



Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003



VTT SYMPOSIUM 231

Avainsanat: biomass, bioenergy, biofuels, wood, energy wood, wood fuels, wood residues, logging residues, wood chips, bark, harvesting, chipping, thinnings, mixed fuels, crushing, transportation, storage, quality control, processing, fuel supply, energy production, co-combustion, environmental impacts, stoves, boilers, firewood, emissions

Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003

Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari
Jyväskylä 17.–18. maaliskuuta 2004

Toimittaja
Eija Alakangas & Niina Holviala
VTT Prosessit

Seminaarin järjestäjä
VTT Prosessit



ISBN 951-38-6287-9 (nid.)

ISSN 0357-9387 (nid.)

ISBN 951-38-6288-7 (URL:<http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

ISSN 1455-0873 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2004

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland
Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosessit, Koivurannantie 1, PL 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ
puh. vaihde (014) 672 611, faksi (014) 672 598

VTT Processer, Koivurannantie 1, PB 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ
tel. växel (014) 672 611, fax (014) 672 598

VTT Processes, Koivurannantie 1, P.O.Box 1603, FIN-40101 JYVÄSKYLÄ, Finland
phone internat. + 358 14 672 611, fax + 358 14 672 598

Esipuhe

Viisivuotisessa Puuenergian teknologiaohjelmassa alkaa sadonkorjuun aika. Kädessä on ohjelman viimeinen vuosikirja, missä kerrotaan vuonna 2003 käynnissä olleiden projektien tuloksista. Aiemmat vuosikirjat vuosilta 2000, 2001 ja 2002 kattavat aikaisemmin päättyneet projektit. Ohjelmaan osallistui 27 tutkimusyksikköä ja yli 50 yritystä lähes sadassa projektissa, joista noin puolet oli julkisia yliopistojen ja tutkimuslaitosten projekteja ja puolet yritysten tuotekehitysprojekteja. Lisäksi tärkeä osa ohjelmaa olivat kauppa- ja teollisuusministeriön tukemat 28 demonstraatiohanketta, joiden avulla uutta teknologiaa voitiin ottaa viivytyksettä käyttöön.

Teknologian kehittämiskeskus Tekes sijoitti ohjelmaan noin 13 miljoonaa euroa – kokonaispanostus oli noin 42 miljoonaa euroa. Tarkoitus on, että sijoitus kertaantuu yhteiskunnassamme valtiovallan tavoitteiden mukaisesti puuenergian käytössä, lisääntyvänä työllisyytenä konepajateollisuudessa ja polttoaineen hankintaketjuissa sekä myös positiivisina vaikutuksina metsän kasvatuksessa.

Metsähakkeen tuotanto on vahvassa nousussa, ja uudet tuotantojärjestelmät ovat vakiinnuttamassa asemiaan. Metsähakkeen raaka-ainepohja on laajentumassa päätehakkuiden hakkuutähteistä nuorten metsien pienpuuhun ja päätehakkualojen kantomurskeeseen. Tuotantologistiikan osaaminen on lisääntynyt. Kestäviä toimintatapoja metsähakkeen korjuussa on kehitetty ja viety toimijakentälle. Polttoaineen laatu hallitaan entistä paremmin koko hankintaketjussa. Metsähakkeelle on syntynyt luotettavia toimitusorganisaatioita. Puuenergian teknologiaohjelma on ollut osaltaan vaikuttamassa tähän, mutta tärkein osa on ollut alan toimijoilla sekä metsäsektorilla että energiantuotannossa unohtamatta metsänomistajia, metsäkone- ja kuljetusyrittäjiä ja laitevalmistajia.

Suomi on edelläkävijä puuenergiateknologiassa maailmalla. Puuenergian teknologiaohjelmassa tehty kehitystyö tarjoaa mahdollisuuden siirtää tätä osaamista oman maamme rajojen ulkopuolelle sekä suunnittelu- että laitevientinä.

Haluan Tekesin puolesta kiittää ohjelmaan osallistuneita hyvästä työstä, johtoryhmää monipuolisesta ja innostuneesta otteesta ja koordinoinnin vastuuhenkilöitä professori Pentti Hakkilaa, tutkija Kati Veijosta ja tuotepäällikkö Eija Alakangasta antaumuksellisesta ja vaivoja säästelemättömästä paneutumisesta ohjelman luotsaamiseen.

Helmikuussa 2004

Marjatta Aarniala
Teknologian kehittämiskeskus Tekes

Sisällys

Esipuhe	3
<i>Marjatta Aarniala, Tekes</i>	
Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2003	11
<i>Pentti Hakkila, VTT Prosessit</i>	
TUOTANNON SUUNNITTELU JA ORGANISOINTI	
Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä – PUUT28	35
<i>Kari Hillebrand (toim.), VTT Prosessit</i>	
<i>Matti Sirén, Vesa Tanttu, Anssi Ahtikoski, Juha Nurmi, Antti Asikainen, Juha Laitila & Lauri Sikanen, Metsäntutkimuslaitos</i>	
<i>Alpo Ahonen, Oulun yliopisto, Thule-instituutti</i>	
Työsuoritteen määrittäminen hakkuutähteen metsäkuljetuksessa – PUUY22	77
<i>Kaarlo Rieppo, Metsäteho Oy</i>	
TUOTANTOTEKNIikka JA -JÄRJESTELMÄT	
Hakkuutähteen autokuljetuksen kehittäminen tiivistävällä kuormatilaratkaisulla – PUUT40	85
<i>Ismo Tiihonen, Samuli Rinne & Heikki Kaipainen, VTT Prosessit</i>	
Kaksivaiheisen murskaimen jatkokehitys puun energiajakeen tuottamiseksi – PUUY31	95
<i>Ismo Tiihonen, VTT Prosessit</i>	
<i>Juha Korpi, Joutsan Konepalvelu Oy</i>	
Kantopuun korjuu ja metsäpolttoaineiden prosessointi – PUUY36	105
<i>Seppo Paananen, UPM Metsä</i>	
Kantoja itsenäisesti nostava laite – PUUY37	113
<i>Janne Saario, Hykomet Oy</i>	

LAADUNHALLINTA, VASTAANOTTO JA KÄYTTÖ

Metsäteollisuuden vastapainevoimantuotannon tehostaminen – PUUT17 <i>Pekka Ahtila, Teknillinen korkeakoulu</i>	119
Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen – PUUT24 <i>Markku Orjala, Janne Kärki, Heidi Häsä & Anne Suomalainen, VTT Prosessit</i>	139
Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa – PUUT29 <i>Leena Fagernäs, Risto Impola, Raija Rautiainen & Sirke Ajanko, VTT Prosessit</i>	155
Kuorihävikin vähentäminen harvesterihakuussa – PUUT35 <i>Harri Liiri & Antti Asikainen, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus</i> <i>Ari Erkkilä, Heikki Kaipainen & Jouko Aalto, VTT Prosessit</i>	167
Puupolttoaineiden esikäsittelyn kemialliset vaikutukset – PUUT37 <i>Leena Fagernäs, Paterson McKeough & Markku Kallio, VTT Prosessit</i>	185
Puupolttoaineita käyttävän voimalaitoksen käytettävyyden parantaminen polttoainehallinnalla – PUUT38 <i>Janne Kärki, Markku Orjala, Heidi Häsä & Risto Impola, VTT Prosessit</i>	197
Lämpölaitosten polttoaineenkäsittelylaitteiden käytettävyyden parantaminen – PUUT39 <i>Martti Flyktman, VTT Prosessit</i>	217
Puun ja lietteiden yhteispolton vaikutus kattilakorroosioon – PUUY28 <i>Juha Räsänen, Varenso Oy, Energiapalvelut</i> <i>Markku Orjala, VTT Prosessit</i>	225
Puupolttoaineiden online-kosteus- ja laatumittaus – PUUY29 <i>Sauli Jäntti, Teknologikeskus Oy Merinova Ab/Länsi-Suomen osaamiskeskus</i>	237

Irtometsätähteen ja risutukkien vastaanoton ja käsittelyjärjestelmän kehittäminen – PUUY32 243

Antti Nurmi, BMH Wood Technology Oy

Epähomogeenisen biopolttoaineen älykäs syöttö – EBÄS – PUUY40 247

Jari Erkkilä, Tuotekehitys Oy Tamlink

Tero Joronen, Metso Automation Oy

Seppo Lappalainen, Kouvo Automation Oy

Jani Lehto, Kvaerner Power Oy

Marko Nylund, Oy Alholmens Kraft Ab

Esko Saarela, Raumaster Oy

SEURANNAISVAIKUTUKSET JA METSÄTALOUS

Puupolttaineiden radioaktiivisuuden vaikutus tuhkan käyttöön – PUUT23 257

Virve Vetikko, Tuomas Valmari, Marko Oksanen, Aino Rantavaara,

Seppo Klemola & Riitta Hänninen, Säteilyturvakeskus STUK

Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus maanmuokkaukseen ja metsänviljelyyn – PUUT32 275

Veli-Matti Saarinen & Pertti Harstela, Metsäntutkimuslaitos,

Suonenjoen tutkimusasema

Koneellisen energiapuukorjuun laadunseurannan kehittäminen – PUUT36 289

Tage Fredriksson & Olli Äijälä, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio

KANSAINVÄLISET PROJEKTIT

Teknologiasiirto biopolttaineiden tuotannossa USA:n ja Suomen välillä – PUUT27 307

Arvo Leinonen, VTT Prosessit

Maximum biomass use and efficiency in large-scale cofiring – PUUT31 317

Pasi Vainikka, Raili Taipale, Kari Hillebrand, Pertti Frilander &

Teuvo Paappanen, VTT Prosessit

PIENTUOTANTO JA -KÄYTTÖ

Puupolttoaineiden jakelu, käsittely ja laadun parantaminen pienkäytössä – PUUT30	345
<i>Ari Erkkilä, Kari Hillebrand, Tapio Ranta, Markku Kallio & Heikki Oravainen, VTT Prosessit</i>	
<i>Harri Liiri & Antti Asikainen, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus</i>	
Metsähakkeen ja pilkkeiden asiakaslähtöinen verkkokauppa ja logistiikka – PUUT34	361
<i>Lauri Sikanen, Timo Tahvanainen & Harri Liiri, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus</i>	
Hakkeen kuivaus osana lämpöyrittäjyyttä – PUUT41	381
<i>Jukka Yrjölä, Satakunnan ammattikorkeakoulu</i>	
Muuratut tulisijat 2001– PUUT43	387
<i>Reijo Karvinen, Tampereen teknillinen yliopisto</i>	
<i>Heikki Hyytiäinen, Tulisydän Oy</i>	
Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät – PUUT44	389
<i>Antti Asikainen Juha Laitila & Jari Lindblad, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus</i>	
<i>Matti Sirén & Jani Heikkilä, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus</i>	
<i>Vesa Tanttu, Työtehoseura</i>	
Puupelletin laadunhallinta pienjakelussa ja käsittelyssä – PUUY27	395
<i>Seppo Tuomi, Työtehoseura ry</i>	
Pilkkeen tuotantoprosessin hallinta ja kehittäminen – PUUY30	403
<i>Aki Jouhiahho, Jyrki Kouki, Kalle Kärhä, Arto Mutikainen, Esko Oksanen & Anne Seppänen, Työtehoseura ry</i>	
Uusi tulipesä – PUUY43	419
<i>Ilkka Paatero, Kerman Savi Oy</i>	
Puun pelletoinnin pienlinjan kehittämien – PUUY45	423
<i>Jari Muona, JPK-Tuote Oy</i>	

Uuden sukupolven saunakiuas – PUUY33

Pertti Harvia, Harvia Oy

Pienkattilan leijupolttotekniikkakeksinnön kehittäminen yritystoiminnaksi
– PUUY35

Kari Hämäläinen, New Fire Oy

Bioenergian logistiikan kehittäminen – PUUY38

Sampo Humalainen, JST-Kone Oy

Pieni vibrahakekeskus – PUUY41

Vilho Widing, Lava ja huolto Heinonen Oy

Briketin polttojalustan kehittäminen – PUUY42

Esko Hukka, PTI-Metalli Oy

Puupolttoaineen puhdas palaminen pientulisijassa – PUUY44

Jari Valtonen, Narvi Oy

Palax Power 100 -puunpilkontakone – PUUY46

Anssi Koski, Ylistaron Terästäkomo Oy

Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2003

Pentti Hakkila
VTT Prosessit
PL 1601, 02044 VTT
Puh. (0400) 208 789, faksi (09) 460 493
E-mail: pentti.hakkila@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Wood Energy Technology Programme in 1999–2003

Tekes, the National Technology Agency in Finland, established in 1999 the Wood Energy Technology Programme to develop efficient technology for large-scale production of forest chips from residual forest biomass such as small-sized trees from early thinnings and logging residues and stump and root wood from final fellings. The five-year programme was completed in spring 2004.

The programme was coordinated by VTT Processes. It was composed of 46 industrial or product development projects, 44 research projects, and 28 demonstration projects. The total expenditure was about 42 M€.

The programme, although it was basically national, participated in international cooperation within organisations such as ALTENER Bioenergy Network – EUBIONET, OPET (Organisations for the Promotion of Energy Technologies) of EU, and Task 31 (Conventional Forestry Systems for Sustainable Production of Bioenergy) of the IEA Bioenergy Agreement, and bilaterally at project level.

A 52-page interim report of the programme, including the list of projects, was published earlier in English as Technology Programme Report 5/2003 of Tekes. An English version of the final report will appear during the first half of 2004.

1. Tilanne ennen ohjelman käynnistymistä

Tekes toteutti vuosina 1993–1998 kuusivuotisen Bioenergian tutkimusohjelman. Tavoitteena oli lisätä bioenergian käyttöä parantamalla turve- ja puupolttoaineiden kilpailukykyä kehittämällä uusia polttoaineita ja bioenergiatekniikkaa. Kun maailmanlaajuisestikin mittava ohjelma päättyi, voitiin todeta, että

- bioenergian mahdollisuudet oli tiedostettu ja tunnustettu laajoissa kansalais- ja poliittisissa piireissä sekä yritysmaailmassa.
- bioenergian tuotanto- ja käyttöteknologiat olivat kehittyneet ja käyttömäärät lähteneet kasvuun.
- suomalainen bioenergiatutkimus ja -tekniikka olivat tulleet kansainvälisesti tunnetuiksi, ja Suomi oli noussut Ruotsin rinnalle edelläkävijämaaksi.

Vuonna 1997 oli laadittu Kioton ilmastopöytäkirja, joka sitouttaa allekirjoittavat teollistuneet maat rajoittamaan kasvihuonekaasupäästöjään. Siltä pohjalta EU oli asettanut tavoitteekseen 8 %:n vähennyksen vuoden 1990 päästötasolla vuosiin 2008–2012 mennessä. Suomen kansalliseksi velvoitteeksi kaavailtiin päästöjen palauttamista vuoden 1990 tasolle, mutta mitään kansallista ohjelmaa ei ollut vielä olemassa.

Bioenergian tutkimusohjelman laaja aihekokonaisuus sisälsi toisaalta sekä puun että turpeen, ja toisaalta polttoaineen tuotannon, käytön ja jalostuksen. Puolet kokonaisrahoituksesta kohdistettiin puupolttoaineiden tuotantoon. Ohjelman kalliutuessa kohti loppuaan eri osapuolet esittivät toivomuksen nimenomaan puupolttoaineiden tuotantoa koskevan tutkimus- ja kehitystyön jatkamisesta. Erityisesti metsäteollisuus ja sitä lähellä toimivat yritykset olivat ryhtyneet suunnittelemaan puupolttoaineiden käytön lisäämistä. Myös energiayritysten kiinnostus oli herännyt.

2. Ohjelman tehtäväkenttä

Syksyllä 1998 Tekes ryhtyi kokoamaan Bioenergian tutkimusohjelman jatkoksi Puuenergian teknologiaohjelmaa, joka oli päätetty keskittää suurimittaisen tuotantoteknologian kehittämiseen metsähakkeelle. Ohjelman suunnittelutehtävä

annettiin VTT Energialle, joka ehdotusta laatiessaan oli tiiviissä kosketuksessa alan yrityksiin.

Lähtökohtana oli, että metsistämme on teknisesti korjattavissa 10–15 milj. m³ (2–3 Mtoe) markkinakelvotonta biomassaa, ja että sitä käyttämään sopiva lämpö- ja voimalaitoskapasiteetti oli nopeasti kasvamassa. Pullonkaulaksi oli yhä selvemmin jäämässä käyttökapasiteetin sijasta tuotantokapasiteetti. Sitä varten haluttiin keskittyä tuotantoteknologian kehittämiseen tavoitteena kustannusten alentaminen, toimitusvarmuuden luominen sekä polttoaineen laadun kohentaminen.

Ohjelma asetti itselleen myös epävirallisen määrätavoitteen: metsähakkeen käytön nostaminen vuoden 1998 arvioidulta 0,5 milj. m³:n tasolta viidessä vuodessa viisinkertaiseksi eli 2,5 milj. m³:iin vuonna 2003. Metsähakkeen lisäksi ohjelman aihepiiriin sisällytettiin myös metsäteollisuuden kiinteät polttoainesivutuotteet, ei kuitenkaan tuotantoteknologian, vaan ainoastaan laadun parantamisen näkökulmasta. Ensisijaisesti oli kysymyksessä kuori, jota käytetään polttoaineksi 8–9 milj. m³ vuodessa, mutta jonka energiapotentiaalin hyödyntäminen on hävikin ja korkean kosteuden johdosta tehotonta.

Aihepiiri rajattiin tietoisesti suppeaksi, jotta voimavarat ja keihäänkärki voitiin kohdistaa tuotantoteknologian kannalta kriittisiin avainongelmiin. Ulkopuolelle jäivät muun muassa metsähakkeen tuotantoon liittyvä ekologinen tutkimus sekä pienimittainen tuotanto ja käyttö. Ne nähtiin kokonaisuuden kannalta kyllä oleelliseksi, mutta niiden katsottiin luonteensa ja tutkimusperinteen vuoksi soveltuvan paremmin maa- ja metsätalousministeriön kuin kauppaa- ja teollisuusministeriön alaisuuteen. Sitä kautta ei tutkimusta kuitenkaan juurikaan virinnyt ja välimaastoon jäi tyhjiöitä. Puuenergian teknologiaohjelmaan lisättiin vuonna 2002 erillinen puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön panostusalue.

Ohjelman jo käynnistettyä kauppaa- ja teollisuusministeriö julkaisi uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman, jossa metsähakkeen käyttötavoitteeksi asetettiin 5 milj. m³ vuonna 2010. Myöhemmin sama tavoite sisällytettiin myös kansalliseen metsäohjelmaan ja kansalliseen ilmastostrategiaan.

3. Ohjelman toiminta

Tekesin puolesta ohjelmaa johtivat teknologia-asiantuntijat Marjatta Aarniala ja Mauri Marjaniemi. Koordinoinnista vastasi VTT Energia, myöhemmin VTT Prosessit. Mukana oli kaikkiaan 53 yritystä ja 27 tutkimusyksikköä. Kokonaislaajuus oli noin 42 M€.

Ohjelmaa ohjasi johtoryhmä puheenjohtajanaan toimitusjohtaja Pekka Laurila ja sihteerinään tutkija Kati Veijonen. Johtoryhmässä oli mukana kahdeksan yritystä, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Koneyrittäjien liitto, kauppa- ja teollisuusministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, Tekes sekä koordinaattori VTT Prosessit. Johtoryhmän kokoonpano vuoden 2004 alussa selviää liitteestä 1.

Ohjelma koostui hankkeista, joita oli yhteensä 118. Tekesin rahoittamat hankkeet jakaantuivat tuotekehitys- eli yrityshankkeisiin ja julkisiin tutkimushankkeisiin. Yritykset ja tutkimuslaitokset tekivät hankkeissa läheistä yhteistyötä, ja tutkimushankkeitten johtoryhmässä oli aina vahva yritysedustus. Seuraavassa taulukossa hankkeet on ryhmitelty aihepiirinsä mukaan.

Taulukko 1. Hankkeet aihepiireittäin.

Aiheryhmä	Tutkimus- hankkeet	Yritys- hankkeet
Tuotannon suunnittelu ja organisointi	5	4
Tuotantojärjestelmät ja -tekniikka	6	17
Laadunhallinta, vastaanotto ja käyttö	14	10
Seurannaisvaikutukset ja metsätalous	7	1
Pientuotanto ja -käyttö	7	13
Kansainväliset hankkeet	5	1
Yhteensä	44	46

Yllämainittujen Tekesin rahoitusta saaneiden hankkeiden ohella kauppa- ja teollisuusministeriö rahoitti 28 demonstraatiohanketta, joilla edistettiin uuden teknologian käyttöönottoa metsähakkeen tuotannossa. Johtoryhmä rahoitti lisäksi 13 selvitystä ja koostetta, joita pidettiin tärkeinä kehityksen seurannan ja ohjelman suuntaamisen kannalta. Joukossa oli myös kaksi metsähakkeen tuotantoon liittyvää opasta. Hankkeet on lueteltu liitteessä 2.

Ohjelmaan liittyi vahva viestintäosuus, josta vastasi tuotepäällikkö Eija Alakan-gas, VTT Prosessit. Koska aihepiirinä oli metsähakkeen suurimittainen tuotanto, viestintä suunnattiin ensisijaisesti alan toimijoille eikä niinkään suurelle yleisölle. Tärkeä osa viestintää muodostui seminaareista, joissa painopiste oli tutkimus-tuloksissa ja uuden tuotantoteknologian käyttöönotossa. Seminaareja järjestettiin vuosittain kaksi lukuun ottamatta vuotta 2003. Tuolloin ei ohjelmaan enää otettu uusia tutkimushankkeita, minkä vuoksi tutkijaseminaaria ei myöskään tarvittu, ja vuosiseminaari yhdistettiin päätösseminariin. Niiden sijaan järjestettiin tutki-joille tarkoitettu polttopuun kuivausseminaari sekä puupolttoaineitten pientuo-tannon ja käytön panostusalueeseen liittynyt seminaari Teknologiaa ja liiketoi-mintaa puupolttoaineista.

Tuloksista esitelmöitiin lukuisissa koti- ja ulkomaisissa tilaisuuksissa, mm. oma sessio Bioenergy 2003 -konferenssissa, ja niistä kirjoitettiin runsaasti artikkeleita alan ammattilehtiin. Tuloksia valituista aihekokonaisuuksista esiteltiin myös case-korteilla ja tutustumiskäynneillä metsäkohteisiin.

Tulosten keskeisenä julkaisuforumina oli vuosikirja, joissa ilmestyi kaikkiaan 140 raporttia ja tilannekatsausta. Tutkimushankkeiden loppuraportit ilmestyivät yleensä asianomaisten laitosten omissa julkaisusarjoissa. Koko ohjelmasta jul-kaistiin Tekesin sarjoissa englanninkielinen väliraportti tammikuussa 2003 ja suomenkielinen loppuraportti maaliskuussa 2004. Viimeksi mainitussa on myös luettelo ohjelman tärkeimmistä julkaisuista.

4. Tilanne keväällä 2004

On ollut tapana, että ohjelmapäällikkö esittää vuosikirjassa tilannekatsauksen kehityksestä metsähakerintamalla. Tämä viimeinen vuosikirja julkistetaan kui-tenkin ohjelman päätösseminaarissa, jolloin samassa yhteydessä ilmestyy ohjel-man loppuraportti. Se on synteesi ohjelmakokonaisuudesta ja kattava selvitys metsähakkeen tuotannon ja käytön nykytilanteesta.

Tarpeettoman toiston välttämiseksi tilannekatsaus on kirjoitettu tässä lyhyen kaavan mukaan:

- Metsäenergia on saavuttanut kaikkien osapuolten lähes varauksettoman hyväksynnän. Sen takana ovat valtio, kunnat, metsäteollisuus, metsänomistajat järjestöineen, ympäristöjärjestöt, energiayritykset, konepajateollisuus ja poliittiset päätöksentekijät.
- Metsähakkeen tuotanto ja käyttö kasvavat 300 000–400 000 m³:n vuosivauhdilla. Ennakoarvio vuoden 2003 käytöstä on 2,1 milj. m³. Ohjelman itselleen asettama 2,5 milj. m³:n määrätavoite savutettaneen vuoden viiveellä. Todennettu virallinen tilastotieto vuoden 2003 käytöstä saadaan huhtikuussa 2004.
- Energia- ja ilmastostrategioissa asetettu virallinen 5 milj. m³:n käyttötavoite vuodelle 2010 edellyttää, että metsähakkeen käyttö kasvaa koko kuluvan vuosikymmenen ajan 400 000 m³ vuodessa. Käyttövalmius on olemassa sekä asennetasolla että teknisesti, mutta rajoitteeksi saattaa nousta saatavuus.
- Metsähakkeen hinta laitoksella on kääntynyt maltilliseen nousuun kysynnän kasvun myötä. Oltuaan alimmillaan vuonna 2000 keskimäärin 8,6 €/MWh se oli Electrowatt-Ekonon hintatilaston mukaan elokuussa 2003 keskimäärin 10,0 €/MWh. Hinnassa tapahtunut nousu ei vielä mahdollista merkittävän kantorahan maksamista metsänomistajalle, mikä hieman hillitsee leimikoitten tarjontaa.
- Käytön kasvu on voimakkainta metsäteollisuuden yhteistuotantolaitoksissa. Niukkuus kohdistuu ensimmäiseksi yhdyskuntien suuriin laitoksiin.
- Kasvu on ollut toistaiseksi pitkälti hakkuutähdehakkeen varassa. Vuodesta 1995 lähtien pienpuuhakkeen käyttö laitoksilla on kasvanut 1,6-kertaiseksi, mutta hakkuutähdehakkeen käyttö 16-kertaiseksi. Raaka-ainepohja on kuitenkin laajenemassa, ja esimerkiksi Biowatti panostaa vahvasti pienpuuhakkeen ja UPM kantomurskeen tuotantoteknologian kehittämiseen ja tuotantomäärien lisäykseen.

- Metsähakkeen tuotanto on koneellistettu. Metsäkone- ja kuljetusyrittäjien toimialalla kasvunäkymät ovat metsähakkeella lupaavammat kuin ainespuulla. Koneyrittäjät ovat kehittäneet valmiuksiaan suurimittaiseen tuotantoon. Alan kannattavuus ei ole kuitenkaan noussut toivotulle tasolle, mikä hidastaa uusien yrittäjien tuloa alalle.
- Metsätalous on hiljalleen mukautumassa tuottamaan energiapuuta, joka aikaisemmin miellettiin vain arvottomaksi jäännöseräksi. Metsähakkeen käyttöä ja hintakehitystä on ryhdytty seuraamaan metsätilastoissa ainespuun tavoin, energiapuun liittämistä metsätalouden suunnittelukäytäntöön selvittämään, metsähakkeen tuotannolle on laadittu hyvän metsänhoidon ohjeet, korjuujälkeä ryhdytään seuraamaan ainespuun tavoin, metsähakkeen kertymä ja hankintakustannukset osataan arvioida varsin tarkkaan ja tähteitten otto-oikeus liittyy jo lähes automaattisesti ainespuukaupan yhteydessä sovittaviin asiakointiin. Mittaus on risutukkeja lukuun ottamatta kuitenkin edelleen ongelma, eikä metsähake kuulu vielä puutavaran mittauslain piiriin.
- Kantorahan vähäisyydestä huolimatta pääosa metsänomistajista on valmis luopumaan metsähakkeen raaka-aineesta nykyisillä kauppaeidoilla, koska he katsovat hyötyjen joka tapauksessa ylittävän ravinnemenetyksiin mahdollisesti liittyvät haitat. Osa metsänomistajista edellyttää kuitenkin korkeampaa kantorahaa.
- Metsähakkeen tuotanto-organisaatiot ovat kehittyneet ripeästi. Tuotantologistiikka, polttoaineen laadun hallinta, koneitten tekninen ja operatiivinen käyttöaste sekä henkilökunnan ammattitaito ovat kehittyneet kokemuksen kautta.
- Tuotantojärjestelmät ovat hioutuneet ja toimitusten luotettavuus on kasvanut. Todellinen konkarinaskel on ollut käyttöpaikkahaketuksen läpimurto, jonka teki mahdolliseksi risutukkipaalaimen käyttöönotto. Vaikka risutukkiteknologia on ollut käytössä tuskin kolmea vuotta, se on jo ehtinyt osoittautua ylivertaiseksi suurtuotannon prosessinhallinnan välineeksi. Vuonna 2004 sen osuus kaupallisen metsähakkeen tuotannosta nousee jo neljännekseen. Käyttöpaikkamurskaimet ovat avanneet mahdollisuuden myös juurakoitten hyödyntämiselle energialähteenä, ja kantomurskeesta onkin tullut mittava ja käyttäjien kiittämä metsäenergian lähde. Käyttöpaikkahaketus ei kuitenkaan sovi kaikkeen, varsinkaan pienimittaiseen toimintaan.

Alan tutkimuskapasiteetti on vahvistunut edelleen sekä määrällisesti että taidollisesti. Tutkijoiden verkottuminen keskenään ja yritysmaailman kanssa on edistynyt hanketyöskentelyn puitteissa Tekesin tavoitteitten mukaisesti.

5. Puuenergian teknologiaohjelman päättyminen

Puuenergian teknologiaohjelma suunniteltiin viisivuotiseksi ajanjaksolle 1999–2003. Hanke-esitysten tulva alkoi ehtyä vuonna 2002, jonka päätyttyä ohjelmaan ei ole enää hyväksytty uusia tutkimushankkeita. Poikkeuksena on kuitenkin vasta vuonna 2002 mukaan otettu puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön panostusalue.

Ohjelma käynnistyi keväällä 1999 muutaman kuukauden alkuperäisestä aikataulustaan myöhässä, ja vastaavasti se jatkuu vuoden 2004 kesäkuun loppuun saakka. Kulminaatiopisteenä on päätösseminaari 17.–18.3.2004 Jyväskylässä. Seminaarin jälkeen ohjelmaan sisältyy vielä muun muassa seuraavat toimet:

- Keskeneneräiset tutkimushankkeet saatetaan päätökseen.
- Erillisellä pientuotannon ja -käytön panostusalueella toiminta jatkuu ennallaan ainakin vuoden 2004 loppuun saakka.
- Vuoden 2004 aikana ohjelman toimesta järjestetään vielä seminaarit seuraavista aiheista: puupolttoaineiden pientuotanto ja -käyttö; metsähakkeen tuotanto nuorista harvennusmetsistä; polttoaineiden vastaanotto ja käsittely laitoksella.
- Ohjelman loppuraportista tehdään ulkomaiselle lukijakunnalle englanninkielinen versio. Lisäksi laaditaan yhteistyössä Växjön yliopiston kanssa julkaisu, jossa vertaillaan metsähakkeen tuotantoa ja käyttöä Ruotsissa ja Suomessa.
- Gaia Groupin toimesta tehtävä ohjelman arviointi, joka käynnistyi vuoden 2003 lopulla, saatetaan päätökseen keväällä 2004.

Tekes on antanut Puuenergian teknologiaohjelmalle korkean prioriteettiaseman ja varauksettoman taustatuen. Tuki puuenergian tutkimus- ja kehitystyölle jatkuu ohjelman päättymisestä huolimatta. Sekä yritys- että tutkimushankkeita on mahdollisuus käynnistää myös tulevaisuudessa, vaikka ohjelman luoma sateenvarjo jäisikin puuttumaan. Todennäköistä on, että sateenvarjo tulee löytymään vielä määrittämättömästä, ilmeisesti nykyistä laajemmasta uudesta ohjelmakokonaisuudesta.

Liite 1

Ohjelman johtoryhmän kokoonpano 2003

Biowatti Oy

Pekka Laurila, puh.joht

Revontulentie 8 A, 02100 Espoo

Puh. 010 465 8210, faksi 010 469 4298

E-mail: pekka.laurila@biowatti.fi

Teknologian kehittämiskeskus

Marjatta Aarniala

PL 69, 00101 Helsinki

Puh. 010 521 5736, faksi 010 521 5905

E-mail: marjatta.aarniala@tekes.fi

KTM Energiaosasto

Mika Anttonen

PL 37, 00131 Helsinki

Puh. 09 1606 4815, faksi 09 1606 3997

E-mail: mika.anttonen@ktm.fi

Teknologian kehittämiskeskus

Mauri Marjaniemi

PL 44, 40101 Jyväskylä

Puh. 010 521 5224, faksi 010 521 5229

E-mail: mauri.marjaniemi@tekes.fi

Fortum Power and Heat Oy

Kyösti Rannila

PL 382, 40101 Jyväskylä

Puh. 010 454 5111, faksi 014 273 913

E-mail: kyosti.rannila@fortum.com

BMH Wood Technology

Antti Nurmi

PL 32, 26101 Rauma

Puh. 02 831 5236, faksi 02 822 1327

E-mail: antti.nurmi@bmh.fi

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio

Tage Fredriksson

Soidinkuja 4, 00700 Helsinki

Puh. 09 156 2247, faksi 09 156 2232

E-mail: tage.fredriksson@tapio.fi

Vapo Oy

Timo Nyrönen

PL 22, 40101 Jyväskylä

Puh. 014 623 5760, faksi 014 623 5622

E-mail: timo.nyronen@vapo.fi

Maa- ja metsätalousministeriö

Matti Heikurainen

PL 232, 00171 Helsinki

Puh. 09 160 3359, faksi 09 160 2400

E-mail: matti.heikurainen@mmm.fi

UPM Metsä

Seppo Paananen, varapj.

PL 32, 37601 Valkeakoski

Puh. 0204 163 818, faksi 0204 16120

E-mail:

seppo.paananen@upm-kymmene.com

Koneyrittäjien liitto ry

Simo Jaakkola

Sitratie 7, 00420 Helsinki

Puh. 09 5660 0114, faksi 09 5630 329

E-mail: simo.jaakkola@koneyrittajat.fi

Pohjolan Voima Oy

Juha Poikola

PL 40, 00101 Helsinki

Puh. 09 693 061, faksi 09 6930 6555

E-mail: juha.poikola@pvo.fi

Kvaerner Power
Matti Rautanen
PL 109, 33101 Tampere
Puh. 020 141 2430, faksi 020 141 2234
E-mail:
matti.rautanen@akerkvaerner.com

Plustech Oy/Timberjack
Arto Timperi
PL 306, 33101 Tampere
Puh. 0205 846 818, faksi 0205 806 849
E-mail: arto.timperi@fi.timberjack.com

VTT Prosessit, *ohjelmapäällikkö*
Pentti Hakkila
PL 1601, 02044 VTT
Puh. 0400 208 789, 09 456 6672,
faksi 09 460 493
E-mail: pentti.hakkila@vtt.fi

VTT Prosessit, *sihteeri*
Kati Veijonen
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. 014 672 709, faksi 014 672 597
E-mail: kati.veijonen@vtt.fi

Puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön ohjausryhmä 2003–2004

Joensuun seudun kehittämissyhtiö
Josek Oy
Keijo Mutanen, pj
Länsikatu 15, 80110 Joensuu
Puh. 013 263 7294, faksi 013.263 7299
E-mail: keijo.mutanen@josek.fi

Farmer Oy
Ari Koskivaara
Torikatu 3 A, 00700 Helsinki
Puh. 09 348 9590, faksi 09 348 9540
E-mail: ari.koskivaara@farmer.fi

Finpro
Veli-Matti Kajova
PL 358, 00181 Helsinki
Puh. 0204 6951, faksi 0204 695 200
E-mail: veli-matti.kajova@finpro.fi

HT Engineering
Hannu Teiskonen
PL 120, 42701 Keuruu
Puh. 014 774 511, faksi 014 732 211
E-mail: hannu.teiskonen@htlaser.fi

Junkkari Oy
Marko Sipola
PL 22, 62375 Ylihärmä
Puh. 06 483 5111, faksi 06 4846 401
E-mail:
marko.sipola@mako-junkkari.fi

Jyväskylän Teknologikeskus Oy/
Keski-Suomen Energiatoimisto
Mikko Ahonen
PL 27, 40101 Jyväskylä
Puh. 014 4451 123, faksi 014 4451 199
E-mail: mikko.ahonen@jsp.fi

Maaselän Kone Oy
Jari Löfroos
Rajakatu 25, 85800 Haapajärvi
Puh. 08 772 7300, faksi 08 772 7320
E-mail: jari.lofroos(at)maaselankone.fi

Motiva Oy
Osmo Nojonen
PL 489, 00101 Helsinki
Puh. 09 8565 3100, faksi 09 8565 3199
E-mail: osmo.nojonen@motiva.fi

Rakennustempo Oy
Ari Kaikkonen
Tempontie 8, 80330 Reijola
Puh. 013 272 820, faksi 013 272 8232
E-mail:
ari.kaikkonen@rakennustempo.fi

Teknologian kehittämiskeskus
Marjatta Aarniala
PL 69, 00101 Helsinki
Puh. 010 521 5736, faksi 010 521 5905
E-mail: marjatta.aarniala@tekes.fi

Teknologian kehittämiskeskus
Mauri Marjaniemi
PL 44, 40101 Jyväskylä
Puh. 014 410 4600, faksi 014 652 560
E-mail: mauri.marjaniemi@tekes.fi

Veljekset Ala-Talkkari
Antti Ala-Talkkari
Hellanmaantie 619, 62130 Hellanmaa
Puh. 06 433 6333, faksi 06 433 6363
E-mail:
antti.ala-talkkari@ala-talkkari.fi

VTT Prosessit
Kati Veijonen
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. 014 672 709, faksi 014 672 597
E-mail: kati.veijonen@vtt.fi

VTT Prosessit
Pentti Hakkila
PL 1601, 02044 VTT
Puh. 09 456 6672, faksi 09 460 493
E-mail: pentti.hakkila@vtt.fi

Liite 2

Puuenergian teknologiaohjelman projektit

TUOTANNON SUUNNITTELU JA ORGANISOINTI

PUUT01 Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavaisen hankinnan logistiikka (P)

Antti Asikainen

Metsäntutkimuslaitos

Joensuun tutkimusasema

E-mail: antti.asikainen@metla.fi

PUUT02 Energiapuun hankinnan organisointi muun puunhankinnan yhteydessä (P)

Pekka Mäkinen

Metsäntutkimuslaitos

Vantaan tutkimusasema

E-mail: pekka.makinen@metla.fi

PUUT03 Energiapuun tilavuuden estimointi harvesterin tietojärjestelmässä (P)

Pertti Harstela

Joensuun yliopisto

E-mail: pertti.harstela@joensuu.fi

PUUT04 Ensiharvennusten korjuuolot, niiden vaikutus korjuumenetelmien kokonaistalouteen ja parantamismahdollisuudet (P)

Matti Sirén

Metsäntutkimuslaitos

Vantaan tutkimusasema

E-mail: matti.siren@metla.fi

TUOTANTOTEKNIikka JA -JÄRJESTELMÄT

PUUT05 Seospolttoaineiden tuotanto terminaalilla – hankekokonaisuus (P)

PUUT28 Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä

Kari Hillebrand

VTT Prosessit

E-mail: kari.hillebrand@vtt.fi

PUUY11 Aines- ja energiapuun välinen rajanveto (P)

Hannu Kivelä

Jaakko Pöyry Oy

E-mail: hannu.kivela@poyry.fi

PUUY15 Tutkimus- ja demonstraatiohanke yrittäjäverkostosta hakkeen tuottamisessa (P)

Tomi Salo/Simo Jaakkola

Koneyrittäjien liitto ry

E-mail: tomi.salo@koneyrittajat.fi

PUUY22 Työsuoritteiden määrittäminen hakkuutähdehän metsäkuljetuksessa (P)

Kaarlo Rieppo

Metsäteho Oy

E-mail: kaarlo.rieppo@metsateho.fi

PUUY23 Verkkoliiketoiminnan mahdollisuudet Suomen energiapuumarkkinoilla (P)

Petri Vasara

JP Management Consulting (Europe) Oy

E-mail: petri.vasara@poyry.fi

Arvo Leinonen

VTT Prosessit

E-mail: arvo.leinonen@vtt.fi

PUUT12 Kaksivaiheisen murskaimen kehittäminen puun energijakeen tuottamiseksi (P)

Arvo Leinonen

VTT Prosessit

E-mail: arvo.leinonen@vtt.fi

PUUT13 Hakkeen hankinnan työvaiheiden kehittäminen, lähikuljetus ja hakkeen varastointi (P)

Teuvo Rasimus

Savonlinnan ammatillinen aikuiskoulutuskeskus

E-mail: teu-

vo.rasimus@akk.savonlinna.fi

PUUT18 Puupolttoaineen laadun ja tuotantotehokkuuden parantaminen haketus- ja murskaustekniikkaa kehittämällä (P)

Veli Seppänen

VTT Prosessit

E-mail: veli.seppanen@vtt.fi

PUUT20 Hakkeen autokuljetuksen logistiikka (P)

Ismo Tiihonen

VTT Prosessit

E-mail: ismo.tiihonen@vtt.fi

PUUT40 Hakkuutähteen autokuljetuksen kehittäminen tiivistävällä kuormatilaratkaisulla

Ismo Tiihonen

VTT Prosessit

E-mail: ismo.tiihonen@vtt.fi

PUUY01 Menetelmä nuorten metsien harvennukseen (P)

Jarmo Hämäläinen

Metsäteho Oy

E-mail:

jarmo.hamalainen@metsateho.fi

PUUY02 Käyttöpaikkahakemukseen perustuva puupolttoaineen tuotanto (P)

Antti Korpilahti

Metsäteho Oy

E-mail: antti.korpilahti@metsateho.fi

PUUY03 Teollisten metsähaketusten erikoishakkurin prototyypin kehittäminen (P)

Tommi Lahti

LHM-Hakkuri Oy

E-mail: tommi.lahti@energiat.inet.fi

PUUY04 Hakkuutähteen käyttöpaikkamurskaukseen perustuva tuotantomenetelmä (P)

Seppo Paananen

UPM Metsä

E-mail: seppo.paananen@

upm-kymmene.com

PUUY05 Traktorikäyttöinen rumpuhakkuri hakkuutähteelle (P)

Ari Melkko

Heinolan Sahakoneet Oyj

E-mail: ari.melkko@heinolasm.fi

PUUY06 Terminaalihakkeen tuotantotekniikka (P)

Jaakko Silpola

Vapo Oy

E-mail: jaakko.silpola@vapo.fi

PUUY07 Puupolttoaineklinikka (P)

Dan Asplund

Jyväskylän Teknologikeskus Oy

E-mail: dan.asplund@jisp.fi

PUUY12 Metsien biomassan nostaminen todelliseksi uusiutuvan energian vaihtoehdoksi, yritysryhmähanke (P)

Arto Timperi

Timberjack Oy

E-mail: arto.timperi@fi.timberjack.com

PUUY13 Metsäenergiakeruukoneen kehitys ja koelaittevalmistus (P)

Sakari Pinomäki

Sakari Pinomäki Ky
E-mail: sakari.pinomaki@spinomaki.fi

PUUY14 Hakkuutähteen kuljetuksen
täysperävaunun yhdistelmä (P)

Jaakko Silpola
Vapo Oy Energia
E-mail: jaakko.silpola@vapo.fi

PUUY16 Hakkuutähteen tiivistykseen
perustuvan niputuslaitteiston
kehittäminen (P)

Fredrik Pressler
Biowatti Oy
E-mail: fredrik.pressler@metsaliitto.fi

PUUY18 Haketta tuottavien koneiden
suunnittelu ja valmistus (P)

Jorma Issakainen
Kesla Oyj
E-mail: jorma.issakainen@kesla.inet.fi

PUUY19 Risutukkitekniikka suurimit-
taisessa puupolttoainehankinnassa (P)

Juha Poikola
Pohjolan Voima Oy
E-mail: juha.poikola@pvo.fi

PUUY21 Hakkuutähteen hankinnan ja
maanmuokkauksen yhdistävä
menetelmä (P)

Timo Hartikainen
Joensuun Tiedepuisto Oy
E-mail: timo.hartikainen@carelian.fi

PUUY31 Kaksivaiheisen murskaimen
jatkokehitys puun energijakeen
tuottamiseksi

Heikki Paalanen/Juha Korpi
Joutsan Konepalvelu Oy
E-mail: heikkipa@joutsankp.fi

PUUY36 Kantopuun korjuu ja metsä-
polttoaineiden prosessointi

Seppo Paananen
UPM Metsä

Email: seppo.paananen@
upm-kymmene.com

PUUY37 Kantoja itsenäisesti
nostava laite

Reijo Saario
Hykomet Oy
E-mail: hykomet@hykomet.fi

LAADUNHALLINTA, VASTAANOTTO JA KÄYTTÖ

PUUT06 Ensiharvennuspuun
hyödyntäminen (P)

Raimo Alén
Jyväskylän yliopisto
E-mail: raimo.alen@jyu.fi

PUUT07 Kuorintajätteen käsittely (P)

Risto Impola
VTT Prosessit
E-mail: risto.impola@vtt.fi

PUUT08 Erilaisten korjuuketjujen
tuottaman metsähakkeen käyttö suurten
voimaloiden leijukerroskattiloissa (P)

Markku Orjala
VTT Prosessit
E-mail: markku.orjala@vtt.fi

PUUT09 puupolttoaineiden kuivumiseen ja laadun hallintaan kannolta polttoon (P)
Kari Hillebrand
VTT Prosessit
E-mail: kari.hillebrand@vtt.fi

PUUT15 Mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteiden polttoteknisten ominaisuuksien parantaminen (P)
Raija Rautiainen
VTT Prosessit
E-mail: raija.rautiainen@vtt.fi

PUUT17 Metsäteollisuuden vastapainevoimantuotannon tehostaminen (P)
Pekka Ahtila
Teknillinen korkeakoulu
E-mail: pekka.ahvila@hut.fi

PUUT19 Puupolttoaineille soveltuvat vastaanotto- ja käsittelyjärjestelmät (P)
Risto Impola
VTT Prosessit
E-mail: risto.impola@vtt.fi

PUUT24 Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen (P)
Markku Orjala
VTT Prosessit
E-mail: markku.orjala@vtt.fi

PUUT25 Vaneri- ja lastulevyteollisuuden sivutuotteiden seospolton savukaa-supäästöt – esitutkimus (P)
Raili Vesterinen
VTT Prosessit
E-mail: raili.vesterinen@vtt.fi

PUUT29 Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa (P)
Leena Fagernäs
VTT Prosessit
E-mail: leena.fagernas@vtt.fi

PUUT35 Kuorihävikin vähentäminen harvesterihakkuussa
Antti Asikainen
Metsäntutkimuslaitos
Joensuun tutkimusasema
E-mail: antti.asikainen@metla.fi

PUUT37 Puupolttoaineiden esikäsitteilyn kemialliset vaikutukset
Paterson McKeough
VTT Prosessit
E-mail: paterson.mckeough@vtt.fi

PUUT38 Puupolttoaineita käyttävän voimalaitoksen käytettävyyden parantaminen polttoainehallinnalla
Markku Orjala
VTT Prosessit
E-mail: markku.orjala@vtt.fi

PUUT39 Lämpölaitosten polttoaineen käsittelylaitteiden käytettävyyden parantaminen
Martti Flyktman
VTT Prosessit
E-mail: martti.flyktman@vtt.fi

PUUY08 Kiinteän polttoaineen varastoinnin sekä tasaus-, laadunvarmistus- ja syöttöjärjestelmän kehittäminen (P)
Antti Nurmi
BMH Wood Technology Oyj
E-mail: antti.nurmi@bmh.fi

PUUY09 Ilmanpaineisen CFB-kaasutustekniikan kehittäminen oljelle ja muille agrobiopolttoaineille soveltuvaksi (P)
Matti Hiltunen
Foster Wheeler Energia Oy
E-mail: matti_hiltunen@fwfin.fwc.com

PUUY10 Seospolttoaineiden toimitus, käsittely, sekoittaminen ja syöttö – MF2 (P)

Timo Järvinen

VTT Prosessit

E-mail: timo.jarvinen@vtt.fi

PUUY20 Kehityspuuteohjelma Oy Alholmens Kraft Ab:n biopolttoaineiden tuotantomenetelmien, vastaanoton ja varastoinnin kehittämiseksi sekä polttoprosessin optimoimiseksi (P)

Juha Poikola

Pohjolan Voima Oy

E-mail: juha.poikola@pvo.fi

PUUY24 Syöttösiilopurkaimen kapasiteetin säädön kehittäminen (P)

Esko Saarela

Raumaster Oy

E-mail: esko.saarela@raumaster.fi

PUUY28 Puun ja lietteiden yhteispoltton vaikutus kattilakorroosioon

Ari Frantsi

Stora Enso Publication Papers Oy Ltd

E-mail: ari.frantsi@storaenso.com

PUUY29 Puupolttoaineiden online-kosteus- ja laatumittaus

Sauli Jäntti

Oy Merinova Ab

E-mail: sauli.jantti@merinova.fi

PUUY32 Irtometsätähteen ja risutukkien vastaanoton ja käsittelyjärjestelmän kehittäminen

Antti Nurmi

BMH Wood Technology Oy

E-mail: antti.nurmi@bmh.fi

PUUY40 Epähomogeenisen biopolttoaineen älykäs syöttö

Jari Erkkilä

Tuotekehitys Oy Tamlink

E-mail: jari.erkkila@tamlink.fi

SEURANNAISVAIKUTUKSET JA METSÄTALOUS

PUUT10 Hakkuutähteen korjuun vaikutukset metsän uudistamiseen (P)

Timo Saksa

Metsäntutkimuslaitos

Suonenjoen tutkimusasema

E-mail: timo.saksa@metla.fi

PUUT11 Puuenergiaketjujen ympäristönäkökohtien hankekokonaisuus (P)

Helena Malkki

VTT Prosessit

E-mail: helena.malkki@vtt.fi

PUUT14 Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä (P)

Juha Nurmi

Metsäntutkimuslaitos

E-mail: juha.nurmi@metla.fi

PUUT22 Puuenergian käyttö ja kasvihuonekaasujen rajoittaminen (P)

Sampo Soimakallio

VTT Prosessit

E-mail: sampo.soiimakallio@vtt.fi

PUUT23 Puupolttoaineiden radioaktiivisuuden vaikutus tuhkan käyttöön (P)

Virve Vetikko

Säteilyturvakeskus

E-mail: virve.vetikko@stuk.fi

PUUT32 Hakkuutähteen ja kantojen korjuun vaikutus maanmuokkaukseen ja metsänviljelyyn

Pertti Harstela

Joensuun yliopisto

E-mail: pertti.harstela@joensuu.fi

PUUT36 Koneellisen energiapuunkorjuun laadunseurannan kehittäminen

Tage Fredriksson

Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapio

E-mail: tage.fredriksson@tapio.fi

PUUY17 Suopohjien metsitys hii-
linieluiksi ympäristövaikutukset
halliten (P)
Pirkko Selin
Vapo Oy Energia
E-mail: pirkko.selin@vapo.fi

KANSAINVÄLISET PROJEKTIT

PUUT16 Uusien bioenergiatekniikoi-
den kilpailukyky – IEA/Bioenergy (P)
Yrjö Solantausta
VTT Prosessit
E-mail: yrjo.solantausta@vtt.fi

PUUT21 Biopolttoaineen ja hiilen
seospoltto (P)
Veli-Pekka Heiskanen
VTT Prosessit
E-mail: veli-pekka.heiskanen@vtt.fi

PUUT27 Teknologiasiiroto biopolttoai-
neiden tuotannossa USA:n ja Suomen
välillä (P)
Arvo Leinonen
VTT Prosessit
E-mail: arvo.leinonen@vtt.fi

PUUT31 Maximum biomass use and
efficiency in large-scale cofiring
Anne Suomalainen
VTT Prosessit
E-mail: anne.suomalainen@vtt.fi

PUUT33 EU:n 6. puiteohjelman bio-
energian IP-projektien valmistelu (P)
Kai Sipilä
VTT Prosessit
E-mail: kai.sipila@vtt.fi

PUUY25 Kaukoidän puupolttoaineiden
laadunmäärittäminen (P)
Dan Asplund
Jyväskylän Teknologiateknologikeskus Oy
E-mail: dan.asplund@josp.fi

PIENTUOTANTO JA -KÄYTTÖ

PUUT30 Puupolttoaineiden jakelu,
käsittely ja laadun parantaminen
pienkäytössä
Ari Erkkilä
VTT Prosessit
E-mail: ari.erkkila@vtt.fi

PUUT34 Metsähakkeiden ja pilkkeiden
asiakaslähtöinen verkkokauppa ja
logistiikka
Lauri Sikanen
Metsäntutkimuslaitos
Joensuun tutkimuskeskus
E-mail: lauri.sikanen@metla.fi

PUUT41 Hakkeen kuivaus osana
lämpöyrittäjyyttä
Jukka Yrjölä
Satakunnan ammattikorkeakoulu, Ke-
hittämis- ja palvelukeskus O'Sata
E-mail: jukka.yrjola@samk.fi

PUUT42 Polttopuun kuivaus ja
laadunhallinta
Kari Hillebrand
VTT Prosessit
E-mail: kari.hillebrand@vtt.fi

PUUT43 Muuratut tulisijat 2001
Reijo Karvinen
Tampereen teknillinen yliopisto
E-mail: reijo.karvinen@tut.fi

PUUT44 Karsitun energiapuun korjuu-
vaihtoehdot ja kustannustekijät
Antti Asikainen
Metsäntutkimuslaitos
Joensuun tutkimusasema
E-mail: antti.asikainen@metla.fi

PUUY26 Palax 450 polttopuuprosessori
(P)
Jaakko Viitamäki
Ylistaron Terästakomo Oy
E-mail:
jaakko.viitamaki@terastakomo.com

PUUY27 Puupelletin laadunhallinta
pienjakelussa ja käsittelyssä
Seppo Tuomi
Työtehoseura ry
E-mail: seppo.tuomi@tts.fi

PUUY30 Pilkkeen tuotantoprosessin
hallinta ja kehittäminen
Aki Jouhiaho
Työtehoseura ry
E-mail: aki.jouhiaho@tts.fi

PUUY33 Uuden sukupolven
saunan-kiuas
Pertti Harvia
Harvia Oy
E-mail: pertti.harvia@harvia.fi

PUUY35 Pienkattilan leijupolttotek-
niikkakeksinnön kehittäminen yritys-
toiminnaksi
Kari Hämäläinen
New Fire Oy
E-mail: asiakaspalvelu@newfire.info

PUUY38 Bioenergian logistiikan
kehittäminen
Sampo Humalainen
JST-Kone
E-mail: jst-kone@dlc.fi

PUUY41 Pieni vibrahakekeskus
Vilho Widing
Lava ja Huolto Heinonen Oy
E-mail: lava@jahuoltoky.inet.fi

PUUY42 Priketin polttojalustan
kehittäminen
Esko Hukka
PTI-Metalli Oy
E-mail: esko.hukka@pti-metalli.fi

PUUY43 Uusi tulipesä
Ilkka Paatero
Kerman Savi Oy
E-mail: ilkka.paatero@kermansavi.fi

PUUY44 Puupolttoaineen puhdas
palaminen pientulisijassa
Jari Valtonen
Narvi Oy
E-mail: jari.valtonen@narvi.fi

PUUY45 Puun pelletöinnin pienlinjan
kehittäminen
Anssi Kokkonen
JPK-Tuote Oy
E-mail: anssi.kokkonen@jpk-tuote.fi

PUUY46 Palax Power 100
-puunpilkontakone
Anssi Koski
Ylistaron terästakomo Oy
E-mail: anssi.koski@terastakomo.com

PUUY47 Polttopuun kuivaus ja laadun
hallinta
Jyrki Kouki
Työtehoseura ry.
E-mail: jyrki.kouki@tts.fi

JOHTORYHMÄN RAHOITTAMAT SELVITYKSET

PUUJ01 Hakkuutähdehakkeen korjuun ohjeistaminen (P)

Tage Fredriksson

Puuenergia ry

E-mail: tage.fredriksson@tapio.fi

PUUJ02 Metsähakkeen käyttökartoitus (P)

Pentti Hakkila

VTT Prosessit

E-mail: pentti.hakkila@vtt.fi

PUUJ03 Puuenergian tutkimus- ja kehitystyön sekä käytön asema EU:ssa (P)

Pirkko Vesterinen

VTT Prosessit

E-mail: pirkko.vesterinen@vtt.fi

PUUJ04 Esiselvitys kanto- ja juuripuun polttoainekäytön mahdollisuuksista (P)

Ari Erkkilä

VTT Prosessit

E-mail: ari.erkkila@vtt.fi

PUUJ05 Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käyttötalouteen (P)

Jouni Hämäläinen

VTT Prosessit

E-mail: jouni.hamalainen@vtt.fi

PUUJ06 Pellettien tuotantokustannukset eri laitoskytkennöillä (P)

Martti Flyktman

VTT Prosessit

E-mail: martti.flyktman@vtt.fi

PUUJ07 Polttihakkeen tuotanto nuorisista metsistä. Opas

Tage Fredriksson

Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapio

E-mail: tage.fredriksson@tapio.fi

PUUJ08 Metsähakkeen laatukartoitus (P)

Risto Impola

VTT Prosessit

E-mail: risto.impola@vtt.fi

PUUJ09 Puupolttoaineiden varmuusvarastointi (P)

Arvo Leinonen

VTT Prosessit

E-mail: arvo.leinonen@vtt.fi

PUUJ10 Polttoaineiden kuivatuksen kannattavuus laitoksilla (P)

Martti Flyktman

VTT Prosessit

E-mail: martti.flyktman@vtt.fi

PUUJ11 Metsähake ja metsätalous (P)

Pertti Harstela/Jari Hynynen

Metsäntutkimuslaitos

E-mail: pertti.harstela@metla.fi

PUUJ12 Puupolttoaineiden vastaanoton, käsittelyn ja syöttöjärjestelmien kapeikot ja niiden ratkaisuja (P)

Timo Järvinen

VTT Prosessit

E-mail: timo.jarvinen@vtt.fi

PUUJ13 Bioenergian kilpailuaseman muutokset Euroopassa (P)

Pirkko Vesterinen

VTT Prosessit

E-mail: pirkko.vesterinen@vtt.fi

DEMONSTRAATIO-PROJEKTIT

PUUD1 Hakkuutähteiden lähikuljetusyksikkö ja varastokontti

Savonlinnan ammatillinen aikuiskoulutuskeskus

PUUD2 Irtohakkuutähteen kuljetusauto

Kuljetusliike Hakonen ja Pojat

PUUD3 Hakkuutähteen paalaus kone
Ris-Esset Ab Oy

PUUD4 Metsähakkeen terminaalituo-
tanta
Vapo Oy Energia

PUUD5 GIANT-hakkuri
Kotimaiset Energiat Ky

PUUD6 Rumpuhakkuri TT-1310RML
Tmi Hake-Energia Kari Vainikka

PUUD7 Hakkuutähteen kaukokuljetus
Vapo Oy Energia

PUUD8 Hakkurikonttiautot
Biowatti Oy

PUUD9 Hakkuutähteen paalaus kone
Konepalvelu Hölrin Oy

PUUD10 Rumpuhakkuri TT-1310
RML
Hakeyhtymä Kankaanmäki

PUUD11 Suoraan kaukokuljetusyksik-
köön purkava palstahakkuri
Biowatti Oy

PUUD12 Käyttöpaikkamurskain
Oy Alholmens Kraft Ab

PUUD13 Hakkuutähteen paalaus kone
Tmi Matti Sadeharju

PUUD14 Hakkuutähteen paalaus kone
H & H Ala-Korpi

PUUD15 Hienohakegiant-hakkuri
Kotimaiset Energiat Ky

PUUD16 Hakkuutähteen irtotavaran
tiivistyslaite
Biowatti Oy

PUUD17 Oksanpaalutuskone
Kuljetusliike J. Kakko Ky

PUUD18 Hakkuutähteen paalaus kone
Koneurakointi Viitanen Oy

PUUD19 Energiapuun korjuukone
Koneurakointi Autio Oy

PUUD20 Hakkuutähteen paalaus kone
Mika Ruokola Ky

PUUD21 Hakkuutähteen paalaus kone
ja puukoura
Mika Ruokola Ky

PUUD22 Hakkuutähteen paalaus kone
Forest Vihavainen Ky

PUUD23 Mobile kaksivaihemurskain
Fore Energia Oy

PUUD24 Hakkuutähteiden paalaus kone
Tenho Pulkkinen

PUUD25 Timberjack 12-10 Fiberpac
-paalaaja
Maanrakennus Jouko Laakso Oy

PUUD26 Hakkuutähteen paalaus kone
Timberjack 1490/Fiberpac 370
Mika Ruokola Ky

PUUD27 Hakkuutähteiden paalaus kone
Forest Vihavainen Ky

PUUD28 Hakkuri-konttiautot
Biowatti Oy

PUUD29 Timberjack 1410 D -
hakkuutähdepaalain
Otava Pauli

Tietoa ohjelmasta Internetistä:

[www.tekes.fi/ohjelmat/
puuenergia](http://www.tekes.fi/ohjelmat/puuenergia)

www.tekes.fi/ohjelmat/pienkaytto

englanninkielinen, in English:

[www.tekes.fi/english/programm/
woodenergy](http://www.tekes.fi/english/programm/woodenergy)

T = tutkimuslaitoshanke

Y = yrityshanke

J = johtoryhmän rahoittamat selvitykset

D = demonstraatiohankkeet

P = päättynyt projekti

Tuotannon suunnittelu ja organisointi

Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä – PUUT28

Kari Hillebrand (toim.)
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 597
E-mail: kari.hillebrand@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Development of forest chip production from young forests

There is a huge production potential for forest chips in seedling stands and first-thinning sites. Due to high production costs, the production of these so-called small-wood chips has been so far insignificant. The aim of this research work is to reduce production costs of small-wood chips by studying and developing, i.a. the production of small-wood chips in co-operation with forest owners and forestry associations and the quality improvement of small-wood chips by drying. The work is divided into four sub-projects, which will be carried out in co-operation with VTT, different departments of the Finish Forest Research Institute, The University of Oulu, and producers of small-wood chips.

Tiivistelmä

Taimikoissa ja ensiharvennuskohteissa on suuri metsähakkeen tuotantopotentiaali. Tämän ns. pienpuuhakkeen tuotanto on tällä hetkellä kuitenkin vähäistä, johtuen pienpuuhakkeen korkeista tuotantokustannuksista. Tutkimuksen tavoitteena on alentaa pienpuuhakkeen tuotantokustannuksia tutkimalla ja kehittämällä mm. metsänomistajien ja metsänhoitoyhdistysten yhteistyönä tapahtuvaa pienpuuhakkeen tuotantoa sekä pienpuuhakkeen laadun parantamista kuivauksella.

Tutkimus jakaantuu neljään osaprojektiin, jotka toteutetaan yhteistyössä VTT:n, Metsäntutkimuslaitoksen eri tutkimusyksiköiden, Oulun yliopiston ja pienpuuhakkeen tuottajien kanssa.

1. Tausta

Vuonna 2001 metsähakkeen käyttö energiantuotannossa oli Suomessa 1,3 miljoonaa kiintokuutiometriä, josta hakkuutähteen eli hakkuualalta korjattujen oksien ja latvusten osuus metsähakkeen raaka-aineesta oli lähes 60 %. Nuorista metsistä energiaksi kerättävän pienpuun ja hakkuutähteen määrä on vielä ollut vähäistä. Tämä johtuu nuorista metsistä korjattavan metsähakkeen korkeista tuotantokustannuksista, jotka aiheutuvat poistettavan puuston pienestä runko-koosta, alhaisesta hehtaarikertymästä ja korjuumenetelmien ja -kaluston huonosta soveltuvuudesta tiheiden pieniläpimittaisten puiden korjuuseen.

Energiapuun korjuuseen liittyvää kehittämistyötä on tehty pääasiassa Bioenergia-, Puuenergian ja Harju-tutkimusohjelmissa. Ensiharvennuksissa ainespuun tuotantoon on kehitetty keveitä hakkuukoneita, yhdistelmäkoneita, joukkokäsittelyharvestereita sekä koko- ja osapuun tiivistämistä. Näistä kehitetyistä laitteista myös energiapuun korjuuseen voidaan soveltaa joukkokäsittelyharvesteria ja osa- ja kokopuun tiivistämistä metsäkuljetuksessa. Joukkokäsittelyharvesterissa voidaan kerätä useampi puu samaan kouraan kaadossa ja puut voidaan karsia, katkoa sekä kuormata samalla kertaa.

Nuorista metsistä tuotettavan metsähakkeen tuotantoa on mahdollista kehittää mm. seuraavin keinoin:

- leimikoiden koon kasvattaminen metsänomistajien ja metsänhoitoyhdistysten yhteistyönä,
- energiapuun korjuun kehittäminen pääomaltaan pieniä korjuukoneita käyttäen,
- metsähakkeen laadun parantaminen palstalla tai tienvarsivarastossa tapahtuvalla kuivatuksella,

- neulasiin varastoituneen ravinteiden jätö metsään palstakuivatuksen tai osittaisen karsimisen avulla,
- perustiedon hankinnalla metsähakkeen tuotantokustannuksista ja työllisyysvaikutuksista.

2. Tavoite

Hankekokonaisuuden tavoitteena on nuorista metsistä kerättävän energiapuun korjuukustannusten alentaminen 1 € /MWh:

- kehittämällä metsänhoitoyhdistysten ja metsänomistajien yhteistyötä energiapuun korjuussa,
- kehittämällä tekniikkaa (mm. kuivatus ja osittainen karsinta) neulasten erottamiseksi osa- ja kokopuusta tavoitteena lisätä ravinteiden jäämistä metsään,
- parantamalla hakkeen laatua käyttäen palsta ja -tienvarsivarastokuivatusta,
- kehittämällä järjestelmä, jolla tasataan ja varmistetaan metsähakkeen tuotanto avohakkuualueilta hyödyntämällä nuorista metsistä tapahtuvaa metsähakkeen tuotantoa,
- määrittämällä metsähakkeen tuotantokustannuksiin vaikuttavat tekijät ja
- selvittää metsähakkeen tuotannon työllisyysvaikutukset sekä henkilö- ja laiteresurssitarpeet.

3. Toteutus

Hankekokonaisuus toteutetaan vuosina 2001–2003 yhteistyössä VTT Prosessien, Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun, Vantaan ja Kannuksen tutkimusyksiköiden sekä Oulun yliopiston Thule-instituutin kanssa. Yritysosapuolina hankkeessa ovat mukana Biowatti Oy, Jyväskylän Teknologiakeskus Oy, StoraEnso Oyj, Turveruukki Oy ja UPM-Kymmene Oyj.

Hankekokonaisuus sisältää seuraavat osaprojektit:

1. Energiapuun korjuun tehostaminen nuorista metsistä metsänhoitoyhdistysten ja metsänomistajien yhteistyönä (Metla, Vantaan tutkimuskeskus)
2. Nuorista metsistä kerättävän energiapuun kuivatus ja varastointi (VTT Prosessit & Metla, Kannuksen tutkimusasema)
3. Metsähakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka (Metla, Joensuu tutkimuskeskus)
4. Pienpuuhakkeen ja hakkuutähdehakkeen energiakäytön sosioekonomiset vaikutukset; case-tarkastelu (Oulun yliopisto, Thule-instituutti).

4. Tulokset

Kukin osaprojekti on esitetty omana kokonaisuutena jäljempänä.

Energiapuun korjuun tehostaminen nuorista metsistä -osaprojekti

Matti Sirén, Vesa Tanttu & Anssi Ahtikoski
Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus
PL 18, 01301 Vantaa

Puh. 010 2112 335, faksi 010 2112 203

E-mail: matti.siren@metla.fi, vesa.tanttu@tts.fi, anssi.ahtikoski@metla.fi

1. Tausta

Poistettavien puiden pienestä runkokoosta ja alhaisesta hehtaarikertymästä johtuvat korkeat hakkeen tuotantokustannukset vaikeuttavat nuorten metsien energiapuupotentiaalin hyödyntämistä. Yksittäisellä leimikolla edellytykset tehokkaalle toiminnalle ovat usein huonot. Korjuukustannuksiin ja samalla toiminnan kattavuuteen voidaan vaikuttaa leimikoiden kokoa kasvattamalla.

Ensiharvennusten energiapuun talteenottoa on edistetty metsäkeskusten ja metsänhoitoyhdistysten vetämillä metsätalousalueittaisilla hankkeilla, joissa leimikkokeskityksillä on pyritty parantamaan korjuuoloja. Energiapuun talteenoton ohella tavoitteena on ollut nuorten metsien hoito. Leimikkokeskitykset lisäävät korjuukelpoista energiapuupotentiaalia ja alentavat metsähakkeen hintaa käyttöpäikällä. Leimikkokeskitysten edut olivat nuorissa metsissä suuremmat kuin päätehakuissa. KEMERA-tuet ovat keskeisessä asemassa merkitys nuorten metsien energiapuun talteenotossa.

2. Tavoite

Hankkeessa selvitetään metsäsuunnitelmatietojen ja kyselytutkimuksen avulla metsänomistajien suhtautumista yhteistyöhankkeisiin puuenergian talteenotossa ja verrataan yhteistyön toteutettavissa olevia ja laskennallisia hyötyjä. Vertailtavina ovat toteutettavissa olevat ja laskennalliset korjuuolot, korjuukustannukset ja energiapuupotentiaalit. Metsänomistajien arvioita omien metsiensä energiapuupotentiaalista verrataan metsäsuunnitelmien kertymätietoihin.

Toisaalta KEMERA-tukien merkitystä nuorten metsien energiapuupotentiaalin hyödyntämisessä selvitetään. Eteläsuomalaisissa nuoren kasvatusmetsän KEMERA-kohteissa verrataan energiapuun korjuun kilpailukykyä kokopuuna tai ainespuun korjuuseen integroituna ainespuuharvennukseen. Tarkastelu tehdään metsänomistajan näkökulmasta ja kauppatapana käytetään hankintakauppaa. Kannattavuusvertailun lisäksi tarkastellaan KEMERA-tukien kannustinvaikutuksia ja tukien rakennetta.

3. Tulokset

3.1 Metsänomistajien arviot energiapuun talteenoton lisäämisestä

Kyselyaineisto käsitti kolmen Etelä-Suomessa sijaitsevan metsätalousalueen metsäsuunnitelmätiedot ja alueiden 116 metsänomistajalle tehdyn postikyselyn. Hyväksytyin vastauksen palautti 57 % metsänomistajista. Kyselyä täydennettiin puhelinhaastattelulla kahden suunnittelualueen osalta, joilla tarkasteltiin energiapuuvaroja ja energiapuun korjuuta. Vastausprosentiksi puhelinkyselyn jälkeen saatiin 92. Kyselyssä selvitettiin toteutunutta energiapuun korjuuta ja arviota tulevasta korjuusta, metsänomistajien tietämystä metsiensä energiapuuvaroista sekä energiapuun korjuuseen vaikuttavia tekijöitä.

Energiapuubarat laskettiin 71 tilan (2826 ha) metsäsuunnitelmätiedoista. Päätehakkuiden harvennusten ja taimikonhoitojen energiapuureserviin sisällytettiin korjuukelpoinen osa seuraavan viisivuotiskauden ainespuuksi kelpaamattomasta biomassakertymästä metsäsuunnitelman hakkuu- ja hoitoehdotuksen mukaan toimittaessa. Korjuukelpoiseksi hehtaarikertymäksi asetettiin päätehakuissa 30 m³/ha ja muissa kohteissa 20 m³/ha. Energiapuukertymät laskettiin kolmelle tarjontavaihtoehdolle:

T1: Koko alueen korjuukelpoinen energiapuukertymä

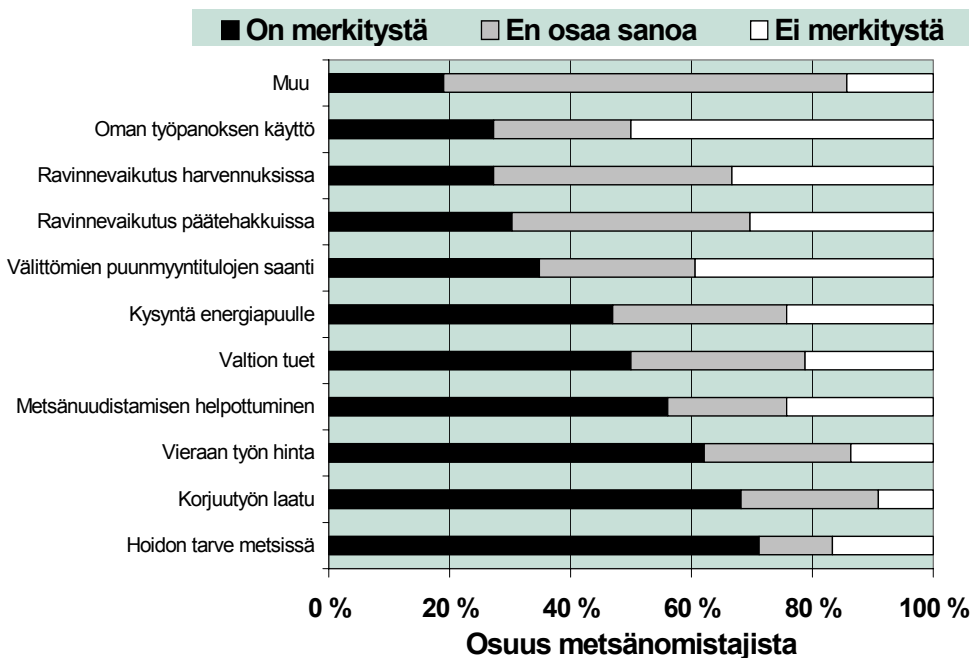
T2: Energiapuun myyntiä suunnittelevien tilojen energiapuukertymä

T3: Yhteistyöhankkeesta kiinnostuneiden tilojen energiapuukertymä.

Tarjontavaihtoehdolle 1 laskettiin metsähakkeen tuotantokustannukset välivarastohaketukseen perustuvalla korjuuketjulle, pienpuu- ja hakkuutähdehakkeen eril-

liselle tuotannolle sekä pienpuun ja hakkuutähteen yhdistetylle tuotannolle. Pienpuun hakkuukustannukset laskettiin kokopuukorjuulle ja koneelliselle kaatokasaukselle. Laskelmissa otettiin huomioon energiapuun korjuu- ja haketustuki.

Metsänomistajat pitivät nuorten metsien hoitotarvetta ja korjuutyön laatua tärkeimpinä energiapuun korjuupäätökseen vaikuttavina tekijöinä (kuva 1). Metsänhoitoyhdistykset olivat kyselyn mukaan tärkein nuoren metsän hoidon ja energiapuun korjuun informaatiolähde. Metsänomistajista 63 % ilmoitti saaneensa tietoa energiapuuasioista metsänhoitoyhdistykseltä. Tarvetta lisäneuvontaan koki kuitenkin tarvitsevansa 40 % vastanneista. Kymmenesosa metsänomistajista oli halukas henkilökohtaiseen maksulliseen neuvontakäyntiin tilan energiapuuvarojen korjuu- ja myyntimahdollisuuksien tarkastelemiseksi. Nuorten metsien hoidon, energiapuun korjuun sekä haketuksen tuista oli tietoinen 68 % metsänomistajista, mutta tukien suuruuden, hakuprosessin ja tukivaatimukset tunsu hyvin vain noin 5 % vastanneista.



Kuva 1. Eri tekijöiden merkitys energiapuun korjuupäätöksiä tehtäessä.

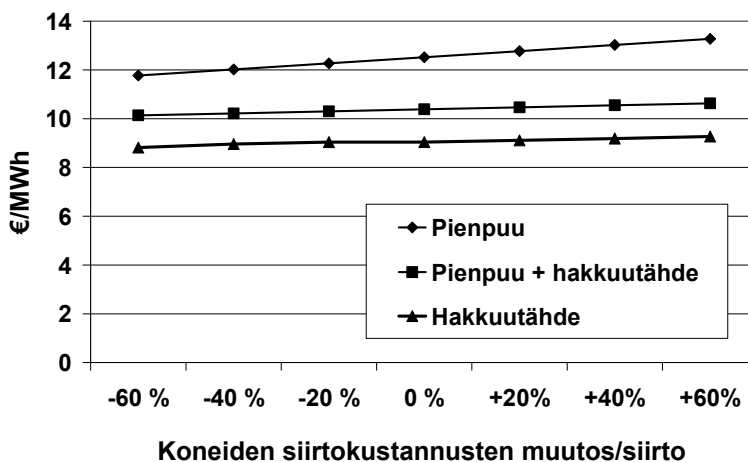
Metsänomistajilta kysyttiin myös mielipidettä energiapuun myyntihinnoista vaihtoehtoisilla KEMERA-tukitasoilla. Metsänomistajista 3 % oli valmis luopumaan nuoren metsän hoidon ja energiapuun korjuun tuista alle 5 euron energiapuun kantohinnalla. Kantohintatasolla 5–10 euroa tuista olisi valmis luopumaan 5 % metsänomistajista. Loput 92 % olivat valmiita luopumaan tuista vasta yli 10 euron kantohintatasolla. Kuitenkin 11 % metsänomistajista oli valmis myymään päätehakkuiden hakkuutähdettä ja 15 % taimikonhoitojen ja harvennusten pienpuuta, vaikka joutuisi itse maksamaan osan korjuukustannuksista tai ei saisi omalle korjuutyölle täyttä korvausta. Ainoastaan 3 % oli valmis lisäämään energiapuun myyntiään arvioimastaan tasosta ilman energiapuusta maksettavaa kantohintaa.

Energiapuun toteutunut vuotuinen korjuu omaan käyttöön oli keskimäärin 8,8 m³/tila ja energiapuuta oli myyty 3,4 m³/tila. Arvio omaan käyttöön tarvittavan puun tulevasta korjuusta oli 14,4 m³/tila ja myynnistä 7,2 m³/tila. Taulukossa 1 esitetään metsäsuunnitelmatiedoista lasketut energiapuukertymät. Metsänomistajia pyydettiin myös arvioimaan suunnittelemansa korjuuarvion osuus tulevan viisivuotiskauden korjuukelpoista energiapuuvaroista (energiapuun talteenottoaste). Omistajien arvioimaa energiapuun talteenottoastetta verrattiin metsäsuunnitelmatiedoista ja korjuuarviosta laskettuun talteenottoasteeseen. Metsänomistajista 70 % arvioi seuraavan viisivuotiskauden talteenottoasteen saman suuruiseksi metsäsuunnitelmatiedoista ja korjuusuunnitelmasta lasketun tason kanssa. Omistajien arvio oli 24 %:ssa vastauksia laskettua tasoa pienempi ja 6 %:ssa suurempi.

Taulukko 1. Tarjontavaihtoehtojen mukaiset energiapuukertymät.

	T1	T2	T3
	Energiapuukertymä, m ³ /vuosi		
Päätehakkuaalat	27,2	10,0	7,0
Harvennukset	9,8	2,9	3,6
Taimikot	6,8	3,5	2,9
Kaikki	43,7	20,4	13,5

Pienpuuhakkeen tuotantokustannukset käyttöpaikalle toimitettuna tarjontavaihtoehdolla 1 (T1) olivat 12,5 €/MWh, päätehakuiden hakkuutähdehakkeen tuotantokustannukset 9,0 €/MWh ja yhdistetyn pienpuu- ja hakkuutähdehakkeen tuotantokustannukset vastaavasti 10,4 €/MWh. Kustannuksia pystytään alentamaan vähentämällä koneiden siirtokustannusten osuutta kokonaiskustannuksista. Tämä onnistuu leimikkokeskityksillä ja ketjuttamalla leimikot optimaalisesti. Korjuukuvioiden tilakohtaisella keskittämällä on pienpuuhakkeen tuotannossa mahdollista päästä 5 %:n kustannussäästöihin ja muodostamalla tilojen yhteisleimikoita 9 %:n säästöihin. Hakkuutähde- ja pienpuuhakkeen yhdistetyssä tuotannossa vastaavasti kustannussäästöt ovat 3 ja 6 %. Kuvassa 2 on esitetty kaatokasauskoneen, metsätraktorin ja välivarastohakkurin siirtokustannusten muutoksen vaikutus metsähakkeen tuotantokustannuksiin tarjontavaihtoehdossa 1.



Kuva 2. Koneiden siirtokustannusten muutoksen vaikutus metsähakkeen tuotantokustannuksiin tarjontavaihtoehdon 1 mukaisilla leimikoilla. Siirtokustannusten perustasona kaato-kasauskoneella on 65 €, metsätraktorilla 60 € ja hakkurilla 50 €/siirto.

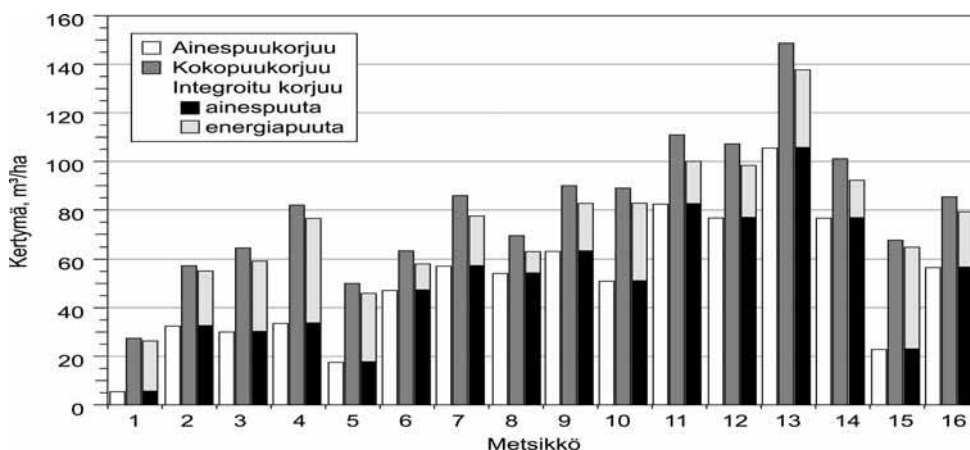
Metsänomistajat tarvitsevat tietoa tilansa energiapuuvaroista sekä energiapuun talteenottomahdollisuuksista pienpuun liikkeelle saamiseksi. Metsänhoitoyhdistysten aktiivinen rooli on tärkeä tässä yhteydessä. Metsänomistajat ovat halukkaita osallistumaan paikallistason yhteistyöhankkeisiin. Yhteistyö tuo kustannussäästöjä ja mahdollistaa energiapuureservien tehokkaan hyödyntämisen.

3.2 Energiapuun korjuun kilpailukyky metsänomistajan näkökulmasta

Tapaustutkimuksessa selvitettiin, onko eteläsuomalaisissa nuoren kasvatusmetsän KEMERA-kohteissa energiapuun korjuu kokopuuna tai ainespuun korjuuseen integroituna metsänomistajan näkökulmasta kilpailukykyinen vaihtoehto ainespuuharvennukseen verrattuna. Kauppatapana käytettiin hankintakauppaa.

3.2.1 Aineisto ja menetelmät

Tutkimusaineisto käsitti kuusitoista nuoren kasvatusmetsän harvennuskohdetta Häme-Uusimaan metsäkeskuksen alueella. Kahta metsikköä (metsiköt 3 ja 14) lukuun ottamatta metsiköt olivat KEMERA-kelpoisia. Metsiköt 3 ja 14 eivät täyttäneet harvennuksen jälkeistä valtapituuskriteeriä (< 14 m), mutta ne täyttivät muilta osin KEMERA-kriteerit ja sisällytettiin täten tutkimukseen. Metsiköissä poistuma vaihteli välillä 1 100–3 694 kpl/ha, valtapituus harvennuksen jälkeen välillä 11,4–14,5 m ja pohjapinta-alalla painotettu rinnankorkeuslähpimita harvennuksen jälkeen oli 11,5–15,6 cm. Kussakin metsikössä verrattiin kolmea vaihtoehtoa: pelkkää energiapuun talteenottoa (kokopuukorjuu), pelkkää ainespuun korjuuta ja integroitua korjuuta, jossa otetaan talteen sekä aines- että energiapuuositteet. Kuvassa 3 on esitetty vaihtoehtojen kertymät.



Kuva 3. Kertymät eri korjuuvaihtoehdoilla.

Peruslaskelmissa vertailtiin neljää toimintavaihtoehtoa ("ENERGIAPUU": kaikki KEMERA-tuet, "AINESPUU-TUKI": metsänomistaja saa korjuun yhteydessä tehtävään raivaukseen KEMERA-tukea, "AINESPUU": ei KEMERA-tukia ja "INTEGROITU": kaikki KEMERA-tuet) metsänomistajan näkökulmasta metsikkötasolla. Metsähakkeen hinnaksi oletettiin 9 €/MWh. Hankintakaupan puutavaralajeittaiset yksikköhinnat saatiin METINFO-tilastopalvelusta (koko maan keskiarvot vuonna 2002: MäK 24,60, KuK 31,22 ja KoK 24,69 €/m³). Ainespuun korjuussa hankintakauppana hankintahakkuutuloista vähennettiin korjuukustannukset (taulukko 2) olettaen, että metsänomistaja tekee korjuun itse tai teettää hakkuun ja metsäkuljetuksen annetuilla kustannusperusteilla. Laskelmiin sisällytettiin kaikki tuet, jotka perustuvat voimassa oleviin Kestävän Metsätalouden Rahoituslakiin ja asetuksiin. Energiapuun korjuun toimintavaihtoehdossa metsänomistajalle kohdentuivat hakkuun ja metsäkuljetuksen lisäksi myös hakeutus- ja kaukokuljetuskustannukset (5,8 €/m³).

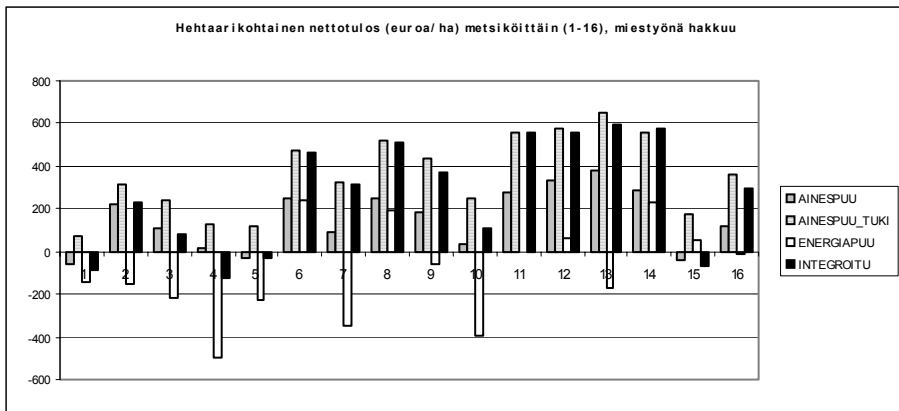
Taulukko 2. Toimintavaihtoehtojen laskennalliset korjuun yksikkökustannukset miestyönä (MANU) tai konehakuuna (KONEHAKKUU).

METSİK-KÖ	KORJUUTAPA	AINESPUU ¹⁾ €/m ³	AINESPUU TUKI ²⁾ €/m ³	ENERGIA- PUU ³⁾ €/m ³	INTEGROITU ⁴⁾ €/m ³
1	MANU	36,3	59,3	28,0	29,1
	KONEHAKKUU	52,6	47,5	25,8	35,3
2	MANU	20,4	25,0	20,8	22,0
	KONEHAKKUU	18,7	19,1	16,2	20,4
3	MANU	22,2	26,0	20,9	22,6
	KONEHAKKUU	19,9	20,7	17,0	21,1
4	MANU	24,8	29,2	22,8	23,7
	KONEHAKKUU	22,3	23,2	18,3	22,5
5	MANU	29,3	35,2	23,2	25,0
	KONEHAKKUU	27,3	26,0	20,3	26,6
6	MANU	19,4	19,9	13,7	19,0
	KONEHAKKUU	16,2	15,2	13,4	17,9
7	MANU	24,6	24,8	20,6	22,1
	KONEHAKKUU	19,0	18,6	16,2	21,7
8	MANU	19,9	19,7	14,5	19,0
	KONEHAKKUU	14,7	15,1	12,8	15,9
9	MANU	21,6	21,8	17,1	20,6
	KONEHAKKUU	17,4	17,1	14,8	19,4
10	MANU	23,9	24,6	20,9	22,1
	KONEHAKKUU	19,1	19,5	16,4	19,8
11	MANU	21,2	21,0	15,9	19,7
	KONEHAKKUU	16,1	16,4	14,1	18,0
12	MANU	20,3	20,3	15,4	19,2
	KONEHAKKUU	15,1	15,7	13,1	15,7
13	MANU	21,7	21,6	16,5	20,1
	KONEHAKKUU	16,8	16,4	13,8	17,5
14	MANU	20,8	20,6	13,8	19,3
	KONEHAKKUU	16,1	15,9	12,7	16,4
15	MANU	26,2	28,0	21,5	22,5
	KONEHAKKUU	21,5	22,3	18,0	19,5
16	MANU	22,5	22,7	16,8	20,9
	KONEHAKKUU	18,0	17,8	16,2	20,9

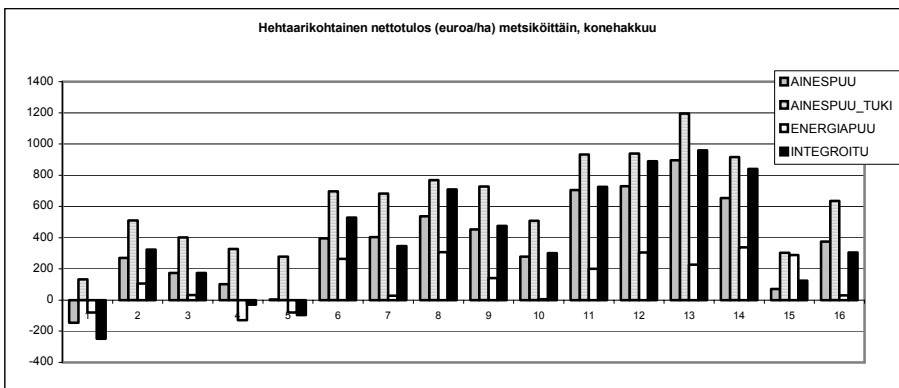
¹⁾ Yksikkökustannukset sisältävät ainespuuhakuun ja metsäkuljetuksen, ²⁾ yksikkökustannukset sisältävät ennakkoraivauksen, ainespuuhakuun ja metsäkuljetuksen, ³⁾ yksikkökustannukset sisältävät kokopuun siirtelykaadon ja metsäkuljetuksen ⁴⁾ yksikkökustannukset sisältävät ainespuun hakuun, ainespuiden latvaosien kasaamisen, pienpuiden kaatokasauksen sekä aines- ja energiapuuositteiden erillisen metsäkuljetuksen.

3.2.2 Tulokset

Hehtaarikohtaisten nettotulosten (kuvat 4 ja 5) perusteella pelkkä energiapuun talteenotto ei ollut metsänomistajalle kannattavin vaihtoehto yhdessäkään metsikössä. Metsiköissä 11 ja 14 integroitu korjuu miestyönä hakkuussa oli kuitenkin metsänomistajalle kannattavampaa kuin ainespuun korjuu hankintakauppana, vaikka ainespuun korjuun yhteydessä tehtävään raivaukseen saatiinkin KEMERA-tuet.



Kuva 4. Metsänomistajan hehtaarikohtainen nettotulos (€/ha) eri vaihtoehtoissa, miestyönä hakkuu.



Kuva 5. Metsänomistajan hehtaarikohtainen nettotulos (€/ha) eri vaihtoehtoissa, konehakkuu.

Nykyisellä tukijärjestelmällä metsänomistajan kannatti korjata "selvätkin" energiapuukohteet ainespuuna. Kuitenkin integroidun korjuun nettotulos oli yhdessätoista metsikössä parempi kuin ainespuun korjuun tulos ilman KEMERA-tukia. Näissä kohteissa integroidun korjuun kertymä oli keskimäärin 22,7 m³/ha energiapuuta ja 58,3 m³/ha ainespuuta. Nykyisen tukijärjestelmän puitteissa metsänomistajalle oli kannattavampaa korjata ainoastaan ainespuu ja jättää energiaosite hyödyntämättä. Tukijärjestelmää voidaan tältä osin pitää vääristävänä. Osa energiapuupotentiaalista (kannattavat integroidun korjuun kohteet) jää hyödyntämättä, vaikka yksityisen metsänomistajankin näkökulmasta integroitu korjuu olisi perustellumpi vaihtoehto, jos ainespuun korjuussa ei saataisi KEMERA-tukia. Pelkkä energiapuun talteenotto oli kannattavampaa kuin integroitu korjuu (konehakuuna) ainoastaan metsiköissä 1, 5 ja 15, joissa ainespuukertymät olivat pieniä. Integroitu korjuu on järkevää kohteissa, joista kertyy suhteellisen paljon sekä energia- että ainespuuta. Pelkkä energiapuun talteenotto on perusteltua kohteissa, joissa on energiapuuta vähintään 40 m³/ha ja ainespuuta on vähän.

Lähteet

Asetus nro 1311/1996. Asetus kestävän metsätalouden rahoituksesta. Annettu 30.12.1996 Helsingissä.

Asetus nro 44/01. Maa- ja metsätalousministeriön asetus kestävän metsätalouden rahoituksesta annetun lain nojalla puuntuotannon kestävyden turvaamiseksi tehtävistä töistä. Päivämäärä 15.5.2001, nro 1803/633/2001.

Asetus nro 1312/2001. Maa- ja metsätalousministeriön asetus energiapuun hake-
tukseen käytettävän tuen myöntämisestä ja tuen enimmäismäärästä. Annettu 17.12.2001 Helsingissä.

Asetus nro 97/01. Maa- ja metsätalousministeriön asetus kestävän metsätalouden rahoituksesta annetun lain nojalla tehtävän suunnittelun ja puuntuotannon kestä-
vyyden turvaamiseksi tehtävien töiden rahoituksesta. Päivämäärä 19.12.2001, Dnro 4570/00/2001.

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia Forestalia* 773. 24 s.

Hakkila, P. 2002. Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2002. Teok-
sessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Joensuu, 18.–19.9.2002. Es-
poo: VTT Symposium 221. S. 9–37.

Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsän-
tutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.

Kahala, M. 1981. Pieniläpimittaisen lehtikokopuun metsäkuljetus. Metsätehon
katsaus 6/1981. 4 s.

Kahala, M. 1984. Osapuunkorjuu eteläsuomalaisissa harvennusekosuhteis-
sa. Metsätehon tiedotus 386. 19 s.

Koistinen, A. 1998. Metsätalouden kylätason yhteistoiminnan kehittäminen.
Työtehoseuran julkaisuja 365. 86 s.

Laitila, J. & Asikainen, A. 2002. Kaatokasauksen koneellistaminen nuorten metsien energiapuun korjuussa. Kutsuttu esitelmä tieteellisessä kokouksessa. Puuenergian teknologiaohjelman tutkijaseminaari, Pietarsaari 10.–11.4.2002.

Laki nro 1094/1996. Laki kestävän metsätalouden rahoituksesta. Annettu Helsingissä 12.12.1996 (HE 63/1996, MmVM18/1996, EV 209/1996).

Sirén, M. & Aaltio, H. 2001. Harvennusharvesterien ja korjurien pitkän aikavälin tuottavuus. Julkaisussa: Kärhä, K. (toim.). Harvennuspuun koneelliset korjuuvaihtoehdot. Harko-projektin (1999–2001) loppuraportti. Summary: Alternative harvesting systems in mechanized thinning. Final report of Harko project (1999–2001). Työtehoseuran julkaisuja 382. S. 29–31, 43–46, 49–52, 66–68.

Tanttu, V., Sirén, M., Aaltio, H. & Kärhä, K. 2002. Energiapuun korjuuolosten parantamismahdollisuudet. Teoksessa: Sirén, M. (toim.). Ensiharvennusten korjuuolot ja niiden parantamismahdollisuudet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 837. S. 27–36.

Örn, J. 1997. Metsä- ja metsäkonealan palkat. Julkaisussa: Häyrynen, J. (toim.). Tapion taskukirja. S. 532–537.

Hankkeen julkaisut

Sirén, M., Tanttu, V. & Ahtikoski, A. 2002. Energiapuun korjuun tehostaminen nuorista metsistä -osaprojekti. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Joensuu, 18.–19.9.2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 57–61.

Tanttu, V. & Sirén, M. 2002. Korjuuta keskittämällä kustannustehokkuutta. Puuenergia 2, s. 12–13, 33.

Tanttu, V. & Sirén, M. 2002. Leimikkokeskityksillä parempiin korjuuoloihin. Concentrated harvesting results in better conditions. Teho 1, s. 32–34, 47.

Tanttu, V. & Sirén, M. 2003. Increasing forest chip production by the integrated harvesting of small trees and logging residues. In: Iwarsson, M. & Baryd, B. (eds.). 2nd Forest Engineering Conference, 12–15 May 2003, Växjö, Sweden. Proceedings. Technique and Methods. SkogForsk, Arbetsrapport 539. S. 30–33.

Tanttu, V., Sirén M. & Ahtikoski, A. 2003. Metsänomistajien arviot energiapuun talteenoton lisäämisestä. Työtehoseuran metsätiedote 669. 4 s.

Tanttu, V. & Sirén, M. 2003. Co-operation and integration in wood energy production. International Journal of Forest Engineering. 20 s. (Julkaistaan helmikuussa 2004).

Energiapuun kuivatus ja varastointi -osaprojekti

Kari Hillebrand
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 597
E-mail: kari.hillebrand@vtt.fi

Juha Nurmi
Metsäntutkimuslaitos
PL 44, 69101 Kannus
Puh. 010 211 3419, faksi. 010 211 3401
E-mail: juha.nurmi@metla.fi

1. Tausta

Kaatotuoreen puun kosteus on 50–60 %. Isoissa laitoksissa kostea polttoaine ei ole ongelma, mutta pienemmissä laitoksissa kosteus ei saisi ylittää 40 %. Toisaalta jos puun kosteutta pystytään alentamaan noin 55 %:sta 25–30 %:n loppukosteuteen, niin lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti kasvaa 10 %. Huomattava osa puuston sisältämistä ja kasvulle tärkeistä ravinteista sijaitsee neulas- tai lehtimassassa sekä oksien kuoressa. Kokopuun korjuussa poistuu kasvupaikalta huomattava osa näistä ravinteista. Kivennäismailla puun kasvua rajoittaa typen määrä, ja turvemailla, missä tyypeä on runsaasi sitoutuneena orgaaniseen kerrokseen, kasvua rajoittavia ravinteita ovat kalium ja boori. Niitä on erityisen runsaasti juuri neulasissa. Puuston kannalta olisikin edullista, mikäli neulasista ja lehdistä voitaisiin päästä eroon ennen puiden välivarastolle ajoa. Tällöin tosin hakkuukertymä pienenee.

2. Tavoite

Tutkimuksessa selvitettiin tekniset keinot, joiden avulla nuorista metsistä kerätävä energiapuu voidaan hankinnan ja varastoinnin aikana kuivata alle 40 %:n

kosteuteen ja säilyttää saavutettu laatutaso välivarastossa. Lisäksi selvitettiin eri korjuumenetelmien vaikutusta metsään jäävän vihermassan määrään.

3. Toteutus

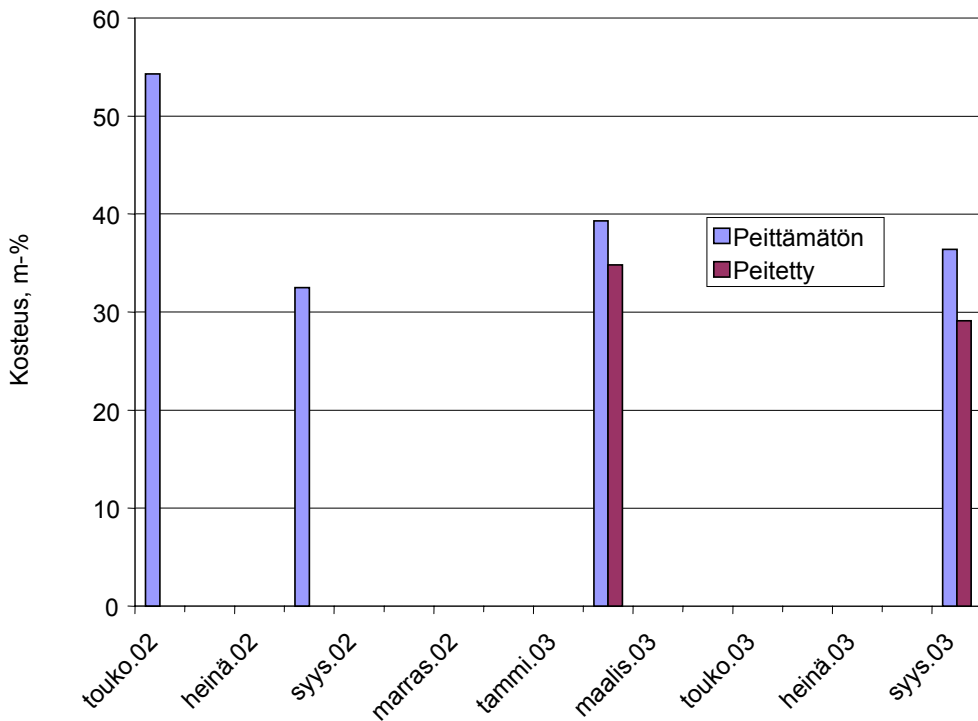
Tutkimuksen kaksi päätehtävää oli kuivatuksen ja varastoinnin vaikutus polttoaineen laatuun sekä kuivatuksen ja karsinnan vaikutus neulasten määrään energiapuun korjuussa. Energiapuun kuivatus ja varastointi tehtiin palstalla ja tienvarsivarastoissa. Erilaisissa varastointitekniikoissa otettiin huomioon mm. kasojen sijainti, koko, alusta ja peittäminen. Kuivatus- ja varastointikokeet palstalla tehtiin kokopuukasoissa ja puun joukkokäsittelyssä syntyvissä kourakasoissa. Kuivatus ja varastointi suuremmissa varastokasoissa tehtiin tienvarressa. Varastokasoja tehtiin sekä karsimattomista että puun joukkokäsittelyssä syntyvästä osittain karsituista puista. Osa varastokasoista peitettiin. Kuivatus- ja varastointikokeet tehtiin eri puolilla Suomea 12 eri kohteessa ja yhteensä varastokasoja tehtiin 37 kpl.

Lisäksi selvitettiin, kuinka neulasten jääntiä palstalle voidaan edistää pieniläpimittaisen energiapuun korjuun yhteydessä. Tavoitteena oli löytää menetelmä tai korjuuketju, mikä ei aiheuta lisäkustannuksia, mutta jolla kuitenkin päästäisiin puuston ravinnetasapainon kannalta mahdollisimman hyvään tulokseen. Tutkimuksessa päädyttiin vertailemaan rasikuivauksen aikaansaamaa neulasten varisemista ja koneellista karsintaa. Luonnon varisemisen edellytyksenä on kosteuden haihtuminen puusta, jonka seurauksena neulaset kuolevat. Kourakasoissa ajouran varressa olevien mäntykokopuitten kuivumista ja neulasten varisemista seurattiin maastokokein.

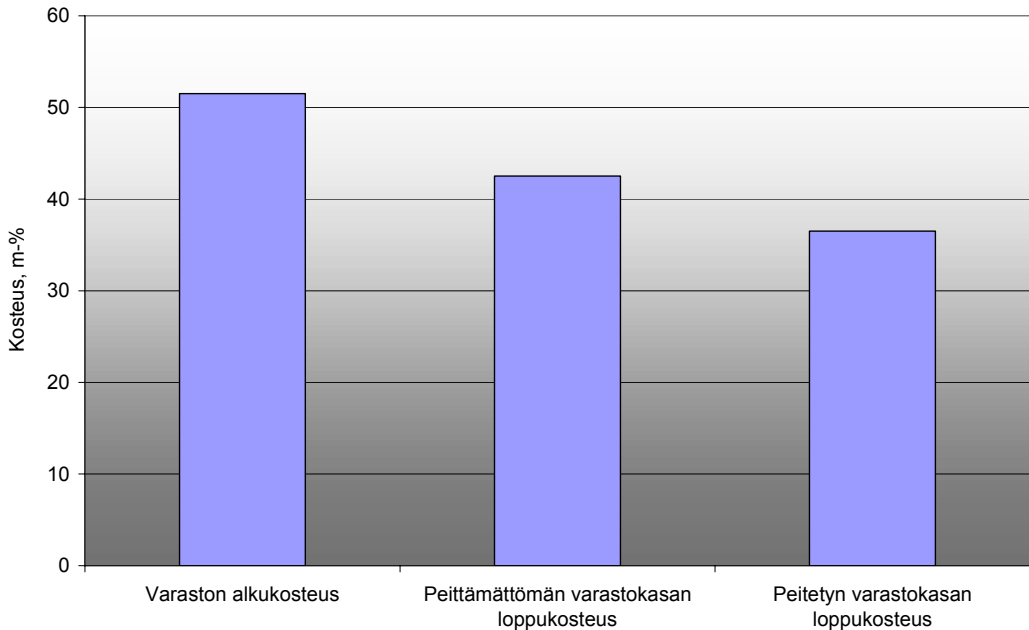
Tutkimuksessa käytettiin kahta laitetta: Outokummun Metalli Oy:n Timberjack Oy:lle valmistamaa rullasyöttöistä, joukkokäsittelykypälillä varustettua Timberjack 745 kouraa ja töysäläisen urakoitsijan Timo Hietaniemen kehittämää sykesyöttöistä joukkokäsittelyharvesteria. Kaadettavien puitten läpimitta sanelee taakassa olevien puitten määrän. Yleisimmät taakkakoot olivat kummallakin koneella 3 tai 4 puuta. Puustojen keskipituus oli noin 12 metriä, joten taakat jouduttiin karsinnan yhteydessä katkomaan. Lisäksi latva katkaistiin parin senttimetrin mittaan.

4. Tulokset

Pienpuu kuivuu hyvin varastossa kesäaikana. Yhden kesän aikana kosteus alenee alle 40 %:iin, eikä varastokasassa oleva pienpuu kastu talven aikana vastaavasti kuten esim. hakkuutähteet (kuva 1). Varastokasan peittämisellä ei siten ole yhtä suurta vaikutusta kuin hakkuutähteillä. Kuvassa 2 on esitetty tutkittujen kasojen peittämisen vaikutus kokopuiden kosteuteen. Varastojen tekovaiheessa kasojen keskikosteus oli 52 % ja haketuksen yhteydessä peittämättömien varastokasojen keskikosteus 42 % ja peitettyjen kasojen 36 %. Varastokasojen peittämisellä saavutetaan keskimäärin noin 6 %-yksikköä kuivempaa polttoainetta.

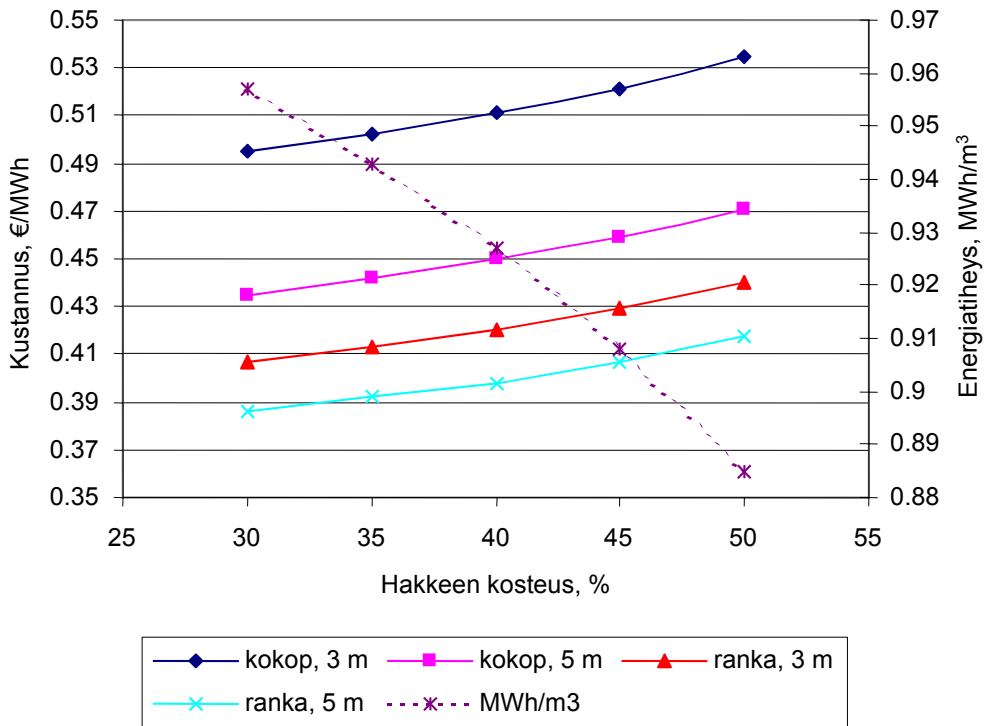


Kuva 1. Kokopuiden kuivuminen varastossa.



Kuva 2. Varastokasan peittämisen vaikutus kokopuun kosteuteen.

Peittämisen kustannuksia arvioitiin olettaen varastot peitettävän 3,1 metriä leveällä Walki Wisa -metsäpeitteellä. Varaston oletettiin sisältävän kuivattua kokopuuta tai rankaa. Varaston kooksi oletettiin 80 m^3 , mikä saadaan 2 hehtaarin leimikolta, jos kertymäksi oletetaan $40 \text{ m}^3/\text{ha}$. Varasto oletettiin peitettävän pituussuuntaisesti kahdella rinnakkain levitettävällä arkilla ja varaston leveys on noin 6 m sekä korkeus 3 tai 5 m. Varaston pituus määräytyi materiaalin tiiviiden perusteella, kun kokopuun tiiviudeksi ($\text{m}^3/\text{irto-m}^3$) oletettiin 0,25 ja rangan tiiviudeksi 0,35. Peittotyö oletettiin tehtävän metsätraktorilla, jonka tuntikustannus kuljettajineen on noin 47 €/h. Kustannukset laskettiin MWh:a kohti, johon vaikuttaa varaston puun kosteus haketushetkellä (kuva 3).



Kuva 3. Varastojen peittämisen kustannus puun kosteuden funktiona pienkoko-
puulle ja karsitulle pienpuulle, kun varaston korkeus on 3 m tai 5 m. Hakkeen
toimituskosteus on 40 %. Kuvassa esitetyn energiatiheyden avulla kustannukset
voidaan muuntaa hake-m³:ä kohti.

Varaston tiivydellä (kokopuu tai ranka) ja korkeudella on suuri vaikutus peittä-
misen kustannuksiin. Tiiviin ja korkean kasan peittämiskustannukset ovat luon-
nollisesti alhaiset. Peittokustannuksesta peitteen hinta muodostaa suurimman
kustannuserän, peittotyön osuus on vain noin 20 %.

Ottamalla huomioon kosteuden vaikutus hakkeen sisältämään energiamäärään
voidaan laskennallisesti arvioida, että peittämisellä tulisi voida alentaa hakkeen
kosteutta 6–8 %-yksikköä, jotta peittäminen tulee kannattavaksi. Jos kasat peite-
tään vain yhdellä arkilla, alenee peittämisen kustannus noin puoleen. Tällöin
peittäminen tulee kannattavaksi, jos hakkeen kosteutta voidaan alentaa noin
3–4 %-yksikköä.

Kokopuitten koneellista karsintaa tutkittiin kahdella laitteella: rullasyöttöistä, joukkokäsittelykypälillä varustettua kouraa ja sykesyöttöistä joukkokäsittelyharvesteria. Taulukosta 1 nähdään, että molemmat koneet ovat onnistuneet karsinnassa erittäin hyvin. Lähes koko neulasmassa on saatu karsituksi. Tämä merkitsee sitä, että lähes kaikki oksat ovat myös karsiutuneet. Karsinnan tehokkuus johtaakin pienempään kertymään. Toisaalta ei sovi unohtaa, että oksien kuoriaines sisältää runsaasti ravinteita, ja niillä on siis myös merkityksensä metsän ravinnetalouden kannalta.

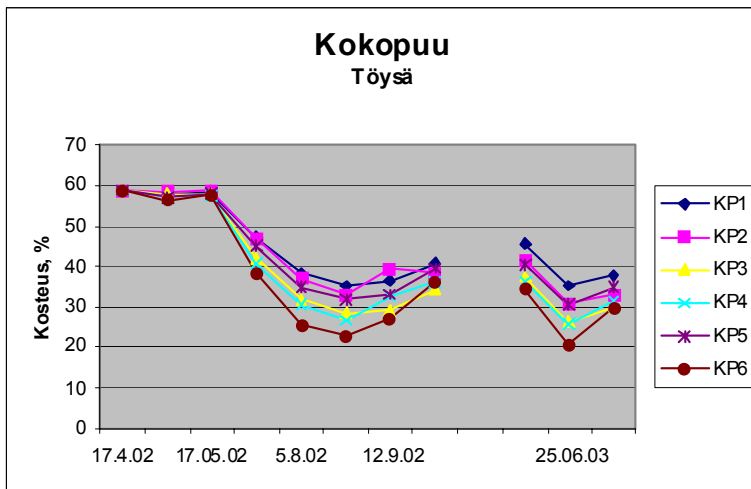
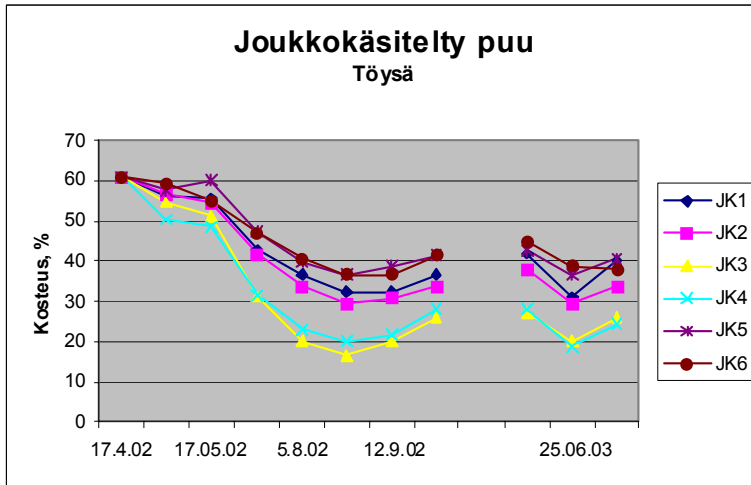
On ajateltu, että neulasista voitaisiin päästä eroon rasikuivauksen avulla. Se on luontevinta tehdä puiden ollessa hakkuukoneen tekemissä kourakasoissa. Rasi-kuivatuksen hyödyntäminen edellyttää kuitenkin hakkuutyön tekemistä kevään tai kesän aikana, jolloin puiden kuivuminen on nopeinta. Vaikka männyn tiedetään kuivuvan lehtipuita ja kuusta hitaammin, kuivuivat männyt hyvin kourakasoissa nyt järjestetyssä kokeessa. Taakkojen kosteus oli loppukesällä keskimäärin alle 30 %, kuivimpien ollessa jopa alle 20 %. Neulaset muuttuivat kuivumisen myötä ruskeiksi, mutta pysyivät lujasti oksassa kiinni. Taulukosta 1 nähdään luonnollisen varisemisen olleen erittäin pientä. Neulaset eivät olleet irronneet, vaikka kourakasoja nosteltiin kahden viikon välein kuivumisen seurannan yhteydessä. Voimakas ravistelu saattaisi karistaa osan neulasista, mutta pelkkä kuormaimella nostelu ei riitä neulasten irrottamiseen. Lisäksi rasimene-
telmä vaatii aikaa, ja työstä muodostuu kaksivaiheinen, mikä puolestaan lisää kustannuksia. Joukkokäsittely puolestaan on erittäin tehokas neulasten ja oksien poistaja. Sen etuna on myös vuodenajasta riippumattomuus. Rasikuivaushan rajoittuu vain kevääseen ja kesään.

Taulukko 1. Joukkokäsittelyn ja rasikuivauksen onnistuminen neulasten ja oksien poistajana eri laitteilla ja työmailla. Luvut ilmaistu prosentteina kuivamassasta.

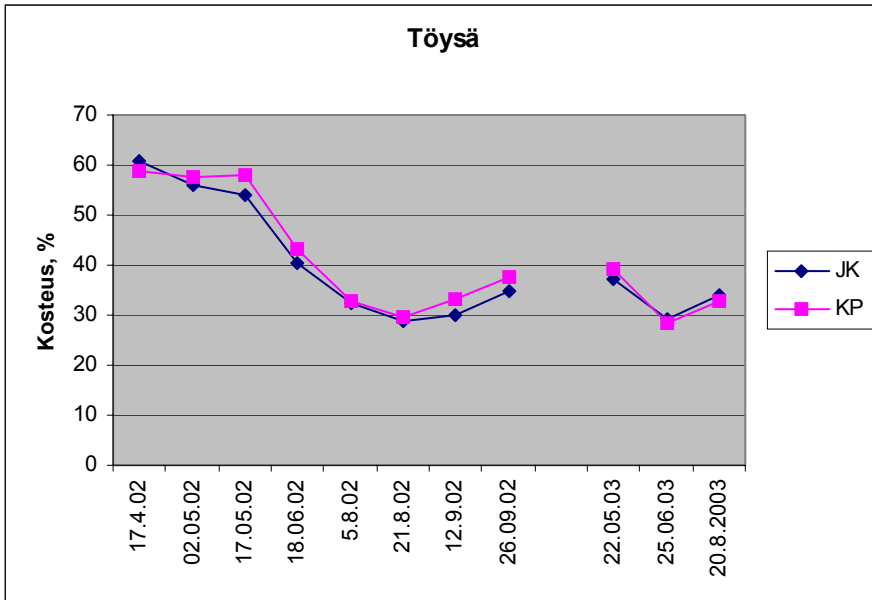
Joukkokäsittely Laitte/työmaa	Rasikuivaus		Neulaset	Oksat
	Neulaset	Oksat		
Outokummun Metalli Oy/ Timberjack	99,2	97,3		
Ruokolahhti			0,88	
Timo Hietaniemi Prototyypä	95,7	89,5		
Töysä			1,30	

Joukkokäsittelyn hyvän karsintatuloksen kääntöpuolena on alhaisempi kertymä. Tehokas karsinta vähentää kertymää noin 15 %. Toisaalta ei tule unohtaa, että joukkokäsittelyn tuloksena syntyy rankaa, josta saatava hake on kokopuuhaketta tasalaatuisempaa. On tärkeää myös muistaa, että tällainen hake ei sisällä vihermassaa. Neulaset ja lehdethän ovat erittäin hyvä kasvualusta kuiva-ainetappioita aiheuttaville mikrobeille. Sen poisto takaa hakkeen paremman säilymisen varastoinnin aikana. Vaikka kalusto ja tottumukset sanelevatkin pitkälti energiapuun korjuun kulun, vaikuttaa se, mihin neulaset päätyvät, puuston kasvuun, energiapuun kertymään sekä polttihakkeen laatuun.

Kokopuumännyt pysyvät kuivina palstalla kourakasoissa vielä toisenakin vuotena. Ensimmäisen kuivauskesän jälkeen syyskuussa kosteus oli n. 35 % pysyen lähes muuttumattomana talven yli. Toisena kesänä saavutettiin sama kuivuuden aste kuin ensimmäisenäkin so. n. 30 %. Sen jälkeen kosteus kourakasoissa lisääntyy. Tämä siksi, että ilman suhteellinen kosteus kasvaa elokuusta eteenpäin, minkä seurauksena puu hydroskooppisena aineena imee itseensä kosteutta. Kosteuden lisäys tosin on hidasta, sillä elokuun loppuun mennessä kosteusprosentti on noussut keskimäärin 5 %-yksikköä. Vaikka ylivuotista kourakasoissa varastointia ei voitaneakaan pitää suositeltavana polttopuun varastointitapana, se ei kuitenkaan lisää puuaineen kosteutta, mikäli välivarastoon ajo tapahtuu ennen elokuuta (kuva 4).



Kuva 4. Joukkokäsittelyn ja kokopuun kosteuden muutos Töysän työmaalla.



Kuva 5. Joukkokäsittelyn (JK) ja kokopuun (KP) kuivuminen palstakasoissa.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tutkimuksessa on syntynyt tieto siitä, miten nuorista metsistä saatavan metsähakkeen loppukosteus saadaan käyttäjälle alle 40 %:n kosteudessa. Paremmasta laadusta hyötyvät hakkeen käyttäjät. Tuloksista hyötyvät suuremman lämpöarvon avulla myös hakkeen tuottajat korjuu- ja kuljetuskustannusten pienemisen myötä tuotettua energiayksikköä kohti.

Kokopuun palstalla kuivaus ei ole vastaus ravinnerikkaitten neulasten varistamiseen. Rasikuivauksen toimivuus neulasten karistajana oli tutkimuksen mukaan erittäin heikko. Mikäli puuston kasvu ja maaperän ravinnetasapaino vaativat neulasmassan poistoa, on se tehtävä joukkokäsittelyn menetelmin. Menetelmä kuitenkin alentaa raaka-ainekertymää oksien määrällä.

Rasikuivaus palstalla tuottaa hyvän tuloksen männynkin kanssa, vaikka tulos ei ole samaa luokkaa kuin lehtipuilla. Joukkokäsiteltyjen puiden aisautuminen karstinnan aikana vaikutti siihen, että kokopuut ja joukkokäsiteltyt puut kuivuivat yhtä hyvin (kuva 5). Jos varastointiaika palstalla muodostuu pitkäksi, on kuivu-

mistulos hyvällä välivarastopaikalla lähes yhtä hyvä. Näin ollen lienee korjuun kannalta järkevintä ajaa kaadetut puut, olivatpa ne joukkokäsiteltyjä tai kokopuita, välittömästi välivarastoon.

Hankkeen julkaisut

Nurmi, J. 2003. Neulasmassan poistaminen metsässä – koneellisesti vai luonnon menetelmillä. *Bioenergia* 2/2003, s. 10–11.

Metsähakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka -osaprojekti

Antti Asikainen, Juha Laitila & Lauri Sikanen
Metsäntutkimuslaitos
PL 68, 80101 Joensuu
Puh. 010 2111, faksi 010 2113 113
E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

1. Tausta

Pienpuun korjuuketjujen tuottavuuksista ja kustannuksista ei ole yhtenäistä esitystä. Uutta korjuutekniologiaa on otettu käyttöön ja vakiintuneiden teknologioiden osalta kehitys on mennyt eteenpäin. Lisäksi hakkuutähdehakkeen korjuumäärien kasvu mahdollistaa pienpuun energiakäytön tehostamisen toimitusketjujen integroinnin ja korjuukohteiden yhteissuunnittelun avulla. Energiapuun käyttömäärien kasvaessa korjuu joudutaan ulottamaan entistä suuremmalle maantieteelliselle alueelle. Lisäksi aikaisempaa epäedullisemmat kohteet on otettava korjuun piiriin, jotta käyttöpaikkojen polttoaineen tarve saadaan täytettyä. Pienpuuhakkeen korjuukustannuksiin ja käyttöpaikkahintaan vaikuttaa mm. vuosittain korjattavissa oleva puumäärä, koneiden työllistyminen, rungon tilavuus, puulaji, metsäkuljetusmatka, työmaan koko, kaukokuljetusmatka sekä toiminnan organisointi. Korjuuolosuhteet maan eri osissa vaihtelevat voimakkaasti korjattavissa olevan pienpuumäärän, kasvupaikkatekijöiden, puulajisuhteiden, työmaankoon sekä tiestön, vesistöjen ja peltojen tiheyden mukaan.

2. Tavoite

Hankkeen tavoitteena oli selvittää

1. nuorista metsistä korjattavan polttohakkeen kustannusrakenne,
2. nuorista metsistä korjattavan energiapuun saatavuus maan eri osissa eri leimikonvalintakriteereillä,

3. mahdollisuudet tasata pienpuuhakkeella hakkuutähdehakkeen laatuvaihtelua sekä
4. hakkuutähde- ja pienpuuhakkeen toimitusketjujen integroinnin kustannusvaikutukset.

3. Toteutus

Hankkeessa kehitettiin VMI:n koeala- ja monilähdeinventointiaineistoon sekä metsäyhtiöiden leimikkotietoihin perustuva nuorten metsien energiapuun kertymä- ja korjuukustannusten laskentamenetelmä. Kertymälaskelmissa hankinta-alueen säde oli 100 km tieverkkoa pitkin ja hankinta-alueet sijaitsivat Joensuun, Kouvolan, Vaasan, Jyväskylän ja Kajaanin ympäristössä. Alueet olivat samat kuin aiemmassa Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta -projektissa. Tämä sen vuoksi, että voitiin verrata hakkuutähdehakkeen ja pienpuuhakkeen kertymiä ja korjuukustannuksia eri rajoitteilla sekä arvioida raaka-ainevirtojen integroinnin kustannusvaikutuksia maan eri osissa.

Pienpuun kertymätarkastelut perustuivat VMI 8:n ja 9:n metsäkeskuskohtaisiin koealatietoihin. Laskennassa olivat mukana ne varttuneiden taimikoiden ja nuorten kasvatusmetsien koealat, joilla oli ensimmäisellä 5-vuotiskaudella taimikonhoidon tai ensiharvennuksen tarve. Kertymään laskettiin mukaan kaikki ne harvennuspoistuman puut, myös ainespuun mitat täyttävät puut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli yli 4 cm. Kertymätarkastelussa oli mukana myös puiden latvusmassa. Metsäkuljetusmatkat ja etäisyydet käyttöpaikoille laskettiin metsäyhtiöiden leimikkotietojen pohjalta.

Kertymätarkasteluissa pienpuun saatavuudella määritettiin viisi tasoa ja rajoitetta:

1. Ainespuun hehtaarikohtainen kertymä saa olla enintään 25 m³/ha.
2. Energiapuun hehtaarikohtainen kertymä pitää olla vähintään 25 m³/ha.
3. Ravinnerajoite: Turvemaat ja mustikkatyyppejä karummat kasvupaikat eivät ole mukana kertymätarkastelusta.
4. Rungon keskikoko: Laskentakuviolla rungon keskikoko pitää olla vähintään 10 dm³.

5. Hakkuun kiireellisyys: Edellä mainittujen rajoitteiden lisäksi laskentakuvioilla on taimikonhoito tai ensiharvennus myöhässä eli ns. ”rästikohteet”.

Hankkeen aikana tehtiin aika- ja tuottavuustutkimuksia seuraavista koneista ja menetelmistä:

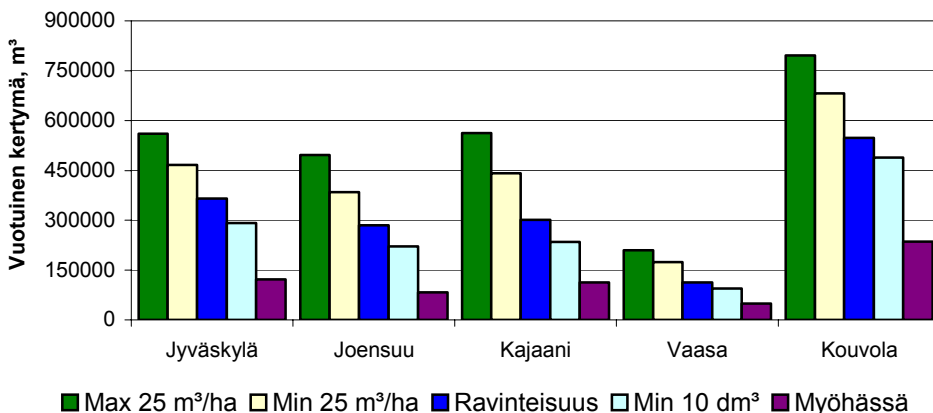
1. Timberjack 720 & 730 -keräävä kaatokoura talvi- ja kesäolosuhteissa
2. Moipu 400 E + Valmet 840 -energiapuukorjuri.
3. Pienpuun paalaus Fiberpac 370 B -hakkuutähdepaalaimella.
4. Pienpuun metsäkuljetuksen tuottavuus koneellisen ja miestyönä tehdyn kaatokasauksen jälkeen.
5. Ainespuun latvusten kasoillehakkuu koneellisessa ensiharvennuksessa ja sen vaikutus hakkuutyön tuottavuuteen.

Energiapuun eri korjuuketjujen korjuukustannusten laskennassa käytetään joko olemassa olevia tuottavuusfunktioita tai tehdään puuttuvien tuottavuusfunktioiden tilalle uudet, aikatutkimuksiin perustuvat tuottavuusfunktiot. Kustannuslaskennassa tarkastellaan manuaalisen ja koneellisen korjuun menetelmäketoja, joissa pienpuu haketetaan tienvarsivarastolla tai se toimitetaan joko paalattuna tai kokopuuna voimalaitoksella haketettavaksi. Pienpuun korjuukustannukset lasketaan VMI:n koealatietojen pohjalta Joensuun, Kouvolan, Vaasan, Jyväskylän ja Kajaanin alueille.

4. Tulokset

Pienpuun saatavuus vaihtelee maan eri osissa. Esimerkkikohteista Kouvolan ympäristössä pienpuun kertymä oli suurin ja Vaasan ympäristössä pienin. Vaasan ympäristössä kertymä 100 kilometrin säteellä oli eri rajoitteilla 210 000–50 000 m³ vuodessa ja Kouvolan alueella 790 000–230 000 m³ vuodessa. Joensuun, Jyväskylän ja Kajaanin ympäristössä kertymät olivat 500 000–120 000 m³ vuodessa (kuva 1). Esitetyt kertymät ovat potentiaalisia ja laskentaoletuksena oli, että kaikki kohteet saadaan tarvittaessa korjuun piiriin. Käytännössä on kuitenkin ylioptimistista olettaa, että kaikki korjuukelpoiset kohteet tulevat markkinoille ja energiapuu saadaan talteen.

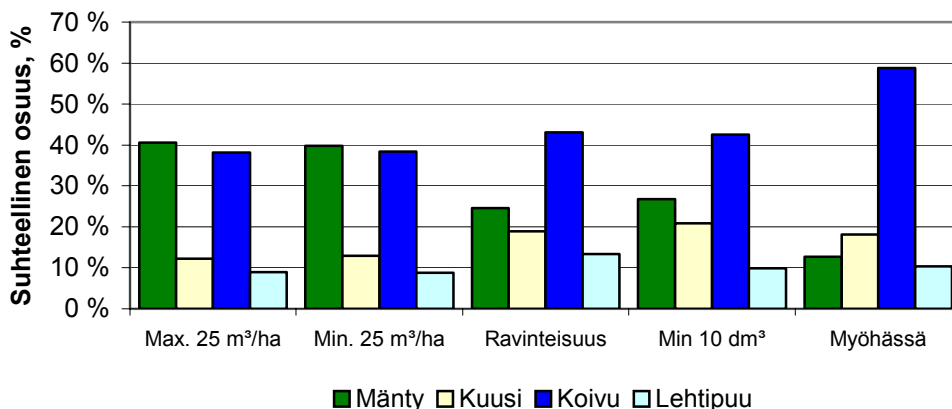
Pienpuuhakkeen saatavuus nuorista metsistä eri rajoitteilla



Kuva 1. Pienpuun saatavuus maan eri osissa eri kertymärajoitteilla.

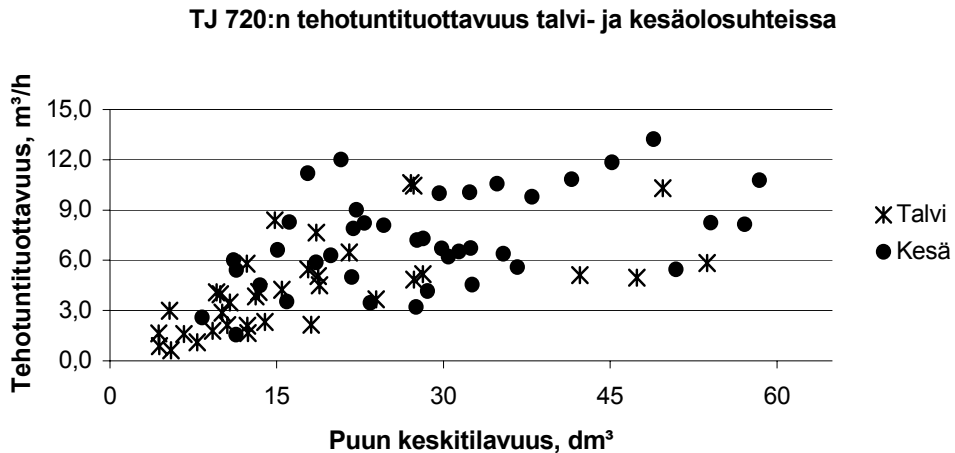
Kertymälaskelmissa käytetyt rajoitteet vaikuttavat energiapuukertymän puulajisuhteisiin (kuva 2). Kasvupaikan viljavuudelle asetetut minimirajoitteet pienentävät männyn osuutta kokonaiskertymästä ja rehevien maiden rästikohteilla pääpuulajina on useimmiten joko koivua, haapaa tai leppää.

Puulajien suhteelliset osuudet kertymästä, Vaasa



Kuva 2. Rajoitteiden vaikutus puulajien suhteelliseen osuuteen kertymästä. Esimerkkinä Vaasan ympäristö.

Timberjack 720 keräävän kaatokouran keskimääräinen tehotuntuottavuus oli 5,9 m³/h ja poistettavien runkojen keskitilavuus 24 dm³. Tuottavuus vaihteli välillä 0,6–13,2 m³/tehotunti ja poistuman keskijäreys välillä 4,5–58 dm³ (kuva 3). Käsiteltävien runkojen lukumäärä oli 105–629 runkoa tehotunnissa.



Kuva 3. Timberjack 720 -keräävän kaatokouran tuottavuus kesä- ja talviolosuhteissa.

Pienpuun metsäkuljetuksen tuottavuus 250 metrin metsäkuljetusmatkalla oli 8,6 m³ käyttötunnissa koneellisen kaatokasauksen jälkeen ja 6,5 m³ miestyönä hakkuun jälkeen. Suurin tuottavuuseroa selittävä tekijä on kourataakkojen koko. Koneellisen kaatokasauksen jäljiltä kourakasat ovat suuria, mikä puolestaan tehostaa kuormaustyötä. Miestyönä hakkuun jäljiltä kourakasat ovat pienempiä ja kasat ovat levittäytyneet suomumaisina muodostelmina laajemmalle alueelle, mikä vastaavasti hidastaa kuorman tekoa.

Energiapuu korjurin (Moipu 400 E + Valmet 840) keskimääräinen tehotuntuottavuus oli 250 metrin metsäkuljetusmatkalla 3,4 m³/tehotunnissa (2,9–4,8 m³/h). Rungon keskikoko oli 31 dm³ ja keskipituus 9,4 metriä. Keskipoistuma oli 2 000 runkoa hehtaarilta.

Pienpuun välivarastolla paalauksessa tuottavuus oli 27 paalia tehotunnissa. Kokopuupalin kiintotilavuus oli 0,63 m³ ja kiintotilavuusprosentti 49 %.

Projektissa tehdyt julkaisut

Laitila, J. & Asikainen, A. 2002. Koneellinen energiapuun korjuu harvennusmet-
sistä. *Puuenergia* 3, s. 8–9.

Laitila, J., Asikainen, A. & Sikanen, L. 2003. Cost factors and supply logistics of
fuel chips from young forest. In: *Bioenergy 2003. International Nordic Bio-
energy Conference from 2nd to 5th of September 2003. Proceedings.* Jyväskylä
Science Park, Jyväskylä. S. 274–276.

Laitila, J., Sikanen, L., Asikainen, A., Tahvanainen, T. & Korhonen, K.T. 2003.
Forest energy potential of young stands – Method of estimation and significance
in Finland. In: *Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference from
2nd to 5th of September 2003. Proceedings.* Jyväskylä Science Park, Jyväskylä.
S. 171–175.

Lähteet

Asikainen A, Ranta T, Laitila J. & Hämäläinen J. 2001. Hakkuutähdehakkeen
kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätie-
teellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia Forestalia* 773. Metsän-
tutkimuslaitos. 24 s.

Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. *Folia Forestalia* 342. Metsän-
tutkimuslaitos. 38 s.

Tomppo, E., Katila, M., Moilanen, J., Mäkelä, H. & Peräsaari, J. 1998. Kunnit-
taiset metsävaratiedot 1990–94. Metsätieteen aikakauskirja *Folia Forestalia*
4B/1998. S. 619–839.

Pienpuuhakkeen ja hakkuutähdehakkeen energiakäytön sosioekonomiset vaikutukset; case-tarkastelu -osaprojekti

Alpo Ahonen
Thule-instituutti
PL 7300, 90014 Oulun yliopisto
Puh. (08) 5533 552, faksi (08) 5533 564
E-mail: alpo.ahonen@oulu.fi

Abstract

Project title in English: The socio-economic effects of the use of forest chips from logging residues and small-sized trees in energy production; case study

The aim of this case study is to analyse the socio-economic effects of forest fuel supply and use chains.

Two of the four cases are rural district heating plants. In Perho, the co-operative organisation of forest owners maintains the fuel supply and operates the plant. In Ruukki, the local forestry association supplies forest chips to the plant. These medium-scale plants use small-sized trees from young thinning stands as their main fuel. The trees are felled manually.

The other two cases are large power plants. Alholmens Kraft's new power plant in Pietarsaari aim to use 250 000 solid-m³ of forest chips annually. The logging residues are hauled to the plant as bales using traditional timber harvesting equipment or as bulk material. At young thinning stands the trees are harvested using an accumulating feller buncher.

The Toppila I and II power plants in the city of Oulu used about 36 000 solid-m³ of forest chips. Over 300 000 solid-m³ can potentially be used. There are three large suppliers, of which two supply also peat. Forest chips are produced from small-sized trees and logging residues.

The indirect employment effects and the allocation of impacts on domestic factor income and imports are analysed by means of an input-output model. The net changes in the disposable income of local households, firms, municipalities, government and others are derived from the factor income based on income redistribution.

The project ends in the spring 2004.

1. Tausta

Metsähakkeen käyttöä energiantuotannossa on pidetty tärkeänä työllistävyyden ja metsien hoidon kannalta. Viime vuosikymmenellä hiilidioksidipäästöjen vähentäminen nousi maamme energiapolitiikassa keskeiseksi tekijäksi. Puun käyttöä onkin päätetty voimakkaasti lisätä. Metsähakkeen käyttö on lisääntynyt sekä tuotantokustannusten alenemisen että julkisen rahoitustuen johdosta.

Metsähakkeen tuotantokustannusten alentaminen on merkinnyt samalla työllisyys- ja tulovaikutusten pienenemistä tuotettua hakekuutiota kohti. Toisaalta käytön kasvun johdosta työpaikkojen määrä on lisääntynyt. Työllisyys- ja tulovaikutukset puoltavat ympäristönäkökohtien ohella edelleenkin metsähakkeen käytön lisäämistä. Metsähakkeen valtakunnallisten käyttötavoitteiden toteutumisen yksi suuri haaste on pienpuuhakkeen käytön lisääminen. Mm. pienpuuhakkeen käyttöä edistävien toimenpiteiden suunnittelun pohjaksi ja käytön vaikutusten arvioimiseksi tarvitaan tietoa metsähakkeen energiakäytön sosioekonomisista vaikutuksista.

2. Tavoite

Tutkimuksessa arvioidaan neljässä case-kohteessa metsähakkeen tuotantoketjujen välittömät ja välilliset tulo- ja työllisyysvaikutukset sekä vaikutukset kotitalouksien ja julkisen sektorin nettotuloihin. Kohteina ovat Perhon lämpölaitos, Ruukin lämpölaitos, Oulun Energian Toppilan voimalat ja Alholmens Kraftin voimalaitos Pietarsaareissa. Tutkimuksessa verrataan myös pienpuuhakkeen hakekuutähdehakkeen työllisyys- ja tulovaikutuksia polttoturpeen ja raskaan polttoöl-

jyn vaikutuksiin. Ruukin ja Perhon osalta tarkastelussa on mukana lisäksi lämpöenergian tuotanto.

3. Toteutus

Välittömät työllisyys- ja tulovaikutukset on arvioitu toimitusorganisaatioilta ja urakoitsijoilta saatujen tietojen perusteella. Välillisten tulo- ja työllisyysvaikutusten laskennassa käytetty malli pohjautuu Tilastokeskuksen vuoden 1995 panostuotostaulukoihin.

Tulovaikutusten laskentamallissa arvioidaan ensin korjuuketjujen kustannusrakenteet ja suorat työpanokset. Työkustannukset, toimintaylijäämät, välilliset verot ja tuet ovat välittömiä peruspanoksia. Muut käyttökustannukset ja pääoman vuosikustannukset eritellään eri toimialojen tuotteiksi, kaupan ja kuljetusten marginaaleiksi ja hyödykeveroiksi. Tässä vaiheessa arvioidaan myös, mikä osuus panosten tuottamisesta ja kaupan marginaaleista voisi olla paikallista, mikä osa tehdään muualla Suomessa ja mikä osa tuodaan suoraan ulkomailta. Yleistä panos-tuotomallia käytetään vasta tämän erittelyn tuloksiin. Panos-tuotomallilla saadaan käyttökustannusten ja pääomakustannusten likimääräinen peruspanossisältö.

Kotimaan vaikutukset jaotellaan paikallistasoon ja muuhun Suomeen. Paikallistaso on määritelty niiksi kunniksi, joissa hakkeen tuotanto- ja käyttöketju toimii ja joihin tuotannon ja kuljetuksen välittömät työllisyysvaikutukset ulottuvat.

Kotimaiset tuotannontekijätulot johdetaan edelleen tulonsiirtojen kautta kotitalouksien, kuntien sekä valtion tulojen nettomuutoksiksi. Käytetyssä tulonsiirtovaikutusten laskentamallissa keskeisinä tekijöinä ovat työllistymisen vaikutukset julkisen sektorin verotulojen kasvuun sekä työllisyysturva- ja sosiaalimenojen supistumiseen.

4. Tulokset

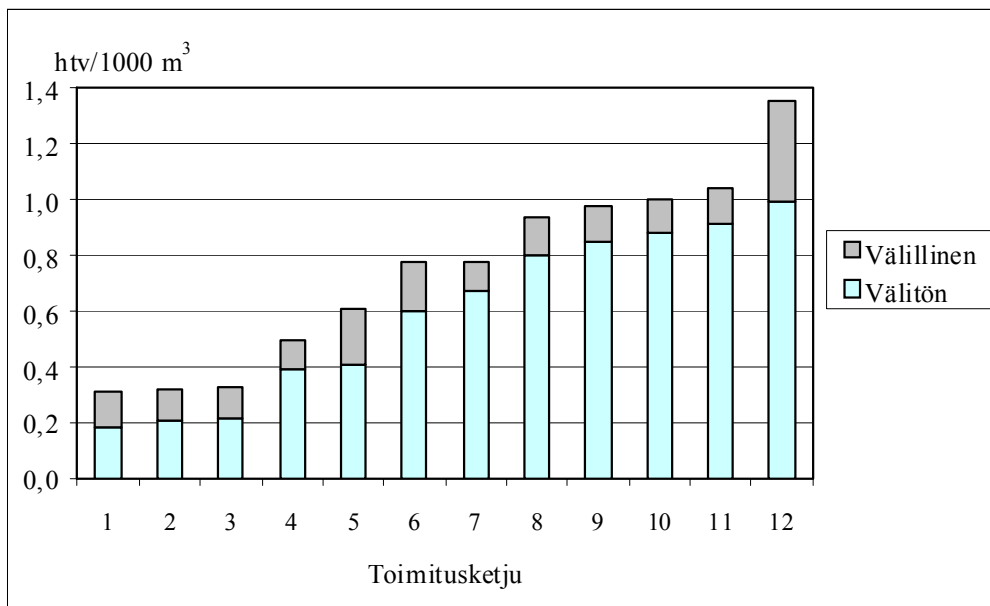
Seuraavassa on joitakin tuloksia projektista. Yhteenvedo case-kohteisiin metsähaketta toimittaneiden toimitusketjujen työllisyysvaikutuksista on esitetty taulu-

kossa 1. Ympärivuotisia työpaikkoja oli lähinnä haketuksessa, hakkeen kuljetuksessa, koneellisessa hakkuussa ja hakkuutähteen paalauksessa. Lisätyötä saivat metsurit, metsänomistajat, osuuskunnan jäsenet, turve- ja puutavararekkojen kuljettajat, metsätraktorin kuljettajat sekä työnjohdon ja hallinnon työntekijät.

Taulukko 1. Metsähakkeen toimitusketjujen toimitukset ja välittömät työllisyysvaikutukset.

	Toimitukset yhteensä m ³	Pienpuuhakkeen osuus	Ympärivuotisia työpaikkoja	Lisätyöpaikkoja	Työllisyysvaikutukset, htv		Toimituksista casekohteeseen
					Välitön	Väillinen	
Perho	3 040	100 %	0	37	2,5	0,5	100 %
Ruukki	9 900	63 %	2	53	6,7	1,1	49 %
Toppila	82 000	28 %	11	?	33	9,4	35 %
Alholmens Kraft	200 000	5 %	24	?	40	23,0	100 %

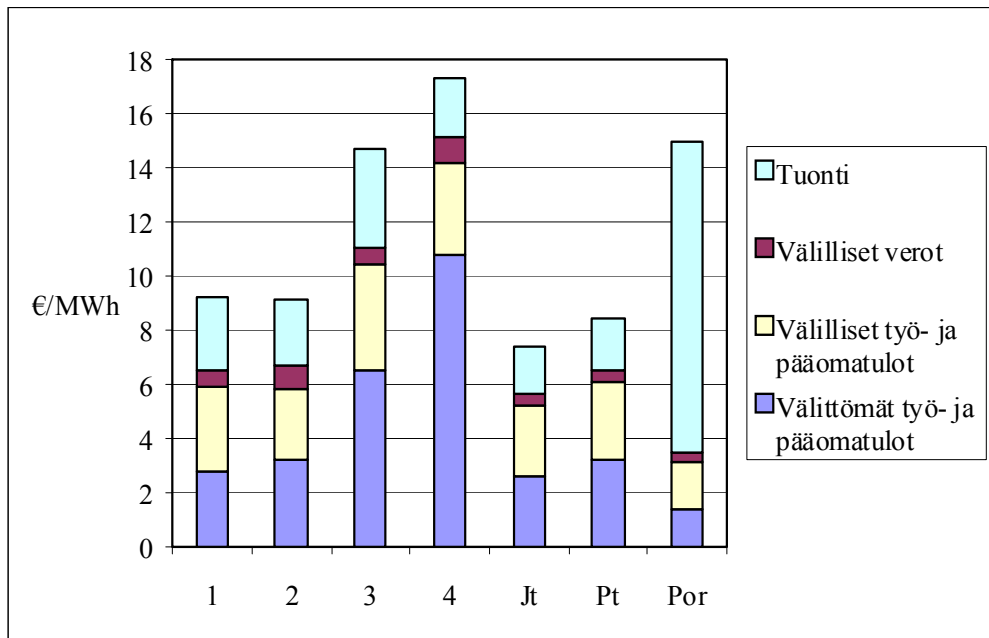
Kuvassa 1 on esitetty metsähakkeen toimitusketjujen työllisyysvaikutuksia henkilötyövuosina 1 000 m³:ä kohti. Täysin koneellistettukin (hakkuu kaato-kasauskoneella) pienpuuhakkeen toimitusketju työllisti noin kaksinkertaisesti tehokkaimpiin hakkuutähteen toimitusketjuihin verrattuna. Suurin työllisyysvaikutus oli pienpuuhakkeen toimitusketjulla, jossa osuuskunnan jäsenet korjasivat energiapuun, hakettivat traktorihakkureilla ja kuljettivat hakkeen traktorien peräkärriissä.



Kuva 1. Metsähakkeen toimitusketjujen työllisyysvaikutuksia, henkilötyövuotta/ 1 000 m³. Toimitusketjujen selitykset alla.

1. Hakkuutähdehake, Alholmens Kraft, risutukkipetju.
2. Hakkuutähdehake, Alholmens Kraft, metsä-/tienvarsihaketus (palstahakkuri), hakkeen autokuljetus.
3. Hakkuutähdehake, Toppila, tienvarsi-/terminaalihaketus (autohakkuri), hakkeen autokuljetus.
4. Hakkuutähdehake, Ruukki, tievarsihaketus (autohakkuri), hakkeen autokuljetus.
5. Pienpuuhake, Alholmens Kraft, kaato-kasauskone, metsä-/tienvarsihaketus (palstahakkuri), hakkeen autokuljetus.
6. Pienpuuhake, Perho, hakkuu maataloustraktorilla, tienvarsihaketus (auto), hakkeen traktorikuljetus.
7. Pienpuuhake, Ruukki, metsurihakkuu, tienvarsihaketus (auto), hakkeen autokuljetus.
8. Pienpuuhake, Perho, metsänomistajien tekemä korjuu, tienvarsihaketus ja hakkeen autokuljetus (hakkurikuorma-auto).
9. Pienpuuhake, Toppila, metsänomistajien tekemä korjuu, tienvarsihaketus (auto) ja hakkeen autokuljetus.
10. Pienpuuhake, Perho, metsänomistajien tekemä korjuu, tienvarsihaketus (auto), hakkeen traktorikuljetus.
11. Pienpuuhake, Ruukki, metsänomistajien tekemä korjuu, tienvarsihaketus (auto), hakkeen autokuljetus.
12. Pienpuuhake, Perho, metsänomistajien tekemä korjuu, tienvarsihaketus (traktori), hakkeen traktorikuljetus.

Hakkuutähdehakkeen ja polttoturpeen hankinnan työllisyysvaikutukset ovat suunnilleen saman suuruisia. Kuvassa 2 on esitetty metsähakkeen ja vertailupolttoaineiden hankinnan tuotannontekijätulojen jakauma. Hakkuutähdehakkeen ja polttoturpeen hankinnan tuotannontekijätulot ovat samaa luokkaa. Raskaalla polttoöljyllä tuonnin osuus on suuri.



Kuva 2. Metsähakkeen ja vertailupolttoaineiden hankinnan tuotannontekijätulojen jakauma, €/MWh. Polttoaineiden valmiste- ja arvonlisäverot sekä veroluonteiset maksut eivät sisälly lukuihin.

1. Hakkuutähdehake, Alholmens Kraft, risutukkiketju
 2. Hakkuutähdehake, Toppila, tienvarsi-/terminaalihaketus, hakkeen autokuljetus
 3. Pienpuuhake, Alholmens Kraft, kaato-kasauskone, metsä-/tienvarsihaketus, hakkeen autokuljetus
 4. Pienpuuhake, Ruukki, metsurihakkuu, tienvarsihaketus, hakkeen autokuljetus
- Jt = jyrsinturve, Pt = palaturve, Por = raskas polttoöljy.

Paikallisia tuotannontekijätuloja kertyi vuodessa Ruukissa 80 000 € ja Perhossa 51 000 €. Ruukissa metsänomistajien osuus tuloista oli noin puolet. Perhossa tulot kohdentuivat kokonaan osuuskunnan jäsenille. Toppilan voimaloiden metsähakkeen hankinnasta paikallisia tuotannontekijätuloja kertyi noin 0,2 milj. €,

josta pienpuuhakkeen osuus oli noin kolmannes. Alholmens Kraftin metsähakkeen hankinnasta tuotannontekijätuloja kertyi noin 1,2 milj. €.

Julkaisut ja raportit

Projekti päättyy helmikuussa 2004. Projektista julkaistaan suomenkielinen raportti ja tiivistelmä englanniksi.

Työsuorituksen määrittäminen hakuutähteen metsäkuljetuksessa – PUUY22

Kaarlo Rieppo
Metsäteho Oy
PL 194, 00131 Helsinki
Puh. (09) 132 5237, faksi (09) 659 202
E-mail: kaarlo.rieppo@metsateho.fi

Abstract

Project title in English: Determining the output and performance in forest haulage of logging residues

Forest haulage of logging residues is usually paid in two stages: advance payment after forest haulage and final payment after chipping, when the site-specific quantity of chips has been measured. The aim was to develop a method of determining the output and performance for forest haulage of logging residue, which supports contract operations and allows the payment of forest haulage immediately after performance. Reliability studies and tests in practice were carried out for the most usable assessed alternative. The productivity of forest haulage of logging residues was also studied.

A method based on the site-specific number of loads and on floating average was developed for the measurement of forest haulage quantities. As a result of the number and size of loads, the amount of logging residues is obtained and used as the basis of payments. The floating average is calculated, e.g., as the mean of load sizes determined in control chipping incidentally, e.g., at intervals of 1–10 sites. The logging residues from these sites are chipped immediately after forest haulage to avoid any changes in the amount of raw material. The method is insensitive to the correctness of site-specific load number, provided the sites of control chipping are chosen at random.

1. Projektissa mukana olevat organisaatiot

Rahoittajina olivat Metsäliitto Osuuskunta, Stora Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj ja Vapo Timber Oy.

Tutkimuksessa tehtyihin hakkuutähteen kuormakoko- ja tuottavuustutkimuksiin osallistui kaksi UPM-Kymmene Oyj:n ja samoin kaksi Metsäliitto Osuuskunnan sopimusurakoitsijaa.

Tutkimusryhmän muodostivat tutkija, dipl.-ins., metsänhoitaja Kaarlo Rieppo, projektitutkija, maat.- ja metsätiet. maist. Sakari Suuriniemi, erikoistutkija, maat.- ja metsätiet. lis. Antti Korpilahti, työntutkijat Reima Liikkanen ja Kari Uusi-Pantti Metsätehosta.

2. Projektin tulokset

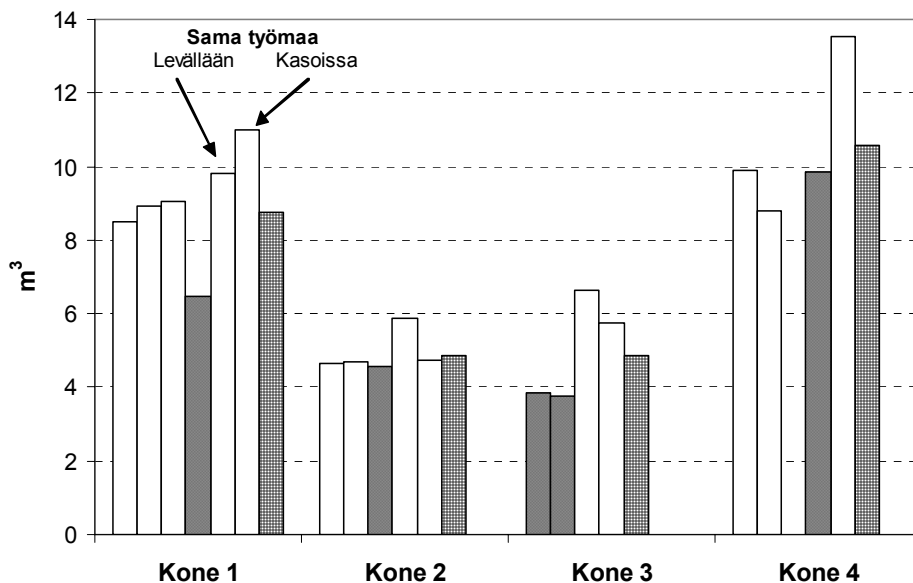
Hakkuutähteen metsäkuljetus on yleisimmin maksettu kahdessa vaiheessa: ennakkomaksu metsäkuljetuksen päätyttyä ja loppumaksu haketuksen jälkeen, kun työmaakohtainen hakemäärä on saatu mitatuksi. Tässä toimintatavassa ongelma-kohtina ovat maksatusten edellyttämä eräkohtainen hakemäärän mittaus, maksatusten välillä raaka-aineessa tapahtuvat, jopa olennaisesti sen määrään vaikuttavat muutokset sekä usein pitkä aika lopputilitykseen. Tavoitteena oli kehittää metsäkuljetussuorituksen määrittämistapa, joka tukee urakointiin perustuvaa toimintaa ja joka mahdollistaa metsäkuljetustyön maksamisen välittömästi suorituksen jälkeen. Vaihtoehdot kuvattiin ja käyttökelpoisimmaksi arvioidusta tehtiin laskennallisia luotettavuustarkasteluita sekä käytännön testauksia. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuutta selvitettiin kelloaika- ja seurantatutkimuksin neljältä kuormatraktorilta.

Hakkuutähteen metsäkuljetusmäärän mittaukseen kehitettiin liukuvaan keskiarvoon perustuva menetelmä. Se perustuu työmaakohtaiseen kuormalukuun ja kontrollihaketuksista laskettavaan kuormakoon liukuvaan keskiarvoon. Kuormaluvun ja kuormakoon tulona saadaan työmaan hakkuutähteen määrä, jota käytetään maksatuksen perusteena. Kuormakoon liukuva keskiarvo lasketaan esimerkiksi viimeisten viiden kontrollihaketuksessa todetun kuormakoon keskiarvona. Kuormakoko on määritettävä aina konekohtaisesti. Kontrollihaketus tehdään

satunnaisesti esimerkiksi 1–10 työmaan välein. Näiden työmaiden hakkuutähteet haketetaan heti metsäkuljetuksen jälkeen, jotta raaka-aineessa ei ehdi tapahtua määrään vaikuttavia muutoksia. Menetelmä ei ole herkkä työmaakohtaisesti ilmoitetun kuormaluvun oikeellisuudelle, kunhan kontrollihaketuskohteiden valinnassa toteutuu satunnaisuus.

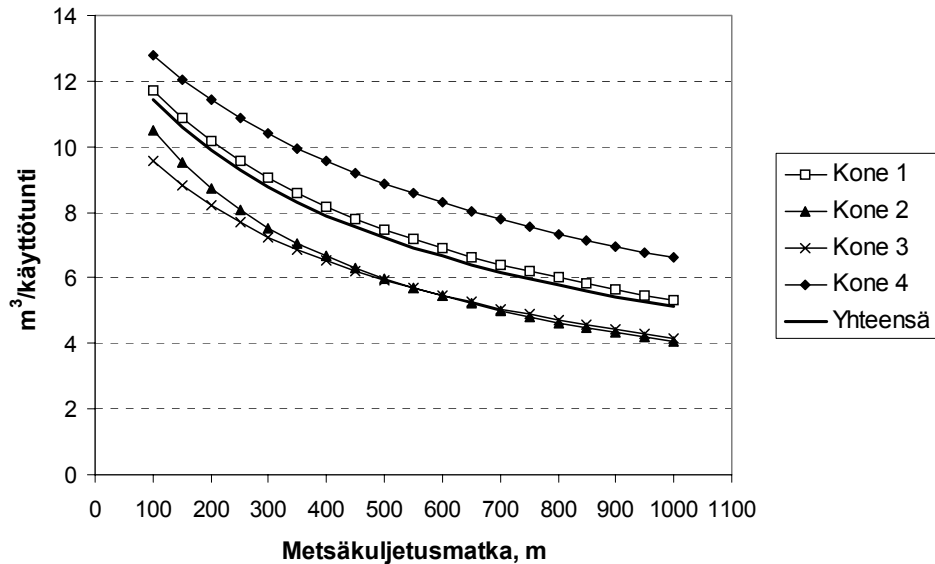
Tutkimuksessa olleiden kuormatraktoreiden kuormatiloja oli muutettu hakkuutähteen kuljetusta varten mm. takaosaa jatkamalla ja karikoita pidentämällä. Siten kuormatila saatiin suurenemaan noin 17 m³:stä 23 m³:iin. Kun kuorma lastattiin kukkuralle, sen kehyskoko oli noin 30 m³. Yhdessä koneessa oli sivulle kallistettavat karikat ja jatkettu kuormatila. Niiden avulla kuormatila saatiin suurennetuksi 16,4 m³:stä lähes 30 m³:iin. Kukkurallisen kuorman kehyskoko oli tällä koneella 43 m³.

Kuormien kiintotilavuudet määritettiin kuormien punnitusten ja materiaalin kuu- tiopainomääritysten avulla. Kuormakoot riippuivat kuormatilan koosta, lastaus- tavasta ja materiaalin ominaisuuksista (kuva 1). Suurimmillaan kuormat olivat 9–11 kiintokuution kokoisia. Seurantatutkimuksessa keskimääräiset kuormat vaihtelivat koneittain 6–10 kiintokuution.



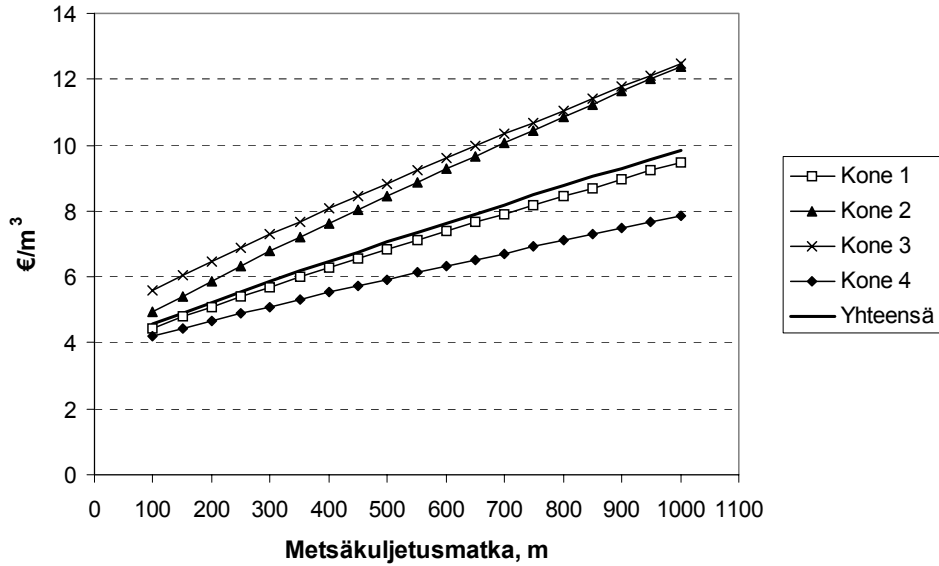
Kuva 1. Täysien hakkuutähdekuormien keskikoot työmaittain, vihreän tähteen kuormat valkoisilla, ruskean harmailla ja keskimääräiset ruudutetuilla pylväillä.

Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus oli käytännössä kyseeseen tulevilla 200–300 m keskikuljetusmatkoilla 7–11 m³ käyttötunnissa (kuva 2). Tuottavuutta tarkasteltiin erilaisten muuttujien suhteen. Todettiin mm, että ruskean hakkuutähteen metsäkuljetus oli noin 80 % tasolla vihreän tähteen kuljetukseen nähden.



Kuva 2. Käyttötuntituottavuus metsäkuljetusmatkan mukaan vihreällä hakkuutähtellä, kun ajouranvarsitiheys on 10 m³/100 m ja kuorman koot aikatutkimuksessa toteutuneet.

Tutkimuksessa olleiden koneiden käyttöaikakustannukset olivat 51,2–53,3 ja keskimäärin 51,2 €/h. Tässä tutkimuksessa saaduilla perusteilla hakkuutähteen metsäkuljetuksen kustannukset olivat keskimääräisillä kuljetusmatkoilla 5–7 €/m³ (kuva 3). Tuoreella tähteellä se merkitsee 2,5–3,5 €/MWh.



Kuva 3. Vihreän hakkuutähteen metsäkuljetuksen kustannukset metsäkuljetusmatkan suhteen. Ajouranvarsiitehyys 10 m³/100 m.

Projektissa syntyneet julkaisut, raportit ja muu materiaali

Rieppo, K. 2002. Hakkuutähteen metsäkuljetusmäärän mittaus. Metsätehon raportti 129. 28.2.2002.

Rieppo, K. 2002. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen ajanmenekki, tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 136. 28.8.2002

Rieppo, K. 2002. Maksimoi kuorma hakkuutähteen metsäkuljetuksessa. Metsäteho-lehti 1/2002.

Rieppo, K. 2001. Työsuoritteiden määrittäminen hakkuutähteen metsäkuljetuksessa – PUUY22. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Jyväskylä, 5.–6.9.2001. Espoo: VTT Symposium 216. S. 103–108.

Rieppo, K. 2002. Työsuoritteiden määrittäminen hakkuutähteen metsäkuljetuksessa – PUUY22. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Joensuu, 18.–19.9.2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 101–107.

Tuotantotekniikka ja -järjestelmät

Hakkuutähteen autokuljetuksen kehittäminen tiivistävällä kuormatilaratkaisulla – PUUT40

Ismo Tiihonen, Samuli Rinne & Heikki Kaipainen

VTT Prosessit

PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh: (014) 672 611, faksi (014) 672 749

E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Abstract

Project title in English: In project 'Developing compressing method for long-distance transportation of loose logging residues' different loading methods and trailer constructions are studied in Finland and Sweden. Compression tests are made with prototype trailer in VTT to define forces and strength of trailer construction.

1. Tausta

Hakettamattoman energiapuun, kuten risutukkien, irtotähteen, pienpuun ja kantojen, kaukokuljetus on keskitettyjen murskainasemien vuoksi lisääntynyt. Metsähakkeen ja risutukkien autokuljetuskustannukset muodostavat noin kolmanneksen hankintakustannuksista. Irtotähteellä kaukokuljetuskustannusten osuus on yli puolet kokonaiskustannuksista.

Nykyisissä risuautoissa ei ole erityisiä tiivistyslaitteita, vaan tiivistys tapahtuu kuormaimella painelemalla. Näin esimerkiksi 140 kehys-m³:n kuormatilaan saadaan kosteudeltaan 40-prosenttisesta tähteestä noin 20 tonnin kuorma. Kun risuautojen tyhjäpaino on tyypillisesti noin 30 tonnia, jää kantavuudesta käyttämättä vielä noin 10 tonnia. Tämän hyödyntämistä voidaan tavoitella esimerkiksi kuormaustekniikkaa kehittämällä tai erillisillä tiivistyslaitteilla.

2. Tavoite

Hankkeen tavoitteena on tutkia hakkuutähteen ja muun irtomateriaalin tiivistämistä autoyhdistelmän kuormatilassa ja suunnitella vaihtoehtoisia tiivistysmenetelmiä ja niihin soveltuvia laiteratkaisuja.

3. Tehtävät

- Tutustuminen nykytilanteeseen irtotähteen yms. kaukokuljetuksessa,
- päältä tiivistetyn kuorman palautumiskokeet VTT:n tutkimuskoelaitteella,
- kuormausmenetelmien vaikutuksen selvittämien tiiviyyteen ja ajanmenekkiin,
- jäännöskuorman määrän arviointi purkamisen jälkeen,
- purkumenetelmien kartoitus ja arviointi,
- tiivistysmenetelmien suunnittelu ja teoreettinen vertailu,
- sopiviksi katsottujen tiivistysmenetelmien koelaitteiden rakentaminen,
- tiivistyskokeet eri materiaaleilla ja tulosten analysointi sekä
- mahdollisten muutostarpeiden ja jatkokehittämiskohteiden kartoitus.

4. Tulokset

Seuraavassa esitetään hankkeen niitä tuloksia, joita kirjoittamisajankohtaan mennessä oli saatu.

4.1 Kokemuksia nykytilanteesta Ruotsissa

Ruotsissa hakkuutähteitä ajetaan irtotavarana lähinnä Norrköpingin voimalaitokselle ja terminaaleihin. Norrköpingissä on kiinteä, keskinopeakäyntinen murskain, johon autot purkavat kuorman yleensä suoraan. Ruotsalaisissakaan risuautoissa ei ole varsinaisia tiivistyslaitteita, mutta kuormaamista helpottavia apulaitteita kylläkin. Vetoautoissa on usein lavan etupäässä hydraulisesti pystyyn nos-

tettava levy, joka estää kourataakassa heiluvia oksia rikkomasta ohjaamoja ja ilmanohjainta. Ajon ajaksi levy käännetään alas vaakatasoon, jolloin sillä saa painettua yksittäisiä ylöstöröttäviä oksia siististi kuormaan. Perävaunuissa on takaosassa hydraulisynterillä pituussuunnassa siirrettävä sisälava, joka liikkuu kiinteän etulavan sisällä. Joissakin malleissa perävaunun takaosassa on kiinteä katto, jolloin katon keskiosassa on hydraulisesti kallistettava ohjainlevy, joka painaa yksittäiset katon alle liu'utettavasta kuormasta sojottavat oksat alas.

Perävaunussa voi olla em. ratkaisun asemesta myös avattavien luukkujen muodostama katto. Luukut on sarakoitu lavan pystytolppiin ja kääntö hoituu pienillä hydraulisyntereillä. Voima riittää muutamien oksien alaspainamiseen, mutta varsinaisesta tiivistämisestä ei voida puhua. Kuorman päälliskerroksen tekeminen kuitenkin helpottuu, kun yksittäisiä oksia ei tarvitse siistiä kuormaimella. Myös tien ja purkupaikan roskaantuminen vähenee, koska kuormattaessa ja purettaessa luukut voi pitää sivuille tai suoraan ylös käännettyinä. Lisäksi luukut estävät tähteiden lentelyn tielle ajon aikana.



Kuva 1. Risuauto Norrköpingissä. Huomaa perävaunun kattoluukut ja vetoauton lavan etupään levy.

Ruotsissa 1990-luvun alussa tehdyn tutkimuksen mukaan kuormien tiiviydeksi on saatu tavallisella kuormaimella 18 % ja suurella 24 %. Käytännössä kuormien tiiviydet lienevät varsinkin suurella kuormaimella hieman pienempiä. Kuormatilojen koko on noin 145 kehys-m³. Kuormausaika on 30–45 minuuttia. Purkamisen kestää noin 20 minuuttia. Purkamisen onnistuisi muuten 10 minuutissa, mutta keskinopeakäyntistä murskaa on syötettävä hieman ripotellen. Mainitut ajanmenekit koskevat vain puhdasta kuormausta ja purkamista eli kääntö, tukijalkojen lasku, vaaitus yms. eivät ole mukana.

4.2 Kokemuksia nykytilanteesta Suomessa

Suomessa risuautoja on tällä hetkellä kymmenkunta. Autojen hyötytilavuudet ovat 100–145 kehys-m³ keskikoon ollessa noin 120 kehys-m³. Myös Suomessa on uusimmissa kärryissä ruotsalaisen mallin mukainen liukuva sisälava, jolloin kärrystä voidaan tehdä pitkä. Kahdessa kärryssä tämä ratkaisu on korvattu sillä, että on käytetty alustana jatkokärryä, jolloin jatkon kohdalta lavan seinät menevät ”haitariksi” tai liukuvat sisäkkäin. Jos pitkiä kärryjä rakennetaan jatkossakin, kuten oletettavaa on, nousee risuautojen keskikoko 135–140 m³:iin. Kuva 2 esittää erästä suomalaista risuautoa.



Kuva 2. Risuauto kärryn liukuvalla sisälavalla.

Akselivälien on oltava puuauton mitoissa kääntyvyyden pitämiseksi riittävänä. Pitkät kärryt on tehty siis peräilytystä jatkamalla. Kevyellä tavaralla tämä ei ole ongelma eli takateli ei ylikuormitu eikä etuteli menetä liikaa painoaan. Ras-kaammilla materiaaleilla, esimerkiksi risutukeilla, ei kärryn perää kannata kuormata aivan täyteen, jottei painonjakauman kanssa tulisi ongelmia.

Eräälle laitokselle helmi–huhtikuussa ja loka–joulukuussa vuonna 2003 tuotujen 748 irtorisu-, kanto- ja pienpuukuorman keskimääräinen tiiviys on ollut 22 %, paino 18 tonnia, keskikosteus 40 % ja energiasisältö kuormaa kohden 54 MWh. Jos kaikki autot olisivat 140-kuutioisia, olisi kuormakoko laskennallisesti 64 MWh. Laskelmasta on poistettu nuppikuormat, koska ne ovat enimmäkseen kaupunkirisuja, joita ajetaan "piha kerrallaan", ja tässä tutkitaan ensisijaisesti metsätähteiden kuljetuksia.

Kuormanteko aika metsässä on ollut keskimäärin 66 minuuttia ja purku aika laitoksella 58 minuuttia. Nämä ajat sisältävät myös aputoiminnot, kuten esimerkiksi tukijalkojen laskun, siivouksen, vaituksen ja murskalle pääsyn odotuksen. Kääntäminen metsäpäässä ja ketjujen laitto ja poisotto eivät sitä vastoin kuulu mainittuun ajanmenekkiin. Laitoksella on hidaskäyntinen murska, jonka pusku-rivarastona toimivalle palkkisyöttimelle autot purkavat omalla kuormaimellaan.

Samalle laitokselle tulleiden 106 risutukkikuorman keskimääräinen energiasisältö oli 78 MWh ja purku aika laitoksella 51 minuuttia. Nämäkin kuormat on purettu autojen omilla kuormaimilla murskan palkkikuljettimelle. Osa autoista on ajanut viittä, osa kuutta peräkkäistä nippua. Jos kaikki autot ajaisivat kuutta nippua, olisi kuormakoko laskennallisesti hieman yli 80 MWh. Vielä tätä suurempiinkin kuormakokoihin on mahdollista päästä ajamalla risutukkeja suurilla risu-autoilla, mutta tällöin risutukkien on oltava kuivia, jottei sallittu kokonaispaino ylity.

Risuautojen ajonopeus on ollut 15–20 % suurempi kuin Metsäteho on puuautoil-le aiemmin esittänyt. Tämä johtunee siitä, että tarkasteluajankohta oli enimmäkseen syksyllä ennen lumen tuloa, mutta myös siitä, että tiet ovat parantuneet, moottoritehot lisääntyneet ja autot muutenkin tulleet paremmiksi ajo-ominaisuuksiltaan. Myös risukuormien keveydellä puukuormiin verrattuna voi olla vaikutusta.

4.3 Tiivistetyn kuorman palautumiskokeet

Aiemmin on havaittu, että tiivistetty kuorma ei välttämättä palaudu paljoakaan ylöspäin vapautettaessa puristus. Tässä tutkittiin, paljonko palautuma käytännössä on, tiivistämällä koekärryyn kuormattuja risuja koko kärryn peittävällä ritilällä alas ja sitten päästämällä puristusaine vähitellen kokonaan pois. Kuva 3 esittää koejärjestelyä.

Kokeissa havaittiin, että tähteen tiivistettynä pitämiseen tarvittava paine laskee nopeasti, kun tiivistävää ritilää päästetään ylöspäin. Kun tiivistyspaine oli aluksi 25 kN/m^2 , tiivistysvoimaa ei tarvittu enää lainkaan, kun tähdepatjaa oli päästetty nousemaan 11 % korkeammalle kuin mitä se oli alimmillaan tiivistyspaineen vaikuttaessa. Kun paine oli aluksi 40 kN/m^2 , vastaava palautuma oli 19 %.

Kärryn seiniin suuntautuva paine oli maksimissaan noin 30 % pystysuuntaisesta tiivistyspaineesta. Sivusuuntainen paine säilyi lähes maksimissaan myös vapautettaessa puristus.



Kuva 3. Palautumiskokeen koejärjestely.

Käytännössä nämä tulokset merkitsevät sitä, että jos käytetään aiemmin mainittua liukuva takalava-idea, voidaan tiivistyslaitteet tehdä ainoastaan etuosaan ja tiivistää niillä myös eteenvedetyn takalavan kuorma, kunhan se tiivistetään palautuman verran alle laitojen yläreunan. Takalavan lujuusmitoituksessa on huomioitava se, että sivusuuntainen paine säilyy myös puristuksen vapauttamisen jälkeen.

4.4 Tiivistyskoelaitteiden suunnittelu, vertailu, rakentaminen ja tulosten analysointi

Käyttökelpoiselle tiivistyslaitteelle asetettiin seuraavia ehtoja:

- Lähtökohtana on, että tehdään maksimikokoinen risuauto, esimerkiksi siten, että vetoauto on tilavuudeltaan 45 m³ ja tyhjäpainoltaan 18 tonnia ja perävaunu vastaavasti 100 m³ ja 12 tonnia. Vetoautoon saadaan kosteudeltaan 45-prosenttisella tähteellä lähes täysi kuorma tiivistämättäkin. Perävaunussa tiiviydeksi pitäisi saada vähintään 28 % täyden 34 tonnin kokonaispainon saavuttamiseksi.
- Tiivistyslaitteiston käytön on oltava turvallista kaikissa olosuhteissa, myös talvella ja pimeässä.
- Tiivistin ei saa painaa liikaa eikä viedä paljoakaan tilaa kuormasta.
- Tiivistys ei saa viedä liikaa aikaa.
- Kuorma tulisi kyetä peittämään ilman kiipeilyä kuorman päällä.
- Peite voi olla osa tiivistyslaitteistoa.
- Tiivistimen tulisi olla sellainen, että se siistisi kuorman päällimmäisen kerroksen.
- Tiivistysperiaatteen tulisi olla myös sellainen, ettei tiivistyksenjälkeistä lisätäyttöä pidä tehdä matalaan tai muuten pieneen tilaan.

Tältä pohjalta pääteltiin, että kansiluukuilla tiivistäminen voisi olla hyvä ratkaisu. Se täyttää teoriassa kaikki em. ehdot. Luukut muistuttaisivat kuvassa 1 olevia, mutta olisivat paljon vankemmat. Kuva 4 esittää koekärryyn asennettuja luukkuja, joilla tiivistäminen on mahdollista. Tiivistys tapahtuu siten, että

luukkujen ollessa auki kuormataan aluksi sopivasti laitojen yli. Tämä ylikuorma painetaan luukuilla alas ja kuten palautumiskokeessa todettiin, se jää painuneeksi, jolloin luukut voidaan avata ja kuormata jälleen lisää. Näin jatketaan, kunnes luukuista voima loppuu tai palautuminen on niin suurta, ettei kuormaus enää onnistu.



Kuva 4. Tiivistävät kansiluukut VTT:n koekärryssä.

Kokeissa todettiin, että kuormakokoa voidaan luukuilla tiivistämällä lisätä pienpuulla ja risuilla noin 50 %, mikä merkitsee 33 % tiiviyyttä ja tiivistyspainetta 27 kN/m². Tämä tarkoittaisi neljää kuormauskertaa. Käytännössä aivan tähän ei päästä mm. siksi, että luukkujen väliin keskelle jäävät puut tekevät kiusaa maksimitiiviyksiä tavoiteltaessa. Alkuehdoissa asetettu 28 %:in tiiviystoive on kuitenkin hyvin mahdollinen.

Seuraavaksi koelaitteeksi rakennettiin pankkopuristin (kuva 5). Se on tavallaan luukkutiivistimen hieman monimutkaisempi ja kehittyneempi versio. Tolppien päissä olevat tiivistyselimet pidetään kuormatessa lavan sivuilla, josta ne noste-

taan tiivistettäessä ylös ja käännetään suoraan. Suorassa asennossa alas vedettäessä tiivistimien runko liukuu tolppissa olevaan hahloon ja estää vaakasuorien tiivistyselimien aiheuttaman momentin kuormittamasta pientä kääntösyylinteriä. Näin voidaan käyttää reilua voimaa.



Kuva 5. Pankkopuristimen koelaite.

Saavutettava tiiviys arvioitiin vähintään samaksi kuin luukkuratkaisulla. Puristuspankoilla on tehty vain esikoe. Toimivuus näytti hyvältä ja luukkutiivistimeen nähden etuna on se, että koko systeemi on nopeasti kehitettävissä kaupalliseksi laitteeksi.

Risuautoilla voidaan ajaa irtotähteiden lisäksi risutukkeja, pienpuuta, puistorisuja, kantoja, rakennus- ja purkujätettä, peltobiomassoja, tasauspätkiä ja jätapaaleja. Jotkin näistä materiaaleista ovat sellaisia, että mahdollisista tiivistyslaitteista on enemmän haittaa lisäpainon ja lisäkustannuksen muodossa kuin hyötyä. Kan-

noilla tiivistysmahdollisuudet todettiin huonoiksi rakenteiden rikkoutumisvaaran vuoksi. Alustavan laskelman mukaan tiivistyslaitteiston hankinta on kannattavaa, kun yli puolet kuljetettavasta tavarasta on sellaista, jossa tiivistysmahdollisuutta voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi.

Kaksivaiheisen murskaimen jatkokehitys puun energiajakeen tuottamiseksi – PUUY31

Ismo Tiihonen
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 638, (0400) 308 555, faksi (014) 672 749
E-mail: ismo.tiihonen@vtt.fi

Juha Korpi
Joutsan Konepalvelu Oy
Kangasniementie 123, 19650 Joutsa
Puh. (014) 8808 100, (044) 2980 848, faksi (014) 8808 120
E-mail: juha.korpi@joutsankp.fi

Abstract

Project title in English: Development of two-phase crusher for production of wood-based fuels

During this project a new two-phase crushing line was developed and built by Joutsan Konepalvelu Oy and VTT Processes. In tests 1398 chip-m³ of wood fuel was made from logging residues, demolition wood waste, forest stumps, and arboricultural residues. Average production capacity was from 40 to 100 chip-m³/h depending on material and energy use 0,6–1,0 kWh/chip-m³ in crushers and 0,9–1,8 kWh/chip-m³ in whole production line including hydraulic feeding crane.

1. Tausta

VTT Prosessit on kehittänyt Puuenergian tutkimusohjelman projektissa yhteistyössä Biowatti Oy:n, Tikomet Oy:n, Paperville Oy:n, Jyväskylän Teknolo-

giakeskus Oy:n ja Tekesin kanssa vuosina 1999–2001 kaksivaiheisen murskainkonseptin, joka soveltuu ensisijaisesti energijakeen tuottamiseen hakkuutähteestä, ensiharvennuspuusta ja suokannoista. Murskainkonsepti soveltuu myös erilaisten rakennuspuumateriaalien ja myös muiden kuivajätteiden murskaukseen energiakäyttöön. Projektin tavoite oli alentaa metsätähteen murskauskustannuksia.

Kaksivaiheisen murskauslinjan etuina voidaan pitää syötön tehokkuutta, kestävämpää rakennetta epäpuhtauksia vastaan ja pienempää tehontarvetta verrattuna perinteisiin murskaimiin ja hakkureihin. Esimurskaimen kehittämisen lähtökohdiana oli Joutsan Konepalvelu Oy:n esimurskainkonsepti. Jälkimurskain on perinteinen veitsityyppinen vasaramurskain. Esimurskaimella murskattava materiaali pienennetään alle 500 mm raekokoon. Esimurskattu materiaali murskataan polttoon soveltuvaksi jälkimurskaimella, jonka jälkeen materiaalin raekoko on alle 50 mm.

Jotta kaksivaiheista murskainlinjaa voidaan lähteä rakentamaan jatkossa kaupallisesti, tarvitaan tietoa laitteiston pitempiaikaisesta toimivuudesta (kapasiteetti, energian kulutus, tehontarve, terien kuluminen jne.) ja murskauskustannuksista. Toisaalta murskainlinjassa on paljon kehittämistarvetta mm. jälkimurskaimen kapasiteetin osalta. Jälkimurskaimen kapasiteettia voidaan kasvattaa esimurskaimen tasolle terästä ja seulastoa sekä syöttöä kehittämällä. Toisaalta jälkimurskaimen kapasiteettia voidaan kasvattaa seulomalla esimurskatusta hakkuutähteestä polttokelpoinen jae pois ennen jälkimurskainta. Esimurskaimen jälkeen hienoaineksen osuus on jopa 50 %.

Toiminnallisten tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan koelaitteistossa esimurskaimen syöttölaitteiston automatisointi tasaisen syötön aikaansaamiseksi esimurskalle, seulaston rakentaminen hienoaineksen erottamiseksi esimurskatusta raaka-ainevirrasta sekä kuljettimien kapasiteetin kasvattaminen.

2. Tavoite

Tutkimuksen päätavoitteena on kehittää kaksivaihemurskainlaitteisto valmiiksi tuotteeksi hakkuutähteen ja rakennusjätteen murskaukseen ja todentaa laitteiston toimivuus ja taloudellisuus pitempiaikaisissa kokeissa.

Valmiin kaksivaihemurskaimen tekniset ominaisuudet ovat: Soveltuu hakkuutähteen ja rakennus- sekä pakkausjätteen murskaukseen, murskaimen kapasiteetti 100 i-m³ tunnissa, raaka-aineen syöttö esimurskaimelle tasainen, murskain varustettu seulalla polttokelpoisen jakeen erottamiseksi esimurskatusta raaka-aineesta, murskain varustettu kivien ja metallien erottamismahdollisuudella raaka-ainevirrasta ennen jälkimurskaa ja kilpailukykyinen muiden murskaimien kanssa niin kiinteänä kuin liikuteltavana versiona.

3. Murskainlinjaston muutostyöt

Kaksivaihemurskauslinjastoon suoritettiin projektissa seuraavat muutostyöt yhteistyössä Joutsan Konepalvelu Oy:n ja VTT Prosessien sekä alihankkijoiden kanssa:

- esimurskaimen syöttöpöydän käytön muuttaminen sähköisestä hydrauliseksi ja automatisointi,
- esimurskaimen poistohuuvan uusiminen,
- sylinterihydrauliikan uusiminen ja muuttaminen sähköohjatuksi lukuun ottamatta jälkimurskaimen seulan ja ylähuuvan aukaisua, jotka manuaalisesti ohjattavia,
- uudet hihnakuuljettimet murskainten välille sekä valmiin materiaalin kuormaukseen kaukokuljetusautoon,
- esimurskaimen jälkeen 1,5 m leveä magneettisten metallien erotusmagneetti kuljetinhihnan yläpuolelle,
- esimurskaimen ja jälkimurskaimen välille kiekko-seula, jolla erotetaan jo polttokelpoinen raekoko materiaalivirrasta ennen jälkimurskainta,
- jälkimurskaimeen uudet terät ja seulaverkko sekä
- koko linjaston sähköistyksen päivitys ja uudet rakenteet vastaamaan nykyisiä turvallisuus- ja toimintavaatimuksia.



Kuva 1. Kaksivaihemurskainlinjasto VTT:llä muutostöiden jälkeen.

4. Koeajot ja mittaustulokset

Projektissa rakennetulla kaksivaihemurskauslinjastolla tehtiin mittauskoeajoja välillä 21.1.2003–30.5.2003 yhteensä 1 398 murske-irtokuutiometrin verran. Raaka-aineina käytettiin viereiselle Rauhalahden voimalaitokselle normaalisti murskattavaksi tulleita toimituseriä siten, että raaka-ainetoimittaja toi kuorman VTT:n koealueelle, jossa murskaus suoritettiin VTT:n hakekuorma-autoon, jolla sitten valmis murskattu materiaali toimitettiin voimalaitoksen vastaanottoon. Taulukossa 1 on lueteltu kokeissa käytetyt materiaalit sekä mitatut keskimääräiset, minimi- ja maksimituotokset irtokuutioina valmista murskettua tehotunnissa. Murskausajot olivat nopeita, alle tunnin mittaisia, koska valmiin materiaalin kuljetusauton kapasiteetti oli enimmillään 50 kuutiometriä. Toimiessaan murskauslinjasto on kuitenkin varsin vähän ajonaikaisia säätö- ja huoltotoimenpiteitä vaativa, joten mikäli raaka-aineen saatavuus murskainta syöttävälle puutavaranoisturille sekä valmiin murskeen poisto ovat jatkuvia ja häiriöttömiä, on käytötuntiteho mahdollista saada hyvin lähelle tehotuntituottavuutta.

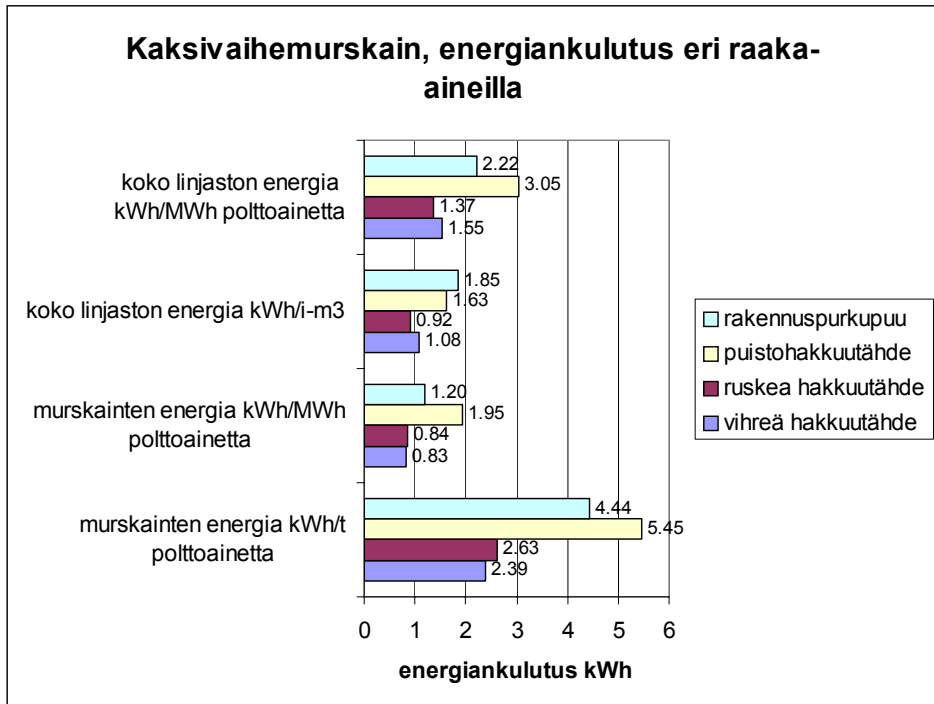
Taulukko 1. Murskatut materiaalit ja murskauslinjan tuottavuus.

	määrä i-m ³	keskiarvo	minimi	maksimi
vihreä hakkuutähde	492	64	42	82
ruskea hakkuutähde	555	100	69	135
puistorisu	117	40	33	48
rakennuspuujäte	170	50	30	68
hakkuutähdekannot	64	66	66	66

Murskauslinjastossa mitattiin tehonkulutukset sekä esimurskaimesta että jälkimurskaimesta. Tehomittaus perustui käyttömoottoreita (nimellisteho 75 kW molemmissa murskaimissa) syöttäviltä taajuusmuuttajilta saatavaan virtaviestiin, joka on suhteessa taajuusmuuttajan moottorille syöttämään sähkötehoon. Tiedonkeruujärjestelmänä oli koeajoissa tietokoneeseen liitetty dataloggeri. Taulukossa 2 sekä kuvassa 2 on mitattujen tiedonkeruujärjestelmien keskiarvot, esimurskaimen ja jälkimurskaimen tehonkulutus erillisinä sekä yhteenlaskettuna, molempien murskaimien tehonkulutus kyseisiä kuormia kohti, mittauskuormista laskettu murskainten tehonkulutus tuotettua irtokuutiometriä, raaka-ainetonnina sekä raaka-aineen energiasisältöä (MWh) kohti. Taulukossa on lisäksi koko linjaston energiankulutus eri raaka-aineilla murskattua irtokuutiometriä ja raaka-aineen energiasisältöä kohti.

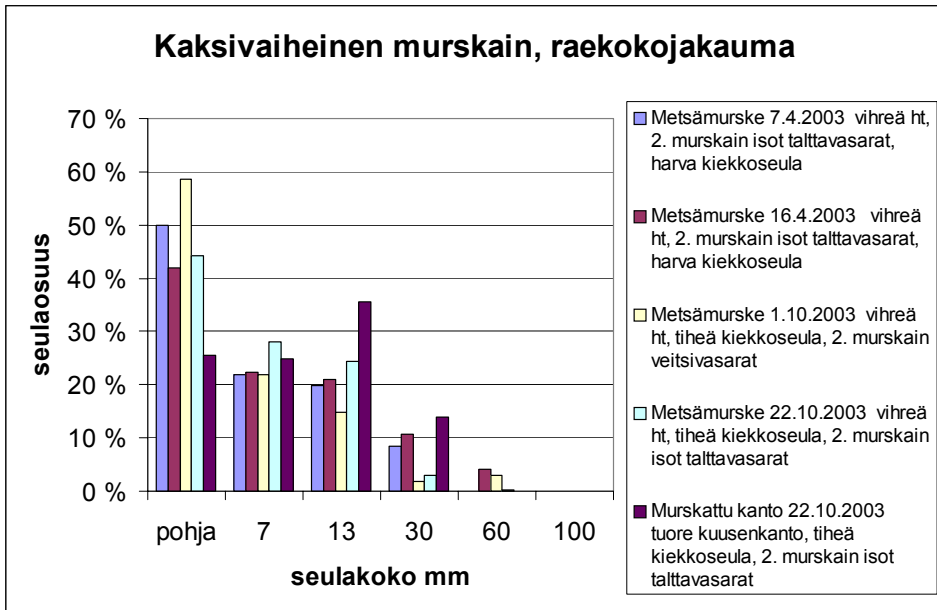
Taulukko 2. Murskainten sekä koko linjaston keskimääräiset energiankulutukset.

	esimurskaimen energia kWh	jälkimurskaimen energia kWh	murskainten energia yhteensä kWh	murskainten energia kWh/i-m ³
vihreä hakkuutähde	10,70	9,68	20,38	0,588
ruskea hakkuutähde	12,46	10,71	23,17	0,604
puistohakkuutähde	27,38	21,67	49,05	1,044
rakennuspurkupuu	9,11	10,86	19,96	0,998
	murskainten energia kWh/t polttoainetta	murskainten energia kWh/MWh polttoainetta	koko linjaston energia kWh/i-m ³	koko linjaston energia kWh/MWh polttoainetta
vihreä hakkuutähde	2,385	0,832	1,079	1,546
ruskea hakkuutähde	2,628	0,840	0,922	1,374
puistohakkuutähde	5,450	1,946	1,634	3,048
rakennuspurkupuu	4,436	1,201	1,846	2,221



Kuva 2. Murskainten ja koko murskainlinjan energiankulutus eri raaka-aineilla.

Koeajoissa tuotettujen polttoainemurskeiden raekoko oli yleisesti voimalaitoskäyttöön kelpavaa lukuun ottamatta yksittäisiä tikkuja, joita muovikiekkaisen kiekoseulan läpi pääsi menemään. Linjastoon vaihdettu metallikiekkoinen tiheämpi kiekoseula toimi optimaalisesti, tuotettu polttoaine oli kelvollista myös aluelämpökokoluokan laitosten syöttölaitteisiin. Kuvassa 3 ja taulukossa 3 on raekokoanalyysien tulokset, jotka on analysoitu SCAN-CM 400:80 (hake) -menetelmän mukaisesti. Kuvassa 4 on kaksivaiheisella murskaimella vihreästä hakkuutähteestä tuotettua murskettä.



Kuva 3. Raekokoanalyysien tulokset.

Taulukko 3. Raekokoanalyysien tulokset.

	pohja	7 mm	13 mm	30 mm	60 mm	100 mm	keskimääräinen raekoko mm	D50-luku mm
Metsämurske 7.4.2003 vihreä ht, 2. murskain isot talttavasarat, harva kiekko-seula	49,90 %	21,85 %	19,84 %	8,37 %	0,01 %	0,03 %	12,01	7,03
Metsämurske 16.4.2003 vihreä ht, 2. murskain isot talttavasarat, harva kiekko-seula	41,85 %	22,39 %	20,89 %	10,73 %	4,10 %	0,03 %	16,36	9,18
Metsämurske 1.10.2003 vihreä ht, tiheä kiekko-seula, 2. murskain veitsi-sasarat	58,53 %	21,88 %	14,81 %	1,87 %	2,88 %	0,03 %	10,61	5,98
Metsämurske 22.10.2003 vihreä ht, tiheä kiekko-seula, 2 murskain isot talttavasarat	44,32 %	28,10 %	24,40 %	3,02 %	0,15 %	0,01 %	11,10	8,21
Murskattu kanto 22.10.2003 tuore kuusen-kanto, tiheä kiekko-seula, 2 murskain isot talttavasarat	25,26 %	24,84 %	35,59 %	13,99 %	0,00 %	0,01 %	17,34	12,90



Kuva 4. Vihreästä hakkuutähteestä tehtyä valmista mursketta.

5. Koeajohavainnot ja kehityskohteet

Koeajojakson aikana ei murskaimissa ollut merkittäviä kulumisia tai vaurioita. Uudet hihnakuuljettimet toimivat odotetulla tavalla ongelmitta myös talviolosuhteissa.

Kiekkoseulan toiminta aiheutti koeajon aikana eniten huollontarvetta murskauslinjassa. Koeajossa käytetty muovikiekkoinen seula oli muussa hankkeessa valmistettu kevyt esiprototyyppi, jota ei rakenteiltaan ja voimansiirrotaan ollut tarkoitettu raskaaseen tuotantoajoon. Linjaan vaihdettu metallikiekkoinen tiheämpi kiekkoseula on tukevarakenteisempi ja tarkoitettu tuotantokäyttöön. Jatkossa vastaavanlaisia murskauslinjastoja toteutettaessa kannattaa välttää materiaalivirran kaventamistarvetta sellaisessa vaiheessa (esimurskaimen jälkeen), jossa materiaalin joukossa on yksittäisiä pitkiä kappaleita, jotka saattavat alkuunsaada tukkeentumia.

Murskattavat materiaalit, erityisesti hakkuutähde ja kannot sisälsivät melko runsaasti epäpuhtauksia, lähinnä kiviä. Suurimmat kivet (> 0,5 m) pystyi erottelemaan jo syöttöpöydällä tai kasassa nosturilla, mutta runsaasti kiviä myös murskattiin. Halkaisijaltaan alle 30 cm:n kivi meni esimurskaimesta läpi ongelmitta ja pilkkoontui noin 10 cm:n kappaleiksi. Esimurskaimen pilkkomat kivet hienontuivat jälkimurskaimessakin ilman merkittäviä vasaroihin tulleita jälkiä. Rakennuspuujätteen sisältämät naulat ja muut metallikappaleet irtosivat lähes poikkeuksetta esimurskaimessa, jolloin hihnamagneetti pystyi poimimaan ne pois materiaalivirrasta. Yksittäiset lattaraudat ja kulmaraudat (materiaalipaksuus alle 6 mm) eivät haitanneet esimurskaimessa ja poistuivat magneetilla, murskaimella pilkottiin mm. kuorma-auton käytöstä poistetun rahtilavan laidat ongelmitta.

Koeajojakson perusteella merkittävimmät jatkokehitystarpeet kaksivaihemurskauslinjassa ovat materiaalivirran sujuvuuden varmistaminen eli kavennusten välttäminen, sekä laitteiden tukijalkojen sijoittaminen siten, että linjan alle varisevan materiaalin puhdistaminen on helppoa. Tuotantomalleissa on jo otettu käyttöön tarvittavat rakenteiden muutokset. Myös hieman korkeampi esimurskaimen syöttöpöydän aukon avautuma (+ 10 cm) auttaisi kokonaistenkin kantojen sopimista murskattavaksi. Tuotantolaitteessa kannattaa lisäksi tuoda esimurskaimen syöttöpöydän nopeuden ja vastaterän säätömahdollisuus myös nosturiin, mikä helpottaa kapasiteetin optimointia ja tarvittavien muutosten tekemistä esim. yksittäisiä lumppitukkeja varten, jolloin syöttönopeutta kannattaa hieman hidastaa verrattuna hakkuutähteen ajoon.

Kantopuun korjuu ja metsäpolttoaineiden prosessointi – PUUY36

Seppo Paananen
UPM Metsä
PL 32, 37601 Valkeakoski
Puh. 020 416 3818, faksi 020 416 120
E-mail: seppo.paananen@upm-kymmene.com

Abstract

Project title in English: Harvesting of stumps and processing of forest energy wood

The aim of the project is to develop a new harvesting chain for stumps by developing a harvester for loosening, cutting, and cleaning of stumps and for hauling the stump fuel to a landing site, to assemble an equipment system for long-distance transports, including landing site, load size, loading, possible splitting of stumps and unloading direct into a crusher, to design a multifuel crusher considering the properties of forest fuels and experience from the use of present crushers, and to define the productivity and cost-efficiency of the overall production technology for stumps and to compare these with those of the present solutions and other forest fuels.

Three concepts of stump harvester are under development. The aim is to develop a combined harvester, which also hauls the stumps from the forest. One harvester was tested in practice. A special truck was designed to maximize the load space and its availability. The plan was realised with a haulage contractor, and four trucks are so far in operation.

Operation experiences of multifuel crushers were surveyed. The specification of a receiving system was defined at 550 GWh/a, achievable only by recovering all logging residues and stumps. The stump potential for a surface unit is 1.2–1.5-fold compared to that of logging residues. Stump harvesting enables soil

preparation and manual or mechanical tree planting. Effects of the use of logging residues and stumps were also surveyed. The project will be continued in 2004.

1. Projektin taustaa

Vaikka metsätähteiden korjuupotentiaalia on vielä runsaastikin hyödyntämättä, metsäenergian käytössä ollaan kuitenkin edistymässä siten, että paikallisesti edullisimmat puupolttoaineet voivat olla jo täysin hyödynnetty tai jopa ylikysytyjä. Uutta kattilakapasiteettia on rakenteilla ja suunnitteilla paikallisten metsäpolttoaineiden varaan. Kun polttoaineiden kuljetusetäisyys on rajallinen, syntyy voimalaitoksen ympärille eri metsäpolttoaineille eri säteisiä hankinta-alueita siten, että hakkuutähdepolttoaineita kannattaa kuljettaa kauempaa, mutta tietyn kustannusrajan jälkeen voimalan lähellä on kannattavaa hankkia nuorten metsien kunnostuspuuta ja jopa kantoja sen sijaan, että hakkuutähteiden hankinta-aluetta laajennettaisiin.

Kantoja on alettu hyödyntää jo 1970-luvun alussa tavoitteena ensin teollisuuspuu ja sittemmin energiakäyttö. Nämä yritykset jäivät kesken mm. tuontipuuväylien avauduttua ja energiakriisien lauettua. Tältä ajalta jäi kuitenkin käyttökelpoista teknologiaa, josta hyvä esimerkki on Pallarin kantoharvesteri, joka on edelleenkin kaupallinen tuote.

UPM:n otsikkoa koskeva hanke aloitettiin tammikuussa 2003 ja jatkuu 2004.

2. Projektin tavoitteet

Kehityshankkeen tavoitteena on rakentaa kantojen hyödyntämiseen soveltuva uusi korjuuketju, jolla oletetaan voitavan parantaa tuottavuutta ja alentaa kustannuksia. Tavoitteeseen pyritään kehittämällä kannon nostoon korjuri, jolla voidaan irrottaa kannot maasta, paloitella ne sopivaan kokoon, poistaa kannoista liika kivennäismaa ja kuljettaa polttoaine autokuljetusvarastoon. Hankkeessa sovitetaan metsävaiheen teknologia korjuuketjuun siten, että osavaiheet optimoituvat sekä käyttöpaikkamurskaukseen että varastomurskaukseen perustuvassa tuotantomenetelmässä.

Toisena tavoitteena on rakentaa käyttöpaikkamurskausetjuun soveltuva kaukokuljetuksen kalustoratkaisu, jossa optimoituu varastoille pääsy, kuormakoko, lastaus ja kantojen mahdollinen paloittelu sekä purkaus suoraan murskaimelle.

Kolmantena tavoitteena on suunnitella monipolttoainemurskain, jossa on mahdollisimman pitkälle huomioitu metsästä tulevien monipolttoaineiden ominaisuudet ottaen huomioon olemassa olevien murskaimien käyttökokemukset.

Neljäntenä tavoitteena on selvittää koko kantojen tuotantoteknologian tuottavuus ja kustannustehokkuus hankkeessa toteutettujen pilottilaitteiden avulla suhteessa nyt käytössä oleviin ratkaisuihin sekä muihin metsäpolttoaineisiin. Hankkeessa selvitetään myös kantoresurssin hyödynnettävissä oleva potentiaali ja sen vaikutus voimalaitoksittaiseen polttoainehankintaan ja sen logistiikkaan.

Kannonnostolla on käytettävästä teknologiasta riippumatta vaikutusta korjuuta seuraavaan metsän uudistamisvaiheeseen – sekä synergiaetuja että mahdollisesti myös riskejä. Kantojen hyötykäytön seurannaisvaikutukset metsän uudistamisessa sekä ympäristövaikutusten osalta selvitetään olemassa olevan tiedon perusteella. Sen perusteella on lisäksi arvioitava lisätutkimustarve yhdessä tutkimuslaitosten kanssa.

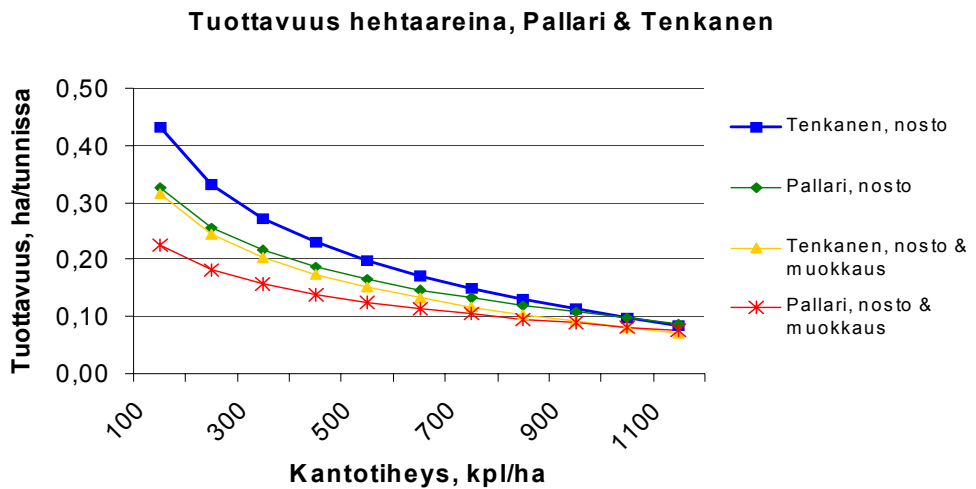
3. Toteutus ja tuloksia

3.1 Kantokorjurin rakentaminen

Hankkeen puitteissa ja osin sen ulkopuolella kehitetään kolmeakin erilaista kantokorjurikonseptia, joiden pääideana on ollut pyöräkonesovitteinen, puomiin integroitava kannon nostoon ja lastaukseen pystyvä agregaatti. Yhdistelmällä pyritään kombikoneratkaisuun – ts. koneella voidaan suorittaa myös metsäkuljetus noston yhteydessä. Kantokorjureista yhtä on ehditty testata tuotannossa syksyllä 2003 ja kehitystyö jatkuu keväällä 2004.

3.2 Kantojen korjuun tuotos ja kustannusrakenne

Kantoja korjataan telakoneilla ja erilaisilla nostoagregateilla (kuva 1). Metlan toimesta selvitettiin käytössä olevien tuotantokonseptien tuotos ja kustannusrakenne. Vertailu muiden metsäpolttoaineen korjuuketjujen tuotoksiin ja kustannuksiin osoitti, että kantoresurssi on kilpailukykyinen niiden kanssa, varsinkin jos autokuljetuksen hyötykuormaa voidaan kasvattaa nykyisestä.



Kuva 1. Kannonoston tuottavuus ha/h.

3.3 Autokuljetuskaluston kehittäminen

Hankkeessa suunniteltiin erikoisauto, jossa kuormatila ja sen käytettävyys pyrittiin maksimoimaan. Suunnitelma toteutettiin kuljetusyrittäjän toimesta ja kokemusten myötä tuotannossa on nyt neljä autoa. Palakokoa, kuormausta ja ajojärjestelyjä kehittäen on päästy 25–30 tonnin kuormakokoon, jolloin kuorman energiasisältö on 80–100 MWh. Kuvassa on kuormattavana metsäpolttoaineiden kuljetukseen soveltuva erikoisauto.



Kuva 2. Metsäpolttoaineiden kuljetukseen soveltuva erikoisauto.

3.4 Monipolttoainemurskaimen kehittäminen

Olemassa olevien murskainten käyttökokemukset on selvitetty, ja Kymin Voimalle suunnitellun vastaanottojärjestelmän spesifikaatio on määritelty tasolle 550 GWh/a erilaista metsästä lankeavaa prosessoimatonta polttoainetta. Määrä on mahdollinen vain hyödyntämällä korjuutoiminnan yhteydessä syntyvä kaikki hakkuutähde ja kantomateriaali.

3.5 Kantopotentiaalin inventointi

Metsäosaston leimikkoaineisto vuosilta 2000–2002 parametroidiin kantojen korjuukelpoisuuden mukaan, ja kantopotentiaali määritettiin VTT:n toimesta. Tulosten mukaan kantopotentiaali pinta-alayksikköä kohti on 1,2–1,5-kertainen verrattuna hakkuutähteiden määrään. Korjuukelpoinen pinta-ala on kuitenkin pienempi kuin hakkuutähteiden. Koko metsäosastotasolla kannoilla on kuitenkin merkittävä rooli suunniteltaessa metsäpolttoaineiden osuutta voimalaitosten polttoainehuollossa.

3.6 Kantojen korjuun puuntuotannolliset vaikutukset

Kannonnosto mahdollistaa joko maanmuokkauksen ja manuaalisen istutuksen tai muokkaavan koneistuksen yhdistämisen siihen. Kannonnosto antaa synergiaetuja molemmissa vaihtoehdoissa. Maanmuokkauksen teknistä laatua kannonnoston yhteydessä selvitettiin määrittelemällä istutuskohteiden lukumäärä, mättään korkeus, rakenne (humus/kivennäismaan suhde mättäissä) ja maanpinnan humuskerroksen rikkoutuminen. Relevantti tieto viedään toimintaohjeisiin, lisäselvitystarpeet määritellään ja mahdolliset vaikutukset metsikön kasvatukseen yleensä arvioidaan.

Kannonnosto on tapa torjua juurikäpää. Metlan selvityksessä varmistettiin, että kantokasat eivät kuivuessaan toimi juurikäävän levittäjinä.

3.7 Kantojen korjuun ympäristölliset vaikutukset

Hakuutähteiden ja kantojen hyödyntämisen aiheuttamista seurannaisvaikutuksista kysyttiin 14:ltä valtakunnalliselta asiantuntijalta heidän mielipidettään. Asiantuntijat arvioivat toiminnan vaikutuksia joukolla kriteereitä skaalalla "positiivinen > neutraali > negatiivinen vaikutus". Tulokset ohjaavat toiminnan rajoituksia ja määrittelevät selvitystarpeita.

3.8 Jatkotoimenpiteet

Hanke jatkuu vuonna 2004, jolloin tavoitteiden mukaisesti testataan kantokorjuurikonseptin realistisuus sekä koko kantokorjuuketjun tuotokset ja kustannukset verrattuna muihin metsäpolttoaineisiin.

Kantoja itsenäisesti nostava laite – PUUY37

Janne Saario
Hykomet Oy
Autoilijankatu 18, 20780 KAARINA
Puh. (02) 5186 200, faksi (02) 4691 151
E-mail: janne.saario@hykomet.fi

Abstract

Project title in English: Stump pulling device

Annually huge amount of stumps has been left in the forests, even though it would be economically parctical to use stumps for energy production. The lack of suitable equipment has slowed down the utilisation of stumps.

The target of this project is to develop a machine, which would extract the stumps economically and utilise them more effectively.

1. Taustaa

Metsien päätehakkuualueille jää vuosittain hyödyntämättä noin 10–15 miljoonaa m³ kantoja. Tällä hetkellä kannoista pystytään hyödyntämään ainoastaan noin 5–10 %. Sopivien nostolaitteiden puuttuminen on jarruttanut kantojen hyötykäyttöä.

Kantojen lämpöarvo on moninkertaisesti suurempi kuin esim. metsähakkeella. Energiämäärältään tämä metsiin jäävä kantomäärä vastaa noin 20–40 TWh:a. Näin ollen kannot sisältävät valtavasti käyttämätöntä potentiaalia, jota voitaisiin käyttää hyväksi valtakunnallisessa energiantuotannossa. Nostamalla kantojen käyttöastetta voitaisiin mahdollisesti vähentää kivihiilen ja öljyn käyttöä energialähteenä. Puu on hiilidioksidipäästöjen kannalta huomattavasti edullisempi vaihtoehto kuin fossiiliset polttoaineet. Tällä hetkellä jo moni voimalaitos pystyisi hyödyntämään kantoja energialähteenä. Kantojen hyötykäyttöä ovat tähän mennessä rajoittaneet lähinnä kalliit nostokustannukset.

Myös erilaisten sienitautien leviämisen estämiseksi olisi edullista, jos kannot pystyttäisiin poistamaan metsästä. Esimerkiksi tyvilahoa aiheuttavan juurikäävän (*Fomes annosus*) leviämistä uusiin taimiin pystyttäisiin todennäköisesti estämään poistamalla vanha kanto.

2. Projektin tavoite

Tämän projektin tavoitteena on kehittää joko metsäkoneessa tai kaivurissa käytettävä lisälaitte, jolla kantojen nosto olisi taloudellisesti kannattavaa. Tämä mahdollistaisi kantojen käytön varteenotettavana energialähteenä.

Projektin alussa kehitettävälle laitteelle asetettiin tavoitteet, jotka sen tulisi toteuttaa:

- Kannon noston olisi tapahduttava nopeasti.
- Kanto tulisi saada halkaistua, jotta se kuivuisi paremmin.
- Vain oleellinen osa kannosta ja juurista nousisi ylös, ettei maisemakuva eikä maasto tärveltyisi tarpeettomasti. Pienjuuristo saisi jäädä paikalleen.
- Vanha kannon paikka toimisi hyvänä istutusalueena uusille taimille.
- Laitteen tulisi olla kohtuuhintainen.

Tavoitteena on saada esimerkiksi metsäkoneurakoitsijoille lisälaitte, jolla pystyttäisiin tasaamaan kausivaihtelua. Koneiden käyttöastetta saadaan nostettua, kun samalla kalustolla voidaan hiljaisena aikana nostaa kantoja.

3. Projektin toteutus

Hykomet Oy vastaa projektin toteutuksesta. Pääyhteistyökumppanina on Markku Järvinen (Kappelinranta Oy). Muita yhteistyökumppaneita ovat UPM Kymmene ja Timberjack.

Projekti on tarkoitus toteuttaa valmistamalla laitteesta prototyyppi, ja sen testitulosten perusteella kehittää laitetta edelleen aina mahdolliseen teolliseen tuotantoon asti. Projektin on tarkoitus päättyä kesällä 2004.



Kuva 1. Ylös nostettu kanto.

4. Tulokset ja niiden hyödyntäminen

Suunnitteluvaiheen ja markkinatutkimuksen jälkeen laitteen prototyyppi valmistui kesällä 2003. Syksyn aikana laitteella suoritettiin koeajot ja testaukset. Talven ja kevään 2004 aikana on tarkoitus analysoida testien tulokset ja jatkokehittää laitetta edelleen.

Laadunhallinta, vastaanotto ja käyttö

Metsäteollisuuden vastapainetuotannon tehostaminen – PUUT17

Pekka Ahtila
Teknillinen korkeakoulu
PL 4100, 02015 TKK
Puh. (09) 4513 622, faksi (09) 4513 674
E-mail: pekka.ahtila@hut.fi

Abstract

Project title in English: Enhancement of Back-Pressure Power Production in Pulp and Paper Mills

The aim of the study was to develop methods for drying of bark and forest residues and drying of sludge in pulp and paper industry. The fuel drying enhances combined heat and power production. Multi stage drying was applied to bark and residue drying, and partial vacuum evaporation to sludge drying. Special attention was paid to the utilisation of secondary heat in drying. Main objectives in the multi stage drying study were the optimisation of process parameters, the economy and control of drying system, and the effect of drying on combined heat and power process. The topics in sludge drying were the drying properties of sludge, energy consumption, and process alternatives.

1. Tausta

Kiinteiden biopolttoaineiden (kuori, metsähake, jätepuu) osuus metsäteollisuuden tehdaspolttoaineista on n. 20 %. Tehdaspolttoaineilla tuotetaan sellu- ja paperitehtaan tarpeisiin sekä lämpöä että sähköä. Kiinteiden biopolttoaineiden kosteuspitoisuus vaihtelee vuodenajasta, säätilasta, varastoinnin pituudesta ja polttoaineen alkuperästä riippuen n. 50–60 %:iin (vettä per kokonaisuudessa). Kuivauksella biopolttoaineen energiasisältöä voidaan nostaa n. 20 %. Teoriassa voimalaitoksen sähköntuotantokapasiteetti lisääntyy samassa suhteessa. Kun kuivauksen energiankulutus, häviöt, polttoaineen realistinen saavutettavissa

oleva loppukosteus ja kuivauksen vaikutus voimalaitosprosessiin huomioidaan, on sähköntuotannon lisäys n. luokkaa 10 %. Polttoaineen kuivauksella parannetaan myös voimalaitoksen palamisprosessin hallintaa sekä vähennetään palamisen päästöjä ja kuiva-ainetappioita mahdollisen varastoinnin aikana. Epäsuorasti kuivauksella voidaan vähentää myös muiden polttoaineiden aiheuttamia päästöjä korvaamalla niitä biopolttoaineilla.

Metsäteollisuuden vesien käsittelyssä syntyy lietteitä, jotka joko uusiokäytetään tai hävitetään polttamalla tai sijoittamalla kaatopaikalle. Erityisesti jätevesilietteiden uusiokäyttö on hankalaa ja kaatopaikkasijoitus tulevaisuudessa mahdollonta tai ainakin kustannuksiltaan kohtuutonta, jolloin useissa tapauksissa lietteiden energiakäyttö on järkevin tapa hävittää jäteliete. Lietteiden korkean vesipitoisuuden vuoksi ne tulee kuitenkin kuivata ennen polttoa. Yleisin tapa käsitellä jätevedenpuhdistuksen lietteitä on yhdistää kuitupitoinen primääriliete ja biologisen puhdistuksen ylijäämäliete (aktiiviliete) ja kuivata seos mekaanisesti ennen polttoa. Primäärilietteen mekaaninen kuivaus onnistuu suhteellisen helposti, kun taas aktiivilietteen käsittely on hankalampaa. Aktiivilietteen osuuden kasvaessa mekaaninen vedenerotus vaikeutuu ja polttoon joudutaan ohjaamaan hyvin kostaetaa lietettä, mikä voi rajoittaa kattilan höyryntuotantoa ja jopa heikentää palamisprosessia. Ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan entistä parempia lietteen kuivausmenetelmiä.

2. Tavoite

Biopolttoaineiden osalta keskeisenä tavoitteena on ollut metsäteollisuuden vastapainetuotannon tehostaminen biopolttoaineen kuivauksen avulla sellu- ja paperitehtaan muodostamassa metsäteollisuusintegraatissa. Erityisesti huomiota on kiinnitetty integraatin sekundäärilämpöjen hyödyntämismahdollisuuksiin polttoaineen kuivauksessa. Biopolttoaineen kuivausmenetelmänä on tarkasteltu ns. monivaihekuivausprosessia.

Polttoaineen kuivauksen ja sekundäärilämpöjen osalta tutkimus on jakaantunut seuraaviin pääosa-alueisiin:

- Biopolttoaineen monivaihekuivausprosessi
- Biopolttoaineen kuivumiskokeet
- Polttoaineen alkukosteuden määrittämissä mahdollisuudet kuivausilman ulostulokosteus- tai lämpötilamittauksen perusteella
- Metsäteollisuusintegraatin sekundäärilämpötaseen määrittäminen.

Lietteiden osalta päätavoitteena on ollut selvittää alipainehaihdutusta lietteiden kuivausmenetelmänä, jolloin matalassa lämpötilassa olevia sekundäärilämpöjä voitaisiin käyttää kuivauksessa. Lietteen korkea kuiva-ainepitoisuus mahdollistaisi lietteen polttoainekäytön pelkän jätteen hävittämisen sijaan. Lietteiden osalta keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat olleet:

- Aktiivilietteen haihtumisominaisuudet
- Haihdutuksen lämmöntarve ja lietteen polttoainepotentiaali
- Nykyiset menetelmät ja tilanne lietteen käsittelyssä
- Haihdutustekniikat ja kuivausprosessin optimointi.

3. Toteutus

Tutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratoriossa. Vastuullisena johtajana toimi professori Pekka Ahtila ja tutkijoina tekn. lis. Jukka-Pekka Spets, dipl.-ins. Henrik Holmberg ja dipl.-ins. Ilkka Hippinen.

Tutkimuksessa tilattiin alihankintatöitä Satakunnan ammattikorkeakoulusta (kuivauksen päästömittaukset), VTT:ltä (lietteiden polttoaineanalyysit) ja TKK:n vesihuoltotekniikan laboratoriosta (lauhdutettujen haihteiden analyysit).

Biopolttoaineen monivaihekuivauksen osalta projekti on jakaantunut mm. seuraaviin osa-alueisiin: prosessin kehittäminen, integrointi voimalaitosprosessiin, alustavien mitoitusparametrien valintaperusteet ja kuivauksen päästöjen arviointi. Kuivumisilmion ja kuivausprosessin alustavien mitoitusparametrien selvittämiseksi projektissa tehtiin kuivumiskokeita laboratoriokokoluokan kiintopetire-

aktorissa. Kuivauksen päästöjä selvitettiin eräällä lämmityslaitoksella tehdyillä mittauksilla.

Lietteiden haihtumisominaisuuksia ja alipainehaihdutuksen soveltuvuutta kuivaukseen selvitettiin laboratorio-olosuhteissa pyöröhaihduttimella. Taselaskelmien avulla selvitettiin lietteiden kuivaamisen vaatimia lämpöääriä ja lietteiden polttoainepotentiaalia. Mahdollisia kuivaustekniikoita selvitettiin kirjallisuustutkimuksena. Kokemuksia ja suunnitelmia lietteiden käsittelyssä kartoitettiin 11 tehdasta kattaneella tehdaskierroksella.

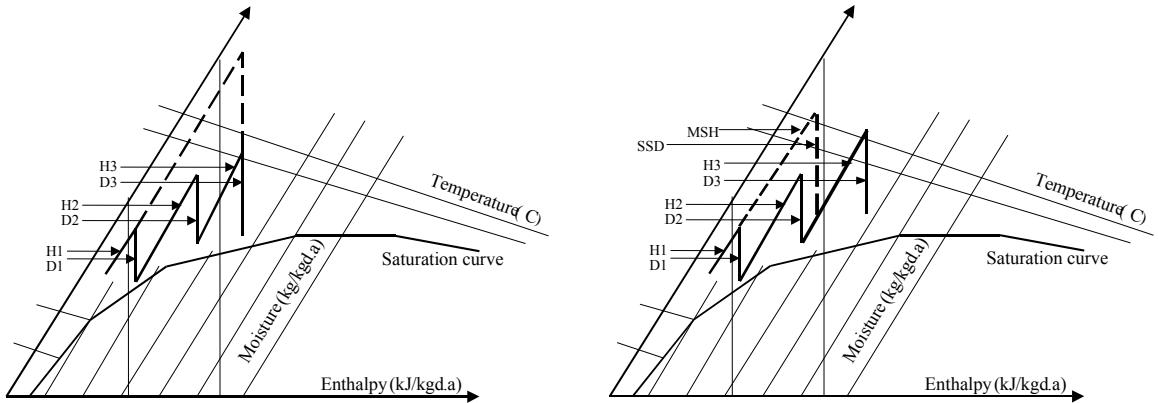
4. Tulokset

4.1 Monivaihekuivauksen prosessikuvaus

Monivaihekuivauskonseptia on ensisijaisesti kehitelty biopolttoaineiden kuivaamiseen sellu- ja paperitehtailla, joissa poltetaan runsaasti biopolttoaineita ja kuivaukseen on saatavilla lämpöenergiaa. Monivaihekuivauksessa kuivauskaasu on ilmaa. Kuivausprosessi koostuu useammasta erillisestä kuivausvaiheesta, joiden välissä samaa kuivausilmavirtaa esi- ja välilämmitetään. Ensisijaisina lämmönlähteinä on tarkoitus käyttää sekundäärilämpöjä (yleensä 50–90 °C olevia lämpimiä vesiä), vastapainehöyryä (paine n. 3–4 bar) ja väliottohöyryä (paine n. 10–12 bar). Myös muut lämmönlähteet ovat mahdollisia. Viimeisestä kuivausvaiheesta ilma johdetaan kattilan palamisilmaksi kuivauksessa vapautuneiden päästöjen eliminoimiseksi. Kuivauskaasun kosteuden pienentämiseksi kuivaussysteemeissä voi olla savukaasupesuri viimeisen kuivausvaiheen jälkeen.

Kuvassa 1 on verrattu monivaihekuivausta yksivaiheiseen kuivaukseen Mollier-diagrammissa. Kuvassa 1 a ilman kosteuden muutos on sama yksivaiheisessa ja monivaiheisessa kuivauksessa. Kuvasta nähdään, että ilman syöttölämpötilat ovat kuitenkin monivaihekuivauksen kaikissa vaiheissa alhaisemmat kuin yksivaiheisessa kuivauksessa. Välilämmitysten ansiosta kuivausilman lämmitykseen voidaan käyttää matalalämpöisempiä energianlähteitä, mikä parantaa kuivauksen energiatehokkuutta (tai mieluummin "exergiatehokkuutta"). Kuvassa 1 b ilman syöttölämpötila monivaihekuivauksen viimeiseen kuivausvaiheeseen on sama kuin yksivaiheisessa kuivauksessa. Kuvasta huomataan, että kuivausilman kosteuden muutos on suurempi monivaihekuivauksessa kuin yksivaiheisessa. Tämä

tarkoittaa käytännössä sitä, että kuivausilman massavirta on pienempi monivaihekuivauksessa kuin yksivaiheisessa.



Kuva 1. Monivaihekuivaus ja yksivaihekuivaus Mollier-diagrammissa. Kuvassa a) ilman kosteuden muutos on sama monivaihe- ja yksivaihekuivauksessa. Kuvassa b) ilman sisäntulolämpötila viimeiseen kuivausvaiheeseen on sama monivaihekuivauksessa kuin yksivaihekuivauksessa. H on lämmitysvaihe ja D kuivausvaihe monivaihekuivauksessa. SSD on kuivausvaihe ja MSH on lämmitysvaihe yksivaihekuivauksessa.

4.2 Monivaihekuivauksen integrointi CHP-prosessiin

Kuivauksen ensisijainen tarkoitus on lisätä vastapainevoimantuotantoprosessista (CHP-prosessi) saatavan sähkötehon määrää sekä parantaa palamisprosessin hallintaa. Sähköntuotannon nettolisäystä laskettaessa on huomioitava kuivauksen lämmönkäyttö, kuivurin omasähkökäyttö ja omasähkökäytön muutokset voimalaitosprosessissa. Kuivauksen lämmönkäytön kannalta on olennaista, kuinka paljon sekundäärilämpöjä kuivauksessa käytetään, ja voiko kuivausilman lämmitykseen käytettävä höyry vielä paisua turbiinissa vai ei.

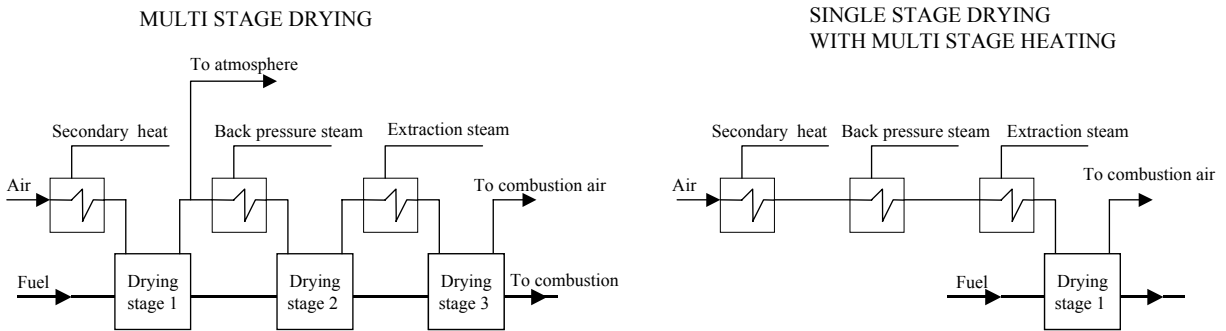
Sekundäärilämpöjen käyttö pienentää höyryntarvetta kuivauksessa. Kuivausprosessia mitoitettaessa on tärkeitä selvittää kuivaukseen käytettävissä olevien sekundäärilämpöjen massavirrat ja lämpötilatasot sekä niiden saatavuuden vuo-

tuinen vaihtelu. Mikäli höyry voi vielä paisua turbiinissa, pienentää höyrynkäyttö sähköntuotannon nettolisäystä. Erityisesti lauhdeperällä varustetuissa turbiineissa sähköntuotannon nettolisäys voi vaihdella merkittävästi riippuen siitä käytetäänkö höyryä kuivaukseen vai ei. Lisäksi on syytä muistaa, että voimalaitoksen ensisijainen tehtävä on toimittaa riittävästi prosessihöyryä tehtaan tarpeisiin joka hetki, mikä asettaa reunaehdot höyrynkäytölle.

Itse kuivurissa eniten sähköä kuluttavat puhaltimet, joiden sähkönkulutus riippuu koko kuivaussysteemin painehäviöstä (lämmönvaihtimet, ilmanavat, varsinainen kuivausosa) sekä kuivausilman tilavuusvirrasta. Koska matalilla kuivauslämpötiloilla kuivausilman tilavuusvirta kasvaa, lisää matalien kuivauslämpötilojen käyttö kuivurin omasähkökäyttöä. Voimalaitosprosessissa kuivaus vaikuttaa ennen kaikkea savukaasupuhaltimien ja pumppujen sähkökäyttöön. Savukaasupuhaltimien sähköntarve pienenee hieman, jos polttoaineen kuiva-ainevirta ei kuivauksen seurauksena muutu. Mikäli kuiva-ainevirta kasvaa, lisääntyy savukaasupuhaltimien sähköntarve. Syöttöveden massavirran suureminen ja myös todennäköinen painehäviöiden kasvu lisää pumppauksen sähköenergiankulutusta.

4.3 Kuivaussysteemin alustavien mitoitusparametrien valinta

Mitoitusparametrien valinnassa on pääasiassa tarkastelu sitä, kuinka kuivaussysteemin lämpöenergiankäyttö tulisi toteuttaa kuivauksen kokonaiskustannusten minimoimiseksi, kun kuivausilman lämmitykseen on saatavilla eri lämpötilatason omaavia lämmönlähteitä. Kuivauksen kokonaiskustannuksissa on huomioitu sekä investointi- että käyttökustannukset. Kuivauksen kokonaiskustannusten laskennassa on verrattu kahden vaihtoehdoisen kuivaussysteemin kokonaiskustannuksia. Kuivaussysteemit eroavat toisistaan ilman lämmityksen osalta, ja ne on esitetty kuvassa 2. Esimerkkikuivurina on käytetty jatkuvatoimista ristivirtaperiaatteella toimivaa kuivuria, jossa ilma puhalletaan kuljettimen ja kiinteän polttoainepedin läpi (ilma voidaan yhtä hyvin myös imeä pedin läpi). Mitoitusparametrien valinnassa on myös kiinnitetty huomiota pedin korkeuden ja virtausnopeuden valintaperusteisiin ristivirtakuivurin tapauksessa. Käytännössä kuivurina voidaan käyttää muunkintyyppistä konstruktiota.



Kuva 2. Monivaiheinen kuivaussysteemi ja yksivaiheinen kuivaussysteemi monivaiheisella lämmityksellä.

Optimaalisen pedin korkeuden valintaperiaatteita tutkittiin kokeellisesti laboratoriotutkimuksen kiintopetikuivurissa (ks. kuva 3) säännöllisen muotoisilla kuusipartikkeleilla, jotka vastaavat ominaisuuksiltaan parhaiten metsähaketta. Tavoitteena oli selvittää, miten pedin korkeus on valittava kuivausilman massavirran minimoimiseksi, kun muut mitoitusparametrit (ilman lämpötila ja kosteus, polttoaineen ominaisuudet jne.) tunnetaan. Mittaustulosten perusteella pedin korkeus on valittava vähintään sellaiseksi, että poistoilma on täysin kylläistä siinä päässä kuivuria, johon kostea polttoaine syötetään. Kuivurin mitoituksen kannalta tämä tarkoittaa, että monivaihekuivauksessa pedin korkeuksien on oltava erisuuruiset eri kuivausvaiheissa kuivausilman sisääntuloarvoista riippuen. Tulokset pätevät ainoastaan yksivaiheiseen ristivirtakuivuriin.

Laskentatapauksissa on oletettu, että saatavilla on sekundäärilämpöä, vastapainehöyryä ja väliottohöyryä. Kuivaussysteemien kokonaiskustannusten eroa on vertailtu, kun eri lämmönlähteiden saatavuus, investoinnin pitoaika, polttoaineen loppukosteus ja sähkönhinta ovat vaihdelleet. Kuivauskustannusten minimoimiseksi jokaiselle laskentatapaukselle on muodostettu kustannusfunktio reunaehtoinen kuivausilman massavirran funktiona.

Tulosten perusteella kuivaussysteemien välinen paremmuus riippuu ratkaisevasti siitä, kuinka paljon väliotto/vastapainehöyryä on saatavilla kuivaukseen verrattuna sekundäärilämmön saatavuuteen. Jos höyryä on saatavilla vähän, joudutaan valtaosa kosteudesta poistamaan sekundäärilämmöillä, ja tällöin monivaihekuivaus on yleensä edullisempi kuivaussysteemi. Tämä johtuu siitä, että höyry-

määrä ei riitä lämmittämään kuivausilmaa yksivaiheisessa kuivauksessa korkeaan lämpötilaan, jolloin ilman massavirta jää suureksi. Ilman ulospuhalluksen ansiosta kuivausilma voidaan kuitenkin monivaihekuivauksen höyryvaiheissa lämmittää korkeaan lämpötilaan, jolloin korkean kuivauslämpötilan edut voidaan hyödyntää näissä vaiheissa.

Mikäli höyryteho riittää lämmittämään kuivausilman yksivaiheisessa kuivauksessa tarpeeksi korkeaan lämpötilaan, on se tavallisesti edullisempi kuivaussysteemi kuin monivaihekuivaus, kun investoinnin takaisinmaksuaika on lyhyt. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että ilman viipymäaika välilämmitysten takia on monivaihekuivaussysteemissä pidempi kuin yksivaiheisessa. Tämän vuoksi investointikustannukset muodostuvat monivaihekuivauksessa suuremmiksi, vaikka ilman massavirta onkin monivaiheisessa systeemissä pienempi. Mitä korkeampi on sähkönhinta sitä edullisempi monivaihekuivaus on yksivaiheiseen verrattuna.

4.4 Kuivauksen päästöt

Biopolttoaineiden kuivauksessa vapautuu pääasiassa erilaisia orgaanisia yhdisteitä. Yhdisteet muodostuvat kondensoituvista hydro- ja lipofiilistä yhdisteistä sekä kondensoitumattomista kaasuihin. Kondensoituvia hydrofiilisiä yhdisteitä ovat pienimolekyyliset haihtuvat hapot (esim. muurahais- ja etikkahappo), alkoholit (esim. metanoli ja etanoli), aldehydit, furfuraalit sekä hiilihydraatit. Kondensoituvia lipofiilisiä yhdisteitä ovat mm. rasva-, hartsi- ja hydroksidivaihapot sekä rasva-alkoholit. Kondensoitumattomat kaasuyhdisteet muodostuvat lähinnä hiilidioksidista sekä vähäisemmässä määrin vedystä, hiilimonoksidista, metaanista ja C₂-C₄-hiilivedyistä.

Kuivauslämpötilalla on huomattava vaikutus päästöjen muodostumiseen. Aikaisempien tutkimustulosten mukaan alle 100 °C:n kuivauslämpötiloissa päästöjen muodostuminen on vähäistä, mutta korkeimmissa lämpötiloissa päästöjä alkaa vapautua huomattavasti. Monivaihekuivauksen sekundääriämpövaiheessa kuivauslämpötila on yleensä alle 100 °C, ja kuivausvaiheen jälkeen poistoilma pitäisi olla mahdollista johtaa ympäristöön. Asian varmistamiseksi biopolttoaineen kuivauksen päästöt määritettiin kokeellisesti.

Kokeissa selvitettiin poistokaasun sekä poistokaasusta lauhdutetun veden pitoisuudet. Polttoaineina käytettiin rankahaketta ja tuoretta metsähaketta, ja kuivaus toteutettiin kiintopetireaktorissa. Kokeet tehtiin kummallekin polttoaineelle sisääntulolämpötiloilla 80 °C ja 100 °C. Mittaukset toteutettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun toimesta Porin metsäopiston hakevoimalaitoksella, ja päästöjen analysoinnin teki Outokumpu Research Oy.

Tulosten perusteella kaasumaisten komponenttien pitoisuudet poistokaasussa ovat pieniä, ja samat pitoisuudet haihtuvat metsiin jäävistä hakkuutähteistä. Sen sijaan lauhdevesien fosforipitoisuudet ovat korkeita, eikä niitä voida johtaa vesistöihin ilman esikäsitelyä. Monivaihekuivauksen kannalta tulokset vahvistavat käsitystä, että poistoilma voidaan tarvittaessa johtaa sellaisenaan ympäristöön sekundäärilämpövaiheen jälkeen.

4.5 Kuivumiskokeet kiintopedissä

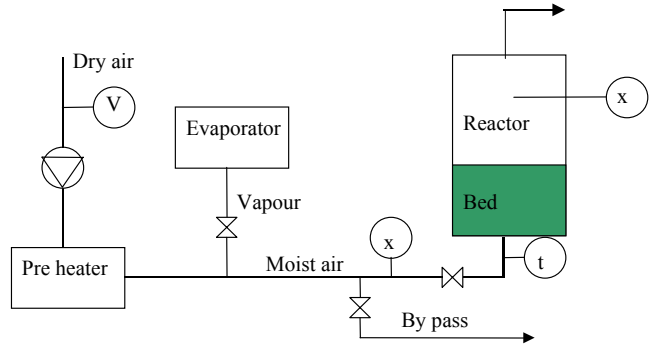
Kuivumiskokeilla oli seuraavat tavoitteet

- Polttoainepartikkeleiden ja ilman välisen konvektiivisen lämmönsiirtoker-toimen selvittäminen
- Vakiokuivumismallin pätevyysrajojen selvittäminen kiintopetikuivauksessa
- Polttoaineen alkukosteuden arviointi poistoilman kosteus/lämpötila-mittauksen perusteella.

Kokeet suoritettiin laboratorioelaitteella, jonka virtauskaavio on esitetty kuvassa 3.

Measurement points
 t = temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 x = moisture ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{da}}$)
 V = mass flow control (l_n/min)
 $t_{\text{max}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V_{\text{max}} = 400\text{ l}_n/\text{min}$
 $v_{\text{max}} \approx 1.1\text{ m/s}$

Dimensions
 - reactor diameter 100 mm
 - reactor height 400 mm

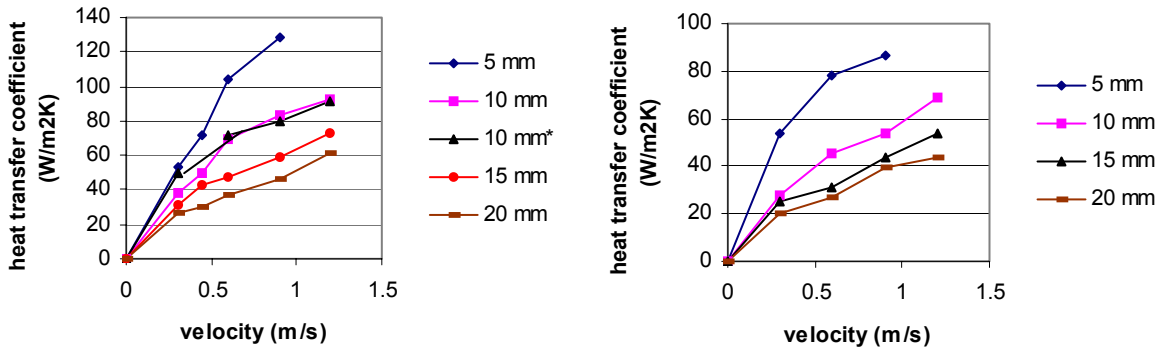


Kuva 3. Laboratoriokokeiden koelaitte.

4.6 Lämmönsiirtokertoimet ja vakiokuivumismallin pätevyysalue

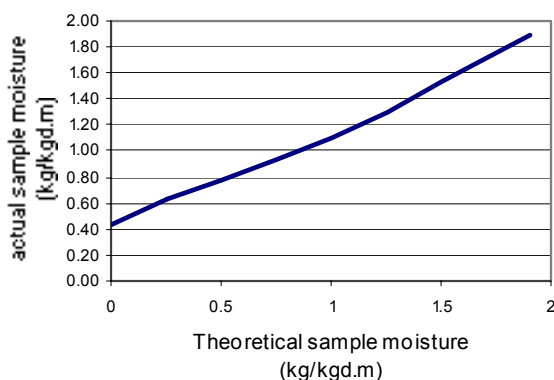
Kiinteän aineen kuivuminen jaetaan tavallisesti kolmeen perättäiseen vaiheeseen: alkulämpenemisen vaihe, vakiokuivumisnopeuden vaihe ja hidastuvan kuivumisnopeuden vaihe. Alkulämpenemisen vaihe on normaalisti lyhyt kuivumisaikaan verrattuna, eikä sitä yleensä tarvitse huomioida teoreettisissa laskelmissa. Vakiokuivumisnopeuden vaiheessa partikkelien sisäiset ominaisuudet eivät rajoita kuivumista, ja kuivumisnopeus riippuu ainoastaan kuivumisympäristön olosuhteista. Hidastuvan kuivumisnopeuden vaiheessa kuivumisnopeus hidastuu kosteuspitoisuuden alentuessa, ja partikkelin sisäiset ominaisuudet rajoittavat eniten kuivumisnopeutta.

Kun kuivumisympäristön ominaisuudet tunnetaan vakiokuivumisnopeuden vaiheessa, on kuivumisnopeuden laskemiseksi tiedettävä ainoastaan partikkelien ja ilman välinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokertoimien määrittämiseksi kiintopedissä tehtiin säännöllisen muotoisilla kuusipartikkeleilla kokeita kuvan 3 koelaitteella. Kokeissa selvitettiin lämmönsiirtokertoimien suurusluokka eri kokoisilla partikkeleilla ja virtausnopeuksilla. Koesarjat tehtiin kahdella ilman sisääntulolämpötilalla, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kokeiden perusteella lasketut lämmönsiirtokertoimet on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kokeellisesti määritetyt lämmönsiirtokertoimet. Ilman nopeus on ilmoitettu arinan vapaata poikkipinta-alaa kohti. Partikkelien todelliset mitat: 5 mm (2,5 x 5 x 5 mm), 10 mm (5 x 20 x 20 mm), 15 mm (7,5 x 30 x 30 mm), 20 mm (10 x 40 x 40 mm).

Vakiokuivumismallin pätevyysaluetta kiintopetikuvauksessa selvitettiin vertaamalla pedin todellista kosteudenmuutosta vakiokuivumismallin avulla laskettuun kosteudenmuutokseen. Koska kuivausilman ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi polttoainepedin korkeuden funktiona, jaettiin polttoainepeti kymmeneen osakerrokseen. Kussakin osakerroksessa kuivausympäristö oletettiin vakioksi, ja seuraavan osakerroksessa ilman sisääntulolämpötila ja -kosteus olivat aina edellisen osakerroksen ulostuloarvot. Lämmönsiirtokertoimina käytettiin kokeellisesti määriteltyjä kertoimia. Palakoolla ja virtausnopeudella on jonkun verran vaikutusta mallin pätevyysalueeseen. Ratkaisevin merkitys mallin pätevyysalueeseen on pedin kosteudella. Kun muut mallin pätevyysalueeseen vaikuttavat tekijät jätetään huomioimatta, voidaan tulosten keskiarvona esittää, kuinka hyvin teoreettisen vakiokuivumismallin avulla laskettu koko pedin kosteudenmuutos vastaa pedin todellista kosteudenmuutosta (ks. kuva 5).



Kuva 5. Partikkelien alkukosteuden vaikutus ilman ulostulokosteuden arvoon. Partikkeleiden koko on 5 x 20 x 20 mm, ja lukumäärä jokaisessa kokeessa 100 kpl.

4.7 Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen sellu- ja paperitehtaalla

Sekundäärilämmöiksi kutsutaan prosessivirtoihin ja sitä kautta edelleen kierto-vesiin, savukaasuihin, vesihöyryihin ja hönkiin sitoutunutta lämpöä. Syntynyt sekundäärilämpö pyritään hyödyntämään joko lämmittämällä sen avulla suoraan muita materiaalivirtoja tai ottamalla se talteen kuumien ja lämpimien vesien sekä lauhteiden muodossa. Vesiin ja lauhteisiin talteen otettua sekundäärilämpöä voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi prosessi- ja lisävesinä tai niiden lämpösisältö voidaan edelleen siirtää johonkin muuhun käyttökohteeseen.

Biopolttoaineiden ja lietteiden kuivauksen kannalta on oleellista tietää kuivaukseen saatavilla olevien sekundäärilämpöjen määrät ja lämpötilatasot sekä sekundäärilämpöjen saatavuuden vaihtelu. Lisäksi on huomioitava, että sekundäärilämmöille on myös vaihtoehtoisia käyttökohteita kuin kuivaus. Mitä korkeampi sekundäärilämpöjen lämpötila on, sitä enemmän taloudellisesti kannattavia käyttökohteita lämmölle yleensä löytyy. Tällöin paras käyttökohde on valittava jonkun tietyn, normaalisti taloudellisen tunnusluvun, perusteella (esim. investoinnin takaisinmaksuaika tai nettonykyarvo).

Oulun Stora Enson sellu- ja paperitehtaalle tehtiin tutkimusprojektiin liittyen diplomityö, jonka tavoitteena oli tutkia integroidun sellu- ja paperitehtaan lämmönkäytön säästämahdollisuuksia sekä taloudellisesti kannattavimpia säästökohteita. Lämmönkäytön säästöpotentiaalia kartoitettaessa on oleellista selvittää tehtaan sekundäärilämpötase sekä kesä- että talvikaudelle. Etsimällä prosesseille vaihtoehtoisia prosessikytkentöjä voidaan sekundäärilämpöä hyödyntää tehokkaammin, ja sitä kautta saada säästöjä primäärihöyryn käytössä. Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen vaatii yleensä laiteinvestointeja, kuten lämmönvaihtimien ja savukaasupesurien hankintaa. Tutkimuksen perusteella potentiaalisia lämmön-säästökohteita ovat kemiallisesti käsiteltävän veden esilämmitys, puuaineksen sulatus, tehtaan kaukolämpöveden lämmitys ja kuumavesisäiliön ohitus. Sähköhinnasta riippuen investointien takaisinmaksuajat vaihtelevat alle puolesta vuodesta runsaaseen neljään vuoteen. Biopolttoaineiden ja lietteiden kuivauksen kannattavuutta ei työssä selvitetty.

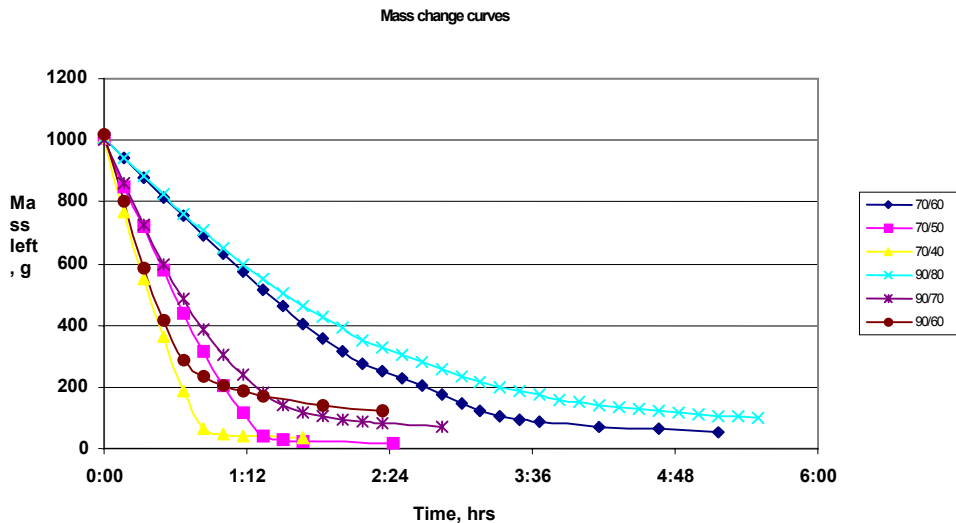
4.8 Lietteiden kuivaus

4.8.1 Haihtumisominaisuudet

Aktiivilietteen kuivumisominaisuuksia alipainehaihdutuksen olosuhteissa tutkittiin kokeellisesti. Työ tehtiin pyöröhaihduttimella kolmen eri tehtaan aktiivilietteilä kiehumislämpötiloja 40–80 °C vastaavissa paineissa.

Kokeissa lietenäytettä haihdutettiin ja punnitsemalla haihtuneen veden määrää määritettiin haihtumisnopeus. Haihtumistapahtuman aikana seurattiin muutoksia lietteen rakenteessa. Näytteen kuiva-ainepitoisuus ennen ja jälkeen kuivauksen määritettiin. Lauhdutetun haihteen puhtaus analysoitiin osassa kokeita.

Massanmuutoskäyrät yhdelle lietteelle eri olosuhteissa on esitetty kuvassa 6. Kuvassa on nähtävissä, että lämpötila ero hauteen ja lietteen välillä vaikutti huomattavasti kuivausnopeuteen. Haihduttimen paineella sen sijaan oli vähemmän vaikutusta.



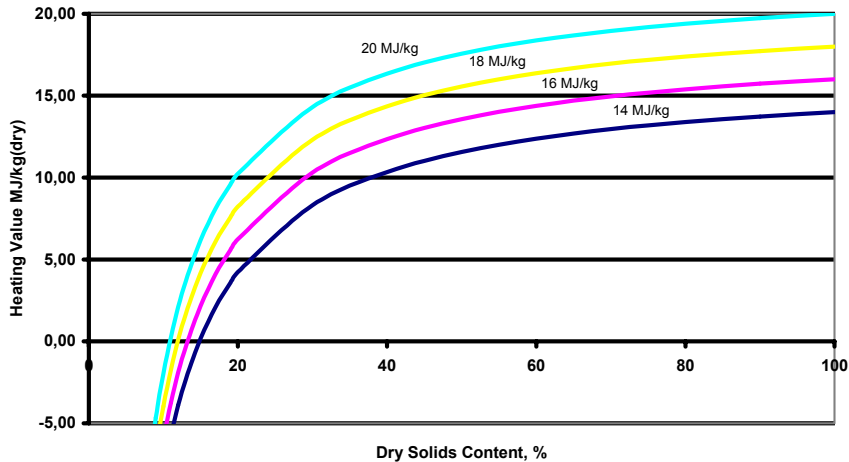
Kuva 6. Lietteiden haihdutuksen massanmuutoskäyrät. Selitteessä olevista luvuista ensimmäinen on hauteen lämpötila ja toinen veden kiehumislämpötila.

Alipainehaihdutuksen toimivuuden kannalta koetulokset olivat lupaavia. Laboratoriossa päästiin korkeisiin, jopa yli 80 %:n kuiva-ainepitoisuuksiin. Kokeissa löydettiin kuiva-ainepitoisuusalue, jolla liete on pinnoille tarttuvaa, edelleen kuivattaessa liete irtosi haihduttimen pinnoilta ja pinnat olivat helposti puhdistettavissa kokeiden jälkeen. Kiehumispisteen nousua kuiva-ainepitoisuuden kasvassa ei havaittu. Haihdutuksen laauhteet voivat olla riittävän puhtaita palautettaviksi tehtaan prosesseihin.

4.8.2 Tasetarkastelut

Tasetarkasteluissa selvitettiin kuivauksen vaatimia lämpömääriä sekä lietteiden polttoainepotentiaalia. Tasetarkastelut osoittivat, että mikäli sekundäärilämpöjä on rajoitetusti käytettävissä, lietteen mekaaninen esikuivaus on tarpeellinen.

Lietteen kuiva-ainepitoisuuden nosto 50 %:iin nosti lietteen tehollisen lämpöarvon 12–18 MJ/kg:aan kuiva-ainetta kohden. Kuiva-ainepitoisuuden nosto tätä korkeammaksi nosti lietteen energiasisältöä enää lievästi (kuva 7).



Kuva 7. Lietteen tehollinen lämpöarvo kuiva-ainetta kohden kuivaainepitoisuuden ja kuiva-aineen lämpöarvon funktiona.

Esimerkkilaskelmissa käytettiin erään 370 000 tonnia sellua ja 800 000 tonnia paperia tuottavan integraatin tietoja. Integraatin aktiivilietteen määrä vuositasona oli n. 2 200 tonnia (k.a.) ja lietteen kuiva-aineen lämpöarvo n. 17 MJ/kg. Nostettaessa lietteen kuiva-ainepitoisuutta 20 %:sta 50 %:iin lietteen polttoainetehto nousi 0,5 MW:sta 1,0 MW:iin. Lietteen kuivaaminen edelleen 100 % kuivaainepitoisuuteen nosti lietteen tehoa enää vain n. 20 %. Aktiivilietteen tehokkaan kuivauksen avulla voitaisiin korvata tehtaan marginaalipolttoaineena käyttämättä turpeesta n. 1 600–1 900 tonnia vuodessa.

4.8.3 Haastattelut

Haastattelututkimuksessa käytiin tutustumassa 11 tehtaan jätevesien ja lietteiden käsittelyyn. Näistä yhdellä oli käytössä lietteiden termien kuivaus muiden käytössä pelkästään mekaanisia menetelmiä. Osalla tehtaista mekaaninen lietteen käsittely oli joko uusittu tai oltiin uusimassa. Kahdella tehtaalla suunniteltiin

biolietteen käsittelyä mustalipeälinjassa. Yleisesti todettiin lietteiden kuivaus merkittävänä selvitettävänä ja ongelmallisena alueena.

4.8.4 Kuivausvaihtoehtojen laitteistokartoitus

Aktiivilietteen termisistä kuivausvaihtoehdoista tehtiin kartoitus. Tarkasteltavina olivat kontaktikuivaus, konvektiokuivaus, bioterminen kuivaus, kuivaus ja poltto mustalipeän kanssa, leijukerroskuivaus ja poltto, arinapoltto sekä vaihtoehtona kaatopaikkasijoitus. Lisäksi kerättiin kirjallisuutta erilaisista haihdutintekniikoista.

5. Projektin jatkotutkimustarpeet

Biopolttoaineiden monivaihekuivauksen osalta jatkotutkimusta tarvitaan edelleen kuivurin tuotekehittelyssä sekä jo olemassa olevien tutkimustulosten verifiointissa. Kuivurin tuotekehittelyssä yksi keskeisimpiä tutkimuskohteita on kuivurin optimaalisten ajotapojen valinta, kun keskeisimmät kuivumisparametrit (mm. polttoaineen alkukosteus ja kuiva-ainevirta sekä ilman kosteus) vaihtelevat. Olemassa olevien tutkimustulosten verifiointissa oleellisinta olisi saada tutkimustietoa isomman kokoluokan pilot-kuivurin toiminnasta sekä kuivauksen vaikutuksista voimalaitosprosessiin sellu- ja paperitehtaalla. Lietteiden termisen kuivauksen tutkimista jatketaan yritysprojektina.

Syntyneet julkaisut

Pat. FI 106817 B. 2001. Järjestelmä kostean biomassaperäisen polttoaineen kuivaamiseksi. Ahtila, Pekka & Spets, Jukka-Pekka. Hakemus FI 991304, 8.6.1999. Julk. 12.4.2001.

Pat. FI 111097 B. 2003. Menetelmä vähintään kaksivaiheisen kuivausprosessin säätämiseksi. Ahtila, Pekka & Holmberg, Henrik. Hakemus FI 20012145, 6.11.2001. Julk. 30.5.2003.

Ahtila, Pekka. 2001. Metsäteollisuuden vastapainevoimantuotannon tehostaminen – PUUT17. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Espoo: VTT Symposium 216. S. 343–344.

Ahtila, Pekka. 2002. Metsäteollisuuden vastapainevoimantuotannon tehostaminen – PUUT17. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 185–187.

Hippinen, Ilkka & Ahtila, Pekka. 2002. Activated sludge in the pulp and paper industry by means of secondary energies. 1st International Conference on Sustainable Energy Technologies. Porto, Portugal.

Hippinen, Ilkka & Ahtila, Pekka. Drying of activated sludge under partial vacuum conditions – an experimental study. Artikkelijulkaisu Drying Technology -lehteen.

Hippinen, Ilkka. 2001. Lietteiden käsittely puunjalostusintegraateilla: Havaintoja tehdyltä tehdaskierrokselta. Projektin sisäinen raportti. Energiatalous ja voimaitostekniikka, TKK.

Holmberg, Henrik & Ahtila, Pekka. 2002. Drying phenomenon in a fixed bed under the bio fuel multi stage drying. 1st International Conference on Sustainable Energy Technologies. Porto, Portugal.

Holmberg, Henrik & Ahtila, Pekka. 2002. Adjusting of temperature levels in multi stage drying system by means of outlet air measurements. 1st International Conference on Sustainable Energy Technologies. Porto, Portugal.

Holmberg, Henrik, Ahtila, Pekka, Arhippainen Pentti & Spets, Jukka-Pekka. 2000. Sekundäärilämpöjen hyödyntäminen metsäteollisuuden käyttämien kiinteiden polttoaineiden kuivauksessa. TKK. TKK-EVO-A7. Energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratorion julkaisuja.

Holmberg, Henrik. 2002. Biopolttoaineiden kuivauksen vaikutus metsäteollisuuden CO₂-tehokkuuteen. TKK. TKK-EVO-A9, CO₂-Efficiency in Forest Industry, Energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratorion julkaisuja.

Holmberg, Henrik & Ahtila, Pekka. Comparison of drying costs in biofuel drying between multi stage drying and single stage drying. Biomass&Bioenergy. Elsevier. In Press (numero ei tiedossa), saatavana kustantajan nettiversiona (science-direct.com).

Kilponen, Leena, Ahtila, Pekka, Parpala, Juha & Pihko Matti. 2000. Improvement of Pulp Mill Energy Efficiency in an Integrated Pulp and Paper Mill. TKK. TKK-EVO-A5. Energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratorion julkaisuja.

Spets, Jukka-Pekka. 2001. A New Multistage Drying System. 1st Nordic Drying Conference. Trondheim, Norway 2001.

Spets, Jukka-Pekka & Ahtila, Pekka. 2001. Preliminary Economical Examinations for a New Multistage Biofuel Drying System Integrated in Industrial CHP-power Plant. 1st Nordic Drying Conference. Trondheim, Norway 2001.

Spets, Jukka-Pekka & Ahtila, Pekka. 2001. A New Multistage Biofuel Drying System Integrated into an Industrial CHP-power Plant: Description of Process and Performance Calculations. ACEEE Summerstudy on Energy Efficiency in Industry. New York, USA.

Spets, Jukka-Pekka & Ahtila, Pekka. 2002. Improving the power-to-heat ratio in CHP plants by means of a biofuel multistage drying system. Applied Thermal Engineering. Elsevier Science Ltd. Approved, lining up for publication.

Spets, Jukka-Pekka & Ahtila, Pekka. Reduction of organic emissions by using a multistage drying system for wood-based biomasses. Drying Technology. Dekker. In Press (numero ei tiedossa).

Spets, Jukka-Pekka. 2003. Enhancement of the use of wood fuels in heat and power production in integrated pulp and paper mill. Doctoral thesis. TKK. TKK-EVO-A11. Energiatalouden ja voimalaitostekniikan julkaisuja.

Vanhatalo, Antti & Kiiskilä, Erkki & Ahtila, Pekka. 1999. Metsäteollisuuden lietteiden kuivaus alipainetekniikalla energiantuotantoa varten. TKK. TKK-EVO-A3. Energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratorion julkaisuja. Energy Economics and Power Plant Engineering Publications.

Vanhatalo, Antti & Ahtila, Pekka. 2001. Drying of Forest Industry Sludge for Energy Production with Partial Vacuum Technology. New York, USA. ACEEE Summer study on Energy Efficient in Industry.

Vanhatalo, Antti. 2001. Kuivausvaihtoehtojen laitekartoitus. Projektin sisäinen raportti. Energiatalous ja voimalaitostekniikka, TKK.

Vanhatalo, Jarkko, Rautanen, Juha & Ahtila, Pekka. 1999. Metsäteollisuuden energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentäminen biomassoilla. TKK. TKK-EVO-A2, Energiatalouden ja voimalaitostekniikan laboratorion julkaisuja.

Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen – PUUT24

Markku Orjala, Janne Kärki, Heidi Häsä & Anne Suomalainen

VTT Prosessit

PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 597

E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Abstract

Project title in English: The effect of wood fuels on power plant availability

The objective of this research was to determine critical properties of wood fuels in respect of power plant availability, to determine the optimal conditions for reducing detriments, and to study the effect of storing and processing of wood fuels on the boiler operation. Both, the circulating (CFB) and bubbling (BFB) fluidized bed technologies were studied. The project started in December 2000 and it was ended in March 2003. Experts at VTT Processes carried out the majority of the research activities. System Technology Laboratory of Oulu University was responsible for the power plant automation and for the research on boiler control technology. Co-operation related to the analytics of heat transfer surface deposition and corrosion with the EU's JRC has continued as established in the Combustion of Forest Chips -project but mainly in a so-called "CORBI"-EU-project. Additionally, VTT co-operated with Swedish Värmeforsk Ab in the form of information exchange on experiences of wood fuel utilisation in Swedish power plants. The following companies participated in the project: Etelä-Savon Energia Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Kvaerner Pulping Oy, Simpele pasteboard factory of M-Real Oyj and Värmeforsk Ab (Sweden).

1. Tausta

Suomessa arvioidaan voitavan käyttää vuonna 2010 energiantuotantoon noin 28,4 TWh kiinteitä puuperäisiä polttoaineita (Electrowatt Ekono, selvitys kauppa- ja teollisuusministeriölle 6/2000). Tästä polttoainemäärästä olisi kuoren osuus 43 %, purun 23 %, metsähakkeen 30 % sekä teollisuuden hakkeen 5 %. Metsähakkeen käyttömäärä olisi tällöin yli 4 miljoonaa m³ vuonna 2010. Voimalaitoksilla poltetaan yhä kasvavassa määrin puupolttoaineita, mutta niiden laajalti vaihtelevat polttotekniset ominaisuudet asettavat kuitenkin uusia vaatimuksia mm. voimalaitoskattiloiden lämmönsiirtimien konstruktiolle ja käytön aikaiselle puhdistukselle.

Tuhkan käyttäytymisestä aiheutuvat ajonaikaiset ongelmat ja lisääntyvä huollon tarve saattavat nostaa merkittävästi energian tuotantokustannuksia. Lisääntyneiden nuohous- ja puhdistuskertojen, ja pahimmassa tapauksessa tulistimien uusimisen lisäksi, myös kattilan hyötysuhde huononee eristävien tuhkerrostumien muodostuessa sen lämmönsiirtopinnoille. Lisäksi kustannuseriä tuovat petiehiekan tihtynyt vaihtotarve (leijupoltto), omakäyttötehon kasvu ja puupolttoaineiden lisääntyvä varastointitarve.

Puupolttoaineiden poltto-ominaisuuksien kannalta on huomioitava poltetaanko niitä yksin tai käytetäänkö niitä seospoltossa rikkipitoisen polttoaineen kanssa. Tutkimuksessa on varmistunut, että metsätähdehakkeen pienikin klooripitoisuus aiheuttaa haitallisia alkalikloridikerrostumia. Kun hakkeen kanssa poltetaan rikkipitoista turvetta, ei vastaavaa alkalikloridikerrostumaa muodostu, koska kloori vapautuu savukaasun mukana kloorivetyinä. Seospoltolla saavutetaan myös päästöjen hallinnan kautta merkittäviä taloudellisia etuja. Esimerkiksi polttoaineista johtuvat typen oksidien ja rikkidioksidin ominaispäästöt voivat laskea, ja rikinsidontaan käytettävien sorbenttien käyttöä voidaan merkittävästi vähentää puun alkalisen tuhkan rikinsidontaa tehostavan vaikutuksen takia.

Uusia voimalaitoksia rakennettaessa kattilan suunnittelulla voidaan merkittävästi parantaa ns. ”vaikeiden” polttoaineiden käytettävyyttä. Kuitenkin käytössä olevilla kattiloilla ongelmat ovat arkipäivää laajalla käyttäjäkunnalla.

2. Projektin tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää puupolttoaineiden kriittiset ominaisuudet voimalaitoksen käytettävyyden kannalta ja määrittää optimaaliset olosuhteet ja toimet haittojen vähentämiseksi. Oulun yliopiston systeemitekniiikan laboratorion tavoitteena projektissa oli tehdä selvitystä polttoainejaon säätöjen vaikutuksista lämpötila- ja happikonsentraatioprofiileihin, päästöihin, kattilarakenteiden rasitukseen ja hyötysuhteeseen puupolttoaineita käytettäessä.

3. Toteutus

Projektissa suoritettuja toimenpiteitä olivat mm:

- 1) Selvitys puuta käyttävien kattiloiden käytettävyydestä.
- 2) Tehostettu seuranta kahdella voimalaitoksella.
- 3) Haavankuoren poltto-ominaisuuksien määrittely laboratoriotestien ja analyysilaitteilla.
- 4) Diplomityö aiheesta: Kerrostumien muodostumisen määrittely sondin lämmönsiirron perusteella.
- 5) Oulun yliopiston tehtäväkokonaisuus aiheesta puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen säätöön.
- 6) CEN Solid Biofuels TC 335 -standardisointityöhön osallistuminen.

Projektin rahoittajina ja yhteistyösopimuksina olivat Tekes, Etelä-Savon Energia Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Kvaerner Pulping Oy, M-Real Oyj, Oulun yliopisto ja Värmeforsk AB. Projektipäällikkönä toimi Markku Orjala VTT Prosesseista.

Ruotsalaisen Värmeforskin kanssa tehtiin yhteistyötä liittyen mm. kokemuksiin puupolttoaineiden käytöstä Ruotsin voimalaitoksilla. Ruotsissa pidettiin yksi projektin johtoryhmän kokouksista, johon osallistui myös Värmeforskin yhteistyökumppaneita.

4. Tulokset

4.1 Käytettävyysselvitys

VTT selvitti kyselykaavakkeen avulla puun käytön merkitystä voimalaitosten käytettävyyteen. Selvitys tehtiin lämpöteholtaan noin 100–300 MW_{th} puuta käytävillä leijukerroskattiloilla ja siinä oli mukana 12 laitosta. Selvityksessä kartoitettiin mahdolliset ongelmat ja olemassa olevat ratkaisut. Kyselyn tuloksina saatujen kulustietojen ja yksikköhintojen perusteella tehtiin arvioita vuotuisista voimalaitoksen käyttökustannuksista.

Lähes kaikilla kyselyn laitoksilla esiintyi puupolttoaineen käytöstä aiheutuneita seuraavanlaisia ongelmia:

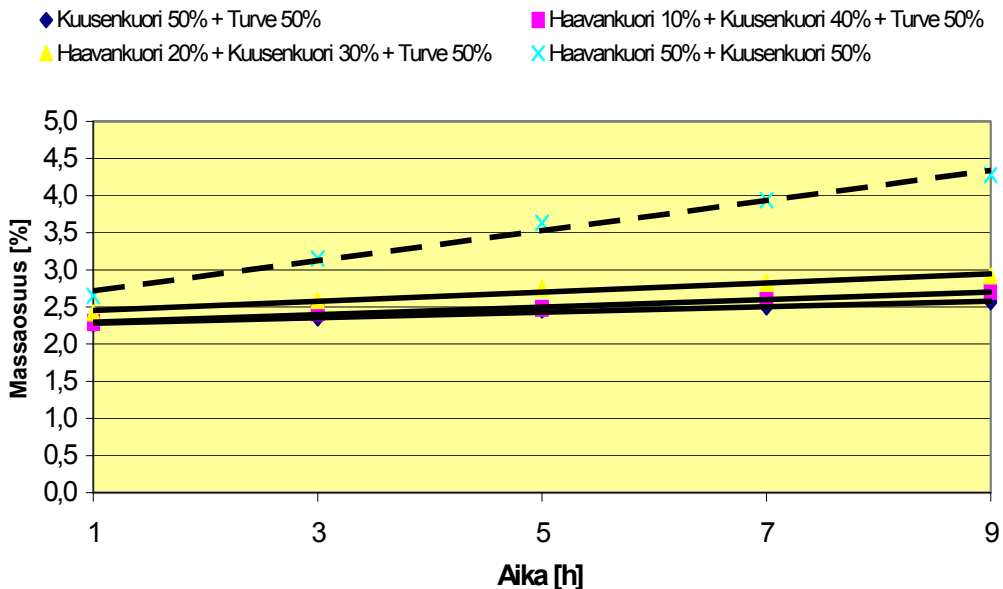
- Polttoaineen käsittelylaitteet tukkeutuvat ja kapasiteetit ovat riittämättömiä.
- Polttoaineen jakautuminen tasaisesti eri puolille kattilaa onnistuu vain harvoilla.
- Petiin liittyviä ongelmia, kuten sintraantumisriskin kasvua.
- Tulipesän lämpötilan laskua.
- Savukaasupuhaltimien kapasiteetin vajavaisuutta.
- Lämpöpintojen kerrostumien lisääntymistä.
- Tuhkan ominaisuuksien muuttumista.
- Kattilaseisokkien työmäärän lisääntymistä.
- Huipputehon saavuttaminen on vaikeampaa.

Toisaalta puun käytöllä on ollut myönteistä vaikutusta päästöihin. Päästöt ovat vähentyneet paikoin merkittävästikin puun käyttämisen myötä. Puupolttoaineet alentavat rikki- ja hiilidioksidipäästöjä ja tästä johtuu kalkintarpeen vähentyminen turpeen rikinsidontaan. Myös CO₂-päästöt vähenevät (laskennalliset), mutta purun käyttö taas nostaa hiukkaspäästöjä.

4.2 Haavankuoren palamisominaisuuksien määrittäminen ja soveltuvuus leijukerrospoltoon

VTT:n kerrosleijukoelaitteella (BFB, polttoaineteho 13–15 kW) suoritettiin polttokokeita haavan ja kuusen kuoren sekä turpeen eri seossuoksilla. Polttokokeissa määritettiin seospolton päästövaikutuksia ja kerrostumien muodostumista voimalaitosmittakaavan olosuhteissa.

Polttokokeet osoittivat, että haavan kuorta on poltettava turpeen kanssa tasaisesti sekoituneena, jolloin petimateriaali ei agglomeroidu. Kuvassa 1 on esitetty, kuinka kalium (K) kertyy leijukerrosmateriaaliin polttokokeen aikana. Edellä mainittujen alkuaineiden kertyminen oli hitaampaa polttoaineseoksilla, joissa haavan ja kuusen kuoren lisäksi poltettiin turvetta. Tämä johtuu siitä, että näiden alkuaineiden pitoisuudet turpeessa ovat matalampia kuin puupolttoaineilla ja ne ovat sitoutuneina stabiileihin yhdisteisiin, kuten silikaatteihin, ja että suurempi hienojakoinen tuhkavirta kuljettaa niitä mukanaan.



Kuva 1. Leijukerrosmateriaalin kaliumpitoisuus (K) polttokokeen aikana. Pelkän kuoripolttoaineen käytöstä saadut tulokset on merkitty kuvaan katkoviivalla.

Lentotuhkat sisälsivät eniten kalsiumia, piitä, rautaa ja alumiinia, näistä piitä ja rautaa oli rikastuneena enemmän karkeampaan fraktioon. Kalium päätyy lentotuhkan hienoimpaan fraktioon.

Kokeiden aikana otetuissa kerrostumanäytteissä esiintyi selviä eroja vain kerrostumien rikkipitoisuuksissa eri polttoaineseoksilla. Kerrostumat olivat lähinnä kalsiumia ja kaliumia yhdessä rikin kanssa, kun turvetta oli poltossa mukana. Kun turvetta ei ollut poltossa, niin kerrostumat sisälsivät oksideja ja silikaatteja. Fosforia esiintyi vähäisissä määrin ja joissakin kerrostumien yksittäisissä pisteissä myös klooria.

4.3 Voimalaitosseuranta, CFB-kattila

Voimalaitoskokeet tehtiin Mikkelissä Pursialan voimalaitoksen CFB-kattilalla, jonka höyryteho on 84 MW.

4.3.1 Kerrostuma- ja korroosiosondimittaukset

Kerrostuma/korroosiosondilla tutkitaan kerrostumien muodostumista tulipesässä ja tulipesäolosuhteiden vaikutusta tulistimissa käytettäviin materiaaleihin. Testattavat tulistinmateriaalit olivat X 20 CrMoV 12 1 (X20), AC 66, Sanicro 28 (SAN 28) ja 10 CrMo 9 10 (10CrMo). Näytteet olivat kattilassa tulistinalueen kaasuvirrassa neljä viikkoa (672 h). Visuaalisen tarkastelun perusteella holkkien tulo- ja sivupinnoilla oli paksu kerrostuma. Kerrostumaa oli kahdenlaista, sekä huokoista että tiivistä sintraantunutta. Jättöpuolella kerrostumaa ei ollut kuin ohuena kerroksena.

Altistuksessa parhaiten kesti materiaali AC66. SAN28-materiaalissa havaittiin lievää syöpymistä erityisesti savukaasujen tulopuolella. Sekä X20- että 10CrMo-materiaalit olivat syöpyneet runsaammin altistuksen aikana. Erityisesti 10 CrMo-materiaalilla havaittiin paksujen oksidikerrosten muodostuneen altistuksen aikana. Näytteistä ei löydetty klooria.

4.3.2 Kerrostuman vaikutus lämpötilaan lämmönsiirtopinnoilla

Tutkimuksissa havaittiin kerrostumasondilla saaduilla mittaustuloksilla ja laitoksen suorituskyvyllä olevan selvää riippuvuutta. Sondin lämpötilojen käyttäytyminen kerrostumien lisääntymisen myötä kuvaa kattilan lämpöpintojen likaantumista. Samanaikaisista laitosmittauksista havaittiin prosessin hyötysuhteen laskua eli polttoaineen kulutuksen kasvua tuotettua höyrytehoa kohti. Näin ollen sondimittauksista saatavaa tietoa voitiin hyvin käyttää lämmönsiirtopintojen likaantumisen arviointiin.

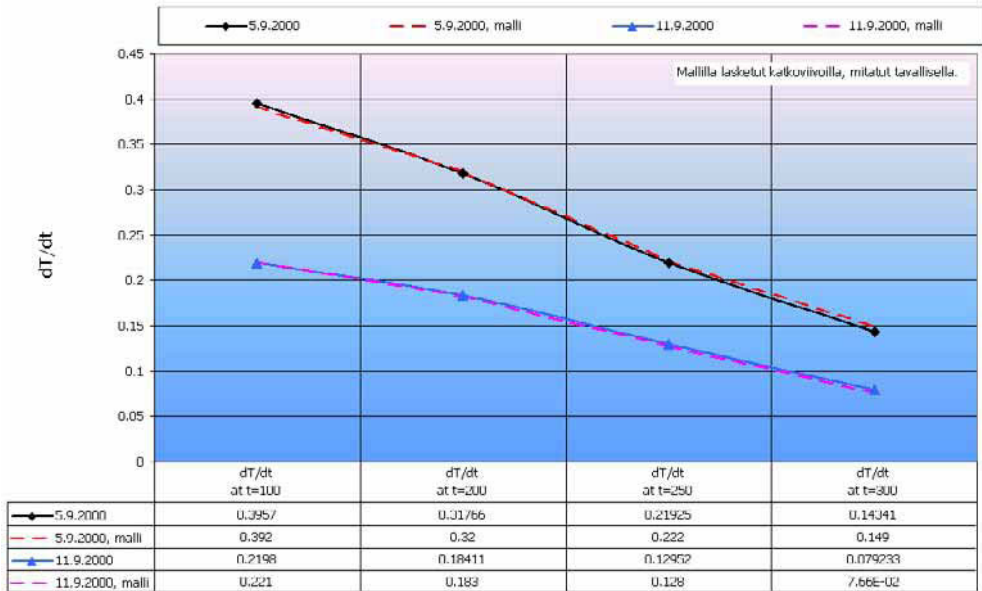
Kattilahyötysuhdetta tarkasteltiin myös erillisellä kolmen kuukauden mittausjaksolla. Tälläkin jaksolla havaittiin, että polttoaineteho- ja lämpötehokäyrät erkaanevat toisistaan (polttoaineteho laskee loivemmin kuin lämpöteho). Tämä indikoi hyötysuhteen laskua, joka ainakin osittain johtuu kattilan likaantumisesta.

Useamman viikon kestäneissä kokeissa todettiin sondin jättöpinnan lämpötilojen uutosnopeuksien vaihtelevan nuohousväleillä mittausjakson loppua kohden. Pintalämpötilan muutosnopeuksia tarkasteltiin vastaavien vuorokausien polttoaineiden ja sähkösuodintuhkien alkuaineanalyysien kanssa, jolloin havaittiin korrelaatiota lämpötilan muutosnopeuksien ja tiettyjen lentotuhkan alkuaineiden kanssa. Tätä riippuvuutta kuvaamaan kehitettiin alustava laskentamalli. Lämpötilan muutosnopeutta tietyllä tarkasteluhetkellä (t_{th}) kuvaava yhtälö ovat muotoa:

(1)

$$\frac{dT}{dt}(t = t_{th}) = \sum_{i=1}^n q_i w_i + B0$$

missä q_i on vakio alkuaineelle i , $B0$ on vakio ja w_i on alkuaineen pitoisuus. Kuvassa 2 on esitetty laskentamallilla ennustetut sondin lämpötilamuutosnopeudet ja alkuperäiset mitatut arvot kahdelta nuohousväliltä eri päivinä. Kuvasta nähdään, että malli toimii hyvin suhteessa alkuperäisiin arvoihin, vaikkakin mallin pätevyysalue on vielä melko suppea.



Kuva 2. Laskentamallilla ennustetut sondin lämpötilamuutosnopeudet ja alkupe-
räiset mitatut arvot kahdelta nuohousväliltä eri päivinä.

Mallin jatkokehityksessä on ideoitu systemaattista karakterisointitapaa likaker-
roksen kasvuille. Likakerroksen (lämpövastuksen) kasvua tulopintaan (t) nähden
kuvataan ajan funktiona eksponentiaalisesti tiettyä raja-arvoa kohti kasvavalla
mallilla seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$R / R_t = Y = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty)e^{-t/\tau} \quad (2)$$

Malliin tarvitaan kolme likaantumista kuvaavaa parametria Y_0 , Y_∞ ja aikavakio
 τ . Sondin lämpötilamittausten perusteella voidaan määrittää näiden arvo kulle-
kin nuohousjaksolle. Peräkkäisille jaksolle saaduista arvoista nähdään tilanteen
kehittyminen myös pitkällä aikavälillä. Aikavakio τ kertoo suoraan, millä no-
peudella kerrostuma kasvaa verrattuna tulopintaan. Y_0 kertoo, miten pitkällä
aikavälillä kyseisen pinnan (sivu- tai jättöpinta) kerrostuma suhtautuu tulopinnan
kerrostumaan. Y_∞ kertoo trendin, mihin kerrostuma (suhteessa tulopintaan) kas-
vaisi pitkällä tähtäimellä, jos nuohousta ei tehdä.

Mallin kehitystä voidaan jatkaa laajentamalla datapohjaa ja hyödyntämällä ai-
kaisempien hallitumpien polttoaineseosten lentotuhkien analyyseja sekä lisää-

mällä siihen tarkemmin prosessiolosuhteiden vaikutus lämmönsiirtoyhtälöiden muodossa. Kun malleja saadaan näin täydennettyä, voidaan siitä kehittää laskentatyökalu mm. polttoaineiden seossuhteiden optimointiin ja nuohouksen ajoitukseen. Lisäksi saataisiin mahdollisesti tietää kvantitatiivisesti, kuinka paljon eri polttoaineet vaikuttavat lämmönsiirtoon ja kattilan toimintatasoon.

4.4 Voimalaitosseuranta, BFB-kattila

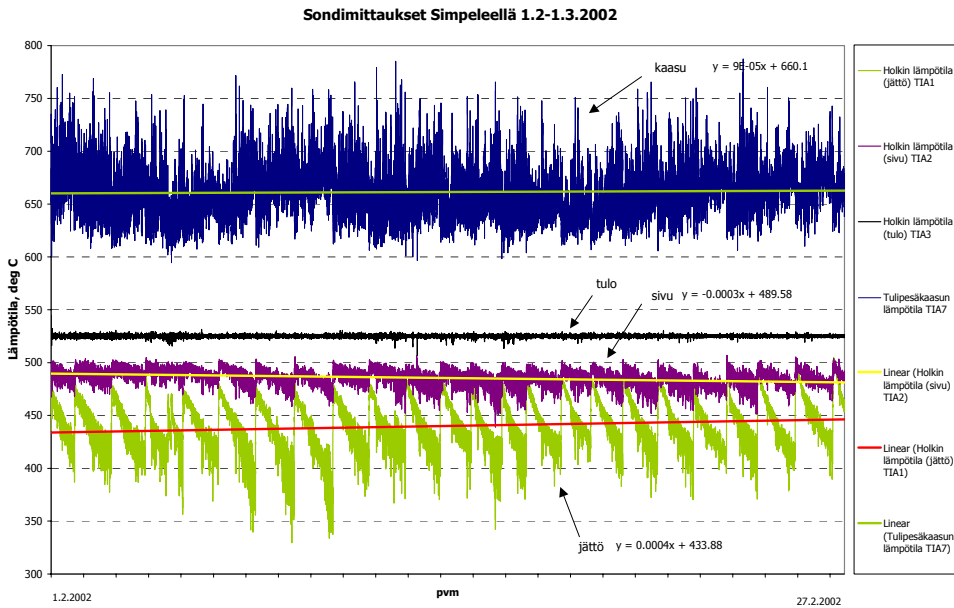
4.4.1 Käytetyt polttoaineet

Polttoaineena kattilassa käytettiin kokeiden aikana jyrshinturvetta, kuorta (haapa, mänty, kuusi), puuhaketta, purua, paperi- ja kartonkijätettä sekä tehtaan jätevedenpuhdistamolta saatavaa lietettä.

4.4.2 Kerrostuma- ja korroosiosondimittaukset

Kokeiden jälkeen nähtiin, että sondin holkkien jättöpuolelle oli jäänyt selvimmät kerrostumat. Sondin tulopuolella oli kaikilla holkeilla poimuttunutta rikkonaista kerrostumaa, ja lisäksi tietyillä holkeilla oli hilseilevää kerrostumaa. Kuvassa 3 on esitetty sondin tulo-, sivu- ja jättöpinnan lämpötilat sekä tulipesän lämpötilat pidemmän seurantajakson kokeesta. Kuvaan on myös tehty lineaariset sovitteet sondin eri pintojen lämpötiloille.

Pidemmän aikavälin tarkastelussa tutkittiin pysyvän kerrostuman muodostumista. Pitkällä tarkasteluvälillä jättöpinnan lämpötila lähti nousemaan ja sivupuolen lämpötila loivasti laskemaan, jonka perusteella voidaan todeta, että sivupinnalle jää pysyvää kerrostumaa enemmän kuin muille pinnoille. Jättöpuolen kerrostumat ovat nousevan trendinsä vuoksi vähemmän merkityksellisiä kuin muiden pintojen. Voidaan todeta myös, että jättöpuolen kerrostumat lähtevät parhaiten nuohouksella pois. Kokonaisuudessaan erot eri pintojen välillä ovat kuitenkin pieniä.



Kuva 3. Sondin lämpötilamittaukset (neljän viikon seuranta).

Jäähdytysteho, tulipesän lämpötila ja sondin eri pintojen lämpötilakäyttäytymiset on otettava huomioon tarkasteltaessa koko sondin käyttäytymistä ja sen avulla saatavia arvioita vaikutuksista lämpöpintojen lämmönsiirtoon. Tarkemmat selvitystyöt ovat käynnissä.

4.5 Kerrostumien muodostumisen määrittäminen sondin lämmönsiirron perusteella

Heidi Häsän diplomityön tavoitteena oli tutkia kerrostumien muodostumista voimalaituskattiloiden lämpöpinnoille ja niiden vaikutusta lämmönsiirtoon. Kerrostumien vaikutusta lämpöpintojen lämpötiloihin tutkittiin kerrostumasondin avulla CFB- ja BFB-leijukattiloissa. Saadun mittausaineiston perusteella muodostettiin mittaustilannetta vastaava laskentamalli, jonka avulla pystytään selvittämään voimalaitoksen lämpöpintojen likaantumista käyttöperiodin aikana.

Työn alussa tarkasteltiin kerrostumien muodostumismekanismeja lämmönsiirto-pinnoille, kerrostumien ominaisuuksia ja virtausympäristön vaikutusta lämmönsiirtoon. Poltossa syntyvä tuhka kiinnittyy eri mekanismeilla kattilan seinille ja

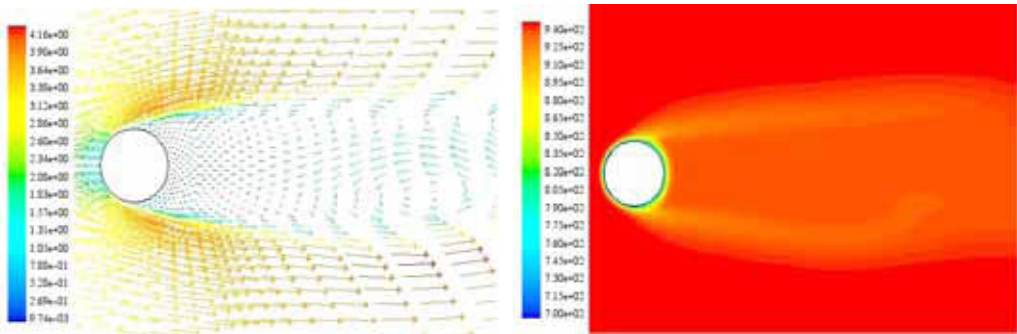
lämpöpinnoille, riippuen polttoaineesta ja ympäröivistä olosuhteista. Likakerrosten muodostuminen lämmönsiirtimen pinnalle pienentää putkeen siirtyvää lämpövirtaa ja alentaa kattilan hyötysuhdetta.

Työn kokeellisessa osassa tarkasteltiin kahdella eri kattilalla tehtyjä mittauksia. Mittaukset tehtiin kerrostumasondilla, jonka lämmönsiirrosta luotiin laskentamalli SIMU-LINK-simulointiohjelmalla. Mittaustuloksina saatiin kolmen eri pinnan lämpötilat, jotka muuttuivat kerrostuman ja jäähtytyksen vaikutuksesta. Laskentamallista muokattiin mittaustilanteita vastaava, jolloin lämpötilamuutoksista nähdään likakerroksen ominaisuuksien vaikutus lämmönsiirtoon. Lämmönsiirron oletettiin olevan 2-dimensioista, jolloin lämpöyhtälö on muotoa

$$\rho_t c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \quad (3)$$

Laskennassa käytetyt kerrostumien lämmönjohtavuudet vaihtelivat välillä 0,0006–0,8 Wm⁻¹K⁻¹. Kirjallisuudessa arvoja löytyy väliltä 0,012–15 Wm⁻¹K⁻¹. Laskennassa jouduttiin tekemään paljon oletuksia puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Laskenta on kattilakohtainen ja riippuu myös hyvin paljon paikasta, johon sondi on sijoitettu. Kehitetty laskentamalli toimii kohtalaisesti työssä esitetyissä tapauksissa. Mallin parantamiseksi ja kehittämiseksi olisi tehtävä useita lisämittauksia ja selvityksiä.

Sondista muodostettiin myös FLUENT-malli, jolla tarkasteltiin yksittäisen putken virtauskenttää sekä kahden lähekkäin olevan putken vaikutusta virtaukseen. Saadut tulokset eivät ole suoraan verrattavissa sondilla saatuihin mittaustuloksiin. Lasketut lämpötilajakaumat vastasivat mittauksissa saatuja tuloksia. FLUENTilla pystyttiin osoittamaan, kuinka sondin lähellä olevat pinnat ja virtauksen muuttuminen saattavat vääristää putken pintalämpötilajakaumaa. Kuvassa 4 on esitetty yksittäisen putken vaikutus virtaukseen sekä ympäröivän kaasun lämpötilaan.



Kuva 4. Vasemmassa kuvassa on esitetty nopeusvektorit yksittäisen putken ympärillä ja oikealla yksittäisen putken vaikutus savukaasun lämpötilaan.

4.6 Voimalaitosautomaatio ja kattilan säätö

Oulun yliopiston systeemitekniikan laboratorio on tutkinut projektissa puupolttoaineiden vaikutusta kattilan säädettävyyteen. Erityisesti projektissa on tutkittu puupolttoaineiden aiheuttamien häiriöiden kompensointia palamisprosessissa.

Sumealla tulitehon kompensatorilla on mahdollisuuksia parantaa kattilan käytettävyyttä häiriöiden kompensointia parantaen. Alkuperäiseen tulitehon kompensointiin verrattuna sumea toteutus ei kovin paljon paranna säätöstrategian toimintaa. Sumea tulitehon kompensatoria on kuitenkin helpompi kehittää eteenpäin. Lisäämällä tehotason informaation sekä mahdollisesti polttoseoksen suhteen säätimen sisääntuloihin, voidaan korjaus polttoainesyöttöön tehdä entistä tarkemmaksi. Lisäämällä nämä parametrit voidaan säätimestä tehdä epälineaarinen esimerkiksi tehotason suhteen. Suuremmalla tehotasolla tehdään suurempi korjaus polttoainesyöttöön, jotta häiriö saadaan kompensoitua hyvin. Lisäksi polttoaineen seossuhteen muuttuessa täytyy häiriön kompensoimiseksi tehdä erisuuruinen korjaus. Tämä voidaan ottaa huomioon, jos säädin saa tiedon seossuhteesta. Sinimuotoisen häiriön täydelliseen poistoon eivät pelkät säätimet kykene. Häiriö johtuu polttoainesyötön mekaanisista osista sekä polttoaineen lajittumisesta. Sumealla tulitehon kompensatorilla pystytään kuitenkin pienentämään häiriön amplitudia hieman.

5. Tuloksien hyödyntäminen ja tavoitteiden toteutus

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli määrittää puupolttoaineiden kriittiset ominaisuudet voimalaitoksen käytettävyyden kannalta. Tällaisia ominaisuuksia ovat tuhkapitoisuus, tuhkan sulamislämpötila ja koostumus. Tuhkan koostumus, kuten alkali-, fosfori-, kloori-, pii- ja kalsiumpitoisuus sekä yhdistekoostumus vaikuttavat sulamiskäyttäytymiseen, sulanmuodostukseen reaktioiden kautta ja sitä kautta kattilan lämpöpintojen likaantumiseen sekä materiaalien keston. Puupolttoaineiden kriittisiä ominaisuuksia selvitettiin mm. pilot-koearjoilla. Leijupe-ttiä agglomeroina aineena petipartikkeleista löytyi kalsium-, kalium- ja piiyhdisteitä eli yhteenkiinnittävä aines oli silikaattiseos. Kun turvetta oli poltossa mukana, kerrostumat olivat lähinnä kalsiumia ja kaliumia yhdessä rikin kanssa, mutta kun turvetta ei ollut poltossa, niin kerrostumat sisälsivät oksideja ja sili-kaatteja, ja joissakin kerrostumien yksittäisissä pisteissä myös klooria.

Tutkimuksen tavoitteena oli myös määrittää optimaaliset olosuhteet ja toimet haittojen vähentämiseksi voimalaitoksilla. Tätä selvitettiin mm. voimalaitosko-keilla ja pilottikoeajoin. Mittauksissa voimalaitoskattiloilla perehdyttiin laitos-kohtaisiin käytettävyysoongelmiin ja luotiin niiden ongelmien vähentämiseksi ratkaisuja arvioimalla järkeviä polttoaineseossuhteita kullekin kattilalle. Pilotti-koearjoissa pystyttiin hallitusti vaihtelevaan olosuhteita (mm. lämpötilatasot), mutta pääpaino tutkimuksissa oli kuitenkin polttoaineseoksien varioinneista saatava informaatio.

Tutkimuksissa havaittiin kerrostumasondilla saaduilla mittaustuloksilla ja laitok-sen suorituskyvyllä olevan selvää riippuvuutta. Sondin lämpötilojen käyttäyty-minen kerrostumien lisääntymisen myötä kuvaa kattilan lämpöpintojen likaant-umista. Samanaikaisista laitosmittauksista havaittiin prosessin hyötysuhteen laskua eli polttoaineen kulutuksen kasvua tuotettua höyrytehoa kohti. Näin ollen sondimittauksista saatavaa tietoa voitiin hyvin käyttää lämmönsiirtopintojen likaantumisen arviointiin.

Projektin tulosten pohjilta on mittauksin, analyysin ja laskennallisin keinoin pystytty määrittelemään polttoaineen ja siitä muodostuvan tuhkan koostumuksen vaikutusta kerrostuman muodostumiseen ja lämmönsiirtoon. Kerrostuma- tai

korroosiosondilla saadaan tietoa kattilan lämmönsiirtopintojen likaantumisnopeudesta ja muodostuvien kerrostumien vaikutuksesta lämmönsiirtoon.

6. Jatkosuunnitelmat

Puuenergian teknologiaohjelmassa on todettu, että metsien energiareservin hyödyntämistä rajoittavat tällä hetkellä metsähakkeen korkea kustannustaso, laadun epätasaisuus ja laadun vaikea ennustettavuus. Tulevissa hankkeissa pyritään luomaan voimalaitoksille työkaluja polttoaineiden laadunvaihtelujen hallintaan, jotta tuotantokustannuksia pystyttäisiin paremmin ennustamaan ja ohjaamaan laadultaan vaihtelevia polttoaineita käytettäessä. Painopiste on puupolttoaineiden käyttäjän ongelmissa ja niiden ratkaisussa, jotta puusta voidaan tehdä houkuttelevampi polttoaine myös voimalaitosten kannalta. Tutkimukset antavat tietoa puupolttoaineiden tuotantojärjestelmien kehittämisen tarpeista laitoksen kannalta, tehostavat polttoaineen laadun hallintaa laitoksen toimivuuden parantamiseksi sekä luovat pohjan teollisuuden puutähteen käyttöominaisuuksien parantamiselle.

Tavoitteena jatkossa on luoda laitoksille edellytyksiä välttää tässäkin projektissa todettuja polttoaineseoksista johtuvia lämmönsiirtopintojen likaantumisongelmia sekä välttää näiden aiheuttamia välillisiä ja välittömiä kustannuksia. Tähän on käytössä pääasiallisesti kaksi keinoa: polttoaineseoksen hallinta ja kattilaprosessin ohjaus. Näiden osa-alueiden kehitys on tärkeää uusien ja olemassa olevien laitosten kilpailukyvyyn ja kustannustehokkuuden parantamiseksi.

Julkaisut ja raportit

Orjala, M. & Ingalsuo, R. 2001. Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen – PUUT24. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Espoo: VTT Symposium 216. S. 349–354.

Hämäläinen, J., Orjala, M. & Suomalainen, A. 2001. Metsähakkeen vaikutukset kattilan käyttötalouteen. Bioenergiapäivät 2001, Suomen Bioenergiayhdistys ry, Jyväskylä. Julkaisu 19. S. 93–98.

Orjala, M. 2001. Turpeen ja puun yhteispoltto vähentää päästöjä sekä varmistaa kattiloiden kestävyuden. Suo ja turve 1/2001, s. 11–16.

Orjala, M., Ingalsuo, R., Paakkinen, K., Hämäläinen, J., Mäkipää, M., Oksa, M., Malkow, T., Fordham, R. J. & Baxter, D. 2001. How to control superheater tube corrosion in FB boilers which use wood and wood waste as fuel. In: 10th International Symposium on Corrosion in the Pulp and Paper Industry. Volume 1. EFC Event number 249. Espoo:VTT Symposium 214. S. 117–136.

Orjala, M., Ingalsuo, R. & Lybeck, E. 2001. Haavankuoren polttokokeet BFB-koelaitteella. VTT Energia tutkimusselostus ENE3/T0100/2001. Jyväskylä, 27.1.2001. Luottamuksellinen. 22 s. + liitt. 6 s.

Orjala, M. & Kärki, J. 2002. Voimalaitosten kokemuksia puupolttoaineiden käytöstä -käytettävyyksely. VTT Prosessit tutkimusselostus PRO/T6039/02. Jyväskylä, 17.4.2002. Luottamuksellinen. 22 s. + liitt. 7 s.

Orjala, M., Kärki, J., Ingalsuo, R., Oksa, M. & Paakkinen, K. 2002. Kerrostumien muodostuminen ja niiden vaikutus lämmönsiirtoon ja käytettävyyteen 84 MW kiertoleijukattilassa; voimalaitosmittaukset. VTT Prosessit tutkimusselostus PRO/T6041/02. Jyväskylä, 17.4.2002. Luottamuksellinen. 33 s. + liitt. 44 s.

Orjala, M. & Kärki, J. 2002. Co-firing of peat and wood based fuels decreases emissions and improves the availability of boilers. Tiedonanto. Turveteollisuusliitto. Jyväskylä 14.2.2002.

Orjala, M., Kärki, J., Mäkipää, M., Oksa, M. & Lybeck E. 2002. Kerrostumien muodostuminen ja niiden vaikutus lämmönsiirtoon ja käytettävyyteen 113 MW kuplapetikatilassa; voimalaitosmittaukset. VTT Prosessit tutkimusselostus PRO/T6059/02. Jyväskylä, 30.7.2002. Luottamuksellinen. 38 s. + liitt. 29 s.

Häsä, H. 2002. Kerrostumien muodostumisen määrittäminen sondin lämmönsiirron perusteella. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 62 s.

Orjala, M., Kärki, J., Mäkipää, M. & Oksa, M. 2002. Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen – PUUT24. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 205–221.

Orjala, M. 2002. Puupolttoaineiden vaikutus laitosten käytettävyyteen ja käyttötalouteen. Energia 2002 -kongressi. Tampere, 16.10.2002.

Orjala, M., Hämäläinen J., Kärki, J. & Vainikka, P. 2002. Optimisation of multifuel-based bioenergy production. Amsterdam, Hollanti 17.–21.6.2002. Proceedings of the 12th European Biomass conference.

Orjala, M., Kärki, J. & Vainikka, P. 2003. The Effect of Wood Fuels on Power Plant Availability G9-903. Värmeforsk Service AB 842. Stockholm, Sweden.

Hämäläinen, J., Orjala, M., Järvinen, T., Kärki, J. & Vainikka, P. 2003. Variation, effect and control of forest chip quality in CHP. International Nordic Bioenergy 2003 Conference. Jyväskylä.

Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa – PUUT29

Leena Fagernäs¹⁾, Risto Impola²⁾, Raija Rautiainen²⁾ & Sirke Ajanko¹⁾

VTT Prosessit

¹⁾ PL 1601, 02044 VTT

Puh. (09) 4561, faksi (09) 460 493

²⁾ PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 720

E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Chemical changes of wood fuels in storing and drying

The aims of the research were to identify the chemical and biological changes occurred in wood fuels during storing and thermal drying, to determine the emissions of this pretreatment to the environment and to estimate occupational health hazards in storage. The research was carried out in co-operation with Åbo Akademi University, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) and Kuopio Regional Institute of Occupational Health. The research was carried out during the years 2001–2002.

The research was divided into following tasks: 1) field and laboratory storage tests, 2) laboratory drying tests, 3) estimation of occupational health hazards in storage, 4) recovery of by-chemicals in the pretreatment and 5) participation in the Swedish co-operation project. The storages of green and brown forest chips and sawdust, were built in the fuel field of a power plant, and followed over 3, 7 and 10 months. The temperature rose to 60–70 °C in the storages. The fuel properties, microbes and chemical composition of the materials were studied. All the raw materials became mouldier during storage. Dust and endotoxin concentrations were high when handling the materials. The laboratory storage tests were carried out by lysimeters at SLU. The drying tests were carried out in a fixed-bed batch dryer and by headspace-GC-AED/MS mainly at low temperatures of 90–170 °C, and the emissions were determined. The main compounds emitted were monoterpenes, sesquiterpenes, alcohols, aldehydes and carboxylic acids.

1. Tausta

Metsähakkeen käytön kasvaessa metsäpolttoaineita tullaan myös käyttämään lisääntyvästi polttoainejalosteiden tuotannossa. Esim. pellettituotannon kasvaessa on raaka-aineena käytettävä nykyisten kuivan sahanpurun ja kutterinpurun lisäksi myös tuoretta sahanpurua sekä jopa kuorta ja metsähaketta. Tuoreen sahanpurun, kuoren tai metsätähteen käyttö polttoainejalostuksen raaka-aineena vaatii kuivausta, yleensä noin 10 %:n kosteuteen. Kuivauksessa voidaan käyttää savukaasu-, höyry- tai varastokuivureita. Pyrkimyksenä on käyttää nykyään suhteellisen matalia kuivauslämpötiloja. Viime aikoina on noussut myös esille puupolttoaineiden termisen kuivaus ennen polttoa kattilassa. Kosteat biopolttoaineet on kuivattava myös kaasutustekniikkaan ja moottoreihin perustuvissa pienvoimalaitoksissa, joita parhaillaan kehitetään Suomessa. Näin ollen puupolttoaineiden kuivaus voi olla tulevaisuudessa paljon laajemmassa käytössä kuin tänä päivänä.

Polttoaineiden varastoinnissa ja kuivauksessa tapahtuu polttoaineissa kemiallisia ja biologisia muutoksia, jotka vaikuttanevat polttoainejalosteiden laatuun. Puun aineosat pilkkoutuvat ja esimerkiksi uuteainepitoisuudet pienenevät. Varastoinnin ja kuivauksen aikana haihtuu polttoaineista orgaanisia yhdisteitä aiheuttaen hajuhaittoja. Turpeen ja kuoren kuivauksessa vapautuvia yhdisteitä on tutkittu yli 150–200 °C:n lämpötiloissa, jolloin on todettu vapautuvan terpeenejä, rasvoja ja hartsihappoja sekä happoja ja alkoholeja. Metsätähteen, samoin kuin muiden puupolttoaineiden, käyttäytymistä matalammissa kuivauslämpötiloissa ei suuressa määrin tunneta. Varastoinnista syntyy myös valumavesiä, jotka aiheuttavat kuormitusta ympäristölle.

2. Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää varastoinnin ja termisen kuivauksen aiheuttamat kemialliset ja biologiset muutokset puupolttoaineissa, lähinnä metsähakkeessa ja sahanpurussa. Lisäksi tavoitteena oli selvittää valitun esikäsittelyketjun päästöt ja ympäristövaikutukset ilmaan sekä valuma- ja jätevesiin sekä arvioida työhygienistä riskiä varaston purkamisen yhteydessä. Mahdollisuuksia saada esikäsittelyn yhteydessä talteen hyödynnettävissä olevia kemikaaleja oli suunniteltu tarkasteltavan alustavasti.

3. Toteutus

Tutkimus toteutettiin vuosina 2001–2002. Työn suorittamiseen osallistuivat VTT Prosessit, Åbo Akademi, Kuopion aluetyöterveyslaitos ja Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Projektissa tehtiin yhteistyötä SLU:n projektin ”Miljöaspekter vid lagring och hantering av bark” kanssa. SLU:n projektissa tutkittiin kuoren käsittelyn ja varastoinnin biologisia, kemiallisia ja fysikaalisia prosesseja. Yrityksistä projektiin osallistuivat Fortum Oil and Gas Oy, Kokkolan Voima Oy, Pohjolan Voima Oy ja Vapo Oy.

Projekti käsitti seuraavat osatehtävät: 1) kenttä- ja laboratoriovarastointikokeet, 2) kuivauskokeet, 3) terveys- ja ympäristövaarojen arviointi, 4) sivutuotekemikaalien kartoitus ja 5) yhteistyö SLU:n tutkimusprojektin kanssa.

Koemateriaaleina olivat vihreä ja ruskea hakkuutähdehake sekä tuore sahanpuru, joista tehtiin marras–joulukuussa 2001 polttoainekohtaiset koeaumat Kokkolan voimalaitoksen polttoainekentälle. Aumojen säilyvyyttä seurattiin 3 ja 7 kuukauden sekä viherhakkeella vielä 10 kuukauden kuluttua tehdyillä leikkauksilla. Varastoissa seurattiin polttoaineen lämpötilan kehitystä sekä polttoaineominaisuuksien, kemiallisen koostumuksen ja mikrobipitoisuuksien muutoksia. Polttoainekentällä olevan ison varastoaman lämpötiloja seurattiin noin kuukauden verran. Laboratoriovarastointikokeet tehtiin lähtökoemateriaaleille SLU:n lysimetreillä, joilla selvitettiin kontrolloiduissa olosuhteissa, miten lämpötila ja sademäärä vaikuttavat varastoitavaan materiaaliin ja varastoinnin valumavesiin. Veden läpäisykokeet tehtiin samanaikaisesti polttoainekohtaisina rinnakkaiskokeina sekä huoneenlämmössä lämmittämättömillä että noin 60 °C:seen lämmitetyillä lysimetreillä.

Kuivauskokeita tehtiin laboratoriomitan koelaitteistoilla, ensin pyöröhaihduttimella ja sitten projektissa kehitetyllä kiinteäpatjaisella panoskuivurilla (patjakuivuri). Lisäksi kuivauksessa haihtuvia kaasumaisia yhdisteitä tutkittiin head-space-kaasukromatograafi-atomiemissioilmaisain-massaspektrometrillä (head-space-GC-AED/MS) ja pyrolyysi-kaasukromatograafi-massaspektrometrillä (pyrolyysi-GC-MS). Lähtö materiaaleina kuivauskokeissa olivat varastointikokeiden lähtönäytteet sekä 7 kuukautta varastoidut näytteet. Lähtökosteudet eri materiaaleilla olivat 40–60 paino-%. Näytteet kuivattiin noin 10 paino-%:n kosteuteen lähinnä kuivauskaasun lämpötilassa 100–200 °C. Lisäksi tehtiin joitakin kokeita 60 °C:ssa

ja 250 °C:ssa. Haihtuneet orgaaniset yhdisteet määritettiin lauhteesta ja kaasufaasista. Patjakuivuri (kuva 1) käsitti metallisen suljetun astian, johon näyte (0,3–0,4 kg) asetettiin yläkautta tiheän verkon päälle. Kuivuri oli öljyhauteessa ja verkon alle johdettiin hauteen lämpötilaan lämmitettyä typpeä. Näytteestä haihtunut vesi ja haihtuvat yhdisteet johdettiin kuivurin yläosasta lauhduttimeen, josta kaasu ja lauhtumattomat yhdisteet jatkoivat talteenottoliuosten kautta ulos.



Kuva 1. VTT:n patjakuivurikoelaitteisto.

Varastointi- ja kuivauskokeiden materiaalinäytteille määritettiin polttoaineominaisuuksia ja kemiallista koostumusta. Polttoaineanalyyseistä määritettiin kosteus-, tuhka- ja haihtuvien aineiden pitoisuudet, lämpöarvot sekä CHN-pitoisuudet. Orgaanista koostumusta tutkittiin määrittämällä selluloosan, hemiselluloosan, ligniinin ja uuteaineiden pitoisuudet. Epäorgaanisista aineosista määritettiin alkalimetalleja, mangaani ja kloori. Orgaaniset yhdisteryhmät analysoitiin Åbo Akademiassa.

Materiaalikoekoiden varastointinäytteille määritettiin mikrobeista mesofiiliset ja termotolerantit sienet, mesofiiliset bakteerit sekä termofiiliset sädesienet. Kenttävarastojen purkamisen yhteydessä tehtiin ilman epäpuhtauksien työhygieeniset mittaukset, joiden tarkoituksena oli mitata terveydelle haitallisia tekijöitä. Työntekijän hengitysvyöhykkeeltä mitattiin pöly-, endotoksiini- ja mikrobipitoisuu- det. Työhygieeniset mittaukset ja analyysit suoritti Kuopion aluetyöterveyslaitos.

Kuivauskokeissa haihtuvat yhdisteet otettiin talteen lauhde- ja kaasunäytteinä. Lauhdenäytteille määritettiin jätevesiparametreista pH, kemiallinen hapenkulutus (COD_{Cr}), kokonaisorgaaninen hiili (TOC) ja johtokyky sekä lisäksi erillisiä yhdisteryhmiä. Kaasunäytteistä määritettiin ei-lauhtuneita haihtuvia orgaanisia yhdisteitä: terpeenejä ja aldehydejä. Lysimetrikokeiden valumavesille tehtiin myös jätevesianalyysjä.

Projektin edetessä kemikaalien talteenottoon liittyvästä osatehtävästä johtoryh- mä esitti, ettei siihen panostettaisi kuitenkaan suuremmalti.

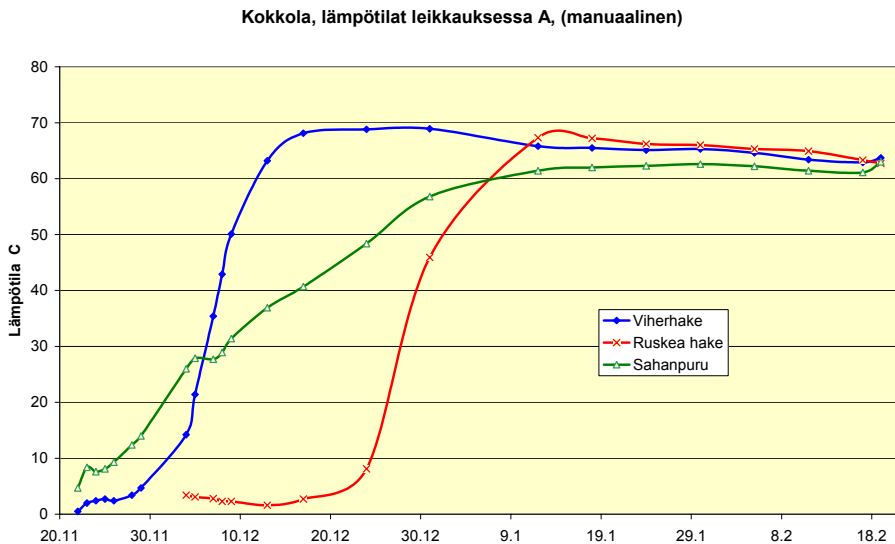
SLU:n projektiin osallistuttiin analysoimalla SLU:n varastointikokeiden näyttei- tä ja arvioimalla työhygieenistä riskiä. SLU:n projekti puolestaan osallistui VTT:n projektiin suorittamalla lysimetrikokeet. Lisäksi yhteistyö käsitti tiedon- vaihtoa SLU:n ja VTT:n välillä.

4. Tulokset

4.1 Lämpötilan ja kosteuden kehitys varastoauomoissa

Ensimmäisten kolmen kuukauden aikana kaikki koeaumat lämpenivät 60 ja 70 oC:n välille (kuva 2). Lämpötilojen nousunopeudet olivat eri polttoaineilla erilaisia. Hakeaumoissa lämpötilan nousu oli hyvin nopeaa. Sahanpuruaumassa lämpötilan nousu oli tasaisempaa ja hitaampaa. Talven ja kevään aikana lämpöti- lat hakeaumoissa laskivat hyvin hitaasti. Lämpenemisestä johtuen kosteusja- kaumat kasvoivat varsinkin hakeaumojen leikkauksissa. Aumojen pinnoille ja varsinkin yläosiin muodostui hyvin kostea vyöhyke, jossa kosteus saattoi nousta 60–70 paino-%:iin. Varastoinnin aikana kosteudet kasvoivat aumaleikkauksissa. Kuivimmat vyöhykkeet, kosteudeltaan 23–30 paino-%, olivat auman ala- ja kes- kiosissa. Kosteusmuutokset leikkauksissa olivat huomattavasti pienempiä puru-

aumassa kuin hakeaumoissa. Varastoauomojen koolla ja muodolla voidaan vaikuttaa polttoaineen optimaaliseen kuivumiseen varastoinnin aikana



Kuva 2. Lämpötilojen kehitys eri materiaalien koeaumoissa kolmen kuukauden aikana.

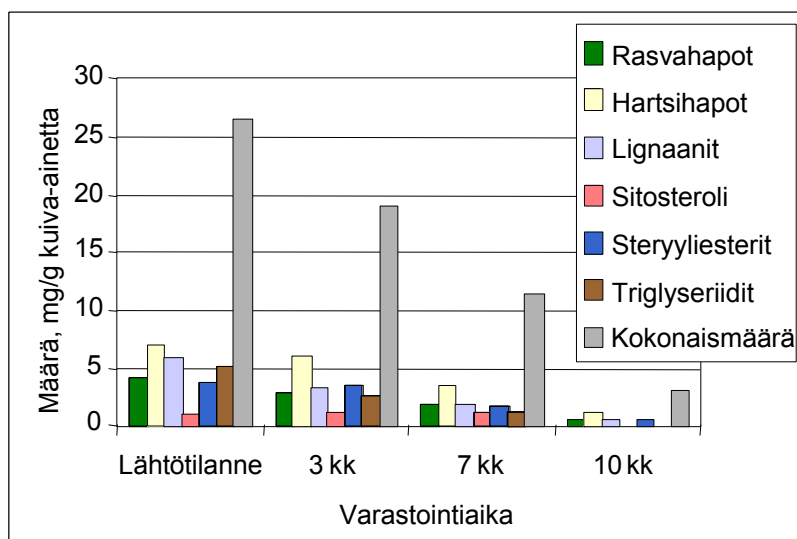
4.2 Materiaalien ominaisuuksien muuttuminen varastoinnissa

Kosteusmuutoksiin verrattuna muutokset muissa polttoaineominaisuuksissa olivat pienempiä. Polttoaineominaisuuksien muutokset olivat suurempia hakkeille kuin sahanpurulle. Viherhakkeen tuhkapitoisuus kasvoi noin 1 %-yksikköä ja haihtuvien aineiden pitoisuus laski noin 2 %-yksikköä 10 kuukauden varastoinnin aikana.

Lähtömateriaaleista viherhake ja ruskeahake olivat kuusivaltaisia ja sahanpuru oli lähinnä mäntyä. Hakkeet sisälsivät enemmän ligniiniä ja epäorgaanisia aineita ja vähemmän selluloosaa kuin sahanpuru. Viherhake sisälsi lisäksi enemmän uuteaineita kuin muut materiaalit. Varastoinnin edetessä tapahtui materiaalien orgaanisten pääaineryhmien pitoisuuksissa muutoksia. Muutokset johtunevat aumassa tapahtuvasta mikrobiologisesta hajoamisesta ja aumoihin muodostuneista korkeista lämpötiloista. Varastoinnissa tapahtuu aineiden hapettumista,

polymeroitumista, hydrolysoitumista ja haihtumista. Koevarastoissa 7 kuukauden aikana uuteainepitoisuus pieneni 60–70 % ja viherhakeaumassa 10 kuukauden aikana 90 % (kuva 3). Glukoosi- ja ligniinipitoisuudet puolestaan kasvoivat viherhakkeella 20 % ja ruskealla hakkeella 10–14 %.

Monet muutokset materiaaleissa, kuten tuhka-, ligniini- ja glukoosipitoisuuksien kasvaminen sekä haihtuvien ja uuteaineiden pieneneminen, viittasivat varastoinnin aikana tapahtuviin kuiva-ainehäviöihin.



Kuva 3. Vihreän hakkuutähdehakkeen uuteainekoostumus varastoinnissa.

4.3 Materiaalien työhygieeninen laatu

Myös mikrobiologisesta näkökulmasta tarkasteltuna kaikki tutkitut materiaalit muuttuivat varastoinnin aikana. Kaikki materiaalit homehtuivat. Mikrobipitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa kaikkien kasojen purkamisen yhteydessä. Homesienipitoisuudet, erityisesti termotoleranttien sienten pitoisuudet, olivat korkeita. Ruskean hakkeen ja sahanpurun käsittelyssä myös endotoksiinialtistuminen oli merkittävä. Purukasan käsittelyn yhteydessä mitattiin korkeimmat pölypitoisuudet.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että on olemassa ilmeinen riski, että puupe-
räisten polttoaineiden käsittelyn yhteydessä työntekijät altistuvat terveyttä vaa-
rantaville tekijöille haitallisessa määrin. Varastoitavalla materiaalilla, kosteudel-
la ja varastointiajalla on tähän erittäin suuri merkitys. Erityisesti mikrobipitoi-
suudet olivat kohonneet merkittävästi, joten työntekijöiden tulisi käyttää työ-
kennellessään kyseisten materiaalien kanssa P3-luokan suodattimilla varustettuja
hengityksen suojaimia.

4.4 Lysimetrikokeiden valumavesien laatu

Lysimetrikokeiden valumavesinäytteiden pH vaihteli välillä 4,0–5,6, COD välil-
lä 2 000–9 100 mg/l ja TOC välillä 900–4 100 mg/l. Kokeiden kokonaisvaluma-
veden COD oli 0,1–0,5 paino-% ja TOC 0,1–0,2 paino-% lähtömateriaalien kui-
va-aineesta. Lämmittämättömissä ja lämmitetyissä lysimetreissä saadut valuma-
vedet eivät eronneet laadultaan toisistaan merkittävästi. Lämmittämättömissä
lysimetreissä valumaveteen liukeni orgaanista aineesta eniten viherhakkeesta (0,5
paino-%) ja lämmitetyissä eniten ruskeasta hakkeesta (0,4 paino-%). Hakemate-
riaalien valumavedet olivat ruskeita ja sahanpurulla harmaita. Lämmitettyjen
lysimetrien kokonaisvalumavesien COD oli 9–16 % veteen liukeneville aineille
saadusta maksimimäärästä, joka oli määritetty uuttamalla materiaaleja 1 tunnin
ajan 60 °C:ssa.

Lysimetrikokeiden valumavesinäytteiden orgaaninen kuormitus COD- ja TOC-
arvojen perusteella oli suhteellisen korkea. Orgaaninen kuormitus oli selvästi
korkeampi ja pH matalampi kuin normaalilla jätevedellä.

4.5 Kuivauksen päästöjen arviointi

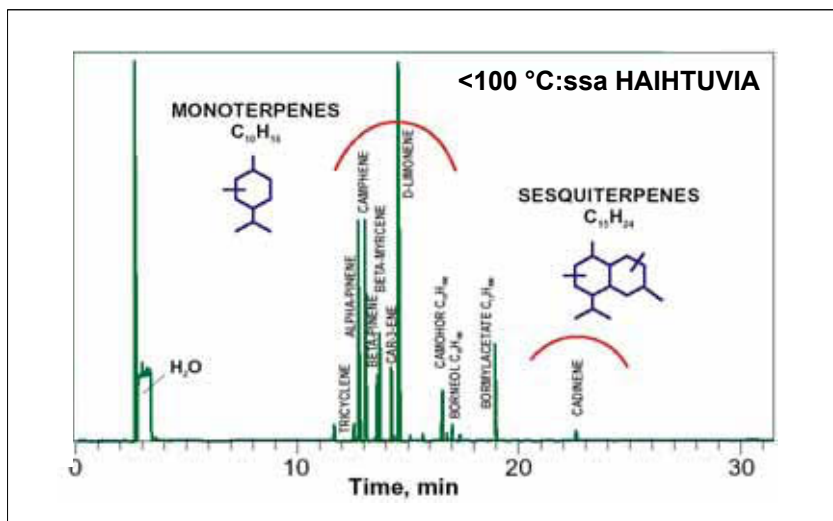
Kuivauksen päästöjen arviointi perustui kuivauskokeissa eri lämpötiloissa muo-
dostuvien haihtuvien, lauhtuvien ja lauhtumattomien, yhdisteiden määrittämiseen.
Headspace-GC-AED/MS-laitteistolla tunnistettiin haihtuvia yhdisteitä. Patja-
kuivuri- ja pyöröhaihdutinkokeissa analysoitiin lähinnä lauhtuvia yhdisteitä ja
saatiin tietoa lauhteen laadusta, jolla on merkitystä, mikäli kuivurin haihtuvat
lauhdutetaan ja johdetaan jäte- tai poistovesiin. Yhdistämällä lauhtuvien yhdis-
teiden ja kaasumaisten yhdisteiden määrät saadaan käsitys kuivauksen orgaani-

sista kokonaispäästöistä. Kuivauskokeissa määritettyjen kuiva-ainehäviöiden oletettiin antavan kuvan kuivauksen kokonaispäästöistä. Patjakuivurikokeissa tuoreesta viherhakkeesta vapautui 100–170 °C:n lämpötilassa haihtuvaa ainesta kuiva-ainehäviöiden perusteella lähes 3 paino-% ja sahanpurusta noin 1 paino-%. Kuiva-ainehäviöihin on kuitenkin suhtauduttava varauksella, sillä kaikkea materiaalia kuivauksen jälkeen ei välttämättä saatu talteen ja normaalissa kuiva-ainemäärityksessäkin saattavat helposti haihtuvat yhdisteet aiheuttaa häviötä. Myöhemmin todettiin, että kuiva-ainehäviöitä ei voida käyttää päästöjen laskemiseen.

Matalissa 90 ja 120 °C kuivauslämpötiloissa headspace-GC-AED/MS:n perusteella haihtui tuoreista lähtömateriaaleista orgaanista hiiltä huomattavasti enemmän kuin varastoiduista materiaaleista, sillä aumauksen aikana oli orgaanisia yhdisteitä haihtunut. Tuoreella viherhakkeella orgaanista hiiltä haihtui 90 °C:ssa 4-kertaisesti, ruskealla hakkeella 3-kertaisesti ja sahanpurulla 2-kertaisesti verrattuna varastoituihin materiaaleihin. Tuoreista materiaaleista haihtui monoterpeenejä ja seskviterpeenejä ja viherhakkeella lisäksi monoterpenoideja (kuva 4). Yli 150 °C:ssa vapautui materiaaleista ligniinin ja hiilihydraattien hajoamistuotteita.

Lauhtuvia yhdisteitä vapautui materiaaleista 100–120 °C:n kuivauslämpötilassa TOC:na määritettynä 0,01–0,09 paino-% ja COD:na 0,03–0,24 paino-% kuivasta lähtömateriaalista. Lauhteiden koostumus vaihteli eri raaka-aineiden kesken. Tuoreella viherhakkeella saadut lauhteet sisälsivät alkoholeista metanolia ja etanolia, joiden osuus TOC:sta oli 40 %. Muut materiaalit sisälsivät alkoholeista vain metanolia. Korkeammassa 150 °C lämpötilassa vapautui materiaaleista lauhtuvia yhdisteitä hiukan enemmän, TOC:na 0,02–0,10 paino-% ja COD:na 0,05–0,26 paino-% kuiva-aineesta. Varastoidusta viherhakkeesta haihtui orgaanisia yhdisteitä selvästi enemmän kuin tuoreesta viherhakkeesta. Varastoidusta viherhakkeesta haihtui 150 °C:ssa lauhteeseen lähinnä happoja, etikka- ja muurahaishappoa, joiden määrä oli 0,3 paino-% kuiva-aineesta ja osuus TOC:sta 97 %. Kuivauskokeissa haihtuvat orgaaniset pääyhdisteet olivat siten monoterpeenit, seskviterpeenit, alkoholit, aldehydit ja karboksyylihapot.

Kuivauksen aikana lähtömateriaalien sisältämien haihtuvien aineiden, hemiselloosan ja uuteaineiden pitoisuudet pienenevät, kun taas hiili- ja glukoosipitoisuudet kasvoivat.



Kuva 4. Vihreän hakkuutähdehakkeen kuivauksessa noin 100 °C:ssa haihtuvia yhdisteitä.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tutkimus antoi uutta tietoa hakkuutähdehakkeen ja sahanpurun käyttäytymisestä varastoinnissa ja kuivauksessa. Lisäksi saatiin tietoa esikäsitteilyn aiheuttamista päästöistä, kuten haihtuvista yhdisteistä, ja valumavesien laadusta, sekä ympäristövaikutuksista ja työhygienisistä riskitekijöistä sekä niihin liittyvästä suojautumisesta. Projektin antamien tulosten lisäksi saadaan ruotsalaisen yhteistyöprojektin kautta tietoa kuoren käyttäytymisestä varastoinnissa sekä siihen liittyvästä työhygieniasta.

Tutkimuksen tuloksia voivat hyödyntää projektiin osallistuneet yritykset sekä muut puupolttoaineiden, kuten metsätähteen, toimittajat, kuivurivalmistajat, polttoainetalosteiden valmistajat sekä lämpövoimalaitokset. Projektin tuloksia on julkaistu Bioenergia-konferenssissa syksyllä 2003 (Fagnäs et al., Changes and emissions in wood fuels during storage and drying). Lisäksi projektin loppuraportista on tarkoitus tehdä uuden jatkoprojektin tulosten kanssa julkaisu VTT:n sarjoihin sekä artikkeleita kansainvälisiin lehtiin ja/tai seminaareihin.

6. Jatkotutkimustarpeet

Työssä todettiin, että jatkotutkimuksessa tulisi esimerkiksi määrittää tarkemmin varastointiajan vaikutus kuivauksessa haihtuviin yhdisteisiin. Työssä saatiin alustava käsitys, että varastoinnilla on vaikutusta sekä kaasumaisiin helposti haihtuviin että lauhtuviin orgaanisiin yhdisteisiin. Puupolttoaineiden laadun ja koostumuksen sekä niiden varastoinnin ja kuivauksen vaikutuksia jalosteiden laatuun tulisi selvittää jalostuskokeiden avulla. Kuivauskokeissa todettiin, että materiaalien haihtuvien aineiden ja uuteaineiden pitoisuudet pienenevät kuivauksessa, mikä vaikuttaa pyrolyysiöljyn laatuun ja mahdollisesti pellettien ominaisuuksiin.

Tutkimus jatkui vuonna 2003 Puuenergian teknologiaohjelmassa uutena projektina ”Puupolttoaineiden esikäsittelyn kemialliset vaikutukset”. Projektin tavoitteena on selvittää erilaisten potentiaalisten puupolttoaineiden ja niiden kuivauksen vaikutus jalosteista pellettien ja pyrolyysiöljyn laatuun. Kuivaukseen liittyen tavoitteena on myös tutkittavien puupolttoaineiden kuivauksessa muodostuvien päästöjen kokeellinen selvittäminen. Tulosaineiston avulla luodaan kuivurin malli, joka ottaa huomioon päästöt ja jota voidaan käyttää kuivauksen integroinnissa eri jalostusprosesseihin. Yhteistyö SLU:n kanssa jatkui uudessa projektissa.

Julkaisut ja raportit

Fagnäs, L., Impola, R., Rautiainen, R. & Ajanko, S. 2003. Changes and emissions in wood fuels during storage and drying. International Nordic Bioenergy Conference, Jyväskylä, Finland, 2–5 September 2003. 2 s.

Fagnäs, L., Impola, R. & Kuoppamäki, R. 2002. Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa – PUUT29. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 231–239.

Fagnäs, L., Kuoppamäki, R. & Impola, R. 2003. Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa. Loppuraportti 23.4.2003. Espoo: VTT Prosessit. 28 s. + liitteet (osaraportit 1 ja 2).

Kuoppamäki, R., Impola, R., Fagnäs, L. & Ajanko, S. 31.03.2003. Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa. Osaraportti 1, Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa. Espoo: VTT Prosessit. 83 s. + liitteet 3 s.

Fagnäs, L., Kuoppala, E., McKeough, P. & Leppämäki, E. 30.04.2003. Puupolttoaineiden muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa. Osaraportti 2, Puupolttoaineiden päästöt ja muutokset kuivauksessa. Espoo: VTT Prosessit. 33 s. + liitteet 5 s.

Fagnäs, L., Impola, R., Kuoppamäki, R. & Ekman, R. 24.4.2002. Puupolttoaineiden kemialliset muutokset varastoinnissa ja kuivauksessa. Väkiraportti. Espoo: VTT Energia. 38 s. + liitteet 4 s.

Kuorihävikin vähentäminen harvesterihakkuussa – PUUT35

Harri Liiri & Antti Asikainen
Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus
PL 68, 80101 Joensuu
E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

Ari Erkkilä, Heikki Kaipainen & Jouko Aalto
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Control of bark losses in single grip harvester cutting

The bark losses due to unwanted debarking in mechanised cuttings are estimated to correspond to 2 TWh of energy. Therefore actions to decrease peeling and reroute bark to energy production is important. In addition, peeling of bark causes damages to the surface layers of industrial roundwood lowering therefore its added value. Bark's peeling is at its highest during the sap season when it is approximately three times higher compared to the rest of the year. This projects aim is to decrease the level of bark's peeling in cutting done by a single grip harvester significantly. To achieve this goal, the level of bark's peeling and its characteristics were determined in different season. Also mechanics of delimiting knives knot-cutting process were studied. It was found that lowering of delimiting knives' pressure to one third of its normal values reduced the unwanted debarking most significantly. Also decrease in feeding rolls' pressure had a similar effect.

1. Tausta

Suomessa metsäteollisuudelle hakattavasta puutavarasta yli 95 % korjataan yksioteharvestereilla. Eräs yksioteharvesterihakkuun haitoista on puutavaran kuoriutuminen karsinnan ja katkonnan aikana varsinkin nila-aikana, jolloin kuoresta jopa pääosa jää maastoon. On arvioitu, että vuotuinen kuoriutumishukka on polttoenergiämäärällisesti jopa 2 TWh:a. Lisäksi suojaavan kuorivaipan vaurioituminen ja irtoaminen aiheuttaa puutavaran pintakerrosten kuivumista varastoinnin aikana, syöttörullien painautumista pintapuuhun, puutavarahukkaa, huonoa kuorintatulosta sekä pidempiä kuorinta-aikoja rumpu- ja roottorikuorinnassa. Pintaosien kuivuminen ja tummuminen pienentää erityisesti selluhakkeen massansaantoa ja lisää valkaisun tarvetta.

Puun kuoriutuminen aiheutuu mm. syöttöpyörien luistosta ja karsintaterien painumisesta oksapahkaan, jolloin puusta irtoaa pahkan mukana pitkä viilu kuorta. Ihannetapauksessa syöttötelojen pito on luistoton ja runkoa vahingoittamaton ja kuitenkin karsintaterät leikkaavat oksat kuorta irrottamatta. Tilannetta on pyritty selvittämään tutkimalla kenttäolosuhteissa hakkuukoneen syöttörulla- ja terätkaisujen sekä niiden puristusaineiden vaikutusta kuoriutumiseen. Laboratorioolosuhteissa on tilanteeseen pyritty tutkimalla koelaitteella eri terä- ja teroituskulmien sekä muiden leikkuuparametrien vaikutusta leikkuuvoimiin. Laboratoriokokeista saatujen mittaustulosten avulla laadittiin leikkuutapahtumaa kuvaavat regressioyhtälöt, joilla voidaan laskea optimaaliset muuttuja-arvot leikkuuvoimille, tarkoituksena löytää sellainen terä- ja teroitusmuoto sekä oksan katkaisutapa, että syöttöpyörille tuleva vastus leikkuuvoimia vähentämällä nykyisestään vähenee.

2. Tavoitteet

Tavoitteena oli selvittää kuoriutumisen määrä ja siihen vaikuttavat tekijät hakkuissa. Laboratoriokokeiden tavoitteena oli määrittää kokeelliset regressioyhtälöt oksan katkaisussa karsintateriin vaikuttavien voimien ja oksiin liittyvien muuttujien välille. Lopputavoitteena on vähentää kuoriutumista 30 %:lla, erityisesti ongelmallisena nila-aikana.

3. Toteutus

Tutkimushanke toteutettiin Metsäntutkimuslaitoksen ja VTT Prosessien yhteishankkeena. Tutkimuksessa olivat mukana myös Ponsse, Timberjack, Partek Forest, Metsäliitto, Stora-Enso ja UPM-Kymmene. Metsäntutkimuslaitos on vastannut hankkeen koordinoinnista, kuoriutumismäärien selvittämisestä kenttäolosuhteissa sekä kuoren sidosvoimatutkimuksen määrittämisestä. VTT Prosessien vastuulla on ollut oksan katkaisukokeet laboratoriokoelaitteella.

3.1 Kuoriutumismittaukset

Tavoitteeseen pääsemiseksi oli selvitettävä kuoriutumisen taso hakkuissa ja kuoren irtoamiseen vaikuttavat vuodenaikaisvaihtelut puutavarassa sekä tutkittava nila-ajan testeissä erilaisten harvesterikouran asetusten vaikutusta kuoriutumiseen.

Kuoren irtoamisherkyys vaihtelee vuodenaikojen mukaan, mikä johtuu ilmastosta ja puun kasvifysiologisista ominaisuuksista. Talvella pakkasoloissa kuori pysyy tiukasti kiinni ja kuoriutuminen on pientä, kun taas nila-aikana puusolukon jakautuessa kuori irtoaa herkästi. Nila-aika on karkeasti toukokuun puolenvälin ja kesäkuun viimeisen viikon välinen aika.

Kuoriutumismäärän mittaukseen kehitettiin menetelmä, jossa pölkkyistä digitaalikameralla otetuista kuvista voidaan määrittää kuvankäsittelyohjelmistoilla kuorettoman vaipanalan osuus. Yhdistettynä tämä tieto harvesterin mittatietoihin ja kuorenpaksuustietoihin saatiin laskettua kuoriutumismäärät. Jokainen pölkky kuvattiin molemmilta puolin, ensimmäisen ollessa kouraa vasten oleva yläpuoli ja toisen sitä kohtisuoraan vastaan oleva alapuoli.

Maastokokeita tehtiin vuoden 2003 maaliskuussa, nila-aikana ja syys-lokakuun vaihteessa. Päätesteissä nila-aikana tehtiin kolmen eri konevalmistajan valitsemalla koneella, kullakin viikon mittaiset kenttäkokeet. Kokeissa hakattiin mäntyä ja kuusta 10–20 rungon erissä erilaisilla asetuksilla. Talvella ja syksyllä tehtiin ns. normaaliasetuksilla erät sekä männyllä että kuusella. Nila-aikana varioitavia muuttujia edellisten lisäksi olivat konevalmistajien erilaiset rulla- ja teräratkaisut sekä niiden puristuspaineet. Yksistään nila-ajan testien aikana määritettiin kuoriutuminen noin 1 900 pölkystä.

3.2 Kuoren sidoslujuus

Kuorta paikallaan pitäviä kestävyiden sidosvoimia on kahdenlaisia, joista puun ja kuoren välistä kutsutaan adheesioksi, ja kuoren sisäistä koheesioksi. Kuoriutumiseen vaikuttavaa kuoren ja puuaineen välistä adheesiovoimaa on hankkeessa selvitetty opinnäytetyönä (Kuronen 2004). Kuoriutumismäärän kenttäkokeiden yhteydessä kerättiin aineisto sidosvoiman tutkimusta varten. Näytepölkkyjä otettiin puulajeittain viidestä rungosta, jokaisesta 3 kappaletta 60 cm pölkkyä tyvitukin, välitukin ja latvakuidun juuresta. Näistä pölkkyistä valmistettiin sahaamalla noin 1 cm paksuja ja noin 9 cm korkeita koepaloja (kuva 1). Sidosvoiman mittaus tapahtui rasittamalla testikappaleen (kuva 1) kuorellista reunaa ylhäältäpäin rungon pituusakselin suuntaisesti Alwetron TCT 20 -lujuuskoestuslaitteella.



Kuva 1. Näytepölkky ja siitä valmistettu koestuskappale.

3.3 Karsintaterien laboratoriotutkimukset

Koeajoissa pyrittiin mahdollisimman hyvin jäljittelemään metsäolosuhteissa tapahtuvia katkaisutapahtumia eri muuttujien avulla ja mittaamalla muuttujien (x-muuttujat) vaikutus esiintyviin terävoimiin (y-muuttujat). Tutkittaviksi muuttujiksi valittiin yhdeksän: terän terävyys, teroituskulma, viiltokulma, päästökulma, leikkuunopeus, puulaji, oksakulma, oksanpaksuus, oksan olotila (sula ja jäinen). Osaa muuttujista tutkittiin kolmella muuttujan arvolla ja osaa kahdella muuttujan arvolla. Näistä laadittiin FPLAN-koesuunnitelmaohjelman avulla koeajosuunnitelma. Kukin koeajo toistettiin. Kokeita tehtiin yhteensä 296 koeajoa. Kussakin ajossa katkaistiin yksi koeoksa.

Tutkimusta varten rakennettiin lineaariliikkeen koelaitte, jolla voitiin matkia hakkuupään nopeaa liikettä (kuva 2). Laitteessa on 6 metriä pitkän vaakatasossa liikkuva pöytä, johon puun rungon korvaava liimapuupalkki kiinnitettiin, ja kiinteä raami, jonka pystysuunnassa säädettävään palkkiin anturoitu teräpidin ja terä kiinnitettiin. Pöytää liikutetaan hydraulimoottorin avulla. Pöydän nopeutta voidaan kiihdyttää portaattomasti 6 m/s saakka. Raamiaukon leveys on 1,2 m ja korkeus 1,7 m. Raamiin on mahdollista kiinnittää esim. hakkuupää.



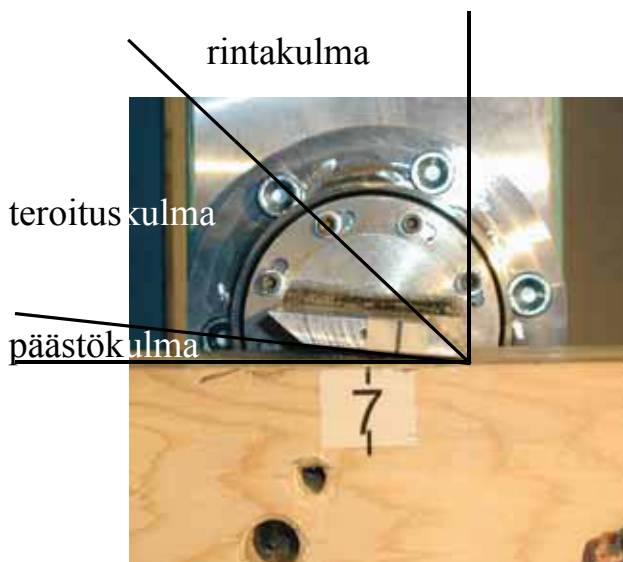
Kuva 2. Koelaitte, jonka pöydällä liimapalkki ja raamipalkissa teräpidin ja terä.

Puulajeiksi valittiin mänty ja kuusi, joiden tuoreista oksista koeoksat sorvattiin. Oksat sorvattiin noin 10 cm:n matkalta 25 mm:n ja 35 mm:n vahvuuteen ja oksien alapääät kartioiksi tukkiinnitystä varten. Oksat säilytettiin pakastimessa, jossa lämpötila oli $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sula-ajoissa oksat sulatettiin huoneenlämpöiseksi ja pakkasajoissa ne kiinnitettiin jäisinä kiinnitystukkiin. Ajot ajettiin tutkimushalissa, jossa lämpötila oli noin $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Oksien katkaisua varten oksat kiinnitettiin tekorunkoon, jona oli 300 kg painava kertopuupalkki. Kertopuupalkkiin tehtiin oksien kiinnitystä varten kartioistukat kolmelle terän ja oksan kohtaamiskulmalle: 60° , 90° ja 120° . Oksat kiinnitettiin kartioistukkaan. Kiinnitys varmistettiin sokalla.

Kokeita varten tehtiin yhdeksän terää kolmella eri teroituskulmalla (kuva 3) (25° , 35° , 45°) ja jokaista kolmella eri viiltokulmalla (0° , 15° , 30°). Teriä ajettiin terävänä, vastateroituksella ja tylsytettynä. Terät valmistettiin 12 mm paksusta, 82 mm leveästä ja 150 mm pitkästä teräslaatasta. Terät kiinnitettiin koeajojen ajaksi voimannmittausta varten anturoituun teräpitimeen.

Voimien mittausta tapahtui vastusvenymäliuskoilla. Voimat mitattiin kolmessa tasossa eli liikesuuntaiset, liikesuuntaan kohtisuorat ja terän suuntaiset voimat. Lisäksi mitattiin kahta terään kohdistuvaa taivutusmomenttia. Vastusvenymäliuskoilta tiedot menivät 5-kanavaiselle vahvistimelle, jonka jokainen kanava mittasi 5 000 mittausta sekunnissa. Lopullisesti tiedot tallennettiin tiedonkeruuhjelman avulla tietokoneelle analysointia varten. Koeajot kuvattiin suurnopeuskameralla.

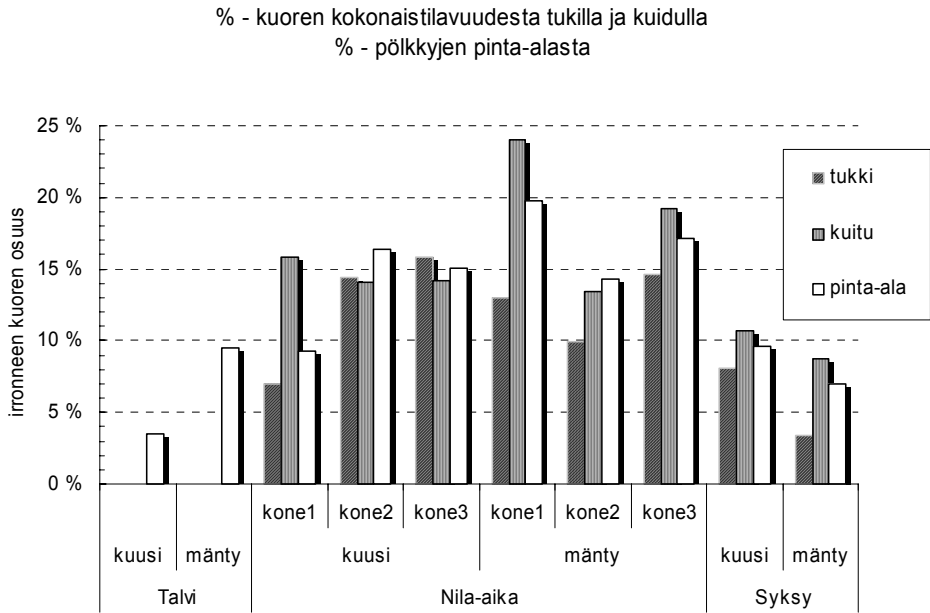


Kuva 3. Kokeissa käytettiin kolmea eri teroituskulmaa ja kahta päästökulmaa.

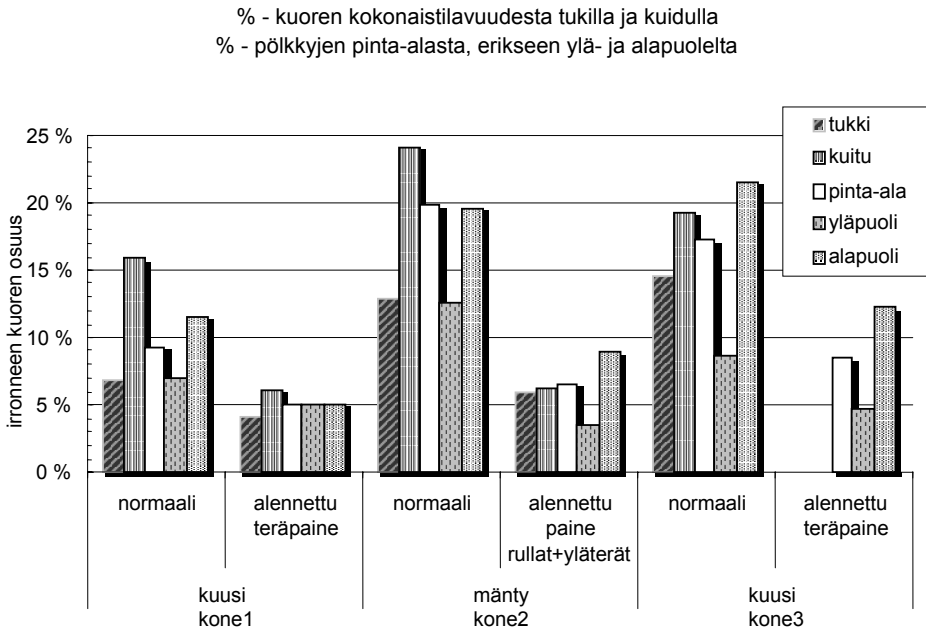
4. Tulokset

4.1 Kuoriutumismittaukset

Kuvankäsittelyohjelmistoilla laskettiin jokaisen pölkyn kuorivaippa-alan prosentuaalinen kuoriutuminen. Harvesterin mittatietojen ja kuoren paksuuden perusteella pystyttiin laskemaan pölkkyttäiset kuoriutumismäärät erikseen tukki- ja kuitupuulle. Tulokset on ilmoitettu poistuneen kuoren osuudella kuoren kokonaisuudesta ja poistuneena kuoren vaippapinta-alaosuutena. Talven mittauksien suuret arvot männyn osalta johtuvat huonoista maasto-olosuhteista, sillä mäkinen maasto pakotti käsittelemään useammat rungot kahteen kertaan. Talven mittauksien ja nila-ajan testien kolmannen konemerkin alennetun teräpaineen osalta ei ole harvesterin mittatietoa tehdystä puutavarasta. Kuvissa 4 ja 5 on osa tutkimuksessa tehtyjen mittauksien tuloksista.



Kuva 4. Puutavaran kuoriutuminen talvella, nila-aikana ja loppukesällä.

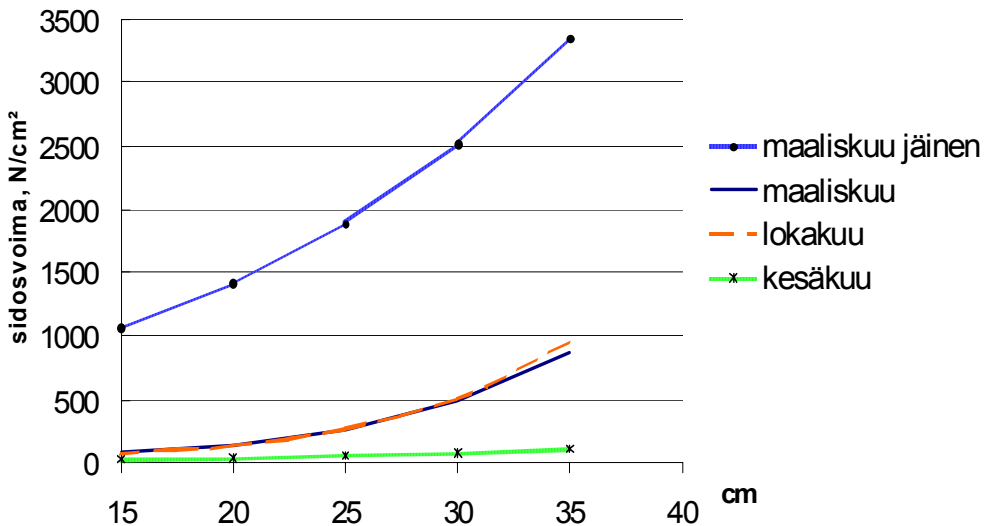


Kuva 5. Kuusen kuoriutuminen nila-aikana kouran eri asetuksilla.

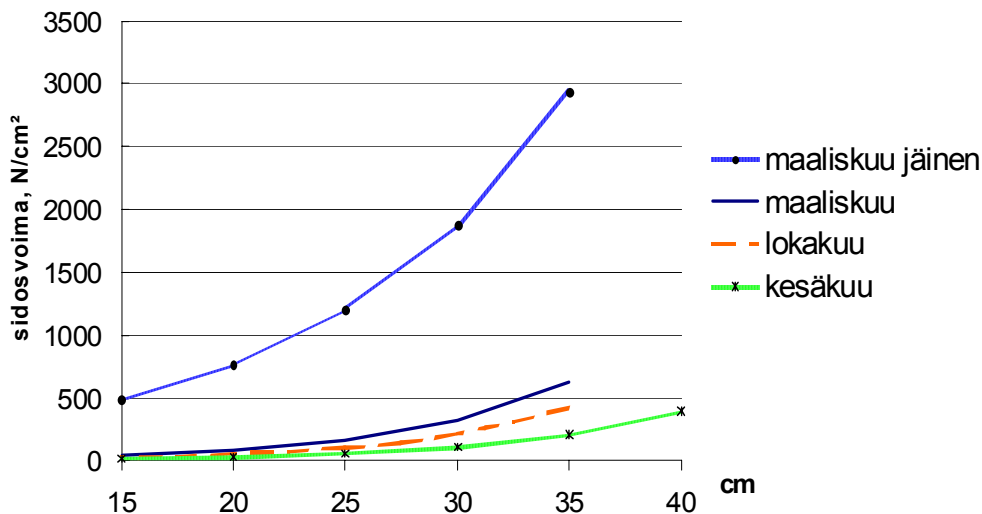
4.2 Kuoren sidoslujus

Mitta-anturilta saadusta voimakäyrästä kirjattiin maksimiarvo ennen kuoren irtoamista. Sidosvoima (N/cm^2) saadaan jakamalla tämä maksimivoima rasitetulla kuoren pinta-alalla. Maaliskuussa kerätylle talviaineistolle tehtiin kaksi koestusta huoneen lämpöisenä ja jäisenä, kaikki muut koestukset tehtiin huoneen lämpöisenä.

Saadusta aineistosta laskettiin lineaarisella regressioanalyysillä yhtälöt, joissa pölkyn läpimitta selittää kuoren kestävyuden muutosta. Saaduista yhtälöistä on havaittavissa tyvipölkkyjen (\varnothing 35 cm) sidosvoiman arvon laskevan nila-ajaksi kuusella (kuva 6) huomattavasti enemmän talviaineiston arvosta (874–113 N/cm^2), kuin männyllä (625–209 N/cm^2) (kuva 7). Talvi- ja syksyaineistosta mitatut arvot ovat molemmilla havupuilla lähellä toisiaan kaikissa läpimitoissa. Talviaineistosta jäisenä koestettu erä on tyvessä (\varnothing 35 cm) männyllä noin 5 kertaa ja kuusella 3 kertaa sulan aineiston arvojen yläpuolella. Latvaan päin mentäessä molemmilla puulajeilla erot aineistojen ja lämpötilojen välillä pienenevät.



Kuva 6. Kuusen puuaineen ja kuoren välinen sidosvoima pölkyn läpimitan funktiona eri vuodenaikoina.



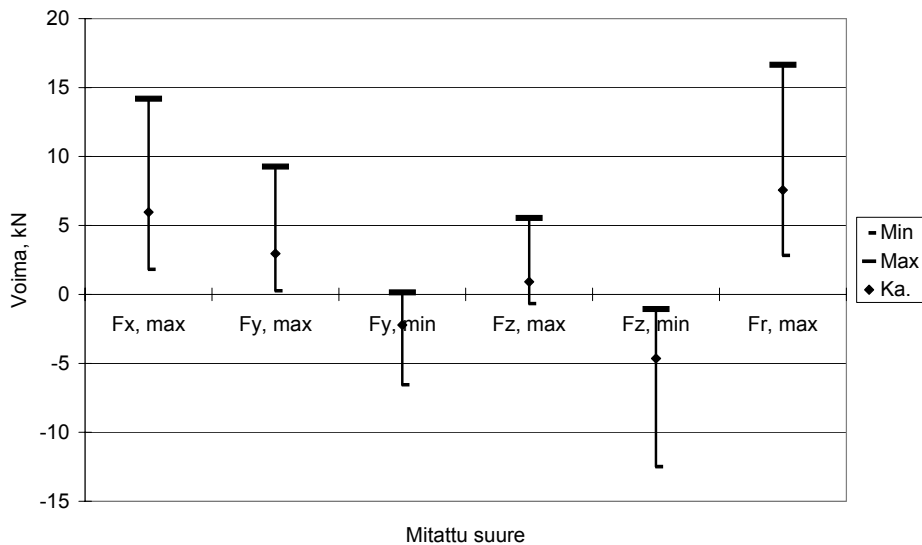
Kuva 7. Männyn puuaineen ja kuoren välinen sidosvoima pölkyn läpimitan funktiona eri vuodenaikoina.

4.3 Karsintaterien laboratoriotutkimukset

Kokeet ajettiin kahdella nopeudella: 1,8 m/s ja 4,9 m/s. Suurien datamäärien vuoksi mittaustiedostot käsiteltiin makrolla, joka etsi datojen joukosta oksan katkaisukohtaan, josta se myös piirsi voimakäyrästä. Makron etsimästä katkaisukohtasta etsittiin esiintyneiden voimien (F_x , F_y , F_z) maksimi- ja minimiarvot. Kokonaisvoima (F_r) laskettiin kaikkien voimien summana

$$(F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}).$$

Liikkeen suunnassa tehty työ ($F_x \cdot W$) saatiin laskemalla oksan katkaisumatkalla voimakäyrän (F_x) ja x-akselin väliin muodostunut pinta-ala. Koeajoissa mitattujen voimien maksimi- ja minimiarvojen sekä niiden summien vaihteluvälit ja keskiarvot esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Kokeissa esiintyneiden voimien vaihteluvälit ja keskiarvot.

Terän liikkeen suuntainen maksimivoima (F_{x_max}) oli 3–14 kN tapauksesta riippuen. Pystysuuntaisilla voimilla (F_y) pyrittiin selvittämään, miten karsintaterä käyttäytyy oksan leikkuutapahtumassa eli painuuko terä puun sisään kuorien myös kuviteltua runkopuuta vai kulkeeko se puun pintaa myöten tai sen yläpuolella kuorimatta runkopuuta. Positiivinen F_y -voimajana esittää terään vaikuttavien maksimivoimien eli terää nostavien voimien vaihtelun ja keskiarvon ja alaspäin suuntautuva jana minimivoimien, terää alaspäin painavien voimien vastaavat arvot. Positiiviset (F_{y_max} -) arvot, johtuvat monissa tapauksissa terän ponnahtamisesta ylöspäin sen vapautuessa painumisesta esimerkiksi oksan lohkeamisen tai katkeamisen jälkeen. Terän viiltokulmien vuoksi mitattiin myös teriin kohdistuneita poikittaisvoimia (F_z) eli terän suuntaisia voimia. Negatiivinen voiman suunta (F_{z_min}) on terän pitimeen päin suuntautuva voima.

Regressioyhtälöitä varten tulokset käsiteltiin monimuuttujamenetelmällä käyttäen UNSCRAMBLER-laskentaohjelmaa. Regressioyhtälökertoimet laskettiin terään kohdistuneille maksimi- ja minimivoimille kolmessa toisiaan vastaan olevaan suuntaan (F_x , F_y , F_z) ja niiden avulla lasketulle kokonaisvoimalle (F_r) sekä liikkeen suunnassa tehdyille työlle (F_{x_W}). Luotettavimmin kertoimet voitiin muodostaa voimille F_{x_max} , F_{r_max} ja liikkeen suunnassa tehdyille työlle F_{x_W} . Yhtälöiden R^2 -arvot olivat 0,889–0,895.

Mallinnuksen perusteella oksan olotilojen (sula ja jäinen) vaikutukset voimiin osoittautuivat niin pieniksi, että ne jätettiin pois mallista. Varsinaisten tutkittujen x-muuttujien lisäksi mallissa on mukana oksan tiheyden ja kosteuden vaikutus tutkittuihin voimiin.

5. Tarkastelu ja johtopäätökset

5.1 Kuoriutumismittaukset

Kuoriutuminen on selvästi pienimmillään talvella ja suurimmillaan nila-aikana. Kuoriutuminen on voimakkaampaa männyllä kuin kuusella. Tätä selittää adheesiovoiman lisäksi myös pitkälti se, että kuusen kuori on kauttaaltaan paksumpi kuin männyn (koheesiovoima). Kuoriutuminen on pölkyn alapinnalla odotettavasti suurempaa kuin yläpinnalla. Kyseinen ero kuitenkin vaihteli kone-merkkien välillä selvästi (kuva 5). Kuoriutumisen määrä aleni rullien ja terien puristuspainoiden alenemisen myötä. Selvimmin kuoriutumista nila-aikana alensi terien puristuspainoiden alentaminen normaalipaineista noin kolmannekseen. Tällä ei ollut vaikutusta karsintalaatuun. Lisäksi eräällä konemerkillä testatun vanhan apteerausjärjestelmän ero uuteen laskentateholtaan nopeampaan versioon tuotti selvästi alemmat arvot kuoriutumiseksi. Kiihdytysrampin alentamisella ei ollut juuri vaikutusta kuoriutumiseen. Kuvankäsittelymenetelmä ei ota huomioon osittaista kuoriutumista, vaan ainoastaan kokonaan kuoriutuneen alueen.

Nila-ajan testeissä puutavara puitiin aluspuiden päälle teloille, ja tämä tapahtui hieman hitaammin kuin normaali puinti maastoon. Tämä työtahdin hidastuminen pienensi kuoriutumista, sillä silmämääräisesti testierien ulkopuolella tehty puutavara oli kuoriutuneempaa kuin teloille tehdyt.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin harvesterin aiheuttamaa kuoriutumista. Pölkkyjen jokainen käsittely, kun niitä siirretään leimikolta tienvarteen ja kaukokuljetukseen, lisää kuoriutumista. Vähentämällä kuoriutumista hakkuun yhteydessä voidaan kokonaiskuoriutumista pienentää, koska hakkuussa kuorivaippaan tulevat vauriot laajenevat helposti kuljetusvaiheiden myötä.

Kuoriutumisen kannalta tärkeäksi tekijäksi muodostuu hakkuupään huolellinen ylläpito. Terien kunnossapito sekä terä- ja rullapainoiden pitäminen optimaalisi-

na johtavat alhaisempaan puutavaran kuoriutumiseen. Kuljettajan ammattitaidolla on huomattava merkitys kuoriutumisen alentamisessa. Nila-aikana kaikki ylimääräiset liikkeet hakkuussa lisäävät helposti kuoriutumista, mikä korostaa-kin ammattitaidon merkitystä laadukkaan työjäljen tuottamisessa.

5.2 Kuoren sidoslujuus

Käytetty menetelmä mittasi kuoren kestävyyttä eli adheesion ja koheesion yhteisvaikutusta. Tämä siksi, että rasitettaessa pientäkin aluetta kuoresta, välittää koheesio rasitusvoimaa kuoren sisällä, ennen kuin adheesiovoiman maksimi ylittyy ja kuori irtoaa. Puhdasta adheesiota on vaikeampi mitata, koska juuri koheesio vaikuttaa pienelläkin alalla.

Näin saadut kuoren kestävyiden arvot laskivat havupuilla kesäksi 40 % maaliskuun arvosta. Lokakuussa männyllä kuoren kestävyys oli maaliskuun tasolla, kuusella 16 % sen yläpuolella. Jäisen männyn kestävyys oli maaliskuun ja lokakuun arvoa noin 6 kertaa suurempi ja kuusella vastaavasti 9 kertaa suurempi. Aikaisempien tutkimuksien perusteella koheesiovaihtelua selittää parhaiten kuoren paksuus, lämpötila ja puulaji. Adheesiota taas vuodenaika, lämpötila ja puun kasvunopeus (Wästerlund 1985).

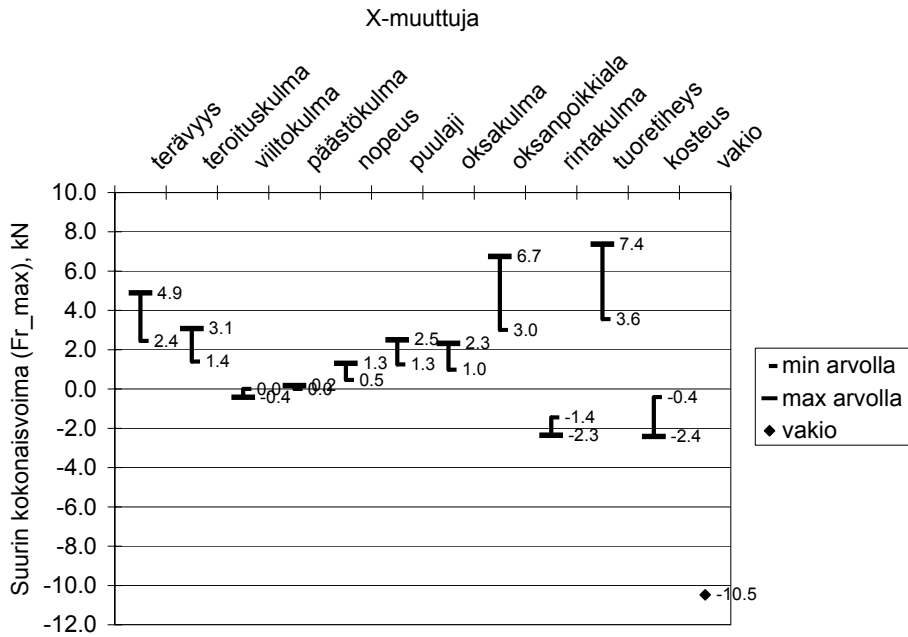
5.3 Karsintaterien laboratoriotutkimukset

Kuvassa 9 on esitetty saatujen regressioyhtälöiden avulla laskettu eri muuttujien vaikutus kokonaisvoiman maksimiarvoon (F_{r_max}) ja kuvassa 10 liikkeen suuntaisen voiman maksimiarvoon (F_{x_max}). Kuvassa 11 on esimerkki kuinka leikkunopeus, terän terävyys ja puulaji vaikuttavat liikkeen suuntaiseen maksimivoimaan, kun muiden muuttujien arvot eivät muutu.

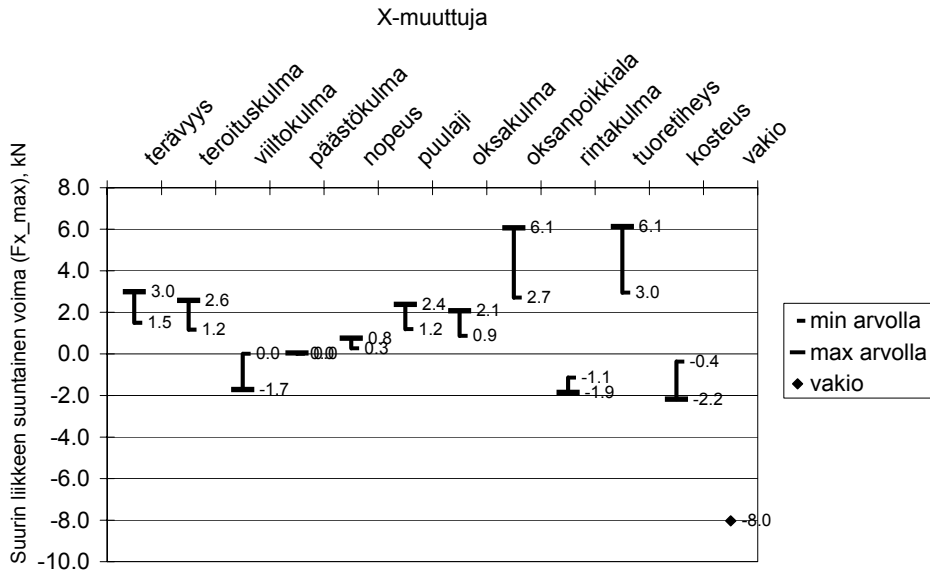
Suurimmat vaikutukset oksan katkaisussa esiintyviin voimiin ja työmäärään aiheutuivat puumateriaalista ja oksan mitoista. Oksan tiheyden ja poikkipinta-alan kasvu lisäsivät ja kosteuden kasvu vähensi mitatun maksimivoiman suuruutta. Puulajien välillä oli leikattavuudessa selvä ero, joka ei johtunut vain puulajien tiheyserosta.

Katkaisuterään liittyvillä muuttujilla oli myös vaikutusta. Näiden muuttujien arvoja voidaan muuttaa ja siten vaikuttaa esiintyviin voimiin. Terän terävyydellä oli suurin merkitys. Sekä teroituskulmalla että viiltokulmalla oli suunnilleen saman suuruinen vaikutus liikkeen suuntaiseen maksimivoimaan. Teroituskulman kasvaminen aiheutti voiman kasvamisen. Viiltokulman kasvaminen puolestaan pienensi liikkeen suuntaista maksimivoimaa, mutta kasvatti terän suuntaista voimaa. Oksan katkaisussa tehtyyn työmäärään oli selvästi eniten merkitystä terän terävyydellä.

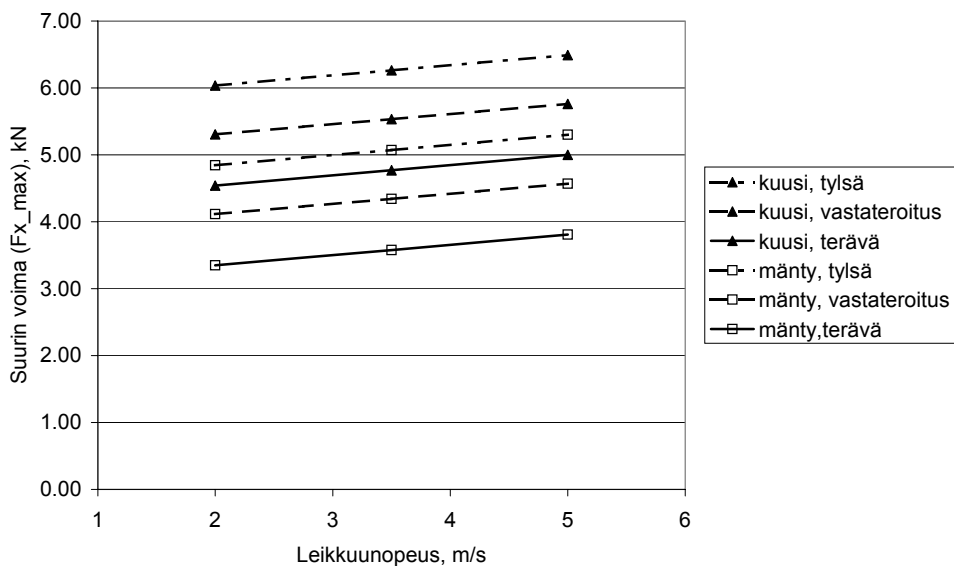
Suurimmat mitatut leikkuuvoimat olivat lähes 15 kN. Terävän ja tylsän katkaisuterän välinen ero oli liikkeen suuntaiseen voimakomponenttiin suurimmillaan vajaa 2 kN ja kokonaisvoimaan noin 2,5 kN. Terävän terän, vastateroituksella olevan ja tylsän terän kesken mitattiin selkeät erot sekä maksimivoimiin että työhön. Vastateroitus lisäsi tehdyn työn määrän kolminkertaiseksi terävään verrattuna. Terän terävyydellä ja vastateroituksella oli myös selvä merkitys terän hallittavuuteen runkoon painumisen suhteen. Oikeilla teräkulmilla ja sopivalla teroituksella on mahdollista pienentää oksan katkaisussa esiintyviä maksimivoimia. Terän hallittavuuden ja terävoimien suuruuden välillä on tehtävä kompromisseja. Leikkuunopeudella ei ollut vaikutusta työmäärään, mutta vaikutus maksimivoimien eroon oli suurimmillaan noin 1 kN.



Kuva 9. Muuttujien vaihtelun vaikutus kokonaisvoiman maksimiarvoon (F_{r_max}).



Kuva 10. Muuttujien arvon vaihtelun vaikutus liikkeen suuntaisen voiman maksimiarvoon (F_{x_max}).



Kuva 11. Leikkuunopeuden, terän terävyyden ja puulajin vaikutus liikkeen suuntaiseen voimaan (F_{x_max}).

Projektissa syntyneet julkaisut ja raportit

Asikainen, A. & Liiri, H. 2003. Control of bark losses in single grip harvester cutting. Bioenergy 2003. Proceedings in International Nordic Bioenergy Conference, 2nd–5th September 2003. S. 253–255.

Asikainen, A., Liiri, H., Ala-Ilomäki, J. & Lindblad, J. 2003. Puutavaran kuoriutuminen ja sen vähentäminen konehakkuussa. Puun käyttö- ja markkinamahdollisuudet – mitä uutta. PKM-tutkimusohjelman tutkimuspäivä, Lahti.

Erkkilä, A., Kaipainen, H. & Aalto, J. 2004. Mänty- ja kuusioksien katkaisukoheet. Projektiraportti PRO2/P6001/04. VTT Prosessit. 36 s. + liitt. 3 s. (luonnos)

Kuronen, M. 2004. Pro Gradu: Kuoren kestävyuden vuodenaikaisvaihtelu ja vaikutus puutavaran kuoriutumiseen hakkuussa. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. Julkaisematon.

Lähteet

Korpilahti, A., Arhimo, A., Backman, M. & Rieppo, K. 1998. Karsimattoman puun korjuu ensiharvennuksilta. Metsäteho, loppuraportti projektissa 137. Joulukuu 1998.

Wästerlund, I. 1985. The strength of bark on scots pine and norway spruce trees. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency. Rapport no 167. 100 s.

Puupolttoaineiden esikäsittelyn kemialliset vaikutukset – PUUT37

Leena Fagernäs & Paterson McKeough
VTT Prosessit
PL 1601, 02044 VTT
Puh. (09) 4561, faksi (09) 460 493
E-mail: leena.fagernas@vtt.fi, paterson.mckeough@vtt.fi

Markku Kallio
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 676 11, faksi (014) 672 596
E-mail: markku.kallio@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Chemical effects of the pretreatment of wood fuels

The aim was to determine the effects of different wood fuels and their drying on the quality of wood pellets and pyrolysis oil. In addition, an aim was to determine emissions from drying and to evolve a dryer model based on the emissions. In another VTT project funded by the Finnish Work Environment Fund and linked with the Tekes project, the quality of wood fuels was studied with regard to occupational health problems. The research was carried out in co-operation with Åbo Akademi University, Swedish University of Agricultural Sciences and Kuopio Regional Institute of Occupational Health.

The research included laboratory fixed-bed drying tests, modelling of drying emissions, pelletisation tests with flat die and ring die presses, and co-operation with the Swedish bark project. As raw materials, fresh sawdust, fresh and stored forest chips, and fresh pine and spruce barks, were used. The effects of feedstock, storage, particle size, temperature and final moisture content, on the emissions of drying were determined. The model obtained could be used in the inte-

gration of drying in different conversion processes. With forest chips and wood barks, it was possible to get high-quality pellets with the flat die press. The results related to pyrolysis oil were obtained in the VTT pyrolysis projects, funded by Tekes and EU. On the basis of the results, optimization of wood fuels and their pretreatment in regard to the quality of pellets and oils was carried out.

1. Tausta

Metsäpolttoaineita tultaneekin myös käyttämään lisääntyvästi polttoainejalosteiden tuotannossa. Esimerkiksi pellettituotannon kasvaessa on raaka-aineena käytettävä nykyisten kuivan sahanpurun ja kutterinpurun lisäksi myös tuoretta sahanpurua sekä jopa kuorta ja metsähaketta. Osaltaan käytön kasvuun on vaikuttanut puupellettien neutraalius kasvihuonekaasujen suhteen. Vuosikymmeniä karjan rehua on valmistettu pelletoimalla, mutta tekniikka ei sovellu täysin energiatuotteiden tekoon. Pellettien kulutus on kasvanut viime vuosina erityisesti Ruotsissa, jossa myös pellettejä tutkitaan monipuolisesti. Suomen pellettituotanto on 200 000 tonnia vuodessa.

Pyrolyysiöljyn valmistusta puupolttoaineista on kehitetty Suomessa jo 1980-luvun lopusta alkaen. Monissa yhteyksissä pyrolyysiöljyn on todettu olevan yksi kilpailukykyisimpiä biopolttonesteitä. Vapon ja Fortumin hakepolttonesteen tuotannon koelaitos vihittiin käyttöön vuonna 2002. Hakepolttonesteen kehitystyön onnistuminen avasi suuria markkinoita isompien kiinteistöjen lämmityksen osalta.

Polttoainejalosteiden raaka-aineiden erilainen laatu ja koostumus vaikuttavat kuitenkin jalosteiden laatuun. Materiaalien epähomogeenisuus aiheuttaa ongelmia. Lisäksi esikäsittely, kuten varastointi, murskaus ja kuivaus, vaikuttanevat jalosteiden ominaisuuksiin. Projektia edeltävässä projektissa PUUT29 todettiin hakkuutähdehakteissa ja tuoreessa sahanpurussa tapahtuvan varastoinnissa merkittäviä kemiallisia ja mikrobiologisia muutoksia. Varastoinnissa puun aineosat pilkkoutuvat ja esim. uuteainepitoisuudet pienenevät. Muutokset vaikuttanevat polttoainejalosteiden saantoon ja laatuun.

Kosteiden raaka-aineiden, kuten tuoreen sahanpurun, kuoren tai metsätähteen, käyttö jalostuksen raaka-aineena vaatii termistä kuivausta, yleensä noin 10 paino-%:n kosteuteen. Pyrkimyksenä kuivauksessa on nykyisin käyttää suhteellisen matalia lämpötiloja kuivauskaasun lämpötilan ollessa alle 250 °C. Kuivauksen tutkimiseen rakennettiin projektissa PUUT29 laboratoriomitan patjakuivurikoelaitteisto. Jalostusprosessien raaka-aineiden kuivausta suunniteltaessa tarvitaan tietoa muodostuvista päästöistä, jotka vaikuttavat laitosten ympäristölupiin. Päästöarvojen perusteella voidaan edelleen laatia kuivureille laskentamallit, joissa otetaan myös päästöt huomioon.

Edellisessä projektissa aloitettiin yhteistyö Sveriges Lantbruksuniversitetin (SLU) Bioenergia-osaston projektin ”Miljöaspekter vid lagring och hantering av bark” kanssa.

2. Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää erilaisten potentiaalisten puupolttoaineiden ja niiden kuivauksen vaikutus pellettien ja pyrolyysiöljyn laatuun. Työssä pyrittiin ymmärtämään laajemmin ja syvällisemmin yhteys raaka-aineiden ja jalosteiden laadun välillä seuraamalla fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia käsittelyketjussa. Tavoitteena oli, että pystyttäisiin, tutkimuksen onnistuessa, yksinkertaisen raaka-aineanalyysin perusteella ennakoimaan jalosteen laatua esimerkiksi uusilla polttoaineseoksilla. Kuivaus- ja pelletointikokeet oli tarkoitus tehdä projektissa, kun taas pyrolyysikokeet meneillään olevissa muissa VTT:n projekteissa. Kuivaukseen liittyen tavoitteena oli myös tutkittavien puupolttoaineiden kuivauksessa muodostuvien päästöjen kokeellinen selvittäminen. Tulosaineiston avulla pyrittiin luomaan malli, joka ottaa huomioon päästöt ja jota voidaan käyttää kuivauksen integroinnissa eri jalostusprosesseihin. SLU:n kuoriprojektin kanssa alkaneen yhteistyön tavoitteena oli tiedonvaihto projektien tuloksista mm. järjestämällä yhteisiä seminaareja sekä lisäksi yhteisjulkaisut ja näyttöiden vaihto projektien välillä.

3. Toteutus

Tutkimus toteutettiin välillä 1.3.2003–31.3.2004. Työn suorittamiseen osallistui-
vat VTT Prosessit, Åbo Akademi ja Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Yri-
tyksistä projektiin osallistui-
vat Fortum Oil and Gas Oy, Vapo Oy, Biowatti Oy,
Andritz AG ja HT-Engineering Ltd. Yhteistyötä tehtiin SLU:n kuoriprojektin
kanssa. SLU:n projektissa tutkittiin kuoren käsittelyn ja varastoinnin biologisia,
kemiallisia ja fysikaalisia prosesseja.

Tutkimusprojektiin kuului liitännäisenä projekti ”Puupolttoaineiden työtervey-
dellinen laatu”, jonka rahoitukseen osallistui Työsuojelurahasto. Projekteilla oli
yhteinen johtoryhmä ja johtoryhmän kokoukset. Projektin tavoitteena oli selvit-
tää valittujen puupolttoaineiden työterveydellinen laatu ja varastoinnin vaikutus
siihen sekä kehittää yksinkertainen laboratoriomenetelmä polttoaineita käsittelevien
työntekijöiden terveydelle haitallisten tekijöiden tunnistamiseksi. Työhön
osallistui VTT Prosessien lisäksi Kuopion aluetyöterveyslaitos.

Tutkimuksen lähtömateriaaleiksi valittiin potentiaalisista puupolttoainejalostuk-
sen uusista raaka-aineista tuore sahanpuru, tuore ja varastoitu hakkuutähde sekä
männyn- ja kuusenkuori.

Kuivauskokeita tehtiin projektissa PUUT29 rakennetulla laboratoriomitan patja-
kuivurilla. Kokeissa tutkittiin raaka-aineen, lämpötilan, palakoon, loppukosteuden
ja kaasufaasin vaikutusta emissioihin. Lähtömateriaaleina olivat edellisen
projektin varastointikokeiden säilötyistä näytteistä tuore sahanpuru, vihreä hak-
kuutähdehake (viherhake) ja 7 kuukautta varastoitu viherhake. Varastoitua män-
nynkuorta toimitettiin kokeisiin Biowatti Oy:ltä ja tuoreita männyn- ja kuusen-
kuorinäytteitä SLU:sta. Materiaalinäytteille määritettiin polttoaineominaisuuksista
kosteus, tuhka, haihtuvat aineet, lämpöarvo ja CHN, orgaanisista aineista
selluloosa, hemiselluloosa, ligniini ja uuteaineet sekä epäorgaanisista alkalime-
talleja, mangaani ja kloori. Orgaaniset yhdisteryhmät analysoitiin Åbo Akade-
missa. Ennen kuivausta lähtömateriaalit murskattiin Weima-murskaimella.

Patjakuivurilla tehtiin ensin tarkennuksia ja rinnakkaiskokeita, joiden perusteella
todettiin kokeiden toistettavuus hyväksi ja laitteisto käyttökelpoiseksi. Lähtöma-
teriaalit, joiden kosteus oli 45–55 paino-%, kuivattiin peruskoeolosuhteissa noin
10 paino-%:n kosteuteen kuivauskaasun (typpi) lämpötiloissa 150 ja 180 °C.

Lisäksi tehtiin kokeita vaihdellen palakokoa ($< 5 - < 40$ mm), loppukosteutta (0–25 paino-%), kaasu/materiaali-suhdetta sekä käyttäen kuivauskaasuna typen sijasta ilmaa. Haihtuneet orgaaniset yhdisteet eli päästöarvot määritettiin lauh-teesta ja kaasufaasista. Lauhdenäytteille määritettiin pH, johtokyky, kemiallinen hapenkulutus (COD_{Cr}), kokonaisorgaaninen hiili (TOC) sekä erillisiä yhdiste-ryhmiä. Kaasunäytteistä määritettiin ei-lauhtuneita haihtuvia orgaanisia yhdistei-tä, joita olivat terpeenit ja aldehydit.

Kuivausemissioiden mallintamistyö perustui kuivauskokeissa saatuihin päästö-arvoihin. Mallinnus kohdistui sellaisiin teollisiin kuivureihin, joissa kuivataan pedissä ja joissa tulokaasun tai höyryn lämpötila on alle $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Suuri osa nykyi-sin tarjolla olevista polttoaineen kuivaukseen tarkoitetuista uusista kuivureista kuuluu tähän sovellusalueeseen. Tällaisia kuivureita ovat kiinteäpeti-, rumpu- ja hihnakuivurit. Laskennassa käytettiin empiiristä menetelmää. Empiiriset lähtö-arvot koskevat raaka-aineen koostumuksen vaikutuksia. Kullekin raaka-aineelle haetaan kyseiset lähtöarvot yksinkertaisella laboratoriokokeella VTT:n patja-kuivurilla. Lähtöarvoihin pohjautuvalla laskennalla voidaan ennustaa ko. raaka-aineesta syntyvät päästöt valittuun sovellutusalueeseen kuuluvissa teollisissa kuivureissa.

Pelletointikokeilla tutkittiin erilaisten puupolttoainemateriaalien pelletoitavuutta Sprout-Matador M5-rengasmatriisi-koneella (kapasiteetti luokkaa 1000 kg/t) ja laboratoriomitan Amandus-Kahl 14-175 -tasomatriisikoneella (kuva 1). Aman-dus-Kahlilla tutkittiin monia mitoitukseltaan erilaisia matriiseja. Kokeita tehtiin mäntysahanpurusta, männyn- ja kuusenkuoresta sekä tuoreesta ja varastoidusta hakkuutähteestä valmistetuilla raaka-aineilla. Kokeita varten männynkuori ja puru kuivattiin rumpukuivurilla noin 20 paino-%:n kosteuteen. Kaikki tutkittavat materiaalit murskattiin hienomurskaimella. Osa kaikista raaka-aineista kuivattiin 4–5 paino-%:n kosteuteen panoskuivurilla. Kuivaa ja kostea raaka-ainetta se-koitettiin keskenään, jotta kokeisiin saatiin kosteudeltaan 12, 14, 16 ja 18 paino-%:n näytteitä. Raaka-aineseokset varastoititiin suursäkeissä. Ennen pelletointia raaka-aineiden irtotiheys vaihteli välillä $100\text{--}250\text{ kg/m}^3$ ja D_{50} -luku välillä 11,7–13,7 mm. Pelleteille tehtiin erilaisia analyysejä, kuten koon määrittäminen, kosteus, irtotiheys, käsittelykestävyys, tuhka, haihtuvat aineet ja lämpöarvo. Lujuus mi-tattiin sekä Kahl-menetelmällä että Ligno-testillä.



Kuva 1. VTT:n laboratoriomittan tasomatriisipelletointikone Amandus-Kahl 14-175.

Raaka-aineen esikäsittelyn vaikutuksesta flash-pyrolyysiöljyjen saantoihin ja laatuun tehtiin selvitys, joka perustui pyrolyysikokeisiin, jotka tehtiin VTT:ssa Tekes- ja EU-projekteissa.

Projektissa saatujen tulosten perusteella arvioidaan erilaisten puupolttoaineiden ja niiden esikäsittelyketjun vaikutusta pellettien ja pyrolyysiöljyn laatuun ja määritetään optimaalisimmat raaka-aineet ja niiden esikäsittely jalosteiden laadun kannalta.

Yhteistyö SLU:n kanssa jatkui. Yhteinen kokous järjestettiin sekä Ruotsissa että Suomessa. Professori Raida Jirjis osallistui lisäksi Tekes-projektin johtoryhmän kokoukseen. Kuivauskokeissa käytetyt tuoreet männyn- ja kuusenkuorinäytteet oli saatu SLU:n projektilta. Åbo Akademiassa tehtiin raaka-ainenäytteiden ja lauhteiden orgaanisia analyysejä.

4. Tulokset

4.1 Kuivauksen päästöt

Kuivauksen päästöt määritettiin lauhteiden orgaanisesta kuormituksesta ja kaasunäytteen analyysiarvoista. Lauhteiden pH vaihteli eri kokeissa välillä 3,4–4,2, COD 500–2 700 mg/l, joka vastaa 0,1–0,8 paino-% raaka-aineen kuiva-aineesta, ja TOC 140–1 800 mg/l vastaten 0,02–0,2 paino-% kuiva-aineesta. Lauhteen laatuun vaikutti lähinnä lähtömateriaali ja sen varastointiaika. Lauhteiden kuormitus oli suurempi varastoiduilla viherhakkeella ja männynkuorella kuin tuoreilla materiaaleilla sekä suurempi tuoreilla kuorimateriaaleilla kuin tuoreella viherhakkeella. Varastoidulla männynkuorella lauhteen COD oli 0,8 paino-% kuiva-aineesta ja varastoidulla viherhakkeella 0,3 paino-%. Varastoidulla männynkuorella lauhteen pääyhdisteet olivat etikkahappo, etanoli ja metanoli, ja viherhakkeella etikkahappo ja muurahaishappo. Tuoreilla näytteillä saaduissa lauhteissa alkoholien osuus oli suurempi ja happojen pienempi verrattuna varastoitujen näytteiden lauhteisiin.

Lauhteiden ja kaasufaasien orgaaniset kokonaispäästöt olivat tuoreilla sahanpurulla ja viherhakkeella noin 0,2 paino-% kuiva-aineesta kuivattaessa 150 ja 180 °C:ssa noin 10 paino-%:iin. Loppukosteudella ei ollut suurta vaikutusta päästöihin kosteusalueella 25–1 paino-%. Päästöt kasvoivat selvästi vasta kuivattaessa näytettä aivan kuivaksi ja jatkettaessa kuivausta edelleen. Kuivattaessa sahanpurua 10 paino-%:sta aivan kuivaksi olivat päästöt 0,4 paino-% kuiva-aineesta. Myös muilla muuttujilla, kuten palakoolla ja kaasufaasilla, ei näyttänyt olevan suurta merkitystä päästöihin. Viherhakkeen suuremmalla palakoolla päästöt olivat hiukan pienemmät. Kuivauslämpötilan noustessa päästötaaso hieman kasvoi. Terpeenien pääyhdisteet olivat lähes kaikissa kokeissa α - ja β -pineenit sekä Δ -3-kareeni.

4.2 Kuivausemissioiden mallinnus

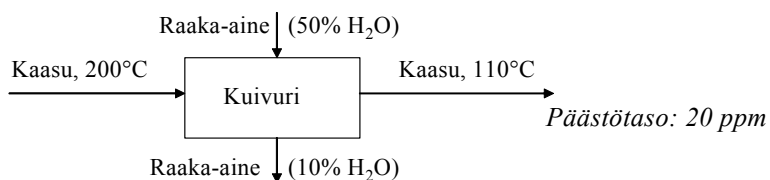
Kuivausemissioiden laskenta perustui kuivauskokeissa saatuihin arvoihin ja niistä tehtyihin havaintoihin:

- Kuivattaessa materiaaleja 10 paino-%:n kosteuteen eivät päästöt paljoa riipuneet tutkituista muuttujista: kuivauskaasun lämpötilasta (100–180 °C), palakoosta ja kaasu/materiaali-suhteesta.
- Kuivattaessa 10 paino-%:n kosteudesta 1 paino-%:iin 180 °C:ssa olivat päästöt yllättävän pieniä ja savua oli näkyvissä vasta, kun loppukosteus oli lähellä 0 paino-%:a.
- Jatkettaessa kuivausta eli pidettäessä materiaalia edelleen kuivausolosuhteissa päästöt kasvoivat jyrkästi.

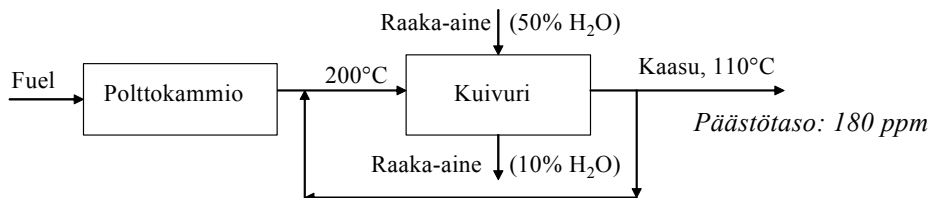
Päästötietojen perusteella ei ylikuivaamista valituissa olosuhteissa juurikaan tapahdu, ennen kuin koko peti on käytännöllisesti katsoen rutikuiva. Vapautuva höyry estää ylikuivumista (pyrolyysiä), jopa pienillä partikkeleilla, niin kauan kuin osa materiaalista pedissä on vielä kostea. Tästä seuraa, että päästöjen kannalta VTT:n laboratoriopetikuivuri simuloi hyvin kaikkia teollisia kuivureita valitulla sovellutusalueella. Tietoa petikuivurilla saaduista emissioista voidaan suoraan soveltaa valittujen teollisten kuivausprosessien laskentaan. Sen jälkeen, kun raaka-aine ja kuivausaste on määriteltä, päästöjen mallintaminen voidaan suorittaa VTT:n laboratoriokuivurin avulla. Ko. valituilla kuivureilla päästötaso tulee olemaan suhteellisen alhainen (kuva 2).

Lähtötiedot orgaanisista päästöistä, esim: (1) kokonaispäästö: 2g/kg kuiva-ainetta, (2) päästöyhdisteiden keskimääräinen molekyylipaino: 100

1. Kerran-läpi-savukaasukuivuri; esim. suuren kattilan loppusavukaasuja käyttävä:



2. Itsenäinen savukaasukuivuri:



Kuva 2. Esimerkkilaskelmia kuivureiden päästötasoista.

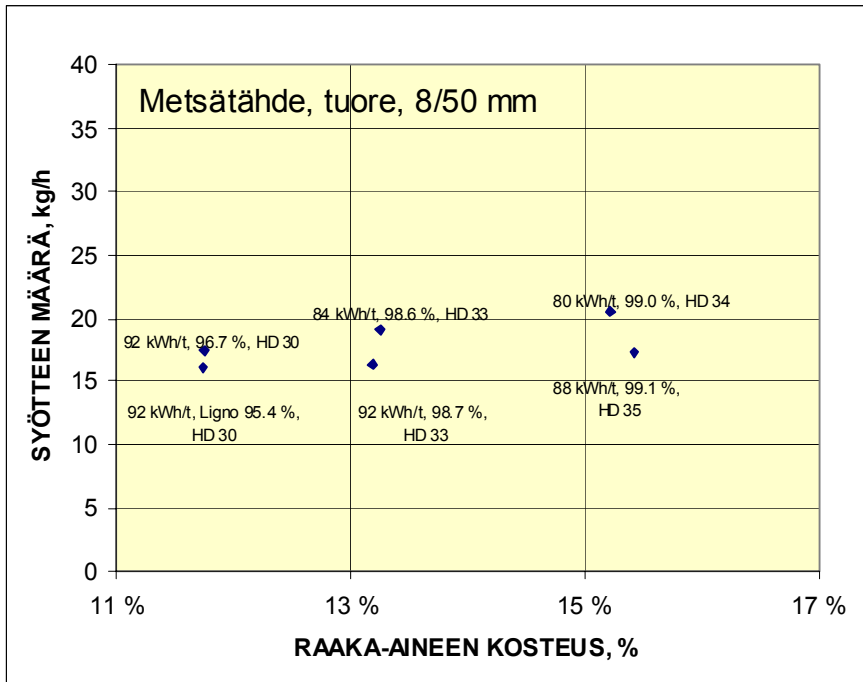
4.3 Materiaalien pelletoitavuus

Kaikki tutkitut materiaalit pystyttiin pellettoimaan tasomatriisikoneen eri matriiseilla. Vaikeinta oli esikuivatun purun pelletointi. Puru pellettoitiin halkaisijaltaan 6 mm:n pelleteiksi, kun muut materiaalit pellettoitiin 8 mm:n pelleteiksi. Purupelletit tarvitsivat myös pelletoinnissa eniten tehoa, noin 130 kWh/t, kun muilla materiaaleilla tehon tarve oli yleensä luokkaa 80 kWh/t. Osittain korkea tehontarve purulla johtunee siitä, että kokeissa ei ollut sille optimaalista matriisia. Kokeissa matriisin reiän painekanavan pituus vaihteli välillä 30–50 mm.

Kahl-kovuus on teollisuuspelleteillä yleensä luokkaa 20 kg ja parhaimmilla tuottajilla 30 kg tai sitä suurempi. Ligno-testerillä parhaimman luokan pelletin pitää saada vähintään luku 97,5 % CEN:n valmisteilla olevan EU-standardin mukaan. Pellettoitaessa näytteitä tasomatriisikoneella sopivalla matriisilla ylettiin usein näihin tai parempiin lukuihin. Tunnusluvuiltaan erinomaisia pellettejä saatiin, kun raaka-aineena oli hakkuutähde (kuva 3). Koska hakkuutähteen irtotiheys oli vähäinen, tuntituotos oli pieni. Männynkuorella mitattiin jopa kaksinkertaisia tuntituotoksia samalla syöttöruuvilla. Tasomatriisikoneella hienoainesta syntyi hyvin vähän, kun käytössä oli mitoitukseltaan oikea matriisi. Tällöin pellettien lämpötila heti pelletoinnin jälkeen kohosi noin 100 °C:seen. Kuvassa 4 on esitetty saatuja korkealaatuisia männynkuoripellettejä.

Rengasmatriisikoneella saatiin purusta, männynkuoresta ja niiden seoksista ainoastaan huonolaatuisia pellettejä. Syynä oli matriisin väärä mitoitus tutkituille raaka-aineille. Käsitksemme mukaan matriisin painekanavan olisi pitänyt olla 5–10 mm pitempi, jolloin puru olisi pelletoitunut. Tasomatriisikoneella saatujen tulosten mukaan kuorilla ja metsätähteellä rengasmatriisikoneen painekanavan olisi pitänyt olla vielä pitempi kuin purulla tai matriisin kanavan painepuoli erilailla muotoiltu.

Matriisin mitoituksella on suuri merkitys eri materiaalien pelletoitavuuteen. Pelletointia on tutkittu eri projekteissa, mutta usein itse pelletoinnissa on epäonnistuttu tai pelletit on hyväksytty, kun ne on tehty sopimattomilla matriiseilla. Pellettien eri ominaisuuksien, mm. raaka-ainesidosten tutkimiseen, tarvitaan hyvälaatuisia pellettejä. Matriisien toiminnasta puumateriaalilla on toistaiseksi vähän julkista tietoa. Tulevaisuudessa kuivan kutterinpurun saatavuuden vähetessä pellettien raaka-aineeksi tarvitaan laaja-alaista tietoa muista potentiaalisista raaka-aineista ja niiden seoksista, niiden pelletoinnista ja hyödyntämisestä, kuten poltosta, päästöistä, muusta käytettävyydestä ja taloudesta.



Kuva 3. Tuoreesta hakkuutähteestä saatujen pellettien ominaisuuksia eri raaka-ainekosteuksilla. Kunkin mittauspisteen kohdalle on merkitty tehontarve (kWh/t), Ligno-testin tulos (%) ja Kahl-puristustestin tulos (kg).



Kuva 4. Korkealaatuisia Amandus-Kahl-puristimella männynkuoresta valmistettuja pellettejä (halkaisija 8 mm).

4.4 Esikäsittelyn vaikutus pyrolyysiöljyjen laatuun

VTT:n pyrolyysiprojekteissa todettiin, että muutokset puupolttoaineiden esikäsittelyketjussa vaikuttivat flash-pyrolyysikokeissa saadun orgaanisen nesteen eli kokoöljyn, joka käsittää pinta- ja pohjaöljyn, kokonaissaantoon ja pintaöljyn osuuteen kokoöljystä. Sen sijaan pohjaöljyn eli päätuotteen öljyominaisuuksiin ei esikäsittelyketjulla havaittu olevan mitään systemaattista vaikutusta. Kohtalainen korrelaatio havaittiin orgaanisen nesteen saannon ja raaka-aineen haihtuvien aineiden pitoisuuden välillä. Korkeammilla haihtuvien aineiden pitoisuuksilla saatiin suurempia kokoöljyn määriä. Pintaöljyn osuus korreloituu suhteellisen hyvin kokoöljyn uuteainepitoisuuden kanssa. Kyseiset korrelaatiot on julkaistu pyrolyysiprojektien raporteissa. Metsätähdehakkeiden tai sahanpurun pitkäaikainen varastoiminen ennen käyttöä vähentää sekä raaka-aineen haihtuvien aineiden kokonaismäärää että tiettyjen uuteaineiden määrää, josta seuraavat pienempi pyrolyysiöljyn saanto sekä pienempi pintaöljyn osuus. Tämän Puuenergia-ohjelman projektin tulosten perusteella raaka-aineen termien kuivaus pedissä (< 200 °C) ennen pyrolyysiä ei sen sijaan vaikuta merkittävästi raaka-aineen haihtuvien aineiden määrään eikä sen uuteainepitoisuuteen, jolloin voidaan olettaa, ettei se myöskään tule merkittävästi vaikuttamaan pyrolyysiöljyn saantoon ja laatuun.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tulosten mahdollisia hyödyntäjiä ovat puupolttoaineiden toimittajat, kuivuri-valmistajat, polttoainetalosteiden tuottajat sekä lämpövoimalaitokset. Tutkimus antoi uutta tietoa potentiaalisten puupolttoaineiden ja niiden esikäsittelyn vaikutuksista pellettien ja pyrolyysiöljyn laatuun. Tulosten perusteella voitaneen määrittää optimaalisimmat raaka-aineet ja niiden esikäsittelyketju jalosteiden laadun kannalta. Kuivauksen aiheuttamista päästöistä saatiin käsitys tutkittavien puupolttoaineiden osalta. Tutkimuksessa luotua päästöt huomioivaa kuivauksen laskentamallia voidaan käyttää kuivauksen integroinnissa eri jalostusprosesseihin.

Ruotsalaisen yhteistyöprojektin kautta saadaan tietoa kuoren varastoinnin vaikutuksesta materiaaliin sekä myös muista aiheeseen liittyvistä tutkimuksista Ruotsissa.

Projektin loppuraportti valmistuu keväällä 2004. Loppuraportista tehdään yhdessä projektin PUUT29 tulosten kanssa julkaisu VTT:n sarjoihin sekä artikkeleita kansainvälisiin lehtiin ja/tai seminaareihin.

Julkaisut ja raportit

Fagernäs, L., Impola, R., Rautiainen, R. & Ajanko, S. 2003. Changes and emissions in wood fuels during storage and drying, Proc. Bioenergy 2003, International Nordic Bioenergy Conference, Jyväskylä, Finland, 2–5 September, 2003. S. 265–267.

Kallio, M. & Oravainen, H. 2003. Pellet research and development at VTT, Processes. Bioenergy 2003, International Nordic Bioenergy Conference, Jyväskylä, Finland, 2–5 September, 2003. S. 489–493.

Fagernäs, L., McKeough, P. & Impola, R. 2003. Puupolttoaineiden päästöt kuivauksessa ja varastoinnissa. Puuenergiaohjelma, Tutkijaseminaari ”Terminen ja luonnonkuivaus”, 6.11.2003, Jyväskylä. (www.tekes.fi/)

Fagernäs, L., McKeough, P. & Kallio, M. 2004. Puupolttoaineiden esikäsittelyn kemialliset vaikutukset. Projektin loppuraportti. Espoo, maaliskuu 2004.

Puupolttoaineita käyttävän voimalaitoksen käytettävyyden parantaminen polttoainehallinnalla – PUUT38

Janne Kärki, Markku Orjala, Heidi Häsä & Risto Impola

VTT Prosessit

PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh. (014) 672 611, fax. (014) 672 597

E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Comprehensive fuel control in improving the availability of wood-fired power plants

The objective of this research was to characterise the deposit build-up and its effect on heat transfer in biomass (especially wood) combustion. With the knowledge gained in this project it is possible to develop the methodologies and mathematical models for better understanding of changes in heat transfer caused by wood combustion. With the models and simulations interrelation between fuel constituents and deposit formation tendency can be described and the causalities between heat transfer, in-furnace conditions and fuel & fuel-ash characteristics established. The results can be used in estimating and optimising the factors that have effect on plant's availability. Furthermore, we can estimate the effects caused by some problematic fuel blends and additives on heat transfer, which are not otherwise possible to study. In general, the results can be used in enhancing boiler availability and the use of wood fuels. Project started in March 2003 and it was ended in March 2004. Experts of the Energy Production research field at VTT Processes carried out the majority of the research activities. System Technology Laboratory of Oulu University was responsible for the power plant automation and for the research on boiler control technology. Following companies participated in the project: Etelä-Savon Energia Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Vapo Oy, Simpele pasteboard factory of M-Real Oyj and Coresto Oy.

1. Tausta

Vapautuvilla energiemarkkinoilla energiayhtiöt joutuvat uudenlaiseen tuottavuutta koskevaan kilpailutilanteeseen. Uusi kilpailuasetelma korostaa toimijoiden kilpailukykyä ja näin vaatii alalla toimivia sähkön ja lämmön tuottajia mahdollisuuksien mukaan laskemaan tuotanto- ja käyttökustannuksia. Tämä luo tarpeen uusille keinoille hallita tuotantolaitoksia, polttoainevalikoimaa ja voimalaitosten ajotapoja.

Turpeen ja puupolttoaineiden seospoltto edellyttää eri laitoskokoluokissa polttoaineseoksen tasaista syöttöä kattilaan. Tämä asettaa vaatimuksia sekä polttoaineiden toimituslogistiikalle että laitoksen käsittelyjärjestelmille. Pyrittäessä saavuttamaan alhaiset tuotanto- ja käyttökustannukset edellytyksenä on, että saavutetaan mahdollisimman stabiili palamisprosessi lämpöpintojen likaantumisen vähentämiseksi. Tämä voidaan saavuttaa parhaiten optimoimalla polttoaineiden seossuhteet.

Puuenergian teknologiaohjelmassa on todettu, että metsien energiareservin hyödyntämistä rajoittavat tällä hetkellä metsähakkeen korkea kustannustaso, laadun epätasaisuus ja laadun vaikea ennustettavuus. Tässä hankkeessa kehitettiin voimalaitoksille työkaluja polttoaineiden laadunvaihtelujen hallintaan, jotta tuotantokustannuksia pystyttäisiin paremmin ennustamaan laadultaan vaihtelevia polttoaineita käytettäessä. Tutkimus antoi tietoa puupolttoaineiden tuotantojärjestelmien kehittämisen tarpeista laitoksen kannalta, tehosti polttoaineen laadun hallintaa laitoksen toimivuuden parantamiseksi sekä loi pohjaa teollisuuden puutähteen käyttöominaisuuksien parantamiselle. Nämä ovat kaikki Puuenergian teknologiaohjelman painopistealueita.

2. Projektin tavoitteet

Tutkimuksen päätavoitteena on helpottaa ja lisätä puupolttoaineiden käyttöä voimalaitoksilla. Työn tavoitteena oli luoda laitoksille edellytyksiä välttää polttoaineseoksista johtuvia lämmönsiirtopintojen likaantumisongelmia sekä välttää näistä aiheutuvia välillisiä ja välittömiä kustannuksia. Tähän on käytössä pääasiallisesti kaksi keinoa: polttoaineseoksen hallinta ja kattilaprosessin ohjaus. Näiden osa-alueiden kehitys on tärkeää uusien ja olemassa olevien laitosten kilpai-

lukyvyn ja kustannustehokkuuden parantamiseksi. Projektissa oli tarkoitus luoda voimalaitoksille työkaluja polttoaineiden laadunvaihtelujen hallintaan. Tutkimustyössä oli tarkoitus tuottaa tietoa puupolttoaineiden tuotantojärjestelmien kehittämistarpeista laitoksen kannalta, polttoaineen laadun hallinnan tarpeista laitoksen toimivuuden parantamiseksi sekä luoda pohjaa teollisuuden puutähteen käyttöominaisuuksien parantamiselle.

Oulun yliopiston systeemitekniikan laboratorion tavoitteena projektissa oli tutkia kahta vaihtoehtoista polttoainehäiriöiden kompensointitapaa: sumeaa tulitehon kompensointistrategiaa sekä adaptiivista kolmitilaista polttoainekorjauksella tapahtuvaa happisäätöstrategiaa.

3. Toteutus

Projektissa suoritettuja toimenpiteitä olivat mm:

- 1) Likaantumis- ja lämmönsiirtolaskentamenetelmien kehitystyö.
- 2) Likaantumisen monitorointi kahdella voimalaitoksella.
- 3) Likaantumisen ja korroosion monitorointi yhdellä voimalaitoksella.
- 4) Selvitys polttoainetoimitusten logistiikasta ja laituskäsittelystä.
- 5) Oulun yliopiston tehtäväkokonaisuus polttoainehäiriöiden kompensointistrategioista.
- 6) CEN Biofuels -standardisointityöhön osallistuminen.
- 7) IEA:n Co-firing taskiin osallistuminen.

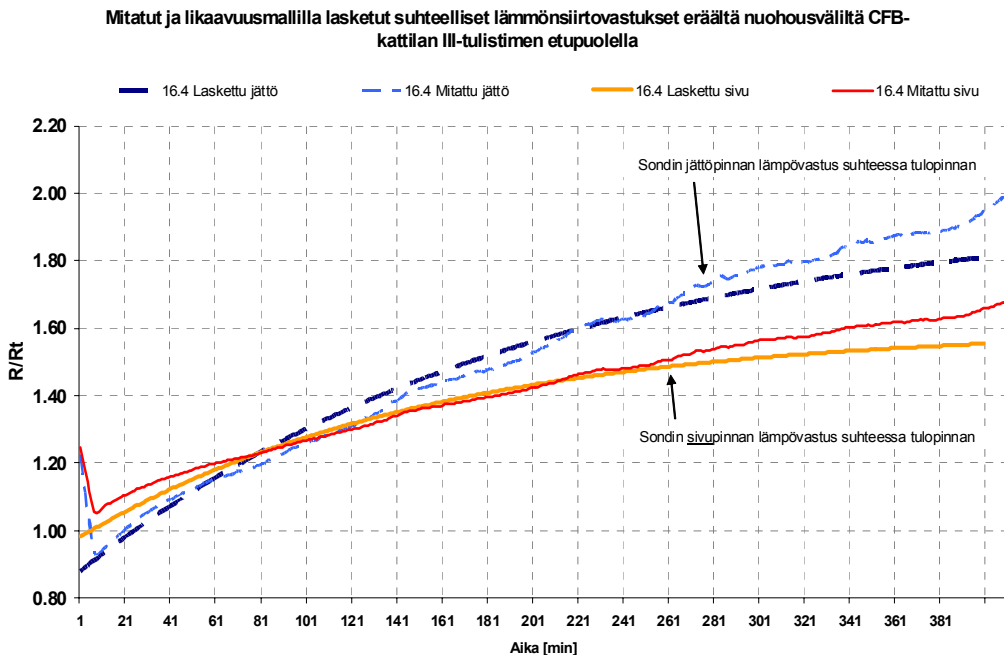
Projektin rahoittajina ja yhteistyösapuolina olivat Tekes, Etelä-Savon Energia Oy, Foster Wheeler Energia Oy, Vapo Oy, M-Real Oyj, Coresto Oy ja Oulun yliopisto. Projektin vastuullisena johtajana toimi Markku Orjala ja projektipäällikkönä Janne Kärki VTT Prosesseista.

4. Tulokset

4.1 Likaantumis- ja lämmönsiirtolaskentamenetelmien kehitystyö

Polttoaineista riippuvan kattilan likaantumisen ennakoimiseksi kehitettiin laskennallinen likaantumismalli, jonka avulla muodostetaan korrelaatiot polttoaineseoksen tuhkan alkuaineiden ja prosessimittausten sekä kattilan lämmönsiirtopintojen likaantumisen välille. Korrelaatioiden luomisessa käytetään apuna VTT Prosessien kerrostumasondilla saatuja mittaustietoja.

Sondilla mitattujen lämpötilojen avulla lasketaan savukaasuvirran sivu- ja jättöpintojen likakerroksien lämpövastukset suhteessa savukaasuvirran tulopinnan likakerroksen lämpövastukseen, R/R_t (kuva 1).



Kuva 1. Sivu- ja jättöpinnan lasketut ja mallinnetut lämmönsiirtovastukset suhteessa tulopinnan vastukseen nuohousvälillä.

Lämpövastuksien suhdetta nuohousvälillä voidaan kuvata yhtälöllä

$$\frac{R}{R_t} = Y = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty) e^{-t/\tau} \quad (1)$$

Y_∞ kuvaa sitä arvoa, jota kerrostuman paksuus lähenee hyvin pitkän ajan kuluessa, Y_0 on lämpövastuksien suhde nuohousjakson alussa, τ kuvaa kerrostuman kasvunopeutta suhteessa tulopintaan ja t on aika nuohousjakson alusta. Kun käytettävänä on sondilla mitatut lämpötilat, saadaan ratkaistua kerrostuman muodostumista kuvaavat parametrit Y_∞ , Y_0 ja τ . Parametrit voidaan korreloida tilastollisen laskennan avulla analysoituihin tuhkan alkuainepitoisuuksiin ja mitattuihin prosessitietoihin, jolloin Y voidaan ratkaista yhtälöstä 1 ilman sondin mittaustietoja.

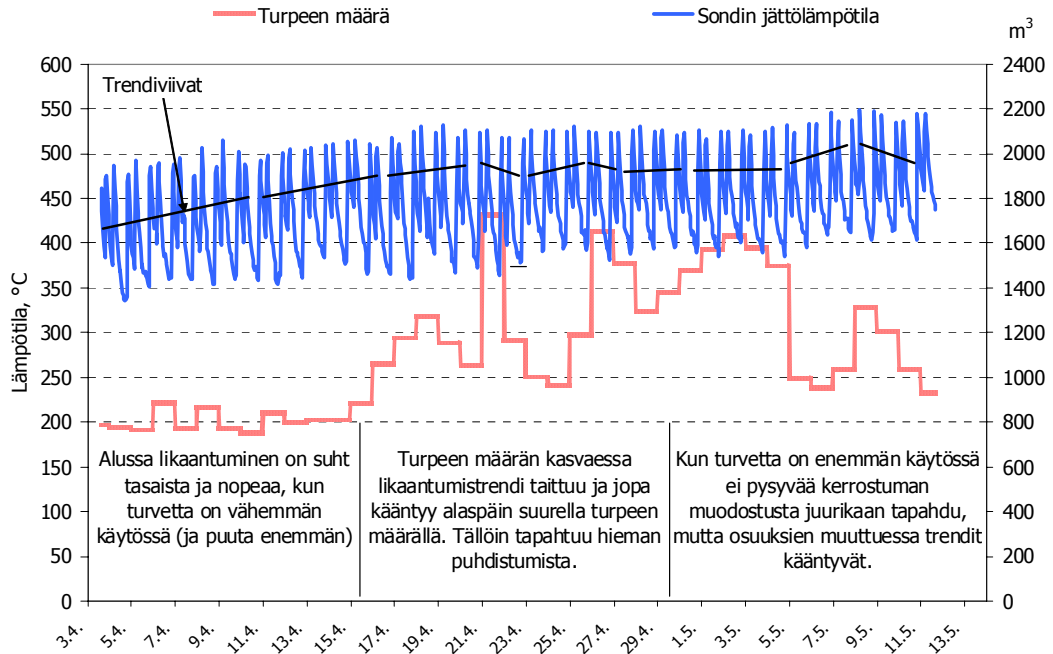
Kun Y on ratkaistu sondimittausten tai korrelaatioiden avulla, voidaan laskea kerrostuman aiheuttamat suhteelliset lämpövastuksien muutokset pinta-alaa kohti eripuolilla sondia. Lämpövastuksien avulla saadaan selvitettyä sondin kokonaiskonduktanssi pinta-alaa kohti. Konduktanssi käsittää lämmönsiirron kaasusta jäähdyttävään väliaineeseen (ilmaan), ja se sisältää putken sisä- ja ulkopuoliset konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet sekä johtumisen putken ja kerrostuman läpi.

Likaantumismittauksiin ja -laskentaan perustuvan lämmönsiirtovaikutuksien arvioinnin rinnalla tehdään todellisen kattilan toimintatason määrittämiseksi prosessidataan pohjautuvia laskennallisia tarkasteluja kattilakohtaisilla simulointimalleilla. Tällöin voidaan arvioida mittauksiin ja laskentaan perustuvien likaantumismallien luotettavuutta todellisessa prosessissa. Menetelmä tarjoaa mahdollisuuksia optimoida kattilaan tulevaa polttoainevirtaa, ohjata kattilan nuohousta ja parantaa täten kattilan käytettävyyttä.

4.2 Likaantumisseuranta, CFB-kattila

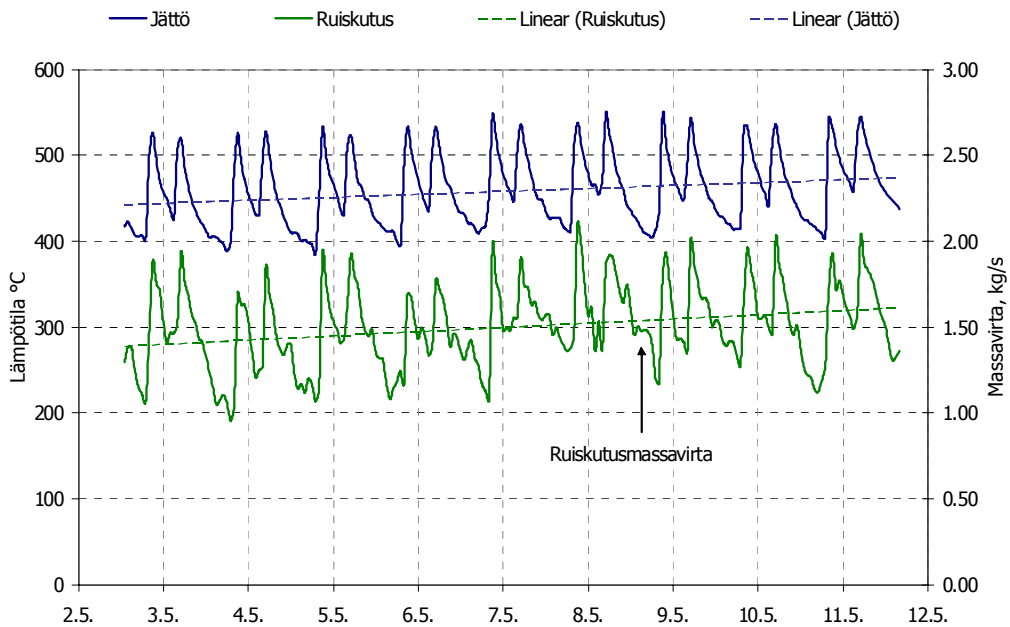
Voimalaitoskokeet tehtiin Mikkeliissä Pursialan voimalaitoksen CFB-kattilalla. Kevään koejakson mittauksilla selvitettiin kerrostuman muodostumista tuotantokauden lopussa eli ennen kesäseisokkia ja kattilan puhdistusta. Polttoainesuhteet olivat alkujaksolla keskimäärin puu 55 % / turve 55 % ja loppujaksolla puu 67 %

/ turve 33 %. Kattilahyötysuhde laski selvästi kevään jaksoilla, joka aiheutui pääosin kattilan likaantumisesta. Sondimittauksen jättöpinnan lämpötila kuvaa hyvin lämmönsiirtovastusten muuttumista likaantumisen myötä. Polttoaineseoksen vaihtelut näkyvät hyvin sondin lämpötilamuutoksissa (kuva 2).



Kuva 2. Sondin jättölämpötilan muutokset turpeen osuuden muuttuessa alkujaksolla.

Laitoksen prosessidatasta löytyy sondimittauksia vastaavaa käyttäytymistä nuohousväleillä, jolloin voidaan todeta, että sondimittaus kuvaa hyvin kattilan likaantumista. Lämmönsiirtopintojen likaantuessa nuohousväleillä sondin lämpötilat laskevat. Höyryn lämpötila vastaavasti nousee nuohouksen aiheuttaman lämpötilan laskun jälkeen. Likaantumisasiinnot näkyvät myös höyryn jäähtyäkseen käytetystä ruiskutusveden massavirran muutoksissa (kuva 3).



Kuva 3. Sondin jättöpinnan lämpötila ja höyryn jäähtytykseen käytetty ruiskutusveden massavirta.

Kevään mittausjaksoilla nähdään selvää indikaatiota myös pysyvän kerrostuman muodostumisesta tarkastelemalla edellä mainittuja prosessidatoja. Savukaasun lämpötila (luvon jälkeen) nousee selvästi jakson edetessä. Höyryn lämpötiloissa tapahtuu muutoksia ruiskutusten välillä, mutta ruiskutusvara riittää säätämään turbiinille menevän höyryn lämpötilan halutuksi likaantumisen huolimatta niin, että höyryntuotto ei vähene. Lämmönsiirron siirtymistä eri tulistinvaiheiden välillä voi arvioida tarkastelemalla höyryn lämpötilaeroja eri kohdissa. Tulipesässä sijaitsevan II-tulistimen tehokkuus pysyi hyvin vakiona, mutta konvektiivisillä I- ja III-tulistimilla tapahtui selviä muutoksia

Syksyn koejaksoilla selvitettiin kerrostumien muodostumista tuotantokauden alussa (eli puhtaalla kattilalla) sekä turpeen mahdollista puhdistavaa vaikutusta erillisillä polttoainejärjestelyillä. Normaalit polttoaineseokset sisälsivät keskimäärin n. 70 % puuta ja 30 % turvetta. Puuajoa ajettiin yhtäjaksoisesti 3 vuorokautta, jolloin puupolttoaineiden osuus kokonaispolttoaine-energiasta oli n. 80 %

ja turveajoa yhtäjaksoisesti 3 vuorokautta, jolloin turpeen osuus kokonaispolttokäytännön energiasta oli n. 80 %.

Sondimittauksista nähtiin, että pysyvän kerrostuman muodostus on hyvin tasaisesti koko jakson ajan. Kerrostumaa tulee koko ajan lisää. Puuajo ei vaikuta sondimittauksista tarkasteltavan pysyvän kerrostuman muodostumisnopeuteen, mikä johtuu pienestä puun osuuden muutoksesta ns. normaaliin nähden. Turveajossa pysyvän kerrostuman muodostus tasaantuu vain aavistuksen verran. Turve ei vaikuta vähentävän pysyvää kerrostumaa sondista yhtään (kuva 4).

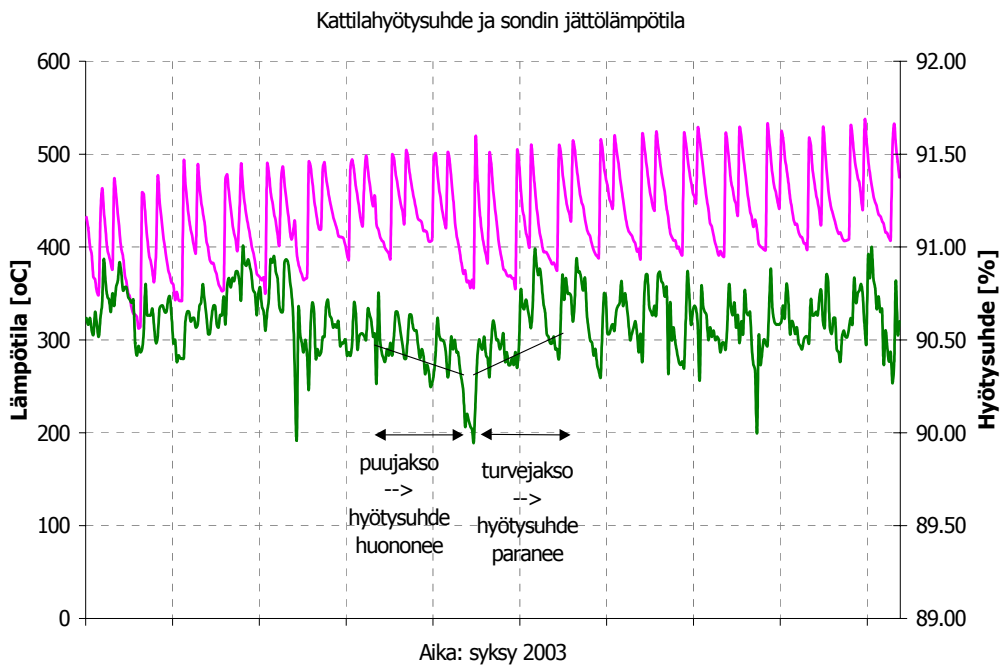
Lyhyen aikavälin (nuohottavien) kerrostumien syntymisessä sen sijaan esiintyy selviä eroja. Puuajossa syntyy pienempi lämpövastus ja turveajossa suurempi lämpövastus sondin pinnalle kuin normaaliajossa. Turpeen tuhkapitoisuus on selvästi suurempi kuin puupolttokäytännön, joten kyse lieneekin vain siitä, että turveajossa on kaiken kaikkiaan suurempi tuhkavirta, jolloin kerrostumaakin syntyy enemmän. Nuohous poistaa kaiken lyhyen aikavälin kerrostuman.

Oma roolinsa voi olla myös paperi- ja muovisilppujätteellä, jota poltettiin koko jakson aikana n. 100 m³ vuorokaudessa tasaisesti muuhun polttoaineeseen sekoitettuna. Tämä voi aiheuttaa koko jaksolle niin dominoivan likaantumistendenssin, että muilla polttoainemuutoksilla ei ole juuri mitään merkitystä.

Tarkastelemalla laitoksen prosessidatoja syksyn loppujaksolla nähdään selvää indikaatiota myös pysyvän kerrostuman muodostumisesta tulistinalueella, mikä on hieman ristiriidassa sondimittauksien kanssa. Savukaasun lämpötila (luvun jälkeen) nousee selvästi puujaksolla, laskee turvejaksolla ja on normaaliajossa keskimäärin melko tasainen. Tämä antaa selviä viitteitä puuajon likaantumista lisäävästä ja turveajon puhdistavasta vaikutuksista. Tukea näille antaa myös puujaksolla laskeva ja turvejaksolla nouseva ruiskutusmassavirran kulutus sekä höyryn lämpötilojen tarkastelu.

Kattilahiötysuhde laskee selvästi puujaksolla, nousee turvejaksolla ja on normaaliajossa keskimäärin melko tasainen (kuva 4). Hiötysuhteen muutokset johtuvat pääosin savukaasun loppulämpötilan muutoksista likaantumisen seurauksena. Sondimittauksen ja laitostietojen ristiriita johtuu sondin likaantumisen kannalta liian edullisesta sijoittumisesta tulistinalueella. Mittausjaksolla todellinen kerrostumanmuodostus oli runsaampaa muualla tulistinalueella kuin mitta-

uspaikalle (III-tulistimen etupuoli). Prosessidatoja tarkastelemalla ja vertaamalla niitä sondidataan tehdään lopulliset johtopäätökset pysyvän kerrostuman muodostuksesta.

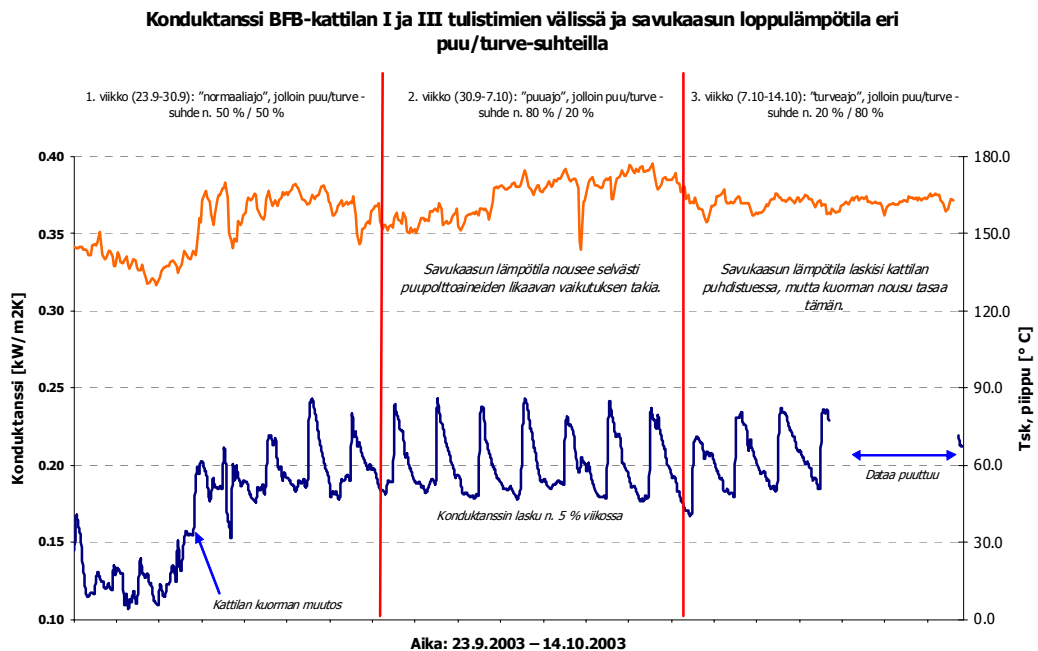


Kuva 4. Sondin jättöpinnan lämpötila ja kattilan hyötysuhde Mikkelissä syksyllä.

4.3 Likaantumisseuranta, BFB-kattila

M-Real Oyj:n Simpeleen kartonkitehtaan voimalaitoksella tehtiin kolmen viikon mittaus, jossa polttoaineen puu/turve osuudet olivat viikoittain 50/50, 80/20 ja 20/80. Tutkimustavoitteena oli likaantumisnopeuden ja lämmönsiirron muutoksien määrittely laajalti vaihtelevilla polttoaineseoksilla keskipitkällä tarkasteluvälillä. Myös turpeen mahdollista puhdistavaa vaikutusta tutkittiin. Polttoaineena kattilassa käytettiin kokeiden aikana jyrshinturvetta, kuorta (haapa, mänty, kuusi), puuhaketta, purua, paperi- ja kartonkijätettä sekä tehtaan jätevedenpuhdistamolta saatavaa lietettä.

Mittauksissa oli käytössä VTT Prosessien kerrostumasondi, jossa on lämpötilamittausten lisäksi myös lämpövuontiheyden mittaukset. Mittaustietojen perusteella voidaan laskea kokonaislämmönsiirtovastuksen (ja kääntäen kokonaiskonduktanssin) absoluuttiset arvot. Toisen viikon aikana poltettaessa pääasiassa puuta voidaan nähdä selvä ero konduktanssin trendissä. Sondimittausten perusteella voidaan todeta, että puujaksolla tapahtuu selvää pysyvän kerrostuman muodostumista ja turvejaksolla pienoista puhdistumista. Puujaksolla konduktanssi III-tulistimen alueella laskee viikon aikana n. 5 % ja likaantuminen taittuu vasta, kun turvetta otetaan käyttöön. Mikäli puujaksoa olisi jatkettu useampia viikkoja, olisi kattilan tila vaikuttanut jo oleellisesti höyryntuotantoon. Nyt nähdään jo, että III-tulistimelle tulevan höyryn lämpötiloissa tapahtuu selviä muutoksia pysyvän kerrostuman muodostuksen myötä eri polttoaineseoksilla. Savukaasun loppulämpötilaa tarkkailemalla saadaan lisätodisteista puuajon likaavasta ja turveajon pienestä puhdistavasta vaikutuksista (kuva 5).



Kuva 5. Konduktanssi BFB-kattilan I ja III tulistimien välissä ja savukaasun loppulämpötila eri puu-turvesuhteilla.

Ruiskutusmassavirran muutokset ilmentävät myös selvästi likaantumisen vaikutuksia. Käytettävissä olevista laitosdatoista nähdään ruiskutuksen tasoerot puu- ja turvejaksolla selvästi. Konduktanssi riippuu vahvasti laitoksen kuormasta, mikä näkyy myös kuvassa 5. Tietoja ei saatu tallennettua turvejaksolla loppuun asti.

4.4 Likaantumis- ja korroosio seuranta, CFB-kattila

VTT Prosessit teki Coresto Oy:n kanssa yhteisen mittausjakso Varenso Oy:n CFB-kattilalla, jossa VTT mittasi lämmönsiirto- ja korroosiosondeilla ja Coresto Oy yhdellä korroosiosondilla. Mittaukset tehtiin EU-projektin (Corbi, ENK5-CT2001-00532) yhteydessä, koska Optipuu-projektin voimalaitoksilla yhteinen mittausjakso olisi ollut teknisesti ja aikataulullisesti vaikeaa. Varenson laitoksella käytetään erilaisten puupolttoaineiden lisäksi myös lietteitä ja hiukan hiiltä. Tärkeimpänä tutkimuskohteena olivat korroosiokysymykset. Optipuu-projektille raportoitiin mittauksen tärkeimmät tulokset ja kokemukset mittausyhteistyöstä. Tuloksista nähtiin polttoaineseoksen muutoksien vaikutukset likaantumis- ja korroosionopeuksiin. Tuloksia hyödynnetään arvioitaessa tiettyjen polttoainelajikkeiden polton järkevyyttä.

4.5 Selvitys polttoainetoimitusten logistiikasta ja laitoskäsittelystä

Turpeen ja puupolttoaineiden onnistunut seospoltto edellyttää eri laitospokoluokissa polttoaineseoksen tasaista syöttöä kattilaan. Tämä asettaa vaatimuksia sekä polttoaineiden toimituslogistiikalle että laitoksen käsittelyjärjestelmälle. Nykyisin yleistynyt leijukerrostekniikka mahdollistaa entistä monipuolisemman polttoainevalikoiman. Niinpä puuperäisten polttoaineiden käyttö on lisääntynyt viime vuosina eri kokoluokan lämpö- ja voimalaitoksilla sekä metsäteollisuuden kattiloissa. Metsäteollisuudella on pitkät perinteet omien sivutuotteiden ja erilaisten ostopolttoaineiden seospoltosta. Näiden laitosten polttoaineen käsittelyjärjestelmät ovat myös olleet suhteellisen joustavia uusien puupolttoaineiden, kuten metsähakkeen, käyttöönotolle.

Useimmat yhdyskuntien suuret jyrshinturvelaitokset aloittivat puupolttoaineiden käytön 1990-luvulla. Turpeen ja puupolttoaineiden seospoltto niiden leijukerroskattiloissa asetti suuria haasteita laitosten alun perin jyrshinturpeelle suunnitelluille polttoaineen käsittelyjärjestelmille ja -laitteille. Osalla näistä laitoksista puupolttoaineiden ja turpeen seospolton aloittaminen on onnistunut olemassa olevilla laitteilla. Tällöin asetetaan rajoitteita sekä puupolttoaineen laadulle (esim. sahanpuru, valmis metsähake, hyvälaatuinen kuori) että puupolttoaineiden toimituslogistiikalle, koska puupolttoaineet täytyy sekoittaa pääpolttoaineeseen laitoksen vastaanotto- varastointi- ja käsittelyjärjestelmässä. Puupolttoaineiden osuus jää yleensä hyvin pieneksi näissä laitoksissa. Osa yhdyskuntien turvelaitoksista on nostanut puupolttoaineiden osuuden 30–50 %:iin. Tämä on edellyttänyt kuitenkin merkittäviä muutoksia ja investointeja laitoksen käsittelyjärjestelmiin. Osa laitoksista on rakentanut oman vastaanotto- ja käsittelylinjan puupolttoaineille, jolloin puu ja turve sekoittuvat vasta lähellä kattilan syöttöä. Tällöin turpeen ja puupolttoaineiden toimituslogistiikat eivät ole lainkaan toisistaan riippuvia. Käyttöpaikkamurskaimet ovat myös yleistyneet, jolloin puupolttoainevalikoimaa on helppo lisätä, esim. risutukit ja kannot.

Sekä Mikkelin että Simpeleen voimalaitoksilla on pitkät perinteet puupolttoaineiden ja turpeen seospoltosta. Puupolttoaineiden osuus vuositasolla molemmilla laitoksilla on yli 40 %. Samoin puupolttoainevalikoima kyseisillä laitoksilla on monipuolinen: erilaiset metsäteollisuuden sivutuotteet, metsähake ja jätemurska, Simpeleellä lisäksi metsäteollisuuden liete. Mikkelissä metsähaketta, sekä hakkuutähde- että kokopuuhaketta, on käytetty jo kymmenen vuotta, Simpeleellä sen käyttö on vielä kasvuvaiheessa.

Molemmilla laitoksilla on hyvät mahdollisuudet syöttää kattilaan tasaista turpeen ja puun seosta. Samoin vastaanottojärjestelmät sallivat joustoja eri polttoainekuormien toimitusjärjestyksiin. Simpeleellä on omat vastaanotto- ja välivarastojärjestelmät turpeelle ja puupolttoaineille (kuva 6). Välivarastoista turve ja puupolttoaineet syötetään hallitusti kattilalaitokselle menevälle pääkuljettimelle. Polttoaineet sekoittuvat vielä hieman kattilasiilossa, josta polttoaineseos syötetään kattilaan. Puun vastaanotossa on lisäksi esimurskain lähinnä tehtaan omien jätteiden hienontamiseen.

Mikkelissä eri polttoaineet kulkevat saman välivaraston kautta, jossa myös sekoituksen pitäisi tapahtua. Sekoitusta tehostetaan ajamalla puuta ja turvetta samanaikaisesti välivarastoon. Tämä on mahdollista, koska molemmille polttoaineille on omat vastaanotot. Logistiikkaa helpottaa puupolttoaineiden vastaanoton kolmitaskuinen päälleajettava kolapohjapurkaimilla varustettu järjestelmä, josta puu- ja kierrätyspolttoaineita voidaan hallitusti syöttää välivarastoon johtavalle kuljettimelle samanaikaisesti turvevastaanotosta tulevan jyrsinturpeen sekaan. Välivarastosta polttoaineseos siirretään kattilan syöttöön kattilasiilojen kautta, joissa vielä pientä sekoittumista mahdollisesti tapahtuu.

Suurten laitosten välivarastot on mitoitettu siten, että polttoaineita täytyy toimittaa laitoksille joka päivä. Turpeen osalta näin tapahtuukin. Sen sijaan puupolttoaineiden, sekä metsähakkeen että sivutuotteiden toimitukset vähenevät tai loppuvat kokonaan viikonloppuisin. Näin myös molemmilla projektin koelaitoksilla. Jotta säännöllinen ja häiriötön seospoltto voisi jatkua, laitokset ovat joutuneet perustamaan omille piha-alueilleen ylimääräisiä puupolttoaineiden puskurivarastoja (kuva 6), joista puuta siirretään kauhakuormaajalla vastaanottoon viikonloppuisin. Vastaavat pitempiaikaiset puupolttoaineiden toimitusongelmat korostuvat juhlapyhien aikana.

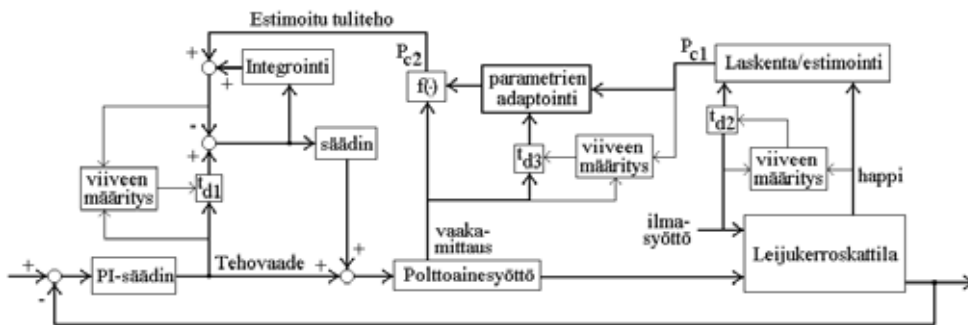


Kuva 6. Vasemmalla: Simpeleen voimalaitoksen välivarastot jyrsinturpeelle ja puupolttoaineille. Oikealla: Metsäteollisuuden sivutuotteita varastoituna Mikkelin Pursialan laitoksen pihalle viikonlopun käyttöä varten.

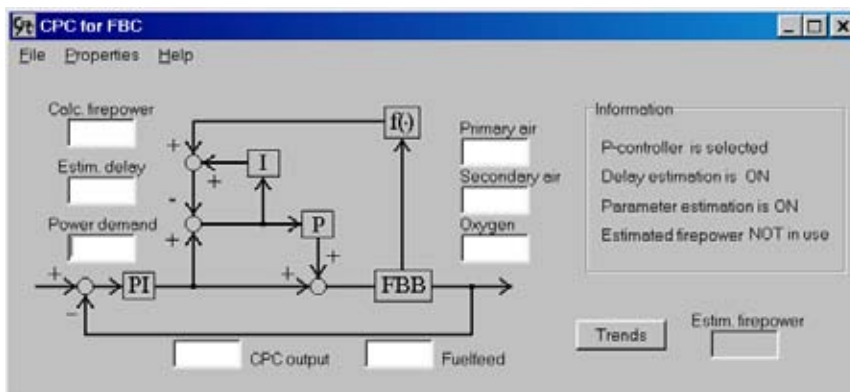
4.6 Voimalaitosautomaatio ja kattilan säätö

Oulun yliopiston systeemitekniikan laboratorion osuudesta vastasivat tutkijat Juha Välikkilä ja Matias Paloranta professori Urpo Kortelan johdolla. Tutkimuksessa oli kaksi erillistä osa-aluetta, joista molemmat keskittyvät leijukattilan säätöratkaisuihin. Osa 1: Modifioitu tulitehon kompensointistrategia. Osa 2: Suodatettu Smith-prediktori happipitoisuuden säädössä.

OSA 1. Tulitehon kompensointistrategian avulla korjataan leijukattilan tehovaadetta siten, että palamisprosessissa vapautuva tuliteho vastaisi haluttua tulitehoa. Korjaus on tarpeellinen, koska kattiloissa käytetyn biopolttoaineen ominaisuudet muuttuvat jatkuvasti. Tulitehon kompensointistrategiassa on havaittu seuraavia kehityskohteita: a) polttoaineen syöttö on hidasta, b) pitkät viiveet yhdessä hitaan polttoaineensyötön kanssa aiheuttavat sen, että korjaus tapahtuu liian myöhään, c) kattilatehovaateen ja estimoidun tulitehon signaalit ovat täysin eri vaiheessa, tästä syystä erosuuren laskenta menee väärin ja d) kattilan dynamiikasta johtuen ilmamittaukset ja happipitoisuus ovat myös eri vaiheessa. Modifioidussa tulitehon kompensointistrategiassa on otettu huomioon seuraavat edellä esitettyjä ongelmia korjaavat asiat: 1) estimoitu tuliteho ($Pc2$) lasketaan vaakamittauksen perusteella, 2) perinteisen tulitehon laskennan ($Pc1$) ja vaakamittauksen avulla adaptoidaan estimointifunktion $f(Pc2)$ parametreja, 3) kattilatehovaateen ja estimoidun tulitehon ($Pc2$) välinen viive ($td1$) otetaan huomioon, 4) happimittauksen ja ilmamittauksien välinen viive ($td2$) kattilassa otetaan huomioon, 5) tulitehon estimaatin ($Pc1$) ja vaakamittauksen välinen viive ($td3$) otetaan huomioon ja 6) puu/turve seossuhde mukaan tulitehon laskentaan. Modifioidun kompensattorin periaatekuva on esitetty alla olevassa kuvassa. Projektin aikana on tehty Windows-pohjainen tulitehon kompensattori, jossa käyttäjä voi valita käyttöön perinteisen kompensattorin tai jonkun muun edellä esitetyn vaihtoehdon 1), 2), 3), 5) tai 6). Happimittauksien ja ilmamittauksien välisen viiveen estimointi on hyvin hankalaa, koska vaikuttavia tekijöitä on paljon. Tästä syystä ohjelmaan ei sisällytetty happi- ja ilmamittauksien välisen viiveen estimaattoria.



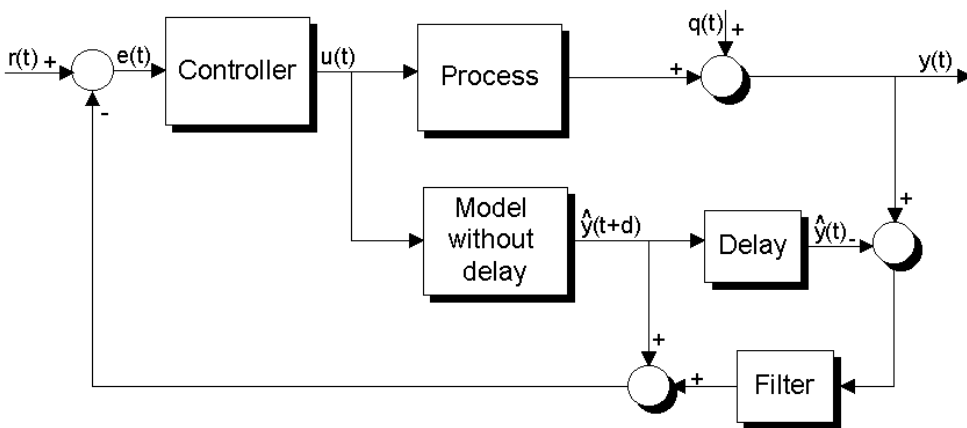
Kuva 7. Modifioidun tulitehon kompensattorin periaatekuva.



Kuva 8. Windows-pohjaisen kompensattori-ohjelman pääikkuna.

OSA 2. Savukaasujen happisäätö on eräs tärkeimmistä leijukattilan stabilointitason säädöistä savukaasupäästöjen ja kattilan suorituskyvyn kannalta. Happisäädön suorituskykyä voidaan parantaa esimerkiksi kehittyneiden mallipohjaisten säätöalgoritmien avulla. Mallipohjaiset säätöalgoritmit edellyttävät yleensä varsin tarkkaa mallia säädettävästä prosessista. Epätarkka malli aiheuttaa usein säädettävän systeemin epästabiliin käyttäytymisen, josta seurauksena on kattilan alasajo. Koska leijukattila on vaikeasti mallinnettava prosessi (epälineaarinen, ristikkäisvaikutteita sisältävä stokastinen monimuuttujasysteemi), ei täysin prosessia kuvaava mallia voida muodostaa. Tämän seurauksena tutkimuksessa on pyritty löytämään säätöratkaisu, joka sietää mallinnusepävarmuutta ja omaa paremman suorituskyvyn kuin perinteinen PI-säädin.

Happipitoisuuden säädössä on käytetty suodatettua Smith-prediktoria (kuva 9). Se on mallipohjainen ennustava säätöalgoritmi, jonka avulla voidaan kompensoida savukaasujen happipitoisuuden säädössä esiintyviä pitkiä viiveitä. Suodatetulla Smith-prediktorilla säädön suorituskyky on oleellisesti parempi kuin nykyisin käytössä olevilla PI-säätimillä, ja se pysyy stabiilina suurtenkin mallinnusvirheiden esiintyessä. Suodatettua Smith-prediktoria on tutkittu simuloinein sekä robustin stabiilisuusanalyysin avulla. Robustin stabiilisuusanalyysin avulla voidaan teoreettisesti tarkastella säädön stabiilisuutta halutuilla taajuuksilla erilaisten mallinnusvirheiden vaikuttaessa. Lisäksi stabiilisuusanalyysin avulla voidaan visuaalisesti valita sopiva aikavakio suodatetun Smith-prediktorin suodattimelle.



Kuva 9. Suodatetun Smith-prediktorin lohkokaavio.

4.7 CEN Biofuels -standardisointityö ja IEA Co-firing task

CEN-standardisointityöhön VTT Prosesseista ovat osallistuneet erikoistutkijat Antero Moilanen ja Raili Vesterinen WG 3:n (näytteenotto ja näytteen valmistaminen) ja WG 5:n (kemialliset analyysit) Suomen edustajina. On Suomen etu, että standardeista tulee sellaisia, että niitä voidaan soveltaa Suomessa ja Euroopassa käytävään kiinteiden biopolttoaineiden kaupankäyntiin ja tuotteiden laadun valvontaan. Standardisointityö on pitkäjänteistä työtä, koska jokaisen maan edut olisi sovittava riittävän hyvin standardeihin.

IEA Bioenergyn Task 32:een (Biomass Combustion and Co-firing) hankittua tietoa käytetään edistämään biomassan käytön laajenemista lämmön- ja sähkön toiminnassa yhteistuotannossa. Tiedon jakelu osanottajille perustuu IEA:n bioenergiaraportteihin, pienryhmien työskentelyyn ja niiden julkaisuihin sekä seminaareissa ja osanottajien muissa tapaamisissa saamaan tietoon. Työryhmän ulkopuolisille tietoa jaetaan mm. järjestämällä seminaareja teollisuuden edustajille ja muille potentiaalisille käyttäjille. Vuonna 2003 VTT Prosesseilta oli edustus molemmissa järjestetyissä työryhmän kokouksissa.

5. Tuloksien hyödyntäminen ja tavoitteiden toteutus

Tavoitteena oli lisätä mahdollisuuksia puupolttoaineiden käyttöön voimalaitoksilla. Tutkimustyö on antanut tietoa puupolttoaineiden tuotantojärjestelmien kehittämistarpeista laitoksen kannalta, polttoaineen laadun hallinnan tarpeista laitoksen toimivuuden parantamiseksi sekä luonut pohjaa teollisuuden puutähteen käyttöominaisuuksien parantamiselle.

Projektissa oli tarkoitus luoda voimalaitoksille työkaluja polttoaineiden laadunvaihtelujen hallintaan. Polttoaineominaisuuksien vaikutuksesta likaantumiseen ja lämmönsiirtoon laadittiin laskentamallit. Likaantumisen monitorointimenetelmällä on saavutettu polttoaineselektiivisiä ja höyrykattilan käyttäytymistä ennakoitua monipuolisemmin kuvaavia tuloksia. Kun tunnetaan polttoaineseoksen tuhkan ominaisuudet ja koostumus, voidaan laatia laskennallinen ennuste likaantumiselle ja sen lämmönsiirtovaikutuksille. Likaantumisen monitorointi ja polttoainepesifinen laskenta tuhkan vaikutuksesta kerrostumisnopeuteen ja lämmönsiirtoon on jo edennyt tuotteistamis- ja kaupallistamisvaiheeseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli luoda laitoksille edellytyksiä välttää likaantumisongelmia polttoaineseoksen hallinnan ja kattilaprosessin ohjauksen kautta. Projektin tuloksina voimalaitokset saivat tietoa likaantumisen kannalta järkevistä polttoaineiden seossuhteista ja likaantumisen kannalta hankalampien polttoainesuhteiden vaikutuksesta kattilan käyttöön. Projektin laitoksien osalta tullaan optimoimaan kattilan höyrynuohouksen aikaväli kattilan höyrytuotannon maksimoimiseksi eri polttoaineseoksilla.

Oulun yliopiston systeemiteknikan laboratorion tavoitteena projektissa oli tutkia kahta vaihtoehtoista polttoainehäiriöiden kompensointitapaa. Modifioidusta tulitehon kompensattorista on valmis koodattu Windows-pohjainen ohjelma, jota voidaan käyttää esim. DDE-linkin avulla voimalaitoksilla. Suodatettu Smith-prediktori on valmis toteutettavaksi johonkin voimalaitokseen.

6. Jatkosuunnitelmat

Saatujen tutkimustulosten, niissä käytettyjen menetelmien ja voimalaitoksilta saatujen käyttökokemusten pohjalta VTT kehittää ja tuotteistaa voimalaitoskattilan käytettävyyden ja käyttötalouden optimointimenetelmää. Menetelmässä hyödynnetään kerrostumien lämmönsiirtovaikutuksien arviointia sekä tehdään samanaikaisia prosessidataan pohjautuvia laskennallisia tarkasteluja käyttämällä kattilakohtaisia simulointimalleja toimintatason määrittämiseen. Menetelmä tarjoaa mahdollisuuksia optimoida kattilaan tulevaa polttoainevirtaa, ohjata kattilan nuohousta ja parantaa kattilan käytettävyyttä. Samalla voidaan saavuttaa etuja myös kattilan käyttötaloudessa.

Menetelmällä saatavia tuloksia hyödynnetään suunniteltaessa erilaisten vähemmän tunnettujen tai ongelmallisten polttoaineiden käyttöönottoa ja käytön lisäystä tai laadun vaihdosta voimalaitoksella. Asiakasyritykset saavat tietoa tutkittavien polttoaineiden käytön kannalta turvallisista seossuhteista ja niiden käyttötaloudesta, ja laitokset voivat hyödyntää kehitettyä menetelmää prosessin ohjaukseen sekä käytön ja käyttötalouden estimointiin.

Julkaisut ja raportit

Orjala, M., Vainikka, P. & Kärki, J. 2003. The Importance of Fuel Control in Improving the Availability of Biomass-Fired Power Plants, International Nordic Bioenergy 2003 conference. Jyväskylä.

Orjala, M., Vainikka, P. & Kärki, J. 2003. A Method for Optimisation of Multi-fuel-based bioenergy production. International Nordic Bioenergy 2003 conference. Jyväskylä.

Orjala, M., Vainikka, P., Kärki, J. & Hämäläinen, J. 2003. Implications of Fuel Blend Characteristics on Availability and Performance of Cofired Power Plant Boilers. XVIII International Symposium on Combustion Processes, September 2003. Ustron, Poland.

Orjala, M., Vainikka, P., Hämäläinen, J. & Kärki, J. 2003. High Performance and Low Emissions – Optimisation of Multifuel-Based Bioenergy Production. The Combustion Canada '03 conference, 21–24 September 2003, Vancouver, Canada.

Orjala, M. & Kärki, J. 2003. Monipolttoainekäytön optimointi höyrykattilassa. Kunnossapitolehti n:o 6, lokakuu/2003.

Häsä, Heidi. 2003. Determination of deposition rate on heat surfaces based on 2-D time dependant heat transfer model. The Nordic Matlab Conference 2003, October 21–22, 2003, Copenhagen, Denmark.

Orjala, M., Vainikka, P., Kärki, J. & Hämäläinen, J. 2004. Fuel Blend Characteristics and Performance of Co-Fired Fluidised Bed Boilers. In: Abstract for The BALTICA VI Conference on Life Management and Maintenance for Power Plants. Helsinki–Stockholm–Helsinki, 8–10 June, 2004. To be published.

Orjala, M, Kärki, J. & Vainikka, P. 2004. The advantages of co-firing peat and wood in improving boiler operation and performance. In: Abstract for International Peat Society 12th Int. Peat Congress, Tampere, 6–11 June 2004. To be published.

Paloranta, M., Leppäkoski, K. & Mononen, J. 2003. A simulator-based control design case for a full-scale bubbling fluidized bed boiler. In: Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling. Marbella, Spain, September 3–5, 2003.

Leppäkoski, K., Paloranta, M., Kovács, J. & Niemitalo, E. 2003. Reducing Nox emissions using control design. In: Automation 2003, Seminar days, Finnish Society of Automation, September 9.–11.2003.

Kärki, J., Orjala, M., Häsä, H. & Impola, R. 2004. Polttoainehallinnan keinot leijukerroskattilan käytettävyyden parantamisessa. VTT Prosessit, projektiraportti PRO2/P6028/03. Jyväskylä, 30.1.2004. Luottamuksellinen.

Lämpölaitosten polttoaineen- käsittelylaitteiden käytettävyyden parantaminen – PUUT39

Martti Flyktman
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 539, faksi (014) 672 597
E-mail: martti.flyktman@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Improving availability for fuel handling system in biomass fired heating plants

The aim is to survey problems related to receiving, handling and feed systems of heating plants and small-scale power plants, to develop equipment components and whole systems in such a way that the availability of small stations is improved and the stations will be able to increase the use of wood fuels of different qualities and types.

As results, an analysis of problems related to the use of wood fuels, data on the operability of handling equipment based on follow-up studies, and measuring data on the operation of handling equipment will be obtained, and alternatives for improving the operation of handling equipment for wood fuels will be presented.

Survey and research results as well as experiences from well-operating equipment can be utilised in the design and construction of new biomass-fired heating plants and also applied at presently operating stations. As soon as the problems related to the use of forest residue chips and other wood fuels are identified and solved when designing equipment, the use can be increased.

1. Tausta

Lämpölaitoskokoluokassa korostuu erityisesti polttoaineen vastaanoton ja käsittelyjärjestelmien tekniset rajoitteet. Märkä polttoaine on jäänyt kuljettimille. Isot jäätyneet hakepaakat ovat aiheuttaneet ongelmia polttoaineen käsittelylaitteissa. Useat, ainakin vanhemmat kattilat on suunniteltu kuivemmalle polttoaineelle kuin nykyisin metsästä suoraan toimitettava hake tai märkä kuori. Polttoainevaraston toimivuudessa on usein ongelmia, joita ovat aiheuttaneet hakkeen, kuoren ja purun erilaiset ominaisuudet, lisäksi tanko- ja kolapurkulaitteiden käytössä on erityisongelmansa.

Nykyisin useammissa kattiloissa halutaan käyttää monta polttoainetta, mikä aiheuttaa entistä tiukemmat vaatimukset polttoaineiden käsittelylaitteille. Suurilla voimalaitoksilla erilaisten polttoaineiden seospoltto on yleistynyt viime vuosina. Useimmiten turpeen rinnalla on alettu käyttää puupolttoaineita – sekä metsähaketta että teollisuuden sivutuotteita. Puupolttoaineiden käytön lisäämisen syitä ovat mm. alhaisemmat päästöt, nykyinen verotus sekä puupolttoaineiden parempi saatavuus. Vastaanottojärjestelmissä ja suurissa välivarastoissa eri polttoaineiden sekoitus ja laaduntasaus onnistuu suhteellisen hyvin suurilla voimalaitoksilla.

2. Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa lämpökeskusten ja pienvoimalaitosten polttoaineen vastaanotto-, käsittely- ja syöttöjärjestelmien ongelmat sekä kehittää yksittäisiä laitekomponentteja ja koko järjestelmiä siten, että pienten laitosten käytettävyys paranee ja laitokset voivat lisätä laatuominaisuuksiltaan erityyppisten puupolttoaineiden käyttöä.

3. Toteutus

Tutkimuksen toteutukseen osallistuvat VTT Prosessit, Wärtsilä Biopower Oy, Termia Oy sekä BMH Wood Technology Oy. Laitosten seurantaan kuuluvat seuraavat Termia Oy:n lämpökeskukset: Siilinjärvi, Pielavesi ja Suonenjoki. Muut mukana olevat laitokset ovat Vieremän kunnan lämpökeskus, Nurmeksen

Kaukolämpö Oy ja Junnikkalan Saha. Hanke on käynnistynyt 1.4.2003 ja se päättyy 30.4.2004.

Tutkimus koostuu seuraavista tehtävistä:

Polttoaineen käsittelyjärjestelmien ongelmien kartoitus ja laitosseuranta

Puupolttoaineiden käytön seuranta aluelämpö- ja pienvoimalaitoksissa sekä sahojen lämpökeskuksissa, ensisijaisena tavoitteena on selvittää polttoaineen ja sen laadun vaikutus kattilan käytettävyyteen, painottaen käsittelylaitteiden osuutta.

Selvitetään aluelämpö- ja pienvoimalakokoluokkien sekä sahojen lämpökeskusten polttoaineiden erilaisten käsittelyjärjestelmien ongelmat. Ongelmakartoituksessa otetaan huomioon mm. seuraavaa:

- vastaanotto, varastointi, kuljettimet, seulonta, murskaus, syöttösiilot, kattilaan syöttö
- eri polttoaineet, kuten turve, metsähake, teollisuuden sivutuotteet, sahoilla kuoren palakoko, kosteusvaikutus purkulaitteiden toimintaan
- mitoitukset ja kapasiteetit eri polttoaineille.

Hankkeessa toteutetaan talvikauden sisältävä muutaman kuukauden kestävä seuranta. Seurannan jälkeen ja/tai aikana käydään kullakin laitoksella, jolloin raportojen kanssa käydään läpi häiriöiden syyt ja vaikutukset laitoksen toimintaan. Käytettävyyss seurannan rinnalla kootaan tiedot käytetystä polttoaineesta.

Seospolton mahdollisuudet pienillä laitoksilla

Tässä osatehtävässä selvitetään mahdollisuuksia lisätä eri polttoaineiden seospoltoa pienemmissä kokoluokissa. Luotettavan sekoituksen ongelmana on pieni varastokoko sekä yksinkertaistettu vastaanottojärjestelmä, joten peräkkäisiä polttoainekuormia on vaikea luotettavasti sekoittaa laitoksella.

Tehtävässä on tavoitteena tutkia erillisin mittauksin puupolttoaineita käyttävissä laitoksissa käsittelylaitteiden toimintaa ja polttoaineiden sekoittamismahdollisuuksia eri varastointi- ja varastojärjestelmissä.

a) Pienet lämpökeskukset (vain yksi varasto/vastaanotto)

- Valmiiden polttoaineseosten käyttäytyminen käsittelyjärjestelmässä ja kattilaan syötössä (lajittuminen, kapasiteetit, juoksevuus/holvautuminen, jne.)
- Kentällä tapahtuvien sekoitusmenetelmien kehittäminen
- Seosten tekeminen kuormauksen yhteydessä
- Miten tekniikkaa pitäisi kehittää, jotta sekoittaminen onnistuisi myös laitoksen käsittelyjärjestelmässä.

b) Suuremmat lämpökeskukset ja pienvoimalaitokset

Perinteisissä välivarastoissa tapahtuva sekoittuminen tunnetaan. Tässä selvitetään kokeellisesti eri polttoaineiden sekoittumista ja laaduntasausta laitoksilla, joissa polttoaine varastoidaan purkulaitteilla varustetuissa vastaanottotaskuissa (2–4 rinnakkain olevaa taskua, joita puretaan samanaikaisesti, kahmarinosturin toiminta).

Selvitetään, miten taskuista saadaan haluttu polttoaineseos kattilalle, pohjapurkulaitteiden nopeuden säätö ja repijöiden toiminta, laitteiden mahdollinen tekninen kehittäminen. Sekoittumisen hyvyttä tutkitaan ottamalla näytteitä sekä polttoainevarastoista että kattilaan menevältä kuljettimelta.

c) Erillismittaukset

Hyödynnetään laitosten tietojen keruujärjestelmää kokoamalla polttoaineen tietoja käsittelyjärjestelmien toiminnasta eri polttoaineilla. Seurattavia suureita voivat olla esimerkiksi järjestelmän kapasiteetti, käyntiajat sekä sähkönkulutus. Tutkimuksen aikana tarvittaessa varustetaan laitoksen purkulaitteet mittaanturein, joilla mitataan varostosiiloissa esiintyviä voimia.

Kehityskohteiden ja uusien teknologioiden kartoitus

Osatehtävässä selvitetään edellytykset pienten laitosten polttoaineen käsittelyjärjestelmien ja komponenttien yhtenäistämiseksi sekä valitaan mahdolliset kehityskohteet. Tavoitteena voisi olla moduulipohjainen valmistusmenetelmä.

Lähtökohtana tarkastelussa on:

- käsittelyjärjestelmien suunnittelu- ja valmistuskustannusten alentaminen,
- riittävien, ei ylimitoitettujen kapasiteettien saavuttaminen eri käsittelylaitteilla erilaisten polttoaineiden ominaisuudet huomioiden,
- käsittelyjärjestelmien luotettavuuden parantaminen sekä
- esimerkkijärjestelmät eri kokoisille lämpökeskuksille ja pienvoimalaitoksille.

Käsittelyjärjestelmien kunnossapidon ja valvonnan kehittämiseksi ja käyttökustannusten pienentämiseksi tarkastellaan pienille laitoksille soveltuvina kohteina:

- kunnossapidon ja kunnossapitojärjestelmien kehittäminen pienillä laitoksilla
- käsittelyjärjestelmien liittäminen laitoksen muun kunnossapidon järjestelmiin.

4. Tulokset

Tutkimuksessa on koottu tietoa polttoaineen käsittelylaitteiden toimintaan liittyvistä ongelmista. Tyypillisimmät ongelmat ovat polttoaineen holvautuminen vastaanottoasemissa ja varastosiiloissa. Samoin polttoaineen joukossa olevat suuret kappaleet aiheuttavat ongelmia pysäyttämällä kuljettimia.

Sahoilta tulevan puujätteen, purun ja kuoren, seassa saattaa olla pitkiä tikkuja ja joissain erissä pieniä kiviä. Pienissä lämpökeskuksissa polttoaineen laadun merkitys korostuu entisestään, koska toimituserät ovat samaa suuruusluokkaa kuin suuremmille laitoksille. Pieni lämpökeskus kärsii näin ollen heikosta polttoaineerästä merkittävästi kauemmin kuin suuri voimala. Pienten lämpökeskusten valvontatyön tarpeella on olennainen merkitys laitoksen talouden kannalta. Tämä asettaa laitoksen käytettävyydelle erittäin suuret vaatimukset.

Ohessa laitosten seurannasta esille nousseita asioita:

- kostea polttoaine jäätyy talvella, pakkasella sahajauhopallot muodostavat holveja
- kiviä polttoaineen joukossa, tyypillinen sahoilta tulevan polttoaineen ongelma
- polttoaineen seulonta ja/tai murskain puuttuu, polttoainevaraston repijätelat puuttuvat
- polttoaineen pakkaantuminen/holvaaminen polttoainevaraston purkavaan seinään, samoin kattilaan syötössä holvausta
- jyrkässä kuljettimessa polttoaine vyöryy alas ruuhkarajalle, polttoaineen laadulla olennainen merkitys
- siilo täyttyy epätasaisesti
- ruuhkavahtien ja pintavahtien toiminnan luotettavuus, usein syynä polttoaineen epäpuhtaudet, pitkät sälot, pintavahti suppilossa ei toimi, suppilon lasi likainen
- käsittelylaitteiden ohjausjärjestelmässä puutteita, esim. kahmari eksyy ns. turva-alueelle, korkeusmittaus ei toimi ja kauha kaatuu
- tankopurkain ja palaturve on huono yhdistelmä, palaturve murenee
- polttoaineiden sekoitusmahdollisuus puuttuu
- vain yksi polttoainevarasto, mikäli tämä jää pois käytöstä, niin lämmön tuotanto keskeytyy
- vastaanotto sidottu yhteen purkutyyppiin, purkukapasiteetti
- kuljettimien ja purkulaitteiden kestäminen, laitteiston huollon tarve suuri.

Kuvassa 1 esitetään Siilinjärven tankopurkainvaraston repijätela.



Kuva 1. Siilinjärven tankopurkainvaraston repijätela.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tutkimuksen tuloksena saadaan:

- analyysi puupolttoaineiden käytön ongelmista,
- käsittelylaitteiden toimivuus seurantatietojen perusteella,
- mitattua tietoa käsittelylaitteiden toiminnasta ja
- esitettäväksi ratkaisuja puupolttoaineiden käsittelylaitteistojen toiminnan tehostamiseen.

Selvitys- ja tutkimustuloksia voidaan hyödyntää eri sovellutuskohteissa seuraavasti:

- uusien laitosten suunnittelussa ja rakentamisessa, koska tunnetaan paremmin nykyisten järjestelmien puutteet
- soveltaminen olemassa oleviin laitoksiin, hyvin toimivien laitteistojen käyttökokemukset.

Metsätähdehakkeen ja muiden puupolttoaineiden käytön lisääntymiselle syntyy mahdollisuuksia, kun käytön ongelmakohdat tunnetaan paremmin ja niiden ratkaisuun voidaan kiinnittää huomiota jo laitteistoja suunniteltaessa.

Puun ja lietteiden yhteispolton vaikutus kattilakorroosioon – PUUY28

Juha Räsänen

Varenso Oy, Energiapalvelut

PL 169, 78201 Varkaus

Puh: 020 4632 704, (040) 7461 220, faksi 020 4632 122

E-mail: juha.rasanen@storaenso.com

Markku Orjala

VTT Prosessit

PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh: (014) 672 534, faksi (014) 672 597

E-mail: markku.orjala@vtt.fi

Abstract

Project title in English: The effect of cofiring of wood fuels and water treatment sludges on corrosion of boiler

The objective of this research was to characterise the deposit build-up and its effect on corrosion in combustion of wood and waste water treatment sludges. The results can be used in estimating and optimising the factors that have effect on plant's availability. Furthermore, we can estimate the effects caused by sludge quality and by amount of different sludges in fuel blends on high temperature corrosion. In general, the results can be used in enhancing boiler availability and the use of wood fuels with byproducts of paper industry. Results will be valuable also when new super heater materials are selected.

1. Tausta

Sellu-paperi-integraatin voimakattiloissa kloorin kiihdyttämää tulistinputkien kuumakorroosiota ovat aiemmin pääosin aiheuttaneet primäärilietteen val-

kaisukemikaalien ja itse puupolttoaineen klooriyhdisteet yhdessä polttoaineen sisältämien alkalimetallien kanssa. Kloorin käytön vähenemisen sekä kestävämpien tulistinmateriaalien myötä kuumakorroosion aiheuttamat vauriot ovat vähentyneet. Lisä- ja tukipolttoaineina käytettävien turpeen ja kivihiilen sisältämä rikki on osaltaan vähentämässä kloorikorroosioriskiä, vaikka niiden poltto on ajallisesti epäjatkuva.

StoraEnso Oyj:n Varkauden tehtaalla otettiin käyttöön vuonna 2002 kemiallinen saostus prosessivesien puhdistuksen tertiäärivaiheena. Kuitu- ja biolietteen lisäksi polttoon tulee kemiallista lietettä uudesta flotaatiolaitoksesta, jossa saostuskemikaalina on pääosin alumiinisulfaatista koostuvaa AVR. Kiintoaineiden lisäksi lietteet sisältävät veteen liuenneita kemikaaleja kuten klorideja ja sulfaatteja. Niinpä kemiallisen lietteen klooripitoisuus 0,37 % (VTT:n tutkimusselostus ENE3/T0046/2001) on haitallisen korkea, jos sitä poltetaan suurina osuuksina kattilan polttoaineesta.

Kun tiedetään biopolttoainetuhkan kalsiumin sulfatoitumisen jälkeisen rikki-kloorisuhteen vaikuttavan oleellisesti lämpöpinnoille muodostuvien kerrostumien laatuun ja kuumakorroosioon, niin nyt on selvitetty, onko merkitystä sillä, missä muodossa rikki tulee polttoaineen mukana tulipesään.

2. Projektin tavoitteet

Tutkimuksen päämääränä on määrittää kiertoleijukattilassa (CFB) K6 puun ja lietteen seospoltossa lietteen aiheuttamia päästövaikutuksia, kerrostumien muodostumista ja kerrostumien laadun mahdollisesti aiheuttamia tulistimien materiaaliskejä. Tutkimuksessa määritetään polttoaineiden ominaisuudet, mitataan syntyneitä päästöjä, kerätään kerrostumanäytteitä sondimittauksilla ja analysoidaan niiden koostumusta sekä tehdään pitkäaikaisia materiaalitestejä. Tarkoituksena on varmentaa pilottikokeen tulokset ja selvittää,

- mikä on nykyisin poltettavien puupolttoaineiden ja lietteiden kloorin sekä sen ja kivihiilen tai turpeen rikin vaikutus kerrostumien laatuun ja materiaalien kestoon

- eliminoiko polttoon tuleva kasvava rikkimäärä kemiallisen lietteen aiheuttamasta kloorimäärän kasvusta tulevan korroosioriskin
- miten nykyisten kiinteiden puupolttoaineiden käyttöä voitaisiin parantaa niin, että haitallinen kerrostumien muodostus vähenisi
- löytyykö uusia hinnaltaan riittävän edullisia tulistinmateriaaleja satunnaisten korkeiden kloorikuormitustilanteiden varalle.

3. Toteutus

Yhteistyössä VTT Prosessien kanssa on tehty täydenmitan polttokokeita kolmessa eri vaiheessa vuosien 2002 ja 2003 aikana kiertoleijukattilalla K6 osana lietteiden palamiskäyttäytymisen ja materiaali vaikutusten tutkimushanketta.

Ensimmäinen koejakso tehtiin laitoksen normaalilla polttoaineseoksella ennen kemiallisen lietteen käyttöönottoa: puu, kuori + kuitu- ja bioliete sekä hiili 18.3.–14.4.2002, toinen koejakso normaalien polttoaineiden lisäksi kemiallisen lietteen kanssa ilman hiiltä 14.10.–14.11.2002 ja kolmas koejakso kemiallisen lietteen kanssa hiilen kera. Kattilakokeiden tehostettu koejakso päästömittauksiin kesti neljä päivää ja korroosioriskin seurantajakso neljä viikkoa. Kolmas koejakso oli korroosioriskin seurantaa ja polttoaine- ja tuhkanäytteiden ottoa ja se tehtiin 21.10.–18.11.2003.

4. Tulokset

4.1 Ensimmäinen koejakso

Ensimmäinen koejakso (18.3.–12.4.2002) tehtiin laitoksen normaalilla polttoaineseoksella: puu, kuori + kuitu- ja bioliete sekä hiili, joiden analyysituloksia on esitetty taulukossa 1. Koejaksolla tehtiin neljä lyhyttä koetta (kokeet 1.1–1.4) sekä pidempi seurantajakso (koe 1.5).

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuuksia ja koostumuksia.

Analyysi Pvm/klo	Hiili	Liete	Kuori 19.3.2002	Kuori (vrk-kokooma)		
				18.3.	20.3	21.3.
Kosteus (p-%)	11,4	55,3	57,6	61,5	62,1	58,7
Tuhkapitoisuus (p-%), SS 550°C	9,56	48,2	1,89	2,02	3,21	2,93
Tuhkapitoisuus (p-%) 815°C			1,58			
Haihtuvat aineet (p-%)	20,3	56,3	77,8			
Kalorimetrinen lämpöarvo	31672	9 750	22 156			
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (kJ/kg)	30 783	8 895	20 767			
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (kJ/kg)	26 986	2 628	7 389			
Hiili C (p-%)			54,6			
Vety H (p-%)			6,37			
Typpi N (p-%)			0,49			
Rikki S (p-%)	0,29	0,87	0,03	0,04	0,06	0,05
Kokonaiskloori Cl (kloridi) (p-%)	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Rikki-kloorisuhde	14,50	87	3,00	2	6,00	2,5

Piipusta mitattiin savukaasun SO₂-, NO-, CO- ja O₂-pitoisuudet jatkuvatoimisilla analysaattoreilla. Koostumustuloksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kiertoleijukattilan (K6) savukaasupitoisuudet kuivassa savukaasussa todellisessa happipitoisuudessa VTT:n jatkuvatoimisen mittauksen perusteella.

Koe	NO	SO ₂	CO	CO ₂	O ₂
	ppm	ppm	ppm	%	%
1.1	128	1	29	13,5	6,6
1.2	135	9	32	13,6	6,4
1.3	124	1	43	13,6	6,5
1.4	121	23	57	13,4	6,7

Savukaasuista tehtiin myös erillisiä koostumusmittauksia ennen ekonomaiseria ja sähkösuodatinta ja määritettiin erillisellä näytteenotolla savukaasun HCl-pitoisuus (taulukko 3).

Taulukko 3. Savukaasun HCl-pitoisuudet sekä erillisellä näytteenotolla että FTIR-menetelmään perustuen (pitoisuus kuivassa savukaasussa). HCl-näytteet otettu kaasukanavasta ennen ekonomaiseria. Vertailun vuoksi taulukkoon kirjattu savupiipusta samoilla ajanjaksoilla mitatut SO₂-pitoisuudet.

Koe	Pvm	Näytteet	Klo	HCl _{FTIR} ppm	HCl _{ERIL} Mg/m ³ _n	HCl _{ERIL} ppm	SO ₂ piippu ppm
1.1	18.03.2002	a	12:00 – 13:30	2,0	6,10	3,8	1
		b	13:32 – 15:02		3,89	2,4	11
		c	15:05 – 16:05		1,96	1,2	1
		d	16:07 – 17:07		1,70	1,1	0
1.2	19.03.2002	a	10:00 – 11:30	1,3	6,45	4,0	0
		b	11:32 – 13:02	1,8	8,16	5,0	3
		c	13:05 – 14:05	2,6	11,91	7,3	17
		d	14:09 – 15:09	5,4	13,18	8,1	25
1.3	20.03.2002	a	10:00 – 11:30	2,0	3,53	2,2	0
		b	11:32 – 13:02		2,96	1,8	0
		c	13:05 – 14:05		5,59	3,4	4
		D	14:07 – 15:07		5,05	3,1	3
1.4	21.03.2002	A	09:45 – 11:15	5,9	-	-	19
		B	12:15 – 13:15		9,47	5,8	21
		C	13:17 – 14:17		5,76	3,5	17
		D	14:18 – 15:18		12,50	7,7	16

4.1.1 Materiaalitestit

Kerrostumien muodostumista tulipesässä ja tulipesäolosuhteiden vaikutusta tulistimissa käytettäviin materiaaleihin tutkittiin kerrostuma-korroosiosondilla. Kerrostumasondi oli kokeiden ajan syklonilta tulevassa kaasuvirrassa ennen hilaputkistoa. Polttoaineiden vuorokausikokoomien kosteus-, rikki- ja klooripitoisuudet vaihtelivat hiukan. Kuorilinja puupolttoaineiden rikki-kloorisuhde oli

kokeissa välillä alle 2. Käytännön kokemusten perusteella on esitetty, että polttoaine ei aiheuta kloorikorroosiota, kun suhde on vähintään 4. Suhteen mennessä alle 2, kloorikorroosiota aiheutuu lähes poikkeuksetta. Kuorilinjan polttoaineseoksien rikki-kloorisuhteet jäivät alhaisiksi kaikilla koejaksoilla. Hiilen osuus kuitenkin kompensoi kokonaissuhdetta jonkin verran.

Nykytietämyksen mukaan polttoaineen muut komponentit, kuten kalsium ja fosfori, vaikuttavat siihen, missä määrin polttoaineen rikki vaikuttaa kloorikorroosion riskiin ja millä mekanismeilla kloorikorroosio tapahtuu. Tästä syystä turvallinen rikki-kloorisuhde vaihtelee polttoaineseoksesta riippuen ja saattaa olla käytännössä merkittävästi arvoa 4 korkeampikin.

Ottamalla huomioon kokeiden aikaiset keskimääräiset polttoaineesuudet voidaan arvioida, että rikki-kloorisuhde oli 19.3.2002 kokeessa 1.2: 3.36, 20.3.2002 kokeessa 1.3: 2.94, 21.3.2002 kokeessa 1.4: 2.99 ja korroosion seurantakokeessa 1.5: 4.52. Polttoaineiden rikki-kloorisuhteet jäivät kuitenkin alhaisiksi kaikilla koejaksoilla, joten kloorikorroosion riski on olemassa.

Korrosonditestejä tehtiin kolme. Koe 1.1 oli kestoltaan 6 tuntia, koe 1.1.2 69 tuntia ja kokeen 1.2 kesto 522 tuntia (3 viikkoa). Kokeen 1.2 jälkeen olivat kaikki kerrostumat selvästi havaittavia. Sondin lämpötilamittauksista lyhyellä aikavälillä nähdään kerrostuman muodostuminen sivu- ja jättöpinnan lämpötilan laskuina. Testattavina materiaaleina sondissa olivat 10CrMo 9 10, X20 ja AC66.

Kokeen 1.1 holkeissa 10CrMo 9 10 -materiaalin pinnalla kerrostuma oli paksuin, mutta huokoinen koostuen yksittäisistä deposiittipartikkeleista. X20-materiaalin tulopinnalla kerrostuma oli tiivistynyt hieman. Kerrostuma koostui pääasiassa kalsiumista (Ca) ja piistä (Si). Sekä 10CrMo 9 10 että X20-holkkien pinnalla oli ohut, alle 10 µm paksu rikkonainen oksidikerros. 10CrMo 9 10 -holkin pinnalla oli paikoin klooria metallin ja oksidin rajapinnalla. AC66-holkin pinnalla kerrostumaa oli erittäin vähän. AC66-metallin pinnalla havaittiin ohut kerros, joka koostui kloorista ja kaliumista.

Kokeen 1.1.2 holkkien pinnalla oli paksumpi kerrostuma kuin kokeessa 1.1 ja kerrostumat olivat sintraantuneet tiiviimmäksi erityisesti tulo- ja sivupinnoilla. Kerrostuman koostumus tulopinnalla oli rikki-, kalsium- ja kaliumpitoinen. Jättöpuolella pääkomponenttina oli kalsium. Tulopinnan oksidikerros holkeissa

X20 ja 10CrMo 9 10 oli hieman paksumpi kuin kokeessa 1.1, noin 15 µm. Raudan ja kromin lisäksi oksidissa oli runsaasti kalsiumia sekä hieman rikkiä, kaliumia ja piitä. Jättöpuolella oksidi oli hyvin rikkonainen.

Pisimmän altistuksen kokeessa (Koe 1.2, 522 h) kerrostumat ovat paksuja ja erityisesti tulopuolella sintraantuneita tiiviiksi. X20-materiaalin pinnalla oli rikkonainen, noin 10–30 µm paksu oksidikerros. 10CrMo 9 10 -materiaalilla oksidikerros oli tulopinnalla hieman paksumpi, noin 40 µm. Oksidin ja metallin rajapinnalta löytyi klooria. AC66-materiaalin pinta on syöpynyt vain hieman. Syöpyneeltä alueelta löytyi hieman klooria. Oksidin ja metallin rajapinnasta on tullut ilmeisesti kosteuden vaikutuksesta esiin kloridipitoinen läikkä.

HCl-pitoisuudet ovat alhaisia kaikkina neljänä koepäivänä. Kattila K6:n savupiipusta mitatuissa SO₂-pitoisuuksissa on havaittavissa selvä kasvava trendi samoilla ajan jaksoilla kuin HCl-pitoisuuksissakin, mikä osoittaa polttoaineen rikki- ja klooriyhdisteiden määrien vaihtelevan prosessissa. Lisäksi on oletettavaa, että polttoaineen rikkisisällön lisääntyessä kloori vapautuu savukaasun mukana enemmän HCl:nä eikä sitoudu alkalimetalleihin korrodoiviksi klorideiksi.

4.2 Toinen koejakso

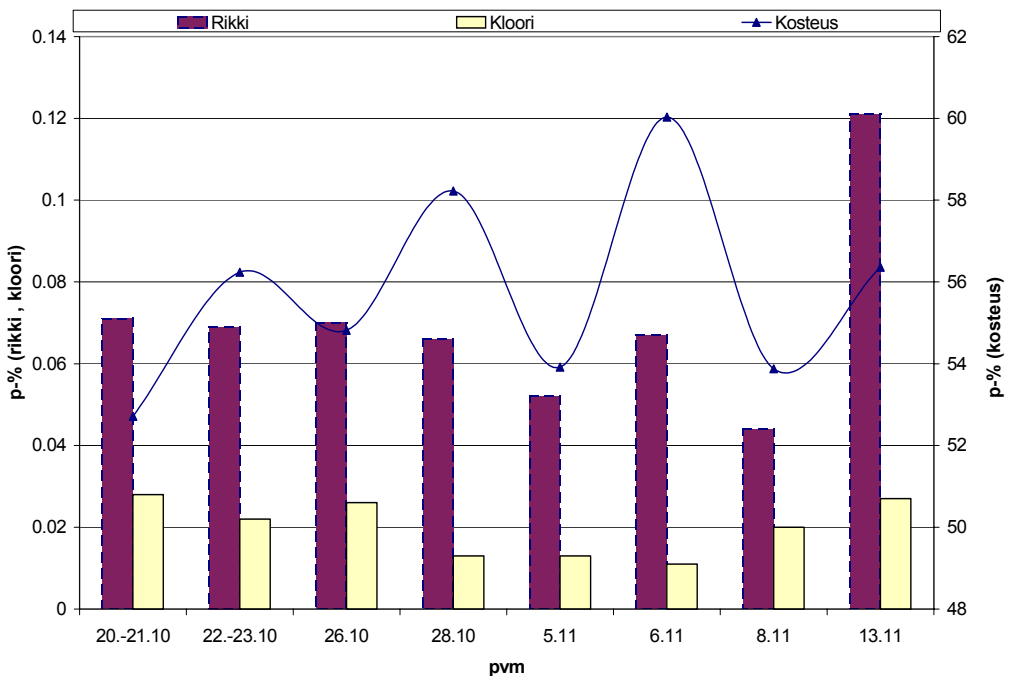
Toisen koejakson aikana (14.10.–14.11.2002) käytetyssä polttoaineseoksessa oli puuta, kuitu-/biolieteseosta, kemiallista lietettä sekä hiiltä. Koejakson aikana tehtiin kaksi lyhyttä n. 6 tunnin koetta (kokeet 2.1 ja 2.2) sekä pidempi neljän viikon seurantajakso (koe 2.3). Kokeiden aikana otettiin tarkempia analyyseja varten näytteitä polttoaineesta, pohjahiekasta, lentotuhkasta ja kertomateriaalista. Savukaasun SO₂-, NO-, CO- ja O₂- pitoisuuksia mitattiin savupiipusta (taulukko 4). Savukaasun HCl-pitoisuus määritettiin erillisellä näytteenotolla. Savukaasusta tehtiin myös erillisiä koostumusmittauksia. Kerrostumien muodostumista ja tulistinmateriaalien korroosiota tutkittiin kerrostumasondilla.

Taulukko 4. Kiertoleijukattilan (K6) savukaasupitoisuudet kuivassa savukaasussa todellisessa happipitoisuudessa.

Koe	NO	SO ₂	CO	CO ₂	O ₂
	ppm	ppm	ppm	%	%
2,1	106	2	16	13,4	6,4
2,2	115	2	18	13,3	6,7
2,3	110	8	17	13,3	6,8

Polttoaineiden rikki-, kloori- ja kosteuspitoisuudet vaihtelivat vähän. Polttoaineseoksen rikki-kloorisuhde oli useissa jakson ensimmäisen kokeen aikana otetuissa näytteissä alle 2, jolloin kloorikorroosiota voidaan olettaa tapahtuvan poikkeuksetta. Kokeen 2.2 aikana S/Cl-suhde oli keskimäärin 3 ja kokeen 2.3 aikana noin 5. S/Cl-suhteen ollessa vähintään 4, ei käytännön kokemusten perusteella kloorikorroosiota aiheudu.

Neljän viikon seurantajakson polttoainenäytteistä analysoitiin korroosiosondimittausten perusteella mielenkiintoisempien mittauspäivien näytteet, ao. kuvassa näytteiden rikki- ja klooripitoisuudet sekä kosteudet.



Kuva 1. Kokeen 2.3 aikana otettujen polttoainenäytteiden rikin, kokonaiskloorin ja kosteuden massaosuudet.

4.2.1 Kerrostuman vaikutus materiaaleihin

Kerrostumasonditestejä tehtiin kolme. Kokeet 2.1 ja 2.2 olivat lyhyitä, noin 6 tunnin pituisia ja koe 2.3 pidempi seurantajakso, joka kesti neljä viikkoa. Seu-

rantajakson aikana käytettiin samanaikaisesti kahta sondia, joiden määritetyt tulopinnan lämpötilat erosivat n. 15 °C. Kokeiden 2.1 ja 2.2 jättö- ja sivupinnoille kertyneiden kerrostumien lämpövastus on tulopinnan kerrostumaa suurempi, jolloin nämä lämpötilat laskevat. Edellä mainitut kerrostumat voidaan kuitenkin poistaa nuohouksella. Seurantajakson aikana tulopinnalle kertyneellä pysyvällä kerrostumalla oli suurin lämpövastus, mikä aiheutti muiden pintojen lämpötilakäyrien nousun pitkällä aikavälillä.

Kokeiden 2.I ja 2.II kaikkia holkkeja ei analysoitu SEM:llä. Tarkastelu stereomikroskoopilla osoitti, että analysoimattomissa näytteissä ei ollut tapahtunut huomattavaa syöpymistä tai hapettumista. Materiaali 10CrMo oli hapettunut saman verran kokeissa 2.I ja 2.II, mutta kokeen 2.I oksidikerros näytti olevan tiiviimpi. Kokeessa 2.I holkin pinnalle ei ollut kertynyt kerrostumaa.

Materiaalin X20 pinta oli hapettunut jonkin verran kokeessa 2.II ja tulopuolella oli runsaasti irtonaisia kerrostumapartikkeleita. Kokeen 2.II holkkien pinnalla havaittiin klooria. Kokeen 2.II holkkien tulopinnalla kertyneet kerrostumat olivat kaikissa holkeissa paksut. Kerrostumien koostumus ei vaihdellut huomattavasti eri materiaali-näyteholkkien pinnoilla.

Kokeen 2.III holkeissa havaittiin klooria oksidimetalli-rajapinnalla tai oksidissa. Holkit 2 (X20) olivat syöpyneet ja hapettuneet altistuksessa samankaltaisesti molemmissa sondeissa. Sekä tulo- että jättöpuolella oli havaittavissa ohut oksidikerros ja sen alla sisäistä syöpymistä erityisesti jättöpinnalla. AC66-materiaali (H4) oli kestänyt altistuksen hyvin. Lähinnä sondin C1 näytteessä sekä tulo- että jättöpinnalla oli havaittavissa syöpymistä. 10CrMo-holkkien pinnalla oli paksu oksidikerros ja metallin pinta oli paikoin raerajakorroosion syövyttämä. Sondien lämpötilaero ei alustavan tarkastelun perusteella vaikuttanut holkkien keston altistuksessa.

4.3 Johtopäätökset

Tehtyjen tutkimuksien perusteella voidaan todeta, että laitoksen normaalilla polttoaineseoksella ei käytössä esiinny merkittävän suuria ongelmia tutkimusten painopistealueilla. Polttoaineseoksien rikki-kloorisuhteet jäivät alhaisiksi kaikil-

la koejaksoilla. Kloorikorroosion riski on täten olemassa. Polttoaineen metallisen alumiinin osuus on merkityksetön.

Sondimittausten alueella lämmönsiirtopintojen tulopinnoille jää pysyvää kerrostumaa merkittävämmän kuin jättö- ja sivupinnoille. Lyhytaikaista kerrostumaa syntyy sen sijaan tulopinnoille vähiten. Nuohous ei poista kaikista paikoista likaa riittävän tehokkaasti. Lisättäessä mahdollisesti ns. likaavien polttoaineiden osuutta kokonaismäärästä, on myös nuohousta pyrittävä tehostamaan.

Materiaali 10CrMo 9 10 hapettuu kaikissa koeolosuhteissa sekä tulo- että jättöpuolella. Oksidikalvojen koostumuksesta ja paksuudesta voidaan päätellä, että oksidin ja kerrostuman väliset reaktiot lisäävät hapettumisnopeutta verrattuna materiaalin altistukseen esim. ilmassa. Pääasiallinen korroosiota kiihdyttävä tekijä tulopuolella on kerrostuman pääkomponenttien (alkali- ja maa-alkalimetallien sulfaatit) reaktiot metallioksidin kanssa. Hapettumiskerroksien paksuus on pitemmillä altistusajoilla tulopuolella niin suuri, jopa useita kymmeniä mikrometrejä, että oksidikerrokset heikentävät lämmönsiirtoa kerrostuman ja metallin välillä lisäten kerrostumien sintrautumista ja heikentäen puhdistettavuutta. Jättöpuolella ja sivupinnoilla poikkileikkausanalyysit ja/tai oksidikerroksen rikkonainen morfologia viittaavat siihen, että kloorilla on voinut olla merkittävä vaikutus hapettumiseen. Putkien sivu- tai olkapinnat savukaasujen tulosuunnassa ovat aiemman kokemuksen mukaan kohtia, jossa kloorin korroosiota kiihdyttävä vaikutus on suurimmillaan. Kloorin vaikutus likaantumiseen ei ole eri tapauksissa selvää, koska rikkonainen oksidikerros voi irrota metallipinnasta nuohouksessa. Metallin ainehäviön kannalta ilmiö on haitallinen ja lisää nuohouksen eroosiovaikutusta. Edellinen tarkastelu koskee laadullisesti myös materiaalia X20 olevia näytteitä.

Materiaalin AC 66 hapettumisnopeus on ollut huomattavasti edellisiä materiaaleja pienempi, minkä seurauksena myös likaantuminen on ollut vähäisempää. Kloorin rikastuminen tulopinnalla lähelle metallipintaa on ilmeisesti seurausta korroosioreaktioista. Aiemmissa hankkeissa suuremmilla kloorikuormituksilla saatujen kokemusten perusteella kloorin vaikutukset arvioidaan tässä tapauksessa muitten tekijöitten rinnalla pieniksi.

HCl-pitoisuudet pysyivät alhaisina koejaksolla, vaikka polttoaineen rikki- ja klooriyhdisteiden määrät vaihtelivat prosessissa. On oletettavaa, että polttoai-

neen rikkisisällön lisääntyessä kloori vapautuu savukaasun mukana enemmän HCl:nä eikä sitoudu alkalimetalleihin korrodoiviksi klorideiksi.

5. Tuloksien hyödyntäminen ja tavoitteiden toteutus

Tavoitteena oli lisätä mahdollisuuksia lietteen ja puupolttoaineiden yhteiskäyttöön voimalaitoksilla. Tutkimustyö on antanut tietoa puutähteen ja lietteiden käyttöominaisuuksien parantamiselle.

Projektissa oli tarkoitus luoda laajemminkin StoraEnson voimalaitoksille työkaluja lietteitä sisältävien polttoaineseoksien laadunvaihtelujen hallintaan niin, että voidaan vähentää kloridien kiihdyttämää kuumakorroosiota kattiloiden tulistinalueella. Lisäksi projektin tulosten perusteella voidaan tulevaisuudessa kattilarevisioissa tehdä sopivia materiaalivalintoja erityisesti tulistinalueelle.

6. Jatkosuunnitelmat

Syksyn 2003 seurantajakson tulokset käsitellään ja raportoidaan sekä tehdään lopullinen yhteenveto työn tuloksista.

Raportit

Orjala, M., Kärki, J., Vainikka, P., Lybeck, E., Mäkipää, M. & Oksa, M. 2002. Metsäteollisuuden lietteiden vaikutus puupolttoaineita polttavan kiertoleijukattilan tulistinmateriaaleihin – StoraEnson Varkauden voimakattila K6:n koejakso I, PRO2/T6557/02. 35 s. + liitt. 21 s. Jyväskylä 27.9.2002. Luottamuksellinen.

Orjala, M., Kärki, J., Häsä, H., Mäkipää, M. & Oksa, M. 2003. Metsäteollisuuden lietteiden vaikutus puupolttoaineita polttavan kiertoleijukattilan tulistinmateriaaleihin – StoraEnson Varkauden voimakattila K6:n koejakso II, PRO2/P6002/03. 28 s. + liitt. 6 s. Jyväskylä 21.1.2003. Luottamuksellinen.

Puupolttoaineiden online-kosteus- ja laatumittaus – PUUY29

Sauli Jäntti

Teknologiakeskus Oy Merinova Ab/Länsi-Suomen osaamiskeskus

Yrittäjänkatu 17, Vaasa Airport Park

PL 810, 65101 Vaasa

Puh. (06) 2828 280, (040) 5863 209, faksi (06) 2828 299

E-mail: sauli.jantti@merinova.fi

Abstract

Wood chips are biofuel material, which is characterised by large variations in physical and chemical quality depending on wood species etc. Moisture of wood chips transported for combustion in a power plant typically varies from 10% to 60% and ice or snow may be present in the material. A need for reliable online monitoring of moisture of the incoming fuel material has been clearly recognized. Availability of real time data on moisture could be used to improve control of the process, to gain better efficiency of combustion, to reduce emissions and to minimise breaks in operation.

The goal of the research was to assemble an experimental pilot installation for online measurement of moisture in wood chips entering combustion in a power plant. An experimental calibration model was developed and performance was evaluated by arranging measurements in real power plant conditions. The results were analysed and recommendations provided on possible further development steps needed to commercialize the technique for power plant users.

1. Projektin tausta

Puupohjaisten polttoaineiden, kuten kuoren, sahatteollisuuden hakkeen ja metsähakkeen, jatkuvatoimiseen online-kosteusmittaukseen ei ole toistaiseksi tarjolla luotettavaa kaupallista mittaustekniikkaa. Lämpö- ja voimalaitoksilla kosteuden reaaliaikaiseen mittaukseen on olemassa selkeä tarve: kosteustiedon avulla voi-

taisiin tehostaa prosessin säätöä ja parantaa siten energiatuotannon hyötysuhdetta sekä vähentää päästöjä ja käyttöhäiriöitä. Vastaavaa tarvetta nähdään myös muille jatkuvatoimisille puupolttoaineen laatumittauksille esim. energiasisällön osalta.

Tällä hetkellä käytetty tekniikka polttoaineen kosteusmääritykseen perustuu näytteenottoon ja uunikosteusmääritykseen, jolloin tulos saadaan vuorokauden myöhässä, eikä sitä voi käyttää prosessin säädössä.

2. Projektin tavoite

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää lyhyen aallonpituuden lähi-infrapunatekniikan (SWNIR) ja monimuuttujamallinnuksen soveltuvuutta kuoresta, sahateollisuuden hakkeesta ja metsähakkeesta sekoitetun polttihakkeen kosteus- ja laatumittauksiin. Tutkimus tähtäsi mahdollisen online-mittalaitteen kehittämiseen, ja siihen sisältyi koejaksoja Kauhavan kaukolämpö Oy:n lämpölaitoksella. Koemittalaitteena hyödynnettiin aikaisemmin kehitettyä SWNIR-mittalaitetta (kuva 1), johon modifioitiin mm. lämpölaitosmittauksiin soveltuva online-mittapää. Koejakson aikana kehitettiin kalibrointimenetelmiä sovellettavaksi lämpölaitoksella.



Kuva 1. Mittauslaitteisto asennettuna.

3. Projektin toteutus

Työ kohdistui SWNIR-menetelmän käyttöön kuoren, sahatteollisuuden puuhakkeen, sahanpurun ja kutterilastun mittauksessa yhdessä koekohteessa (Kauhavan kaukolämpö, 4 MW_{th} lämpölaitos). Päätaavoitteena oli online-kosteusmittaus.

Lyhyen aallonpituuden NIR-tekniikalla (SWNIR) on saavutettu hyvä tuloksia viljan, lihan, siementen ja muiden elintarvikeraaka-aineiden kosteus- ja laatumittauksissa. Menetelmä perustuu jatkuvan spektrin mittaamiseen 800–1 100 nm aallonpituusalueella. Tällä aallonpituusalueella materiaalien absorptiokertoimet ovat alhaisia, jolloin mittaussäde voi tunkeutua paksumman näytekerroksen läpi, mikä mahdollistaa mittauksen paremman edustavuuden. Kaupallisilla mittalaitteilla mm. mitataan viljan jyviä tyypillisesti 2 cm mittauskennon läpi. Menetelmän muita etuja on jatkuvan spektrin mittauksen tuoma kattava laatuinformaatio sekä kohtuuhintainen laitetekniikka. SWNIR-alueen spektrissä absorptioaikat ovat voimakkaasti päällekkäisiä, jolloin kalibrointi perustuu monimuuttujamallinnuksen menetelmiin. SWNIR-mittauksella saavutettava suorituskyky määräytyykin pitkälle kalibrointimallin hyvyden perusteella. Luotettavan ja suorituskykyisen kalibrointimallin kehittäminen vaatii yleensä kalibrointikokeen huolellista suunnittelua sekä riittävän suurta kalibrointipisteiden lukumäärää, johon sisältyy mittauskohteen kaikki mahdollinen laatuvariaatio. Viime aikoina menetelmää on sovellettu mm. Case IH:n valmistamaan leikkuupuimuriin integroidussa viljan laatuanalysointiossa sekä selluprosessiin tulevan hakkeen online-laatumittauksessa

Projektissa mukana olleet yritykset ja organisaatiot: Tekes, Merinova Oy, Fortum Lämpö Oy, Exens Development Oy, Metso Field Systems Oy, Svenska yrkeshögskolan, VTT Elektroniikka, Kauhavan Kaukolämpö Oy ja Wärtsilä Finland Oy.

4. Projektin tulokset

Tutkimuksessa saatiin alustavia tuloksia SWNIR-menetelmän soveltuvuudesta polttohakeseoksen kosteusmittauksiin. Aikaisemman SWNIR-mittalaitteen pohjalta toteutettiin koemittalaite, jolla mitattiin hakeseosnäytteiden SWNIR-spektrejä ensi vaiheessa Kajaanissa offline-mittauksina. Mittalaite asennettiin Kauhavan kaukolämpö Oy:n lämpölaitokselle kattilaan menevän polttoai-

nesyötön in line -mittaukseen, jossa kerättiin ensin kalibrointiaineistoa ja lopuksi suoritettiin alustava koe liikkuvan materiaalin mittauksessa.

Koemittalaite toimi kokeissa pääosin odotusten mukaan. Kalibrointikokeissa SWNIR-menetelmän virhe referenssimenetelmään verrattuna jäi kuitenkin keskihajontalukuna n. 4 kosteus-%:iin. On huomattava, että keskihajontaluku sisältää SWNIR-menetelmän virheen lisäksi myös näytteen epähomogeenisuudesta johtuvan edustavuusvirheen, mikä tarkoittaa sitä, että SWNIR-mittaus ja referenssimäärittäminen on tehty eri kohdasta materiaalia. Kirjallisuudesta tunnetaan, että vastaavalla SWNIR-menetelmällä on päästy selluhakkeen kosteusmittauksessa vastaavasti keskihajontalukuna 0,8 kosteus-% tarkkuuteen (kosteusalue 19–56 %) ja kuoren kosteusmittauksessa 1,9 kosteus-% tarkkuuteen (kosteusalue 42–76 %). Sellusovelluksessa saadut tulokset viittaavat siihen, että SWNIR-kalibrointia edelleen kehittämällä, mm. edellisen kappaleen mukaisesti, tuloksia todennäköisesti voidaan parantaa myös polttohakeseoksen mittauksessa.

Suorituskyvyn parantamiseksi jatkossa nähdään mm. seuraavia mahdollisuuksia:

- Kokeiden perusteella online-mittauksessa vaaditaan riittävää keskiarvoistutusai-
kaa, jopa noin 1 tuntia, jolla on mahdollista parantaa mittauksen edustavuutta.
- Näytteen luontaisesta hajonnasta johtuen kalibrointimittaukset olisi tehtävä
linjalla mittaamalla liikkuvaa näytevirtaa ja keräämällä samanaikaisesti näy-
tettä. Näin voidaan hyödyntää SWNIR-mittauksessa riittävän pitkää keskiar-
voistusaikaa. Kerätystä suuremmasta näytemäärästä voidaan ottaa huolelli-
sen sekoituksen ja näytteen jakamisen jälkeen varsinaiset referenssinäytteet.
Tällä menettelyllä olisi mahdollista huomattavasti parantaa referenssinäyt-
teiden ja SWNIR-tulosten vastaavuutta kalibrointitilanteessa.
- Kosteuden kalibrointimallia on mahdollista parantaa huomioimalla katta-
vammin polttohakkeen mittaustilanteessa vaihtelevat tekijät, kuten näytteen
lämpötila ja polttoaineen laatu vaihtelu vuodenaikojen mukaan.
- Energiasisällön kalibrointimalli voidaan kehittää ja suorituskykyä arvioida
järjestämällä kalibrointikoe, jossa enemmän vaihtelua.

5. Tuloksien hyödyntäminen ja miten tulokset palvelevat ohjelman tavoitteiden toteutusta

Projektissa todettiin erityisesti kalibrointiosuuden vaativan lisätutkimusta. Projektin tulosten hyödyntäminen jatkuu NIRWOOD-hankkeessa.

6. Projektin jatkotutkimustarpeet

Jatkotoimenpiteenä ehdotetaan tutkimuksen jatkovaiheen järjestämistä, johon olisi mahdollista sisällyttää mm. seuraavia osa-alueita:

- Mittapään parantaminen etäisyysvaihtelun vaikutuksen minimoimiseksi, mahdollinen sovittaminen kuljettimen päältä tapahtuvaan mittaukseen.
- Laajemman kalibrointiaineiston kerääminen in-line-mittauksena liikkuvasta näytevirrasta huomioiden riittävän kattavasti näytelämpötilan ja vuodenaikojen vaikutus kalibrointimalliin.
- Pitkän 10 min – 1 tunti keskiarvoistuksen käyttöönotto SWNIR-mittauksessa mittauksen edustavuuden parantamiseksi.
- Energiasisällön kalibrointimallin jatkokehitys.
- Kalibrointimallien testaus toisessa lämpölaitoskohteessa, kalibroinnin muokkaaminen uuteen kohteeseen (saadaan kokemusta mittausmenetelmän monistamisesta uusiin kohteisiin).
- SWNIR-menetelmän arviointi ja testaaminen muissa biopolttoaineiden mittaustarpeissa, mm. pellettivalmistuksen mittaustarpeet, turvepolttoaineen mittaustarpeet.

Projektissa syntyneet julkaisut ja raportit

Projektissa on syntynyt loppuraportti ja kokoelma-cd mittaustuloksista ja raporteista, jotka on jaettu projektin osallistujille.

Irtometsätähteen ja risutukkien vastaanoton ja käsittelyjärjestelmän kehittäminen – PUUY32

Antti Nurmi
BMH Wood Technology Oy
PL 32, 26100 Rauma
Puh. (02) 8315 236, faksi (02) 8221 327
E-mail: antti.nurmi@bmh.fi

Abstract

Project title in English: Development of a receiving and handling system for loose forest residues and forest residue bundles

The use of wood energy for energy production has increased sharply, especially in Finland, largely due to the use of loose forest residues, forest residue bundles and stumps. The receiving and handling systems of older power plants were designed mainly for peat and wood chips, but not these residue fuels. Hence, the project initiative came from the market.

The aim of the project was to study the reception of loose forest residues and forest residue bundles at power plants and to develop receiving equipment, crushing, sampling, identification and removal of impurities, and handling systems, as well as to improve the cost effectiveness of the power plants.

A number of large-scale receiving and crushing systems of forest residues were commissioned in Finland during the project. A company is able to offer a system for receiving, crushing and handling, i.a. forest residue bundles, loose residues and stumps, as well as different sampling systems. Hence, the reception and use of diversified wood fuels can be considered at power plants. Development work will be continued in 2004.

1. Tausta

Energiantuotannossa puuenergian käyttö on lisääntynyt ja lisääntymässä voimakkaasti, erityisesti Suomessa. Suuri osa lisäyksestä on tullut irtometsätähteistä, risutukeista ja kannoista. Voimalaitoksien vastaanotto- ja käsittelyjärjestelmät on aikaisemmin suunniteltu pääosin mm. turpeen ja metsähakkeen käyttöön eikä edellä mainittujen, eri muodoissa olevien puupolttoaineiden vastaanottoon. Peruste projektin käynnistämiseen tuli siis pääosin alan markkinoilta.

2. Tavoite

Projektin tavoitteena on tutkia irtometsätähteen ja risutukkien vastaanottoa voimalaitoksilla sekä kehittää vastaanottolaitteistoa, murskausta, näytteenottoa, epäpuhtauksien tunnistamista ja poistoa sekä käsittelyjärjestelmää. Lisäksi projektin tavoitteena on parantaa kustannustehokkuutta voimalaitoksilla.

3. Toteutus ja tuloksia

Ensimmäisessä vaiheessa toteutettiin tutkimustyötä Oy Alholmens Kraft Ab:n murskausasemalla Pietarsaassa yhteistyössä Metsäteho Oy:n kanssa. Kokeissa käytettiin seuraavia materiaaleja: paalattua ja irtonaista hakkuutähdettä, paalattua ja irtonaista nuoren metsän kunnostuksesta korjattua karsimatonta puuta, lahoa kuitupuuta, kuormalavoja, tasauspätkiä sahalta ja kantopuuta. Murskauksesta tehtiin kelloaikatutkimus, käyttövirran kulutus mitattiin ja murskeen palakokojakaumat määriteltiin koeseulonnalla. Murskaimella pystyttiin murskaamaan kaikkia kokeiltuja materiaaleja. Oksapaalien murskauksessa saavutettiin n. 150–165 im³/h taso. Käyttövirran kulutus vaihteli murskattavan materiaalin tiiviyyden ja kovuuden mukaan. Keskimääräinen tehontarve oli suurin kokopuupaaleilla, lähes 440 kW. Murskeen palakokojakaumat luokittuivat kahteen ryhmään sen mukaan, sisälsikö materiaali neulasia vai ei.

BMH Wood Technology Oy on kehittänyt uudentyyppisen vastaanotto- ja murskausjärjestelmän erityyppisille biopolttoaineille. Vastaanottojärjestelmässä on askelsyötin, jonka leveys on esim. 4,2 m ja pituus esim. 20 m. Askelsyötin syöttää 2-roottorista ECO-Crusheria, joka on hitaasti pyörivä, repimistoimintoon

perustuva, järeä murskain. Kyseinen vastaanottojärjestelmä on käytössä Jämsänkosken Voima Oy:ssä. Laitoksella otetaan vastaan mm. risutukkeja, irtometsätähteitä ja kantoja. Voimalaitoksessa suoritettiin testiajoja eri polttoaineilla kesällä 2003. Suoritettujen mittausten perusteella ECO-Crusherin kapasiteetiksi risutukeilla saatiin n. 200–230 im³/h. Mittausten perusteella murskaimen kapasiteetiksi irtometsätähteellä ja kannoilla saatiin n. 190–210 im³/h. Lisäksi Jämsänkosken Voima Oy:ssä ajetaan murskaimen läpi sahoilta tuotua pitkää kuorta ja tasauspätkiä. Risutukkien pitkät sidontanarut, pitkät risut ja kepit sekä pitkät kuorenkappaleet saattavat aiheuttaa tukoksia ja muita ongelmia jatkokäsittelyprosessissa. BMH Wood Technology Oy on kehittänyt eri ratkaisuvaihtoehtoja, ja mainitut ongelmat on pääosin saatu ratkaistua. Jatkokehitystyötä on tehtävä erityisesti terien kulumiskestävyyden parantamiseksi. Projektissa on myös kehitetty uudentyyppien, haketun puupolttoaineen vastaanottoon tarkoitettu laitteisto, jonka tarkoituksena on varmistaa vastaanotettavan materiaalin laatu mm. palakoon suhteen. Laitteistoa on testattu Ruotsissa laitoksella ja toteutettu esiin tulleet muutostarpeet. Projektin eräänä osa-alueena on ollut automaattisen näytteenottojärjestelmän kehittäminen. Kehitetty näytteenottolaitteisto koostuu mäntätoimisesta näytteenottimesta, näytemurskaimesta sekä monipaikkaisesta kääntöpöydästä näytteille. Jokaisesta laitokselle tuotavasta kuormasta otetaan näyte, näyte hienonnetaan näytemurskaimen avulla ja ohjataan automatiikan avulla kuljettajakohlaiseen näyteastiaan. Edellä kuvattu laitteisto on asennettu eräälle voimalaitokselle Suomeen.

4. Tuloksien hyödyntäminen

Projektin aikana on suuren kokoluokan metsätähteen vastaanotto- ja murskausjärjestelmiä Suomessa lähtenyt käyntiin muutamia. Projektin tähän mennessä saavutettujen tulosten perusteella BMH Wood Technology Oy voi tarjota asiakkailleen järjestelmää, joka pystyy vastaanottamaan, murskaamaan ja käsittelemään monipuolisia puupolttoaineita mm. risutukkeja, irtorisuja ja kantoja kohtuullisesti. Näytteenottojärjestelmän kehityksen myötä BMH voi tarjota eri sovelluksia näytteenottojärjestelmiksi. Puuenergian teknologiaohjelman tavoitteena on ollut puuperäisten polttoaineiden voimakas lisäkäyttö energiantuotannossa. Projektin tähänastisilla tuloksilla on saavutettu mm. se, että useat laitokset voivat harkita monipuolisten puupolttoaineiden, esim. risutukkien, irtorisujen ja kantojen, vastaanottamista laitoksilleen.

5. Jatkotutkimustarpeet

Voimalaitoksille tulevan puuperäisen sekä muun biopolttoaineen repertuaari on kasvanut, ja materiaali tulee laitoksille erilaisissa muodoissa. Tämä on lisännyt tarvetta kehittää edelleen vastaanotto-, murskaus- ja käsittelyjärjestelmiä. Lisäksi Puuenergia-teknologiaohjelman JR-selvityksen ”Puupolttoaineiden vastaanoton, käsittelyn ja syöttöjärjestelmien kapeikot ja niiden ratkaisuja” perusteella alueen jatkokehitystyö on tarpeen. BMH Wood Technology Oy jatkaa kehitystyötä projektissa vuoden 2004 alkupuoliskolla.

Epähomogeenisen biopolttoaineen älykäs syöttö – EBÄS – PUUY40

Jari Erkkilä
Tuotekehitys Oy Tamlink
Hermiankatu 6, 33720 Tampere
Puh. (03) 316 5125, faksi (03) 316 5123
E-mail: jari.erkkila@tamlink.fi

Tero Joronen
Metso Automation Oy
PL 237, 33101 Tampere
Puh. 020 483 8807, faksi 020 483 8405
E-mail: tero.joronen@metso.com

Seppo Lappalainen
Kouvo Automation Oy
Puhjontie 17, 45720 Kuusankoski
Puh. (05) 363 1655, faksi (05) 363 1663
E-mail: seppo.lappalainen@kouvo.fi

Jani Lehto
Kvaerner Power Oy
PL 109, 33101 Tampere
Puh. 020 1412 432, faksi 020 1412 210
E-mail: jani.lehto@akerkvaerner.com

Marko Nylund
Oy Alholmens Kraft Ab
PL 250, 68601 Jakobstad
Puh. 020 416 8503, faksi 020 416 8550
E-mail: marko.nylund@alholmenskraft.com

Esko Saarela
Raumaster Oy
Nortamonkatu 32, 26100 Rauma
Puh. (02) 837 74231, faksi (02) 822 3801

Abstract

Project title in English: Intelligent Fuel Feeding and Control System for Heterogeneous Fuels

Steady and reliable fuel feeding is the key to the process optimisation. Since biomass typically has low energy density, boilers designed to operate with any fuel mixture between 100% coal and 100% biomass, might have quite remarkable changes in fuel volume flows. Additionally, heating value, moisture and bulk density of the biomass may vary in very short term. Therefore, an intelligent fuel feeding and control system is needed.

Fuel feeding equipment for biomass has a history for over 20 years of research and development, but not until recently the operation with wide range of fuels has been concerned thoroughly. Fuels need pre-handling, typically screening and crushing and metal separation, and it is always a cost-optimisation issue to determine the level of fuel pre-handling. With certain mechanical improvements and with a new sophisticated control system the operation of the fuel feeding line can be further improved to meet the challenge of burning both coal and biomass in the same boiler with any combination.

In the project the new control method combining the standard measurement of mass flows and the volumetric outputs of the feeding devices in an innovative way was developed and demonstrated in Alholmens Kraft Circulating Fluidized Bed boiler (550 MW_{th}) in Finland. As a result, the process swings caused by the changes in fuel quality were minimised. The standard deviations of the main process parameters like steam flow, steam pressure and oxygen level were decreased remarkably. As the fuel feeding is optimised, it is possible to use set points closer to the nominal ones, and thus increase the use of biomass in the power plant.

1. Projektin tausta

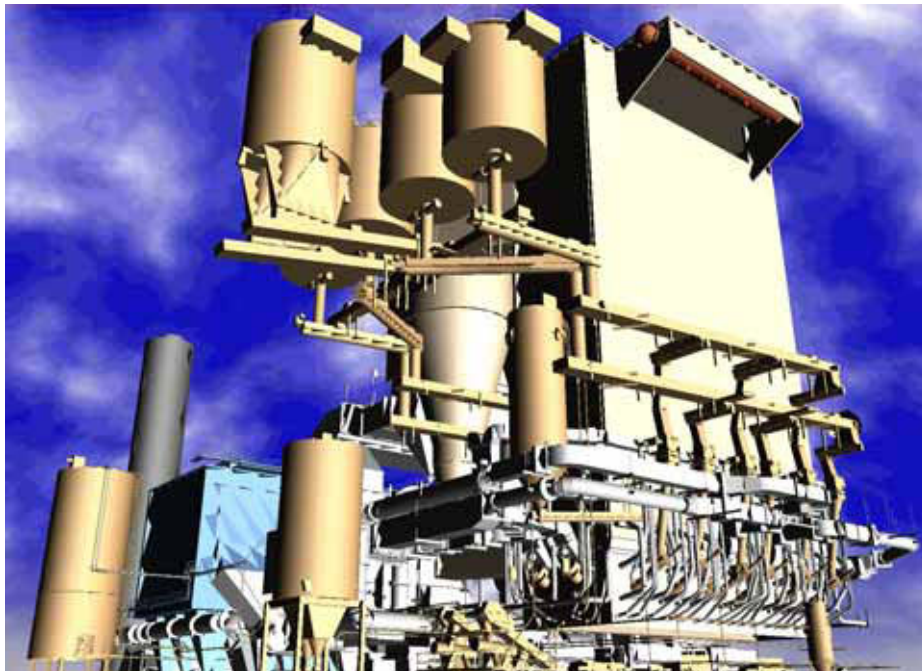
Hankkeen taustan muodostaa laaja suomalainen kokemus biomassojen käytöstä polttoaineena. Biomassaa hyödynnetään suuremmassa mittakaavassa ja myös moninaisemmin kuin muualla maailmassa. Yhtenä ilmentymänä voidaan pitää

Alholmens Kraftin voimalaitosta, jossa käsitellään satojen kuutiometrien biomassa-virtoja tunnissa. Biomassa ei kuitenkaan ole homogeeninen aine, vaan seos kuorta, sellutehtaan jätepuuta, risutukkimurskaa, turvetta, jne. Koska syötettävän seoksen koostumus vaihtelee, myös sen käsittelyominaisuudet vaihtelevat jatkuvasti.

Tällaiset ominaisuuksien jatkuvat, mutta kuitenkin epäsäännölliset vaihtelut, aiheuttavat huojuntaa myös palamisprosessissa ja höyryntuotannossa. Pahimmillaan huojunta voi johtaa joko höyryn tuotannon ja paineen laskuun, tai toisaalta sen äkillisen nousuun. Kumpikin tapaus on riski laitoksen käytettävyydelle, ja siksi polttoaineen syötön tasaaminen on merkittävä kehityskohde biomassaan perustuvan voimantuotannon laajetessa.

Suomalaiset laitevalmistajat ovat yhteistyössä tutkineet mahdollisuuksia, joilla huojuntaa voidaan mahdollisesti minimoida, mutta ei ole olemassa yhtä yksittäistä toimenpidettä, jolla ongelma voidaan poistaa, vaan tarvitaan parempia mittausmenetelmiä, edelleen kehitettyjä kuljetusjärjestelmiä ja älykkäämpiä säätöjärjestelmiä.

Tässä yritysryhmähankkeessa kehitettiin ja demonstroitiin uudenlainen älykäs polttoaineen syöttölinjan ohjaussovellus, joka toteutettiin Alholmens Kraftin voimalaitoksen polttoaineensyöttöjärjestelmän linjoille 2 ja 3. Yhteistyössä olivat mukana Kvaerner Power, Metso Automation, Kouvo Automation, Raumaster ja Alholmens Kraft.



Kuva 1. Alholmens Kraftin voimalaitoksen "luurankokuva", jossa polttoainetta jakavat kuljettimet ja ilmanavat näkyvät kattilalaitoksen ympärillä. Kattilan leveys on lähes 25 metriä.

2. Projektin tavoite

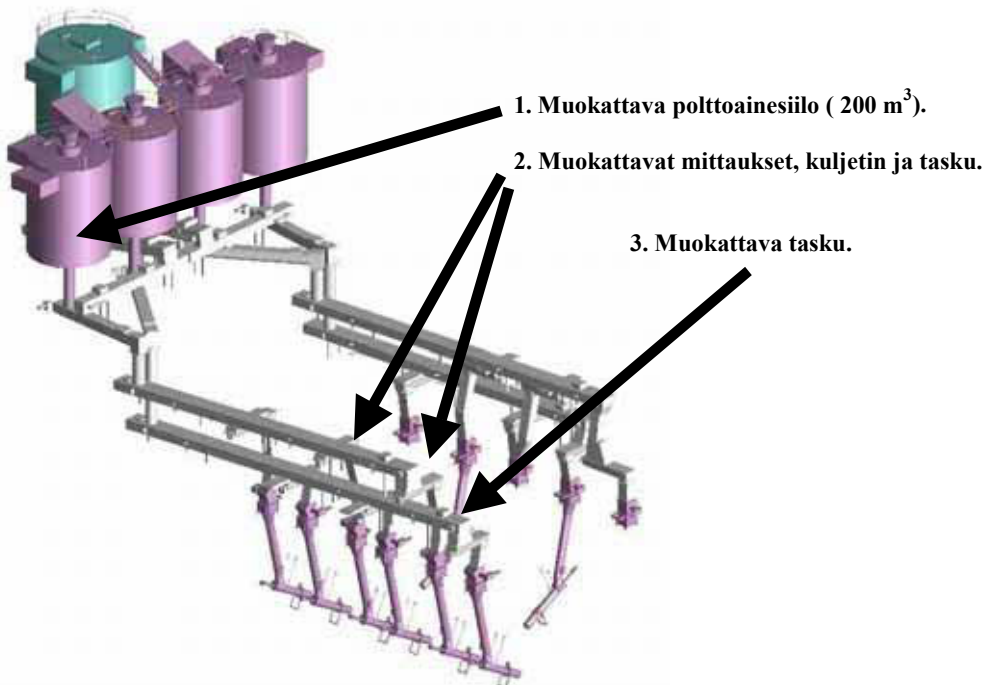
Projektille asetettiin viisi tavoitetta:

1. Tutkia epähomogeenisten biomassavirtojen käyttäytymistä polttoainetaskuissa
2. Testata uusia syöttösiilo- ja purkainratkaisuja
3. Testata uusia mittausmenetelmiä, joilla saadaan luotettavampi kuva polttoainevirtojen jakaumasta eri syöttöpisteiden välillä
4. Testata uudenlaista säätöstrategiaa, jolla voidaan vähentää syötön huojuntaa ja sen aiheuttamia haittoja kattilan toiminnalle
5. Todentaa uuden syöttömenetelmän hyöty kattilalle mittaamalla sen toiminnan tasaisuutta ja säädettävyyttä.

Tavoitteet toteutuivat kaikilta osin erinomaisesti.

3. Projektin toteutus

Projekti toteutettiin aikavälillä 1.4.–31.12.2003. Toteutus jakautui kevään suunnitteluvaiheeseen, referenssimittausten tekoon alkukesän koeajojaksolla, muutostyön toteuttamiseen kesäseisokin aikana, uuden konseptin mukaiseen testausajoon elokuussa sekä tulosten analysointi- ja raportointijaksoon syksyllä 2003.



Kuva 2. Kattilalaitoksen syöttölinjan rakennekuva ja muutettavat osiot.

Projektin koordinaattorina toimi Tuotekehitys Oy Tamlink yhteistyössä Tampereen Teknoliakeskuksessa toimivan Sentre – Kestävien energiaratkaisujen keskuksen kanssa, jonka tehtävänä on kehittää yritysten, tutkimuksen ja koulutuksen yhteistyöhankkeita kestävän kehityksen mukaisten energiaratkaisujen edistämiseksi.

Projektin sisällöllisten osa-alueiden vastuorganisaatiot olivat:

1) Siilopurkaimen muutokset	Raumaster, Alholmens Kraft
2) Polttoainetaskujen muutokset	Raumaster
3) Uusien mittalaitteiden toimitus ja asennus	Kouvo Automation
4) Kytkentä tiedonkeräykseen ja säätöön	Metso Automation, Alholmens Kraft
5) Datan keruu	Metso Automation
6) Säätöjärjestelmien ohjelmointi	Metso Automation
7) Kattilan toiminnan analyysi/tulosten käsittely	Kvaerner Power.

Projektissa toteutetuissa koeajoissa olivat mukana kaikki osapuolet.

4. Projektin tulokset

Syöttölinjoille 2 ja 3 tehtyjen mekaanisten ja säätömuutosten vaikutusta prosessin toimintaan tutkittiin tarkastelemalla prosessiparametrien keskiarvoja, trendejä sekä keskihajontien muutoksia ennen ja jälkeen muutosten.

Kaikki tarkastelutavat antavat samansuuntaisia tuloksia. Tehdyt muutokset ovat parantaneet prosessin toimintaa, vaikka lähtökohtaisestikin prosessin heilunta on ollut pientä ja parannuksen kohteena on ollut vain kaksi neljästä polttoaineen syöttölinjoista eli linjat 2 ja 3. Prosessin toimintaan aikaansaadut parannukset kumuloituvat loppukäyttäjää eniten kiinnostaviin tuorehöyryn lämpötilaan ja paineeseen sekä jäännöshapen määrään, joiden keskihajonnat pienenevät muutosten seurauksena oleellisesti.

Yhteenvedona voidaan todeta seuraavaa:

1. Jo tehdyt muutokset ovat parantaneet polttoaineen syöttöä.
2. Linjojen 1 ja 4 modifioinnin pitäisi edelleen parantaa polttoaineen syöttöä eli vähentää kaikkien prosessiparametrien heiluntaa.
3. Kun polttoaineen syöttö optimoidaan, voidaan entistä heterogeenisempia, matalan energiatiheuden omaavia polttoaineita käyttää enemmän.
4. Polttoaineen syötön optimoinnin seurauksena savukaasupuolen rajoitukset vähenevät, jolloin voidaan ajaa lähempänä kattilan maksimitehoa.

Kehittyneen säätöratkaisun voidaan todeta parantaneen kattilan toimintaa erityisesti kuoripitoisella polttoaineella. Polttoainetaskujen pinnat pysyvät paremmin hallinnassa, ja tilanteita, joissa kaikki polttoainetaskut olisivat tyhjä, tulee harvemmin. Tämä näkyy erityisesti CO-päästön pienenemisenä kuoriajolla. Myös kattilan käytettävyys on parantunut kuorella. Aikaisemmin kuoripolttoaineella ajoittain esiintynyttä epävakautta ei muutosten jälkeen ole esiintynyt.

5. Tuloksien hyödyntäminen

Projektin tuloksia tullaan hyödyntämään hankkeen osapuolten tuotekehityksessä ja tuotannossa. Uutta menetelmää voidaan soveltaa uusissa kehitteillä olevissa laitoksissa sekä jo olemassa olevissa laitoksissa, joissa menetelmän avulla voidaan lisätä biopolttoaineiden käyttöä.

6. Jatkotutkimustarpeet

Projekti täytti sille asetetut tavoitteet. Uusi menetelmä onnistuttiin kehittämään ja demonstroimaan riittävän laajasti, jotta menetelmää voidaan soveltaa osapuolten tuotekehityshankkeissa.

Älykästä säätöä varten kehitettyjen uudenlaisten säätöalgoritmien analysointi koeajojen aikana kerätyn datan perusteella säätötekniikan näkökulmasta tarjoaisi kiinnostavaa jatkotutkimusaiheen puuenergia-alan ulkopuolelta.

Projektissa syntyneet julkaisut ja raportit

PowerGen Europe 2004 -konferenssiin on hyväksytty projektin tuloksista esitelmä, jota työstävät Tero Joronen/Metso Automation (esitelmän yhdyshenkilö), Marko Nylund/Alholmens Kraft sekä Jani Lehto/Kvaerner Power. Konferenssiaineisto julkaistaan toukokuussa 2004.

Seurannaisvaikutukset ja metsätalous

Puupolttoaineiden radioaktiivisuuden vaikutus tuhkan käyttöön – PUUT23

Virve Vetikko, Tuomas Valmari, Marko Oksanen, Aino Rantavaara,
Seppo Klemola & Riitta Hänninen
Säteilyturvakeskus STUK
PL 14, 00881 Helsinki
Puh. (09) 759 881, faksi (09) 7598 8498
E-mail: etunimi.sukunimi@stuk.fi

Abstract

Project title in English: Radioactivity of wood fuels and ash, and implications for the use of ashes

Project aimed at improving assessment of wood ash radioactivity and facilitating safe handling and use of ash. The origin and composition of wood fuel as sources of variation of radioactive caesium (^{137}Cs) content in ash were examined. The resulting information can be used by combustion plants which are responsible for safe handling of ash at the plant and deliver ash to customers for further utilisation. The project has been conducted in co-operation with Finnish energy and forest industries.

All radionuclides that contribute to the human radiation exposure through production of bioenergy end up in ash during combustion. Radiation exposure is mainly due to ^{137}Cs from the Chernobyl fallout in 1986. ^{137}Cs is transferred from soil to trees via root uptake. Typical ^{137}Cs activity found in fly ashes was 1000–5000 Bq/kg. Co-combustion of wood and other fuels generally produces ashes of lower activity compared to wood ash. Naturally occurring radionuclides, such as ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th also contribute to the total radioactivity in wood ash. The estimated radiation doses for workers involved in ash handling were clearly lower than the action level 1 mSv/a. Internal radiation dose (from inhaled ash) is minor as compared to external dose from ash located nearby (outside human body).

There are safety criteria in Finland for the radiation exposure from materials used for land filling, and for road and street construction etc. The handling or use of ash may have to be modified, if the chosen key radionuclides in ash cause doses approaching action levels for workers or the public. Materials with higher activity can be used, when shown that the action level for the public, 0.1 mSv/a, is not exceeded. If necessary, the dose can be effectively reduced by a soil layer on top of the ash. A 10 cm layer of soil reduces the external dose from a large pile of ash to one third.

Ash fertilisation has a clear mitigating effect on the transfer of ^{137}Cs from soil to trees and other vegetation. This is because potassium in ash reduces the uptake of ^{137}Cs independent of the origin of caesium. Therefore the reduction is significant also for the ^{137}Cs accumulated earlier in soil, and the net effect of ash fertilisation is mostly reduction of human radiation doses through the use of forest products or staying in forest, when both internal and external exposure is considered.

1. Projektin tausta

1.1 Puupolttoaineiden ja puun tuhkan radioaktiivisuus

Metsähakkeen ja muiden puupolttoaineiden lisääntyvä käyttö energiantuotannossa voi lisätä tuotettavan tuhkan radioaktiivisuutta, jolloin säteilyaltistusta on arvioitava ja tarvittaessa rajoitettava tuhkan käsittelyssä, käytössä ja sijoituksessa. Puuntuhkan sisältämistä radionuklideista säteilyaltistuksen kannalta merkittävin on cesium 137 (^{137}Cs , puoliintumisaika 30 vuotta), joka on lähes kokonaan peräisin vuonna 1986 tapahtuneesta Tshernobylin ydinvoimalaitosonnettomuudesta. Arvela ym. (1990) kartoittivat Suomeen tulleen laskeuman automittauksilla (19 000 ajokilometriä) vuosina 1986–1987. Maahan pidättynyt ^{137}Cs -laskeuma vaihteli silloin koko maassa välillä 0–77 kBq/m².

Cesiumia siirtyy maaperästä puuhun vähitellen ravinteiden mukana. Ravinnekierroksen mukana ^{137}Cs :ää kertyy eniten puiden kasvaviin osiin, eli neulasiin, latvuksen yläosaan, nuoriin oksiin ja vuosikasvaimiin. ^{137}Cs pysyy metsien ravinnekierrossa kauan ja vähenee jatkuvasti lähinnä radioaktiivisen hajoamisen kaut-

ta. Jos metsiköiden kasvuolosuhteet ovat muuten samanlaiset, puuston ^{137}Cs -aktiivisuus on verrannollinen paikalliseen ^{137}Cs -laskeuman aktiivisuuteen.

Kaikki säteilyaltistuksen kannalta merkittävät puupolttoaineissa olevat radionuklidit päätyvät poltossa tuhkaan. Palamisolosuhteet sekä muiden tuhkaa muodostavien aineiden pitoisuudet vaikuttavat siihen, miten ^{137}Cs jakaantuu lentotuhkan ja pohja- tai arinatuhkan kesken, ja kuinka liukoisessa muodossa se on tuhkassa. Tuhkan radio-isotooppien liukoisuus voi periaatteessa vaikuttaa siihen, missä suhteessa ja kuinka nopeasti niitä kertyy metsäkasvillisuuteen.

1.2 Säteilyturvallisuusohjeet tuhkan käsittelyssä, käytössä ja sijoituksessa

Elinympäristössä olevista radioaktiivisista aineista aiheutuvaa säteilyaltistusta rajoitetaan säteilyn aiheuttamien haittojen pitämiseksi niin vähäisinä kuin käytännön toimin on järkevää. Tuhkan käsittelyä, käyttöä ja sijoitusta koskee Säteilyturvakeskuksen ohje ST 12.2 Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus (ST 12.2, 2003). Sen mukaan tuhkan läjityksessä sekä katujen ja teiden rakentamiseen, maantäyttöön tai maisemointiin käytettävien materiaalien gammasäteilystä väestölle aiheutuvan säteilyaltistuksen toimenpidearvo on 0,1 mSv vuodessa. Tuhkan käsittelystä työntekijöille aiheutuvan altistuksen toimenpidearvo on 1,0 mSv vuodessa.

Toiminnan harjoittaja on velvollinen huolehtimaan siitä, että tuhkan käsittelyn, sijoittamisen ja käytön turvallisuustavoitteet saavutetaan eli säteilyannosten toimenpidearvoja noudatetaan. Tuhkan käyttäjä vastaa siitä, että käytettävä materiaali ei ylitä säteilyaltistuksen toimenpidearvoa (0,1 mSv/v) kyseisellä käyttötavalla.

Säteilyannoksen arviointi riippuu monista tekijöistä, kuten altistumisolosuhteista ja altistusajasta. Tämän vuoksi on kehitetty aktiivisuusindeksit erilaisille tuhkan käyttökohteille. Niissä turvallisuusarviointi perustuu materiaalin radioaktiivisuuteen eikä erillisiä annoslaskuja tarvita.

Talonrakennustuotantoon käytettäville valmiille rakennusmateriaaleille aktiivisuusindeksi on

$$I_1 = \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_K}{3000}$$

Lisäksi betonin seosaineena käytettävän tuhkan ^{137}Cs saa aiheuttaa betoniin korkeintaan pitoisuuden $120\,000\text{ Bq/m}^3$.

Katujen, teiden ja vastaavien kohteiden rakentamiseen käytettäville materiaaleille aktiivisuusindeksi on

$$I_2 = \frac{C_{Th}}{500} + \frac{C_{Ra}}{700} + \frac{C_K}{8000} + \frac{C_{Cs}}{2000}$$

Maantäyttöön ja maisemarakentamiseen käytettäville materiaaleille aktiivisuusindeksi on

$$I_3 = \frac{C_{Th}}{1500} + \frac{C_{Ra}}{2000} + \frac{C_K}{20000} + \frac{C_{Cs}}{5000}$$

Tuhkan käsittelyssä aktiivisuusindeksi on

$$I_4 = \frac{C_{Th}}{3000} + \frac{C_{Ra}}{4000} + \frac{C_K}{50000} + \frac{C_{Cs}}{10000}$$

missä C_{Th} , C_{Ra} , C_K ja C_{Cs} tarkoittavat materiaalista mitattuja torium-232:n (^{232}Th), radium-226:n (^{226}Ra), kalium-40:n (^{40}K) ja cesium-137:n (^{137}Cs) aktiivisuuspitoisuuksia yksikössä Bq/kg.

Jos aktiivisuusindeksin arvo on 1 tai pienempi, tuhkan käsittelylle ja käytölle ei ole radioaktiivisuudesta johtuvia rajoituksia. Jos indeksin arvo on suurempi kuin 1, tulee toimenpidearvon (0,1 tai 1 mSv/v) toteutumisesta tehdä erillinen selvitys. Käytettäessä tuhkaa kadun- tai tienrakennukseen, maantäyttöön tai maisemarakentamiseen, väestön säteilyaltistuksen toimenpidearvo 0,1 mSv/v voidaan alittaa kyseisissä kohteissa peittämällä tuhka riittävän paksulla maa- tai sorakeroksella, joka vaimentaa säteilyä. Jos tuhkan käsittelystä työntekijälle aiheutuva säteilyannos on suurempi kuin 1 mSv/v, toiminnan harjoittajan tulee toteuttaa olosuhteisiin katsoen perustellut toimenpiteet säteilyaltistuksen pienentämiseksi (ST 12.1, 2000). Ulkoisesta säteilystä aiheutuvaa altistusta voidaan tehokkaasti rajoittaa järjestämällä työt siten, että radioaktiivisia aineita sisältävän materiaalin

välittömässä läheisyydessä työskennellään mahdollisimman lyhyitä aikoja (ST 12.1, 2000).

2. Tavoitteet

Voimalaitoksessa muodostuvan tuhkan aktiivisuutta ei yleensä kovin tarkasti tunneta. Tämä voi tarpeettomasti hankaloittaa tuhkan hyötykäyttöä, jos riittävän alhainen aktiivisuus joudutaan jatkuvasti osoittamaan näytemittauksin. Aktiivisuus myös vaihtelee ajan myötä polttoaineseoksen koostumuksen ja puupolttoainesten hankinta-alueen mukaan. Hankkeen tavoitteena oli kehittää menettelyä, jolla puupolttoaineita käyttävät laitokset voivat arvioida syntyvän tuhkan radioaktiivisuutta ja ottaa tarvittaessa huomioon sen aiheuttaman säteilyaltistuksen tuhkan käsittelyn, varastoinnin ja hyötykäytön yhteydessä. Tuhkan aktiivisuuden arviointi perustuu tietoihin laitoksen käyttämän polttoaineseoksen koostumuksesta ja puupolttoaineen alueellisesta alkuperästä. Tätä varten selvitettiin näytemittauksilla polttoaineen hankintakunnan Tshernobyl-laskeuman, polttoaineseoksen koostumuksen ja polttotekniikan vaikutusta tuhkan aktiivisuuteen.

Tavoitteena oli myös mitata ja arvioida työntekijöiden säteilyaltistusta tuhkan käsittelyn ja hyötykäytön yhteydessä sekä arvioida metsien tuhkalannoituksen aiheuttamia muutoksia väestön säteilyannoksiin metsien käytöstä.

3. Toteutus

Hankkeeseen osallistuivat Energia-alan keskusliitto ry (Finergy) ja Metsäteollisuus ry jäsenyrityksineen. Tuhka- ja polttoainenäytteiden hankinta toteutettiin yhteistyössä hankkeeseen osallistuneiden 16 laitoksen ja polttoaineen toimittajan kanssa.

Hankkeeseen osallistuneet lämpö- ja voimalaitokset sekä sahat käyttivät tutkimusjakson aikana Tshernobyl-laskeuman alueelta tulevia puupolttoaineita, osa laitoksista käytti samanaikaisesti myös turvetta. Laitokset toimittivat näytteitä polttoaineista sekä lento- ja pohja- tai arinatuhkista laitoskohtaisten näyteenotossuunnitelmien mukaisesti. Lisäksi kaksi muuta laitosta toimitti tuhkanäytteitä, joilla tutkittiin rakeistuksen vaikutusta radionuklidien liukoisuuteen tuhkassa.

Sahauksen sivutuotteista hankittiin näytteitä kahdelta sahalta, joiden puunhankinta-alueet sijaitsevat päälaskeuma-alueella. Metsähakenäytteitä hankittiin laskeuma-alueelta viideltä polttoaineen toimittajalta tai haketta käyttävältä laitokselta. Hakenäytteiden alkuperä selvitettiin kunnan tarkkuudella, jotta hakkeen aktiivisuutta voitiin verrata kuntakohtaisiin ^{137}Cs -laskeumatietoihin. Tieto hake-tyypistä pyydettiin näytteenottajilta näytteiden mukana. Pääosa näytteistä oli kuusivaltaisten päätehakkuualojen hakkuutähdehaketta.

Puu- ja tuhkanäytteitä kerättiin yhteensä yli 500. Näytteistä määritettiin STUKin laboratoriossa gammaspektrometrisesti ulkoisen altistuksen kannalta tärkeimmät radionuklidit (^{137}Cs ja ^{40}K , osasta tuhkanäytteitä myös ^{226}Ra ja ^{232}Th). Valituista puupolttoainenäytteistä määritettiin tuhkapitoisuus (550°C, 12 tai 16 h) Geologian Tutkimuskeskuksessa, ja aktiivisuuspitoisuudet laskettiin tuhkaa kohti. Rakeistuksen vaikutusta em. radionuklidien liukoisuuteen puun tuhkassa tutkittiin ammoniumasetaatti- ja CAT-uutoilla. Cesiumin käyttäytymistä poltossa tutkittiin VTT Kemiantekniikan Puuenergian teknologiaohjelman hankkeessa PUUT11 keräämien näytteiden avulla. VTT:n kolmesta koetilanteesta keräämille tuhkanäytteille (pohjatuhka sekä lentotuhka erikseen sähkösuodattimen 1. ja 2. kentstä) tehtiin sekvenssiuutto Geologian tutkimuskeskuksessa.

Tuhkan radioaktiivisuudesta aiheutuvaa sisäistä ja ulkoista säteilyaltistusta arvioitiin sekä tuhkaa käsittelevien työntekijöiden että väestön kannalta. Työntekijöiden altistusta tuhkan säteilylle selvitettiin mittaamalla annosnopeuksia laitospaikoilla ja arvioimalla altistusajoja. Altistusta selvitettiin myös tuhkan rakeistuksen ja metsään levityksen yhteydessä. Tuhkan peittämistä maa- ja tierakenteissa arvioitiin väestön säteilyaltistuksen vähentämisen kannalta.

4. Tulokset

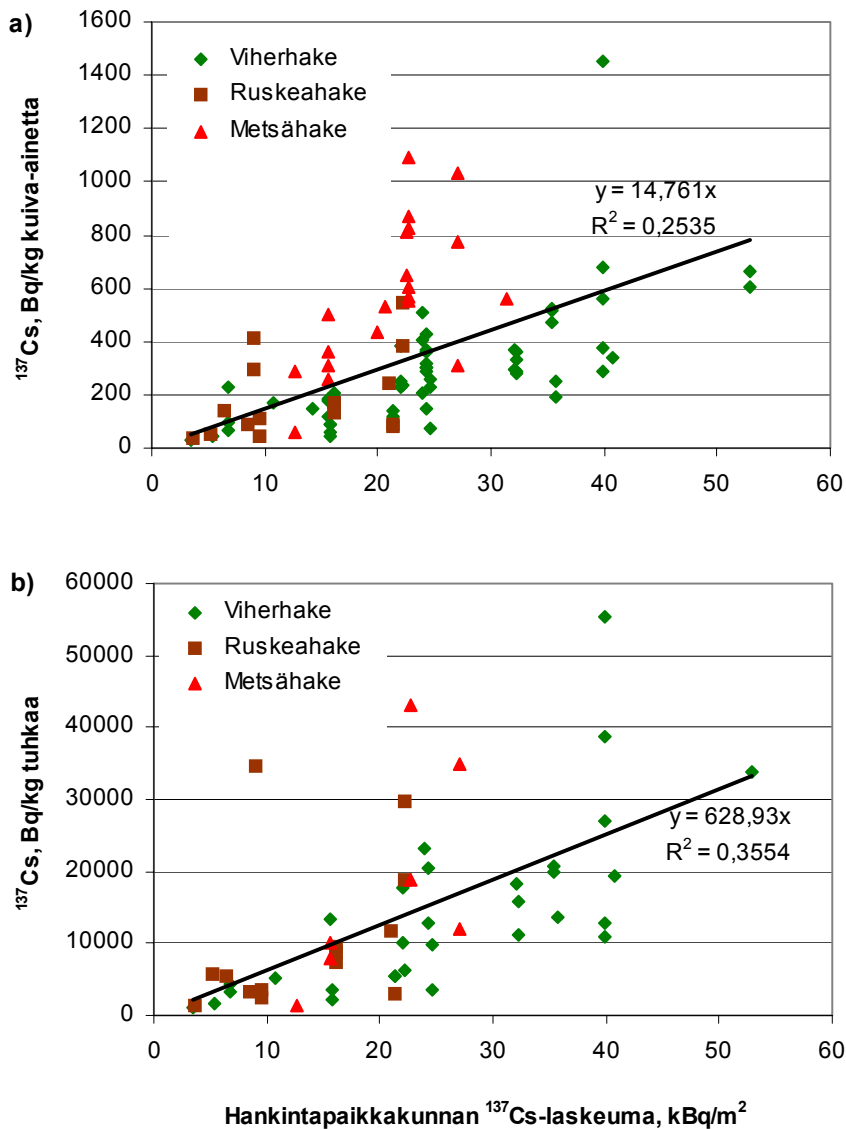
4.1 Puupolttoaineiden ^{137}Cs -pitoisuudet

Metsähakenäytteistä määritetty tuhkan ^{137}Cs -pitoisuuden ja hakkeen hankintakunnan ^{137}Cs -laskeuman välinen suhde oli keskimäärin 580 (Bq/kg) / (kBq/m²), ja 90 %:ssa näytteistä se oli alle 1 200 (Bq/kg) / (kBq/m²), kun aineistosta jätettiin pois turvemaan hakenäyte (kuva 1). Turvemaalla aktiivisuuksien välinen suhde oli 3 800 (Bq/kg) / (kBq/m²).

Hajonta hakkeen ja sen tuhkan ^{137}Cs -pitoisuudessa aiheutuu näytteenottometsikön laskeuman poikkeamasta kunnan keskimääräisestä laskeumasta, kasvupaikkaolosuhteiden aiheuttamasta vaihtelusta ^{137}Cs :n kulkeutumisessa puustoon sekä näytekohtaisesta satunnaisvaihtelusta hakkeen koostumuksessa. Lisäksi havaittiin systemaattinen, mutta ei tilastollisesti merkitsevä ero, eri näytteenottomittajien välillä. Ero voi johtua joko hakkeen tuotantomenetelmistä tai siitä, että eri toimittajien näytteet olivat eri alueilta ja erilaisilta kasvupaikoilta. Toisaalta saman toimittajan viher- ja ruskeahakkeen ^{137}Cs -pitoisuudessa ei ollut eroa. Näytteenottomittajien välillä havaittu ero viittaa siihen, että jonkun muun kuin tähän tutkimukseen osallistuneen polttoaineen toimittajan hakkeen ^{137}Cs -pitoisuus voi poiketa systemaattisesti näistä tuloksista.

Samalla laskeuma-alueella hakkuutähdehakkeen ja kuoren ^{137}Cs -pitoisuus on suurin, puuaineksen purun pitoisuus on pienin. Toisaalta samalta puunhankinta-alueelta ja siten samalta laskeuma-alueelta olevat havupuiden kuoren ja purun tuhkat olivat mittaustarkkuuden rajoissa yhtä aktiivisia, koska kuoren suurempi tuhkapitoisuus kompensoi sen suurempaa ^{137}Cs -pitoisuutta.

Laitoksen tuottaman puuntuhkan ^{137}Cs -pitoisuutta voi karkeasti arvioida puupolttoaineen hankinta-alueen ^{137}Cs -laskeumasta käyttämällä kertoimena edellä esitettyä haketuhkan ja laskeuman aktiivisuuksien välistä suhdetta (580 tai 1200 Bq/kg per kBq/m²). Kuntakohtaiset laskeumavyöhyketiedot ovat saatavilla esimerkiksi Säteilyturvakeskuksen Internet-sivuilla (www.stuk.fi/säteily ja ihminen). Puuntuhkan aktiivisuuden laimenemista seospoltossa ja petihiekan tai palamattomien aineiden vaikutuksesta on käsitelty kohdassa 4.4.

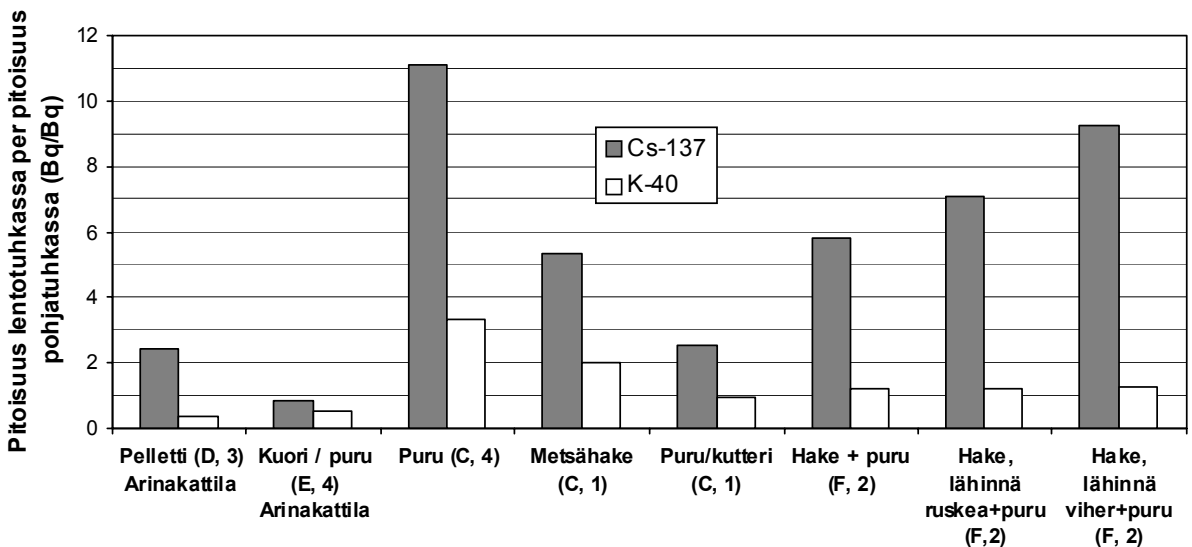


Kuva 1. ^{137}Cs -pitoisuus a) hakkuutähdehakeessa ($N = 92$) ja b) hakeen puhtaassa tuhkassa ($N = 52$) hankintakunnan keskimääräisen ^{137}Cs -laskeuman mukaan. Laskeuma-arvoissa on otettu huomioon Tshernobylin onnettomuuden (v. 1986) ja näytteenoton (v. 2001–2003) välisenä aikana tapahtunut 30 %:n pieneminen radioaktiivisen hajoamisen vuoksi. Näytteet ovat neljältä toimittajalta laskeuma-alueelta. Ryhmä ”Metsähake” on yhden laitoksen metsähaketta, jota ei ole lisätietojen puuttuessa luokiteltu viher- tai ruskeahakkeeksi.

4.2 Radionuklidien käyttäytyminen puun poltossa

Cesiumin jakautumista poltossa eri tuhkiin tutkittiin samanaikaisten lento- ja pohja/arinatuhkanäytteiden avulla pienissä laitoksissa, jotka polttivat tutkimusjakson aikana vain yhtä polttoainetta (kuva 2). Näin saatiin mahdollisimman hyvä vastaavuus lento- ja pohjatuhkan välille. Leijupetipoltossa pohjatuhkan ^{137}Cs -pitoisuus on selvästi pienempi kuin lentotuhkan, koska petihiekassa ei ole ^{137}Cs :ää (ks. myös taulukko 1). Myös kuplivan leijupetikattilan tuhkanäytteille (eivät ole mukana kuvassa 2) tehdyt sekvenssiuuttokokeet osoittivat, että ^{137}Cs :stä jäi pohjatuhkaan pienempi osuus kuin kaliumista, vaikka petihiekan mukana syötettyä kaliumia ei otettaisi huomioon. Arinapoltossakin ^{137}Cs -pitoisuudet olivat lentotuhkassa yleensä hiukan suurempia kuin pohjatuhkassa.

Kaliumin (^{40}K) sekä ^{226}Ra :n ja ^{232}Th :n pitoisuuksissa ei ollut merkittävää eroa lento- ja pohjatuhkan välillä (taulukko 1). Nämä kolme luonnon nuklidia yhdessä aiheuttavat tuhkan käsittelyä koskevan indeksin I4 arvoon lisäyksen, joka on keskimäärin 0,06–0,08. Tällöin tuhkan ^{137}Cs -pitoisuus voi olla yli 9 000 Bq/kg ennen kuin indeksi saavuttaa arvon 1.



Kuva 2. ^{137}Cs :n ja kaliumin lentotuhka- ja pohjatuhkapitoisuuksien suhde. Suluissa laitoksen tunnus ja näyteparien lukumäärä. Kaksi ensimmäistä ovat arinakattiloita, muut leijupetejä.

Taulukko 1. Tuhkista mitatut radionuklidipitoisuudet (Bq/kg). Aineisto sisältää vain ne näytteet, joista määritettiin myös ²³²Th- ja ²²⁶Ra-pitoisuudet. Lisäksi on ilmoitettu tuhkan käsittelyn aktiivisuusindeksin I4 arvo ilman ¹³⁷Cs:n osuutta.

	Näytteitä	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²³² Th	²²⁶ Ra	I ₄ ilman ¹³⁷ Cs:ää
Leijupetipoltto						
Lentotuhka	26	4 100 ± 1 800	1 100 ± 600	60 ± 20	160 ± 40	0,08 ± 0,02
Pohjatuhka	23	1 000 ± 700	1 100 ± 600	50 ± 30	100 ± 60	0,06 ± 0,03
Arinapoltto						
Lentotuhka	9	5 800 ± 3 100	1 200 ± 500	30 ± 20	80 ± 50	0,06 ± 0,02
Arinatumka	11	4 700 ± 3 400	1 800 ± 800	40 ± 20	120 ± 110	0,08 ± 0,03

4.3 Työntekijöiden altistuminen tuhkan säteilylle

Tuhkan säteilystä työntekijöille aiheutuvat säteilyannokset ovat tämän tutkimuksen mukaan vähäisiä verrattuna työntekijöiden säteilyannoksen toimenpidearvoon 1 mSv vuodessa. Taulukossa 2 esitetyt annosarviot perustuvat yksittäisillä laitospaikoilla mitattuihin suurimpiin annosnopeuksiin tai suurimpiin annosnopeusarvioihin sekä työntekijöiltä saatuihin tietoihin tehtävissä käytettävistä työajoista. Suurimmat arvioidut annosnopeudet 0,3 µSv/h olivat metsien tuhkanalnoituksessa ja tuhkan kuljetuksessa. Kyseinen annosnopeus johtaa kokopäivätyössä (1 500 h/vuosi) 0,45 mSv:in vuosittaiseen säteilyannokseen. Voimalaitoksen henkilökunnan säteilyannokset olivat arvion mukaan alle 0,1 mSv vuodessa.

Suurin osa tuhkan radioaktiivisuuden aiheuttamasta säteilyannoksesta tulee ulkoisesta säteilystä. Suurimman laskeuman alueilla säteilyannoksen aiheuttaa pääasiassa ¹³⁷Cs, mutta luonnon nuklidit ⁴⁰K, ²²⁶Ra ja ²³²Th vaikuttavat myös säteilyannokseen. Hengityksen kautta saatava sisäinen säteilyannos on pieni, ja pölyvässä työssä hengityssuojainten käyttö vielä pienentää säteilyannosta.

Suurimmat annosnopeudet, noin 0,2 µSv/h, mitattiin tuhkan läjitysalueella sekä kattiloiden huoltotoimenpiteiden aikana. Polttolaitoksilla tuotantoprosessi on pitkälle automatisoitu. Tuotannossa syntyvä tuhka kulkeutuu automaattisesti

tuhkasiiloon, josta se kuljetetaan erilliselle tuhkan läjitysalueelle tai ohjataan hyötykäyttöön. Suurin osa tuotantolaitoksen henkilökunnasta ei joudu tekemisiin tuhkan kanssa. Laitosrakennuksessa oleva tuhka on hyvin ohuina kerroksina tai säteilyä vaimentavien metallikuorien sisällä, jolloin tuhkan aiheuttamat annosnopeudet laitosrakennuksen sisällä ovat pieniä.

Taulukko 2. Työntekijöiden säteilyannosarviot. Kun otetaan huomioon työntekijän sijainnin vaihtelut, tuhkan aktiivisuuden vaihtelut ja säteilyn vaimeneminen ajoneuvoissa, jäävät todelliset säteilyannokset näitä arvioita pienemmiksi.

	Annosnopeus, μSv/h	Työaika vuodessa, h	Annos, mSv/vuosi
Laitosalueen työntekijä	0,05	1 500	0,08
Huoltohenkilö 1	0,2	144	0,03
Huoltohenkilö 2	0,2	340	0,07
Läjitysalueen urakoitsija	0,2	250	0,05
Metsälannoituksen	0,3*	270	0,08
Rakeistamon työntekijä	0,2	1 419	0,28
Tuhkan kuljettajat	0,3*	1 500	0,45

* Annosnopeus on arvioitu ilman mittauksia.

4.4 Tuhkan käsittelyn ja käytön säteilyturvallisuuden arviointi

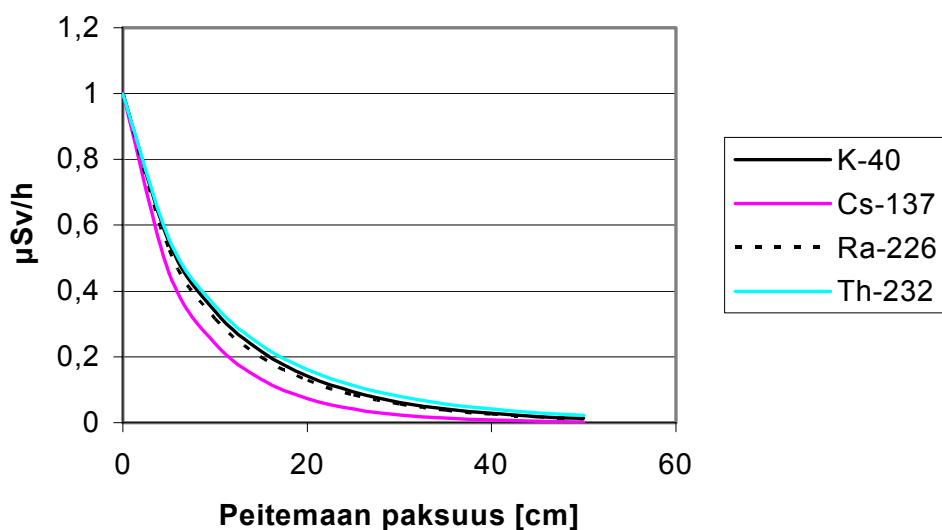
Tutkimukseen osallistuneilla, suurimman laskeuman alueelta tulevia puupolttoaineita käyttävillä laitoksilla aktiivisuusindeksit I2 ja I3 ylittivät selvitysrajan (I = 1) suuressa osassa tuhkanäytteitä. Katujen, teiden ja vastaavien kohteiden rakentamisessa (indeksi I2) sekä maantäytössä ja maisemarakentamisessa (indeksi I3) voidaan toimenpidearvo 0,1 mSv alittaa peittävän maakerroksen avulla, vaikka tuhkan aktiivisuusindeksi ylittäisi arvon 1. Tarvittavan maakerroksen paksuus riippuu tuhkan aktiivisuudesta ja peitemaan tiheydestä. Jo 10 cm paksuinen maa- tai sorakerros vaimentaa tuhkan säteilyn kolmasosaan (jos peitemaan tiheys on 1,5 g/cm³), joten peitemaan käyttö on tehokas tapa välttää säteilyaltistusta (kuva 3). Riittävä peitemaakerroksen paksuus selviää kuvasta 4, jos aktiivisuusindeksin arvo tiedetään tuhkan aktiivisuusmittausten perusteella.

Laitoksen tuottaman puuntuhan ^{137}Cs -pitoisuus ja aktiivisuusindeksien arvot voidaan myös karkeasti arvioida ilman näytemittauksia polttoaineseoksen koostumuksen ja puupolttoaineiden hankinta-alueen perusteella (kohta 4.1, kuva 5). Arvioinnin tarkkuuteen vaikuttavat puupolttoaineen hankinta-alueen laajuus, toisin sanoen ^{137}Cs -laskeuman vaihtelu hankinta-alueella, sekä puupolttoaineiden osuus kaikista laitoksen käyttämistä polttoaineista, kuten myös käytettävät polttoainelajit.

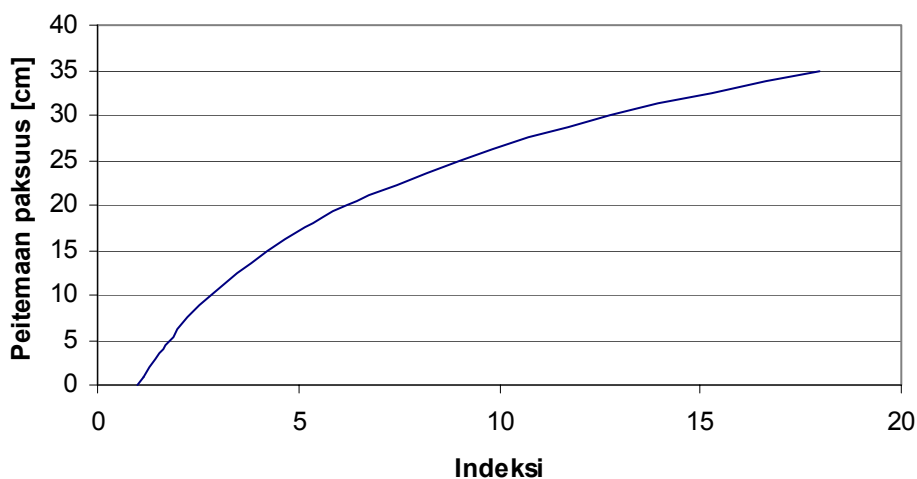
Voimalaitosmittakaavassa merkittävä osa puupolttoaineista käytetään seospoltossa turpeen, erilaisten lietteiden tai yhdyskuntajätteen ohella. Muiden polttoaineiden suurempi tuhkapitoisuus ja yleensä pienempi ^{137}Cs -pitoisuus vähentävät tuhkan aktiivisuutta verrattuna pelkän puupolttoaineen tuhkaan. Poikkeuksena on polttoturve silloin kun se on otettu laskeumalle altistuneen turvesuon pintakerroksesta. Seospolton tuhkan ^{137}Cs -pitoisuutta voidaan arvioida ottamalla tuhkamäärillä painotettu keskiarvo eri osapolttoaineiden tuhkien ^{137}Cs -pitoisuuksista.

Laitosten tuottamien tuhkien aktiivisuus voi olla huomattavasti pelkälle puuntuhkalle laskettuja arvioita pienempi, koska tuhkassa oleva muu kuin puun epäorgaanisesta aineesta peräisin oleva materiaali yleensä pienentää aktiivisuutta. Jos tuhkassa on palamatonta hiiltä tai muuta ei-aktiivista ainetta merkittävästi, voidaan arvioitu ^{137}Cs -pitoisuus kertoa tekijällä $1 - C/100$, missä C on ei-aktiivisen aineen pitoisuus tuhkassa prosentteina. Petihiekan osalta vastaava vähennys voidaan tehdä ^{137}Cs -pitoisuuteen, mutta ei luonnon nuklidien pitoisuuteen koska niitä on hiekassa suunnilleen saman verran kuin puun tuhkassa.

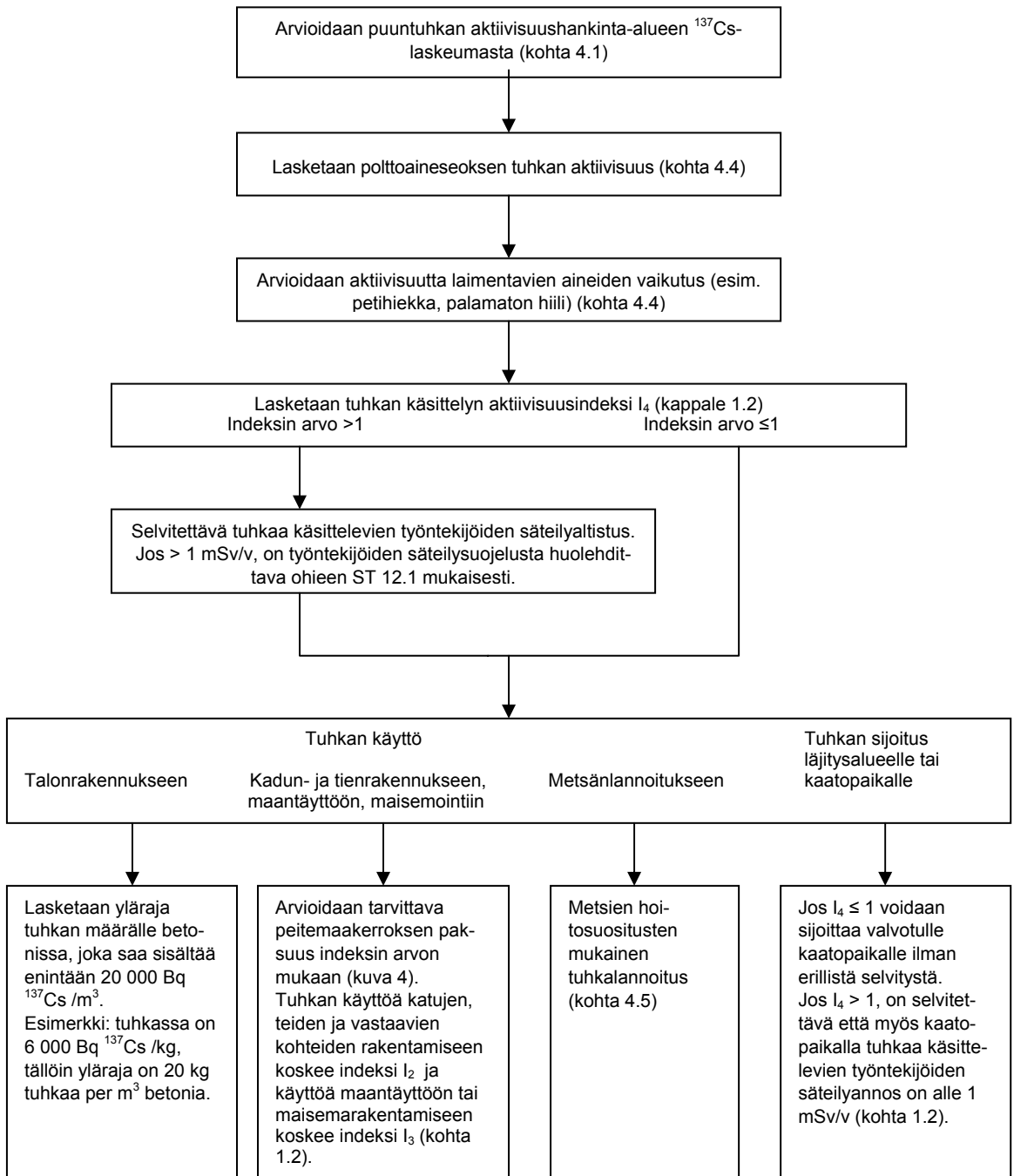
Aktiivisuusindeksit I2–I4 voidaan arvioida edellä käsitellyn tuhkan ^{137}Cs -pitoisuusarvion perusteella (indeksien laskukaavat on annettu kohdassa 1.2). Indeksien arvo on luonnon nuklidien ja ^{137}Cs :n osuuksien summa. Keskimääräisessä arviossa luonnon nuklidien osuus indeksissä I2 on 0,43, indeksissä I3 0,16 ja indeksissä I4 0,07 (mitattujen tuhkanäytteiden keskiarvo). Konservatiivisessa arviossa luonnon nuklidien osuus indeksissä I2 on 0,91, indeksissä I3 0,32 ja indeksissä I4 0,16 (suurin tuhkanäytteissä havaittu). Jos indeksi I2 tai I3 ylittää arvon 1 ja tuhkaa aiotaan käyttää kadun- tai tienrakennukseen, maantäyttöön tai maisemointiin, on tuhka peitettävä indeksien arvoa vastaavalla maakerroksella (kuva 4).



Kuva 3. Peittävän kerroksen vaimennusvaikutus. Oletukset: Tuhkalaatan koko on $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 1\text{ m}$. Annospiste on metrin korkeudella laatan pinnasta. Tuhkan tiheys on 1 g/cm^3 ja peittävän kerroksen tiheys $1,5\text{ g/cm}^3$. Aktiivisuuspitoisuudet aiheuttavat erikseen annosnopeuden $1\text{ }\mu\text{Sv/h}$ ilman peittävää kerrosta.



Kuva 4. Peitemaan paksuuden määrittäminen, kun tiedetään tuhkan aktiivisuusindeksin arvo. Peitemaan tiheys on $1,5\text{ g/cm}^3$.



Kuva 5. Tuhkan aktiivisuuden sekä tuhkan käsittelyn, käytön ja sijoituksen säteilyturvallisuuden arviointi.

4.5 Metsien tuhkalannoitus

Metsien hoitosuosituksen mukainen tuhkalannoitus vähentää yleensä väestölle ravintoketjujen kautta aiheutuvaa sisäistä säteilyaltistusta siitä, mikä se olisi ilman lannoitusta. Ulkoinen annos metsissä oleskelun aikana on Suomessa sisäiseen annokseen verrattuna pieni. Päälaskeuma-alueella Etelä-Suomessa voidaan olettaa sisäisen säteilyannoksen ja sen kautta myös kokonaisaltistuksen tuhkan radionuklidien säteilylle vähenevän lannoituksen vaikutusaikana (STUK-A177 s. 29–34). Oletus pätee myös lievimmän Tshernobyl-laskeuman alueilla, jos niille ei levitetä lannoitteeksi suuria määriä ^{137}Cs -aktiivisuudeltaan tässä tutkimuksessa havaittuja enimmäispitoisuuksia vastaavaa tuhkaa.

Metsien lannoitteeksi kannattaa levittää puun tuhkaa, sillä sen ravinnekoostumus on metsien kannalta tasapainoinen etenkin turvemaidella. Sekä puun tuhalla että seospolttoaineen tuhalla lannoitettaessa tulee varmistaa, ettei lannoitusvaikutuksen saamiseksi tarvittava tuhkan määrä sisällä radioaktiivista cesiumia huomattavasti enemmän kuin metsämaassa on ennestään. Näin toimien tuhkalannoitus ei suurena metsäntuotteiden ^{137}Cs -kontaminaatiota myöskään lievän laskeuman alueella siitä, mikä se olisi ilman lannoitusta. Samoin ulkoinen säteily tuhkan radioaktiivisista aineista pysyy vähäisenä, eikä metsien käytöstä aiheutuva säteilyannos väestölle kasva tuhkalannoituksen johdosta nykyisessä laskeumatilanteessa.

Tutkimuksessa havaitut tuhkan radionuklidipitoisuudet ja tähänastiset radioekologisten tutkimusten tulokset oikeuttavat päättelemään, että Suomessa ei ilmeisesti tarvita puuenergia-alan kannalta merkittävää rajoitusta puun tuhkan laajalokaan käytölle metsien lannoitteena. Tuhkalannoitus voi olla muun ohessa myös keino lieventää radioaktiivisen laskeuman vaikutuksia metsäkasvillisuuteen pitkällä aikavälillä etenkin ravinneköyhillä kasvupaikoilla. Metsien ravinnetilan asianmukainen parantaminen on yleensäkin järkevää vakavien ydinlaitosonnettomuuksien haittoihin varautumista metsätaloudessa.

Tuhkalannoituksen vaikutukset metsien käytöstä aiheutuvaan väestön säteilyaltistukseen tulee arvioida pitkällä aikavälillä, jolloin metsissä pitkään kestävä lannoitusvaikutus voidaan ottaa huomioon. Metsiin palautettavan tuhkan laatu, alueellinen alkuperä ja myös ^{137}Cs -aktiivisuuden suuruusluokka kannattaa do-

kumentoida. Siten voidaan varmistaa ja tarvittaessa osoittaa toiminnan turvallisuus sekä työntekijöiden että väestön kannalta.

5. Tulosten hyödyntäminen

Hankkeen tuottama tieto palvelee puuenergiaa tuottavia laitoksia ja tuhkan hyötykäytön suunnittelijoita tuhkan radioaktiivisuuden aiheuttamien säteilyvaikutusten tunnistamisessa ja hallinnassa, siten että toimintaan liittyvä säteilyaltistus pysyy asetettuja toimenpidearvoja pienempänä. Tutkimuksessa on tarkasteltu tuhkan ¹³⁷Cs-aktiivisuuden arviointia ja tarvetta rajoittaa työntekijän tai väestön säteilyaltistusta tuhkaa käsiteltäessä, sijoitettaessa ja käytettäessä. Hankkeen loppuraportissa annettavien esimerkkien avulla on selvennetty toiminnan harjoittajille ¹³⁷Cs:n ja luonnon nuklidien osuutta tuhkan aiheuttamaan säteilyn annosnopeuteen ja säteilyaltistukseen siten, että suuntaa-antava arviointi on mahdollista myös laitosten oman toiminnan osalta. STUK-A-sarjassa julkaistava raportti on ilmestyttyään saatavilla Säteilyturvakeskuksen Internet-sivuilla (www.stuk.fi/julkaisut).

Hanke on parantanut tiedonvaihtoa puuenergia-alan ja STUKin välillä ja luo teollisuudelle mahdollisuuden asiantuntemuksen lisäämiseen puuenergiaa koskevissa ja muissa esiin tulevilla säteilykysymyksissä. Tällä seikalla voi olla taloudellista merkitystä esimerkiksi tilanteissa, joissa on eduksi esittää nopeasti tutkimukseen perustuvaa puuenergian käyttöön liittyvää tietoa radioaktiivisten aineiden esiintymisestä, säteilyvaikutuksista ja niiden huomioon ottamisesta.

Julkaisut ja raportit

Hänninen, R., Klemola, S., Rantavaara, A., Valmari, T. & Vetikko V. 2001. Puupolttoaineiden radioaktiivisuuden vaikutus tuhkan käyttöön – PUUT23. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Jyväskylä, 5.–6.9.2001. VTT Symposium 216. S. 421–424.

Vetikko, V., Valmari, T., Oksanen, M., Rantavaara, A., Klemola, S. & Hänninen, R. 2004. Energiateollisuudessa syntyvän puuntuhkan radioaktiivisuus ja sen säteilyvaikutukset. Helsinki: Säteilyturvakeskus. STUK-A200. (Käsikirjoitus).

Vetikko, V., Valmari, T., Rantavaara, A., Oksanen, M., Klemola, S. & Hänninen, R. 2002. Puupolttoaineiden radioaktiivisuuden vaikutus tuhkan käyttöön – PUUT23. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari, Joensuu, 18.–19.9.2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 279–289.

Kirjallisuus

Arvela, H., Markkanen, M. & Lemmelä, H. 1990. Mobile survey of environmental gamma radiation and fall-out levels in Finland after the Chernobyl accident. Radiation Protection Dosimetry 32 (No 3), s. 177–184.

Säteilyturvallisuus luonnonsäteilylle altistavassa toiminnassa. 2000. Helsinki: Säteilyturvakeskus. 11 s. ST 12.1.

Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus. 2003. Helsinki: Säteilyturvakeskus. 6 s. ST 12.2.

Rantavaara, A. & Moring, M. 2001. Puun tuhkan radioaktiivisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus. 41 s. STUK-A177.

Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus maanmuokkaukseen ja metsänviljelyyn – PUUT32

Veli-Matti Saarinen & Pertti Harstela
Metsäntutkimuslaitos
Suonenjoen tutkimusasema
Juntintie 154, 77600 Suonenjoki
Puh. 010 211 4847
E-mail: veli-matti.saarinen@metla.fi

Abstract

Project title in English: Effect of slash and stump removal on soil preparation and planting

The object of this study was to survey the effects of slash and stump removal on work productivity, work quality and technology of forest regeneration operations. Site preparation and planting were studied in test areas with and without slash or/and stump removal in different conditions. Work studies were done during site preparation and planting. The quality of mounding and planting was analysed by measurements of the seedlings.

After slash removal, the increase of work productivity (E_0) in mechanized planting was on average 18 per cent with Bräcke and on average 0 per cent with Ecoplanter. The quality of mechanized planting was slightly better after slash removal.

The productivity (E_0) of excavator-mounted mounders was after slash removal on average about 22 per cent higher with mounding blade and 53 per cent higher with ditching bucket. The quality of mounding was at the same level in both slash treatments. The productivity of three forwarder-mounted mounders (E_0) was on average 5 per cent lower after slash removal, but the quality of mounding was much better.

In combined stump extraction and mounding the time consumption of mounding phase was on average 40 per cent lower than separate mounding after stump removal.

1. Tausta

Hakkuutähteiden korjuun vaikutusta on aiemmin selvitetty muun muassa äestyksen, kaivukonemätästyksen, käsin- ja koneistutuksen sekä taimien alkukehityksen osalta (Saksa ym. 2001, 2002). Alan teknologia kehittyy kuitenkin jatkuvasti ja kiinnostavia vaihtoehtoja kustannustehokkaaseen metsänviljelyyn ovat edellä mainittujen työmenetelmien lisäksi muun muassa uudet istutuskoneet ja jatkuva-toimiset mätästäjät. Yhdistelmäkone samanaikaiseen hakkuutähteiden kuljetukseen ja maanmuokkaukseen joko äestykseen tai jatkuva-toimiseen mätästykseen perustuvana vaikuttaa niin ikään lupaavalta menetelmältä (Hartikainen ym. 2001, 2002). Uusista vaihtoehdoista tarvitaan tutkimusta paitsi työn tuottavuuden ja kustannusten, myös työn laadun ja taimien menestymisen osalta.

Kantojen korjuu on yleistynyt nopeasti, sillä kantopuu on hyvä raaka-aine energian tuotannossa. Kantojen poisto on lisäksi tehokas keino juurikäävän torjuntaan. Kantojen korjuun vaikutuksia metsänviljelyyn ei ole aiemmin selvitetty. Metsänviljelyn kannalta kantojen korjuun tekee kiinnostavaksi muun muassa se, että kantojen poisto paljastaa kivennäismaata, jolloin myös syntyy jonkin verran istutuspaikkoja taimille. Oletettavasti kantojen korjuu muuttaa muutoinkin muokkaus- ja istutusolosuhteita edullisemmiksi, koska pintaesteitä on vähemmän. Mätästyslevyllä varustetulla kantoharalla voidaan tehdä kantojen nosto ja täydennysmaanmuokkaus hyväksikäyttäen valmiit kantojen korjuussa syntyneet istutuspaikat.

2. Tavoite

Tavoitteena on sekä aikaisempien että uusien kokeellisten tutkimuksien perusteella muodostaa kokonaiskuva hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutuksista metsänviljelyn menetelmävalintaan, työn tuottavuuteen, kustannuksiin ja metsänviljelyn laatuun. Tutkimusraportin lisäksi tavoitteena on tuottaa toiminta-ohjeita sekä ehdotuksia koneiden ja työmenetelmien kehittämiseen.

3. Toteutus

Hanke toteutetaan vuosina 2002–2004 ja sen osatutkimukset ovat:

1. Empiirinen tutkimus hakkuutähteiden korjuun vaikutuksesta istutuksen työn tuottavuuteen, laatuun ja yksikkökustannuksiin.
2. Empiirinen tutkimus hakkuutähteiden korjuun vaikutuksesta mätästyskoneen työn tuottavuuteen, laatuun ja yksikkökustannuksiin.
3. Empiirinen tutkimus kantojen korjuun vaikutuksesta maanmuokkauksen ja istutuksen työn tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin.
4. Synteesi kirjallisuudesta ja osatutkimuksista (toteutus 2004).

Projektin vastuuorganisaatio on Metsäntutkimuslaitoksen Suonenjoen tutkimus-asema. Hankkeen rahoittajina ovat Biowatti Oy, UPM-Kymmene Oyj, Tornator Oy ja TTS-Forest Oy. Kokeissa käytettyjen koneiden hankinnassa ovat avustaneet mm. Metsäkoneurakointi Antti ja Matti Varis, T:mi Toimi Holck ja Tervolan Konopaja Ky.

Projekti päättyy 29.2.2004.

3.1 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus istutuksen työn tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Tutkittavina istutusmenetelminä olivat Bräcke- ja Ecoplanter-istutuskone sekä käsinistutus mätästyslevyllä tehtyihin laikkumättäisiin. Kaivukoneeseen asennettun Bräcke-istutuskoneen mätästystyönjälki vastaa mätästyslevyllä tehtyä laikkumätästä. Laitteella tehdään kerrallaan yksi mätäs, joka samalla istutetaan. Hakkuukoneeseen asennettavassa Ecoplanter-istutuskoneessa laikkumätäs tehdään jyrsimellä. Kerrallaan on mahdollista jyrsiä ja istuttaa kaksi mätästä.

Tutkimukseen valittiin kolme kivisytyltään erilaista yli viiden hehtaarin pääte-hakkuukuusikkoa. Valituksi tulivat normaalikivinen, kivinen sekä vähäkivinen ja

paksuhumuksinen työmaa. Hakkuu tehtiin kaikilla työmailla kevään ja kesän 2002 aikana.

Ennen hakkuuta kukin työmaa jaettiin kolmeen lohkoon, jotka edelleen jaettiin hakkuutähteiden käsittelyn osalta kahtia. Toisella osalla, jolta hakkuutähteet korjattiin, hakkuu tehtiin hakkuutähteiden korjuun edellyttämällä tavalla eli hakkuutähteet puitiin kasoille. Hakkuun jälkeen lohkoille muodostettiin hakkuutähteettömän ja hakkuutähteellisen puolen käsittävät ruudut. Kaikilla kohteilla istutettiin 0,9 hehtaarin pinta-ala kullakin istutusmenetelmällä.

Eri työmaiden istutukset tehtiin samaa tuotantoerää olevilla 2-vuotiailla kuusen paakkutaimilla (PL-64 F) kesäkuun 2002 aikana. Erot istutusajoissa pyrittiin niin työmenetelmien kuin työmaiden välillä minimoimaan. Bräcke-istutuskoneen kuljettajalla ja käsinistutuksen suorittaneella metsurilla oli työstään kokemusta useiden vuosien ajalta. Sen sijaan Ecoplanter-istutuskoneen kuljettajalla oli työkokemusta koneistutuksesta vajaan yhden istutuskauden ajalta. Työntutkimusaineisto tallennettiin videonauhoille.

Istutusten jälkeen jokaisen lohkon jokaiselle ruudulle perustettiin viisi 50 m² ympyräkoealaa taimien menestymisen useampivuotista seurantaa varten. Ympyräkoealan yksilömerkityistä taimista mitattiin mm. pituus, kuluvan vuoden kasvu ja asento sekä arvioitiin istutusvirheet ja -vauriot. Mättäistä mitattiin mm. mättään korkeusasema sekä määritettiin mm. mätästyyppi mättään pintakerroksen perusteella ja arvioitiin hakkuutähteen määrä mättäessä. Ympyräkoealat inventoitiin syksyllä 2002 ja uudelleen syksyllä 2003, jolloin taimista mitattiin muun muassa pituus ja kuluneen vuoden kasvu sekä arvioitiin taimien kunto ja selvitetiin mahdollisten tuhojen aiheuttajat.

3.2 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus mätästykseen työn tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Tutkittavina mätästysmenetelminä olivat kaivukoneen puomiin asennettavat Naarva-mätästyslevy ja ojakauhasta tehty mätästyskauha sekä kuormatraktorialustalle asennettavat jatkuvatoimiset Bräcke-, Toimi- ja Varis-mätästäjät. Varis-mätästäjä oli asennettu hakkuutähteiden korjuuta varten rakennettuun kuormatraktoriin, mutta tässä kokeessa sillä ainoastaan mätästettiin. Tutkimukseen

valittiin suhteellisen vähäkivinen ja tätä kivisempi yli viiden hehtaarin päätehakkuusyksikkö. Hakkuu tehtiin molemmilla työmailla kesän 2002 aikana.

Alueelle muodostettiin ennen hakkuuta kolme lohkoa ja hakkuun jälkeen ruudut eri mätästysmenetelmiä varten samoin periaattein kuin istutuskokeessa (kohta 3.1). Ruuduista tehtiin kuitenkin pienempiä, ja molemmilla kohteilla mätästettiin 0,45 hehtaaria jokaisella koneella. Mätästykset tehtiin syksyllä 2002 ja istutukset 2-vuotiailla kuusen taimilla (PL-64 F) touko–kesäkuun vaihteessa vuonna 2003. Työntutkimusaineisto tallennettiin videonauhoille. Istutusten jälkeen perustettiin ympyräkoealaverkosto ja suoritettiin mittaukset samalla periaatteella kuin istutuskokeessa. Ympyräkoealat inventoitiin istutusvuoden syksyllä.

3.3 Kantojen korjuun vaikutus mätästykseen ja istutuksen työn tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Tutkittavina olivat erilaiset maanmuokkaus- ja istutusvaihtoehdot alueella, jolta hakkuutähteet ja kannot on korjattu. Koe perustettiin suhteellisen vähäkiviselle kivennäismaalle. Hakkuu tapahtui kesällä 2002. Hakkuun ja hakkutähteiden korjuun jälkeen alueelle muodostettiin kolme lohkoa ja niille kaikille 10 ruutua erilaisia kannonnosto-, maanmuokkaus- ja istutusvaihtoehtoja varten. Jokaiselle lohkolle perustettiin kuitenkin kaksi ruutua, joilta kantoja ei nostettu.

Kannot nostettiin kaivukoneisiin asennetuilla kannonnostolaitteilla. Tutkitut kannonnostolaitteet olivat kantohara, mätästyslevyllä varustettu kantohara ja Pallarin kantoharvesteri, joka on varustettu hydraulisella kannon murskaimella. Mätästyslevyllä varustetulla kantoharalla voidaan puolestaan tehdä mätästys ja kantojen poisto samanaikaisesti.

Kantoja nostettiin kaikilla menetelmillä 0,45 hehtaarin alalta. Miestyönä istutettavat ruudut laikkumätästettiin erikseen kaivukoneen kauhalla syksyllä 2002. Istutukset 2-vuotiailla kuusen taimilla tehtiin toukokuussa 2003. Käsiniestutuksen lisäksi käytössä oli Ecoplanter-istutuskone. Käsiniestutusta tehtiin laikkumättäiden lisäksi tasattuun kannonnostojälkeen sekä mätästyslevyllä varustetulla kantoharalla tehtyihin täydennysmättäisiin. Ecoplanter-istutuskoneella istutettiin normaalin työtavan lisäksi eri jyrsinvoimakkuudella tehtyihin mättäisiin, kannonnostojälkeen ja täydennysmättäisiin.

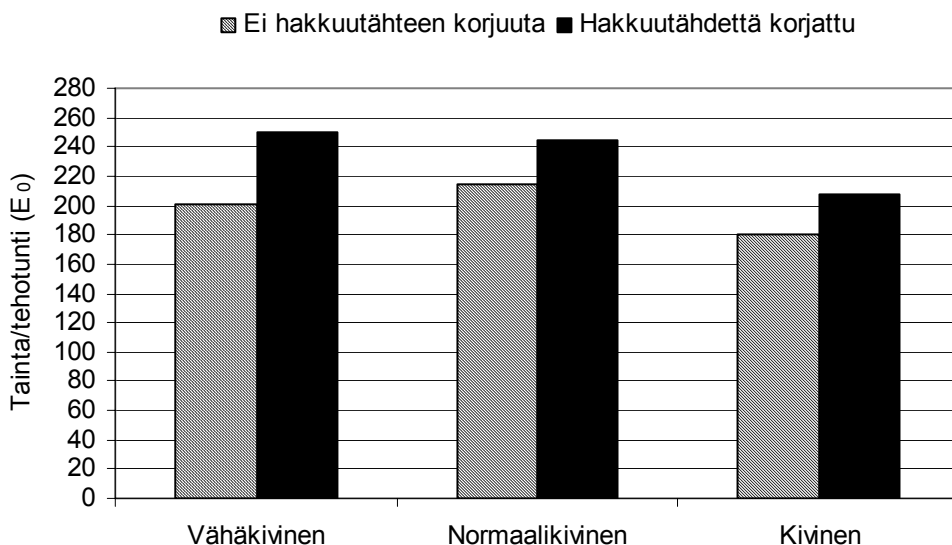
Istutusten jälkeen perustettiin istutus- ja muokkauskokeissa toteutetulla tavalla ympyräkoealat, jotka inventoitiin syksyllä 2003.

4. Tulokset

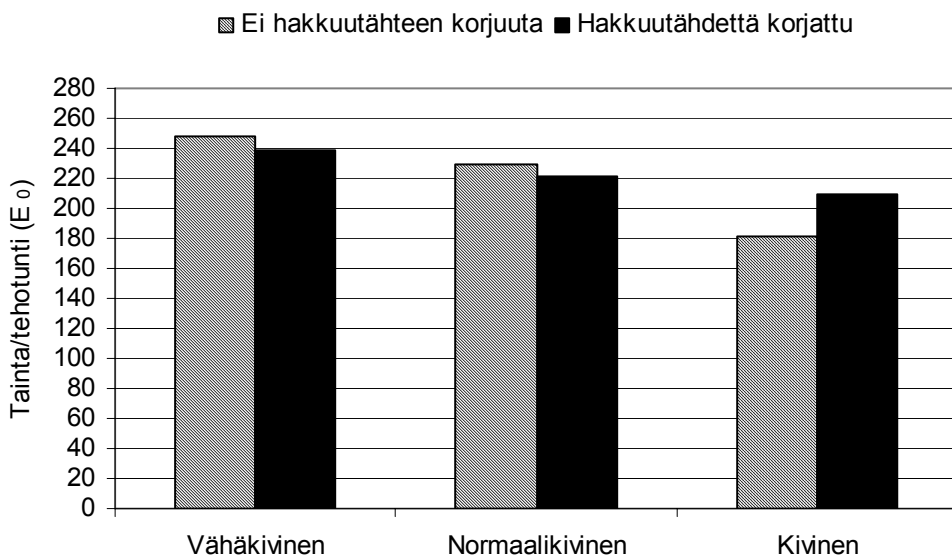
Projektin alustavat tulokset esitetään seuraavassa osatehtävittäin siltä osin kuin niitä on ehditty laskea.

4.1 Hakkuutähteiden korjuun vaikutus istutustyön tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Hakkuutähteiden korjuu lisäsi Bräcke-istutuskoneen työn tuottavuutta kaikilla työmailla. Bräckellä työn tuottavuus nousi hakkuutähteiden korjuusta keskimäärin 18 % (kuva 1), kun Ecoplanterilla työn tuottavuus oli keskimäärin sama sekä hakkuutähteettömällä että hakkuutähteellisillä osilla (kuva 2). Kahdella työmaalla Ecoplanterin työn tuottavuus oli hakkuutähteettömällä osalla jopa hieman pienempi. Ecoplanterin keskimääräinen tehotuntituottavuus (223 tainta tunnissa) oli vain hieman suurempi kuin Bräcken (214 tainta tunnissa), vaikka siinä on kaksi istutuspäätä.

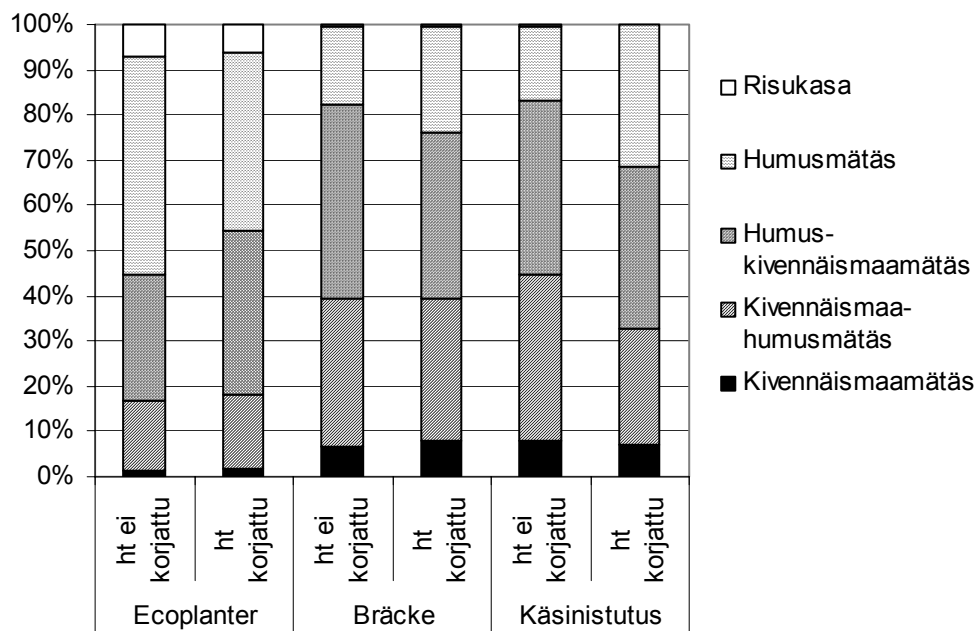


Kuva 1. Hakkuutähteen korjuun vaikutus Bräcke-istutuskoneen työn tuottavuuteen (E_0) vähäkivisellä, normaalikivisellä ja kivisellä työmaalla.



Kuva 2. Hakkuutähteen korjuun vaikutus Ecoplanter-istutuskoneen työn tuottavuuteen (E_0) vähäkivisellä, normaalikivisellä ja kivisellä työmaalla.

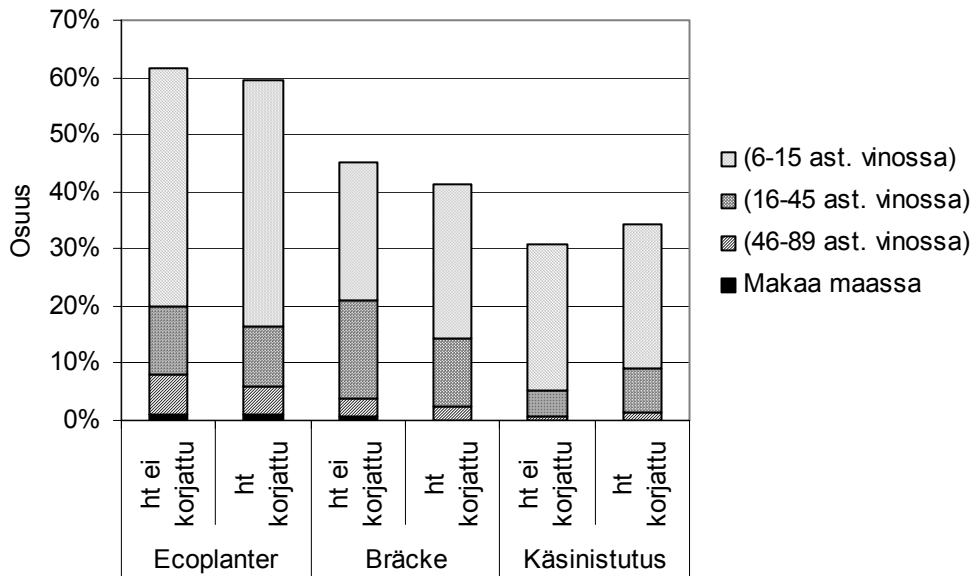
Ecoplanterin jyrsimellä tehdyt mätät erosivat selvästi levyllä tehdyistä Bräcke-istutuskoneen ja käsinistutuksen mätäistä (kuva 3), kun ne jaettiin eri tyypeihin mätäiden pintakerroksien perusteella. Ihannemätäs muun muassa tukkimiehen-tään torjunnan kannalta on tyypiltään kivennäismaamätäs, jonka pintakerros on puhdasta kivennäismaata. Ecoplanterin mätäistä vain hyvin pieni osa oli tyypiltään kivennäismaamätäitä (kuva 3), eikä Bräcke-istutuskoneen ja käsinistutuksen mätäistäkään ollut tällaisia kuin keskimäärin alle 10 %. Sellaisia mätäitä, joiden pintakerroksesta enin osa muodostui kivennäismaasta, oli levyllä tehdyistä mätäistä keskimäärin noin 40 %. Ecoplanterilla tehdyistä mätäistä tällaisia oli keskimäärin alle 20 %. Hakkuutähteiden korjuulla ei ollut selvää vaikutusta mätästyyppiin (kuva 3).



Kuva 3. Mätästyypien keskimääräiset prosentiosuudet eri istutusmenetelmillä ja hakkuutähdellä. ht = hakkuutähtely.

Istutustyön laadussa oli eroja eri menetelmien välillä. Esimerkiksi vinoon istutettujen taimien osuus oli istutuskoneilla selvästi suurempi kuin käsinistutuksessa. Molemmilla istutuskoneilla huomattavasti (vähintään 16 astetta) vinossa

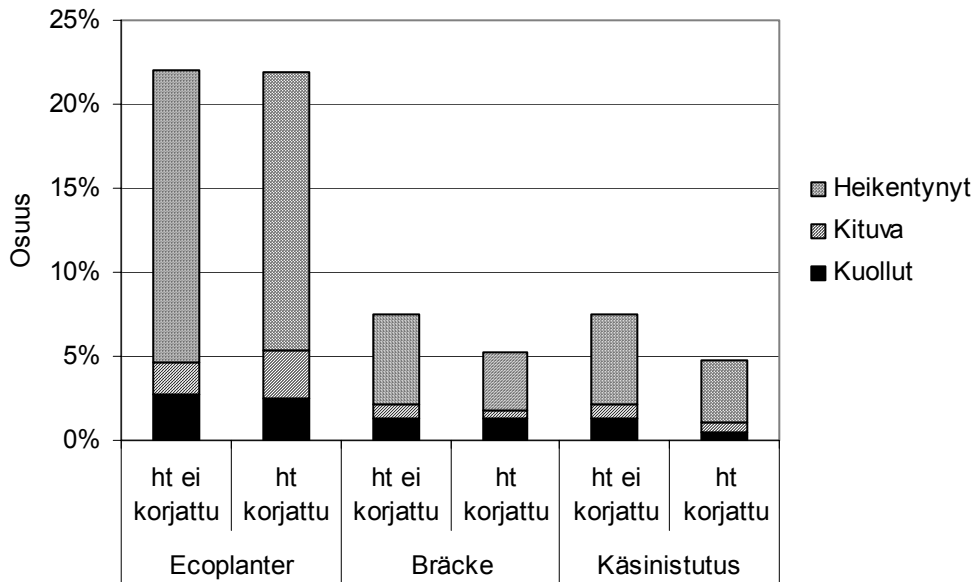
olevien taimia oli noin 20 %, kun sellaisia oli käsinistutuksessa alle 10 % (kuva 4). Pahasti vinossa (vähintään 46 astetta) oli yli 5 % Ecoplanterilla istutetuista taimista. Istutuskoneilla istutetut taimet olivat keskimäärin hieman suuremmassa silloin, kun hakkuutähteet oli korjattu.



Kuva 4. Vinoon istutettujen taimien keskimääräiset prosenttiosuudet vinousluokittain eri istutusmenetelmillä ja hakkuutähdekäsittelyillä. ht = hakkuutähde.

Bräckellä istutettujen taimien kunto oli ensimmäisen kasvukauden jälkeen keskimäärin selvästi parempi kuin Ecoplanterilla istutettujen (kuva 5). Bräckellä istutettujen taimien kunto oli samaa luokkaa käsin istutettujen taimien kanssa. Vaikka Ecoplanterilla istutetuista taimista lähes viidesosa luokiteltiin heikentyneiksi tai kituviksi, oli taimista kuolleita keskimäärin vain 3 %. Sekä Bräcke-istutuskoneella että käsin istutetuista taimista kuolleita oli vain noin yksi prosentti. Kuolleisuutta aiheutti mm. tukkimiehentäi ja istutusvirheet.

Toisella kasvukaudella kuolleisuus oli kuitenkin keskimäärin huomattavasti suurempaa: Ecoplanterilla 8, Bräckellä 2 ja käsinistutuksessa 2 %. Hakkuutähteen korjuulla ei ollut selvää vaikutusta taimien kuntoon. Kahden kasvukauden aikana taimien pituuskasvussa ei havaittu selviä eroja eri työmenetelmien eikä eri hakkuutähdekäsittelyjen välillä.

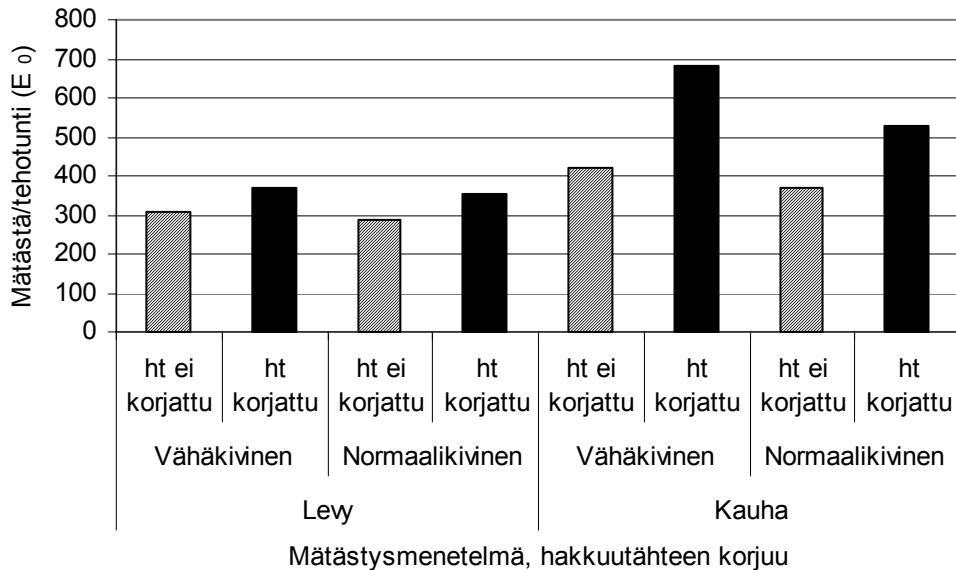


Kuva 5. Kunnoltaan heikentyneiden, kituvien ja kuolleiden taimien keskimääräiset prosenttiosuudet eri istutusmenetelmillä ja hakkautähdekäsittelyillä ensimmäisen kasvukauden lopussa. ht = hakkautähde.

4.2 Hakkautähteiden korjuun vaikutus mätästystyön tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Hakkautähteiden korjuu lisäsi selvästi työn tuottavuutta kaivuriin asennetuilla mätästäjillä (kuva 6). Kahdella tutkitulla työmaalla mätästykseen työn tuottavuus oli levyllä mätästettäessä keskimäärin 326 mätästä tehotunnissa. Hakkautähteiden korjuu lisäsi työn tuottavuutta levyllä mätästettäessä keskimäärin 22 %.

Mättäiden tekeminen kaivukoneen kauhalla oli huomattavasti nopeampaa. Työn tuottavuus oli keskimäärin 480 mätästä tehotunnissa (kuva 6). Suurempi työn tuottavuus levyllä tehtävään mätästykseen verrattuna selittyi lähinnä sillä, että mättäitä ei tiivistetty. Kauhalla mätästettäessä hakkautähteiden korjuu lisäsi työn tuottavuutta huomattavasti, keskimäärin 53 %.



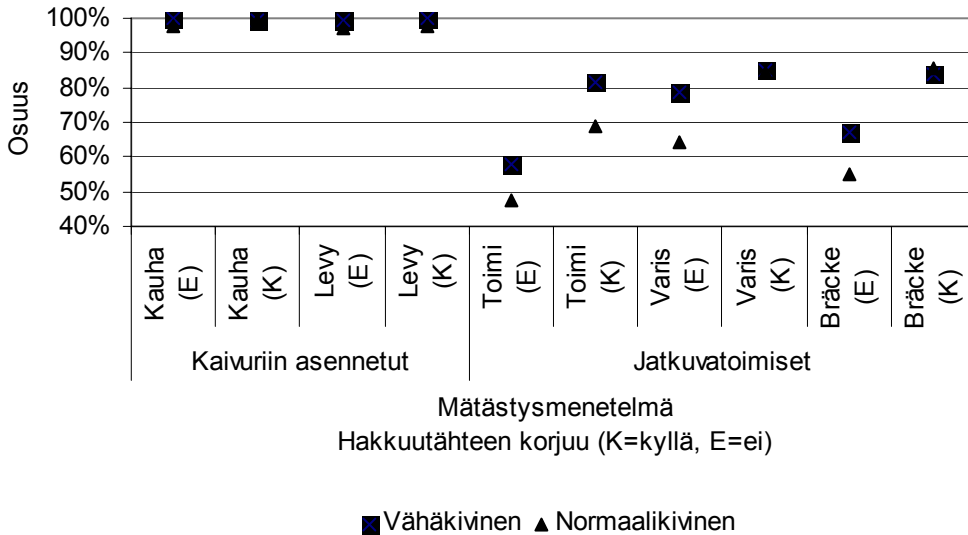
Kuva 6. Hakkuutähteen korjuun vaikutus mätästyksen työn tuottavuuteen (E_0) kaivukoneen kauhalla ja levyllä vähäkivisellä ja normaalikivisellä kohteella. ht = hakkuutähde.

Kuormatraktoriin asennettujen jatkuvatoimisten mätästäjien työn tuottavuuteen ei hakkuutähteen korjuulla ollut suurta vaikutusta. Pinta-alayksikköä kohti laskettu työn tuottavuus jopa laski noin 5 %. Mätästyksen tehotuntituottavuus ilman käännöksiä ja keskeytyksiä oli vähäkivisellä kohteella keskimäärin 1,2 ja normaalikivisellä kohteella keskimäärin 1,0 ha/h (E_0). Keskimääräinen tehotuntituottavuus vaihteli eri valmistajien mätästäjillä 0,9 hehtaarista 1,3 hehtaariin.

Kun hakkuutähteet oli korjattu, jatkuvatoimisten mätästäjien työn laatu parani huomattavasti. Hakkuutähteettömällä alueella huomattavasti suurempi osa taimista voitiin istuttaa ensisijaiseen istutuspaikkaan eli mättään laelle eikä laikuun (kuva 7). Kaikki laikutkaan eivät soveltuneet istutuspaikoiksi, ja osa taimista jouduttiin istuttamaan muokkaamattomaan maahan. Hakkuutähteen korjuu lisäsi mättäisiin istutettujen taimien osuutta selvästi.

Käsinistutuksen työn tuottavuus oli keskimäärin 12 % parempi kaivurilla kuin jatkuvatoimisilla mätästäjillä mätästetyillä alueilla. Kaivukoneilla mätästetyillä alueilla käsinistutuksen työn tuottavuus oli keskimäärin 284 tainta/h (E_0) ja jatkuvatoimisilla mätästäjillä käsitellyillä alueilla keskimäärin 254 tainta/h (E_0).

Hakkuutähteiden korjuu lisäsi istutustyön tuottavuutta kaivukoneella mätäste-
tyillä alueilla keskimäärin 3 % ja jatkuvatoimisilla mätästäjillä käsitellyillä alu-
eilla keskimäärin 10 %.



Kuva 7. Mättääseen istutettujen taimien prosenttiosuudet eri mätästysmenet-
millä ja hakkuutähtekäsittelyillä.

4.3 Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus mätästys- ja istutustyön tuottavuuteen, laatuun ja kustannuksiin

Kantojen noston yhteydessä tehtävä täydennysmätästys kantojaran mätästysle-
vyllä osoittautui tehokkaammaksi kuin erillistyönä tehty mätästys. Alueella,
josta nostettiin keskimäärin 478 kantoa hehtaarilta, tehtiin kannonnostojälkiä
täydentämään keskimäärin 724 mätästä hehtaarille. Yhdistetyn kantojen noston
ja mätästykseen ajanmenekki oli keskimäärin 12,7 tuntia (E_0) hehtaarille, josta
mätästykseen laskennallinen osuus oli keskimäärin 2,4 tuntia (E_0) hehtaarille.
Erikseen kauhalla tehdyssä täydennysmätästyksessä ajanmenekki oli keskimää-
rin 4,0 tuntia (E_0) hehtaarille. Mätästykseen laskennallinen osuus tehotyöajasta oli
yhdistelmätyössä ainoastaan 60 % siitä, mitä mätästykseen kului erillistyönä. On

kuitenkin otettava huomioon, että kantoharan mätästyslevyllä ja kauhalla tehtyjen mätäiden laatu voi erota toisistaan.

Kantojen korjuulla oli vähäinen vaikutus myös istutustyön tuottavuuteen. Tosin käsiniestutuksessa, jossa keskimääräinen työn tuottavuus oli 314 tainta tunnissa (E_0), selvää eroa työn tuottavuudessa ei ollut. Ecoplanterin tuottavuus oli keskimäärin 290 tainta tunnissa (E_0). Kantojen korjuu lisäsi Ecoplanterin työn tuottavuutta normaalilla työskentelytavalla keskimäärin 4 %.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tulosten mukaan hakkuutähteiden korjuu lisää työn tuottavuutta useimpia mätästys- tai istutusmenetelmiä käytettäessä. Myös kantojen korjuu lisää työn tuottavuutta eräissä työlajeissa. Tulokset osoittavat, että hakkuutähteiden tai kantojen korjuu mahdollistaa myös kustannuksiltaan edullisempien metsänviljelymenetelmien käytön. Tutkituilla työmenetelmillä aikaansaatuja taimikoiden menestymistä pyritään jatkossa selvittämään.

Viitteet

Hartikainen, T. 2001. Hakkuutähteen hankinnan ja maanmuokkauksen yhdistävä menetelmä – PUUY21. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Espoo: VTT Symposium 216. S. 247–253.

Hartikainen, T., Karppinen, H. & Laitila, J. 2002. Hakkuutähteen hankinnan ja maanmuokkauksen yhdistävä menetelmä – PUUY21. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 157–167.

Nurmi, J. & Kokko, A. (toim.) 2001. Biomassan tehostetun talteenoton seurausvaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816. 80 s.

Saksa, T., Tervo, L. & Kautto, K. 2001. Hakkuutähteen korjuun vaikutukset metsän uudistamiseen – PUUT10. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. Espoo: VTT Symposium 216. S. 359–377.

Saksa, T., Tervo, L. & Kautto, K. 2002. Hakkuutähteen korjuun vaikutukset metsän uudistamiseen – PUUT10. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 249–267.

Koneellisen energiapuukorjuun laadunseurannan kehittäminen – PUUT36

Tage Fredriksson & Olli Äijälä
Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio
Soidinkuja 4, 00700 Helsinki
Puh. (09) 15621, faksi (09) 1562 232
E-mail: etunimi.sukunimi@tapio.fi

Abstract

Project title: Development of quality control system for energy wood harvesting

The aim was to study harvesting impacts at mechanically harvested thinning plots of energy wood. Another aim was to test the adaptability of harvest control methods on the quality control of energy wood thinning and to develop the terminology of harvesting impacts. The sites measured were harvested with a combination of felling-bunching-forest tractor and with a harvester. As comparison material, plots harvested manually were studied. Mechanical harvesting of energy wood is a fairly new method, the harvesting technique and methods being under development. The results concerning the level of harvesting impacts should be assessed considering this development work.

The thinning sites under study comprised mainly untreated young planted stands. The parameters describing the quantity of tree stand remaining in the forest were mainly in accordance with forestry recommendations, while problems were due to damages caused to the remaining wood stand. The quantity of damages is dependent on harvesting conditions, technical solutions of harvesting machinery, and work experience of machine operators. The parameters related to driving tracks were in accordance with recommendations.

The control methods tested were an impact surveying method based on a systematic test site line, developed by the Forestry Development Centre TAPIO,

and a constant quality control method of Metsäteho Oy. Both methods are applicable to the quality control of energy wood harvests. This study also indicated that it was difficult to measure the percentage of wood damages exactly with conventional quality control methods.

1. Tausta

Harvennushakkuiden korjuujälki tarkoittaa metsikön puuston ja maaperän tilaa puunkorjuun jälkeen. Käsite pitää sisällään puustovauriot, ajourapainumat, -välin ja -leveyden, leimikon harvennusvoimakkuuden ja puulajivalinnan. Metsäkeskukset aloittivat Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion ohjeistamina harvennushakkuiden korjuujäljen laadunseurannan 1989. Metsäteollisuusyritykset alkoivat samoihin aikoihin seurata korjuujälkeä sisäisenä laadunseurantana.

Vuonna 1997 voimaan tullut metsälaki ja Suomen metsäsertifiointijärjestelmän kriteeristö asettivat osaltaan vaatimuksia korjuujäljelle ja sen seurannalle. Tapio toteutti 2001–2002 laajana yhteistyönä harvennushakkuiden korjuujäljen seurannan yhtenäistämiprojektin. Projektissa kehitettiin uusi korjuujäljen jälkiinventointimenetelmä sekä yhtenäistettiin ja kehitettiin hajanaista korjuujälki-terminologiaa. Metsäteho Oy kehitti samaan aikaan menetelmää korjuujäljen korjuutyönaikaiseen laadunseurantaan. Toteutetut projektit ja kehitetyt menetelmät ovat luoneet vahvan pohjan harvennushakkuiden korjuujäljen seurannalle.

Nuorten metsien energiapuukorjuun eli ns. energiapuuharvennuksen koneellistumisessa näkyy nyt sama kehitysvaihe kuin harvennushakkuissa 1990-luvun alkupuolella. Kun metsureiden ja omatoimisten metsänomistajien määrä vähenee ja kustannustietoisuus lisääntyy, energiapuukorjuu koneellistuu kovaa vauhtia. Tätä kehityssuuntaa voimistaa suunnitelmat puuenergian käytön lisäämiseksi tulevana vuosina. Koneellinen energiapuuharvennus on hyvin nuori työlaji, jonka korjuutekniikka ja korjuumenetelmät on vasta kehittymässä. Tulos energiapuuharvennusten korjuujäljen tasosta tulee suhteuttaa em. kehitykseen.

Energiapuuharvennuksia tehdään koneellisesti pääasiassa kahdella eri korjuumenetelmällä. Tällä hetkellä yleisimmin käytössä on korjuumenetelmä, jossa harvennuksen tekee joukkokäsittelykouralla varustettu kaato-kasauskone ja lähikuljetuksen metsätraktori. Korjurimenetelmää käytetään myös enenevästi ener-

giapuuharvennuksissa. Myös metsuri-metsätraktorimenetelmä on laajasti käytössä nuorten metsien energiapuukorjuussa.

Toiminnan laatuksymykset ovat yhä tärkeämpi osa nykyistä toimintaympäristöä. Puunkorjaajan täytyy voida osoittaa, että hänen toimintansa täyttää yleisesti hyväksytyt laatu- ja ympäristövaatimukset. Kun nuorista metsistä korjatun energiapuun määrät ovat kasvaneet ja toiminta on voimakkaasti koneellistunut, on tullut tarve seurata myös tämän toiminnan metsänhoidollista laatua eli korjuujälkeä.

Harvennushakkuiden korjuujäljen taloudellisista ja biologisista kysymyksistä tiedetään nykyisin suhteellisen paljon. Energiapuuharvennusten korjuujäljestä oli ennen tätä projektia tutkittua tietoa tarjolla hyvin niukasti. Olettamuksena oli, ettei harvennushakkuiden korjuujäljestä tutkittua tietoa voida sellaisenaan käyttää nuoriin energiapuumetsiin, koska energiapuuharvennusten korjuuolot poikkeavat harvennushakkuista. Lähtöpuuston tiheys on korkeampi ja puuston pituus sekä rinnankorkeusläpimitta ovat alhaisemmat kuin harvennushakkuissa. Lisäksi energiapuukorjuussa käytetään erilaisia korjuumenetelmiä ja korjuutekniikkaa.

2. Tavoite

Projektin päätavoitteena oli tuottaa tietoa nuorten metsien energiapuuharvennusten korjuujäljestä, kehittää laadunseurantaan kriteerit ja menetelmät sekä luoda yleisesti hyväksytty korjuujälkiterminologia. Korjuujäljen seurantamenetelmien kehittämisen lähtökohta oli testata Tapion jälki-inventointimenetelmän ja Metsäteho Oy:n työaikaisen laadunseurantamenetelmän soveltuminen energiapuuharvennusten laadunseurantaan. Lisäksi tavoitteena oli kuvata energiapuukorjuun tukijärjestelmä sekä tuottaa tietoa korjuumenetelmien ja koneiden kehityksestä.

3. Toteutus

Projektia ovat rahoittaneet Puuenergian teknologiaohjelma, maa- ja metsätalousministeriö, Metsäliitto Osuuskunta, Stora Enso Oyj, Upm-Kymmene Oyj, Maa- ja metsätaloustuottajien keskusliitto MTK ry ja Koneyrittäjien liitto. Projektia on työpanoksellaan merkittävästi tukenut Metsäteho Oy. Tutkimuskohtei-

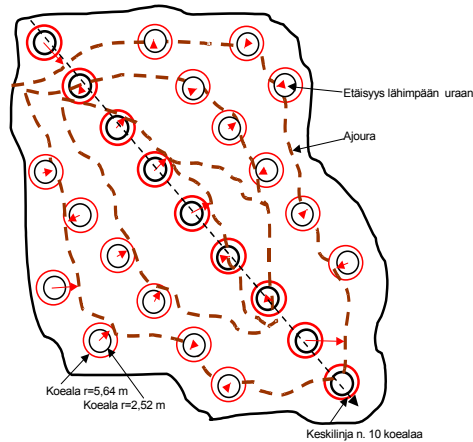
den löytämisessä on lisäksi Vapo Oy ollut suureksi avuksi. Projekti käynnistyi maaliskuussa 2003 ja päättyi saman vuoden joulukuussa.

Projektiryhmään kuuluivat metsänhoitajat Martti Kuusinen ja Olli Äijälä (projektipäällikkö) Metsätalouden kehittämiskeskus Tapiosta.

Projektin johtoryhmään kuuluivat Pekka Airaksinen MTK ry:stä, Matti Gynther Metsäliitto Osuuskunnasta, Pentti Hakkila VTT:stä, Kimmo Roininen Stora Enso Oyj:stä, Mauri Marjaniemi Tekesistä, Toni Mörsky Upm-Kymmene Oyj:stä, Asko Poikela Metsäteho Oy:stä, Tomi Salo Koneyrittäjien liitosta, Matti Sirén Metsäntutkimuslaitokselta, Tage Fredriksson ja Hannu Niemelä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapiosta. Johtoryhmän puheenjohtajana toimi Hannu Niemelä ja sihteerinä Olli Äijälä.

3.1 Maastomittausten toteutus

Koneellisen energiapuuharvennuksen korjuujäljen selvittämiseksi tehtiin mittauksia 26 kuviolla. Kaato-kasauskone- ja metsätraktorimenetelmällä korjattuja kuvioita mitattiin 16 kappaletta. Kaato-kasauskonetyöskentelyssä on kaksi yleisesti käytettyä työmenetelmää: a) normaali joukkokäsittely (mitattiin 13 kohdetta) ja b) korjattavan puun latvuksen katkaiseminen nipsauttamalla (mitattiin 3 kohdetta) ennen puun katkaisemista. Nipsautettu latvus jätetään metsään vähentämään korjuun aiheuttamaan ravinnehukkaa. Korjurimenetelmällä korjattuja kuvioita mitattiin 5 kappaletta. Vertailuaineistona mitattiin Metsuri- (siirtelykaatomenetelmä) ja metsätraktorimenetelmällä korjattuja kuvioita 5 kappaletta.



Kuva 1. Kuvioiden inventointimenetelmä.

Maastomittauksissa inventointimenetelmänä käytettiin Tapion kehittämää korjuujäljen jälki-inventointimenetelmää sovellettuna tähän tarkoitukseen. Mittaus jälki-inventointimenetelmällä toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensin mitattiin kuvion pisimmän halkaisijan lävistävältä linjalta noin 10 koealaa. Sen lisäksi keskilinjän jokaiselta koealalta mitattiin kohtisuora koealalinja (kuva 1). Mittauksille kuvioille tuli keskimäärin 27 koealaa/kuvio. Keskilinjän tuloksen perusteella arvioitiin Tapion nykyisen korjuujäljen seurantamenetelmän soveltuvuus energiapuuharvennuksille. Koko kuvion kattava ympyräkoelaverkko antoi tarkan kuvan kuvion korjuujäljestä ja vertailutason keskilinjalta saadulle tulokselle. Lisäksi testattiin Metsäteho Oy:n työnaikaista laadunseurantamenetelmää, joka on tarkoitettu korjuutyönjohdon ja/tai metsäkoneenkuljettajan korjuuntyönaikaiseen laadunseurantaan.

Jokaiselta ympyräkoelaverkon koealalta mitattiin kaksi eri säteisistä koealaa (kuva 1). Suuremman koealan säde oli 5,64 metriä ja pienemmän koealan säde 2,52 metriä.

Suuremmalta koealalta luettiin: runkoluku puulajeittain. Ensimmäiseltä 10 koealalta kirjattiin runkoluku ja puustovauriot myös 3,99 metrin säteiseltä ympyräkoelalta. Menettelytavan tarkoitus oli selvittää koealasäteen vaikutus tulosten oikeellisuuteen. Joka kolmannelta koealalta mitattiin valtapituus ja koealan puiden rinnankorkeuslähpimitat ($d_{1,3}$). Puustovauriot luokiteltiin sijainnin (runko- tai juurivaurio), koon (cm^2) ja korkeuden (cm juurenniskasta) perusteella. Tavalliset

korjuuvauriot jaettiin normaaleihin vaurioihin, syvävaurioihin ja viiltoihin. Lievät vauriot jaettiin vakavuusluokkiin sen mukaan, ulottuiko vaurio puuaineeseen asti vai ainoastaan nilakerrokseen. Lisäksi mitattiin vauriopuun kohtisuora etäisyys lähimmän ajouran keskelle.

Pienemmältä koealalta luettiin: poistuman määrittämistä varten kannot kpl/puulajeittain. D_K (kantoläpimitta) mitattiin viidestä koealan keskipistettä lähinnä olevasta kannosta. Mitattiin koealan keskipisteen kohtisuora etäisyys lähimmän ajouran keskelle, näin saatiin tietoa harvennusvoimakkuudesta eri etäisyyksillä ajourasta. Kuviolle jääneen hakkuutähteen määrän ja laadun selvittämiseksi laskettiin kaikki koealalle jääneet latvukset, joiden tyvi oli koealalla (kpl). Mitattiin viidestä koealan keskipistettä lähinnä olevasta latvuksesta tyviläpimitta ja latvan pituus. Tunnukset mitattiin vain kuvioilta, joissa energiapuukorjuussa oli käytetty ns. nipsautusmenetelmää.

Ajouratunnusten mittaus: uravälin määrittelemiseksi mitattiin koealan keskipisteen kautta kulkeva lyhin suora kahden rinnakkaisen ajouran keskilinjojen välillä. Koealan keskipistettä lähinnä olevalta uralta rajattiin uraleveyden mittaamiseksi kymmenen metrin matka (5 m oikeaan ja vasempaan uralta) ja urapainumien arvioimiseksi kolmenkymmenen metrin matka (15 m oikeaan ja vasempaan uralta).

4. Tulokset

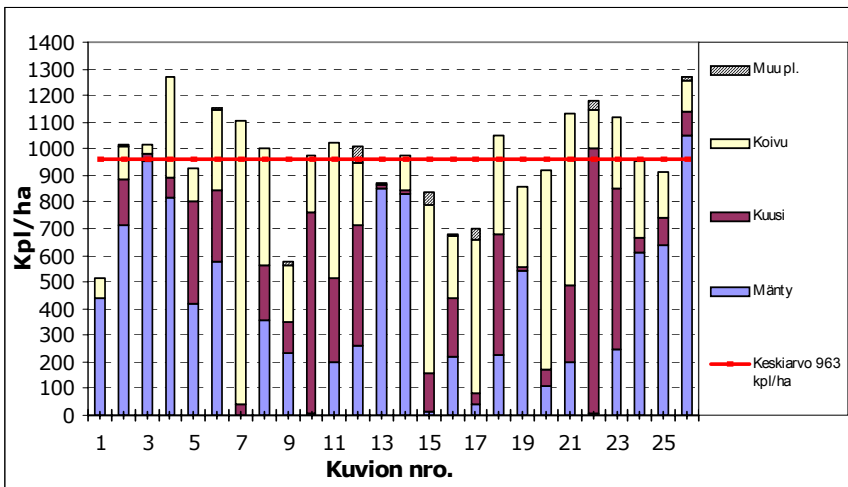
Mitatut kohteet olivat pääasiassa kivennäismaalla kasvavia tuoreen kankaan nuoria kasvatusmetsiä (kehitysluokka 02). Pääpuulajina oli mänty puolella mitatuista kohteista. Kuviot olivat olleet pääasiassa raivaamattomia ennen energiapuuharvennusta. Osalta mitatuista kuvioista oli energiapuun lisäksi korjattu ainespuutakin, valtaosassa kohteista oli korjattu ainoastaan energiapuuta. Puusto oli syntynyt luontaisesti tai kylvön seurauksena merkittävässä osassa kuvioita. Haastetta puunkorjuulle lisää etenkin luontaisesti syntyneissä metsissä ryhmittäinen tilajärjestys ja vesasyntyiset lehtipuurykelmät. Ongelmana kylvämällä syntyneissä metsissä on kylvötuppaiden harventaminen ilman, että jäävää puustoa vaurioitetaan.

Energiapuuharvennusten korjuujälki on hyvin samankaltaista kuin harvennushakkuissa. Lähtöhypoteesina tosin oli, että erot olisivat olleet merkittävämmätkin. Tämän projektin päätulos oli puustovaurioiden määrän, luonteen ja syntyvän selvittäminen. Korjuujäljen tuloksia tulkitessa on aina syytä muistaa, että harvennuksen tekemättömyys on huomattavasti suurempi vahinko ja ongelma kuin vauriot, joita mahdollisesti syntyy puunkorjuussa.

4.1 Kasvatettavan puuston määrä ja laatu

4.1.1 Runkoluku ja pohjapinta-ala

Mitattujen kuvioiden runkolukujen keskiarvo oli 963 kpl/ha (kuva 2), kuusivaltaisissa kuvioissa keskiarvo oli 1 079 kpl/ha, mäntyvaltaisissa 946 kpl/ha ja koivuvaltaisissa 895 kpl/ha. Mitatut runkoluvut olivat jonkin verran metsänhoitosuosituksen ohjearvoja alhaisempia. Kun verrataan kasvatettavan puuston määrää metsänhoitosuositukseen, tulee huomioida puuston synty tapa ja mahdollisten aiempien metsänhoitotoimien vaikutukset. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta voidaan todeta, että kasvatettavan puuston runkoluku on jäänyt hyvälle tasolle. Kuvasta 2 voidaan päätellä puulajikoostumuksen säilyneen monipuolisenä mitatuilla kuvioilla, vaikka merkittävä osa poistumasta olikin ollut lehtipuuta.



Kuva 2. Mitatuilla kuvioilla eri puulajien osuus kokonaisrunkoluvusta (kpl/ha).

Kuvioiden pohjapinta-alat laskettiin koealoilta mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitoista ($d_{1,3}$). Jääneen puuston pohjapinta-alat olivat mänty- ja kuusivaltaisissa metsissä lähellä metsänhoitosuosituksen alarajaa. Pohjapinta-alat olivat koivuvaltaisissa metsissä metsänhoitosuositusten mukaiset. Runkoluku on käytökelpoisempi tunnusluku kuin pohjapinta-ala nuorissa metsissä, joiden valtapituus on alle 12 metriä.

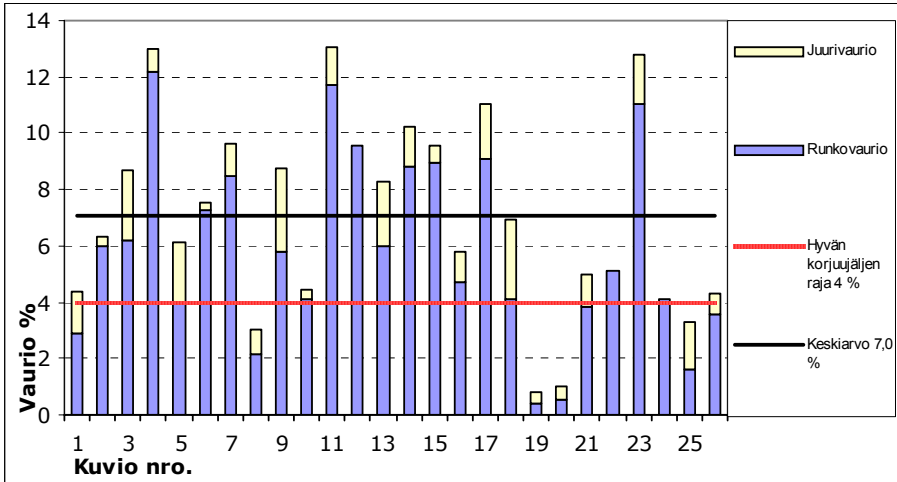
4.1.2 Puustovauriot

Vaurioluokitusta jouduttiin täsmentämään ensimmäisiltä mitatuilta kuvioilta saadun kokemuksen perusteella. Näissä kohteissa oli vaurioita enemmän kuin keskimääräisellä ainespuukorjuukohteessa. Osassa vaurioita oli ainoastaan nilakerros paljastunut. Ongelmaksi vaurioiden luokittelussa muodostui, miten puustovaurion määritelmää pitää tulkita. Täytyykö puuaineen pintaa näkyä koko 12 cm² alalla vai riittääkö, että pelkkä nila näkyy? Ongelma oli myös se, mikä on nilakerros. Etenkin koivulla on nilakerrosta vaikea erottaa, havupuilla erottaminen on helpompaa. Mitä merkitystä puun kasvulle ja puuteknisille ominaisuuksille on nilakerrokseen ulottuvalla vauriolla? Kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijoiden haastattelun perusteella päädyttiin seuraaviin määritelmiin, joita on tässä tutkimuksessa käytetty ja käytetään jatkossa energiapuuharvennusten korjuujälkeä mitattaessa.

Runko katsotaan vaurioituneeksi, jos

- a) sen kuori on rikki nilakerrokseen saakka yhdestä tai useammasta kohdasta yhteensä yli 12 cm² laajuudelta ja puuaineen pintaa on samalla paljastunut yli 1 cm² (normaalivaurio),
- b) siinä on puuaineksen rikkonut ns. syvävaurio (vaurion koosta riippumatta),
- c) siinä on kuoren rikkonut viilto tai viiltoja, joiden yhteenlaskettu pituus on yli 50 cm.

Täsmennys koskee myös harvennushakkuiden korjuujäljen laadunseurantaa.



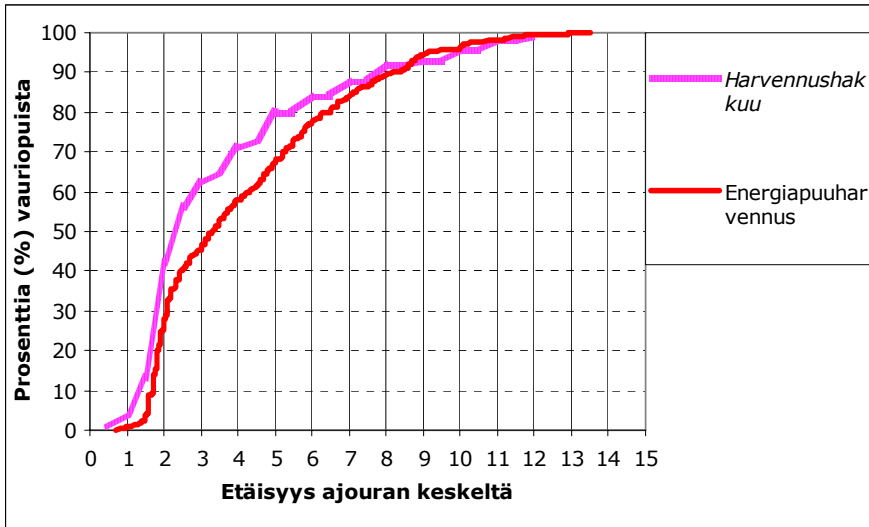
Kuva 3. Vaurioprosenttien koostuminen eri vauriotyypeistä mitatuilla kuvioilla. Yksi hyvän korjuujäljen kriteeri on kohteen vaurioprosenttien jääminen alle 4 %.

Mitattujen kohteiden vaurioprosenttien keskiarvo oli 7 %, josta runkovaurioita oli 5,8 % ja juurivaurioita 1,2 % (kuva 3). Metsäkeskusten korjuujälkitarkastusten puustovaurioprosenttien valtakunnallinen keskiarvo oli 2,3 % 2002. Tässä tutkimuksessa mitatuista vaurioista normaaleja oli 59 %, syvävaurioita 39 % ja viiltoja 2 %. Harvennushakkuilla kaatuvan puun aiheuttamat viiltovauriot ovat yleisiä. Varsinaisten vaurioiden lisäksi oli jäävässä puustossa jonkin verran pieniä nilakerroksen paljastaneita nirhaumia. Koska näistä ei ole olemassa tutkittua tietoa, korjuujälkimittauksissa ei tulevaisuudessa tulla niiden määrää seuraamaan.

Energiapuuharvennusten työmenetelmät ja korjuutekniikka ovat kehityksessä alkuvaiheessa harvennushakkuihin verrattuna. Vaikka koneellisen harvennushakkuun alkuaikojen vaurioprosentit olivatkin suurempia kuin mitä ne nyt energiapuuharvennuksissa ovat, tulee jäävän puuston vaurioitumisen ehkäisemiseen kiinnittää jatkossa erityistä huomiota.

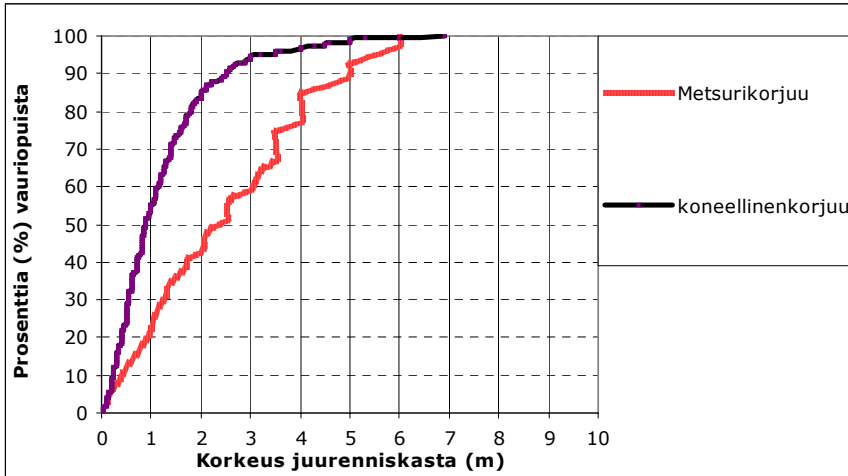
Vaurioiden etäisyys ajouran keskilinjaan on jonkin verran suurempi energiapuuharvennuksissa kuin harvennushakkuissa (kuva 4). Eroa selittää nuorten metsien energiapuuharvennuksissa lähtöpuuston korkeampi tiheys, näkyvyyttä heikentävä raivaamattomuus ja joukkokäsittelykourien rakenne ja koko. Ener-

giapuuharvennuksilla metsuri-metsätraktoriyhdistelmän aiheuttamat vauriot, pääasiassa metsätraktorin, ovat lähempänä ajouran keskilinjaa kuin täyskoneellisen korjuun aiheuttamat vauriot.



Kuva 4. Vaurioiden etäisyys ajouran keskilinjalle harvennushakkuussa ja energiapuuharvennuksessa. Tiedot harvennushakkuista perustuvat Metsäteho Oy:n aineistoon.

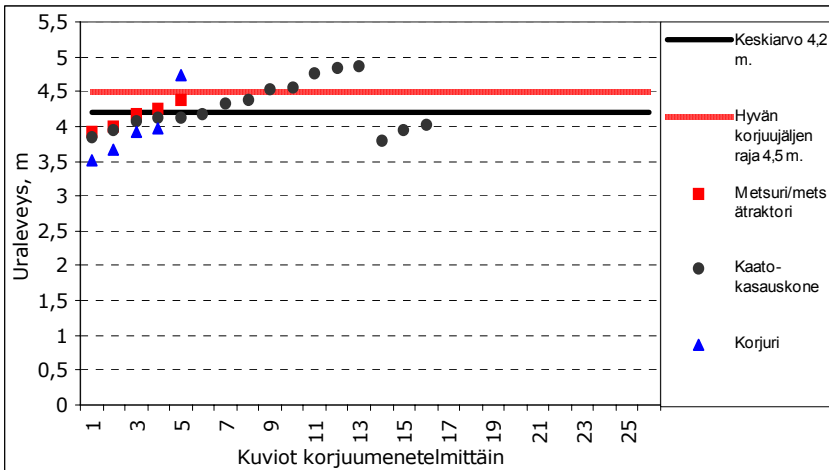
Runkovaurioiden korkeus juurenniskasta on alhaisempi energiapuuharvennuksilla kuin koneellisesti korjatuilta harvennushakkuilta mitatussa aineistoissa. Eroa selittänevät korjattujen kohteiden syntytyyppi ja rakenne sekä joukkokäsittelykourien rakenne ja koko. Joukkokäsittelykouran giljotiiniveitsi vahingoittaa helposti kaatovaiheessa jäävän puustoa tyviä. Hoitamattomissa nuorissa metsissä on paljon kantovesoista syntyneitä puurykelmiä, joita on teknisesti erittäin vaikea harventaa vaurioittamatta jääviä puita.



Kuva 5. Vaurioiden korkeus juurenniskasta mitattuna.

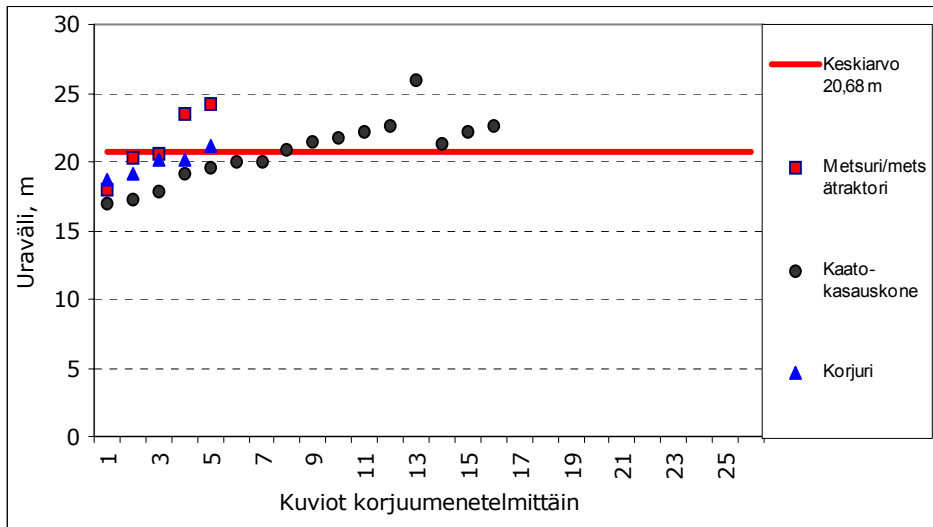
4.2 Ajouratunnukset

Mitattujen kohteiden uraleveysien keskiarvo on samaa tasoa kuin metsäkeskusten tarkastajien mittaamien uraleveysien valtakunnallinen keskiarvo, joka oli 4,05 m 2002. Korjurimenetelmällä korjattujen kohteiden uralevydet olivat jonkin verran alhaisemmat kuin muilla menetelmillä korjattujen kohteiden.



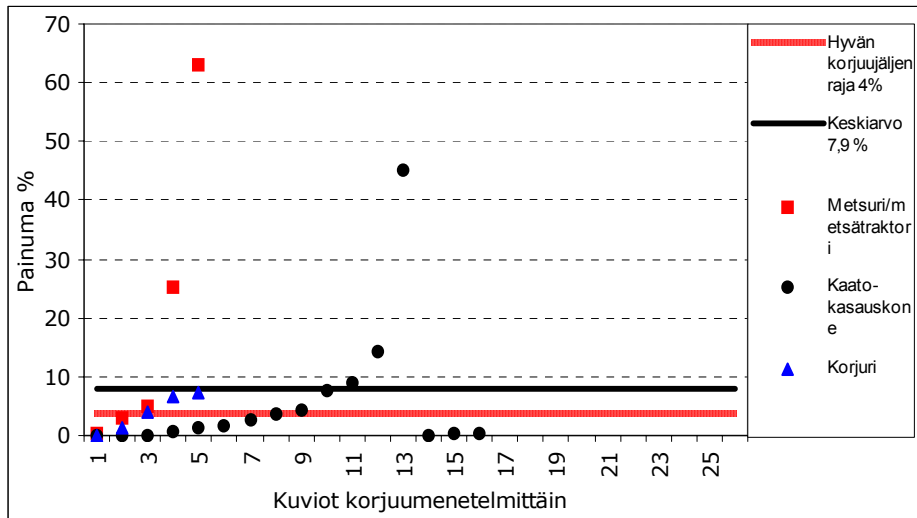
Kuva 6. Uraleveydet korjuumenetelmittäin. Yksi hyvän korjuujäljen kriteeri on kohteen keskimääräisen uraleveyden jääminen alle 4,5 metrin. Ajouraleveyshavaintojen keskiarvo oli tarkastetuissa kohteissa 4,2 metriä.

Mitattujen kohteiden uravälit olivat hivenen alhaisemmat kuin metsäkeskusten tarkastajien mittaamien uraleveyksien valtakunnallinen keskiarvo, joka oli 22,3 metriä 2002. Korjuumenetelmistä korjurikorjuussa oli alhaisin uraväli (keskiarvo 20 m) ja metsuri-metsätraktorimenetelmällä korkein uraväli (keskiarvo 21,3 m). Kaikilla menetelmillä uravälit olivat selvästi metsänhoitosuosituksen mukaiset (suositusuraväli on 20–30 metriä).



Kuva 7. Uravälit korjuumenetelmittäin. Ajouraleveyshavaintojen keskiarvo oli tarkastetuissa kohteissa 20,68 metriä.

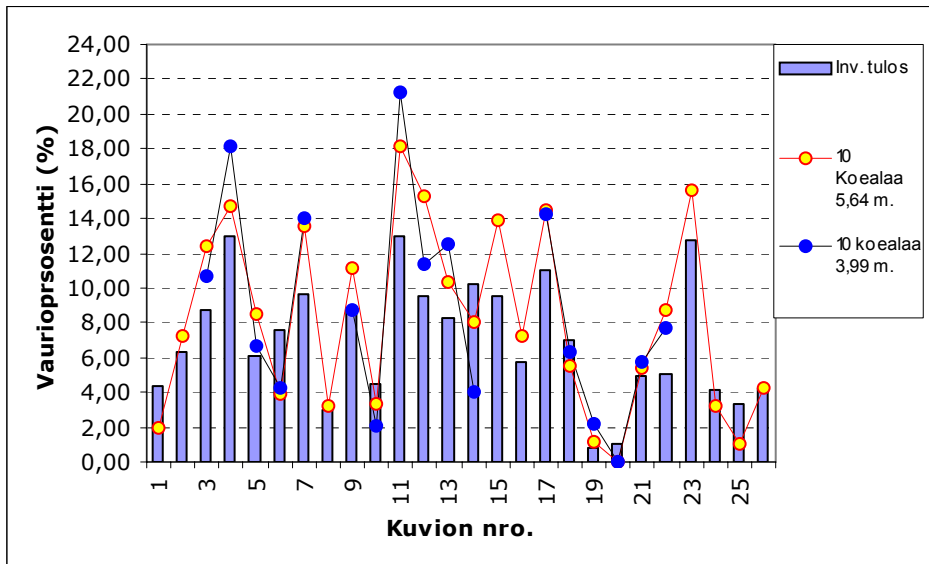
Mitatut urapainumaprocentit ovat korkeammat kuin metsäkeskusten mittaamien uraleveyksien valtakunnallinen keskiarvo, joka oli 2,5 % 2002. Valtaosassa kohteita urapainumaprocentti on suositusten asettamissa rajoissa. Lähikuljetus oli tehty kuvion korjuuoloihin nähden sopimattomana aikana kohteilla, joissa oli paljon urapainumia.



Kuva 8. Maastovauriot korjuumenetelmittäin (painumaprosenttien keskiarvo on 7,9%). Yksi hyvän korjuujäljen kriteeri on maastovaurioiden jäänti alle 4%.

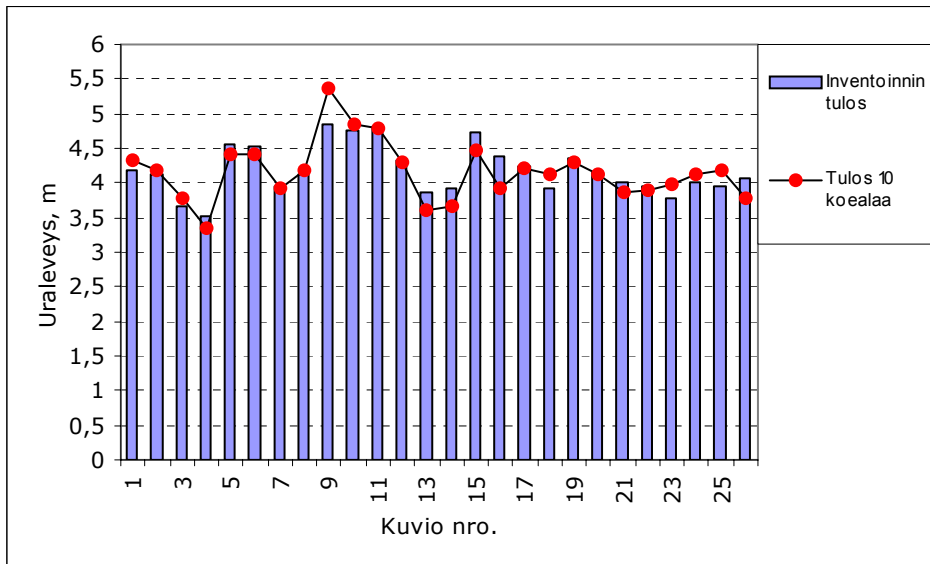
4.3 Korjuujäljen seurantamenetelmien testaus

Testattavat menetelmät olivat Tapion kehittämä jälki-inventointimenetelmä sekä Metsäteho Oy:n työnaikaisen laadunseurannan menetelmä. Tässä käsitellään lähinnä jälki-inventointimenetelmän testausta. Käytännön korjuujälkimittauksissa metsäkeskuksen tarkastajat mittaavat jälki-inventointimenetelmällä noin 10 koealaa kuvion pisimmän halkaisijan lävistämältä keskilinjalta. Tavoitteena oli selvittää, kuinka luotettavia tuloksia saadaan eri korjuujälkitunnusten osalta keskilinjalla mittauksella. Koealasäteen vaikutusta runkoluku ja vaurioprocentti tuloksiin tarkasteltiin myös.



Kuva 9. Vaurioprocentin oikeellisuus 10 koealalla mitattuna kahdella eri säteellä.

Korjuujäljen seurannan yhtenäistämiprojektissa tutkittiin maastomittauksien ja tietokonesimulointien avulla koealamäärän ja tulosten oikeellisuuden välistä riippuvuutta. Silloin todettiin, että 10 koealaa riittää oikeaan ja luotettavaan tulokseen suurimmassa osassa korjuujälkitunnuksia (kuva 10). Ongelmallisin tunnus on vaurioprocentti (kuva 9). Vaurioita on vaikea havaita ja niiden esiintymisen kuviolla on hyvin satunnaista. Ainoa keino suhteellisen luotettavaan vaurioprocenttiin on tässä tutkimuksessa tehty systemaattinen koealaverkkoinventointi, jossa kuviolle tulee noin 30 koealaa.



Kuva 10. Uraleveysmittaukset keskilinjan 10 koealalta.

Yhteenvetona menetelmien testauksesta voidaan todeta, että Tapion jälkiinventointimenetelmä sopii energiapuuharvennusten laadunseurantaan. Myös Metsäteho Oy:n työnaikaisen laadunseurannan menetelmä sopii energiapuuharvennusten korjuujäljen seurantaan.

4.4 Korjuujälkiterminologian kehittäminen

Maastotyö ovat hyvä apu käytännönläheisen terminologian luomisessa ja kehittämisessä. Monet harvennushakkuiden korjuujälkitunnukset, esimerkiksi uraleveys, -väli ja -painuma, sopivat sellaisinaan myös energiapuuharvennuksien korjuujälkiterminologiaksi. Määrittelemistä kaipasivat muun muassa kasvatettavaksi luettava puun ja poistetun puun määritelmä. Terminologian osalta tämän projektin mittavin työ tehtiin, kun pohdittiin puustovaurion määritelmän tulkin-
taa ja ns. lievien vaurioiden merkitystä.

5. Tulosten hyödyntäminen

- Tuloksista tiedotetaan aktiivisesti alan toimijoille.
- Maastomittauksen kokemuksia on jo hyödynnetty ja hyödynnetään harvennushakkuiden korjuujäljen laadunseurantamenetelmien ja korjuujälkiterminologian kehittämisessä.
- Metsäkeskukset alkavat seurata energiapuuharvennusten korjuujälkeä Tapion kehittämällä jälki-inventointimenetelmällä 2005.

Kansainväliset projektit

Teknologiasiiro biopolttoaineiden tuotannossa USA:n ja Suomen välillä – PUUT27

Arvo Leinonen
VTT Prosessit
PL 1603, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 677, faksi (014) 672 597
E-mail: arvo.leinonen@vtt.fi

Abstract

This work has been carried out in Biomass Feedstock Development Program in Oak Ridge National Laboratory (ORNL) during 1.9.2001–31.08.2002. The work and the final report have been made by Dr. Arvo Leinonen who has been working as a visiting research scientist for ORNL. Arvo Leinonen is employed by VTT Processes.

The main focus of this work was to collect and assemble information on the methods and economics associated with collection of wood residues for bioenergy from natural forest systems and from short-rotation fiber production systems. Additionally, information on bioenergy crop development approaches and projected economics has been collected and summarized. Comparisons have been made between the USA and Finnish biomass production and collection technologies to evaluate possible technology transfer opportunities.

In the USA 3.5–4.5 million dry tons (15.3–19.6 TWh in 50% moisture content) of whole tree chips are utilized for fuel annually at present. Forest residues are mainly utilized in power plants for electricity production. There are no subsidies for utilizing wood for fuel. The use of forest residues has an important social and economical impact on the rural areas offering industrial jobs, which in general are decreasing in these regions. There is a huge forest residue potential to increase the use of forest residues for fuel, 23.8–44.8 million dry short tons (103.8–195.3 TWh). Also smallwood, if harvested for fuel, has a potential of

17.0–65.0 million dry short tons (74.1–283.4 TWh in 50% moisture content). The biggest possibility to utilize forest residues for fuel is to co-fire them in coal fired power plants. Small municipal cogeneration (20 MW_{th}) power plants in the northern areas would also be economical and possible users for forest residues. The harvesting technologies in the USA are effective, but there is still potential to intensify them. It would be justified to start an R&D programme to intensify the use of forest residues for fuel for different end users.

1. Tausta, tavoite ja toteutus

Tutkimuksen tavoitteena oli verrata Suomessa ja USA:ssa käytössä olevaa metsähakkeen korjuuteknologiaa ja tällä tavoin pyrkiä kehittämään molemmissa maissa käytettävää korjuuteknologiaa. Työ on toteutettu keräämällä tietoa vierailuilla metsähaketta käyttävissä laitoksissa ja alan kirjallisuuteen tutustumalla. Tutkimus on tehty 1.9.2001–31.8.2002 välisenä aikana, jolloin Arvo Leinonen on työskennellyt Oak Ridge National Laboratoriossa (ORNL) Tennesseessä. ORNL:ssä työskentelee kaikkiaan noin 4500 tutkijaa ja biomassaryhmässä tutkijoita on 15. Ryhmä koordinoi kahta kansallista bioenergia-ohjelmaa. Ohjelmassa pääpaino on erilaisten ruohojen ja nopeakiertoisten puiden kasvattamisessa nestemäisten polttoaineiden ja energian tuotannon raaka-aineeksi. Kun tutkimus tehtiin, niin yksi USA:n dollari vastasi 1.1 euroa.

2. Puun käyttö energiaksi USA:ssa

Vuonna 1997 erilaisen puun käyttö energiaksi USA:ssa oli noin 603 TWh. Tämä on noin 2,7 % koko energian kulutuksesta ja noin 80 % koko biopolttoaineiden käytöstä. Puun käyttö energiaksi koostuu mustalipeästä, metsäteollisuuden muista sivutuotteista, polttopuusta ja kokopuuhakkeesta. Puun energiakäytöstä suuri osa (74 %) käytettiin metsäteollisuudessa. Puuta käytettiin myös talojen ja muiden rakennusten lämmittämiseen (21 %). Pieni osa puusta käytettiin pelkästään sähköä tuottavissa laitoksissa (5 %). Puulla tuotettavan sähkön kokonaistuotantokapasiteetti USA:ssa on tällä hetkellä noin 7 500 MW_e ja puuta käyttäviä voimalaitoksia yli 350 kappaletta.

3. Metsähakkeen tuotantopotentiaali ja käyttö

USA:n 302 miljoonan hehtaarin metsäpinta-alasta noin 204 miljoonaa hehtaaria on metsäteollisuuden käytettävissä. Vuonna 1996 ainespuuta hakattiin USA:ssa noin 467 milj. m³. Hakkuutähdettä USA:ssa vuonna 1996 syntyi kaikkiaan noin 135 milj. m³. Tästä vain osa on taloudellisesti ja teknisesti hyödynnettävissä energiaksi. On arvioitu, että hakkuutähdehakkeen tuotantopotentiaali USA:ssa on noin 103,8 TWh kun tuotantokustannus on alle 7,6 €/MWh ja 195,3 TWh, kun tuotantokustannusrajana on 11,0 €/MWh. Mikäli pienpuu käytetään energiaksi, niin sen tuotantopotentiaali on 74,1–283,4 TWh tuotantokustannusrajan ollessa 7,6 ja 11 €/MWh.

Kokopuuhakkeen käyttöä USA:ssa on vaikea arvioida, sillä siitä ei kukaan USA:ssa kerää tietoa. Olen itse arvioinut tutkimuksessani, että metsähakkeen käyttö on tällä hetkellä 15,3–19,6 TWh vuodessa. Metsähake käytetään pääasiassa sähköä tuottavissa laitoksissa. Metsähakkeen osuus koko USA:n energia-puun käytöstä on 2–3 %. Metsähake tuotetaan pääasiassa kokopuuhakkeena harvennuksista. Kaliforniassa käytetään myös lyhytkiertoista eukalyptushaketta energiaksi. Lyhytkiertoista puuta kuten poppelia ja eukalyptusta kasvatetaan tällä hetkellä koko Pohjois-Amerikassa noin 60 000 hehtaarin alueella lähinnä puumassateollisuuden tarpeisiin.

4. Kokopuuhaketta käyttävät laitokset

Sähköä tuottavat laitokset, jotka käyttävät metsähaketta, sijaitsevat Kaliforniassa ja USA:n kaakkois- ja koillisosissa sekä suurten järvien alueella. Sähköä tuottavat laitokset ovat kooltaan 15–55 MW_e. Shastan voimalaitos Kaliforniassa on yksi sähköä tuottavista voimalaitoksista. Laitoksen sähköntuotantokapasiteetti on 55 MW_e. Laitos koostuu kolmesta liikkuvasta arinakattilasta. Laitoksen hyötysuhde on pieni, noin 20–25 %. Metsähakkeen osuus on vajaa 50 % koko hakkeen käytöstä (1,4–1,6 TWh). Metsähake on kokopuuhaketta harvennuksista ja lyhytkiertopuuviiljelmiltä, ja se hankitaan alle 80 km:n säteellä laitoksesta.

5. Polttoaineen tuottaminen harvennuksista

Metsähake tuotetaan pääasiassa harvennuksista käyttäen ns. kokopuumenetelmää. Menetelmän nimi tulee siitä, että puut kuljetetaan kokopuuna tienvarteen. Tämä on pääasiallinen menetelmä metsän hakkuissa USA:ssa. Kokopuuhakkeen saanto on käytännössä noin 100–200 MWh hehtaarilta.

Kokopuumenetelmä koostui kaatokoneesta ja juontokoneesta. Kaatokone pelkääntään kaataa puut. Se on varustettu keräävällä kaatopäällä, johon sopii kerralla useita pienpuita. Kaatokone voi olla pyörillä tai teloilla varustettu. Pyörillä varustettu kone on nopea ja tehokas. Sen puutteena on, että se ei sovellu mäkiin eikä pehmeisiin olosuhteisiin eikä järeisiin hakkuisiin. Näihin olosuhteisiin on tehty teloilla varustetut kaatokoneet, joissa keräävä kaatopää on kiinnitetty nivelpuominosturin päähän. Kun kaatopäässä on riittävästi puita, niin kaatokone siirtää ne pystyssä palstatie varteen. Tuottavuus kaatokoneella vaihtelee riippuen palstan puusto- ja maasto-ominaisuuksista ja kaatokoneesta, ja on käytännössä harvennushakkuissa noin 25 kuutiometriä tehotuntia kohti (kuvat 1 ja 2).



Kuva 1. Kaatokone New Mexicossa heinäkuussa 2002.



*Kuva 2. Kaatokoneen keräämiä nippuja palsttien varressa Shastassa marras-
kuussa 2001.*

Palsttien varresta kokopuunen menetelmässä puuniput siirrettiin juontokoneella tienvarsivarastoon. Yksi tai useampi nippu kiinnitetään juontokoneen takaosaan puristamalla niput kahden puolikaaren muotoisen pihdin väliin nippujen tyvipäästä ja kohotetaan hieman maasta ylös. Juontokone vetää kuorman perässään sitten varastolle, jolloin puun latvat ja osa rungostakin laahaa maata. Huonoina puolina juontokoneessa on puiden likaantuminen, palstalle kasvamaan jätettyjen puiden mahdollinen rikkoontuminen ja kuljetusmatkan lyhyys. Juontokoneen tuottavuus vaihtelee harvennushakkuissa riippuen ajomatka- välillä 35–45 kuutiometriä tehotunnissa (kuva 3).



Kuva 3. Juontokone vetää puut perässään varastolle tienvarteen Vermontissa tammikuussa 2002.

Normaalisti tienvarsivarastolla puut karsitaan ja katkotaan määrämittaan näihin työvaiheisiin kehitetyillä koneilla. Puuta ei tarkoituksella kuivata varastolla lämpöarvon lisäämiseksi, vaan ne hakkuun yhteydessä haketetaan suoraan rekan puoliperävaunuun. Käytössä on Suomessakin tutut laikka- ja rumpuhakkurit. Hakkurien tuotos on noin 55 kuutiometriä tehotunnissa (kuva 4). Hakkuri puhalsi hakkeen suoraan rekan puoliperävaunuun rekan takaosasta. Rekan peräkärryn tilavuus USA:ssa on yleensä 72 m³. Hakkeen kuljetusmatka on alle 80 kilometriä.



Kuva 4. Kokopuun haketusta suoraan rekan puoliperävaunuun Vermontissa.

6. Hakkeen käsittely laitoksella

Rekan perävaunua ei oltu varustettu millään purkulaitteella. Reikka ajettiin laitoksella alustalle, mihin se lukittiin. Alustaa kallistettiin siten, että hake purkautui kuljettimelle rekan peräpäältä. Tämä on valtamenetelmä hakkeen kuljetuksessa ja purkauksessa USA:ssa. Sen etuna on, että kuormatilaa saadaan lisää, kun rekassa ei ole purkulaitteita (kuva 5).



Kuva 5. Hakkeen purkua kuorma-autosta laitoksella Vermontissa.

Kalifornian Shastan laitoksella oli kaksi suurta kattamatonta polttoainevarastoa, joiden kokonaistilavuus oli yli 250 000 MWh talvikuukausien käytön ajalle, jolloin metsänhakkuu ei ole sallittua Kaliforniassa. Laitoksen varastoista hake syötettiin automaattisesti kolakuljettimella hihnakuiljettimelle, millä se siirrettiin edelleen kattilaan (kuva 6).



Kuva 6. Hakkeen talvivarasto Shastan voimalaitoksella Kaliforniassa.

7. Kokopuuhakkeen tuotantokustannukset

Kokopuuhakkeen hinta käyttöpaikalla oli 6,6–9,2 euroa/MWh. Energiapuulle maksettiin USA:ssa kantohintaa, joka oli 0,6–1,0 euroa/MW. Korjuun osuus on 2,5–3,1 euroa/MWh, haketuksen 1,5–2,0 euroa/MWh ja kuljetuksen 2,0–3,1 euroa/MWh. Kokopuuhakkeen tuotantokustannukset harvennuksista ovat huomattavasti alemmat USA:ssa kuin Suomessa. Tämä johtuu edullisimmista korjuuloista, suuremmasta leimikkokoosta ja tehokkaammista koneista.

8. Johtopäätöksiä

Sähköä tuottavat biomassalaitokset toimivat USA:ssa kannattavuuden rajoilla. Hiilellä sähkön tuotantokustannukset ovat noin 2,8 s/kWh, kun tuotantokustannukset biomassalaitoksissa ovat huomattavasti korkeammat. Biomassalaitokset eivät saa USA:ssa mitään valtion tukia.

USA:ssa monin paikoin ovat tällä hetkellä suurena vaarana ja uhkana vuosittaiset metsäpalot, mikä osittain johtuu hoitamattomien metsien suuresta puuainemäärästä. Tämä on otollinen metsäpalojen syttymiselle ja leviämiselle. Metsähakkeen käytöllä energiaksi metsäpalojen riskiä voidaan vähentää. Monin paikoin hakkuutähteet poltetaan tienvarsivarastolla avoimissa nuotioissa.

Tällä hetkellä USA:ssa ei panosteta tutkimuksellisesti metsähakkeen käyttöön suorassa poltossa. Tulevaisuuden käyttökohteita USA:ssa ovat puun ja hiilen yhteispoltto nykyisissä voimalaitoksissa, kaasutusteknologia sähkön tuotannossa (IGCC) sekä pienet (15–25 kW) haketta käyttävät, sähköä ja lämpöä tuottavat yksiköt. Näiden kohteiden lisäksi tutkitaan paljon liikennepolttonesteiden valmistusta selluloosapohjaisista raaka-aineista.

Suomassakin kannattaa tarkastella, ja mahdollisesti kokeilla käytännössä uusia USA:ssa käytössä olevia kokopuun korjuukoneita taimikonhoidossa ja harvennuksissa työntehokkuuden lisäämiseksi.

Kirjallisuus

Leinonen, A. 2002. Kokopuuhakkeen käyttöä sähkön tuotannossa Kaliforniassa. *Suo ja Turve* 1/2002.

Leinonen, A. 2002. Lyhytkiertoisien eukalyptuspuun viljelyä ja käyttöä Kaliforniassa. *Suo ja turve* 2/2002.

Leinonen, A. 2003. Puun energiakäyttö USA:ssa. *Puuenergia* 1/2003.

Leinonen, A. 2004. Harvesting technology of forest residues for fuel in the USA and Finland. Espoo: VTT Research Notes 2229.

Maximum biomass use and efficiency in large-scale cofiring – PUUT31

Pasi Vainikka, Raili Taipale, Kari Hillebrand,
Pertti Frilander & Teuvo Paappanen
VTT Prosessit
Koivurannantie 1, 40101 Jyväskylä
Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 597
E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Tiivistelmä

Puupolttoaineiden kilpailukykyä voidaan parantaa ratkaisemalla polttoaineiden käsittelyyn ja käyttöön liittyviä ongelmakohtia. Puun seospoltto turpeen tai hiilen kanssa tarjoaa mahdollisuuden vähentää päästöjä ja hallita erityyppisten polttoaineiden vaikutuksia kattilassa. Voimalaitoksen hyvän käytettävyyden ja hyötysuhteen ylläpitämiseksi polttoaineen laadun tulee pysyä mahdollisimman hyvänä vuodenajasta riippumatta ja polttoainekäsittelyn on toimittava mutkattomasti.

BIOMAX (Maximum biomass use and efficiency in large-scale co-firing) -hankkeessa tutkitaan valituilta osin koko Oy Alholmens Kraft Ab:n voimalaitoksen energian tuotantoketjua. Tarkastelun kohteina ovat polttoaineen hankinta ja käsittely, kattilan palamisolosuhteet, likaantuminen ja korrosio sekä poltosta syntyvät päästöt. Tutkimuksessa tehdyistä kokeista osa tehtiin Oy Alholmens Kraft Ab:n voimalaitoksella ja osa kahdella eri pilottikokoluokan koepolttolaitteistolla VTT Prosesseilla ja Kvaerner Power Oy:llä. Tavoitteena on osoittaa modernin kiertoleijukerrostekniikan soveltuvuus maksimoitaessa biopolttoaineiden osuutta suuren kokoluokan voimalaitoksissa. Tähän kuuluu polttoaineen käsittelyn ja laadun tarkkailun parantaminen sekä turvallisten polttoaineseossuhteiden määrittäminen kuoren, hakkuutähteen, hiilen ja turpeen seospoltossa. Leijupolton etuina voidaan pitää mahdollisuutta käyttää erilaisia polttoaineita, halpaa rikin poistoa sekä pieniä NO_x-päästöjä sekä palamattomien vähäistä määrää.

Tutkimusprojektin sisältö jakautuu kahteen kokonaisuuteen. Ensimmäinen kokonaisuus sisältää polttoaineen laadun hallintaan ja käsittelyyn liittyviä tehtäviä ja toinen lähinnä polttoon liittyvien potentiaalisten ongelmien ratkaisua. Projekti on alkanut tammikuussa 2002 ja se päättyy kesäkuussa 2004. Hanketta rahoittaa EU:n 5. puiteohjelman lisäksi Tekes.

1. Background

The selection range of solid bio-fuels used at power plants in Finland is increasing. Especially the use of forest chips is increasing. The ability to control fuel quality requires understanding of the effect of quality variation of different fuels. This is emphasised particularly when large quantities of logging residue are being used. By solving operational problems and reducing fuel originated risks in combustion the economics of co-fired power plants can be further improved.

In case of large power plants, appropriate logistic arrangements of long-distance transport are important in ensuring fuel supply, right volume and fuel properties and in minimising the transport costs. Proper storage method will contribute to the decrease of moisture content of the fuel, thus increasing the heat value and decreasing dust, mould and other harmful microbes. Fuel dust causes fire and occupational risks to employees working inside reception facilities of a power plant. Large power plants have crushers, which are used to process the minor wood volume incoming among the bulk of peat. The newest crushers are designed to process also other wood fuels, such as loose or bundled logging residue and small-size wood from first thinning.

Alholmens Kraft's boiler, the largest biofuel fired CFB-boiler in the World (550 MW_{th}, 194 kg/s, 165 bar, 545 °C), represents the best-practise biomass/fossil fuel co-fired power plant concept with extremely diverse fuel range - suitable to be replicated almost anywhere in Europe. In the current project the consortium is focusing on providing means to improve competitiveness and environmental performance of this power plant.

This text tackles with the part VTT Processes carried out on Tekes' support. In the time of writing results' analysis of the full-scale combustion experiments (other project partners carried out this) is still going on. The list of publications

is updated to the project www-pages (www.tekes.fi) wherefrom the newest information can be found later on, also about the full-scale experiments.

2. Objective

The objective of this R&D project is to show the viability of modern Circulating Fluidized Bed (CFB) technology in maximising the use of biomass fuels in large-scale combined heat and power generation. This includes providing means for safe, sufficient and well-controlled biomass fuel supply and handling as well as for appropriate and safe boiler operation.

The challenge should be approached from two directions: on one hand, biomass fuels can cause operation problems in fuel storing, receiving and handling systems due to heterogeneous properties of biomass fuels, and on the other hand, biomass fuels may induce deposit formation and corrosion problems in boilers due to the specific chemical characteristics of biomass fuels. Therefore selected topics from the whole fuel “life cycle” are tackled starting from fuel procurement and handling, going through combustion, deposit formation and corrosion tests to emission control and monitoring. Also advanced fuel characterisation methods and chemical calculations have been applied in the research.

2.1 Project partners

- VTT Technical Research Centre of Finland, Finland
- Oy Alholmens Kraft Ab, Finland
- Fundación CIRCE, Spain
- Kvaerner Pulping Oy, Finland
- Elsam Engineering A/S, Denmark
- Åbo Akademi University, Finland.

3. Results from fuel receiving, handling and procurement

The study included following tasks:

Fuel procurement and logistics of fuel deliveries:

- The quality control and storing of fuels
- The logistics in fuel supply.

Fuel receiving and handling:

- The prevention of fires and explosions at power plant, literature
- A study on dusting in fuel unloading facilities at selected Finnish power plants
- The health effect of dust, literature survey
- Dust measurements at Alholmens Kraft's power plant
- The crushing tests of wood at Alholmens Kraft's power plant.

3.1 Fuel procurement and logistics of fuel deliveries

3.1.1 Quality control and storing of peat and wood fuel

Peat producers have established ways of action for quality control and storing. Experienced producer can keep the overall moisture content variation quite low, although variation, for example, between truckloads can be higher: typically the standard deviation of moisture content is ± 4 percentage. Wood fuel production does not yet have same kind of knowledge, settled production practices and quality control methods as peat has, thus the moisture content variation of delivered wood fuel is higher compared to peat. Especially the seasonal variation is high, while that of peat is almost insignificant. The wide quality range results partly from the small stacks and from the porous structure of stacks allowing water to penetrate into a stack.

Drying of loose logging residue can take place on terrain (summer time) or on roadside piles (winter and summer time), when piles are made from loose or bundled residue. Terrain drying is the fastest way of drying: drying time is 1–3 weeks, while drying of stacks takes one summer. When chipping or crushing takes place during winter, the snow covering the pile should be carefully peeled off, so that it does not mix with the material and increase the moisture content of chips.

According to survey at power plant, the average moisture content of all peat during observation period (July 2002 – June 2003) was 44.7%, which is relatively good value. The moisture content between production sites and truckloads varies to some extent.

3.1.2 Logistics in fuel supply

The most important goals of fuel supply system for power plants can be listed as follows:

- the supply of fuel with even and expected moisture content over short period of time
- to minimise the traffic volume and to avoid traffic jams at receiving stations, so that the idle time of trucks can be minimised
- reliability of fuel supply.

The goals of fuel supply system for fuel supplier can be listed as follows:

- planning of the deliveries based on the bookkeeping of the fuel properties of stacks
- ensuring the transport capacity of the hauling equipment
- optimisation of the total haulage.

3.2 Fuel receiving and handling

3.2.1 Prevention of fires and explosions at power plant

Peat dust causes problems at power plant's receiving station, in conveyor system and in silos. Peat dust can settle down to various locations in handling and feeding system, which forms a significant fire risk if regular cleaning is neglected. However, serious fire and explosion accidents are nowadays rare. Improved fire safety is achieved with advanced technology, such as comprehensive pre-extinguish and sprinkler systems, steam based extinguish of boiler feed, spark and carbon monoxide detection as well as with experience from correct use of the equipment.

Six different peat-fired power plants were visited to study the operation and problems of the fuel receiving equipment. All installations were large CHP-plants. The annual use of peat was between 710–3800 GWh.

The amount of dusting varied between power plants. None of the plants were totally dust free, because massive airflows caused by unloading are very difficult to handle. The length of unloading space of some receiving stations is too short, so that one of the doors must be kept open during unloading. The greatest inconvenience is caused to the truck drivers working inside the halls and only minor amount of dust spreads outside the facilities. It seems that personnel working inside unloading halls are used to dusting and do not pay sufficient attention to it. Some plants use air fans and water spraying to clean the outgoing trucks.

According to study following improvements can be made to equipment of unloading facilities:

- Walls and floor are made plain (no shelves) to make cleaning easy.
- The unloading pit is deep/spacious enough.
- The unloading pit is equipped with air deflectors which limit the out-bursting airflow.

- To limit the dusting to small space with doors and similar structures, so that the entire hall area is not contaminated. Dust removal from small volume is more efficient. In practice, dust removal with dust collectors from large air volumes is not feasible, because of the high fan capacity required.
- More efficient lighting to improve visibility (because of dust/water vapour).
- Instruct drivers to use compressed air cleaning of trucks.

3.2.2 Health effects of dust

Peat dust can be regarded as inert dust. Peat includes substances, which have sterilising effect against bacteria and mould fungus. Therefore the dust does not cause same kind of stress to respiratory system as wood chips' dust. However, peat dust has irritating effect, which reduces working capability and causes symptoms to people, who suffer from the lung insufficiency. In Finland the threshold for HTP-value on air (known to be as harmful concentration) is 10 mg peat/m³ of air.

Chipped wood and agro-biomass can be a favourable substratum for microbes, such as mould and yeast fungus and bacteria that live by decomposing the material. Microbes cause allergies on respiratory system, toxic compounds produced by bacteria or other harmful substances in dust affects organs and the dust itself can irritate. Most people can tolerate concentrations which are under 10⁶ spores/m³ of air, but higher microbe contents, 10¹⁰ spores/m³ can cause allergic reactions. The exposure time is also crucial and symptoms vary between individuals. Some research results indicate that microbe content only 10³ to 10⁴ per m³ can cause health effects.

According to measurements the microbe content of fresh and stored logging residue is clearly so high (10⁷–10⁸ /g), that it has to be taken into account when the health risks of the employees are evaluated. Personal dust filters can filter dust, fibres, fumes, smoke and even bacteria and viruses. The usage of filters is the most effective way to prevent falling ill to respiratory system disease.

3.2.3 Dust measurements at Alholmens Kraft's power plant

Dust measurements were carried out inside and outside the fuel receiving station. Inside the station, near the unloading zone momentary maximum values of dust concentration during rear unloading of a truck load were between 80–180 mg/m³ of air. The corresponding values for side unloading were between 80–380 mg/m³ (Figure 1). Although the momentary dust concentrations near the unloading zone in side-unloading are higher compared to rear-unloading, causes rear-unloading higher total dusting during 15-minute test period. The total dust concentration of rear-unloading is 2- to 3-fold, and 6- to 8-fold near the unloading spot, compared to side-unloading. On both cases dust concentrations exceed the dusting (15-minute average) threshold value set for the organic dust (10 mg/m³) inhaled by the employees, which means that the personal P3-class dust filters must be used when working inside the unloading hall. Dust concentration to which the truck driver was exposed to was 3–4 times higher during rear-unloading compared to side-unloading. According to the results the dusting caused by unloading is independent of the season. Outside the unloading hall dust concentrations are low.

Peat dust is quite coarse. Coarse dust will deposit quite effectively down on the floor. Therefore it is difficult to decrease dust concentration in peat receiving stations by increasing general ventilation. Contrary, possibilities to reduce dust problem by developing unloading system and local ventilation for unloading should be studied.

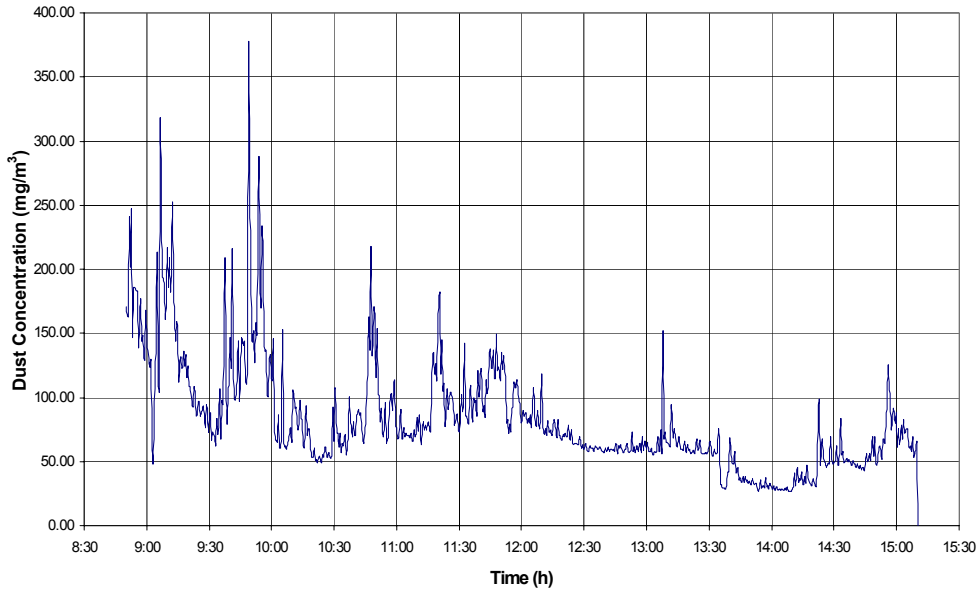


Figure 1. The temporal variation of dust concentration at the location nearest to the unloading zone. Measured by an aerosol monitor Mini Ram 1.

3.2.4 Crushing tests of wood at Alholmens Kraft's power plant

The first crushing station in Finland, which is particularly suitable for production of logging residue chips, was built to Alholmens Kraft's power plant. The equipment includes high revolution, high capacity crusher, which is equipped with cutting edges. Conveyor belts lie before and after the crusher to feed the material and remove the chips. The materials used in crushing tests were spruce branch bundles, pine branch bundles, spruce dominated loose logging residue and bundled and loose whole tree from thinning of young forests. Two bundles fit simultaneously to the feeder belt and to the crusher intake.

The maximum capacity of the crusher could not be measured, because of the blockage of the output conveyor. Some interrupts occurred on the feed conveyor and on entering reel of the crusher. With best feeding materials the capacity of 160 m³/h was achieved, which fulfils the criterion that was set to the crushing station. At the time, the feed rate was 0.2 m/s and on average 1.5 bundles were fed together. The lowest capacity, 78 m³/h, was measured to loose logging residue.

The sound power levels of the crusher were measured with precision sound level meter. There were four different measurement points at a distance of 12 meters from the crusher (European Standard EN ISO 3746:1995). On directions of the inlet and outlet of the conveyors the sound power level is higher than on directions facing the closed walls. Nevertheless, the sound power level was below 85 dB on all test points. The sound power level inside the station was 97 dB, which means that hearing protectors must be used. The sound power levels during crushing and on idle-running are almost equal and the human hearing can not distinguish the difference.

4. Results from combustion experiments

Pilot scale CFB reactors applied in this research can be used in characterising fuels in CFB conditions without the necessity of introducing them to full-scale boiler. By pre-characterising fuels boundary conditions for full-scale experiments can be set and comparison made between different feasible options. Yet, fine tuning of the fuel blend composition has to be carried out at a 'real' plant. The objective was set as to characterise the behaviour of different blends when compared to each other. The main areas of interest were the behaviour of fuel ash and determining the level of risk for hot corrosion with 11 blends of bark, logging residue, peat and coal.

The Circulating Fluidised Bed reactor at VTT Processes (see Figure 1) has 50 kW fuel capacity. The CFB reactor consists of an air/water-cooled ceramic chamber with fluidised bed within. The inner diameter of the reactor is 16.7 cm and height 8 metres. The process measurement and control system is PC-controlled and based on a purpose-developed computer programme.

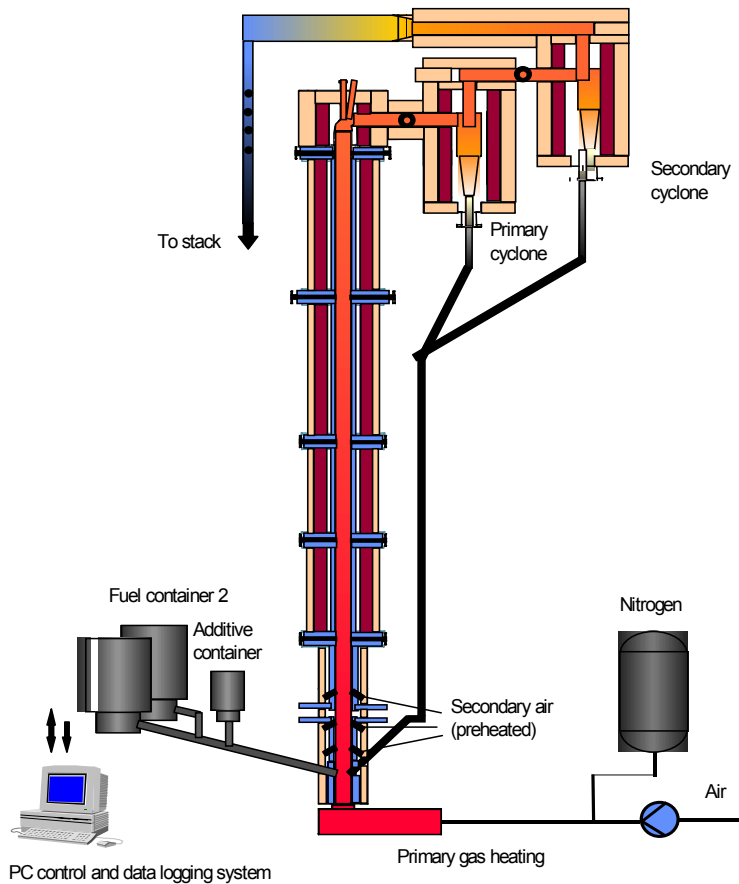


Figure 2. Schematic drawing of the $50 \text{ kW}_{\text{fuel}}$ pilot reactor at VTT Processes. In addition to the main features of the reactor the location of sampling ports, heated/cooled zones and flue gas path are shown in the figure.

Two boiler load conditions were applied, maximum load (100%) and minimum load (45%). At maximum load the combustion gas temperature in the furnace was $870 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, gas velocity 4 m/s and excess air ratio 1.2 and at minimum load gas temperature was $770 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, velocity 2 m/s and air ratio 1.4. These conditions correspond to Alholmens Kraft's design values. Fuel blends for the experiments were selected so that they would represent normal process situations. The shares of different fuels in the experiments are shown in Table 1. Fuel moisture varied between 36 and 41%.

Table 1. The experiment matrix.

Exp. #	Duration, h	Load, %	Share of fuel in the blend (enb.-%)			
			Logging residue	Bark	Peat	Coal
1	6	100	49	51	-	-
2	6	45	49	51	-	-
3	6	45	39	-	61	-
4	7.3	100	40	39	21	-
5	8	100	20	39	41	-
6	8	100	10	38	52	-
7	8	100	10	38	52	-
8	8	100	15	26	45	14
9	8	100	30	-	35	35
10	8	100	31	-	36	34
11	8	45	100	-	-	-

[†] Parallel to previous experiment, but with limestone feeding

Experiments were started with 100% load by combusting a blend of 50% (enb.) logging residue and 50% bark. The same fuel blend was applied also in a 45% load experiment. The objective was to bring out the characteristics and effects of pure wood based fuel blend without offsetting the possible drawbacks of the blend with peat or coal.

In experiment #3 logging residue was combusted with peat at minimum load. The objective was to characterise Alholmens' minimum load situation with relatively high share of peat (60%).

In experiment #4, #5 and #6 fuel blend included logging residue, bark and peat. This is standard blend composition for Alholmens' boiler. The share of logging residue was decreased from 40 to 10% and the share of peat was increased from 20 to 50%. The share of bark was kept at 40%. The objective was to search for the highest safe share of logging residue in the blend. Experiment #7 was carried out with same blend as #6, however, limestone was added in Ca/S-ratio of 2.6.

In experiment #8 the objective was to apply a blend that represents a 'business as usual' situation, but when coal is needed. In #9 and #10 logging residue was

combusted with coal and peat. The share of logging residue was 30%. Compared to experiment #9, experiment #10 included limestone feeding in Ca/s-ratio 2.5.

In experiment #11 logging residue was combusted at minimum load. This was to compare the characteristics of pure logging residue to bark/residue blend.

4.1 Fuels

In Table 2 are shown proximate and ultimate analysis of fuels used. Values are typical for the fuel types with the exception of relatively high chlorine content of peat. Peat is Finnish milled peat, logging residue is 'fresh' residue needles included and coal is Polish coal.

Table 2. Proximate and ultimate analysis of fuels.

		Peat	Bark	Logging residue	Coal
Moisture ⁽¹⁾	%	45,0	17,4	8,2	11,0
Ash, 815 °C	%	4,77	2,51	2,57	12,47
Ash, 550 °C	%	4,66	2,78	3,01	12,90
Volatile matter	%	70,7	76,4	76,1	36,83
Higher heating value	MJ/k	21,2	21,3	21,3	28,9
Lower heating value, d ⁽²⁾	MJ/k	19,9	20,0	20,0	27,9
Lower heating value, ar ⁽³⁾	MJ/k	9,9	16,1	18,2	24,5
Carbon	%	53,5	53,4	53,4	72,51
Hydrogen	%	5,76	6,14	6,06	4,79
Nitrogen	%	1,34	0,34	0,48	1,68
Sulphur	%	0,17	0,09	0,06	0,30
Chlorine	%	0,079	0,024	0,029	0,013
Oxygen	%	34,38	37,50	37,40	8,24
Ca/S atomic ratio ⁽⁴⁾		1,5	6,6	12,0	1,4
O/N atomic ratio		26	110	78	5
S/Cl atomic ratio		2,3	4,1	2,1	25,5

⁽¹⁾ At VTT after crushing

⁽²⁾ Dry fuel

⁽³⁾ As received

⁽⁴⁾ Ca from fuel ash analysis

In Figure 3 is plotted the content of selected elements in fuel ash calculated as wt-% in fuel blends' ashes. This figure shows well how the composition of ash changes when increasing the amount of peat and coal in fuel blends: contents of calcium, potassium and zinc decrease and aluminium increases. It is not only the proportion of elements in the ash but also the reactivity of ash that dictates the behaviour of this inorganic material. So called fuel fractionation can reveal further differences in blend ashes. Results from this are to be reported elsewhere, see the list of publications.

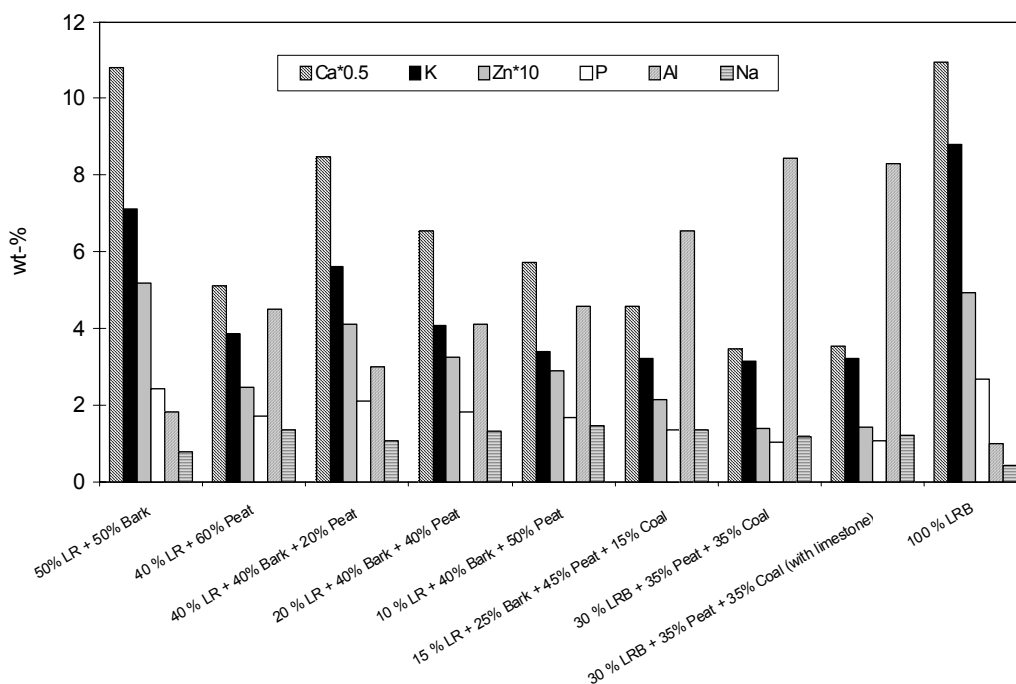


Figure 3. Share of selected elements in fuel blend ashes.

As sulphur to chlorine ratio is often referred to in the context of corrosion characterisation, in Figure 4 are shown sulphur and chlorine weight percentages in the fuel blends and S/Cl atomic ratio. With the exception of #9, all the blends settle between $2 < S/Cl < 4$. Values have been calculated based on the results from ultimate analysis, not fuel ash analyses.

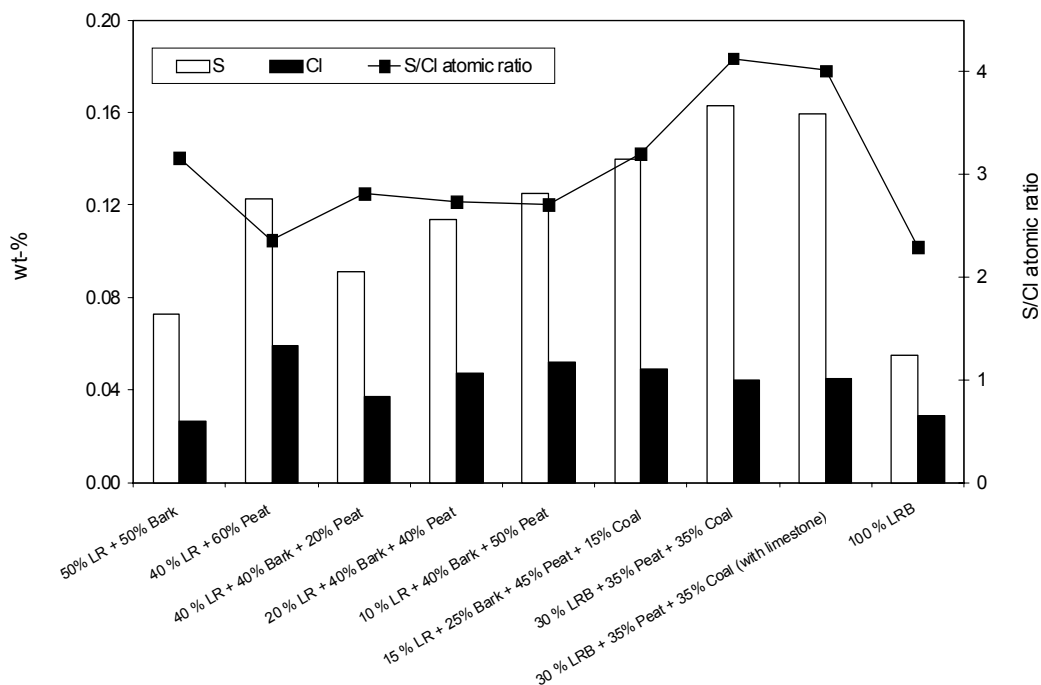


Figure 4. Total sulphur and chlorine in the fuel blends and S/Cl atomic ratio. There is only one set of values for experiments #1 & #2 and #6 & #7 because these were parallel experiments. Experiments #9 & #10 had a slight difference in fuel composition and they have been plotted separately.

4.2 Flue gas composition

Concentrations of main flue gas components in the experiments are listed in Table 3. In experiments #1 to #3 there was no FTIR measurement; consequently values for NO_2 , N_2O and C_xH_y are not available. Notable offsets from the general trend are high CO concentration in experiment #9 and low NO concentration in experiment #4. The previous could be involved with the formation of nitrous oxide, N_2O , in coal co-firing and the latter is probably due very low excess air ratio.

Table 3. Concentration of main flue gas components in 6% O₂.

Exp. No	CO ₂ %	CO ppm	SO ₂ ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	N ₂ O ppm ^(*)	C _x H _y ppm ^(*)
1	14	28	3	186	- ^(**)	-	-
2	13	32	0	234	-	-	-
3	13	44	1	195	-	-	-
4	12	18	15	112	4	7	13
5	14	27	26	141	5	24	21
6	14	32	40	142	6	21	14
7	14	28	12	162	6	23	14
8	13	80	46	140	5	32	15
9	13	123	64	124	5	67	14
10	13	91	36	149	5	46	12
11	14	28	0	268	7	15	18

^(*) FTIR

^(**) No FTIR measurement in experiments 1–3.

In Figure 5 is shown the sum of the concentration of gaseous nitrogen species in flue gases. It can be concluded that pure biomass combustion in CFB produced higher NO and lower N₂O emissions than blends with high share of coal or peat. It can be concluded further that limestone feeding catalyses the formation of NO and decomposition of N₂O. This is in good agreement with literature. This result has been obtained even if the excess oxygen (in flue gases) in #9 was 4.4 vol-% and in #10 as low as 2.3%. In the case of experiments #6 and #7 the excess oxygen levels were 2.6% and 4.1%, respectively. These differences make the evaluation of other contributors, like the effect of calcium as a catalyst, somewhat difficult.

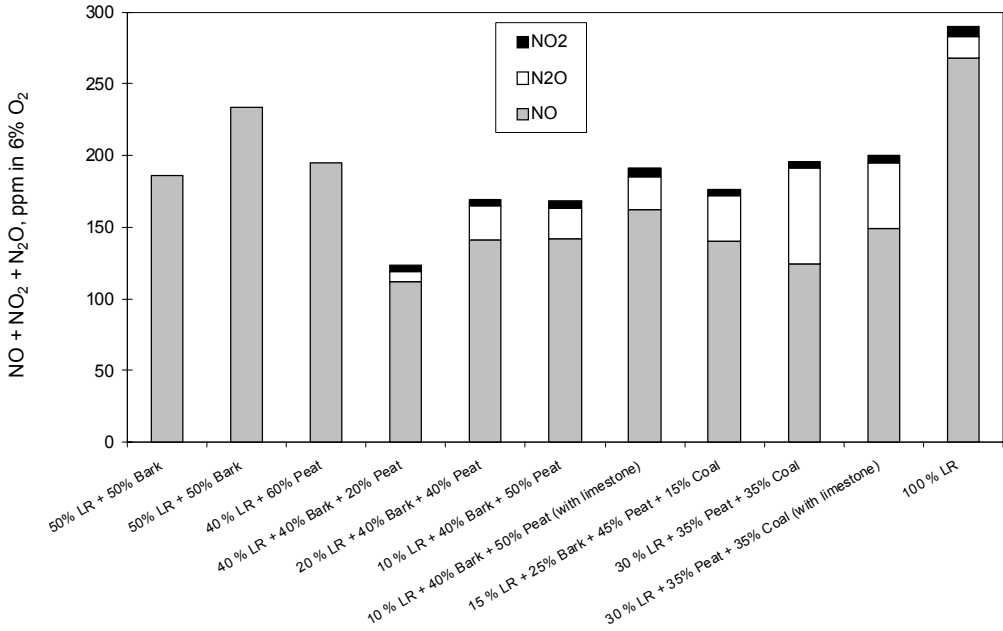


Figure 5. The sum $NO+NO_2+N_2O$ in the experiments.

SO₂ emission can be effectively reduced in FBC by feeding limestone to the combustor. Two experiments with limestone feeding were carried out, i.e. #7 and #10. In #7 Ca/S (feeding) ratio was 2.6 and in #10 2.5. Limestone feeding resulted in 70% and 44% reduction in the SO₂ emissions respectively. In biomass co-firing where high amounts of calcium is available from biomass ash the ‘effective’ Ca/S ratio should be used. This could be defined as

$$Effective\ Ca/S = \frac{Ca_{fuel} + Ca_{limestone}}{S_{fuel}} \quad (1)$$

In Figure 6 are plotted SO₂ reduction-%'s in the experiments. Reduction-% can be calculated as

$$SO_2 \text{ reduction} - \% = \left[1 - \frac{SO_2 \text{ in flue gases (ppm)}}{SO_2 \text{ theoretical maximum (ppm)}} \right] \cdot 100\% \quad (2)$$

The ability of fuel originated calcium to bind sulphur can be called as self-desulphuration or autoretention. In the plots shown in this text black dots and triangles represent values for autoretention. Data plotted with white circles is that from limestone feeding cases.

Very high reduction efficiencies in the 45% load experiments could be explained with smaller combustion gas velocities in the furnace and the consequent longer residence time. Temperature changes the efficiency of SO₂ reduction but it can not be said that it would work in favour of either experiment conditions.

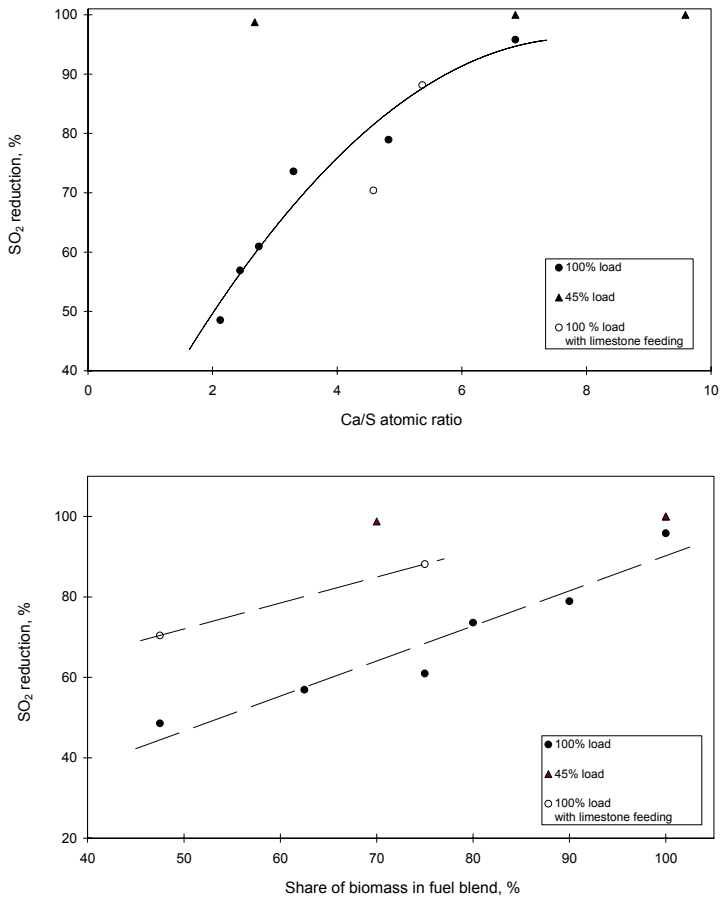


Figure 6. SO₂ reduction-% as a function of effective Ca/S atomic ratio (above) and share of biomass in fuel blend (below).

SO₂ contributes also to the behaviour of chlorine in the furnace. SO₂ can sulphate KCl and free Cl to form HCl. HCl-conversion describes the extent of conversion of total chlorine in fuel to gaseous HCl. If all the chlorine in fuel converts to HCl, conversion is 100%. The lower the conversion, the higher is the risk for alkali chloride deposition. The use of conversion is reasonable as it does not make distinction between experiments with different absolute values for chlorine in fuel blend. In other words, also low chlorine content can result in Cl-corrosion if conversion is low. By using this as justification, SO₂ concentrations in the gas phase were plotted versus HCl-conversions in Figure 7. Correlation is very good. The effect of aluminium silicates in reducing chlorine deposition can not be separated in these experiments from sulphur's effect.

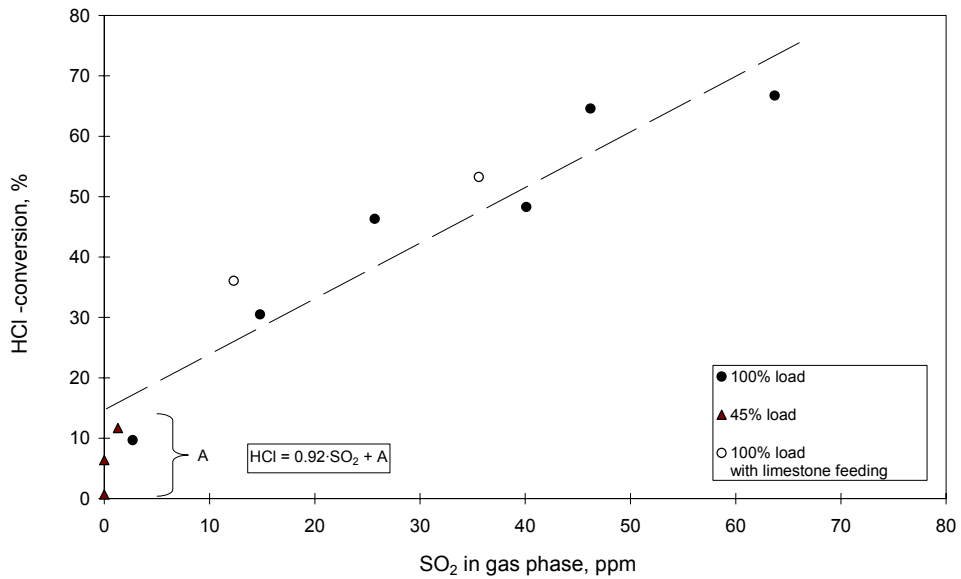


Figure 7. SO₂ concentration versus HCl conversion.

In Figure 8 is shown the S/Cl atomic ratio as a function of HCl-conversion. In experiments from #4 to #7 the ratio is roughly equal, which does not explain the fluctuation in HCl-conversion. On the other hand, in experiments #8 and #9 S/Cl ratio increases significantly as does SO₂ concentration in the gas phase, yet this does not increase the conversion. In Figure 8 is also plotted the “effective S/Cl atomic ratio”, which is the S/Cl ratio multiplied with term $1 - [(SO_2 \text{ reduction} - \%) / 100]$. In practice this is estimation for the S/Cl balance in the gas phase.

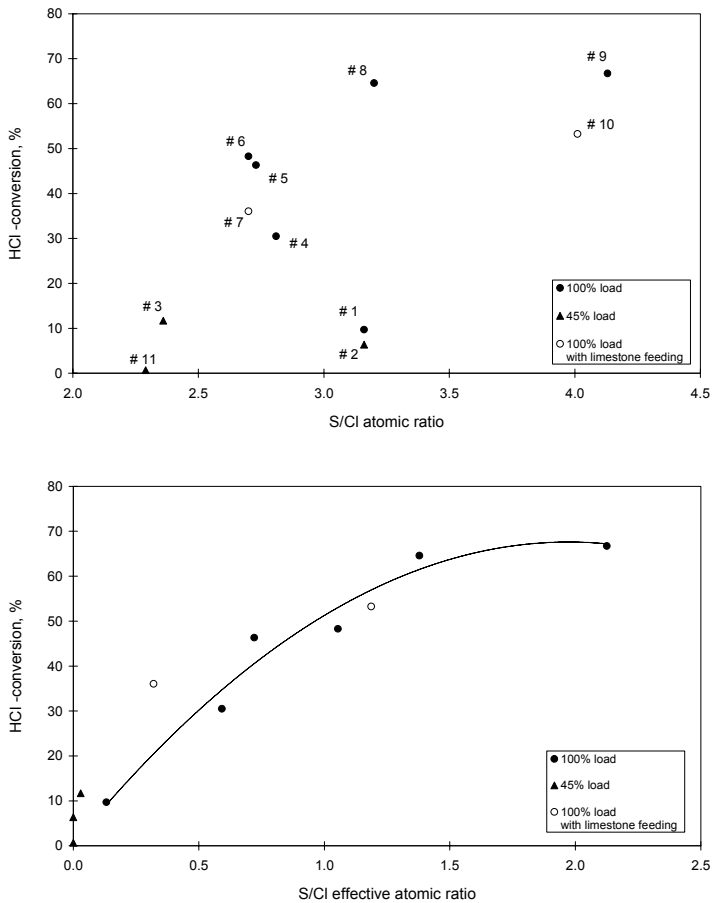


Figure 8. HCl-conversion as a function of fuel blend's S/Cl atomic ratio (above) and "effective" S/Cl atomic ratio (below). S/Cl ratio does not give clear indication about the conversion of chlorine to HCl before this estimation is converted to represent an estimation of this ratio in the gas phase.

In this set of experiments S/Cl atomic ratio does not give clear indication about the conversion of chlorine to HCl. Rather one should refer to gas phase and assess gas concentrations there. Theoretically S/Cl atomic ratio of 0.5 is sufficient to sulphate all alkali chlorides. However, there are several competing reactions that suppress sulphur's effect. It has been suggested for waste combustion that atomic ratio 2.0 is sufficient to retard corrosion rates and that ratio 4.0 would result in negligible corrosion rates. This hypothesis is not applicable to cases

where there is high amount of calcium available in the combustion atmosphere. This is often the case in biomass co-firing as wood fuel ash is high in calcium and in fluidised bed combustion in general if calcium is used as sorbent. From Figure 3 it can be seen that that bark and logging residue ash contains more than 20 wt-% calcium.

4.3 Composition of deposits

In all the experiments deposit sampling was carried out with 16 mm diameter probes. Particulates accumulate on sample ring surface that can be removed from the probe after experiment and deposits can be analysed. In this case rings were moulded into epoxy after exposure. This enables qualitative analysis of the deposit layer cross section. Analysis was carried out with SEM-EDX (Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-ray micro analyser).

Deposits were collected from two locations. Sampling probes were exposed to the flue gas flow by installing them through sampling ports which are located after 1st and 2nd cyclone, see Figure 2. Probes were held at 545 °C (after 1st cyclone) and 480 °C (after 2nd cyclone) in 100% load experiments and at 535 °C and 470 °C in 45% load experiments.

KCl and NaCl deposit layers were observed in samples from experiments #2, #7 and #11, see Figure 9. Both experiments #2 and #11 were run with 45% fuel power and with pure biomass blend.

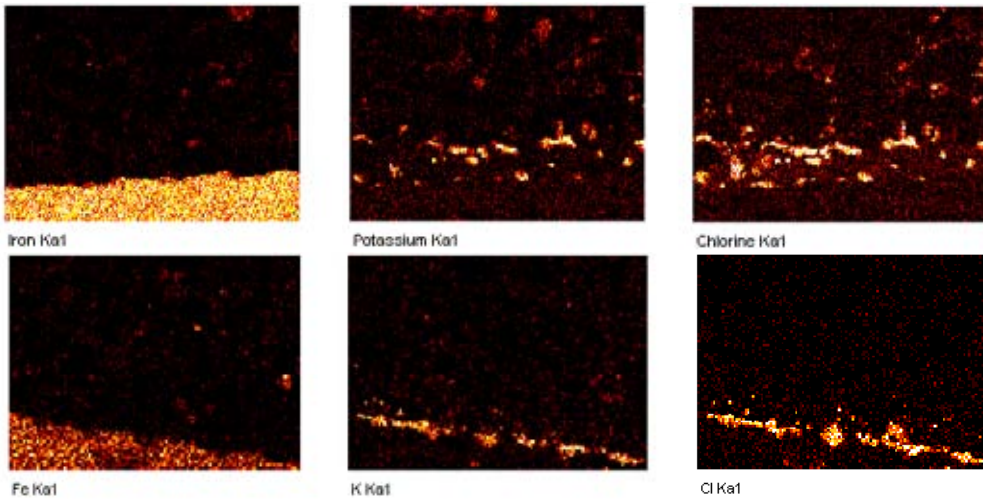


Figure 9. *First row: Experiment #2, X-ray map from deposit layer on windward side (after 1st cyclone). Second row: Experiment #7, X-ray map from deposit layer on 30° clockwise from windward side (after 1st cyclone). Size of the square analysis areas is 0.2 by 0.2 mm.*

The result from experiment #7 is very interesting but not surprising. This experiment has 25% smaller HCl conversion than experiment #6 and higher chlorine content in filter ash. The effective Ca/S ration of 5.4 seems to be too high in this case.

It can be seen from Figure 10, which represents well the information gained from other deposit analyses, that the effect of sulphur in sulphating alkaline metals is heavily disturbed by the existence of calcium in the system. Sodium and potassium is in most cases bound in aluminium silicate matrix.

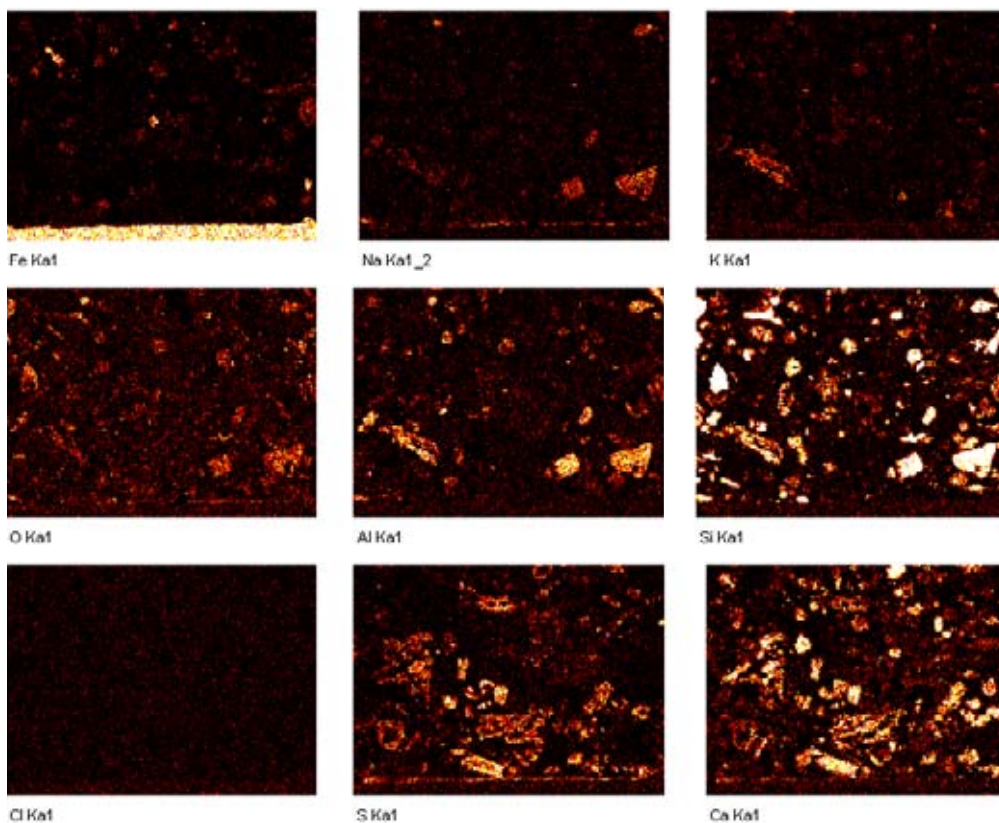


Figure 10. Experiment #5, X-ray map from deposit layer on windward side (after 1st cyclone). Size of the square analysis area is 0.2 by 0.2 mm.

4.4 Conclusions

Following conclusions may be drawn from the combustion experiments:

1. All biomass fuels in these experiments require blending with peat or/and coal in order to reduce the risk for chlorine deposition.
2. Excessive Ca/S ratios should be avoided in reducing SO₂ emissions with high chlorine fuels. High Ca/S reduces sulphur-chlorine balance in the gas phase and this may result in chlorine deposition.

3. In these experiments conversion of fuel bound chlorine to gaseous HCl correlates well with SO₂ concentration in the gas phase.
4. In the deposit samples potassium and sodium are bound in aluminium silicate matrix (especially in coal co-firing) and in (K, Na) sulphate.
5. S/Cl atomic ratio in fuel is not appropriate parameter in describing corrosion propensity of fuel blends in biomass co-firing. Instead, estimation for this ratio in gas phase could be used as a guideline. With higher shares of peat and especially coal, the effect of aluminium silicate should also be assessed because these bind sodium and potassium.
6. In co-firing key figures or characterising ratios for only risky or protective element is not appropriate, instead, the ratio of risky and protective elements should be assessed.
7. High calcium content in wood-based fuel ash contributes to several factors in biomass co-firing, which stresses the importance of estimating the net effect of combusting fuels of very different in nature. The most relevant parameters which can change greatly depending upon the extent of biomass co-firing are: SO₂ auto-desulphuration, chlorine bearing deposit formation and emissions of gaseous nitrogen compounds (namely NO_x and N₂O).
8. SO₂ reduction correlates well with Ca/S atomic ratio but only if fuel bound calcium is also accounted for.
9. When compared to pure biomass combustion, blends of coal/peat/biomass produce less NO_x in CFB combustion.

Publications and reports

Vainikka, P., Helynen, S., Hillebrand, K., Nickull, S., Nylund, M., Roppo, J. & Yrjas, P. 2004. Alholmens Kraft: Optimised Multifuel CHP with High Performance and Low Emissions at Pietarsaari Pulp and Paper mills. In: Proceedings of the Pulpaper 2004 Conference, 1–3 June, 2004, Helsinki, Finland. To be published.

Vainikka, P., Helynen, S., Hillebrand, K., Nickull, S., Nylund, M., Roppo, J. & Yrjas, P. 2004. Cofiring experiments at the World's largest biofuel fired CFB. 2004. In: Proceedings of the 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10–14 May, 2004, Rome, Italy. To be published.

Suomalainen, A. 2002. Maximum biomass use and efficiency in large-scale cofiring – PUUT31. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. VTT Symposium 221. S. 397–407.

Pientuotanto ja -käyttö

Puupolttoaineiden jakelu, käsittely ja laadun parantaminen pienkäytössä – PUUT30

Ari Erkkilä, Kari Hillebrand, Tapio Ranta, Markku Kallio & Heikki Oravainen

VTT Prosessit

PL 1603, 40101 Jyväskylä

Puh. (014) 672 611, faksi (014) 672 749

E-mail: etunimi.sukunimi@vtt.fi

Harri Liiri & Antti Asikainen

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus

PL 68, 80101 Joensuu

Puh. 010 2111, faksi 010 2113 113

E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

Abstract

Project title in English: Distribution, handling and quality improvement of wood fuels in small-scale use

The purpose of developing the production and handling of wood fuel for small-scale use was to improve the production and delivery methods as well as the technology so that the fuel quality is adequate and the costs are competitive. The project included four sub-projects, which concentrated on more efficient wood fuel drying, fuel handling at the storage site, handling technique for pellets and wood chips, and the impacts of wood pellet raw materials and structure on the handling durability and combustion emissions. In the project, experimental studies were carried out in laboratory and field tests, and calculatory models were developed for wood fuel drying.

1. Tausta

Puuenergian teknologiaohjelman tavoitteen saavuttamiseen vaikuttaa myös polttopuun pientuotanto ja käyttö, sillä kyseessä on noin 6 milj. m³ vuosittain polttopuuta, nykyisin lähinnä pilkettä, tuottava ja käyttävä alue. Päätoimintakijöitä tällä alueella on noin miljoona, jotka voivat edelleen lisätä polttopuun käyttöä halkona, pilkkeenä, hakkeena, pellettinä ja brikettinä. Puupellettien tuotannon ja käytön vuotuinen kasvu Suomessa on ollut yli 60 % ainakin kolmen viimeisen vuoden aikana.

2. Tavoite

Puupolttoaineen pientuotannon kehittämistavoitteena oli uusien tuotanto- ja jakelumenetelmien sekä teknologioiden kehittäminen niin, että polttoaineen laatu on hyvä ja kustannuksiltaan kilpailukykyinen. Menetelmien ja laitteiden oli sovelluttava Euroopan pääpuulajeille ja markkinoille.

3. Toteutus

Tutkimushanke jakaantui neljään osaprojektiin, jotka olivat:

1. Polttopuun keinokuivauksen tehostaminen,
2. Puupolttoaineen priimaus varastolla,
3. Pellettien ja hakkeen uudet syöttötekniikat sekä
4. Pellettien raaka-aineiden ja rakenteen vaikutus käsittelylujuuteen ja polton päästöihin.

Tutkimuksesta vastasi VTT Prosessit -tutkimusyksikkö. Tutkimuksessa olivat mukana myös Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskus, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylän ammattikorkeakoulun Luonnonvarainstituutti ja Työtehoseura ry.

Tutkimus toteutettiin 1.10.2001–31.3.2003.

Tutkimuksen rahoitukseen osallistuneita yrityksiä ovat Jyväskylän Teknologiakeskus Oy, Antti-Teollisuus Oy, Arskametalli Oy, Biowatti Oy sekä Ylistaron Terästakomo Oy. Muita hankkeeseen osallistuneita yrityksiä ovat Haminan Puunjalostus Oy, Laukaan Kuivaamo Oy, Oy Nord Mills Ltd, Puukarkko Oy, Scanpell Oy, Suomenselän puupilke Oy, Sääötuli Oy ja Vivokset Oy.

Tutkimushankkeessa tehtiin yhteistyötä Työtehoseura ry:n Puupelletin laadunhallinta pienjakelussa ja käsittelyssä -projektin sekä Pilkkeen tuotantoprosessin hallinta ja kehittäminen -projektin kanssa.

3.1 Polttopuun keinokuivauksen tehostaminen

Osaprojektin tavoitteena oli tehostaa polttopuun (hake ja pilke) keinokuivausta tutkimalla kuivumiseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä polttopuun kuivumisen tehokkuuteen laskennallisesti mallintamalla ja kokeellisesti sääsimulaattoria hyväksikäyttäen.

Osaprojekti koostui neljästä osatehtävästä:

- 1) Kirjallisuuskatsaus maailmalla tehdyistä ko. aiheeseen liittyvistä tutkimuksista ja saaduista tuloksista sekä vallitsevista käytännöistä. Tehtävään liittyi opinnäytetyö.
- 2) Polttopuun kuivauksen matemaattinen mallintaminen.
- 3) Polttopuun kuivumiseen vaikuttavien tekijöiden kokeellinen tutkiminen laboratoriossa sääsimulaattorin avulla.
- 4) Tulosten perusteella tarkastelu erilaisista mahdollisuuksia tehostaa polttopuun kuivausta.

3.2 Puupolttoaineen priimaus varastolla

Osaprojektin tavoitteena oli parantaa pienkäyttöön tarkoitettun puupolttoaineen – hakkeen ja pilkkeen – laatua ja tuotannon taloudellisuutta tutkimalla ja kehittämällä varastolla tapahtuvaa puupolttoaineen jalostamista laadullisesti ja taloudellisesti optimaaliseen käyttöön. Työn aikana osaprojekti ohjautui erityisesti pilkkeen käsittely-yksiköiden ja sahatavara-kuivaamojen hyödyntämisen tutkimiseen.

3.3 Pellettien ja hakkeen uudet syöttötekniikat

Pellettien ja hakkeen siirto ja syöttö polttolaitteisiin tapahtuu nykyisin pääasiassa ruuvisyöttimillä. Ongelmiksi muodostuu pellettien jauhautuminen, ruuvien kuluminen sekä etenkin tikkuisen hakkeen aiheuttamat tukkeutumiset.

Osaprojektin tavoitteena oli tutkia ja kehittää nykyisiä ruuvisyöttimiä varmempia ja monipuolisempia syöttötekniikoita pellettien ja hakkeen käsittelyyn ja syöttöön.

3.4 Pellettien raaka-aineiden ja rakenteen vaikutus käsittelylujuuteen ja polton päästöihin

Pellettien lujuusominaisuudet riippuivat raaka-aineen koostumuksesta ja prosessointioloista. Perinteisesti pelletin lujuutta on tutkittu rummuttamalla tai puristamalla, johon on olemassa rehuteollisuuden standardeja. Pelletin sisäistä rakennetta ja toisaalta särkymistä iskujen vaikutuksesta ei ole tarkemmin tutkittu. Tässä projektissa pelletin rakennetta ja lujuutta tutkittiin käyttäen hyväksi mm. mikroskooppikuvausta, kuvankäsittelyä sekä suurnopeuskameraa.

Osaprojektin tavoitteena oli selvittää puuraaka-aineen ja valmistusolosuhteiden vaikutus pelletin rakenteeseen, lujuuteen, poltto-ominaisuuksiin ja päästöihin. Lisäksi tavoitteena oli oppia tuntemaan pelletin käyttäytyminen pneumaattisen kuljetuksen aikana.

4. Tulokset

4.1 Polttopuun keinokuivauksen tehostaminen

Olosuhdesimulaattorissa tehdyissä pilkkeen kuivauskokeissa (Hillebrand et al. 2004) tutkittiin mm. pilkkeiden koon ja kuoren vaikutusta kuivumiseen, aisatun ja aisaamattoman rangan kuivumista sekä eri kuivumisolojen vaikutusta pilkkeiden kuivumisnopeuteen. Kokeellisia tuloksia käytettiin kuivumista kuvaavan laskentamallin muodostamisessa. Tutkimuksessa kehitettiin malli mm. yksittäisen pilkkeen sekä pilkekan kuivumiselle. Parametreina ovat pilkkeen mitat,

kuorellisen pinta-alan osuus, alkukosteus, ympäristön lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä ilman virtausnopeus. Pilkkeen mittojen vaikutus saadaan likimäärin otettua huomioon käyttämällä ns. tehollista halkaisijaa (tilavuus/pinta-alasuhte). Kuorelliselle pinta-alalle käytetään (kokeisiin perustuvaa) kuorikerrointa (aineensiirto ympäristöön vähenee) ja diffuusiokerroin optimoidaan siten, että laske-
kennan ja kokeiden korrelaatio on hyvä. Työtehoseura ry:n kanssa tehtiin lisäksi pilkkeiden kuivauskokeita koekuivurissa, jonka tuloksia hyödynnettiin mallin verifiointissa.

Pilkkeen koolla ja kuoren osuudella on huomattava merkitys pilkkeiden kuivumisnopeuteen. Kuivumisnopeuteen vaikuttaa eniten pilkkeen paksuus – paksuuden puolittuminen lyhentää kuivumisaikaa noin puoleen. Pilkkeen pituudella ei ole juurikaan vaikutusta kuivumisnopeuteen. Halkaistuissa pilkkeissä kuivumista dominoikin veden siirtyminen puun sisästä kohti halkaistua pintaa. Kuori estää puolestaan pilkkeen kuivumista tehokkaasti ja kosteus onkin suurin juuri kuoren alla. Pilkkeen kuivumista voidaankin tehostaa merkittävästi rikkomalla kuorta, esim. pilkkeiden teon yhteydessä. Jo pienikin kuoren rikkominen edesauttaa pilkkeen kuivumista. Sama vaikutus havaitaan myös rangan aisauksella, jossa sillä on vielä suurempi vaikutus kuivumiseen kuin pilkkeillä. Pilkkeillä kuoren rikkomisella ei ole yhtä suurta vaikutusta, koska pilkkeissä on aina myös halkaistu, kuoreton pinta, jonka kautta kosteus pääsee haihtumaan hyvin.

Kuivausolosuhteilla on myös huomattava vaikutus pilkkeiden kuivumiseen. Kuivauslämpötilan nosto yli 50 °C:seen nopeuttaa kuivumista merkittävästi. Sen sijaan ilman suhteellisen kosteuden nousu 40 %:sta 60 %:iin hidastaa kuivumista jo selvästi.

Pilkkeiden kuivumisen karakterisoimiseen laadittiin malli tehollisen kuivumispinta-alan, johon kuori vaikuttaa, ja kosteuden siirtoa partikkelin sisällä kuvaavan parametrin (diffusiviteetti) laskemiseksi kuivauskokeiden avulla (Saastamoinen et al. 2004). Näitä parametreja kuivausmallissa käyttäen laskettiin hakeen sekä pilkkeiden kuivumista kerroksessa (Saastamoinen et al. 2004). Kuivaus on nopeinta vastavirtakuivurissa (Saastamoinen 2004). Taloudellisessa optimoinnissa havaittiin, että jos kuivausilman sisäänmenolämpötila on vapaasti valittavissa, on paras käyttää mahdollisimman korkeaa lämpötilaa. Tällöin yläraja käytettävälle lämpötilalle asettuikin turvallisuusnäkökohtien (syttyminen) tai päästöjen (VOC) perusteella. Korkean kuivauslämpötilan vuoksi kuivausilman

massavirta tulee pieneksi, painehäviöt ovat pienet ja kuivurin, ilmalämmönsiirtimeen ja puhaltimen koko minimoituu. Lisäksi havaittiin, että tarvittava kuivausenergian määrä on käytännössä riippumaton kuivausilman lämpötilasta. Tulos pätee pilkkeiden, halkojen ja myös hakkeen kuivaukseen esim. lämpöyrittäjän kattilasta saamalla lämmöllä. Toisaalta, jos kuivausilman lämpötilataso ei ole vapaasti valittavissa kuten on laita olemassa olevia jätelämpöjä käytettäessä tai jos kuivaukseen käytetään aluelämpöä, jonka menoveden lämpötila on maksimissaan esim. 120 °C, on optimoitava lämmönsiirtimestä tulevan ilman lämpötila, joka vaikuttaa lämmönsiirtimeen ja kuivurin kokoon. Lisäksi voidaan optimoida kuivurin poikkipinta-alan ja pituuden suhde, joka vaikuttaa painehäviöihin ja jonkin verran kuivurin kokoon. Tuloksia raportoidaan julkaisuissa Saastamoinen et al. (2004) ja Saastamoinen (2004).

4.2 Puupolttoaineen priimaus varastolla

Pilkkeiden käsittelyä ja lämminilma-kuivattamista kamarikuivaamalla tutkittiin kahdessa koejaksossa, ensin keväällä 2002 ja toiseksi alkuvuodesta 2003. Tulokset on raportoitu osatehtävän kahdessa projektiraportissa (Ranta & Vääräsmäki 2002 ja Ranta 2003).

Ensimmäisessä koeajossa koivukuitupuumittainen raaka-aine pilkottiin Palax Monster -pilkekoneella metallisiin 1,2 m³:n verkkohäkkeihin. Häkit oli kiinnitetty kuormalavoihin, joten niiden käsittelyyn soveltui tavanomainen trukki. Raaka-ainetta pilkottiin kuivaamon terminaalilla, joten häkit voitiin siirtää trukilla suoraan kuivaamon kamariin. Kokeissa käytettiin patterilämmitteistä lämminilma-kuivaamo (yhden kamarin koko 174 m³), jossa ilman kierto aikaansaatiin neljällä ylhäälle sijoitetulla potkuripuhaltimella. Puhallussuuntaa vaihdettiin kolmen tunnin välein. Kuivaus tapahtui alkulämmityksen jälkeen noin 60–70 °C:n lämpötilassa. Sahatavaran kuivauksessa sovellettu alku- ja loppukostutus ohitettiin. Kuivausajaksi valittiin 114 h. Alkukosteudeltaan 42 % ollut tuore koivupilke kuivui 13 %:n keskimääräiseen loppukosteuteen eli lyhyempikin kuivausjakso olisi riittänyt alle 20 %:n loppukosteuden aikaansaamiseksi. Kuivaustulos oli melko tasainen sekä häkkien sisällä että häkkien kesken.

Toisessa kokeessa pilkkeet tehtiin kahteen päältä avonaiseen vaihtolavaan erillisessä pilketerminaalissa, josta ne siirrettiin kuorma-autolla kuivaamolle. Pie-

nempi noin 8 m³:n lava sisälsi leppäpilkettä ja suurempi noin 15 m³:n lava koivusta, männystä ja haavasta koostuvaa sekapilkettä. Lavat sijoitettiin rinnakkain kamariin, jossa niitä kuivattiin kolme päivää. Kuivumistulos vaihtolavoilla kuivattaessa oli epätasainen ja loppukosteus jäi yli 20 %:n. Tähän vaikutti puutteellinen ilman kierto erityisesti lavan sisäosissa sekä puulajikohtainen vaihtelu. Lavojen avoimempi rakenne ja kuivattamisajan kasvattaminen valitusta kolmesta päivästä olisi parantanut lopputulosta.

Toisessa tutkimusjaksossa selvitettiin erilaisten helposti käsiteltävien käsittelyyksiköiden soveltuvuutta kuivaukseen. Polttopuuta pilkottiin säkitystelineen avulla kuormalavan päälle asetettuihin verkkosäkkeihin sekä 1,2 i-m³:n ja neljän kuution verkkokehikkoihin, jotka oli kiinnitetty alaosastaan kuormalavoihin. Tämän lisäksi pilkkeiden kuljettamista ja kuivaamista varten rakennettiin 20 kuutiometrin verkkoseinäiset vaihtokontit. Pilkehäkit ja vaihtokontit kuljetettiin pilketerminaalista vaihtolava-autolla sahatavakuivaamolle. Kuormalavallisten kehiköiden käsittelyyn pilketerminaalilla ja kuivaamalla soveltui tavanomainen trukki, kun taas täysien vaihtokonttien siirtely ilman vaihtolava-autoa edellytti järeää yli 8 tonnin nostotehoon kykenevää trukkia.

Kuivauskokeita tehtiin joko täyttämällä kokonainen kamari pilkkeillä tai täyttämällä vain osa kamaria pilkkeillä. Tällöin korvattiin muutama sahatavaranippu pilkehäkeillä (kuva 1). Sahatavaran ja pilkkeiden yhteiskuivauksessa oli ajatuksena tutkia mahdollisuutta kuivata pienehköjä määriä pilkkeitä koko kamarillisen sijaan. Yksi sahatavaranippu voidaan korvata esimerkiksi kuudella 1,2 m³:n pilkehäkeillä. Kuormaamalla häkkejä kuusi rinnan ja kuusi syvyysuunnassa ja kolme päällekkäin, pilkkeitä mahtuu kamariin yhteensä noin 130 i-m³. Kamari-kuivauksessa käytetyt kuivauslämpötilat olivat 60–70 °C, kun kuivausaika oli eri kokeissa 3–6 vuorokautta. Tavoitteena oli kuivata kaatotuoreesta koivupuusta valmistettu pilke-erä alle 20 %:n loppukosteuteen.



Kuva 1. Pilkehäkkeitä sahatavaranipun alla.

Kuivaustulokseen oleellisimmin vaikutti pilkkeiden kuivausyksiköiden sijoittelu kamariin. Kokeissa käytetyillä kuivauslämpötiloilla ja -ajoilla loppukosteustavoitteen saavuttaminen ei ole ongelma, mikäli kamari on täytetty oikein. Tavoitteena on toisaalta kamarin mahdollisimman korkea täyttöaste ja toisaalta tehokas ilman kierto eri osissa kamaria. Kamari on täytettävä siten, ettei synny isoja tyhjiä kanavia, joiden kautta ilma pääsisi ohittamaan pilkekerroksen. Ongelmat ilman kierrossa aiheuttavat epätasaisen kuivumisen ja homehaittoja. Pilkkeellä paras kuivumistulos saavutettiin täyttämällä kamari kuution metallihäkeillä, joita oli helppo pinota useita kerroksia päällekkäin. Pilkehäkkeitä kerrosten väliin asetettiin lankut kuorman tukevoittamiseksi. Säkkien ongelmana on pinoamisen vaikeus, jolloin kamari jää yläosastaan vajaaksi. Isommilla kehikoilla tulee helposti ongelmia täyttää kamari yhtä tehokkaasti kuin pienemmillä häkeillä. Lisäksi ne voivat olla esteenä tehokkaalle ilman kierrolle, mikä heikentää kuivumistulosta. Vaihtokonteilla ongelmaksi muodostuu suuri pilkekerroksen paksuus, mikä estää tehokkaan ilman kierron kerroksen läpi. Tehokas ilman kierto edellyttää ilmanakanavien tekemistä kontin läpi, jotta puhallusilma saadaan johdettua myös kontin sisäosiin.

Hyvä kuivumistulos tarkoittaa riittävän alhaisen loppukosteuden lisäksi myös mahdollisimman tasaista kuivumistulosta koko kuivauserälle. Kuivumisolosuhteiden lisäksi tähän vaikuttaa kuivattavan pilke-erän ominaisuudet kuten puulaji ja pilkkeiden kokojakauma. Pilkkeiden kuivaus sahatavara-kuivaamossa on kallis kuivausmenetelmä ja soveltuu erikoistilanteisiin, kuten pakatun pilkkeen kuivaukseen, jolloin myös pilkkeen ulkonäkökysymykset korostuvat. Käytetyillä kuivauslämpötiloilla koivun vaalea väri säilyy, päinvastoin kuin pitkäaikaisessa ulkokuivauksessa. Mikäli on tarve kuivata nopeasti suuria eriä pilkkeitä esimerkiksi ulkomaan vientiin, voi sahatavara-kuivaamo olla hyvä ratkaisu. Tämä vähentää suuriin pilkevarastoihin sitoutunutta käyttöpääomaa ja helpottaa laadunhallintaa, kun pilkkeitä ei tarvitse varastoida ympärivuotisesti vaihtelevissa sääolosuhteissa. Edullisten erityisesti pilkkeille suunniteltujen lämminilmakuivurien kehittäminen olisi tarpeen.

4.3 Pilkekoneiden käyttölogistiikka

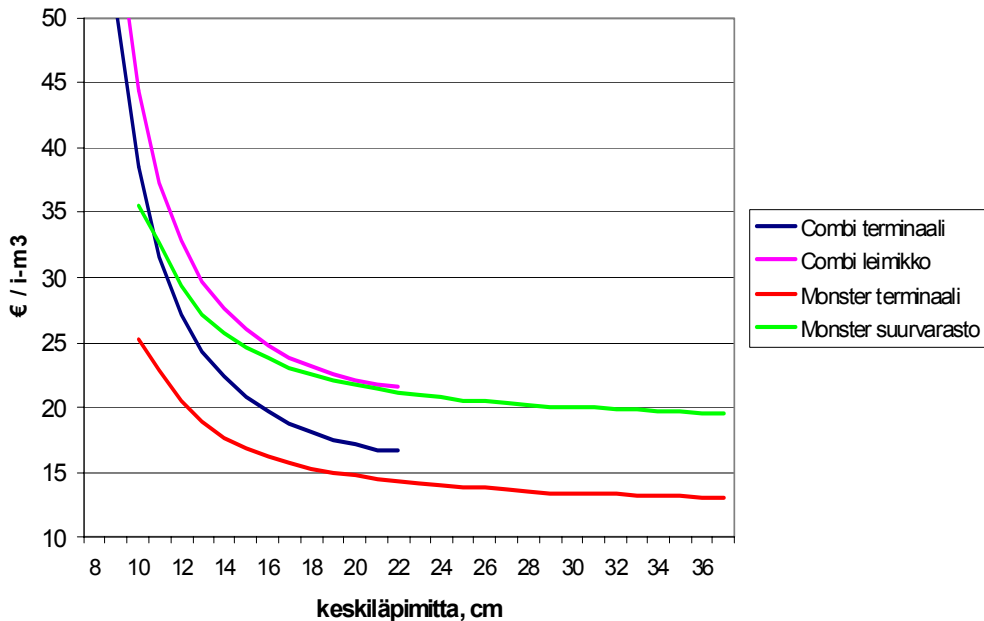
Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskus teki hankkeessa pilkekoneen käyttölogistiikkaa koskevan simulointitarkastelun (Liiri & Asikainen 2002). Tutkimuksessa mallitettavaksi koneeksi valittiin Terästakomo Oy:n valmistama Palax Monster, joka on suunniteltu toimimaan terminaaliolosuhteissa. Vertailtuun otettiin myös pienempi saman valmistajan Palax Combi -pilkekone, jota voidaan helposti siirrellä esimerkiksi metsävarastojen välillä.

Pilkekoneiden logistiikan tutkimusmenetelmäksi valittiin diskreetti simulointi, jota on käytetty mm. turpeen tuotannon, hakkeen tuotannon terminaali-logistiikan ja kaukukuljetuksen tutkimuksessa. Simuloimalla voidaan varsin helposti tutkia monenlaisten muuttujien vaikutusta lopputulokseen. Pilkekoneista rakennettiin visuaalista ohjelmointia käyttävään WITNESS-ohjelmistoon simulointimallit, joilla tehtiin halutut simulointiajot.

Tutkimuksessa tutkittiin kahta toimintavaihtoehtoa, jossa ensimmäisessä puut tuodaan koneen luo ja toisessa kone vieään puiden luo. Näin saatiin kahdelle pilkekoneelle neljä erilaista mallia: Monster terminaalissa, Monster suurvarastolla, Combi terminaalissa ja Combi leimikoilla. Malleihin luotiin 30 leimikkoa tai suurvarastoa, joihin jokaiseen generoitiin simulointiajon alussa pilkottavan puutavaran määrä ja keskiläpimitta. Kun varastoissa oleva puutavara oli valmis,

mallin pilkekone-elementti alkoi valmistaa niistä pilkettä käyttäen toimintatietoinaan aikatutkimuksista saatua aineistoa. Kun kaikki puutavara oli pilkottu, malli laski eriteltyt tulokset tästä pilkosta-ajosta. Malli ohjelmoitiin tuottamaan simulointiajon lopussa pilkkeen omakustannushinta (Breakeven-point). Ajojen perusteella on kuvaan 2 koostettu keskiläpimitan vaikutus pilkkeen omakustannushintaan terminaalissa.

Pilkkeen omakustannushinta, €/i-m³



Kuva 2. Pilkkeen omakustannushinta pilkottavan puun keskiläpimitan funktiona tutkimuksessa käytetyillä lähtöarvoilla laskettuna. Käyrät alhaalta ylöspäin: Monster terminali, Combi terminali, Monster suurvarasto, Combi leimikko.

Kuvasta 2 voidaan huomata, että kustannustehokkainta on terminaalitoiminta sekä Combilla että Monsterilla. Omakustannushinta laskee melko voimakkaasti läpimitan kasvaessa, mutta alkaa tasaantua sekä Combilla että Monsterilla 17 cm keskiläpimitan jälkeen. Leimikoilla toimivan Combin ja suurvarastoilla toimivan Monsterin omakustannushinnan ero on varsin pieni, vaikka tuottavuus onkin Monsterilla kaksinkertainen. Tämä johtuu siitä, että Monsterin tuntikustannukset ja siirtämisestä aiheutuvat kulut ovat Combilla selvästi suuremmat. Merkittävin

suurvarastolla toimivan Monsterin kuluista on traktorin tuntikustannus, jonka osuus kokonaistuntikustannuksista on 10 €.

Monsterin terminaalissa tekemän pilkekuution omakustannushinta on noin 7,5 € halvempi kuin suurvarastolla. Tämän vuoksi Monster on täysin terminaalikone, eikä sitä kannata siirrellä tämän perusteella varastolta toiselle. Terminaalissa ja leimikolla toimivan Combin ero on hieman pienempi, mutta terminaalitoiminta on siltäkin kannattavinta.

4.4 Pellettien ja hakkeen uudet syöttötekniikat

Puupellettien pienkäyttö on kasvamassa ja tietoa sopivista käsittelylaitteista tarvitaan. Hienoaineksen määrän vähentäminen eri käsittelyvaiheissa, laitteiden oikea käyttö ja niiden sopivuus kiinnostavat kuluttajia. Tutkimuksen aiheena oli pellettien ja hakkeen siirtäminen varastosta tai siilosta kattilasiiloon erilaisilla kuljettimilla. Tulokset on raportoitu osatehtävän projektiraportissa (Kallio & Kirjalainen 2004a).

Pohjoismaissa pelletit siirretään varastosta, joka on noin 8 m³:n (kaupallisen jakelun vähimmäiskoko) vaaka- tai pystysiilo, alle 0,5 m³:n kattilahuoneen siiloon yleensä spiraali- tai ruuvikuljettimen avulla. Kattilan polttimelle pelletit syötetään joko pieniläpimittaisella ruuvilla tai spiraalilla.

Spiraalilla on useita etuja: se on edullinen ja tehokas, se on taipuisa ja rakenteeltaan yksinkertainen. Seinän läpi spiraali menee putkivaipan suuruudesta aukosta. Halkaisijaltaan 60–75 mm:n spiraalilla pellettejä siirtyy vaakatasossa 1 000 kg/h helposti, kun matkan pituus on alle 10 m. Spiraalin putkivaipan halkaisija on 70–90 mm ja sähkömoottorin tehontarve on 0,55 kW–1,5 kW riippuen pyörimisnopeudesta ja spiraalin pituudesta. Spiraalin nostokyky on rajallinen. Kun hyvälaatuisia pellettejä siirretään oikeaa tapaa käyttäen (pyörimisnopeus 300–360 1/min kokeissa) vaaka-tasossa 8–19 m:n matka, alle 3 mm:n hienoaineksen määrä jää alle 1 p-%:n. Huonolla ajotavalla heikkolaatuisia pellettejä siirrettäessä alle 3 mm:n hienoaineksen määrä saattaa olla 4–10 p-%.

Ruuvi on spiraalia kalliimpi ja jäykempi järjestelmä. Kolmen metrin vaakasiilo tyhjennettiin kokeissa halkaisijaltaan 86 mm:n ruuvilla, joka oli suunniteltu maa-

talouskäyttöön jyvien siirtoon. Kun pyörimisnopeus oli 40 l/min, pellettivirta oli 720 kg/h ja alle 3 mm:n hienoaineksen määrä vaihteli välillä 1–3 p-% pellettien laadusta riippuen. Tehontarve oli 250 W. Järeämmällä, hitaasti pyörivällä halkaisijaltaan 113 mm:n ruuvilla tutkittiin sekä pellettien että hakkeen siirtoa. Pelleteillä alle 3 mm:n hienoainesta syntyi 2–10 p-% riippuen ruuvin rakenteesta.

Hankkeessa tutkittiin myös kiinteistössä käytettävää pneumaattista siirtojärjestelmää. Pelletit voitiin nostaa pneumaattisesti 5,5 m:n korkeuteen ilman ongelmia. Kokeissa hienoaineksen määrä jäi alle 1 p-%:iin 12,5 m:n siirtomatalla.

Edellä mainittujen järjestelmien lisäksi esimerkiksi suursäkit ja myös pienemmät säkit ovat varteenotettava vaihtoehto pellettien pienkäytössä. Pelletti säilynee parhaimmassa kunnossa kuluttajalle, kun jakelu tehdään säkkitarvarana.

Pelleteistä lujimmiksi osoittautuivat pienen määrän perunatärkkelystä sisältävät pelletit.

Pellettien pienkäytön lisääntyminen nykyisellä kasvuvauhdilla edellyttää pelleteiltä hyvää laatua ja edullista hintaa sekä lämmitysmuodon helppoutta, laitteistokomponenttien, automatiikan ja kokonaisten laitepakettien kehittämistä. Paraskaan laite ei toimi täysitehoisesti, jos pellettien lujuus on huono ja hienoainepitoisuus suuri jo valmistusvaiheessa. Jokainen käsittelyvaihe lisää hienoaineksen määrää.

4.5 Pellettien raaka-aineiden ja rakenteen vaikutus käsittelylujuuteen ja polton päästöihin

Tarja Tervo tutki opinnäytetyössään (Tervo 2002) raaka-aineiltaan ja tuotantotavoiltaan erilaisia pellettejä. Pellettien sisäistä rakennetta analysoitiin märkäseulonnan ja mikroskooppitutkimusten avulla. Näytteiden uuteaine- ja ligniinipitoisuudet analysoitiin kemiallisin menetelmin. Tavoitteena oli selvittää puuraaka-aineen ja valmistusolosuhteiden vaikutus pelletin rakenteeseen ja lujuuteen. Tulosten mukaan tärkkelyksen lisääminen sideaineeksi paransi selvästi pellettien lujuutta ja käsittelykestävyyttä.

Pellettien pneumaattista jakelua tutkittiin sekä laboratoriossa että käytännön kokein (Kallio & Kirjalainen 2004b). Eräissä koesarjassa pelletit siirrettiin jakeluautosta 24 m pitkällä letkulla vaakasiiloon. Suurella ilmannopeedella ja pienellä syötöllä tuli paljon hienoainesta, mujua peräti 20–30 p-%. Jakeluauton tavanomaisella ajotavalla syntyi hienoainesta ja mujua enemmän kuin isolla kuormituksella ja suurella paineella. Perunatärkkelyslisäys vähensi mujun ja hienoaineksen määrää useita %-yksiköitä siirtoparametreista riippuen.

Pellettien törmäystä siilossa voidaan vaimentaa huomattavasti, jos törmäyspintana käytetään joustavaa kumilevyä ja sopivia ohjaimia. Kumilevyn eduista saatiin selvä näyttö laboratoriokokeissa, joissa törmäytettiin erilaisia pellettejä eri pinnoille. Törmäykset kuvattiin suurnopeuskameralla.

Pellettien käyttäytymistä siilopinnoilla ja varastoituna tutkittiin. Sinkityllä peltipinnalla pelletti liukui huomattavasti enemmän kuin filmivaneripinnalla, liukumiskulmien välinen ero oli noin 8°. Jos filmivaneripinta kastui, liukumiskulma suureni 17°:sta reiluun 35°:seen. Hienoaineksen määrän suureneminen kasvatti liukumiskulmaa selvästi. Kokeiltujen pellettilaatuksen vaikutus liukumiskulman suuruuteen oli vähäinen.

Hienoaineesta puhtaiden pellettien asettumiskulmaksi mitattiin 38° ja runsaasti hienoainesta (alle 7 mm:n partikkeleja 20 p-%) sisältävien pellettien 40°. Hienoaineesta puhtaiden pellettien virtauskulmaksi mitattiin 48° ja runsaasti hienoainesta sisältävien pellettien 60°.

Pellettitehtaalla tutkittiin hienoaineksen määrää prosessin eri vaiheissa. Hienoaineksen määrää voi vähentää huomattavasti viljan esipuhdistimella. Mitä suurempi puhdistimen ilmavirtaus oli, sitä pienempi oli pellettien hienoainesmäärä. Kun puhdistimen puhaltimen virtausta ei kuristettu lainkaan, pelletit sisälsivät jopa vähemmän alle 3 mm:n hienoainesta kuin valmistuksessa. Mujun määrään erotin ei vaikuttanut yhtä tehokkaasti.

Osaprojektissa tutkittiin myös pellettien laadun vaikutusta pellettipolttimen toimintaan ja polton päästöihin (Oravainen 2003). Kokeita tehtiin viidellä eri pellettilaadulla. Referenssikoe tehtiin puupelletillä, josta hienoaines oli eroteltu pois. Vertailukokeet tehtiin puupelletillä, jossa pellettoinnin sideaineena oli käytetty perunatärkkelystä ja maissitärkkelystä. Pelletit oli valmistettu Biowatti

Oy:n Turengin pellettitehtaalla. Sideaineiden määrä oli noin 1 paino-%. Näistä molemmista tehtiin polttoaine-erät, josta hienoaines oli eroteltu pois sekä erä, jossa hienoaineksen osuus oli 20 paino-%. Hienoaineksesta 30 % oli raekooltaan alle 3 mm ja 70 % raekooltaan 3–7 mm.

Pelletit poltettiin nimellisteholtaan 20 kW Pelikko-pellettipolttimella, joka oli kytketty nimellisteholtaan 50 kW:n HT Enerco Oy:n Tulimax STK 50 Vario -kattilaan. Kokeet tehtiin VTT Prosessien pienpolton tutkimus- ja testaustilassa Jyväskylässä. Puupellettien laadun vaikutusta palamiseen tutkittiin savukaasu-, teho- ja hyötysuhdemittausten sekä polttoaine- ja tuhka-analyyysien perusteella. Kaikki polttokokeet tehtiin pelkästään nimellisteholla.

Hienoaineksen määrä ja pellettien sideaine eivät aiheuttaneet mainittavia eroja polttimen käyttäytymisessä eikä savukaasupäästöissä. Kaikilla pelleteillä saavutettiin reilu 20 kW:n teho ja kokonaishyötysuhde oli 87–91 %. Polttimen tarvitsema yli-ilmakerroin oli kohtuullinen, eli n. 50 %. Hiilimonoksidipäästöt olivat alhaiset, 192–276 ppm (10 % O₂) ja hiilivetyypäästöt lähes olemattomat. Savukaasujen hiukkaspäästöt olivat vain noin 6 mg/Nm³, mikä on erittäin alhainen verrattuna jopa voimalaitoskattiloihin, joissa käytetään sähkösuodattimia.

5. Tulosten hyödyntäminen

Kuivaustutkimuksesta saatujen kokeellisten ja laskennallisten tulosten perusteella voidaan selvittää kuivatettavan pilkekerroksen optimaalista kuivaustapaa. Saatua tietoa hyödynnetään kehitettäessä käytännön kuivausratkaisuja pilkkeelle. Pilkkeiden käsittely-yksiköistä ja sahatavara-kuivaamoista saatuja tuloksia ovat pilkeyrittäjät alkaneet hyödyntää.

Useassa yrityksessä on pellettien ja hakkeen käsittelytekniikkaan liittyvää osaamista. Yritysten lisäksi yksityiset henkilöt rakentavat omia, hyvinkin monimuotoisia ratkaisuja. Yritysten ja yksityisten henkilöiden kiinnostus osoitti, että tutkittua tietoa käsittelylaitteiden toiminnasta tarvitaan. Hyvillä käsittelylaiteratkaisulla on vientimahdollisuuksia. Pienlämmityksen kokonaisratkaisuja (siilo, kuljetin, kattila ja poltin) tarjoavista yrityksistä on puutetta.

Tutkimuksessa selvitettiin pellettien rakenteen lujuteen vaikuttavia seikkoja. Aihe on monimutkainen. Pellettien rakenteeseen ja laatuun vaikuttavat sekä raaka-aineominaisuudet että prosessiolot, joiden vaikutusta ei vielä riittävästi tunneta.

Tutkimuksessa tehdyt opinnäytetyöt ovat Tekesin verkkosivulla vapaasti ladattavissa: (<http://akseli.tekes.fi/Resource.phx/enyr/puuenergia/z-vtt-06140685.htx>).

6. Jatkosuunnitelmat

Hanke on pääosin raportoitu. Viimeiset raportit saatetaan valmiiksi. Aihealueeseen jäi vielä paljon tutkittavaa ja jatkohankkeita pyritään käynnistämään.

Projektissa syntyneet julkaisut ja raportit

Raportit ja opinnäytetyöt

Hillebrand, Kari, Frilander, Pertti & Saastamoinen, Jaakko. 2004. Polttopuun keinokuivauksen tehostaminen. Projektiraportti PRO2/6002/04. Jyväskylä: VTT Prosessit.

Kallio, Markku & Kirjalainen, Timo. 2004a. Pellettien ja hakkeen syöttötekniikat. Projektiraportti PRO2/P6034/03. Luonnos. Jyväskylä: VTT Prosessit. 89 s. + liitt. 22 s.

Kallio, Markku & Kirjalainen, Timo. 2004b. Pellettisiilot ja pellettien pneumaattinen syöttö siiloon. Projektiraportti PRO2/6002/04. Jyväskylä: VTT Prosessit.

Liiri, Harri & Asikainen, Antti. 2002. Palax Monsterin ja Palax Combin käyttölogistiikan tutkiminen simuloimalla. Osaraportti. Metsäntutkimuslaitos, Joensuu tutkimuskeskus. Julkaisematon. 10 s. + liitt. 4 s.

Oravainen, Heikki. 2003. Puupellettien laadun vaikutus palamistulokseen. Projektiraportti PRO2/6037/03. Jyväskylä: VTT Prosessit. 10 s.

Ranta, Tapio. 2003. Pilkkeiden käsittely ja keinokuivaus vaihtokonteissa. Projektiraportti PRO2/6016/03. Jyväskylä: VTT Prosessit. 28 s. + liitt. 1 s.

Ranta, Tapio & Vääräsmäki, Markku. 2002. Pilkkeiden laadun parantaminen sahatavara-kuivaamoa hyödyntämällä. Projektiraportti PRO2/6612/02. Jyväskylä: VTT Prosessit. 35 s. + liitt. 4 s.

Rinne, Sami. 2002. Puupolttoaineiden kuivausmenetelmien kartoitus. Diplomityö. LTKK, energiatekniikan osasto. 96 s. + liitt. 12 s.

Tervo, Tarja. 2002. Puupellettien sisäisen rakenteen ja kemiallisen koostumuksen vaikutus pellettien kestävyteen. Pro Gradu. Jyväskylän yliopisto, kemian laitos, soveltavan kemian osasto. 59 s. + liitt. 11 s.

Muut julkaisut

Erkkilä, Ari. 2002. Polttopuun pientuotantoa ja -käyttöä kehitetään. Tekniikka ja kunta 9/2002, s. 51–53.

Erkkilä, A., Hillebrand, K., Ranta, T., Kallio, M. & Oravainen, H. 2002. Puupolttoaineiden jakelu, käsittely ja laadun parantaminen pienkäytössä – PUUT30. Teoksessa: Alakangas, Eija (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 321–334.

Hillebrand, Kari & Frilander, Pertti. 2003. Olosuhdesimulaattorilla tutkitaan polttopuun kuivausta. TEHO 1/2003, s. 28–29.

Kallio, Markku & Oravainen, Heikki. 2003. Pellet research and development at VTT. Proceedings of the International Nordic Bioenergy 2003 Conference, Jyväskylä, 2.–5.9.2003. FINBIO. Jyväskylä. S. 489–493.

Ranta, Tapio & Hillebrand, Kari. 2003. Polttopuun kuivauksen tehostaminen ja laadun parantaminen. BioEnergia 3/03, s. 36–38.

Saastamoinen, J. 2004. Comparison of moving bed dryers of solids operating in parallel and counter-flow modes. Submitted to *Drying Technology*.

Saastamoinen, J., Hillebrand, K., Frilander, P. & Kouki, J. 2004. Drying of chopped wood and woog logs in heated air. Submitted to *Drying Technology*.

Metsähakkeen ja pilkkeiden asiakaslähtöinen verkkokauppa ja logistiikka – PUUT34

Lauri Sikanen

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus

PL 68, 80101 Joensuu

Puh. (050) 391 3254, faksi 010 211 3251

E-mail: lauri.sikanen@metla.fi

Timo Tahvanainen

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus

PL 68, 80101 Joensuu

Puh. (050) 391 3267, faksi 010 211 3251

E-mail: timo.tahvanainen@metla.fi

Harri Liiri

Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus

PL 68, 80101 Joensuu

Puh. 010 211 3258, faksi 010 211 3251

E-mail: harri.liiri@metla.fi

Abstract

Project title in English: Customer oriented logistics and e-business of forest chips and chopped firewood

The small-scale use of firewood is the second largest source of energy in space heating in Finland being the main energy source in detached houses. Most of the annual consumption of 6.1 million m³ of firewood is used as chopped firewood. Only one fifth of the firewood is commercial, purchased as ready-made chopped firewood or semi-products. The use of firewood has been growing during the last decade and the share of self-produced firewood is estimated to decrease in the future. The markets for chopped firewood are growing but they are still undevel-

oped. Only ten percent of producers are working full time with the business even their production volume and marketing efforts are low. Cost-efficient delivery systems are one essential bottleneck in both expanding the commercial firewood production and in meeting the customers' quality requirements. Nowadays most of the suppliers are using their own, versatile transportation equipment for the firewood deliveries. The project "Customer oriented logistics and e-business of forest chips and chopped firewood" seeks for solutions to promote more professional production of firewood as well as to develop efficient delivery systems for firewood. The effect of transportation equipment, the size of delivery and the delivery efficiency is examined using discrete-event simulation. The preliminary results show that delivery systems developed in other fields of trade are adaptable also in firewood delivery and give distinct advantages especially for the large-scale supply of firewood.

1. Tausta

Pilkkeiden merkitys lämmitysenergian tuotannossa on kasvussa, varaavien tulisijojen määrä lisääntyy noin 2 %:n vuosivauhdilla ja uusiin pientaloihin rakennetaan tällä hetkellä lähes poikkeuksetta yksi tai useampia tulisijoja. Perinteisesti valtaosa pilkkeistä on hankittu omatoimisesti omista metsistä. Tulisijojen lisääntyminen pientaloissa ja taajama-asutuksessa lisää kysyntää polttopuun kaupallisilla markkinoilla (mm. Helynen & Oravainen 2002). Suomessa on tällä hetkellä käytössä 1,2 miljoonaa tulisijaa ja uusia rakennetaan noin 50 000 vuodessa. Esimerkiksi Pohjois-Karjalassa puulisälämmityksen osuus on noin 10 % kaikesta lämpöenergiasta (www.miilu.com). Puulisälämmityksen yleistyessä markkinat polttoaineelle kasvavat tasaisesti. Laatutietoinen kuluttaja haluaa polttopuunsa yhä useammin kuivattuna ja käyttöpaikkaan toimitettuna. Ahtaat tai puuttuvat polttopuun varastotilat omakotialueilla edellyttävät sujuvaa logistiikkaa (mm. Luoma 1998).

Pientalokiinteistöissä poltetaan haketta vuosittain 0,4 milj. m³ (Ylitalo 2003). Tästä valtaosa on maataloilla omista metsistä korjattua rankapuuta (Sevola ym. 2003). Ns. lämpöyrittäjäkohteissa poltettiin v. 2002 lisäksi runsaat 80 000 m³ metsähaketta (Nikkola ja Solmio 2003). Lämpöyrittäjien ylläpitämät kohteet ovat pääosin alle 1 MW:n kokoisia suurten kiinteistöjen tai kiinteistöryhmien lämmitykseen rakennettuja "lähilämpökeskuksia". Pienkäyttökohteille tyypillisiä

piirteitä ovat sijainti taajaman tai lämmön käyttäjien keskellä, pienet kertatoimituserät sekä rajalliset mahdollisuudet polttoaineen varastointiin käyttöpaikalla. Myös hakkeen laadulle asetetaan tyypillisesti suurkäyttäjiä tiukemmat rajoitteet erityisesti palakoon, hakkeen kosteuden ja neulasjakeen määrien osalta. Lähilämpökohteiden hakkeesta lähes puolet valmistetaan karsimattomasta pienpuusta, karsitun rangan osuus on kustannussyistä laskussa. Polttoteknisistä syistä pienkäyttökohteilla on hakkuutähteen käyttö vähäistä: korkea kosteus ja suuri pienjakeen määrä aiheuttavat ongelmia poltossa ja varastoinnissa.

Pienimuotoista metsähakkeen ja pilkkeiden hankintaa ja tuotantoa ei ole järkevää tarkastella erillisinä toimintoina, vaan näkökulma pitää olla tuote- ja markkinalähtöinen raaka-aineen allokointi mahdollisimman kannattavaan jalostukseen ja käyttöön. Allokoinnissa lähtökohtana on markkina- ja käyttöpaikkatilanne, johon yhdistetään raaka-ainelähteiden hallinta. Käytännön tasolla kysymys on ensiharvennuksista ja nuoren metsän kunnostuskohteilta kertyvän puuraaka-aineen jakamisesta metsäteollisuuden ainespuuksi ja energian tuotantoon joko hakkeeksi tai pilkkeeksi.

Etenkin pilkkeiden kaupassa toimituserät ovat yleensä pieniä ja toimitusmuodot hyvin vaihtelevia. Kysynnän ja tarjonnan kohtaamisessa on ongelmia sekä paikallisella että suuralueetasolla. Metsähakkeen ja erityisesti pilkkeiden kaupassa voidaan erottaa selkeästi kaksi erillistä logistista vaihetta, raaka-aineen hankintalogistiikka ja tuotteen jakelulogistiikka. Tällä hetkellä puun toimittajat yleensä kantavat vastuun molemmista vaiheista (Seppänen ja Kärhä 2003). Menetelmät ovat hyvin kirjavia ja tehokkuus etenkin toiminnan laajentuessa kyseenalaista. Kysynnän ja tarjonnan kohtaamista on voitu edesauttaa huomattavasti Internet-pohjaisten palveluiden avulla (esim. MottiNetti, www.mottinetti.com). Tiedon tehokkaasta kulusta seuraa tarve kehittää myös materiaalivirtoja tehokkaammiksi.

2. Tavoite

Hankkeen tavoitteena on kehittää pienkäyttäjien hake- ja pilkelogistiikkaa ja taloutta sekä tuottaa tietoa alalla toimivien yrittäjien ja neuvontaorganisaatioiden käyttöön

- tehostamalla raaka-ainehankinnan ohjausta tuotelähtöisyyden periaatteen mukaisesti
- kehittämällä metsäsuunnittelun tuottaman tiedon hyväksikäyttöä nuorten metsien energiapuun hankinnassa
- kehittämällä jakelutyyppeiden, lyhyillä kuljetusmatkoilla operoivien ajoneuvojen käytettävyyttä ja logistiikkaa pilkkeen jakelussa sekä määrittämällä erikoistuneiden kuljetuspalveluiden käytön asettamia vaatimuksia pilkkeen tuotannolle
- selvittämällä vaihtoehtoisten pilkkeen jakelujärjestelmien toteutettavuutta
- tarkastelemalla pilkkeen pakkaustavoille asetettavia vaatimuksia erityisesti jakelun ja loppukäytön näkökulmasta.
- tutkimalla ja kehittämällä pilkkeiden suurmittakaavaisen kaukokuljetuksen logistiikkaa.
- tuottamalla malleja ensiharvennusten ja nuoren metsän kunnostuskohteiden ohjaamiseen ainespuuksi sekä hake- tai pilketuotantoon
- kehittämällä polttopuun verkkokauppaa sekä verkkokaupan asiakastoimittaja- ja tuottaja-toimittaja-rajapintoja hankkeessa saatujen kokemusten perusteella.
- arvioimalla erikoistumisesta ja verkottumisesta saatavia hyötyjä pilkkeen tuotannossa ja jakelussa.

3. Aineistot, menetelmät ja toteuttajat

Pilketuotannon nykytilaa ja yrittäjiä on tutkittu haastattelemalla. Verkkokaupan nykytilaa ja MottiNetti-kauppapaikan toimintaa on lisäksi kartoittanut hankkeen yrityspartneri (Pohjois-Karjalan Sähkö Oy) pilkkeen käyttäjille ja polttopuuyrityksille suunnatuilla kyselyillä. Nämä tiedot eivät ole julkisia, mutta tuloksia on voitu käyttää verkkokaupan kehittämissuunnitelmissa.

Pilkkeen tuotanto- ja jakeluketjujen mallittamisessa ja analysoinnissa käytetään eri lähteistä saatuja tuottavuus- ja kustannustietoja. Puunkorjuumenetelmistä sekä pilkkeen tuotanto- ja toimitusketjuista on saatavissa haastatteluihin ja työntutkimukseen perustuvia tietoja aiemmista tutkimuksista. Pilkeketjujen tuotta-

vuusparametreista ei ole kattavasti tutkimuksiin perustuvaa tietoa, joten osa aika- ja kustannusparametreista joudutaan arvioimaan. Tavoitteena tutkimuksessa on vertailla toimivia ja koostaa uusia tuotantoketjuja sekä tehdä ketjujen toimivuus- ja kustannustarkasteluja. Jakeluketjujen toimivuutta tarkastellaan diskreetillä simuloinnilla.

Energiapuukohteiden allokointi- ja kertymätarkasteluissa tuotetaan simuloinneissa tarvittavia puutason energiapuun kertymämalleja käyttäen Hakkilan (1991) aineistoa. Lisäksi hankkeessa on kerätty Metsäkeskus Pohjois-Karjalan metsäsuunnittelussa tunnistamista energiapuukohteista 37 metsikköä, 246 koelaa ja 9 130 lukupuuta käsittävä aineisto. Aineistoa käytetään em. energiapuumallien laadinnassa keväällä 2004. Sen avulla tutkitaan myös metsäsuunnittelun energiapuuintoiminnan tarkkuutta ja sen kehittämismahdollisuuksia. Tuotettujen energiapuumallien avulla analysoidaan hakkuutavan, esim. kuitupuun latvaläpimitan ja eri korjuumenetelmien vaikutusta energiapuun kertymään. Simuloinnit tehdään Monsu-ohjelmistolla, mutta laadittavat energiapuumallit ovat käytökel- pisiä myös muissa metsikkösimulaattoreissa.

Projektia koordinoi Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun tutkimuskeskus. Projektipäällikkö on vanhempi tutkija, maat.- ja metsätiet. maist. Timo Tahvanainen. Hankkeen toteutuksessa ovat mukana lisäksi: Metsäkeskus Pohjois-Karjala, Pohjois-Karjalan Sähkö Oy, Kiitoautot Oy ja Airaxin Ky. Yritykset osallistuvat myös hankkeen rahoitukseen.

4. Tulokset

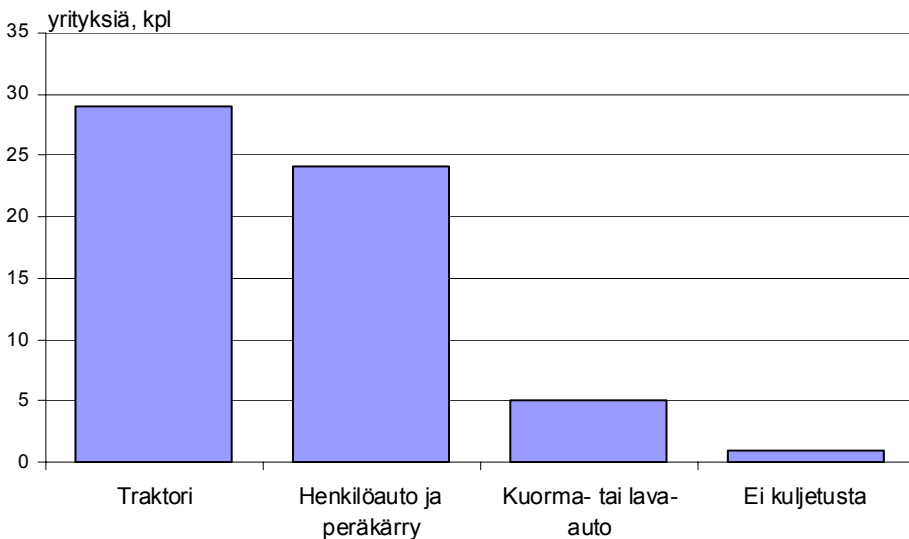
4.1 Pohjoiskarjalainen pilkeyrittäjä

Hankkeen alussa vuonna 2002 kartoitettiin haastattelemalla MottiNetti-verkkokaupassa mukana olleiden pohjoiskarjalaisten yrittäjien toimintaa. Haastatelluista 48 pilkeyrittäjästä lähes kaikki ilmoittivat hankkivansa raakapuun joko kokonaan tai ainakin osittain omista metsistään. Vain joka kymmenes ilmoitti ostavansa kaiken pilkkeiden tekoon tarvitsemansa puun. Rankojen kuljetus metsästä pilkontapaikalle tapahtui yleisesti tavallisella maataloustraktorilla, jossa oli usein työtä helpottamassa metsätyövälineitä, kuten kuormain ja metsä-

perävaunu. Neljännes vastaajista kertoi rankojen kuljetuksen tapahtuvan joko osittain tai kokonaan ostopalveluna.

Polttopuun kuivaus tapahtui yleensä pinottuna taivasalla pressulla tai vastaavalla kevyellä katteella peitettynä. Noin neljänneksellä vastaajista pilkkeet olivat kuivausta varten lastattu erilaisiin häkkeihin tai verkkosäkkeihin. Kiinteitä pilkkeiden kuivaukseen soveltuvia katettuja tiloja oli vain muutamilla vastaajista. Pilkkeiden kuivumista katetuissa tiloissa oli tehostettu lisäämällä ilman kiertoa esimerkiksi käyttämällä puukasan alla kuormalavoja tai johtamalla puhaltimella ilmaa lattiassa olevien reikien kautta puukerrostien läpi. Noin joka kolmas haastatelluista varastoi kuivaa puuta katettuihin varastotiloihin.

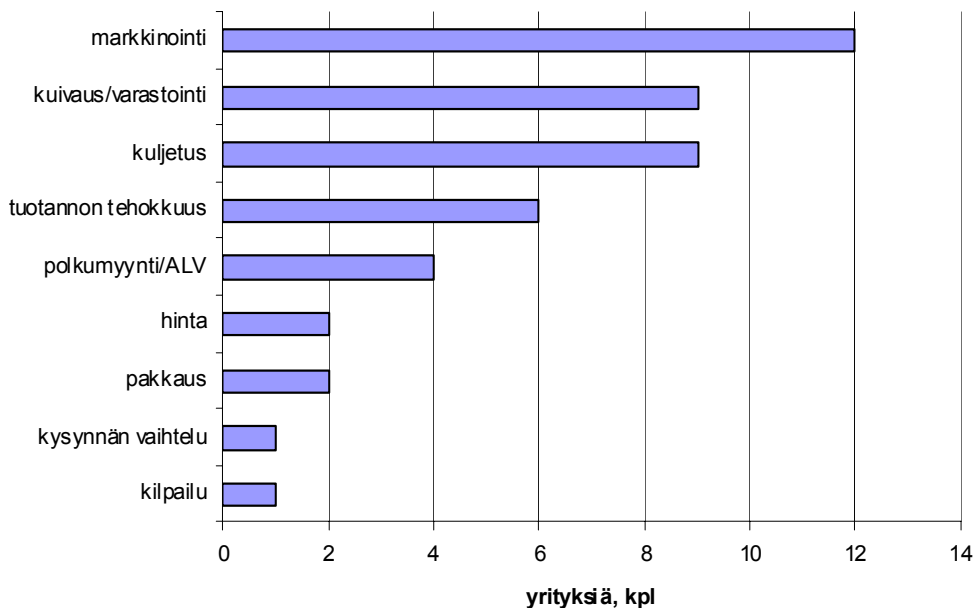
Asiakkaille puupilke toimitetaan pääsääntöisesti pakkaamattomana irtotavarana. Eräät yrittäjät toimittivat pilkettä myös pakattuna erilaisiin puulavojen päälle rakennettuihin häkkeihin, verkkosäkkeihin tai pahvilaatikoihin. Useimmiten pilkkeet toimitetaan lähialueille joko traktorin peräkärriellä tai, mikäli kyseessä on pienempi erä, henkilöauton peräkärriellä tai pakettiautolla (kuva 1).



Kuva 1. Pohjoiskarjalaisten pilkeyrittäjien kuljetuskalusto.

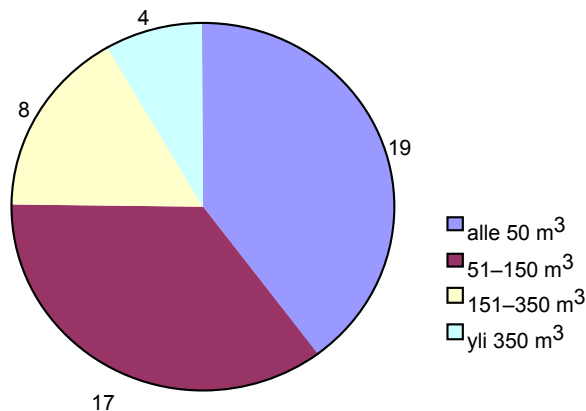
Kaikki haastatellut pilkeyrittäjät mainostivat polttopuueriään MottiNetissä. Myös perinteisiä markkinointitapoja käytettiin yleisesti. Yleisimpiä tapoja markkinoida pilkettä olivat ilmoitukset sanomalehdissä, erilaisissa yritys- ja palveluhakemistoissa ja kauppojen ilmoitustauluilla. Suurella osalla vastaajista oli vakiintuneita asiakassuhteita polttopuun ostajiin ja he luottivat asiakkaiden kertovan edelleen tuttavilleen puukaupoistaan ja näin levittävän ”puskaradion” tavoin tietoa pilkeyrittäjän tarjonnasta ja palvelusta.

Kuvassa 2 nähdään yleisimmät pilkeyrittäjien mainitsemat toimintansa ongelma-alueet ja kehittämistarpeet. Monille yrittäjille markkinointi, pilkkeen kuivaus ja varastointi sekä kuljetus tuottaa eniten ongelmia, ja he kaipaisivatkin erityisesti näiden osa-alueiden kehittämistä. Pilkkeiden kuivaus ja varastointi vaativat aikaa, ja mikäli kuivumista halutaan nopeuttaa, myös sopivia katettuja tiloja. Pilkkeen käsittely vaatii ihmistyötä ja nostaa kustannuksia. Tuotannon tehokkuutta haluttiin monissa vastauksissa parantaa vähentämällä pilkkeen käsittelyn tarvetta ja kehittämällä pilkkeen jakelua.



Kuva 2. Pohjois-Karjalan pilkekauppiaiden ilmaisemat ongelmatekijät ja kehittämistarpeet.

Pilkeyrittäjät jaettiin neljään ryhmään vuotuisen pilkekaupan määrän mukaan (kuva 3). Ensimmäiseen ryhmään kuuluivat sellaiset pilkeyrittäjät, jotka myivät alle 50 pinomottia ($p\text{-m}^3$) vuodessa. Heidän toimintansa katsottiin olevan pieni-
muotoista ja/tai satunnaista. Ryhmässä oli mukana myös muutamia toimintaansa aloittelevia pilkeyrittäjiä, joita ei vielä toiminnan vähyyden perusteella voinut luokitella muihin ryhmiin. Valtaosalla ryhmään kuuluvista oli pilkekone, mutta osa heistä käytti pilkkeen teossa yksinkertaisempaa teknologiaa, kuten ruuvihalkaisijaa ja/tai moottorisahaa ja kirvestä. Ongelmia tälle ryhmälle aiheuttivat lähinnä markkinointi ja asiakkaiden löytäminen. Osalla vastaajista syrjäinen sijainti vaikeutti toimintaa. Kolmannes vastaajista aikoi laajentaa toimintaansa. Saman verran arvioi toiminnan jatkuvan samalla tasolla ja loppu kolmannes oli aikeissa joko vähentää pilkkeen myyntiään tai lopettaa toiminnan kokonaan.



Kuva 3. Pohjois-Karjalan pilkekauppioiden jakautuminen tuotannon määrän mukaan, kpl.

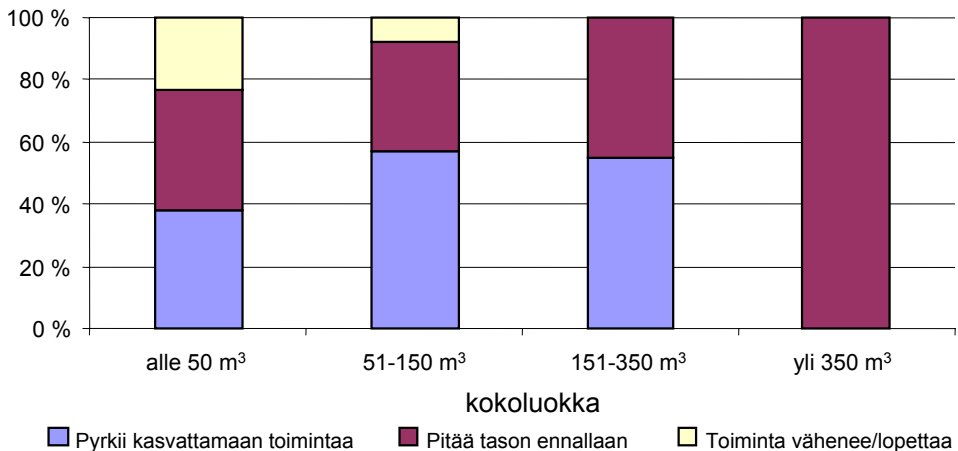
Toinen ryhmä käsitti pilkeyrittäjät, joilla vuosittain myyty pilkemäärä oli 51–150 $p\text{-m}^3$. Heidän toimintaansa voidaan kuvailla sivutoimiseksi. Pilke tehtiin edellistä ryhmää useammin pilkekoneella, ja tuotantoa oli pyritty tehostamaan erityisesti kuivauksen ja jakelun osalta. Pilkkeen kuivaus tapahtui usein kuormalavojen päälle rakennetuissa häkeissä ja kehikoissa. Muutamat vastaajista kertoivat toimittavansa osan pilkkeestä eri tavoin pakattuna. Kuljetuskalustona oli traktorin lisäksi monesti myös avolava-auto. Eniten päänvaivaa tämän ryhmän

vastaajille aiheuttivat pilkkeen kuivatuksen nopeuttaminen ja varastointi, kuiva-
tun pilkkeen tehokas käsittely ja asiakkaille toimittaminen sekä markkinointi.
Valtaosa ryhmään kuuluvista oli laajentamassa toimintaansa.

Osa-aikaisiksi katsottiin pilkeyrittäjät, joiden vuotuinen pilkekauppa oli
151–350 p-m³. Tässä ryhmässä pilkkeen teko tapahtui poikkeuksetta pilkeko-
neilla ja pilkkeen käsittely oli monilla myös koneistettua. Pilkkeen kuivausta
varten oli yleensä katettu varasto ja muutamilla oli varaston ilman kiertoa tehos-
tamassa sähkökäyttöisiä puhaltimia. Useat ryhmän pilkeyrittäjistä toimittivat
pilkkeet asiakkaille joko lavoilla häkeissä tai säkeissä. Lavakuorma-autot olivat
yleisiä kuljetuskalustona, mutta traktori ja henkilöauto peräkärriyineen olivat
edelleen käytettyjä kuljetusvaihtoehtoja lyhyemmille matkoille. Ryhmässä tu-
otannon tehostaminen ja koneellistaminen koettiin tärkeäksi. Pilkkeen hintatasoa
pidettiin muutamien vastaajien taholta liian alhaisena. Puolet ryhmästä aikoi
lisätä tuotantoaan ja puolet keskittyvät pitämään nykytasoa yllä.

Neljännän ryhmän edustajia (351–1 500 p-m³) voidaan kutsua ammattimaisiksi
pilkeyrittäjiksi. Heitä oli vastaajista vajaa kymmenes (4 kpl). Pilkkeen tuotanto-
ja jakelukulusto oli pitkälti samaa tasoa kuin edelliselläkin ryhmällä. Ongelmista
ja kehittämistarpeista mainittiin mm. tuotannon tehostamistarve, kannattavuuden
parantaminen ja kuivaustilojen tarve. Kannattavuutta heikentävänä tekijänä nähtiin
myös markkinoilla olevat ”pimeät” kauppiat, jotka eivät maksa liikevaih-
dostaan lakisääteisiä veroja ja pystyvät myymään pilkkeitään tästä syystä hal-
vemmallalla. Tämän ryhmän kaikki vastaajat kertoivat pitävänsä pilketoimintansa
määrällisesti nykyisellä tasollaan. Syyksi tähän kerrottiin esimerkiksi se, että
kapasiteetin kasvattaminen edellyttäisi työvoiman lisäämistä.

Pohjois-Karjalan pilkekauppa elää kasvun aikaa. Kyselyyn osallistuneista varsin
monet olivat investoimassa pilkekauppaan ja uskoivat myyntinsä kasvavan (ku-
va 4). Erityisesti sivutoimiset ja osa-aikaiset pilkeyrittäjät kertoivat toimintansa
kehittämissuunnitelmista ja odottivat toimintansa laajenevan. Pilkeyritykset ovat
yhden miehen tai perheen pyörittämiä. Ulkopuolista työvoimaa ei mielellään
haluta ottaa ehkä siksi, että sen kannattavuus edellyttäisi pilkkeen myyntimäärän
huomattavaa lisäystä. Pilkeyrittäjät ovat keskimäärin varovaisen optimistisia
myyntinsä kasvun suhteen eivätkä halua edetä investoinneissaan liian nopeasti ja
suurella riskillä. Pienillä pilkekauppiaille toiminnan kasvua rajoittavat usein
markkinoinnin ongelmat ja sen aiheuttama heikko kysyntä.



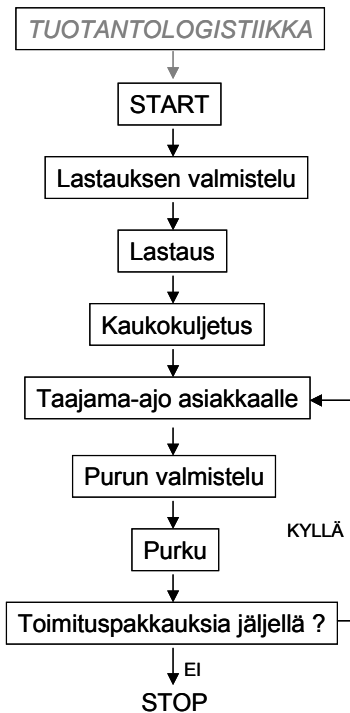
Kuva 4. Pohjois-Karjalan pilkekauppiaiden näkemykset toimintansa tulevaisuudesta.

Pienten pilkeyrittäjien markkinointiin kaivattaisiinkin lisää tehoa ja MottiNetti-palvelu on selkeä parannus tähän ongelmaan. Kyselyn toteutushetkellä (syksy 2002) vastaajilla oli palvelun toiminnasta kokemuksia vajaan ensimmäisen lämmityskauden osalta.

4.2 Jakelulogistiikka

Jakelulogistiikan simuloinnissa tavoitteena oli selvittää pilkkeen jakeluketjuihin sisältyvää kehittämispotentiaalia laatimalla yksinkertainen pilkkeen jakelun logistiikkamalli. Mallin rakenne on esitetty kuvassa 5. Mallin avulla tehdyillä simuloinneilla tarkasteltiin:

- pakkauskoon, toimituserän koon sekä kuormakoon vaikutusta jakelun tehokkuuteen
- yleisesti käytettyjen pilkkeen kuljetustapojen tehokkuutta suhteessa kaupallisten kuljetusliikkeiden tavarantoimituksissa käyttämiin jakelujärjestelmiin
- jakeluterminaalien käyttökelpoisuutta pilkkeen toimituksissa.



Kuva 5. Pilkkeen jakelujärjestelmän simulointimallin rakenne.

Simuloinnit tehtiin kolmelle eri jakeluetäisyydelle, 5 km, 35 km ja 70 km, pohjautuen Suomen Kiitoautot Oy:n jakelujärjestelmien luokitteluun. Luokittelussa lähijakelu on 0–40 km, aluejakelu 40–150 km ja kaukojakelu yli 150 km. Simuloidut jakeluetäisyydet vastaavat tilannetta, jossa jakelu tapahtuu taajaman välittömästä läheisyydestä (terminaalista) taajama-alueelle (5 km), polttopuuyrittäjän keskimääräistä jakeluetäisyydestä (35 km) (Seppänen ja Kärhä 2003) sekä kauempaa maaseudulta taajama-alueelle tapahtuvaa kuljetusta (70 km). Tarkasteltavana muuttujana käytettiin kuljetuksen ajanmenekkiä suhteessa toimitetun polttopuun määrään (minuutteja/m³).

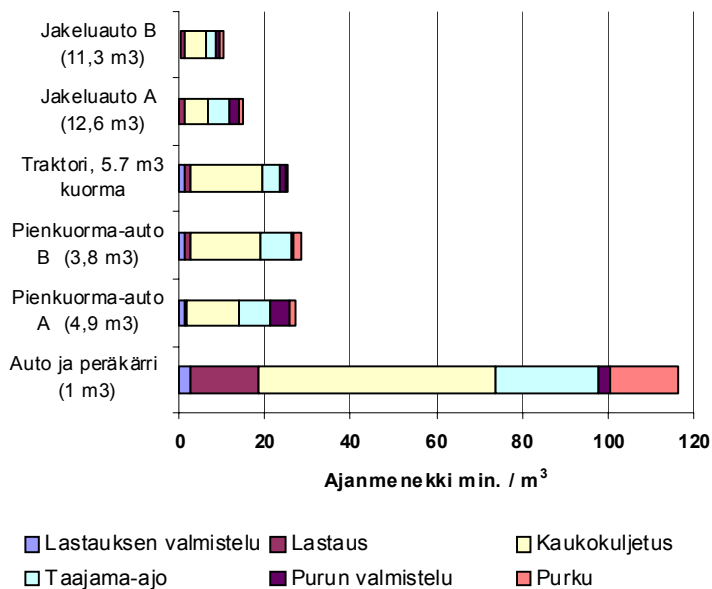
Pienkuorma-autolla ja kuljetusliikkeen jakeluatolla tapahtuvassa jakelussa pilke oletettiin pakatun kuormalavapohjaisiin toimituspakkauksiin, joiden koko vaihteli 0,45–1,4 kiintokuutiometrin välillä. Kaksi suurinta pakkaukokoaa (1,1 ja 1,4 m³) toimitettiin 1,0 x 1,2 Fin-kuormalavoilla ja alle kuutiometrin pakkaukoot pienemmällä 0,8 x 1,0 m Eur-kuormalavoilla. Pakkaukoko vaikutti siten kuljetusvälineeseen mahtuvien pakkausten määrään eli kuormakokoon.

Pilkkeen pakkaustekniikka oletettiin ratkaistuksi ja lastauksen sekä kuorman purkamisen oletettiin tapahtuvan joutuisasti trukkia ja kuormainta käyttäen. Toimituserän koon ei oletettu vaikuttavan pakkaus aikaan, ts. kuormalava siirtyi lavalle tai sieltä pois painosta tai tilavuudesta riippumatta samalla nopeudella. A-vaihtoehdossa toimitettiin kerrallaan yksi kuljetuspakkaus ja auto kuormattiin aina täyteen. B-vaihtoehdossa asiakkaalle toimitettiin kerralla vuoden puut, keskimäärin n. 3,2 m³.

Kuvassa 6 on vertailtu pilkkeen jakeluketjuja käyttäen eri kuljetusvaihtoehtoja. Tulosten mukaan yhden kiintokuutiometrin toimittaminen pilkkeen tuottajan varastosta 35 kilometrin kuljetusmatkan päässä sijaitsevalle asiakkaalle vie lähes kaksi tuntia käytettäessä autoa ja 1 m³:n kokoista peräkärriä. Tässä kuljetusvaihdossa sekä lastauksen että kuorman purkamisen on oletettu tapahtuvan käsityönä. Toinen pilkemyyjien yleisesti käyttämä jakelumuoto eli polttopuun toimittaminen irtotavarana traktorin lavalla vähensi ajanmenekin n. 25 minuuttiin kuutiometriä kohden. Kuorman ja toimituserän kokona käytettiin tällöin keskimäärin 5,7 kuutiometriä, lastauksen oletettiin tapahtuvan koneellisesti esim. etukuormajalla ja kuorma purettiin kippaamalla se asiakkaan pihaan.

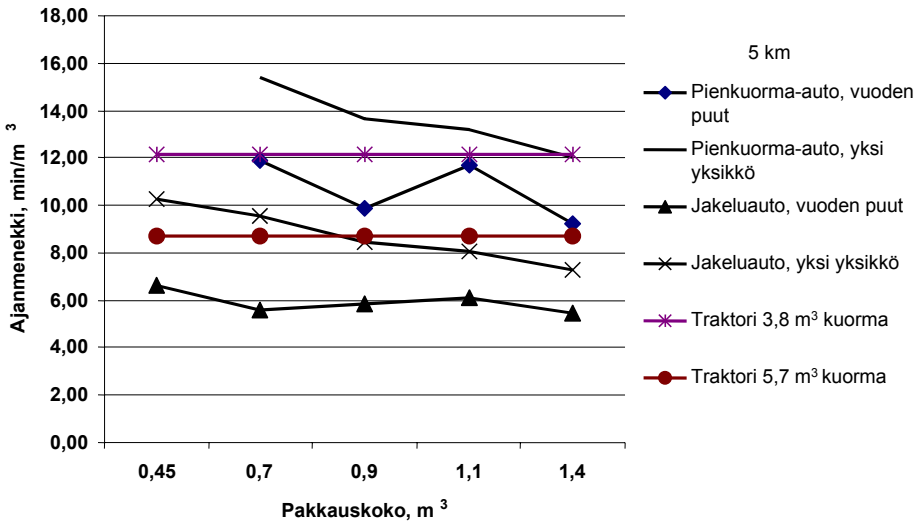
Pienkuorma-autolla tapahtuvassa jakelussa mahtui esimerkkiauton lavalle seitsemän Eur-lavaa (4,9 m³). Tämän lisäksi lavalle mahtuu siirtelyissä käytettävä hydraulinen ns. pumppukärri. Toimitettaessa talven puut kerralla täyttyi kuormatila useimmiten jo yhden asiakkaan puista, mikä laskee kuorman keskikoon 3,8 m³:iin. Kuutiometriä kohden lasketussa ajanmenekissä pienkuorma-auto hävisi ajankäytön tehokkuudessa hieman em. traktorivaihtoehdolle. Yksittäisjakelun ja ”koko talven puut” -vaihtoehdon välinen ero oli vain runsas minuutti. Vajaalla kuormalla tehtävä matka-ajo söi siten kuljetuksen tehokkuutta enemmän kuin yksittäisjakelusta aiheutuvat ylimääräiset asiakkaiden väliset siirrot ja kuorman purun valmistelutyöt.

Jakeluauton suurempi kuormatilavuus (12,6 m³) tehosti selvästi jakelua: toimitettaessa koko talven puut kerralla laskee ajanmenekki 10,5 minuuttiin kuutiometriä kohden. Yksittäisjakelussa taajama-ajon ja purkutapahtumien lisääntyminen nosti ajanmenekin 15 minuuttiin, vaikka keskimääräinen kuormakoko oli runsaan kuutiometrin suurempi.



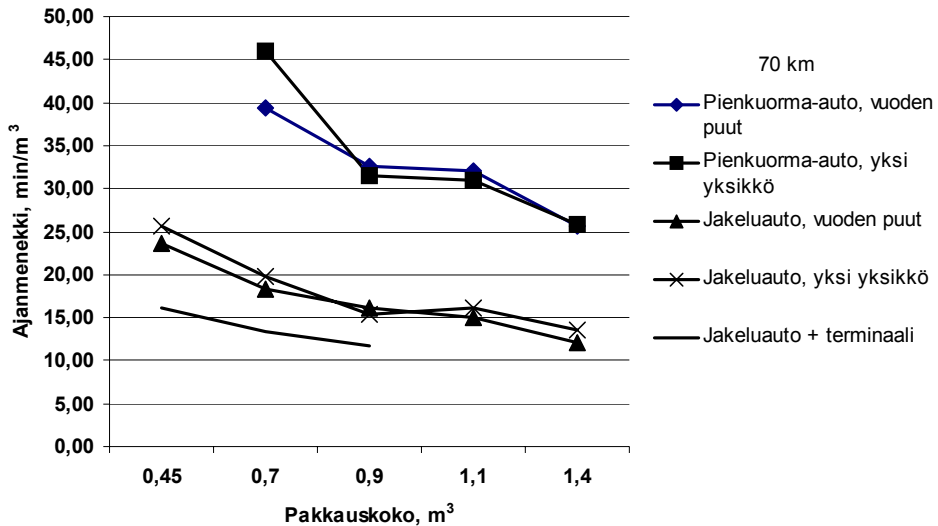
Kuva 6. Pilkkeen jakelun ajanmenekki 35 km:n etäisyydelle. Toimituserä keskimäärin per asiakas: $A = 0,7 \text{ m}^3$ ja $B = 3,2 \text{ m}^3$.

Kuvassa 7 on tarkasteltu kuljetusvaihtoehtojen eroja pilkkeen lähijakelussa, jossa ensimmäisen asiakkaan oletetaan sijaitsevan 5 kilometrin päässä toimituspai- kasta. Vaakasuorat viivat kuvaavat traktorijakelun ajanmenekkiä 3,8 kuutiometrin kuormalla (n. 12 min/m³) ja 5,7 kuutiometrin kuormalla (n. 9 min/m³). Lyhyellä kuljetusmatkalla irtotavarana ja suhteellisen suurissa erissä tapahtuva pilkkeen jakelu tarjoaa pienkuorma-autoa tehokkaamman jakeluvaihtoehdon, mutta häviää tehokkuudessa jakeluautolle, mikäli molemmilla vaihtoehdoilla toimitetaan kerralla omakotitalon vuoden käyttöä vastaava puumäärä. Yksittäisjakelu vie pienkuorma-autolla 2,5–3,8 minuuttia ja jakeluautolla 1,9–3,8 minuuttia enemmän aikaa kuutiometriä kohden verrattuna vuoden puiden toimittamiseen kerralla. Pakkauskon ja toimituserän koon kaksinkertaistaminen laskivat kumpi- kin yksittäisjakelussa kustannuksia noin neljänneksellä.



Kuva 7. Toimitusyksikön koon vaikutus jakelun ajanmenekkiin eri kuljetusmuodoilla 5 km:n matkalla.

Kuvassa 8 on tarkasteltu kuljetusvaihtoehtojen eroja 70 kilometrin toimitusmatkalla. Pitkillä toimitusmatkoilla kuormakoon merkitys kasvaa ja ajanmenekki kuutiometriä kohden on pienkuorma-autolla noin kaksinkertainen verrattuna suurempaan jakeluautoon. Samasta syystä yksittäisjakelu muuttuu suurimpia pakkauskojoja käytettäessä vuoden puiden toimituserissä kuljettamista nopeammaksi. Jakeluterminaalien käyttö pitkän matkan toimituksissa vaikutti tehokkaan jakelua. Pilkkeen kaukokuljetus täyteen pakattuina rekkalasteina on varsin tehokasta, sillä 70 kilometrin matkalla kaukosiirron ajanmenekki kuutiometriä kohden vaihteli 0,45–0,9 m³:n pakkauskoolla 5,8–3,2 min/m³. Kun lähijakelu oletettiin tapahtuvan jakeluautolla yksittäisjakeluna, jäi terminaalivaihtoehto aina selvästi tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi. Terminaalivaihtoehdossa kaukosiirron ajanmenekkiin on luettu vain yhteen suuntaan tapahtuva kuljetus, kun muissa vaihtoehdoissa matka-aikaan sisältyy molempiin suuntiin tapahtuva kuljetus. Oletuksena on, että rekka-auto saa ”maksavan asiakkaan” myös paluumatkalle. Matka-ajan merkitys 70 kilometrin kaukosiirrosta on kuitenkin vähäinen verrattuna lastaus- ja purkuaikeihin.



Kuva 8. Toimitusyksikön koon vaikutus jakelun ajanmenekkiin eri kuljetusmuodoilla 70 km:n matkalla.

Simulointi osoittautui käyttökelpoiseksi keinoksi pilkkeen kuljetusvaihtojen tarkastelussa. Tuloksia arvioitaessa on kuitenkin muistettava, että varsinkin pakatun polttopuun kuljetusta koskevat lastauksen ja purun aikaparametrit ovat arvioita. Käytettyihin käsittelyaikoihin voidaan päästä vain laajamittaisessa ja kouliintuneessa pilkkeen jakelussa, jolloin kuljetettava tuote on pakattu helposti siirrettäviin käsittely-yksiköihin, joiden avulla kuormatila voidaan täyttää tehokkaasti. Pakkaukset eivät saa kuljetuksen aikana myöskään esim. hajota tai takertua toisiinsa. Jakeluketjujen aikataarkastelussa ei ole otettu huomioon pilkkeen pakkaamiseen kuluva aikaa ja kustannuksia, eikä kuljetuslavojen palautukseen liittyviä näkökohtia ole otettu huomioon. Pakkauskulujen vastapainoksi pilkkeen käsittely helpottuu. Lisäksi pakkaaminen nostaa pilkkeen jalostusarvoa ja antaa mahdollisuuden parantaa toimituksen laatua ja siten asiakkaan saamia hyötyjä.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että kuljetusvaihtoehdoissa on eroja ja nykyisin yleisesti käytetyt toimitusratkaisut sisältävät runsaasti kehittämismahdollisuuksia. Henkilö- ja pakettiautot eivät sovellu laajamittaiseen pilkkeen jakeluun ja pienkuorma-autotkin jäävät tehokkuudessa selvästi jälkeen varsinaisten jakeluautojen tehokkuudesta. Pilkemyyjien arvioima keskimääräinen jakelukustannus (9–12,5 €/m³) (Seppälä ja Kärhä 2003) ei riitä kattamaan tehostomimpien

kuljetusvaihtoehtojen kustannuksia. Kuljetusvaihtoehtojen kustannuksia ei voida suoraan verrata toisiinsa ajankäytön tehokkuuden perusteella, sillä tehokkaimmissa vaihtoehdoissa myös pääoma- ja käyttökulut ovat usein korkeammat. Silti kaupallisten kuljetuspalveluiden käytön voidaan arvioida tarjoavan hyviä mahdollisuuksia pilkkeen jakelukustannusten alentamisessa. Tämä edellyttää kuitenkin pilkkeen tuottajalta ja markkinoijalta nykyistä suurempia volyymejä, pakkausongelman teknistä ja taloudellista ratkaisua sekä mm. kehittyneitä varastointi- ja lastausjärjestelyjä. Kuljetustiheyden nostaminen esim. pakkauskokoa tai pakkaustiiviyyttä nostamalla tarjoaa varman keinon alentaa kuljetus- ja käsittelykustannuksia. Pilkkeen jakelussa voisi eri kokoisiin jakelueriin perustuva ja asiakkaiden tarpeista lähtevä malli yhdistää parhaiten yksittäisjakelun sekä ”vuoden puut” -jakelun hyvät puolet. Suuremmissa erissä toimitettuna saavutetaan säästöä purku- ja ajoajoissa ja toisaalta yksittäisjakelun avulla voidaan taata täysi kuorma. Kuljetustermiinaaleja käytetään laajasti esim. vähittäiskaupan jakelussa ja nyrkkisäännön mukaan terminaalivehto on suoratoimituksia edullisempi toimitusmatkan ylittäessä 40 km. Tämä periaate näyttäisi soveltuvan hyvin myös pakatun pilkkeen jakeluun.

4.3 Polttopuun kuivauskapasiteetti -kysely

Vuoden 2002 lopussa lähetettiin kysely 50:lle Pohjois-Karjalassa toimivalle puunjalostajalle, joilla tiedettiin olevan puutavaran kuivauskapasiteettia. Vastaus saatiin yhdeksältä yrittäjältä, joista kahdeksan oli kiinnostunut vuokraamaan kuivaamonsa kapasiteettia polttopuun kuivaukseen. Parhaat edellytyksen polttopuun kuivaukseen katsottiin olevan yrityksillä, joilla kuivausenergia tuotetaan sahaustoiminnan jätteistä. Näitä vastaajista oli kolme ja kaikki olivat kiinnostuneita polttopuun rahtikuivauksesta. Yhteensä näiden yritysten kuivauskapasiteetti on 13 000–53 000 m³ vuodessa sahatavarakuutiometreinä ilmaistuna. Yhteistyöhön pilkeyrittäjien kanssa suhtauduttiin myönteisesti, vaikka polttopuun kuivaus ei kuulunut kellään lähitulevaisuuden kehittämissuunnitelmiin. Omaan polttopuuliiketoimintaan vastaajilla ei ollut halukkuutta, vaan toimintamallina olisi mieluummin yhteistyö polttopuuyrittäjän kanssa.

Sahojen vajaakäytössä oleva kuivauskapasiteetti antaa hyvän mahdollisuuden kehittää polttopuun kuumailmakuivausta ilman omaan kuivauskapasiteettiin tehtäviä investointeja. Kyselyyn vastanneiden Pohjois-Karjalan yritysten vapaa

kuivauskapasiteetti vastaa koko Suomen pakatun pilkkeen nykyisiä markkinoita (Seppälä ja Kärhä 2003). Käyttämättömän kuivauskapasiteetin myynnissä yrittäjän kannalta kannattava markkinahinta voi vaihdella merkittävästi ja pilkeyrittäjän kannattaakin kartoittaa toiminta-alueensa mahdollisuuksia mahdollisimman kattavasti. Polttopuun keinokuivauksesta puuttuu edelleen merkittäviä perustietoja toiminnan kehittämiseksi. Tutkittua tietoa tarvitaan esim. polttopuulle optimoiduista kuivauskaavoista, kuivausenergian tarpeesta puun eri kosteustasoilla sekä tarvittavan energian jakautumisesta lämpö- ja sähköenergiaan. Em. tiedot antaisivat mahdollisuuden tarkastella lämminilmakuivauksen kannattavuutta tapauskohtaisesti sekä loisisivat edellytyksiä kehittää ulkoilmakuivauksen ja keinokuivauksen yhdistäviä menetelmiä.

5. Tulosten hyödyntäminen ja julkaisut

Jakelujärjestelmien tutkimuksella saatava tieto auttaa polttopuuyrittäjiä liiketoimintansa kehittämisessä. Polttopuuliiketoiminnan kehittyessä, yrittäjien tuotantomäärien kasvaessa ja toiminnan muuttuessa entistä ammattimaisemmaksi, pitää saatavilla olla luotettavaa tietoa eri vaihtoehtoista. Hankkeiden tuloksia tullaan hyödyntämään yrittäjien koulutuksessa ja neuvonnassa.

Metsäsuunnitteluun ja sen kehittämiseen perustuvat laskelmat polttopuun saavuudesta ja eri korjuukriteerien vaikutuksesta kertymiin auttavat merkittävästi polttopuun markkinoille tuloon. Nuorten metsien ja pienpuun korjuussa raaka-aine ei tule markkinoille muun toiminnan sivutuotteena, kuten hakkuutähteiden korjuussa. Raaka-ainevarojen paikallistaminen ja saaminen markkinoille ei onnistu nykyisillä metsäsuunnittelutiedoilla ja -järjestelmillä ilman jatkokehitystä. Tiedon ensisijainen käyttäjä tulee olemaan paikallinen metsäkeskus yhteistyössä yrittäjien ja muiden alan toimijoiden kanssa kehittäessään MottiNetti-sovelluksen Puulaakso-osaa, johon kootaan tietoa kaupan olevista energiapuu-kohteista.

Hankkeessa on tuotettu vuoden 2003 loppuun mennessä seuraavat julkaisut:

Tahvanainen, T., Liiri, H. & Sikanen, L. 2003. Delivery Logistics in Developing Efficient Supply Chains for Chopped Firewood. Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference. Jyväskylä. Finland 2.–5. 9. 2003. Proceedings. S. 499–503.

Tahvanainen, T., Sikanen, L., Karppinen, H. & Tolvanen, K. 2003. MottiNetti – Marketing chopped firewood and services in Internet. Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference. Jyväskylä. Finland 2.–5. 9. 2003. Proceedings. S. 514–517. (myös posterit)

Tahvanainen, T. & Sikanen, L. 2003. Energiapuun kysyntä luo työpaikkoja ja uutta liiketoimintaa. Metsäsektorin suhdannekatsaus 2003–2004. Metsäntutkimuslaitos. S. 53–55.

Hanke osallistui myös Metsäntutkimuslaitoksen metsänteknologian tutkimuksen tulevaisuuden haasteita luotaavaan skenaariotyöskentelyyn, jonka tuloksena valmistui seuraava julkaisu:

Rummukainen, A., Heikkilä, J., Sikanen, L., Aarnio, J., Mäkinen, P. ja Tahvanainen T. 2003. Puunhankinnan tienviitat. Tutkimustarpeet muuttuvassa toimintaympäristössä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 896. 80 s. ISBN 951-40-1885-0, ISSN 0358-4283.

Hankkeessa on tuotettu kaksi posteria, suomenkielinen hankkeen yleisesittely-posteri ja MottiNettiä esittelevä posterit, ”MottiNetti – polttopuut verkossa – www.mottinetti.com”.

Lisäksi hanke teki yhteistyössä Sanomalehti Karjalaisen kanssa artikkelin polttopuumarkkinoista lämmityskauden 2003–2004 alussa. ”Hiillos hiipuu uunissa” 3.11.2003. S. 8.

Lähteet

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusbiomassa. Folia Forestalia 773. Metsäntutkimuslaitos. 24 s.

Helynen, S. & Oravainen, H. 2002. Polttopuun pientuotannon ja -käytön kehitystarpeet. Tekes. Teknologiakatsaus. 124. 26 s.

Luoma, H. 1998. Pientalojen polttopuun markkinatilanne pääkaupunkiseudulla. Työtehoseuran metsätiedote 7/1998. 4s.

Nikkola, A. & Solmio, H. 2003. Lämpöyrittäjätoiminta vuonna 2002. Työtehoseuran metsätiedote 10/2003. 4 s.

Seppänen, A. & Kärhä, K. 2003. Pilkekauppa Suomessa. Summary: The chopped firewood trade in Finland. Työtehoseura. Metsätiedote 662. 6 s.

Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Polttopuun käyttö pientaloissa 2000/2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 894. 25 s.

Tahvanainen, T., Liiri, H. & Sikanen, L. 2003. Delivery Logistics in Developing Efficient Supply Chains for Chopped Firewood. Bioenergy 2003. International Nordic Bioenergy Conference. Jyväskylä. Finland 2.–5. 9. 2003. Proceedings. S. 499–503.

Ylitalo Y. 2003. Puupolttoaineen käyttö energiantuotannossa vuonna 2002. Metsätilastotiedote 670. Metsäntutkimuslaitos. 5 s.

www.miilu.com: Puuenergian käytön tietopalvelu

www.mottinetti.com: Polttopuun ja liitännäispalvelujen sähköinen kauppapaikka.

Hakkeen kuivaus osana lämpöyrittäjyyttä – PUUT41

Jukka Yrjölä

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Tekniikantie 2, 28600 Pori

Puh. (02) 6203 214, (044) 7103 214, faksi (02) 6203 300

E-mail: jukka.yrjola@samk.fi

Abstract

Project title in English: Drying of wood chips as a supplementary business of energy co-operatives

The most significant difficulties in using wood chips in small scale heating plants are the great variation of moisture and size of the fuel particles. Drying and sieving improves the qualitative competitiveness of wood chips. The aim of the study is to find out the technological and economical possibilities of small scale drying and sieving stations as a supplementary business of energy co-operatives. The study consists of three parts. Firstly, the energy economy of the fuel chain of wood chips is analysed. In the long-term storage the dry matter loss will be compared to the gain of the heating value due to the decrease of moisture content. Secondly, the thermal drying performed with warm air is modelled and measured. The drying of deep fuel bed will be modelled by taking into account the movement of moisture inside the fuel particle. The measurements will be carried out with several species of wood and changing the parameters (temperature and volume flow rate of the drying air and thickness of the fuel bed). A calculation programme for the designing work of dryers will be developed. Thirdly, the heat and mass balance calculations of drying and sieving stations and the profitability calculations for the most promising alternatives will be done. The aim is to find also an investor for a demonstration plant.

1. Projektin tausta

Lukumääräisesti eniten uusia hakelämpölaitoksia toteutettaneen teholuokkaan 30–300 kW. Merkittävä osa näistä tulee maataloille, joilla on tarve vähentää kustannuksia ja halu käyttää tilalta saatavaa energiapuuta. Paljon uusia lämpökeskuksia tulee myös lämpöyrittäjien hoitoon. Tässä teholuokassa laitoksien hoidon kannalta työllistävimmät tekijät ovat hakkeen laatuvaihtelut (kosteus, tikkuisuus) sekä laitosten heikko automaatiotaso. Nämä puutteet ovat erityisen haitallisia lämpöyrittäjyyskohteissa, mikä näkyy matalana hyötysuhteena ja runsaina tarkastus- ja häiriönpoistokäyntien määrinä. Lämpöyrittäjillä voisi olla useita laitoksia hoidettavana, mikäli heillä olisi käytössään tasalaatuaisempaa haketta ja toimiva laitosautomaatio.

Pienen kokoluokan hakelämmityksen yleistymisen muissakin kohteissa kuin maanviljelijöiden omakäytössä edellyttää hakkeen laadun parantamista. Palkkooltaan ja kosteudeltaan tasalaatuinen hake on polttolaitoksen huollettavuudessa verrattavissa pelletin polttoon. Hakkeen etuina ovat pölyttömyys, raaka-aineen saatavuus ja lyhyet kuljetusmatkat.

Kuivausprosessi on jo vuosikymmeniä ollut laajan kansainvälisen tutkimusmielenkiinnon kohteena: kohdistuahan maailman energiankulutuksesta yli kymmenesosa teollisiin kuivausprosesseihin. Aiemmin saavutettujen tulosten ja kehitettyjen menetelmien soveltaminen hakkeen kuivaamiseen täydennettynä uusilla laboratoriomittauksilla tarjoavat mahdollisuuden kehittää hakepedin kuivumisen mallinnusta ja sen käyttöä kuivureiden mitoittamiseen.

Hakkeen kuivaus- ja lajittelutoiminta soveltuisi hyvin osaksi lämpöyrittäjyyttä. Laitos vaatii samantasoista valvontaa kuin muutkin lämmityskohteet. Lämpöyrittäjät voisivat ottaa useita pienempiä lämmityskohteita valvontaan, mikäli heillä olisi käytettävissään tasalaatuista polttoainetta. Kohteina voisivat olla esimerkiksi isohkot asuin-, liike-, virasto- ja teollisuuskiinteistöt, tai muutaman omakoti- ja/tai rivitalon lämmitysryhmät. Lämpöyrittäjät voisivat myös toimittaa kuivattua haketta pienikiinteistöjen ja muidenkin kiinteistöjen omistajille samoin kuin pellettitoimituksien osalta tehdään. Kuivatun hakkeen kysyntää saattaa esiintyä myös isommissa lämpökeskuksissa kosteina tai kylminä vuodenaikoina. Kuivausyksikköä voidaan käyttää myös hakkeen rahtikuivaukseen.

Lämpöyrittäminen on tyypillisesti sivutoimista, mutta hakkeen kuivaus ja lajittelu yhdistettynä siihen voi myös mahdollistaa päätoimisuuden. Toisaalta kuivatua ja lajiteltua haketta voidaan jaella myös valtakunnallisella ammattimaisella jakeluorganisaatiolla.

2. Projektin tavoite

Projektin tavoitteena on selvittää lämminilmakuivauksen vaikutuksia hakepolttoaineketjun energiatalouteen, laatia hakkeen lämminilmakuivurille mitoitus- ja simulointimalli, tehdä mallin lähtöarvojen määrittämiseksi ja tulosten verifiointiksi mittauksia sekä laatia laskentaohjelma kuivurin mitoittamiseksi. Tavoitteena on edelleen kehittää hakkeelle jatkuvatoiminen kuivaus- ja lajittelumenetelmä, selvittää hakkeen kuivauksen liiketoimintaedellytykset ja lämpöyrittäjyyteen soveltuvimmat toimintamallit sekä suunnitella kuivausliiketoiminnan demonstraatioprojekti.

3. Projektin toteutus

Hanke käynnistyi keväällä 2003 ja päättyi vuoden 2004 lopussa. Tuloksia alkaa olla käytettävissä kesällä 2004. Hanke jakautuu kolmeen pääosaan: polttoaineketjun energiatalouden tutkiminen, kuivauksen mallintaminen ja mittaukset sekä kuivausliiketoiminnan vaihtoehtotarkastelut ja talouden selvittäminen. Yritysosapuolina hankkeessa ovat mukana Antti-Teollisuus Oy, Biowatti Oy ja Nakkilan Konepaja Oy sekä tutkimuskumppaneina Metla ja VTT Prosessit.

Polttoaineketjun energiatalouteen liittyvästä osuudesta vastaa Metla. Kirjallisuustutkimuksen ja Metlan aiempien kokeellisten varastointitutkimusten aineistojen pohjalta selvitetään, paljonko tyypillisten lämpöyrittäjäkohteiden puupolttoainelaatujen lämpömäärästä menetetään kuiva-ainetappioiden takia pitkäaikaisessa metsä- tai tienvarsivarastoinnissa, ja toisaalta paljonko energiaa säästyy puun kuivuessa. Tavoitteena on selvittää, missä vaiheessa energiatalouden kannalta kannattaisi toimittaa kuivattava tuote kuivausyksikköön.

Kuivauksen mallintamiseen liittyvä osuus toteutetaan Satakunnan ammattikorkeakoulu (SAMK) ja VTT Prosessit yhteistyönä. Hakepedin lämminilmakuiva-

ukselle laaditaan malli, jossa otetaan huomioon kosteuden kulku hakepartikkelin sisällä ja sen haihtuminen partikkelin pinnalta. Osuudessa toisaalta täsmennetään aiempia malleja ja toisaalta pyritään kehittämään niistä yksinkertaistettu ja käytäjäystävällisen laskentaohjelman laatimiseen soveltuva riittävän tarkka muoto. Mallinnuksen aluksi tehdään kirjallisuustutkimus aiemmin laadituista soveltuvista malleista ja raportoiduista kokeellisista tutkimuksista. SAMK:n laboratorioon on syksyllä 2003 rakennettu mittauslaitteisto (kuva 1). Mitataan kiinteän hakepedin kuivumista eri parametreilla (hakelaatu, partikkelikoko, pedin paksuus, kuivausilman lämpötila ja massavirta). Tehdään myös mittauksia kuivumisprofiilin selvittämiseksi ja lämmönsiirron parametrien selvittämiseksi. Mittaustuloksia verrataan laskentamalliin, tehdään tarvittavat mallin täsmennykset ja laaditaan laitemitoitukseen soveltuva laskentaohjelma hakekuivurille.



Kuva 1. Kuivausmittalaitteen ilmavirta ja sen lämpötila ovat portaattomasti säädettävissä. Vaaka, jonka päälle laitteisto on asennettu, näkyy kuvassa taustalla. Kosteaa ilmaa poistetaan laboratoriotilasta ylhäällä näkyvän huuvan ja taipuisan poistokanavan kautta. Laboratorioinsinööri Pekka Anttonen (taustalla) ja insinööriopiskelija Peter Pyykkönen asentamassa tiedonkeruulaitteita toimintakuntoon.

Yhteistyössä yritysten kanssa suunnitellaan kustannusarviotarpeisiin esimerkkilaitoksien järjestelmä- ja laiteratkaisut. Laaditaan massa- ja energiataselaskelmat pelkästään kuivatun ja seulotun hakkeen tuotantoon suunnitellulle yksikölle.

Lisäksi mallinnetaan tyypillisen kuivatun hakkeen oheistuottajaksi soveltuvan lämpöyrittäjäkohteen energiankäyttö ja laaditaan vastaavat laskelmat muutamalle hakekattilan huipputeho-osuudelle. Laskelmien tuloksena saadaan tarvittava vuotuinen hakemäärä ja sen jakautuminen lämmityskäyttöön sekä lopputuotteen. Esimerkkitapauksille arvioidaan investointikustannukset, polttoainekustannukset ja muut käyttökustannukset sekä laaditaan toiminnan kannattavuuslaskelmat. Kartoitetaan vaihtoehtoja tuoreen hakkeen hankinnalle, kuivaustoiminnan organisoinnille sekä kuivatun hakkeen jakelulle. Arvioidaan eri vaihtoehtojen etuja ja haittoja sekä selvitetään tarvittavia sopimuksia osapuolten välillä valituissa vaihtoehdoissa. Pyritään etsimään kohde, jossa valitun toimintamallin mukainen hanke voidaan jatkossa toteuttaa.

4. Tuloksien hyödyntäminen

Lajitellun ja kuivatun hakkeen saaminen markkinoille täydentää pienkäyttäjien polttoainevalikoimaa ja lisää osaltaan puun polttoainekäyttöä. Onnistuessaan hanke tukee harvennuspuun saantia energiantuotantoon parantamalla myös lämpöyrittäjien liiketoimintaedellytyksiä. Mukana olevat yritykset edustavat kuivureiden ja lämpölaitoksien toimituksia sekä polttoaineen jakelua ja saavat tietoa ja kokemusta oman teknologiansa kehittämiseen. Tutkimusosapuolien kokemukset ja tieto kuivauksesta lisääntyvät. Satakunnan ammattikorkeakoulu voi hyödyntää tuloksia soveltuvien osin insinöörikoulutuksessa. Hankkeessa kehitetään kuivaustekniikkaa. Myös kaasutuspolttolaitokset saattavat tulevaisuudessa hyödyntää tätä tekniikkaa.

Julkaisut ja raportit

Yrjölä, Jukka. 2003. Hakkeen kuivaus osana lämpöyrittäjyyttä. Puupolttoaineiden kuivaus – Puuenergian teknologiaohjelman tutkijaseminaari. VTT Prosessit, Jyväskylä 6.11.2003. Saatavilla: www.tekes.fi/ohjelmat/puuenergia/tapahtumia

Muuratut tulisijat 2001 – PUUT43

Reijo Karvinen
Tampereen teknillinen yliopisto
Puh. (03) 3115 2021
E-mail: reijo.karvinen@tut.fi

Heikki Hyytiäinen
Tulisydän Oy
Riipiläntie 50, 01760 Vantaa
Puh. (0400) 700 311
E-mail: heikki.hyytiainen@megabound.fi

Abstract

The aim of the project is to develop the operation of wood-heating equipment as an element of modern housing. Objects of research include combustion in masonry fireplaces and reduction of emission. As a result, instructions for use will be prepared. Transfer of heat energy from combustion to fireplace structures and further to the surface of the fireplace is studied both theoretically and by carrying out combustion tests, the target being to adapt heat generation to the needs of present housing units. The study is carried out in co-operation with bricklayers, industries and research institutes in the field.

1. Tiivistelmä projektista

Muuratut tulisijat 2001 -tutkimus kehittää puulämmityslaitteitten toimintaa nykyaikaisen asumisen osana. Tutkimuksessa selvitetään palotapahtumaa ja päästöjen vähentämistä muuratuissa tulisijoissa. Tutkimuksen tuloksena laaditaan käyttöohje. Lämpöenergian siirtymistä palotapahtumasta tulisijan rakenteisiin ja edelleen niistä tulisijan pintaan tutkitaan teoreettisesti ja polttokokeitten avulla, tavoitteena sovittaa lämmöntuotto asuntojen nykyisiin tarpeisiin. Tutkimustyö tehdään yhteistyössä muurariammattikunnan, alan teollisuuden ja tutkimuslaitosten kesken.

Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät – PUUT44

Antti Asikainen, Juha Laitila & Jari Lindblad
Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus
PL 68, 80101 Joensuu
Puh. 010 211 3250, faksi 010 211 3251
E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

Matti Sirén & Jani Heikkilä
Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus
PL 18, 01301 Vantaa
Puh. 010 211 2335, faksi 010 211 2203
E-mail: etunimi.sukunimi@metla.fi

Vesa Tantt
Työteho-seura
PL 28, 00211 Helsinki
Puh. (09) 2904 1424, faksi (09) 6922 084
E-mail: vesa.tantt@vtt.fi

Abstract

Project title in English: Harvesting methods and cost factors of delimbed energy wood

Annual use of forest chips in small boilers was 0.4 mill. m³ in 2002. Large part of this volume is produced from delimbed stems. In addition, 19% of traditional firewood is produced from delimbed wood. Production of delimbed stems is expensive due to high cutting costs. Productivity of cutting, however, can be improved by multi stem handling and by integrating the harvesting of energy stems with the production of industrial roundwood. In this study the harvesting

methods for the production of delimbed energy stems are studied in energy wood thinnings. Both multi tree and single tree cutting methods are studied and the criterion for the selection of potential harvesting sites is developed.

1. Tausta

Vuonna 2002 poltettiin 0,4 milj. m³ metsähaketta pienkattiloissa (Ylitalo 2003). Tämä on noin 24 % kaikesta metsähakkeen määrästä. Karsitun energiapuun määrä metsähakkeen tuotannossa vuonna 2002 oli noin 100 000 m³ (Laitila ym. 2003). Kaiken kaikkiaan pientalokiinteistöt käyttivät lämmityskaudella 2000/2001 6,1 miljoonaa kuutiometriä polttopuuta (Sevola ym. 2003). Työteho-seuran vuonna 2002 tekemän tutkimuksen mukaan pilkkekauppiat valmistivat 19 % tekemistään pilkkeistä suoraan rankapuusta.

Energiakäyttöön ohjautuvan pienpuun määrä ja myös tuotantokustannukset riip-puvat vahvasti siitä, millaisia vähimmäismittoja metsäteollisuus soveltaa kuitu-puulle. Pienpuuhakkeen tuotannon rajoitteina ovat kalliit tuotantokustannukset ja vaikeus integroida energiapuun ja ainespuun tuotanto. Pienkattiloissa poltettavan hakkeen ja pilkkeiden raaka-aineena karsittu pienpuu säilyttää kuitenkin ase-mansa raaka-aineominaisuuksiensa ansiosta jatkossakin edellyttäen, että sen tuotantoketju on kustannustehokas.

Pienpuukorjuun korkeat kustannukset johtuvat pitkälti hakkuun alhaisesta tuot-tavuudesta. Yksi kustannusten alentamiskeino on puiden karsinnasta luopumi-nen. Koko- tai osapuukorjuussa säästöt syntyvät kertymää kasvattavasta latvus-massasta ja korjuutyön tuottavuuden kasvamisesta. Karsitusta puusta valmiste-tulla hakkeella on kuitenkin useita hyviä ominaisuuksia etenkin pienkattiloiden polttoaineena. Pienten maatila- ja asuinkiinteistöjen kattiloissa (alle 100 kW) ei aina voida käyttää kokopuusta valmistettua haketta. Karsitusta puusta valmiste-tussa hakkeessa kosteus ja palakokojakauma vaihtelevat suhteellisen vähän eikä neulasista ja lehdistä aiheudu ongelmia itse poltossa. Karsittu ranka soveltuu myös pilkkeen raaka-aineeksi.

Erilliskorjuussa aines- ja energiapuun korjataan toisistaan erillään, jolloin samal-ta alalta otetaan talteen ainoastaan energiapuuta tai ainespuuta. **Aines- ja ener-giapuun integroidussa** korjuussa puutavaraositteet hakataan yhtäaikaaisesti.

Energiapuuosite eli ainespuurunkojen latvakappaleet sekä ainespuukokoa pienemmät puut erotetaan ainespuusta jo hakkuuvaiheessa valmistamalla ositteet omiin kasoihinsa. Ositteiden metsäkuljetus on sujuvampaa omina kuorminaan. Suuri osa integroidusta korjuusta toteutetaan edelleen miestyöhakkuuseen perustuvana korjuuna, mutta hakkuun koneellistamiseen sekä tehostamiseen on suuri tarve.

Kasvatusmetsistä korjattavan energiapuun mukana poistuu jonkin verran ravinteita. Tämä vaikuttaa osaltaan metsänkasvatuksen talouteen, mutta sillä on vaikutusta etenkin energiapuun hankinnan hyväksyttävyyteen metsänomistajatasolla. Karsitun puun mukana metsästä poistuu huomattavasti vähemmän ravinteita kuin kokopuun mukana, koska merkittävä osa ravinteista on sitoutuneena puiden lehtiin, neulasiin ja oksien kuoriainekseen.

Yksiotehakkuukoneen tuottavuuteen vaikuttaa korjuuolosuhteiden lisäksi kuljettajan ammattitaito ja työskentelytekniikka. Kaadettujen puiden siirtely kasamuodostelmien aikaansaamiseksi ja hakkuutähteiden siirtämiseksi ajouraa suojaavaksi matoksi lisää ajanmenekkiä, mutta suuremmat kasat nopeuttavat metsäkuljetusta. Hakkuun tuottavuutta voidaan nostaa keräämällä hakkuulaitteeseen kaatovaiheessa useita puita samanaikaisesti ja karsimalla ja katkomalla ne yhtenä käsittely-yksikkönä. Joukkokäsittelystä onkin saatu aiemmin lupaavia tuloksia ainespuuhakkuussa. Tuottavuus suhteessa yksinpuinkäsittelyyn on noussut n. 20 % (Bergkvist 2003). Joukkokäsittelyssä hakkuussa syntyvistä kasamuodostelmista tulee suuria yksinpuinkäsittelyä pienemmällä puiden siirtelyllä. Toisaalta puutavaran hakkuukonemittaus on ongelmallista käsiteltäessä useita puita yhtäikää, mikä on hidastanut joukkokäsittelyn käyttöönottoa ainespuun korjuussa. Energiapuun korjuussa mittaus ei kuitenkaan ole yhtä suuri ongelma kuin ainespuuhakkuussa. Joukkokäsittelyn onnistuminen edellyttää, että hakkuukone on varustettu joukkokäsittelyyn soveltuvalla hakkuulaitteella.

Ainespuun ja karsitun energiapuun integroitua korjuuta ja joukkokäsittelyhakkuuseen perustuvaa karsitun energiapuun korjuuta ei ole kokonaisuutena aiemmin tutkittu. Bioenergian tutkimusohjelmassa Työtehoseura tutki metsänomistajien energiapuun korjuutekniikoita, ja yhtenä tutkimusaiheena oli karsitun energiapuun hakkuu ja metsäkuljetus maataloustraktorikalustolla. (Ryynänen ym. 1998)

2. Tavoitteet

Hankkeen ensisijaisena tavoitteena on selvittää mahdollisuudet alentaa koneellisesti korjatun karsitun energiapuun korjuukustannuksia harvennuselementtien koneellisessa korjuussa. Tutkittavia korjuumenetelmiä ovat ainespuun ja karsitun energiapuun integroitu korjuu ja karsitun rangan valmistus joukkokäsittelynä sekä yksittäisten runkojen käsittelynä. Lisäksi tavoitteena on selvittää rankapuun korjuuseen sopivat kohteet ja materiaalin saatavuus paikkatietoanalyysin avulla.

3. Toteutus

Tutkimushanke on Metsäntutkimuslaitoksen ja Työtehoseuran yhteishanke. Tutkimuksessa ovat mukana myös Sampo Rosenlew Oy, Timberjack Oy sekä Partek Forest Oy. Metsäntutkimuslaitos vastaa hankkeen koordinoinnista, joukkokäsittelyn tutkimuksesta ja kertymäselvitysten toteuttamisesta. Työtehoseura toteuttaa aines- ja energiapuun korjuuseen liittyvän osion. Projektin aikataulu on 1.1.2004–31.5.2005.

Tutkimustehtävät:

1. Selvitetään karsitun rankapuun korjuutyön tuottavuus ja kustannukset sekä energiapuun erilliskorjuussa että ainespuukorjuuseen integroidussa korjuussa.

1.1 Energiapuun erilliskorjuussa tutkimukset suoritetaan ns. energiapuuharvennusleimikoissa.

Erilliskorjuussa määritetään sekä yksinpuinhakkuuseen että joukkokäsittelyyn perustuvan hakkuun ja hakkuun jälkeisen metsäkuljetuksen tuottavuus.

Erilliskorjuussa verrataan samalla energiapuuharvennusleimikolla kokopuukorjuumenetelmän ja joukkokäsittelyyn perustuvan karsitun energiapuun korjuumenetelmän kustannuksia ja merkittävimpien leimikkotekijöiden vaikutuksia kustannuksiin. Energiapuun metsäkuljetus sisällytetään mukaan vertailuun.

Erilliskorjuussa verrataan samalla energiapuuharvennusleimikolla kokopuumenetelmällä ja karsintaan perustuvalla joukkokäsittelymenetelmällä saavutettavaa korjuujälkeä käyttäen Metsätalouden kehittämiskeskus Tapiossa kehitettyä uutta energiapuuhakkuun korjuujälkianalyysiä.

1.2 Integroitua korjuuta tutkitaan sekä nuorten että varttuneiden metsien kasvatushakuissa.

Integroidussa korjuussa selvitetään merkittävimpien leimikkotekijöiden vaikutusta tuottavuuksiin ja korjuukustannuksiin, ja mukana tarkastelussa on myös energiapuun metsäkuljetus.

2. Koneiden tuottavuusaineistot yhdistetään paikkatietojärjestelmän avulla potentiaaliin leimikoihin ja selvitetään rankapuun saatavuus sekä kustannusrakenne (asiakkaalle saakka toimitettuna) valittujen taajamien ympäristössä.
3. Kehitetään menetelmä rankapuun mittaukseen yksinpuin käsittelyssä ja joukkokäsittelyssä.
4. Rakennetaan yksinkertainen päätöstukimalli, jolla voidaan arvioida kohteen soveltuvuutta rankapuun korjuukohteeksi sekä korjuun kustannuksia sekä kertymiä.

Lisäksi tehtävän 1.1 (Erilliskorjuu yksinpuin ja joukkokäsittelynä) yhteydessä kerätään puutavaran mittausaineisto, jossa koko nipun tilavuuden arviointi perustuu ensimmäisen katkaistun puun tilavuuden tarkkaan tyven mittaukseen, runkojen lukumäärän toteamiseen ja muiden mittaustietojen avulla tuloksen tarkentamiseen.

Lähteet

Bergkvist, I. 2003. Flerträdshantering höjer prestationen och ökar nettot i klen gallring. Skogforsk resultat 5/2003.

Laitila, J., Sikanen, L., Asikainen, A., Tahvanainen, T. & Korhonen, K. T. 2003. Forest Energy Potential of Young Stands – Methods of Estimation and Significance in Finland. Julkaisussa: Bioenergy 2003 Conference. 2.–5.9.2003. Book of Proceedings. Finbio – The Bioenergy association of Finland. S. 171–175.

Ryynänen, S., Ihonen, M. & Nätt, H. 1998. Metsänomistajien energiapuun korjuutekniikat.

Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Polttopuun käyttö pientaloissa 2000/2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 894.

Ylitalo, E. 2003. Puupolttoaineen käyttö energiantuotannossa 2002. Metsätilastotiedote 670.

Puupelletin laadunhallinta pienjake­lussa ja käsittelyssä – PUUY27

Seppo Tuomi
Työte­hoseura ry
PL 13, 05201 Rajamäki
Puh. (09) 2904 1280, faksi. (09) 2904 1285
E-mail: seppo.tuomi@tts.fi

Abstract

Project title in English: Quality control of wood pellets in small-scale distribution and handling

Quality control of wood pellets through the whole production, distribution and handling chain is of significance when trying to increase the small-scale use of wood pellets and to improve the competitiveness of the pellet branch. In order to improve the quality of pellets, the critical sites of different stages of production, distribution and handling, in which the pellet properties may change unfavourable for combustion, will be identified. The project will also produce data on physical and mechanical properties of pellets for the development of production, distribution and handling methods. The results will give basis for determination methods, and quality requirements and control for the needs of the Finnish market and for exports.

1. Tausta

Pelletit joutuvat matkallaan tehta­an varastosta lämmityslaitteeseen erilaisille kuluttaville voimille alttiiksi. Näitä ovat lastaus- ja purkuvaiheen pudotukset, kuljetuksen aikana tärinä, käsittelylaitteiden aiheuttamat leikkaus- ja puristusvoimat sekä pellettien hankautuminen toisiaan vasten. Erityisen kovaan rasitukseen pelletit joutuvat puhallusautojakelussa. Voimien vaikutuksesta pelletit voivat murskautua ja jauhautua. Syntynyt hienoaines voi aiheuttaa häiriöitä varastosiilojen sekä käsittely- ja lämmityslaitteiden toiminnalle.

Pelleteille ei ole Suomessa yleisesti hyväksytyjä laadun määrittämenetelmiä. Myös yhtenäiset laatuvaatimukset ja sitä tukeva laadunvalvontajärjestelmä puuttuvat. Laadunvalvonnan pohjaksi tarvitaan tutkimustietoa, jotta laadunvalvonta vastaisi mahdollisimman hyvin käytännön pellettikaupan tarpeita.

Erityisesti pellettien käsittelyominaisuuksista tarvitaan tutkimustietoa, jotta tuotekehitystyö osattaisiin kohdistaa oikeisiin kohteisiin. Pellettien hyvän laadun varmistaminen koko tuotanto-, jakelu- ja käsittelyketjun läpi on tärkeää, jotta pellettien käyttö lisääntyisi ja kilpailukyky paranisi.

2. Tavoite

Projektin tavoitteena on:

- tuottaa tietoa suomalaisten puupellettien ominaisuuksista tuotanto-, jakelu- ja käsittelymenetelmien kehittämistä varten,
- parantaa suomalaisten puupellettien käsittelyominaisuuksia sekä
- kehittää puupellettien laadun määrittämenetelmiä, näihin perustuvia laatuvaatimuksia sekä laadunvalvontaa kotimaan ja vientimaiden pellettikaupan tarpeisiin.

3. Toteutus

Pellettien laadunhallintaa tutkitaan pellettien tuotanto-, jakelu- ja käsittelyketjujen eri vaiheissa. Tutkimus koostuu seuraavista osatehtävistä:

- Pellettien laadunhallinta tehtaalla
- Pellettien laadunhallinta jakelussa
- Pellettien laadunhallinta käsittelyssä.

3.1 Pellettien laadunhallinta tehtaalla

Pellettien ominaisuuksien mittaamenetelmien kehittämiseksi on selvitetty Amandus Kahl -kovuusmittarin, laatikkorummun ja Ligno-testerin soveltuvuutta pellettien käsittelykestävyyden mittaukseen. Toimintavuonna menetelmistä tehtiin lisäksi kansainvälinen vertailututkimus viiden maan (Belgia, Itävalta, Saksa, Tanska ja Suomi) erilaatuisilla pelleteillä. Tutkimuksessa verrattiin eri menetelmiä neljässä laboratorioissa. Tutkimustulosten perusteella tehtiin Euroopan standardisoimisjärjestölle (CEN) ehdotus pellettien käsittelykestävyyden viralliseksi mittaamenetelmäksi. Ehdotuksen pohjalta CEN TC335 käynnisti laatikkorumpuun perustuvan mittausstandardin valmistelun.



Kuva 1. Pellettien käsittelykestävyyden mittaamenetelmistä tehtiin kansainvälinen vertailututkimus viiden maan erilaatuisilla pelleteillä. Kuvassa laatikkorumpuun perustuvan menetelmän testaus. Kuva: Arto Mutikainen.

Pellettien hienoaineksen määrän mittaamisesta on kerätty aineistoa eri näytteenottotavoilla pellettitehtaalla. Hienoaineen määrä on selvitetty erilaisilla seulantatavoilla ja seularakenteilla. Pellettien irtotiheyttä on verrattu erilaatuisilla pelleteillä pienellä ($3,4 \text{ dm}^3$) ja suureella mitta-astialla (1 m^3). Mittausmenetelmistä saatuja tuloksia on hyödynnetty Euroopan standardisoimisjärjestön CEN:n ja Suomen Bioenergiayhdistyksen puupellettien laatuohjeiden laadinnassa.

Pellettien laadunhallinta tuotannossa osatyön pääpaino on ollut pellettien käsitteilykestävyyteen vaikuttavien tekijöiden tutkimisessa ja hienoaineen määrän vähentämisessä tehtaalla. Tuotantoprosessin eri vaiheista kerätystä aineistosta on selvitetty mm. raaka-aineen kosteuden ja sideaineiden vaikutusta pellettien käsitteilykestävyyteen. Tuloksista on laadittu luottamuksellinen tutkimusraportti yritysosaapuolille.

3.2 Pellettien laadunhallinta jakelussa

Pellettien puhallusautojakelun kehittämiseksi on tehty kokeita erityyppisillä jakeluautoilla (sulkusyötinauto, painesäiliöauto). Kokeilla on selvitetty pellettien laadun, käyttötavan sekä jakelukaluston ja pellettivaraston rakenteiden vaikutusta pellettien murskautumiseen ja pölyn muodostukseen. Tuloksista on laadittu luottamukselliset raportit yritysosaapuolille.



Kuva 2. Jakelukokeilla on selvitetty puhallusautokaluston rakenteen, purkutavan ja pellettisiilon rakenteen vaikutusta pellettien murskautumiseen erilaatuisilla pelleteillä. Kuva: Seppo Tuomi.

3.3 Pellettien laadunhallinta käsittelyssä

Pellettien käsittelymenetelmien kehittämiseksi on tehty kokeita spiraalityyppisillä kuljettimilla. Kokeilla on selvitetty pellettien murskautumis- ja jauhautumisherkkyyttä sekä siirtokapasiteettia eri pellettilaaduilla. Pellettisiilojen pohjarakenteiden vaikutusta pellettien juoksevuteen on selvitetty sekä laboratorio- että kenttäoloissa.



Kuva 3. Pellettien syöttökokeilla on selvitetty kuljettimen rakenteen ja asennustavan vaikutusta pellettien murskautumiseen. Kuva: Seppo Tuomi.

3.4 Toteutusorganisaatio ja aikataulu

Projekti on yrityshanke ja siihen osallistuivat toimintavuonna seuraavat yritykset: Biowatti Oy, Combitrans Oy, Movere Oy, Lapin Ekolämpö Oy, Vapo Oy ja Kortteen Konepaja Oy.

Tutkimuksen toteutuksesta vastaa Työtehoseuran metsäosasto. Tutkimuksen vastuullinen johtaja on fil. tri, tutkimusjohtaja Pekka Ripatti. Projektipäällikkönä

toimii dipl.ins., tutkimuspäällikkö Seppo Tuomi. Projektin tutkimusaineiston keräyksestä vastaavat insinööri, tutkija Jyrki Kouki ja insinööri, tutkija Kari Vuorio.

Projektissa on tehty yhteistyötä VTT Prosessien ”Puupolttoaineiden jakelu, käsittely ja laadun parantaminen pienkäytössä – PUUT30” -hankkeen kanssa. Projektin tuloksista on raportoitu PUUT30-hankkeen johtoryhmälle.

Tutkimus valmistuu vuonna 2004.

4. Tulokset

Pääosa tutkimustuloksista on vielä alustavia. Lopulliset tulokset raportoidaan Työtehoseuran julkaisusarjoissa vuonna 2004.

5. Tuloksien hyödyntäminen

Tutkimus antaa tietoa suomalaisten puupellettien ominaisuuksista tuotannon, jakelukuluston ja käsittelymenetelmien kehittämiseen. Tutkimus lisää puupelletteihin liittyvää teoreettista ja käytännön osaamista Suomessa sekä luo yhteistyökontaktit Suomen kannalta tärkeimpien pellettien vientimaiden tutkimuslaitoksiin.

Tulokset hyödyttävät pellettien tuottajia, jakelu- ja kuljetusyrityksiä sekä pellettien poltto- ja käsittelylaitteiden valmistajia. Tulosten pohjalta yritykset voivat kohdistaa tuotekehitystyönsä tehokkaammin kilpailukykyisempien tuotteiden saamiseksi koti- ja vientimaiden tarpeita varten. Tutkimuksella tuetaan Kansallisen ilmasto-ohjelman toteuttamista ja pellettiliiketoiminnan kasvua.

6. Projektin jatkosuunnitelmat

Tutkimusaineistoa täydennetään vuoden 2004 alussa. Aineisto analysoidaan ja keskeiset tulokset raportoidaan Työtehoseuran julkaisusarjoissa vuonna 2004.

Projektissa laaditut raportit

Tuomi, S. 2002. Pelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä – PUUY27. Teoksessa: Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. VTT Symposium 221. S. 335–345.

Tuomi, S. 2002. Pellettien puhallusautokokeet ja pellettien varastointi. Pelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 28 s.

Tuomi, S. 2002. Kostean purun seostaminen kuivaan kutterinpuruun. Pelletöintikokeet Biowatti Oy:n Turengin tehtaalla. Pelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 36 s.

Tuomi, S. 2003. Pellettien jakelu sulkusyötinautolla. Puupelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 22 s.

Tuomi, S. 2003. Pellettien jakeluautokokeet. Puupelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 23 s.

Tuomi, S. 2003. Pellettisiilo- ja puhallusputkikokeet. Puupelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 16 s.

Tuomi, S. 2003. Pellettien jakelukokeet dekantteriautoilla. Puupelletin laadunhallinta pienjaketussa ja käsittelyssä -projekti. Luottamuksellinen työraportti. 24 s.

Tuomi, S. 2003. Pellettien pienkäyttöä kehitetään. Teho 4, s. 8–10.

Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P., Hartmann, H., Böhm, T., Golser, M. & Tuomi, S. 2003. Comparison between two methods for wood pellet durability testing. Euroopan Standardisoimisjärjestö CEN:n biopolttoainestandardia valmisteleavan työryhmän CEN TC 335 sisäinen raportti. 8 s.

Pilkkeen tuotantoprosessin hallinta ja kehittäminen – PUUY30

Aki Jouhiaho, Jyrki Kouki, Kalle Kärhä, Arto Mutikainen,
Esko Oksanen & Anne Seppänen
Työteho-seura ry
PL 28, 00211 Helsinki
Puh. (09) 2904 1200, faksi (09) 692 2084
E-mail: aki.jouhiaho@tts.fi

Abstract

Project title in English: The management and development of the chopped firewood production process

The main aim of the research project is to improve competitiveness by reducing the production and distribution costs of chopped firewood and raising the quality of chopped firewood. The aim is to attain the goal through four subprojects: 1. Productivity, costs and development targets of new firewood machines, 2. The artificial drying and storage management of chopped firewood, 3. New logistics solutions for the chopped firewood production process, and 4. The current situation of the firewood trade in Europe.

The research project covered an analysis of the productivity of new firewood machines, and the costs and quality of produced chopped firewood. Suggestions were made to firewood machine manufacturers for developing firewood machines. Also, the cost-effectiveness of current chopped firewood production and distribution chains was studied. The drying process will be modelled for artificial drying, the functionality of a theoretical drying programme will be tested under field conditions and instructions will be prepared for building a chopped firewood drier. Furthermore, a survey was carried out on the volume of firewood sales and the firewood production equipment available for sale in Europe, and European firewood merchants' methods of operation was studied.

1. Tausta

Lämmityskaudella 2000/2001 Suomen pientalokiinteistöissä (maatilat, omakotitalot, vapaa-ajan asunnot) käytettiin 6,1 milj. m³ polttopuuta (Sevola ym. 2002). Valtaosin pienkiinteistöissä puu poltetaan pilkkeenä (vrt. Solmio & Valkonen 2002). Kauppa- ja teollisuusministeriön uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman tavoitteena on lisätä polttopuun pienkäyttöä viidenneksellä vuoden 2001 tasosta vuoteen 2010 (Uusiutuvan energian... 2003). Polttopuun pienkäytön osalta ohjelman tavoitteet merkitsevät 7,3 milj. m³:n käyttöä vuonna 2010. Pilkkeelle tarkoitetut tulisijat ja kattilat mahdollistavat ohjelman tavoitetasoa vastaavan käytön, mutta tuotantokustannuksia olisi kyettävä laskemaan sekä nostamaan pilkkeen laatua.

Pienkiinteistöjen omistajille vuonna 2001 suunnatun kyselyn mukaan 13 % Suomen pientalon omistajista aikoi lisätä polttopuun käyttöä (Tuomi & Peltola 2002). Heistä neljännes aikoi hankkia tarvitsevansa puun ostamalla. Vaikka myyntipilkkeen osuus tulee yhä kasvaa, ei pilkekaupan myyntivolyymeja, toimintatapoja ja kaupallisen pilkkeen tuotantomenetelmiä tunneta riittävästi. Toimialan tunteminen on minimiedellytys toimialan kehittämiseksi.

Suomessa polttopuun pilkontateknologiaa koskevia laajoja tuottavuus-, käyttöominaisuus-, työturvallisuus- ja kustannustarkasteluja ei ole tehty kymmeneen vuoteen, vaikka teknologia on kehittynyt koko ajan. Erilaisten puun syöttömenetelmien vaikutusta pilkontatyöhön ei ole aiemmin tutkittu lainkaan.

Pilkkeen kosteus on kuluttajien kannalta merkittävin pilkkeen laatuun vaikuttava tekijä. Luonnonkuivaus on ollut perinteinen pilkkeiden kuivaustapa. Luonnonkuivauksen haittana kaupallisessa pilketuotannossa on varaston kierron hitaudesta johtuvat suuret korkokustannukset. Lisäksi ongelmia aiheuttavat pilkkeiden epätasainen kuivuminen, home- ja ulkonäköhaitat sekä tuotannon joustamattomuus kysynnän vaihteluihin (Kouki 2001). Yksityiset pilkeyrittäjät ovat rakenneet pilkekuivureita, mutta tieto kustannuksiltaan ja kuivaustulokseltaan optimaalisesta pilkkeen kuivausmenetelmästä puuttuu.

2. Tavoitteet

Tutkimushankkeen tavoitteena on parantaa pilkkeen kilpailukykyä laskemalla pilkkeen tuotanto- ja jakelukustannuksia sekä nostamalla valmistetun pilkkeen laatua.

3. Toteutus

Projekti koostuu neljästä osaprojektista:

1. Uusien pilkekoneiden tuottavuus, kustannukset ja kehittämiskohteet
2. Pilkkeen keinokuivauksen ja varastoinnin hallinta
3. Uudet logistiset ratkaisut pilkkeen tuotantoprosessiin
4. Polttopuukaupan nykytila Euroopassa.

3.1 Uusien pilkekoneiden tuottavuus, kustannukset ja kehittämiskohteet

Osaprojektissa tutkittiin työntutkimuksen keinoin uusien, ammattimaiseen ja omatoimiseen käyttöön soveltuvien pilkontalaitteiden tuottavuutta ja pilkontakustannuksia, analysoitiin uusilla pilkontalaitteilla tehtävän pilkkeen laatua, työturvallisuutta ja ergonomiaa sekä tehtiin konevalmistajille ehdotuksia koneiden ja laitteiden kehittämiseksi.

Pilkekoneiden työntutkimukset tehtiin huhti-toukokuussa 2002. Tutkittavina oli kuusi sahaavaa pilkekonetta (Hakki Pilke OH 60, Hakki Pilke 1X37 Easy, Hakki Pilke 2X, Palax 55, Palax Combi TSV E ja Palax Monster 450), yksi viiltäväteräinen pilkekone (Superpilke 2000), kaksi hydraulihalkojaa ja nippukatkaisulaite. Sahaavissa pilkekoneissa käytetyt katkaisuterätyypit olivat pyörö- eli sirkeliterä ja ketjusaha. Viiltävässä pilkekoneessa puun katkaisi viiltävä giljotiiniterä. Hydraulihalkojat olivat kaksivipuohjattu ja vaakatasossa toimivaan hydraulisynteriin ja vastaterähalkaisuun perustuvia laitteita (Hakki Pilke Z-100 ja Palax 60 Logsplit). Metsätraktorialustainen Pätkä Rok

-nippukatkaisulaite perustui kourakuormainsyöttöön ja ketjusahalla tapahtuvaan useiden runkojen samanaikaiseen katkontaan.

Työntutkimuksessa pilkottiin puuta yhteensä 145 m³. Pilkotuista rungoista mitattiin läpimitta runkojen keskikohdasta. Pilkontatyötä teki kerrallaan yksi koehenkilö. Pilkontatyötä tehtiin käyttäen apuna puun syöttötasoja (puutelineitä) ja puunnostinta sekä ilman puun syöttöapuvälineitä. Pilkekoneiden tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin tutkimuksessa lineaarisella regressioanalyysillä.

Osaprojekti toteutettiin yhteistyössä seuraavien pilkontalaittevalmistajien kanssa: Agromaster Oy, Maaselän Kone Oy, keksijä Reijo Ossi ja Terästäkomo Oy. Osaprojekti saatiin päätökseen vuonna 2003.

3.2 Pilkkeen keinokuivauksen ja varastoinnin hallinta

Osaprojektissa tehtiin kenttäkokeita erityyppisillä pilkeyrittäjien käytössä olevilla kylmä- ja lämminilmakuivureilla. Tavoitteena oli löytää kustannus- ja toimintatehokkuudeltaan lupaavin kuivurityyppi. Kenttäkokeiden avulla hankitun tiedon pohjalta rakennettiin Työtehoseuran lämpökoeasemalle tilavuudeltaan 3,2 m³:n koekuivuri tarkempia kuivauskokeita varten. Kokeissa tutkitaan pilkkeen kylmäilmakuivausta ja ajoittaista lisälämmön käyttöä sekä lämminilmakuivausta. Muuttujina on pilkkeen palakoko, kuivausilman määrä ja jakotapa sekä pilkkeen pinoamistapa kuivurissa.

Koekuivauksissa hankittu aineisto toimitetaan VTT Prosesseille, jossa niitä hyödynnetään VTT:ssä aiemmin tehtyjen kuivausmallien ja VTT:n olosuhdesimulaattorissa hankitun yksittäisen pilkkeen kuivausaineiston avulla tehtävässä pilkkeen kuivumisen matemaattisessa mallintamisessa (ks. PUUT30). Työtehoseura testaa mallinnuksen perusteella tehdyn kuivausohjelman toimivuutta kenttäoloissa ja laatii yhdessä VTT Prosessien kanssa ohjeet mitoitukseltaan ja toiminnaltaan optimaalisten pilkekuivureiden rakentamiseen. Tehdyistä kokeista julkaisetaan tuloksia kevään 2004 aikana.

3.3 Uudet logistiset ratkaisut pilkkeen tuotantoprosessiin

Osaprojektissa lähetettiin postikysely 640 polttopuukauppiaalle, joiden oletettiin myyneen pilkettä vuonna 2001. Kyselyssä kartoitettiin pilkekauppioiden toimintatapoja ja erityyppisten logististen ratkaisujen (mm. keinokuivaus ja pakkaaminen) käytön yleisyyttä ja kustannustehokkuutta. Hyväksytyjä vastauksia saatiin 244. Lisäksi 161 kyselyn vastaanottanutta ilmoitti, että he eivät olleet myyneet pilkkeitä tutkimusvuonna. Kun nämä perusjoukkoon kuulumattomat vähennettiin kyselyn vastaanottaneista, vastausprosentiksi saatiin tällöin 51. Postikyselyn lisäksi haastateltiin kymmentä pilkekauppiasta, joista saatujen tulosten pohjalta analysoitiin polttopuuterminaalien toimivuutta ja kannattavuutta sekä selvitettiin nykyisten pilkkeen tuotanto- ja jakeluketjujen kustannustehokkuutta.

Osaprojekti toteutettiin yhteistyössä polttopuukauppioiden ja Tulipuu Oy:n kanssa. Postikyselyn ja haastattelujen tulosten analysointi saatiin päätökseen vuonna 2003.

3.4 Polttopuukaupan nykytila Euroopassa

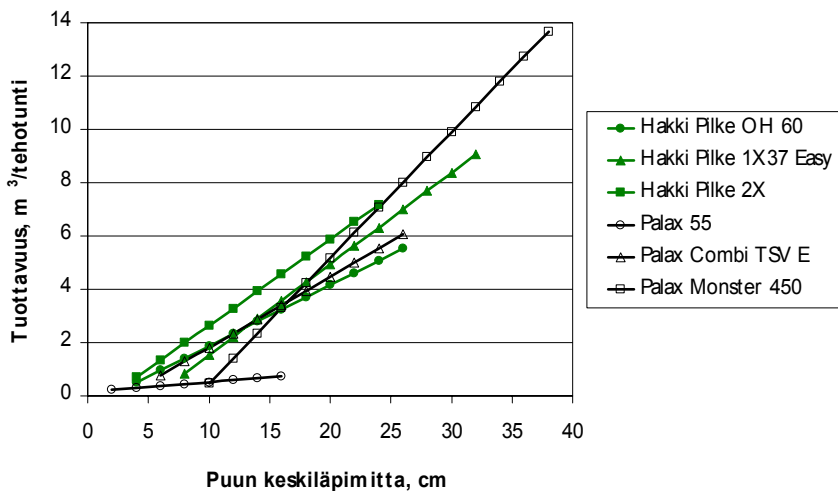
Euroopan maiden polttopuukaupan volyymia ja toimintatapoja sekä markkinoilla myynnissä olevaa polttopuun tuotantokalustoa kartoitettiin asiantuntijakyselyllä vuonna 2002. Kolmestatoista Länsi-Euroopan maasta valittiin alan asiantuntija, jolle kysely lähetettiin. Kyselylomakkeen palauttaneet maat olivat Ruotsi, Norja, Tanska, Saksa, Espanja ja Suomi. Vastaajilta pyydettiin vuotta 2001 koskevia tietoja. Asiantuntijakyselyllä hankittu tieto oli pääosin arvionvaraista ja siten luonteeltaan suuntaa-antavaa, koska tilasto- ja tutkimustietoa ei maista ole olemassa.

Osaprojekti toteutettiin yhteistyössä eurooppalaisten tutkimusorganisaatioiden kanssa. Työ saatiin päätökseen joulukuussa 2002.

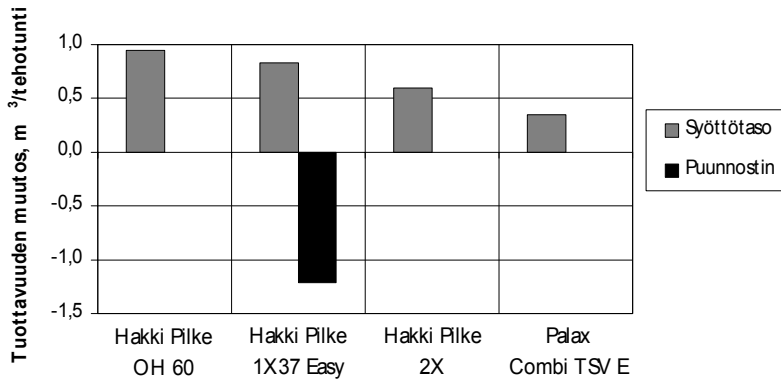
4. Tulokset

4.1 Uusien pilkekoneiden tuottavuus, kustannukset ja kehittämiskohteet

Pilkekoneilla tehdyn pilkontatyön tuottavuuteen vaikutti eniten pilkottavan puun keskiläpimitta (kuva 1). Puun keskiläpimitan ollessa alle 15 cm Superpilke 2000 oli tuottavin tutkituista pilkekoneista. Puun keskiläpimitan ollessa alle 20 cm pilkontatyö oli sahaavilla pilkekoneilla tuottavinta Hakki Pilke 2X -koneella. Palax Monster 450 oli tuottavin pilkekone pilkottavien runkojen keskiläpimitan ollessa yli 25 cm. Pilkottavan puun keskiläpimitan lisäksi tuottavuuteen vaikuttivat pilkottavan puun pituus, pilkepituus sekä puun syöttöjärjestelyt (kuva 2). Pilkontatyö oli tuottavinta paksuja ja pitkiä puita pilkottaessa, käytettäessä pitkiä pilkepituuksia ja syöttötasoa.



Kuva 1. Sahaavien pilkekoneiden tuottavuus puun keskiläpimitan funktiona käytettäessä puun syöttötasoa. Pilkottavan puun pituus 3 m ja pilkepituus 33 cm.



Kuva 2. Puun syöttöapuvälineiden (syöttötaso ja puunnostin) vaikutus pilkontatyön tuottavuuteen verrattaessa pilkontatyöhön, jossa ei käytetä puun syöttöapuvälineitä.

Hydraulihalkojilla tehdyn 33 cm pitkien pölkkyjen halontatyön tuottavuus pilkkeiksi oli 9 cm paksuilla pölkkyillä 0,9 m³/tehotunti ja 30 cm paksuilla pölkkyillä 0,8 m³/tehotunti. 23 cm paksujen ja 100 cm pitkien pölkkyjen halontatyön tuottavuus haloiksi oli 3,1 m³/tehotunti. Pätkä Rok -nippukatkojalla 7 cm paksuisten ja 380 cm pitkien polttorankojen katkontatyön tuottavuus oli 3,5 m³/tehotunti.

Hakki Pilke 2X -koneella saavutettiin 10 €/m³:n pilkontakustannustaso, kun pilkottavan puun keskiläpimita oli 12 cm. Hakki Pilke OH 60, Hakki Pilke 1X37 Easy ja Palax Combi TSV E -koneilla 10 €/m³:n kustannustaso saavutettiin 15 cm:n keskiläpimitalla ja Palax Monster 450 -koneella pilkottavan puun paksuuden ollessa 21 cm. Viiltävällä Superpilke 2000 -koneella pilkontakustannukset olivat selvästi pienemmät kuin sahaavilla pilkekoneilla. Pilkottavan rungon keskiläpimitan ollessa 10 cm pilkontakustannukset olivat Superpilke 2000 -koneella alle 5 €/m³.

Hydraulihalkojilla 100 cm:n pituisia halkoja halottaessa päästiin alle 10 €/m³:n halkaisukustannuksiin. Sen sijaan lyhyiden pölkkyjen (33 cm) halontakustannus pilkkeiksi oli yli kolminkertainen metristen halkojen halontaan verrattuna. Pätkä Rok -nippukatkaisulaitteella saavutettiin 10 €/m³:n katkontakustannus 250 tunnin vuotuisella käytöllä.

Tutkimuksessa valmistetun pilkkeen laatua tarkasteltiin pilkkeen pituuden mittatarkkuuden, katkaisupinnan tasaisuuden ja suoruuden sekä halonnan onnistuneisuuden näkökulmasta. Viiltävällä Superpilke 2000 -koneella valmistetuista pilkkeistä vain 41 % täytti ensimmäisen laatuluokan pilkkeen pituustoleranssirajat. Sahaavilla pilkekoneilla osuus oli yli 90 %. Superpilke 2000 -koneella valmistetuista pilkkeistä ensimmäisen luokan pilkettä katkaisupinnan tasaisuuden ja suoruuden suhteen oli vain 18 %, kun vastaava luku sahaavilla pilkekoneilla oli 56–72 %. Halonta onnistui hyvin sekä viiltävällä Superpilke 2000 -koneella että sahaavilla pilkekoneilla.

Pilkontatyön kuormittavuus mitattiin tutkimuksessa OWAS-analyysillä. Analyysin mukaan pilkontatyöhön ei juuri tarvitse tehdä mitään muutostoimenpiteitä, kun käytetään puun syöttöapuvälineitä. Sen sijaan ilman syöttöapuvälineitä pilkottavien puiden noudossa ilmeni työasentoyhdistelmiä, jotka kaipaavat parannusta. Superpilke 2000 -koneen puun syöttötyövaihe kaipaa OWAS-analyysin mukaan kehittämistä, koska työvaihe vaati koneen käyttäjältä pilkottavan puun kannattelua. Palax 55 -pilkekoneella kuormittavia työasentoyhdistelmiä tuli runsaasti myös sahauksessa johtuen lähinnä selän kumarista työasennoista. Tutkittujen pilkekoneiden työturvallisuus oli hyvä. Superpilke 2000 -koneella mutkaiset pilkottavat rungot aiheuttivat koneen käyttäjälle kohonneen työturvallisuusriskin pilkottavan puun pään heiluessa pilkontatyön edetessä.

4.2 Pilkkeen keinokuivauksen ja varastoinnin hallinta

Työteho-seuran lämpökoeasemalle rakennettiin tilavuudeltaan 3,2 m³:n koekui-vuri, jolla aloitettiin pilkkeiden keinokuivauskokeet (kuva 3). Kokeet jatkuvat vuonna 2004.

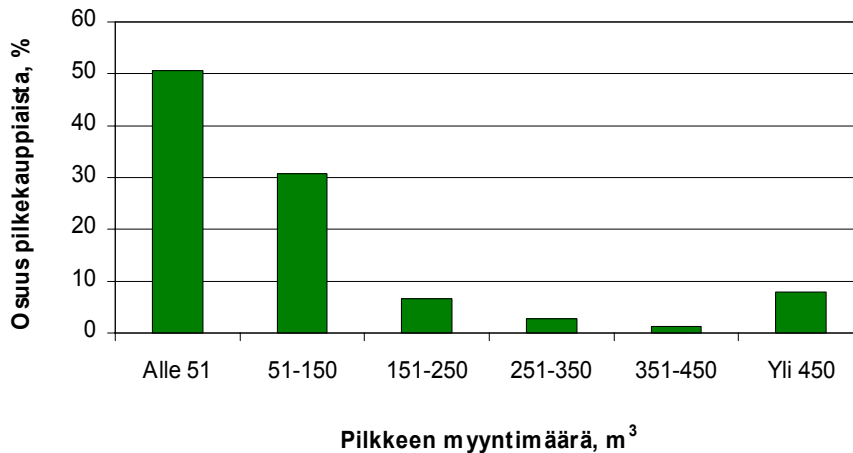


*Kuva 3. Työtehoseuran lämpökoesemalle rakennetulla koekuivurilla tutkitaan pilkkeen palakoon, kuivausilman määrän ja jakotavan sekä pilkkeen pinoamista-
van vaikutusta pilkkeen kylmä- ja lämminilmakuivauksessa.*

4.3 Uudet logistiset ratkaisut pilkkeen tuotantoprosessiin

Pilkekauppiat myivät pilkkeitä keskimäärin 151 m^3 vuonna 2001 (kuva 4). Pieniä pilkekauppiaita oli runsaasti: puolet kauppiaista oli myynyt 50 m^3 tai vähemmän ja neljäsosa 20 m^3 tai vähemmän. Pilkekauppa oli useimmille pilkekauppiaista sivutoimeentulomuoto pääelinkeinon ollessa tavallisimmin maa- tai metsätalous. Polttopuukauppa oli päätoimialana vain alle viidenneksellä kauppiaista. Kun Suomessa myydään pilkkeitä vuosittain noin $300\,000 \text{ m}^3$, voidaan tämän tutkimuksen perusteella pilkekauppiaita arvioida olevan kaikkiaan noin 2000.

Keinollisella kylmäilmakuivauksella pilkkeitä kuivasi vain alle joka kymmenes kauppias. Lämminilmakuivauksen käyttö oli pilkkeiden kuivauksessa vähäistä: vain neljä kauppiasta käytti lämmintä ilmaa pilkkeiden kuivauksessa. Pakatun pilkkeen osuus kaikesta myydystä pilkkeestä oli 14 %. Valtaosin pilkkeet pakattiin käsin. Erityistä pakkauskonetta ei käyttänyt yksikään pilkekauppias.



Kuva 4. Pilkekauppiaiden pilkkeen myyntimäärät vuonna 2001.

Tutkimuksessa pilkkeen tuotannossa ei havaittu mittakaavaetua: tuotannon- ja jakelun yksikkökustannukset eivät laskeneet tuotannon volyymin kasvaessa. Tärkeimpänä tuotannon kehityskohteena pilkekauppiat pitivät pilkkeen tuotanto- ja jakeluketjun rationalisointia pilkkeiden kuivauksen, varastoinnin, pakkaamisen ja jakelun osalta siten, että pilkkeelle tulevia käsittelykertoja voitaisiin vähentää. Samalla tulee kiinnittää huomiota valmistettavan pilkkeen laatuun sekä tuotannon ja jakelun kustannustehokkuuteen, jotta pilkkeestä tulisi entistä kilpailukykyisempi vaihtoehto muiden lämmitysmuotojen rinnalle. Lisäksi pilkekauppaan tarvitaan lisää markkinointia ja tiedotusta polttopuun eduista lämmityksessä. Pilkekauppiat toivoivat pilkekaupan kehittyvän järjestäytyneempään suuntaan mm. käytettävien mittayksiköiden ja laatuvaatimusten osalta.

4.4 Polttopuukaupan nykytila Euroopassa

Polttopuun eli pilkkeiden, halkojen, hakkeen, puupellettien ja -brikettien käyttö pienkiinteistöissä oli suurinta Saksassa, noin 23 milj. m³/vuosi. Suomessa polttopuun pienkäyttö lämmityskaudella 2000/2001 oli 6,1 milj. m³, kun tilastotietojen mukaan Ruotsin polttopuun pienkäyttö vuonna 2000 oli noin 5 milj. m³. Päinvastoin kuin Suomessa on Ruotsissa polttopuun pienkäytön määrän kehitys pellettejä lukuun ottamatta laskeva polttopuulämmityksen työläyden takia. Norjassa päästään asiantuntija-arvion mukaan noin puoleen Ruotsin lukemista. Tanskassa polttopuun tilastotietoon pohjautuvan arvion mukaan polttopuun pienkäyttö oli 0,7 milj. m³/vuosi. Kaikissa kyselyyn vastanneissa maissa pilke oli yleisin tulisijoissa käytetty polttopuulaji.

Saksalaisen tutkimuksen mukaan Saksan pilkekonemarkkinoilla on noin 40 konevalmistajan yli 200 erilaista pilkekonemallia. Ruotsalaisen asiantuntijan esittämän karkean arvion mukaan länsinaapurissamme on pilkekoneen ostajalle tarjolla runsaan 20 eri konevalmistajan 60–80 koneen mallisto. Suomessa pilkekoneita myy Työtehoseuran tekemän selvityksen mukaan 14 laitevalmistajaa, jotka tarjoavat yli 80 konevaihtoehtoa. Esitetyn asiantuntija-arvion mukaan Norjassa pilkekonevalmistajia on markkinoilla 11–15. Tanskan arvion mukaan markkinoilla on tarjolla vain alle viiden konevalmistajan tuotteita. Norjassa ja Tanskassa pilkekoneille on tarjolla 20–40, kun Espanjassa myytävien mallien määrä jää alle 20:n. Espanjassa käytössä olevat pilkekoneet ovat usein itse rakennettuja.

5. Tulosten hyödyntäminen

Tieto erityyppisten pilkonta- ja syöttölaitteiden tuottavuudesta, kustannuksista, tuotetun pilkkeen laadusta, pilkontatyön kuormittavuudesta sekä esitetyt laitteiden konkreettiset kehittämisehdotukset ovat suoraan hyödynnettävissä konevalmistajien tuotekehitystyössä. Lisäksi tutkimustieto hyödyntää laitehankintoja suunnittelevia pilkeyrittäjiä ja yksityishenkilöitä.

Pilkkeiden kuivauskokeilla saatiin aineistoa pilkkeen kuivumisen matemaattiseen mallintamiseen sekä mitoitukseltaan ja toiminnaltaan optimaalisen pilkekuivurin rakentamiseen.

Kaupallisen pilkkeen tuotantoprosessien ja pilkekaupan tutkiminen lisäsi tietoa pilkekaupan ja -tuotannon toimintatavoista ja nykytilasta. Lisäksi päästiin arvioimaan pilkkeen tuotanto- ja jakeluketjujen sekä tuotannon mittakaavan kustannusvaikutuksia. Tieto tarjoaa hyödyllistä apua kasvavan toimialan tutkimus- ja kehitystarpeiden määrittämisessä.

Eurooppalaisille bioenergia-alan asiantuntijoille kohdistetulla kyselyllä saatiin suuntaa-antavaa tietoa Euroopan maiden polttopuunmarkkinoiden ja pilkkeen tuotantokaluston määrästä sekä pilkekaupan toimintatavoista. Tietoa voidaan hyödyntää alan kone- ja laitevalmistajien vientimarkkinoinnissa. Asiantuntijakyselyn sekä suomalaista pilkekauppaa selvittäneen tutkimuksen tulosten perusteella voidaan esittää myös arvioita suomalaisen pilkekaupan merkityksestä ja kehitysnäkymistä eurooppalaisessa vertailussa.

Projektissa syntyneet julkaisut ja raportit

Jouhiahho, A. 2003. FAO:n polttopuutilastojen luotettavuus. Onko Ranska yhä Länsi-Euroopan suurin polttopuun tuottajamaa? *BioEnergia* 2/2003, s. 32–33.

Jouhiahho, A. 2003. Tulta pilkekauppaan. Summary: Fire the chopped firewood trade. *Teho* 4/2003, s. 27–29, 38–39.

Jouhiahho, A. & Kärhä, K. 2003. Pilkekauppa Länsi-Euroopassa. *Teho* 1/2003, s. 30–32.

Jouhiahho, A. & Kärhä, K. 2003. The chopped firewood trade in Western Europe. Julkaisussa: *Bioenergy 2003 Conference 2.–5.9.2003 Book of Proceedings*. Finbio – The Bioenergy Association of Finland. S. 250–252.

Jouhiahho, A. & Kärhä, K. 2003. Pilke- ja pilkekonemarkkinat Länsi-Euroopassa. *BioEnergia* 1/2003, s. 37–38.

Jouhiahho, A. & Kärhä, K. 2003. The chopped firewood in Western Europe. *Wood Energy* 2/2003, s. 14–15.

Jouhiahho, A. & Mutikainen, A. 2003. Hydraulihalkoja halkaisee puun tehokkaasti ja turvallisesti. *Metsälehti* 70(13), s. 19.

Kärhä, K. 2002. Pilkkeen tuotantoprosessin hallinta ja kehittäminen – PUUY30. Abstract: The management and development of the chopped firewood production process. Julkaisussa: Alakangas, E. (toim.). *Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002*. *Puuenergian teknologiaohjelman vuosiseminaari*, Joensuu, 18.–19.9.2002. Espoo: VTT Symposium 221. S. 347–355.

Kärhä, K. 2002. Pilkkeen tuotantoketju suurennuslasin alle. *Koneviesti* 50(14), s. 30.

Kärhä, K. 2002. Vers une meilleure qualité de bois de chauffage. *Bois Energie* 7, s. 24–26.

Kärhä, K. 2002. Für bessere Qualität beim Scheitholz – Towards better quality chopped firewood. *Holzenergie – Wood Energy* 7, s. 22–23.

Kärhä, K. & Jouhiahho, A. 2002. Puuta poikki tehokkaasti viiltämällä. Summary: Cutting wood efficiently by chopping. *Teho* 4/2002, s. 31–33, 39.

Kärhä, K. & Jouhiahho, A. 2002. « Superpilke » La machine qui débite rapidement le bois de chauffage – Die Superpilke Maschine verbessert die Effizienz der Stückholzherstellung für Heizzwecke – The Superpilke machine efficiently processes firewood for heating. *Bois Energie – Holzenergie – Wood Energy* 7, s. 16–17.

Kärhä, K. & Jouhiahho, A. 2003. Sahaavien pilkekoneiden tuottavuus. Summary: The productivity of sawing chopped firewood machines. *Työtehoseuran metsätiedote* 660. 4 s.

Kärhä, K. & Jouhiahho, A. 2003. Sahaavat pilkekoneet TTS:n tutkittavina. Osa I: Tuottavuus. *Koneviesti* 51(2), s. 60–64.

Kärhä, K. & Jouhiahho, A. 2003. The productivity of sawing chopped firewood machines. Julkaisussa: *Bioenergy 2003 Conference* 2.–5.9.2003. *Book of Proceedings*. Finbio – The Bioenergy Association of Finland. S. 224–246.

Kärhä, K., Jouhiaho, A. & Mutikainen, A. 2003. Pilkekonetyön tuottavuus, kustannukset ja kuormittavuus. Työtehoseuran raportteja ja oppaita 4. 57 s.

Kärhä, K., Jouhiaho, A. & Mutikainen, A. 2003. Kallis halpa klapi. Sahaavat pilkekoneet TTS:n tutkittavina, osa II: kustannukset. Koneviesti 51(3), s. 86–89.

Kärhä, K. & Kouki, J. 2002. Pilkkeen keinokuivausta aletaan tutkia. Koneviesti 50(7), s. 21.

Kärhä, K. & Seppänen, A. 2003. The production of chopped firewood in Finland. Julkaisussa: Bioenergy 2003 Conference 2.–5.9.2003 Book of Proceedings. Finbio – The Bioenergy Association of Finland. S. 247–249.

Mutikainen, A. & Kärhä, K. 2002. Polttopuun pilkontalaitteet vuonna 2002. Summary: Firewood processing devices in Finland 2002. Työtehoseuran metsätiedote 649.

Oksanen, E. 2003. Polttopuun nippukatkaisulaite Pätkä Rok. Abstract: Fuelwood bundlecrosscutting device Pätkä Rok. Hämeen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden koulutusohjelma, Evo. Opinnäyte. 33 s.

Oksanen, E. 2003. Pätkä Rok -nippukatkaisulaite pilkkeen valmistuksessa. Summary: Firewood production with the ”Pätkä Rok” firewood bundle processing device. Työtehoseuran metsätiedote 664. 4 s.

Seppänen, A. 2003. Pilkkeen tuotanto ja pilkekauppa. Summary: The Production and the Trade of Chopped Firewood. Metsä- ja puuteknologian pro gradu. Metsätieteellinen tiedekunta, Joensuun yliopisto. 50 s. + liitteet.

Seppänen, A. & Kärhä, K. 2003. Pilkekauppa Suomessa. Summary: The chopped firewood trade in Finland. Työtehoseuran metsätiedote 662. 6 s.

Seppänen, A. & Kärhä, K. 2003. Pilkekauppa käy säästöliekillä. Metsälehti 69(6), s. 18.

Kirjallisuus

Kouki, J. 2001. Pilkekuivurilla hyvälaatuista polttopuuta. *Teho* 4/2001, s. 29–30.

Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. (toim.). 2002. Pientalokiinteistöjen polttopuun käyttö lämmityskaudella 2000/2001. Metsäntutkimuslaitos, Metsätilastotiedote 631. 5 s.

Solmio, H. & Valkonen, J. 2002. Hakkeen käyttö ja haketekniikan kehitystarpeet maataloilla. Työtehoseuran raportteja ja oppaita 3. 73 s.

Tuomi, S. & Peltola, A. 2002. Polttopuun käytön nykytila pientaloissa. Summary: The present state of fuelwood use in detached houses in Finland. Työtehoseuran metsätiedote 658. 4 s.

Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006. Työryhmän ehdotus. 2003. Abstract: Action Plan for Renewable Energy 2003–2006. A Working Group Proposal. Kauppa- ja teollisuusministeriön työryhmä- ja toimikuntaraportteja 5/2003, Energiaosasto. 56 s.

Uusi tulipesä – PUUY43

Ilkka Paatero
Kerman Savi Oy
Rasiahontie 3, 79700 Heinävesi
Puh. (017) 664 4200, faksi (017) 664 4212
E-mail: ilkka.paatero@kermansavi.fi

Abstract

Project title in English: A novel fireplace construction

This project had several aims: one of them was to develop a novel, low emission fireplace that uses solid fuel, wood. The environmental requirements on these applications are becoming stricter and it is known that traditional batch firing in a single grate fireplace is highly sensitive to many parameters in firing process. Several approaches to control the efficiency of burning were tested and the idea of a construction, where both the place and the amount of air inlet depending on the phase of the firing cycle, was selected.

An essential part of this development was the research and application of speciality ceramics with low thermal expansion, cordierite bodies. These ceramic components are used as inner lining of the actual fireplace to form the air channels, to give visual character to the tilestove and to shield the mainframe of the structure in places where the thermal stress is highest.

Currently this project has produced one fireplace geometry, which can be installed to several models in the tilestove family of Kerman Savi Oy. In independent tests at Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, and at VTT Processes, Jyväskylä, this product has also showed quite outstanding performance in the purity of firing process.

This project will continue with both ceramic and constructional aspects. Other raw materials for the cordierite body shall be tested to give it more performance

in shaping and versatility. Also the geometry and the basic principles of this concept shall be imported to other types of fireplaces.

1. Tausta

Sekä lainsäädännön että kuluttajien vaatimukset puuta polttavien tulisijojen ympäristöystävällisyydelle ovat kovenemassa. Kun tiedetään, että perinteinen rakoarina polttaa toistettavasti sekä hyvällä hyötysuhteella että puhtaasti vain tietyn kosteuden omaavaa, tietynkokoista puupanosta, tulevaisuudessa tulee olemaan tilausta myös kehittyneemmille tulisijoille. Jo tällä hetkellä Keski-Euroopan ympäristönormit vaativat suhteellisen alhaisia hiilimonoksidipäästöjä ja tulevaisuudessa normit tulevat tiukkenemaan myös Suomessa.

2. Tavoite

Tällaisen, seuraavan sukupolven tulisijan kehitys Kerman Savi Oy:ssä alkoi useiden erilaisten sovellusten läpikäymisellä ja testaamisella. Vaatimuksina olivat parempi palamisprosessin hallinta, kivuton valmistus teollisessa mittakaavassa käyttäen olemassa olevia tuotantolinjoja, tuotteen parempi ulkonäkö ja parempi lämpörasituksen kesto palamisalueella. Toteutus valikoitui kahteen osioon, joista toisessa kehitettiin osaamista ja materiaalivalmiutta erikoiskeraamien osalta. Toisessa keskityttiin tuottamaan kontrolloitu palamisilmasyöttö siihen osaan pyrolyysikaasuja tai hiiltynyttä petiä, mihin sitä missäkin palon vaiheessa tarvitaan.

3. Projektin toteutus

Keraamisen kehitystyön pohjaksi valittiin kordieriittipohjainen massa. Kordieriitti on kiteinen magnesiumalumiinisilikaatti, jota esiintyy pieninä määrinä maaperässä. Tulenkestävät kordieriittirakenteet tehdään normaalisti korkean lämpötilan keraamisessa poltossa käyttäen raaka-aineita, joissa on korkea magnesium- ja alumiinipitoisuus sekä savea massan muovautumisen vuoksi. Kordieriitissa on kiinnostavaa se, että sillä on hyvin matala lämpölaajenemiskerroin, so. suuretkin kappaleen sisällä olevat lämpötilaerot aiheuttavat vain pieniä ra-

kenteellisiä jännitteitä. Samoin kappaleella on suuri lämpöshokinsietokyky, so. nopeat lämpötilanvaihtelut eivät aiheuta pirstoutumista. Normaali keramiikka ei tähän kykene. Perinteisissä massoissa on paljon kiteistä kvartsia, jonka kide-muodonmuutos lämpötilassa +573 °C tulee rikkomaan kappaleen nopeassa lämpötilanvaihtelussa.

Kordieriittiprojektia varten hankittiin välineistöä, ja aloitettiin kehitystyö mahdollista talossa tehtävää massaa varten. Samalla kartoitettiin kaupallisia valmis-massoja ja niiden soveltuvuutta Kerman Savi Oy:n keramiikkapolttoon. Kehitystyön tuloksena on tähän mennessä saatu valmius käyttää kahta kaupallista massaa ja valmius testata laajamittaisesti kahta kotitekoista massaa. Laboratoriomittan testauksessa omat massat ovat olleet lupaavia ja niiden soveltuvuus sekä tulipesämateriaalina että astiatavarana tullaan testaamaan. Jo olemassa olevassa tulipesässä, tyyppinimeltään Celcius+ (kuva 1), sovelletaan toista kaupallisista massoista käyttäen talon osaamista sekä suulake- että märkäpuristuksessa muodonantomenetelmänä.

Palotilan ja ilmansyötön geometria toteutettiin yhdistämällä keraamiset osat uudelleenmuotoiltuihin uunielementeihin. Osassa rakennetta voitiin käyttää jo olemassa olevia elementtejä, osa suunniteltiin uudestaan. Tuloksena oli kahden materiaalin yhdistelmäkonstruktio, jossa keraami suojaa sisäelementin pintaa lämpösäteilyltä, on rapautumisensa jälkeen vaihdettavissa ja ohjaa paloilmua kanavistojen läpi sinne, minne sitä kussakin palon vaiheessa tarvitaan. Samalla mahdollisuus muovata keraamia antaa myös tulipesän sisäosille ilmettä.

4. Tulokset

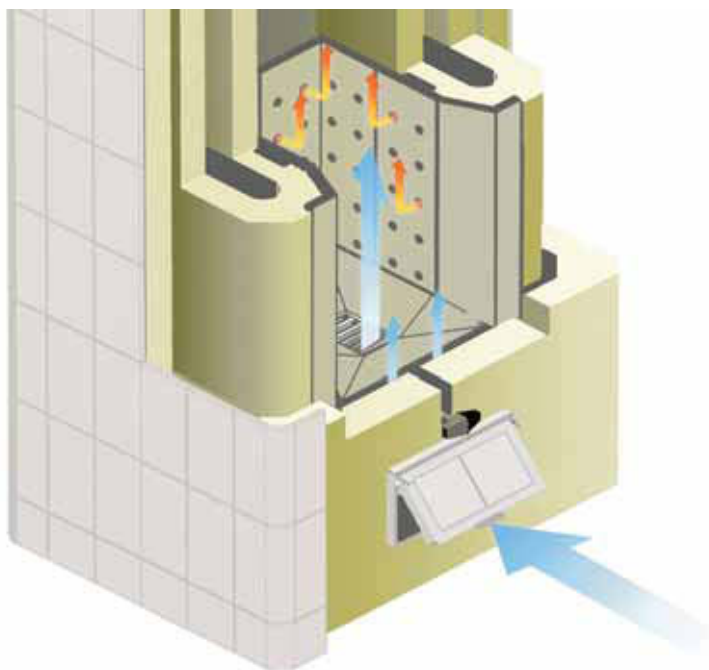
Vuoden 2003 aikana lanseerattiin markkinoille uusi Celcius+-tulipesällä varustettu kaakeliuunimallisto, jonka paloprosessin on riippumattomissa testeissä (Fraunhofer-Instituutin rakennusfysiikan laboratorio, Stuttgart; yhteenveto P8-83/2003 ja VTT Prosessit, Jyväskylä; tutkimusseloste Nro PRO2/6056/03) havaittu täyttävän kaikki hyväksyntävaatimukset erinomaisesti.

5. Tulosten hyödyntäminen ja projektin jatkosuunnitelmat

Projektin tuloksia pyritään hyödyntämään kaupallisesti.

Jatkossa hyväksi havaittu konsepti siirretään myös muihin Kerman Savi Oy:n uunimalleihin, aloittaen erkkerityyppisestä uunista, mikä on edennyt koepoltto-vaiheeseen. Jatkossa tarkoituksena on kehittää myös tekniikkaa muihin tulipesiin, mukaan lukien kamiinat ja kiukaat sekä tuottaa kotimainen puhtaanpolton tekniikkaa käyttävä tulisijaperhe.

Kordieriittimateriaalin osalta tuotekehitystä jatketaan ja kehitetään massan muodonantomahdollisuuksia. Tähän tulee liittymään myös teollisen muotoilun ammattilaisten käyttäminen visuaalisen ilmeen osalta. Kerman Savi Oy:ssä on myös jo muutamia kordieriitille soveltuvia lasitteita ja sen mukana odotetaan saavutettavan sovelluksia myös muualla kuin tulisijabisneksessä.



Kuva 1. Kaavio Kerman Savi Oy:n Celcius+-tulipesästä. Nuolet osoittavat ilmansyöttöreitit palotilaan.

Puun pelletoinnin pienlinjan kehittäminen – PUUY45

Jari Muona
JPK-Tuote Oy
PL 196, 80101 Joensuu
Puh. (013) 221 572, faksi (013) 824 403
E-mail: jari.muona@jpk-tuote.fi

Abstract

Project title in English: The development of small size wood pelletizing line

The objective of the project is to develop a small size (capacity appr. 1 t/h) wood pelletizing line by using existing technology. The pelletizing line will include both the drying and the pressing units. As the result of the project there will be a ready pelletizing line also for export markets. The special key sectors in the project will be the development of subcontractor network, the material selecting and the development of controlling system.

1. Tausta

Sekä pellettien tuotanto että käyttö ovat olleet voimakkaassa kasvussa useissa Euroopan maissa viimeisen viiden vuoden aikana, näin myös Suomessa. Fossiliesten polttoaineiden saatavuuden heikkeneminen ja hintojen nousu vauhdittavat osaltaan pelletöintilaitteiden kysyntää erityisesti Itä-Euroopan maissa, joissa tekniikka ei toistaiseksi ole laajalti käytössä. Pellettien tuotantoon on markkinoilla vähän tarjolla pieniä laitteistoja (kapasiteetti alle 1 t/h), joissa on mukana myös raaka-aineen kuivaus. Pääosa valmiista laitteistoista on alun perin rehun jalostukseen suunniteltua tekniikkaa, joka kuitenkin oikean tietotaidon turvin on muunnettavissa soveltuvaksi myös puuainekselle.

2. Tavoite

Hankkeen tavoitteena on tuotteistaa pienehkö puun pelletöintilaitteisto myös vientiin soveltuvaksi kokonaisuudeksi. Laitteistoon kuuluu sekä puuraaka-aineen kuivaus- että puristuslaitteisto.

3. Projektin toteutus

Hankkeessa kootaan sekä kuivaus- että puristuslaitteiston sisältävä pellettilinja käyttäen olemassa olevia laitteistorunkoja. Laitteistoon tehdään tarvittavat osien vaihdot ja muutostyöt sekä rakennetaan alkuvaiheessa perustoiminnot sisältävä ohjausautomaattikka. Koekäytöllä arvioidaan ja testataan rakenteiden ja osien soveltuvuutta ja haetaan parhaat ratkaisut laitteiston toimivuutta ja vientimarkkinoita silmällä pitäen. Pääosa rakentamisesta ja testauksesta tehdään vuosien 2004–2005 aikana.

Muita käynnissä olevia yrityshankkeita

Uuden sukupolven saunankiuas – PUUY33

Harvia Oy
Pertti Harvia
PL 12, 40951 Muurame
Puh. (014) 331 4000, faksi (014) 331 4090
E-mail: pertti.harvia@harvia.fi

Hanke, jossa tutkitaan ja kehitetään nykyajan vaatimukset täyttävää vähäpäästöistä puukiuasta. Harvia Oy kehittää yhteistyössä VTT:n kanssa uuden sukupolven puukiuasta, jossa tavoitteena on päästöjen pienentäminen. VTT tekee t&k-projektiin liittyen polttokokeita tulisijojen tutkimuslaitteistolla, jolla päästöjä ja lämmöntuottoa voidaan tutkia monipuolisesti.

Pienkattilan leijupolttotekniikkakeksinnön kehittäminen yritystoiminnaksi – PUUY35

New Fire Oy
Kari Hämäläinen
Muovikatu 6, 74120 Iisalmi
Puh. (017) 818 585, faksi (017) 818 586
E-mail: asiakaspalvelu@newfire.info

Bioenergian logistiikan kehittäminen – PUUY38

JST-Kone Oy

Sampo Humalainen

Nokiantie 9, 52700 Mäntyharju

Puh. (015) 685 855, faksi (015) 685 856

E-mail: jst-kone@dlc.fi

Hankkeessa kehitetään usean biopolttoaineella toimivan lämpölaitoksen verkoston toimintamalli, jossa yksittäisten voimaloiden polttoaineen jakelun ja käytön vastuu on keskitetty. Tämä käsittää sekä modulaarisen ja vakioidun laitoskonseptin kehittämisen että polttoainehuollon logistisen järjestelmän kartoittamisen.

Pieni vibrahakekeskus – PUUY41

Lava ja Huolto Heinonen Oy

Vilho Widing

Kukkoinkuja 2, 03300 Otalampi

Puh. (09) 2233 795, faksi (09) 2233 233

E-mail: lava@jahuoltoky.inet.fi

Hankkeessa kehitetään kompaktia hakelämpölaitosta.

Briketin polttojalustan kehittäminen – PUUY42

PTI-Metalli Oy

Esko Hukka

Toholahdentie 53, 77700 Rautalampi

Puh. (017) 530 910, faksi (017) 531 090

E-mail: esko.hukka@pti-metalli.fi

PTI-Metalli Oy kehittää uudella toimintaperiaatteella toimivaa briketinpolttolaitteistoa pienen tuotantomitan prototyypiksi, jota koeajetaan lopullisia käyttöolosuhteita vastaavasti mahdollisimman kattavien tulosten keräämiseksi.

Puupolttoaineen puhdas palaminen pientulisijassa – PUUY44

Narvi Oy

Jari Valtonen

Yrittäjätie 1 A, 27230 Lappi

Puh. (02) 8378 6500, faksi (02) 8378 6510

E-mail: jari.valtonen@narvi.fi

Tuotekehitysprojektin tavoitteena on kehittää puulämmitteinen kiuas, jonka palaminen on taloudellista ja savukaasupäästöt vähäisiä. Tavoitteena on myös edistää kotimaista puupolttoainetta puhtaana vaihtoehtona.

Palax Power 100 -puunpilkontakone – PUUY46

Ylistaron Terästäkomo Oy

Anssi Koski

Lahdentie 9, 61400 Ylistaro

Puh. (06) 474 5100, faksi (06) 474 0790

E-mail: anssi.koski@terastakomo.com

Ammattimaiseen käyttöön tarkoitetun polttopuun pilkontakoneen kehittäminen Keski-Euroopan markkinoille.

Tekijä(t) Alakangas, Eija & Holviala, Niina (toim.)			
Nimeke Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003			
Tiivistelmä Puuenergian teknologiaohjelmassa kehitettiin metsähakkeen suurimittaisia tuotantoketjuja ja niihin liittyviä teknologioita. Kehitystyössä tähdennettiin tuotantokustannusten alentamista, toimitusvarmuutta ja metsähakkeen laadun parantamista. Ohjelmassa on kehitetty hakkeen suurkanäyttäjille erinomaisesti soveltuvaa risutukkitekniikkaa, joka on nopeasti yleistynyt Suomessa ja leviämässä vientituotteeksi. Metsähakkeen raaka-ainepohja on laajentunut ohjelman aikana päätehakuiden tähteistä nuorten metsien harvennuspuihuhun ja kantomurskeeseen. Ohjelman kokonaislaajuus oli noin 42 miljoonaa euroa ja siihen osallistui 53 yritystä ja 27 tutkimusyksikköä. Tässä ohjelman neljännessä vuosikirjassa esitellään 31:n käynnissä olevan projektin tuloksia vuosilta 2002–2003. Ohjelmaan on liitetty Puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön panostusalue vuonna 2002. Siinä kehitetään korkeatasoista osaamista koko puupolttoaineiden pienkäytön liiketoimintaketjuun: polttoaineen hankinnasta, käsittelystä, varastoinnista ja logistiikasta sen käyttöön ja lämmöntuotantoon. Kirjan lopussa esitellään tämän panostusalueen projektien ensimmäisiä tuloksia.			
Avainsanat biomass, bioenergy, biofuels, wood, energy wood, wood fuels, wood residues, logging residues, wood chips, bark, harvesting, chipping, thinnings, mixed fuels, crushing, transportation, storage, quality control, processing, fuel supply, energy production, co-combustion, environmental impacts, stoves, boilers, firewood, emissions			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Energian tuotanto, Koivurannantie 1, PL 1603, 40101 Jyväskylä			
ISBN 951-38-6287-9 (nid.) 951-38-6288-7 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektin numero C4SU00005	
Julkaisu-aika Maaliskuu 2004	Kieli Suomi, englanti	Sivu- 430 s.	Hinta I
Projektin nimi Puuenergian teknologiaohjelma		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus Tekes	
Avainnimeke ja ISSN VTT Symposium 0357-9387 (nid.) 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Myynti VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puhelin. (09) 456 4404 Fax (09) 456 4374	

Published by



Series title, number and report
code of publication

VTT Symposium 231
VTT-SYMP-231

Author(s) Alakangas, Eija & Holviala, Niina (eds.)			
Title The Yearbook 2003 of the Finnish Wood Energy Technology Programme			
Abstract <p>The Finnish Wood Energy Technology Programme of Tekes, National Technology Agency, was launched in 1999 to promote the development of efficient systems for large-scale production of chips from residual forest biomass. Cost reduction, improved fuel quality, reliable deliveries and environmentally sound technology have been its key objectives. The Programme is one of the tools of the Ministry of Trade and Industry for substituting renewable sources of energy for fossil fuels.</p> <p>The five-year Wood Energy Technology Programme has included over 120 R&D projects, and the total funding accounts for EUR 42 million. More than 50 companies, research institutes and universities have been involved. In 2002, the Programme was extended towards the small-scale production and use as a new sub-programme was launched. This programme focuses on solutions for small-scale (usually under 1 MW) wood fuel production, storage, processing, distribution and heat production. This extension will continue to the end of 2004.</p> <p>The Programme also participates in international co-operation such as the ALTENER Bioenergy Network – EUBIONET, OPET Network (Organisations for the Promotion of Energy Technologies) of EU, and the IEA Bioenergy Agreement.</p> <p>This fourth yearbook presents the results of 31 ongoing projects and it is published in the seminar arranged on 17–18 March 2004 in Jyväskylä, Finland.</p>			
Keywords biomass, bioenergy, biofuels, wood, energy wood, wood fuels, wood residues, logging residues, wood chips, bark, harvesting, chipping, thinnings, mixed fuels, crushing, transportation, storage, quality control, processing, fuel supply, energy production, co-combustion, environmental impacts, stoves, boilers, firewood, emissions			
Activity unit VTT Processes, Koivurannantie 1, P.O.Box 1603, FIN-40101 JYVÄSKYLÄ, Finland			
ISBN 951-38-6287-9 (soft back ed.) 951-38-6288-7 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number C4SU00005	
Date March 2004	Language Finnish, English	Pages 430 p.	Price I
Name of project The Finnish Wood Energy Technology Programme		Commissioned by National Technology Agency Tekes	
Series title and ISSN VTT Symposium 0357-9387 (soft back ed.) 1455-0873 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

Puuenergian teknologiaohjelmassa kehitettiin metsähakkeen suurimittaisia tuotantoketjuja ja niihin liittyviä teknologioita. Kehitystyössä tähdennettiin tuotantokustannusten alentamista, toimitusvarmuutta ja metsähakkeen laadun parantamista. Ohjelmassa on kehitetty hakkeen suurkäyttäjille erinomaisesti soveltuvaa risutukkitekniikkaa, joka on nopeasti yleistynyt Suomessa ja leviämässä vientituotteeksi. Metsähakkeen raaka-ainepohja on laajentunut ohjelman aikana päätehakkuiden tähteistä nuorten metsien harvennusuuhun ja kantomurskeeseen. Ohjelman kokonaislaajuus oli noin 42 miljoonaa euroa ja siihen osallistui 53 yritystä ja 27 tutkimusyksikköä.

Tässä ohjelman neljännessä vuosikirjassa esitellään 31:n käynnissä olevan projektin tuloksia vuosilta 2002–2003. Ohjelmaan on liitetty Puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön panostusalue vuonna 2002. Siinä kehitetään korkeatasoista osaamista koko puupolttoaineiden pienkäytön liiketoimintaketjuun: polttoaineen hankinnasta, käsittelystä, varastoinnista ja logistiikasta sen käyttöön ja lämmöntuotantoon. Kirjan lopussa esitellään tämän panostusalueen projektien ensimmäisiä tuloksia. Vuosikirja julkistettiin ohjelman päätösseminaarissa 17.–18.3.2004 Jyväskylässä.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 456 4404
Fax +358 9 456 4374

