

Höyryn käyttö sahatavaran kuivauksessa

Antti Hukka & Veikko Tarvainen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-4537-0 (nid.)

ISSN 1235-0613 (nid.)

ISBN 951-38-4538-9 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0857 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A,
PL 1806, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Träkarlsgränden 2 A, PB 1806, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,
Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Tekninen toimitus Leena Ukskoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1997

Hukka, Antti & Tarvainen, Veikko. Höyryn käyttö sahatavaran kuivauksessa [Using steam in drying of sawn timber]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 826. 49 s. + liitt. 11 s.

UDK 674.09:674.04

Avainsanat timber, drying, wood, sawn lumber, steam, utilization, cracking, heating, moisture

TIIVISTELMÄ

Sahatavaran kamarikuivauksen alkulämmitysvaiheessa sahatavara pyrkii kuivumaan hallitsemattomasti, koska kuormiin puhallettavan ilman kosteus on vesihöyryn tiivistymisen vuoksi liian alhainen. Tästä aiheutuu sahatavaran pinnalle pieniä alkuhalkeamia eli niin sanottua mikrohalkeilua, joka kuivauksen myöhemmässä vaiheessa kasvaa silmin havaittavaksi halkeiluksi. Mikrohalkeilun on havaittu olevan suurin yksittäinen kuivaushalkeilun syy, mutta se voidaan lähes kokonaan välttää kostuttamalla kuivausilmaa alkulämmitysvaiheessa voimakkaasti. Tehokkain tapa on käyttää tarkoitukseen matalapaineista höyryä. Näin voidaan vähentää kuivaushalkeilun määrää jopa 50 %, minkä lisäksi alkulämmitysvaiheeseen käytettävän ajan lyhentymisen 50 - 80 %:lla tuo lisää kuivauskapasiteettia 5 - 10 %. Tarvittavan höyrykattilan teho on nimellistilavuudeltaan 100 m³:n kamarissa noin 500 kW. Sekä kattilan pääoma- että käyttökustannukset saadaan takaisin halkeilun aiheuttaman arvonalennuksen vähentymisenä.

Myös sahatavaran kuivauksen laadun toinen tärkeä osatekijä, sisäosan ja pinnan välinen kosteusero, voidaan minimoida käyttämällä höyryä lopputasaannuksessa. Tasaannuttamattomana sahatavara ei kelpaa jatkojalostuksen tarpeisiin, koska kosteusgradientti yhdessä kuivauksen aiheuttaman jännitystilan kanssa aiheuttaa sahatavaran poikkileikkauksessa taipumuksen muodonmuutoksiin halkaisussa ja höyläyksessä. Höyryllä tapahtuvassa tasaannuksessa puun keskiosan ja pinnan välinen kosteusero tasaantuu erittäin tehokkaasti jo muutamassa tunnissa ja sen keskimääräinen kosteus kasvaa 1 - 2 prosenttiyksikköä. Jotta prosessi olisi tehokas ja mahdollisimman taloudellinen, puun on oltava ensin jäähtynyt. Tämä antaa mahdollisuuden toteuttaa tasaannutusvaihe erillisessä, tätä varten suunnitellussa tasaannuskammiossa, jolloin prosessi kestää kokonaisuudessaan vain noin ½ vuorokautta. Ilman höyryä tasaantuminen kestää varastossa useita kuukausia, mikä aiheuttaa pääoman sitoutumisen muodossa useimmiten myös selvästi enemmän kustannuksia kuin tehokkaasti höyryn avulla toteutettu lopputasaannutus.

Hukka, Antti & Tarvainen, Veikko. Höyryn käyttö sahatavaran kuivauksessa [Using steam in drying of sawn timber]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Julkaisuja – Publikationer 826. 49 p. + app. 11 p.

UDC 674.09:674.04

Keywords timber, drying, wood, sawn lumber, steam, utilization, cracking, heating, moisture

ABSTRACT

In convective air-drying of sawn timber the drying process is not well controlled during the warm-up phase, because the humidity of the air condenses on the cold timber and the kiln walls. As a result of this drying taking place when the wood is still cold, very small initial cracks appear at the wood surface. Later on, these so-called micro-checks open and form the macroscopic checking to be observed at the end of the drying process. It has been shown that this phenomenon is the most important single factor causing drying checking, but it can be entirely avoided by humidifying the air effectively during the warm-up phase. The most effective method is using low-pressure steam. With steam drying checking can be reduced by 50 % and the time needed for the warm-up phase be diminished by 50-80 % increasing the drying capacity by as much as 10 %. The power needed in a kiln with nominal volume of 100 m³ is about 500 kW. Both the investment and the operation cost of the steam boiler will be compensated for by the lower loss in timber value caused by checking.

Another important factor in drying quality is the final moisture gradient of the timber. Immediately after drying the moisture gradient is typically so large, that the timber is not suitable for further processing, because moisture gradient along with the drying stresses causes deformations in splitting and planing. By conditioning with steam the moisture difference between the centre and surface of the wood can be conditioned in a few hours while the average moisture increases by 1 - 2 %. This process to be effective and economical the timber must first be cooled down after drying. This suggests using a separate conditioning chamber of special design, when the whole process can be carried out in 12 hours. Without steam in a warehouse the conditioning takes several months, which usually also causes substantially more capital costs than effective steam conditioning.

ALKUSANAT

Sahateollisuudessa on asiakaslähtöisen toiminnan voimakas kasvu lisännyt tarvetta parantaa kuivauslaatua sekä nostaa kuivauskapasiteettia. Kuivaus puusepäнкуivaksi kestää noin kaksinkertaisen ajan vientikuivaukseen verrattuna. Lisäksi asiakas toivoo saavansa halkeilematonta ja kosteudeltaan tasaista sahatavaraa. Muualla tehdyt tutkimukset ja käytännön kokemukset ovat antaneet viitteitä, että höyryllä kuivaamon kostutuksessa voidaan säästää kuivausaikaa ja vähentää kuivausvirheitä.

Höyryn käytön etujen ja kustannusten selvittämiseksi Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) ja Suomen Puututkimus Oy päättivät teettää höyrykuivaustutkimuksen. Tutkimus, jonka projektinimenä on "Puun kuivumisen ja halkeilun mallintaminen höyrykuivauksessa", jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa, jonka tulokset esitetään tässä raportissa, käsitellään höyryn käyttöä perinteisissä kuivaamoissa. Toisessa osassa tutkitaan uudella kuivauslaitteistolla puun kuivumista ja käyttäytymistä yli 100°C:n lämpötiloissa ja 0 - 10 barin ylipaineessa.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat kehitysjohtaja Seppo Vainio Enso-Gutzeit Oy:stä, kehitysjohtaja Kalevi Asikainen Kaukas Oy:stä, professori Tero Paajanen eknillisestä korkeakoulusta, tutkimuspäällikkö Ilmari Absetz TEKESistä ja tutkimuksen vastuullinen johtaja tutkimusprofessori Alpo Ranta-Maunus VTT:stä. Projektin tutkijoina olivat Antti Hukka ja Veikko Tarvainen.

Haluamme kiittää johtoryhmää työn asiantuntevasta suuntaamisesta ja sahateollisuuden käytännön näkökantojen korostamisesta. Toivomme julkaisun antavan sopivan käytännönläheiset ohjeet höyryn käyttöön kuivauksen eri vaiheissa sekä antavan selvityksen höyryn käyttömahdollisuuksista, eduista ja kustannuksista.

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT	5
1 JOHDANTO	7
2 FYSIKAALISET PERUSTEET HÖYRYN KÄYTÖLLE SAHATAVARAN KUIVAUKSESSA	9
2.1 HÖYRYN VAIKUTUS KUIVAUKSEN ERI VAIHEISSA	10
2.2 HÖYRYN KÄYTTÖ ERI KUIVAUSMENETELMISSÄ.....	11
2.3 VAIKUTUS KUIVAUSLAADUN ERI OSATEKIJÖIHIN	12
3 ESIHÖYRYTYYS ENNEN KUIVAUSTA	13
4 HÖYRYN KÄYTTÖ KUIVAUKSEN ALKULÄMMITYSVAIHEESSA.....	15
4.1 LABORATORIOKUIVAUSKOKEET ALKULÄMMITYSVAIHEESSA VALLITSEVAN KUIVAUSKAAVAN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMISEKSI	16
4.2 YLÖSAJOVAIHEEN SIMULOINTI KAMARIKUIVAUKSEN SIMULOINTIOHJELMALLA	18
4.2.1 Mallin rakenne	18
4.2.2 Tulokset.....	20
4.3 ALKULÄMMITYKSESSÄ TARVITTAVA HÖYRYTEHO.....	23
5 HÖYRYN KÄYTTÖ LOPPUTASAANNUTUKSESSA	28
5.1 LOPPUTASAANNUTUKSEN SUORITUS: TEOREETTINEN TARKASTELU	30
5.2 LOPPUHÖYRYTYKSEN KOKEELLINEN TUTKIMUS	31
5.2.1 Kuusisahatavara, ensimmäinen koesarja.....	32
5.2.2 Kuusisahatavara, toinen koesarja.....	33
5.2.3 Mäntysahatavara	34
5.2.4 Muodonmuutostaipumuksen ja kosteusgradientin välinen yhteys	36
5.3 TEHOKKAIN TAPA TOIMIA: ERILLINEN TASAANNUTUSKAMMIO	40
6 HÖYRYN TUOTANTOLAITTEISTO	43
6.1 ENERGIAN KOKONAISKULUTUS	44
6.2 LAINSÄÄDÄNTÖ.....	45
7 YHTEENVETO	47
LÄHDELUETTELO	49

LIITTEET

1 JOHDANTO

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen ja eräiden muiden tahojen yhteistyönä vuosina 1990 - 1992 toteutetun 'Sahatavaran kuivauksen laadun parantaminen' -projektin yhtenä päätavoitteena oli luoda edellytykset paksun, hyvälaatuisen sahatavaran kuivaushalkeilun vähentämiseen puoleen verrattuna projektin alkaessa vallinneeseen tilanteeseen. Tutkimuksen lähtökohtana oli ajatus siitä, että kuivumisprosessissa olennaisten puun materiaaliominaisuuksien ymmärtämisen kautta on mahdollista oikeiden kuivauskaavojen avulla hallita kuivaushalkeilua. Myös tämän jälkeen on VTT:llä toteutettu useita puussa tapahtuvan kosteuden- ja lämmönsiirron sekä virumisen ymmärtämiseen tähdänneitä projekteja, joiden sovelluksena on ollut muun muassa edellä mainitun projektin lopputuloksena luodun kuivauksen simulointiohjelman LAATUKAMARI jatkokehitys. Nämä projektit ovat sisältyneet Teknologian kehittämiskeskuksen TEKESin Puun mekaanisen teknologian (PMT) ohjelmaan.

Edellytykset kuivaushalkeilun hallintaan ovat näin olleet olemassa jo pidemmän aikaa (Ranta-Maunus ym. 1995), mutta yhä edelleen etenkin mäntysahatavaran osalta on suomalaisessa sahateollisuudessa kuitenkin vallitsevana se tilanne, että kuivaushalkeilun aiheuttama sahatavaran arvon aleneminen on suurempi kustannustekijä kuin kaikki muut kuivauksen aiheuttamat kustannukset yhteensä. Tilanne on kyllä parantunut 1990-luvun aikana, mutta hyvin tyypillisesti 63 tai 75 mm paksun hyvälaatuisen mäntysahatavaran arvo alentuu kuivaushalkeilun seurauksena vieläkin 10 %, mikä merkitsee yli 100 markan kustannusta kuutiometriä kohti. Myös muilla dimensioilla ja laaduilla halkeiluongelma on selkeästi vielä olemassa.

Yhtenä syynä ongelmiin on se, että nykyisillä kamarikuivaamoilla on vaikea saada aikaan sellaisia kuivausolosuhteita, jotka tutkimuksissa on havaittu optimaaliseksi kuivaushalkeilun minimoimiseksi. Etenkin ennen varsinaisen kuivauslämpötilan saavuttamista tapahtuva ennenaikainen kuivuminen on ongelma, koska tällöin puun materiaaliominaisuudet ovat sellaiset, että vähäininkin sahatavaran pinnan kuivuminen riittää aiheuttamaan pieniä halkeaman alkujia. Tämän niin sanotun mikrohalkeilun on muun muassa ruotsalaisissa tutkimuksissa (Morén 1994b) havaittu olevan suurin yksittäinen kuivaushalkeilun aiheuttaja.

Alkulämmitysvaiheessa tapahtuvan hallitsemattoman kuivumisen estämiseksi kuivauskuormiin puhallettavaa kuivausilmaa on kostutettava, koska siinä oleva kosteus pyrkii tiivistymään kylmän sahatavaran pintaan. Kuivausilman vesisisältö ei näin ollen riitä kuivauksen hallittuun aloittamiseen. Matalapaineisen vesihöyryn käyttö kuivausilman lämmitykseen ja kostutukseen on ajatuksena jo vanha, mutta suomalaisessa sahateollisuudessa se ei ole laajemmalti levinnyt. Sen sijaan yleisesti käytetään kuivaamoissa vesisumutusta, joka vieläpä usein huonosti toteutettuna on ongelmallinen ja riittämätön väline halutun kuivauskaavan toteuttamiseen. Täsmällinen

tieteellinen ja ennen kaikkea päätöksenteon avuksi tarvittava numeerinen tietämys höyryn käytön mukanaan tuomista eduista on paljolti puuttunut.

Toinen asiakaslähtöisen toiminnan lisääntyessä kasvava sahatavaran kuivauslaatuun liittyvä ongelma on kuivatussa puussa vallitseva kosteus- ja jännitys jakauma. Suuri kosteusgradientti ja jäännösjännitykset yhdessä aiheuttavat sen, että sahatavara ei sellaisenaan kelpaa jatkojalostuksen tarpeisiin. Etenkin halkaisu ja höyläys aiheuttavat tasaannuttamattomassa sahatavarassa niin suuria muodonmuutoksia, että näin syntyvää materiaalitappiota ei voida hyväksyä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää se, kuinka höyryä tulisi käyttää käytännön kuivaustoiminnassa nykyisissä suomalaisissa sahatavaran kamarikuivaamoissa edellä kuvattujen ongelmien ratkaisemiseksi siten, että kuivaukseen kuluva aika ja kustannukset eivät korkean kuivauslaatu-tavoitteen vuoksi kohoa olennaisesti nykytilannetta korkeammiksi.

2 FYSIKAALISET PERUSTEET HÖYRYN KÄYTÖLLE SAHATAVARAN KUIVAUKSESSA

Höyryn käytön vaikutusten ymmärtämiseksi on välttämätöntä ymmärtää konvektiiviseen lämmön- ja massansiirtoon perustuvan kuivauksen fysikaaliset perusteet. Kuivaamoon asetettu sahatavara kokee ympäröivästä ilmvirrasta kolme fysikaalista perusasiaa, lämpötilan, ilman kosteuden ja ilman virtausnopeuden. Tavanomaisessa lämpimän ilman virtaukseen pohjautuvassa kuivaamossa kuivuminen perustuu siihen, että kuivauspaketin läpi virtaavasta kuivausilmasta siirtyy lämpöenergiaa puuhun, jossa tämä energia kuluu veden höyrystämiseen. Höyrystynyt vesi siirtyy virtaavan ilman mukana pois puusta. Jos puun pinta on hyvin märkä (tuore pintapu), tämä höyrystyminen tapahtuu pääasiassa puun pinnalla. Muussa tapauksessa ilmasta puuhun absorboitua lämpöä siirtyy johtamalla puun sisäosiin ja aiheuttaa veden höyrystymisen laajemmalla alueella puun sisällä.

Mainitut fysikaaliset suureet vaikuttavat yksittäisen sahatavarakappaleen kuivumista tarkasteltaessa kuivumistapahtumaan seuraavasti:

- Korkea lämpötila parantaa puun kosteudenjohtavuutta eli kosteuden virtausta puun sisäosista kohti puun pintaa. Tätä ilmiötä tehostaa veden kiehumispistettä korkeammassa lämpötilassa puun sisäosiin syntyvä ylipaine, jonka hyväksikäyttö on kuumakuivauksen perusajatus. Myös alipaine-kuivauksessa syntyy sama ilmiö jo alemmassa lämpötilassa ulkoisen paineen alentamisen seurauksena.
- Kuivausilman kosteus eli kuivauskaava määrää olennaisesti sen, kuinka tehokkaasti vesi haihtuu puun pinnalta sitä ympäröivään ilmaan. Asiaan liittyy lisäksi olennaisena tekijänä puun pinnan kosteus: mitä kuivempi puun pinta on, sitä heikommin siitä haihtuu kosteutta. Tämä johtuu suurelta osin puun hygroskooppisuudesta eli sen kosteuspitoisuuden vaikutuksesta puussa vallitsevaan vesihöyryn osapaineeseen. Vastaava ilmiö, joskin heikompana on havaittavissa myös puunsyiden kylläsymispisteen yläpuolella.
- Puun pinnalla eli kuivauskuorman rimavälissä virtaavan ilman virtausnopeus vaikuttaa lämmön- ja aineensiirron tehokkuuteen puun ja ilman välisellä rajapinnalla. Asiaan vaikuttaa lisäksi vähäisemmässä määrin puun pinnan karheus.

Mainittujen tekijöiden keskinäinen merkittävyys riippuu olennaisesti kuivattavasta materiaalista. Sahatavaran kyseessä ollen on erotettavissa selvästi kaksi erilaista tapausta:

1. Ohuen pintalaudan kuivaus, jolloin ongelmana on saada siirretyksi vesi puun pinnalta sitä ympäröivään ilmaan. Sekä laudan ohuus että pintapuun materiaaliominaisuudet edistävät kosteuden siirtymistä puun sisäosista sen

pinnalle. Tällöin kuivumisen määräävät ensisijaisesti kuivausilman suhteellinen kosteus ja laudan pinnalla virtaavan ilman nopeus. Lämpötilan korottamisella on kuivumisnopeuteen vain vähäinen vaikutus.

2. Paksun sydäntavaran kuivaus, jolloin perusongelmana on siirtää kosteus puun sisäosista sen pinnalle. Puun pinta kuivuu joka tapauksessa jopa liiankin nopeasti, sillä sekä lankun suuri paksuus että sydänpuun materiaaliominaisuudet ovat hidastamassa veden siirtymistä kohti puun pintaa. Tällöin korostuu korkean lämpötilan puun kosteudenjohtavuutta parantava vaikutus, kun taas ilman virtausnopeuden kasvattaminen ei lisää kuivumisnopeutta käytännöllisesti katsoen lainkaan.

Kaikilla kolmella mainitulla kostean ilman ominaisuudella on lisäksi merkitystä tarkasteltaessa kuivumistapahtumaa teollisen sahatavara-kuivaamon suuremmassa mittakaavassa. Tällöin korostuu erityisesti ilman nopeuden vaikutus, josta ensisijaisesti riippuu kuivausolosuhteiden tasaisuus kuivaamon eri osissa. Sekä kuormiin puhallettavan ilman olosuhteiden epätasaisuus painepuolella että olosuhteiden liiallinen muuttuminen puhallussyvyyden seurauksena johtuvat useimmiten juuri liian alhaisesta tai epätasaisesta ilman virtausnopeudesta. Tällöin myös kuivumistulos on epätasainen, eikä kuivauslaatukaan voi ainakaan kaikkien kappaleiden osalta olla tyydyttävä.

2.1 HÖYRYN VAIKUTUS KUIVAUKSEN ERI VAIHEISSA

Vesihöyry ei sellaisenaan reagoi puun kanssa, eli puun solukko ei tavanomaisessa lämminilmakuivauksessa kysymykseen tulevissa olosuhteissa kuivumiseen vaikuttavien ominaisuuksien osalta muutu sen vaikutuksesta. Höyry on siis vain väline halutunlaisen kuivauskaavan toteuttamiseen, mutta sellaisena olennaisesti muita vaihtoehtoisia välineitä tehokkaampi. Höyry sisältää sekä lämpöenergian että kosteuden, jotka molemmat ovat kondensoitumisen kautta tehokkaasti siirrettävissä sahatavaran pintaan. Kostutukseen yleisesti käytettävällä vesisumutuksella ei saada aikaan samaa vaikutusta, koska tavanomaisten vesitäyttöisten lämpöpattereiden tapauksessa sekä pattereiden pintalämpötila että teho ovat liian alhaisia sumutettavan veden tehokkaaseen höyrystämiseen. Lisäksi käytettävät sumutussuuttimet ovat rakenteeltaan sellaisia, että niissä syntyvä pisarakoko on huomattavan suuri ja suuttimet pyrkivät ajan kuluessa tukkeutumaan.

Tarkasteltaessa höyryn vaikutusta sahatavaran kuivumiseen on erotettava tyypillisen hyvän kamarikuivauskaavan neljä eri vaihetta:

1. Kuivauksen lämmitysvaiheessa (kuivaamon ylösajo) puu on kylmää, joten höyry tiivistyy vedeksi sahatavaran pinnalle ja siirtää samalla veden höyrystyslämmön verran lämpöenergiaa puun pintaan. Pinnalta tämä lämpö siirtyy johtumalla puun sisäosiin. Tiivistyvistä vedestä valtaosa valuu kuivaamon lattialle, mutta osa imeytyy sahatavaraan nostaen sen kosteutta. Tuloksena on puun nopea lämpeneminen ilman, että sen pinta

pääsee kuivumaan. Tämä estää lämmitysvaiheessa syntyvän mikrohalkeilun, jonka on tutkimuksissa havaittu aiheuttavan jopa 50 % kuivauksen lopputuloksessa nähtävistä sahatavaran pintalapteen halkeamista. Kuivauksen lämmitysvaiheeseen kuluva aikaa voidaan lyhentää höyryn avulla jopa 80 %, koska höyry merkitsee 'ylimääräisen' lämmitystehon käyttöä.

2. Varsinaisessa kuivausvaiheessa höyry merkitsee puun kannalta vain kuivausilmassa olevaa kosteutta. Se on keino kostuttaa ilmaa kuivauskaavan niin vaatiessa, eikä puu voi kokea eroa höyryllä tai vesisumutuksella tuotetun kosteuden välillä, jos vesisumutus on riittävän tehokas. Jos kuivaamo on tiivis, kuten sen pitäisi, ei höyryä tarvita kuivausvaiheessa lainkaan, vaan päinvastoin puusta haihtuva kosteus on kuljetettava ilmanvaihdon tai kondensoinnin avulla höyrynä tai vetenä kuivaamosta ulos.
3. Kappaleiden välisen kosteusvaihtelun tasaamisvaiheessa höyryä tarvitaan ilman suhteellisen kosteuden nostamiseen, koska käytännössä kuivaamot yleensä eivät ole riittävän tiiviitä. Tiiviissä kuivaamossa tarkoitukseen riittää pelkkä ilmanvaihdon vähentäminen, koska joka tapauksessa kuorman keskimääräinen kosteus vielä alentuu tässä vaiheessa.
4. Tasaannutusvaiheessa perinteisenä ajatuksena on nostaa kuivausilman suhteellinen kosteus niin suureksi, että vallitseva tasapainokosteus on puun pinnan kosteutta korkeampi. Suomalainen havusahatavara tasaantuu kuitenkin hyvin hitaasti, minkä vuoksi parempi tulos saavutetaan käyttämällä tässäkin hyväksi höyryn kondensoitumista. Kun puun pinta on kylmä (vallitsevaa kastepistelämpötilaa kylmempi), puun pinnalla tapahtuu sama höyryn tiivistymisilmiö kuin kuivauksen lämmitysvaiheessa ja tasaantuminen on hyvin tehokasta.

2.2 HÖYRYN KÄYTTÖ ERI KUIVAUSMENETELMISSÄ

Tavanomaisessa lämminilmakuivauksen kamarisovelluksessa höyryä tarvitaan edellä kuvatun mukaisesti lähinnä alkulämmitys- ja tasaannutusvaiheissa. Jos kuivaamo vuotaa niin paljon, että ilman kosteus ei pysy halutulla tasolla varsinaisessa kuivausvaiheessa, on taloudellisesti poikkeuksetta parempi vaihtoehto tiivistää kuivaamo kuin käyttää lisähöyryä halutun kuivauskaavan toteuttamiseen.

Kuumakuivauksessa tilanne ei höyryn käytön suhteen eroa lämminilmakuivauksesta muutoin, kuin että tasaannutusvaiheen käyttöä vaaditaan kosteusgradientin tasaamiseksi käytännössä aina. Jotta höyryä ei kuuma-kuivauksen yhteydessä varsinaisessa kuivausvaiheessa tarvittaisi, on kuuma-kuivaamon tiiviydelle asetettava selvästi perinteistä lämminilmakuivaamoaa suurempia vaatimuksia.

Myös alipainekuivauksessa tilanne on lämmitys- ja tasaannutusvaiheiden suhteen sama kuin perinteisessä lämminilma-kuivauksessa. Varsinaisessa kuivausvaiheessa puusta tulevaa höyryä on alipainepumpun tai kondenssilaitteiston avulla joka tapauksessa koko ajan poistettava, joten ulkopuolisen höyryn lisääminen kuivaamoon ei ajatuksenaan ole järkevä.

2.3 VAIKUTUS KUIVAUSLAADUN ERI OSATEKIJÖIHIN

Höyryn käyttö perinteisessä sahatavarakuivauksessa vaikuttaa vain osaan kuivauslaadun osatekijöistä, ja vaikutus muihin saattaa joissakin tapauksissa olla jopa kielteinen:

- Keskimääräisen kosteuden määrää yksinomaan kuivauksen oikea-aikainen lopetus. Höyryllä ei ole asiaan vaikutusta.
- Kosteuden hajonta kappaleiden välillä riippuu raaka-aineen homogeenisuuden lisäksi kuivaamon olosuhteiden tasaisuudesta ja siten erityisesti rimavälissä vallitsevasta ilman nopeudesta. Kuivaamon ominaisuuksien mukaan valitulla kuivauskaavalla voidaan kuitenkin saavuttaa hajonnan suhteen useimmiten haluttu tulos, jos aikaa on käytettävissä riittävästi. Höyryn käyttö kosteushajonnan pienentämiseksi tasaannutusvaiheessa merkitsee vuotavan kuivaamon paikkaamista lisäenergialla, mitä ei voida suositella.
- Kosteusgradientti saadaan niin pieneksi kuin halutaan käyttämällä tehokasta lopputasaannutusta. Tässä höyryn käyttö on avainasemassa. Paljolti samasta asiasta on kysymys puhuttaessa kuivatun sahatavaran jäännösjännityksistä, muodonmuutostaipumuksesta tai niinsanotusta pintakovuudesta.
- Kuivaushalkeilu johtuu raaka-aineen ja sahausasetteen valinnan jälkeen lähinnä kuivauskaavasta ja erityisesti sen alkulämmitysvaiheesta. Ylösajovaiheessa tapahtuvaa halkeilua voidaan höyryn avulla olennaisesti vähentää, jos muut edellytykset tässä suhteessa hyvän kuivauslaadun tuottamiselle ovat olemassa.
- Muodonmuutokset, joista erityisesti kierous on ongelma, riippuvat lähinnä puun luontaisista ominaisuuksista. Niiden vähentämisessä avainasemassa on tukin ja sahausasetteen valinta; kuivauksessa asiaan voidaan vaikuttaa lähinnä jättämällä tavaran keskimääräinen kosteus niin korkeaksi kuin mahdollista. Myös lisäpainojen käyttö kuivauskuorman päällä on avuksi.
- Värivirheet aiheutuvat lähinnä liian pitkäaikaisesta ja korkeasta lämpötilasta suhteessa puun kosteuteen. Höyryllä tilannetta ei voida muuttaa, joskin loppuhöyrytyksessä saattaa käytettävän korkean lämpötilan vuoksi syntyä pihkavuotoja.

3 ESIHÖYRYTYS ENNEN KUIVAUSTA

Kirjallisuuden mukaan (Alexiou ym. 1990) tuoreen puun höyrytys ennen kuivausta kuumassa, kylläisessä höyryssä vähentää sahatavaran kuivaukseen kuluvaa aikaa jopa 16 %. Tällaisen esihöyrytyksen vaikutus perustuu siihen, että höyryttäminen korkeassa lämpötilassa muuttaa puun solurakennetta erityisesti sydänpuussa niin, että sen permeabiliteetti eli höyrynläpäisevyys kasvaa. Tämän johdosta kosteus varsinaisessa kuivausvaiheessa siirtyy helpommin kappaleen sisäosista sen pintaan ja kuivuminen tätä kautta nopeutuu. Ennen kuivausta tapahtuvan höyrytyksen vaikutuksen pitäisi näin ollen näkyä voimakkaimmin kuivattaessa paksua sahatavaraa korkeassa lämpötilassa alhaiseen loppukosteuteen, jolloin kosteuden siirtyminen höyrymuodossa on suurimmillaan ja siten myös puun permeabiliteetin merkitys kuivumisnopeuteen on tärkein. Ilmiö on ymmärrettävästi voimakkaasti puulajista riippuva.

Asiaa tutkittiin suomalaisella 50 x 200 mm² mäntysahatavaralla, joka kuivattiin VTT:n pienessä laboratoriokuivaamossa puusepänkuivaksi lämpötiloissa 63 °C ja 120 °C. Tavara oli sahattu tyvitukista, jonka tilavuuspaino oli poikkeuksellisen korkea (470 kg/m³), ja se oli pääasiassa sydänpuuta (alkukosteus 45 %). Kuivattavat puut jaettiin kahteen 19 kappaleen ryhmään, joiden keskimääräiset lähtötiedot olivat olennaisesti samat. Tämä varmistettiin sijoittamalla kumpaankin ryhmään yhtä paljon lankun tyvestä, keskeltä ja latvasta sahattuja kappaleita. Ensimmäistä ryhmää höyrytettiin 100 °C:n höyryssä 10 tunnin ajan. Tämän jälkeen seurasi jäähdytys kuivauslämpötilaan (puhallin pois päältä) ja vertailupuiden lisäys kuormaan 20 tunnin kuluttua. Käytetyt kuivauskaavat on esitetty liitteessä 1. Kuivausten yksityiskohtaiset tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Esihöyrytyksen vaikutus kuivaustulokseen eri kuivauslämpötiloissa 50 x 200 mm² mäntysahatavaralla.

Koe	Loppukosteus		Kosteusgradientti		Halkeilu %	Kierous	
	k.a.	hajonta	k.a.	hajonta		k.a.	hajonta
63 °C, ei höyry	10,7	1,2	3,6	1,5	9	4,7	4,1
63 °C, höyry	10,8	0,8	3,9	1,2	6	2,7	3
120 °C, ei höyry	7,3	2,3	3,7	1,7	16	4,9	4
120 °C, höyry	8,1	2,7	6,9	4,9	26	3,7	3,1

Höyrytyksellä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta loppukosteuteen eikä myöskään sen hajontaan, joten höyrytyksen aiheuttamalla mahdollisella permeabiliteetin kasvulla ei ainakaan tavanomaisessa kuivauslämpötilassa mäntysahatavaran kohdalla ole käytännön merkitystä. Kosteusgradientin osalta esihöyrytys näyttäisi kuumakuivauksessa jopa hieman hidastavan kuivumista, mutta tämä odottamaton havainto on pienistä kappalemääristä ja suuresta hajonnasta johtuen hyvin epävarma.

Myös halkeilun suhteen vertailuryhmät olivat kummassakin tapauksessa samanarvoiset, joten esihöyrytyksen ei voida katsoa parantaneen virumista syitä vastaan kohtisuorissa suunnissa. Niin ikään kierous (mittaus 1 m:n matkalta) oli kummassakin ryhmässä tilastollisen tarkastelun valossa keskimäärin yhtä suuri, vaikka puhtaasti keskiarvoina tarkastellen eroa näyttäisikin olevan. Syidenkään suuntaisen viruman ei siis voida katsoa kasvaneen höyrytyksen seurauksena.

Sahatavaran pinta oli tummunut selvästi jo välittömästi esihöyrytyksen jälkeen muistuttaen kuumakuivatun puun pinnan väriä. Kuivauksen loputtua väri oli alhaisessakin lämpötilassa kuivatuilla esihöyrytetyillä puilla selkeän harmahtava, eikä männylle tunnusomaista sydänpuun punertavaa väriä ollut havaittavissa yhtä selkeästi kuin vertailuryhmässä. Tummumisen syvyys selvitettiin höyläämällä pinta kolmesta koekappaleparista, jolloin voitiin nähdä, että normaalin höyläyksen syvyydellä värinmuutos oli vielä selkeästi olemassa. Muutos ei kuitenkaan ollut yhtä voimakas kuin tavanomaisella kuumakuivatulla sahatavaralla, mikä johtuu ilmeisesti höyrytyksen lyhyestä kestosta kuumakuivausprosessin keston verrattuna.

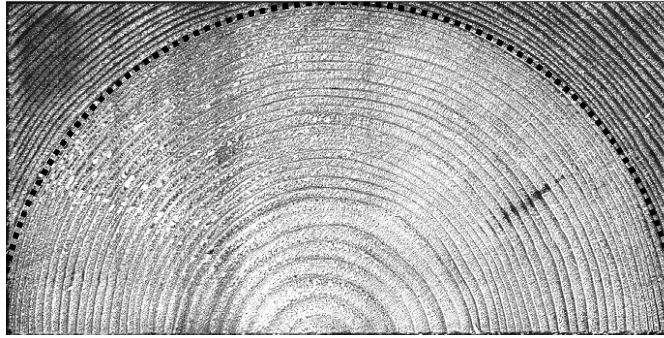
Selkeänä johtopäätöksenä voidaan esittää, että jos esihöyrytyksellä on kuivauksen aikana puun sisällä tapahtuvaan kosteuden siirtymiseen jonkinlaisia vaikutuksia, ne eivät ainakaan tule esille vielä tavanomaisissa kuivauslämpötiloissa. Sen sijaan värimuutokset puun pinnalla ovat selviä sokereiden tummuessa tuoreessa puussa 100 °C:n lämpötilassa jo 10 tuntia kestävä jakson aikana. Mitään selvää hyötyä tällaisesta esihöyrytyksestä ei voida katsoa suomalaiselle mäntysahatavaralle olevan sen enempää lämminilma- kuin kuumakuivaussessaan.

4 HÖYRYN KÄYTTÖ KUIVAUKSEN ALKULÄMMITYSVAIHEESSA

Ruotsalaisissa kokeellisissa tutkimuksissa (Morén 1994b) on havaittu kuivauksen alkulämmitysvaiheessa tapahtuvan puun pinnan niin sanotun mikrohalkeilun aiheuttavan jopa 50 % kaikista kuivauksen lopputilanteessa havaittavista halkeamista. Tämä merkitsee sitä, että jopa pääasiallinen kuivatusta sahatavarassa paljain silmin havaittavan halkeilun syntymekanismi kuivauksessa olisi jo olemassa olevien säröjen kasvu makroskooppiseksi halkeamiksi. Tällaiset halkeaman alut voivat syntyä joko juuri kuivauksen lämmitysvaiheessa tai jo ennen sitä sahatavaran joutuessa odottamaan kuivausta sahausksen jälkeen. Lämpimänä vuodenaikana jo vuorokauden pituinen varastointi riittää aiheuttamaan sydäntavaran välittömän pinnan kuivahtamisen alle puunsyiden kyllästymispisteen ja siten mahdollistamaan mikrohalkeilun alkamisen.

Puun kimmo- ja lujuusominaisuudet riippuvat voimakkaasti lämpötilasta siten, että kuivauslämpötilaa nostettaessa sahatavaran pinnalle syntyvä suhteellinen jännitys selvästi alentuu. Lämpötilan korottaminen parantaa lisäksi puun kosteudenjohtavuutta, jolloin puun pinnalle muodostuva kosteusgradientti jää korkeammassa lämpötilassa pienemmäksi. Myös kuivumisjännityksiä relaxoiva puun viruminen on korkeassa lämpötilassa olennaisesti voimakkaampaa. Kaikkien näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta etenkin halkeilua aiheuttava suhteellinen jännitys (jännityksen ja lujuuden suhde) kasvaa puun pinnassa kuivauksen ylösajovaiheessa helposti korkeaksi. Kaikin keinoin tulisi välttää puun pinnan kuivumista ennen varsinaisen kuivauslämpötilan saavuttamista.

Usein puhutaan kuivumisjännitysten ja -halkeilun yhteydessä siitä, että halkeilun kannalta vaarallinen kutistuminen alkaa, kun sahatavaran kosteus saavuttaa puunsyiden kyllästymispisteen (PSK). Käytettäessä kosteutena sahatavaran keskimääräistä kosteutta tämä on kuitenkin virheellinen ajattelutapa, sillä sydän- ja pintapuun rajapinnan sijainti sydänpuuvaltaisen sahatavaran poikkileikkauksessa on useimmiten kuvassa 1 esitetyn kaltainen. Pintalappeen keskiosa eli kohta, johon kuivumishalkeilu keskittyy, koostuu sydänpuusta, jonka alkukosteus tuoreessa puussa on tyypillisesti vain hieman yli PSK:n. Näin ollen kuivumiskutistuminen alkaa käytännöllisesti katsoen heti kuivauksen alettua, vaikka poikkileikkauksen keskimääräinen kosteus saattaa vielä olla esimerkiksi 60 %. Juuri tästä syystä myös ennen kuivausta tapahtuva esikuivuminen on erityisen haitallista jo lyhyinäkin ajanjaksoina.



Kuva 1. Sydänpuuvaltaisen tuoreen mäntysahatavaran poikkileikkaus. Kuivemman sydänpuun ja kosteamman pintapuun välinen raja (katkoviiva) on selvästi havaittavissa.

Tehokkain tapa välttää sahatavaran mikrohalkeilu kuivauksen ylösajovaiheessa on käyttää alkulämmityksessä runsaasti matalapaineista höyryä, jolloin kuivaamoon pystytään tuomaan tehokkaasti sekä lämpöenergiaa että kosteutta samanaikaisesti. Käyttämättä ulkopuolista kostutusta kuivausilman kosteus eli märkälämpötila kuivaamossa nousee vain puusta tulevasta kosteuden vaikutuksesta, mikä juuri merkitsee ei-toivottua puun pinnan kuivumista jo ennen varsinaisen kuivauslämpötilan saavuttamista. Perinteinen ratkaisu tähän ongelmaan on käyttää ilman kostuttamiseen vesisumutusta, mutta käytännössä sumutus ei koskaan ole tarkoitukseen riittävän tehokas. Sumutusta käytettäessä ongelmaksi muodostuu lisäksi lämpöpattereiden tehon riittämättömyys, koska tällöin myös ilman kostutukseen käytettävän veden höyrystämiseen kuluva energia on tuotettava lämpöpattereilla. Vesisumutusta käytettäessä kamarikuivauksen ylösajoon kuluukin talvisaikaan teollisessa mittakaavassa aikaa jopa toista vuorokautta, jos kuivan ja märän lämpötilan erotus pyritään pitämään maltillisena.

4.1 LABORATORIOKUIVAUSKOKEET ALKULÄMMITYSVAIHEESSA VALLITSEVAN KUIVAUSKAAVAN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMISEKSI

Mikrohalkeiluilmion merkittävyyden selvittämiseksi VTT Rakennustekniikan pienessä Vanicek-koekuivaamossa kuivattiin useita rinnakkaiserää sahatavaraa samalla kuivauskaavalla siten, että ainoastaan ylösajovaiheessa vallitsevaa kuivauskaavaa vaihdeltiin. Kokeita suoritettiin taulukon 2 mukaisesti usealla eri dimensiolla, sekä männyllä että kuusella. Kaikki käytetty sahatavara oli sydänpuuvaltaista tavaraa, joka oli hankittu suoraan sahalta välittömästi sahauksen jälkeen ja varastoitu ennen kuivausta umpipaketissa kosteassa ulkoilmassa (loka- helmikuu) pääasiassa alle 0 °C:n lämpötilassa mahdollisimman tiukasti muoviin käärittynä. Kuivaamon kostutukseen käytettiin ohjausautomaattiikkaan kytkettyä höyrytystä tarpeen mukaan siten, että ennalta määritely kuivauskaava toteutui myös alkulämmitysvaiheessa.

Taulukko 2. Mikrohalkeilun tutkimiseksi suoritettut sahatavaran laboratorikuivauskokeet.

Koe	Saha- tavara	Sahaus- asete	Alkuläm- mitysaika	Lämpötila- erotus	Loppu- kosteus	Kosteus- hajonta	Halkeilu %	Suht. jännitys
1a	ku50x125	2-exlog	10	6	15,8	0,7	12	110
1b	ku50x125	2-exlog	10	2	16,2	1,1	1	74
2a	mä38x150	4-exlog	10	8	17,3	2,2	35	134
2b	mä38x150	4-exlog	10	2	19,8	2,1	11	104
3a	ku50x125	2-exlog	18	5,5	16,7	1,3	2	84
3b	ku50x125	2-exlog	10	8	16,9	1,0	3	105
3c	ku50x125	2-exlog	5	2	17,1	0,9	4	65
4a	mä75x150	2-exlog	5	3	19,7	2,0	9	78
4b	mä75x150	2-exlog	10	5	18,1	1,5	19	97
4c	mä75x150	2-exlog	5	3	19,2	1,5	11	85

Kokeissa pyrittiin jäljittelemään tavanomaisen teollisuuden kamarikuivaamon ohjausautomaatiikan toimintaa siten, että ylösajovaiheessa vallitseva kuivan ja märän lämpötilan erotus pyrittiin pitämään kussakin kokeessa vakiona. Tämän niin sanotun erosäädön tarkoituksena on kuivaamossa rajoittaa lämpöpatterin tehoa, jotta kuivausvoima ei märkälämpötilan alhaisuuden vuoksi alkuvaiheessa kasvaisi hallitsemattomasti. Käytetyt kuivauskaavat on esitetty liitteessä 2. Kokeella 4c haluttiin selvittää, mikä merkitys rajulla kuivauskaavalla on halkeilulle, jos mikrohalkeilu onnistutaan alkulämmitysvaiheessa välttämään. Tulos osoittaa, että kuivauskaavan nopeuttaminen on hyvin mahdollista ilman, että halkeilu olennaisesti kasvaa, jos kuivuminen saadaan alusta lähtien kunnolla hallituksi. Höyryn kuivauskapasiteettia lisäävä vaikutus ei siis rajoitu yksinomaan alkulämmitysvaiheen lyhentymiseen, vaan myös varsinaisen kuivausvaiheen kestoa voidaan lyhentää.

Tulokset osoittavat, että ylösajovaiheessa vallitsevalla kuivauskaavalla selvästi on vaikutusta kuivauksen lopputilanteessa havaittavien halkeamien määrään. Jos tavaran halkeiluriski alunpitäen on suuri, varovaisella alulla saavutetaan olennaisesti pienempi halkeilu kuin rajulla. Jos sen sijaan halkeilutaipumus on vähäinen kuten (50 mm kuusella), alkulämmitysvaiheessa vallitsevan kuivauskaavan merkitys on pienempi. Tämä on havaittavissa verrattaessa samaa dimensiota olevia koesarjoja 1 ja 3, jotka ovat peräisin eri sahatavaraeristä. On kuitenkin huomattava, että yksittäisen lankun halkeilu on aina tietystä mielessä satunnaisilmiö, joten käytetyissä muutamana kymmenen kappaleen otoksissa esiintyy joka tapauksessa aina myös satunnaista vaihtelua.

Kokeissa käytetty kuivaamo on varustettu 12 kW:n höyrykehittimellä, joten käytettävissä oli sahatavaratilavuuteen nähden erittäin suuri höyryteho. Edellä todetun mukaisesti tätä tehoa ei kuitenkaan käytetty koko aikaa, vaan ainoastaan kuivauskaavan määrittelemän kustutustarpeen mukaisesti. Pienessä laboratorikuivaamossa sahatavaratilavuutta kohti käytetyn höyrytehon yleistäminen olennaisesti suurempaan teollisuusmittakaavaan kuiva-

vaamoon ei ole järkevää, koska pienessä mitassa itse kuivaamon lämpökapasiteetti on kuivattavan sahatavaran lämpökapasiteettiin nähden suhteetoman suuri.

4.2 YLÖSAJOVAIHEEN SIMULOINTI KAMARIKUIVAUKSEN SIMULOINTIOHJELMALLA

4.2.1 Mallin rakenne

Kuivauksen ylösajovaiheen toimintaa tutkittiin myös laskennallisesti käyttämällä hyväksi jo aikaisemmin VTT:llä kehitettyä sahatavaran kamarikuivauksen simulointiohjelmaa LAATUKAMARI. Ohjelman pohjana olevan matemaattisen mallin rakenne on tarkemmin kuvattu viitteessä Hukka (1996). Tätä tutkimusta varten ohjelmaan lisättiin erillinen osuus, joka jäljittelee kamarikuivaamon automatiikan erosäädön toimintaa ja ottaa huomioon jäätyneen puun sulattamiseen tarvittavan energian. Lähtötiedoiksi ohjelma tarvitsee sahatavaran ja kuivaamon muiden lähtötietojen lisäksi käytettävissä olevan höyrykattilan tehon ja kuivaamossa sijaitsevan lämpöpatterin ominaisuudet (mitoitusteho ja -lämpötila, syöttöveden lämpötila). Kuivaamon lämpövuotoihin kuluvan hukkatheon oletettiin olevan suuruudeltaan sama kuin kiertoilmapuhaltimien yhteenlaskettu teho, jolloin molemmat voitiin jättää huomiotta. Myöskään kuivaamorakennuksen lämmittämiseen kuluvaa energiaa ei ole laskelmissa huomioitu, koska Siimeksen (1983) mukaan tämän merkitys on vähäinen, etenkin kun rakennus käytännössä vain harvoin pääsee kokonaan jäähtymään.

Simuloinnissa kostean ilman ominaisuuksien kehittymiseen käytetty matemaattinen malli on lähemmin kuvattu lähteessä Hukka (1997). Olennaisia huomioon otettavia tekijöitä mallissa on tuoreen puun hyvin rajallinen kyky imeä sen pinnalle kondensoituvaa vettä, jolloin valtaosa tästä vedestä valuu kuivaamon lattialle. Tämän veden on simuloinnissa oletettu poistuvan kokonaisuudessaan lattiakaivon kautta.

Lämpöpattereiden antama teho on voimakkaasti riippuvainen niiden läpi virtaavan ilman lämpötilasta. Lisäksi asiaan vaikuttaa käytettävän syöttöveden lämpötila, jonka avulla patterista saatava suurin mahdollinen teho on varsin hyvällä tarkkuudella laskettavissa suoraan verrannollisena käytettävän syöttöveden ja patterin ohi virtaavan ilman lämpötilojen erotukseen

$$P_{\max}(T) = P_{\text{nominal}} \cdot \frac{T_{\text{water}} - T}{T_{\text{water}} - T_{\text{nominal}}} \quad (1)$$

jossa	P_{nominal}	on patterin nimellisteho
	T_{water}	on syöttöveden lämpötila
	T	on kuivauslämpötila ja
	T_{nominal}	on patterin mitoituslämpötila.

Mallille annetaan ensimmäinen kuivauskaavan piste, esim. 60/55 °C, jonka se yrittää saavuttaa seuraavan ohjauslogiikan mukaisesti:

1. Lasketaan halutun kuivauskaavan ylläpitämiseksi tarvittava patteri- ja kostutusteho.
2. Jos kostutusta tarvitaan enemmän kuin sitä voidaan tuottaa, alennetaan lämpötilaa ja pidetään kuivan ja märän lämpötilan erotus kaavan määräämässä arvossa, kunnes vaadittu kostutustarve voidaan tyydyttää.
3. Jos lämpöpatterin teho ei riitä, lasketaan lämpötilaa, mutta pidetään kuormiin puhallettavan ilman vesisisältö vakiona. Tarvittava lämpöteho alentuu, mutta vaadittava kostutusteho ei merkittävästi muutu.
4. Jos märkälämpötila on kaavan määräämää tavoitetta alempi eikä kaikki kostutuskapasiteetti vielä ole käytössä, käytetään sekä täyttä höyrytystä että täyttä lämmitystehoa.

Kuivan ja märän lämpötilan erotus saattaa esitetyn logiikan mukaisessa toiminnassa jäädä pienemmäksi kuin mitä kuivauskaava sallisi, mutta näin varmistetaan, että saadaan aikaan suurin mahdollinen annetuilla toimilaitteilla saavutettavissa oleva lämpiämisnopeus.

Odotettavissa olevaa halkeilun määrää simulointimallissa kuvataan niin sanotulla suhteellisella jännityksellä, joka on määritelty simuloidun jännityksen ja materiaalin lyhytaikaislujuuden suhteen siten, että mukana on lisäksi paksumman sahatavaran suuremman halkeilualttiuden huomioiva skaalaustekijä

$$\sigma_{rel} = \frac{\sigma}{f} \sqrt{\frac{d}{d_0}}, \quad (2)$$

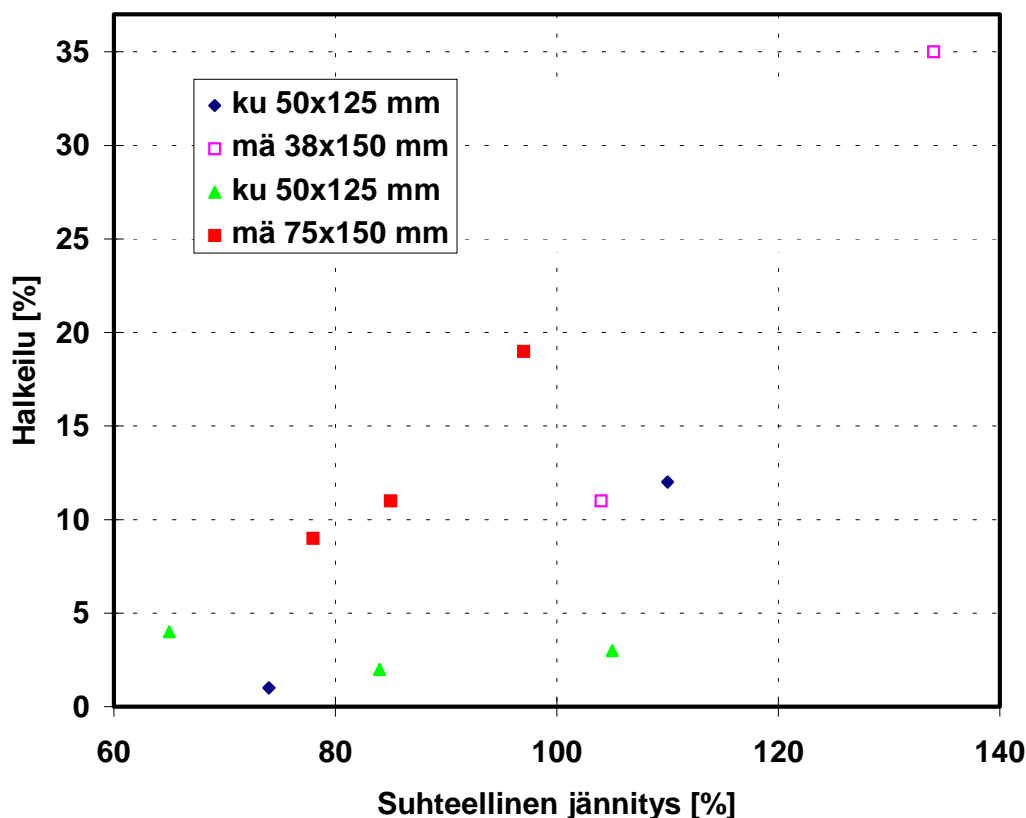
jossa	σ	on laskettu jännitys
	f	on lyhytaikaislujuus
	d	on sahatavaran paksuus ja
	d_0	on vakio.

LAATUKAMARIn aikaisemmissa versioissa suhteellisen jännityksen saavuttamaa suurinta arvoa on päädytty tarkastelemaan 3 mm:n syvyydellä sahatavaran pinnasta, koska tämän kohdan on havaittu tuottavan parhaan korrelaation teollismittakaavaisissa kokeissa havaitun halkeilupituuden kanssa. Tähän tulokseen johtanut aineisto käsittää yli 20 koekuivausta. Mikrohalkeiluilmion kannalta olisi ilmeisesti järkevämpää tarkastella puun välittömällä pinnalla vallitsevaa suhteellisen jännityksen arvoa, mutta tällaisen hypoteesin mukaan mikrohalkeilun välttäminen johtaa todellisuuden kanssa ristiriitaiseen mahdollisuuteen kuivata paksukin sahatavara täysin halkeamatta. Puun pinnalla vallitseva suhteellinen jännitys siis ilmeisesti kuvaa kyllä mikrohalkeilua, mutta sekä alkulämmitysvaiheessa että varsi-

naisessa kuivausvaiheessa tyydyttävästi toimivan halkeilukriteerin kehittäminen vaatii vielä selvää jatkotutkimusta.

4.2.2 Tulokset

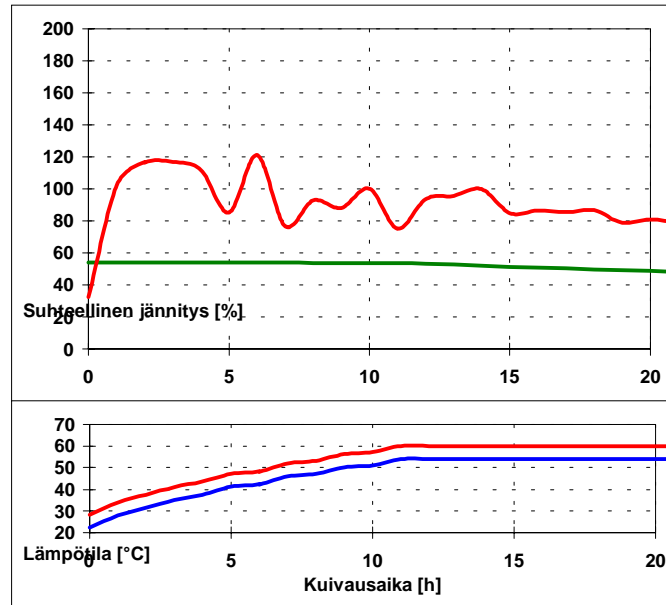
Kuvassa 2 on esitetty suoritettujen kuivauskokeiden simuloinnista saatava tulos, kun oletetaan halkeilun korreloivan sahatavaran pinnassa vallitsevan suhteellisen jännityksen suurimman arvon kanssa. Laboratoriokuivauksissa puhallussyvyydellä ei ole merkitystä. Simuloinnin lähtötietoina on käytetty toteutuneita mitattuja kuivauskaavoja ja puun ominaisuuksia. Kuvasta nähdään, että lukuun ottamatta jälkimmäistä 50 mm kuusen koesarjaa suhteellisen jännityksen ja sahatavaran pintalappeen halkeilupituuden välinen korrelaatio on varsin hyvä. Mainitulla koesarjalla ei merkittävää halkeilua syntynyt suurellakaan suhteellisen jännityksen arvolla. Hyvää selitystä ilmiölle ei ole löydetty.



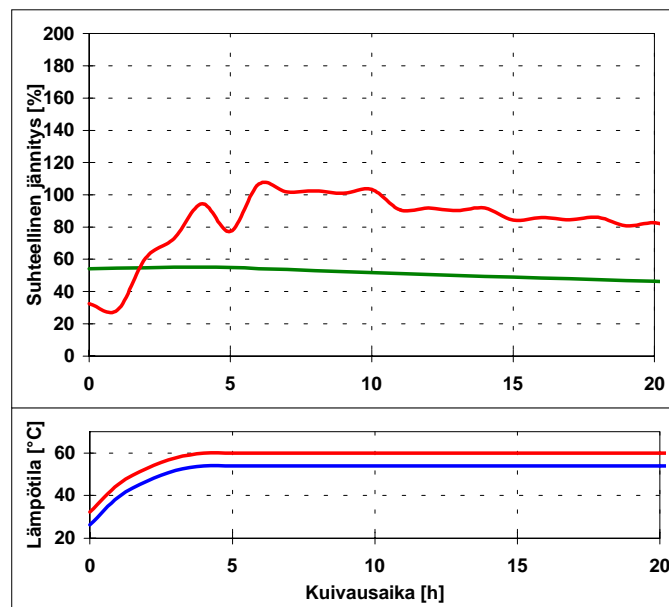
Kuva 2. Mikrohalkeilukokeiden simulointi LAATUKAMARI-simulointimalilla.

Kuvissa 3 - 4 on esitetty esimerkki simulointiohjelmalla lasketusta höyryn käytön vaikutuksesta 50 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla kesäolosuhteissa. Höyrykattilan teho on 500 kW ja vesisumutuksen tehoksi on laskettu 2 l/min. Sahatavaran on oletettu esikuivuneen kolme vuorokautta sahauksen jälkeen 80 %:n suhteellisessa kosteudessa olosuhteissa, joissa ilmavirtaus ei

edesauta kuivumista. Simulointituloksen mukaan alkulämmitykseen kuluvan ajan säästö höyryä käytettäessä on noin 70 %. Lisäksi puun pinnan halkeiluriskiä kuvaava suhteellinen jännitys alentuu noin 10 prosenttiyksikköä, mikä on odotettavissa olevan halkeilun kannalta jo merkittävä muutos.

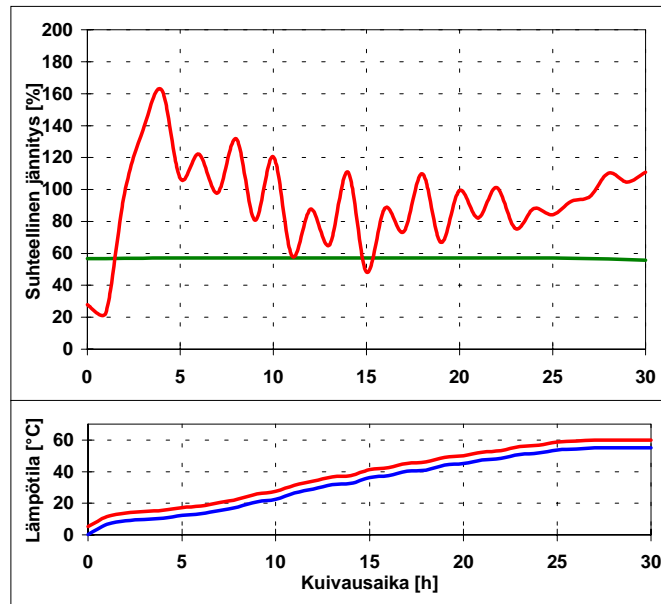


Kuva 3. Simuloitu alkulämmitys $50 \times 150 \text{ mm}^2$ mäntysahatavaralla. Vesi-sumutus, ulkoilman lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

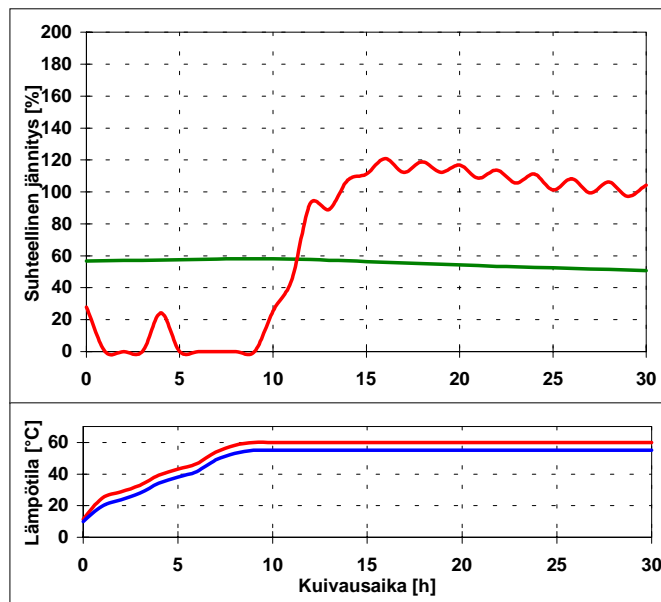


Kuva 4. Simuloitu alkulämmitys $50 \times 150 \text{ mm}^2$ mäntysahatavaralla. 500 kW höyrykattila, ulkoilman lämpötila $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Paksummalla 75x150 mm²:n mänyllä talviolosuhteissa laskettu vertailu kuvissa 5 - 6 osoittaa, että potentiaalinen halkeilun väheneminen paksulla sahatavaralla on vielä selvästi suurempi. Alkulämmitysvaiheeseen kuluvan ajan säästö on samaa luokkaa kuin edellisessä esimerkissä.



Kuva 5. Simuloitu alkulämmitys 75 x 150 mm² mäntysahatavaralla. Vesi-sumutus, ulkoilman lämpötila -20 °C.

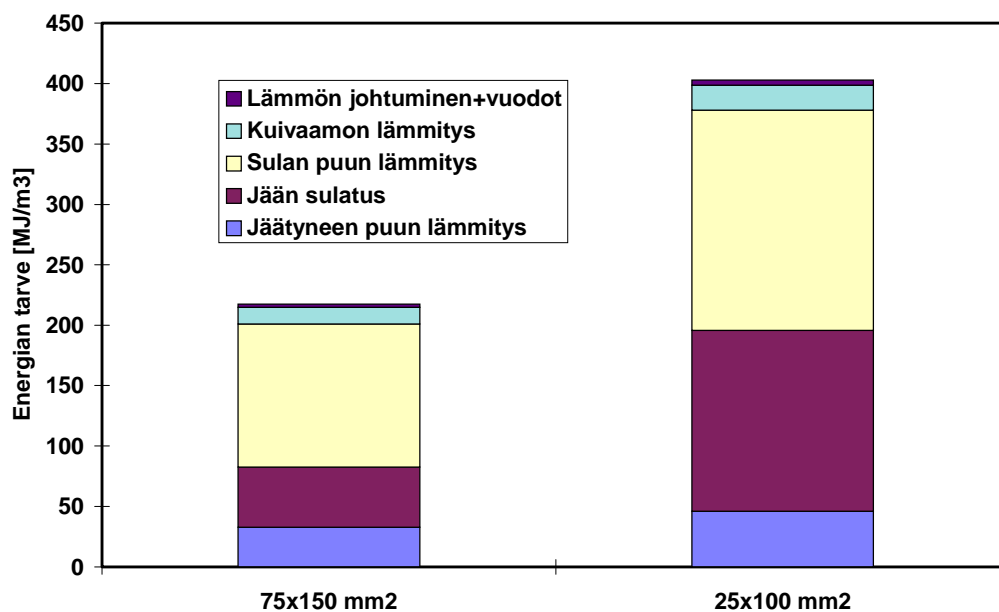


Kuva 6. Simuloitu alkulämmitys 75 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla. 500 kW höyrykattila, ulkoilman lämpötila -20 °C.

4.3 ALKULÄMMITYKSESSÄ TARVITTAVA HÖYRYTEHO

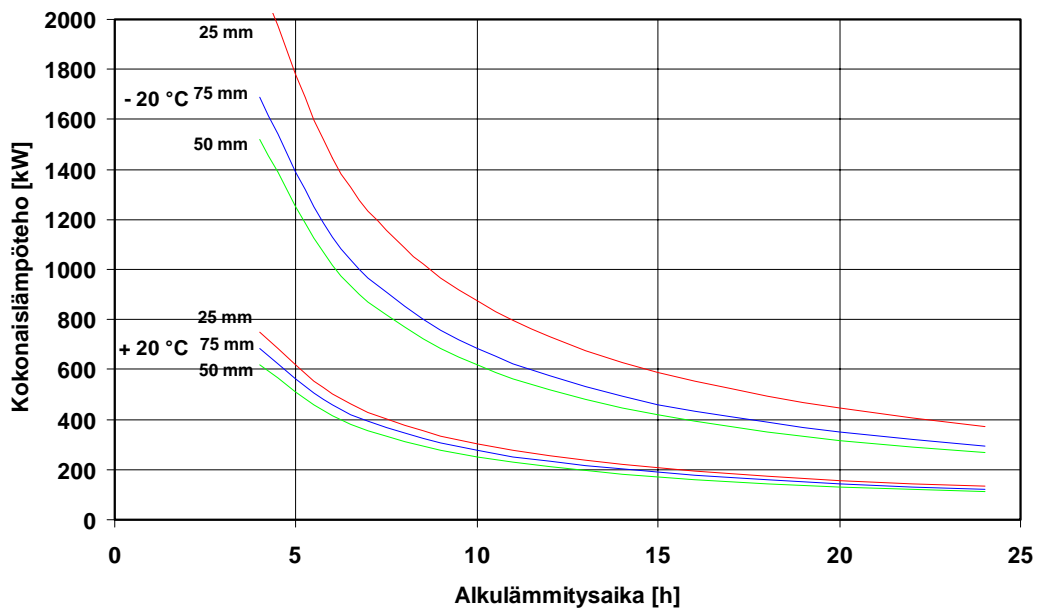
Edellä höyryn käytön fysikaalisten lähtökohtien yhteydessä esitetyn mukaisesti hyvin toimivassa ja asianmukaisesti eristetyssä kuivaamossa höyryä tarvitaan vain kuivauksen alkulämmitysvaiheessa. Tällöin kuivaamoon tuotava energia sitoutuu puuhun ja puussa olevaan veteen, minkä lisäksi pakkaskautena huomattava energia kuluu puun soluonteloissa jäätyneenä olevan vapaan veden sulattamiseen. Kuivaamorakennuksen lämmittämiseen kuluva energia on käytännössä vähäinen, koska kuivaamo vain harvoin pääsee kokonaan jäähtymään. Lämmön johtumisella ja muilla lämpövuodoilla on ylösajovaiheessa vain vähäinen merkitys, jos kuivaamo on asianmukaisesti tiivis.

Siimeksen (1983) esittämällä yksinkertaisilla energialaskelmilla voidaan selvittää, paljonko kuivauksen ylösajovaiheessa tarvitaan lämmitykseen kokonaistehoa erilaisissa tilanteissa. Tulos riippuu voimakkaasti puun alkulämpötilasta, jonka ulkona varastoidun puun osalta voidaan olettaa olevan likimain sama kuin viimeksi kuluneen vuorokauden ulkoilman keskilämpötila. Eri tekijöiden keskinäinen merkittävyys sahatavaran erilaisilla alkukosteuksilla käy ilmi kuvasta 7. Alkukosteutena 60 % on tyypillinen sydäntavaralle ja 120 % edustaa puhdasta pintalautaa. Kuusen alkukosteus on etenkin pintapuussa tyypillisesti hieman korkeampi kuin männyn, mutta vastaavasti sen kuiva-tuore-tiheys on alempi, eikä olennaista eroa näiden puulajien välillä näin ollen ole havaittavissa. Kuivaamon lämmitykseen ja vuotoihin kuluu ohuen laudan tapauksessa sahatavaratilavuutta kohti enemmän energiaa kuin paksua lankkua kuivattaessa, koska kuivaamon täyttöaste on alempi.



Kuva 7. Energian tarve kuivauksen ylösajovaiheessa, kun ulkolämpötila on -20 °C ja kuivauslämpötila on 60 °C.

Alkulämmitysvaiheessa tarvittavan kokonaistehon tarve riippuu ensisijaisesti siitä, kuinka nopeaksi kuivauksen ylösajo on tarkoitus saada; muilla tekijöillä on vaikutusta lähinnä lämpöpattereiden mitoittamiseen. Näin laskettu kokonaistehotarve 25 mm, 50 mm ja 75 mm sahatavaralle on esitetty kuvassa 8. Esimerkkikuivaamon nimellistilavuus on 100 m^3 . Kuvasta nähdään, että tehontarve talviaikana on yli kaksinkertainen kesäaikaan verrattuna ja että sahatavaradimension vaikutus on vuodenaikaa selvästi vähäisempi. Alkukosteudeltaan korkea lautatavara vaatii lämmitystehoa selvästi eniten, mutta tässä suhteessa samanlaiset 50 mm ja 75 mm:n tavarat olennaisesti yhtä paljon; ero johtuu lähinnä siitä, että kuivaamoon mahtuu 75 mm paksua tavaraa 12 % enemmän kuin 50 mm paksua tavaraa.



Kuva 8. Alkulämmitysvaiheessa nimellistilavuudeltaan 100 m^3 :n kuivaamossa tarvittava keskimääräinen kokonaislämpöteho alkulämmitysvaiheen käytettävän ajan funktiona.

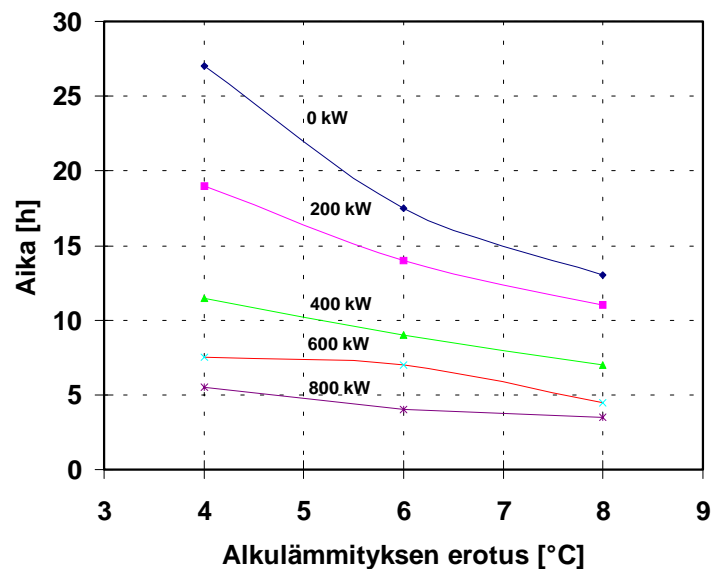
Lämpöpattereiden nimellisteho on lankkutavaralle suunnitellussa hyvässä kamarikuivaamossa tyypillisesti luokkaa 400 kW. Jos patteri on suunniteltu 65 °C :n lämpötilalle ja sen syöttöveden lämpötila on kuivauslämpötilasta riippumaton vakio 110 °C , alkulämmityksessä patterista saadaan kaavan (1) mukaisesti keskimäärin lähes 1 000 kW. Pelkkä lämpöpatterikin riittäisi siis siirtämään lämpöä kuivaamoon niin tehokkaasti, että kuvan 8 mukaisesti alkulämmitykseen kuluisi kovallakin pakkasella aikaa alle 10 tuntia. Ongelmana onkin kuivausilman kosteuden riittämättömyys, minkä vuoksi lämpöpattereiden tehoa joudutaan rajoittamaan.

Käyttämällä höyryä kuivausilman kosteus eli märkälämpötila saadaan alussa nousemaan nopeasti, jolloin myös lämpöpattereita voidaan käyttää suuremmalla teholla. Mitä enemmän höyrytehoa on käytettävissä, sitä enemmän

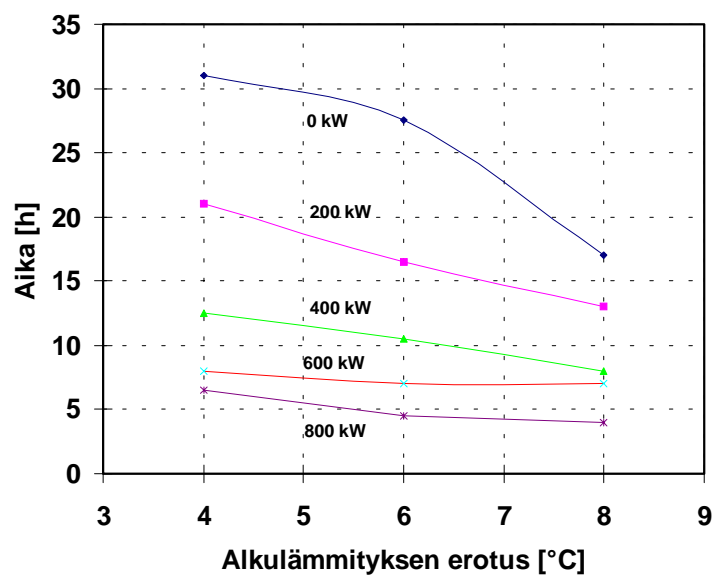
voidaan myös patteritehoa käyttää ja tarkasteltaessa alkulämmitykseen kuluvaa aikaa höyryn teho näin vielä korostuu.

Tarvittavan höyrytehon selvittämiseksi suoritettiin alkulämmitysvaiheen simulointiajot LAATUKAMARI-ohjelmalla erilaisilla höyrytehoilla (0, 200, 400, 600 ja 800 kW) ja kuivan ja märän lämpötilan erotuksilla (4, 6 ja 8 °C). Tavoitteena oli saavuttaa 60 °C:n kuivauslämpötila. Simuloinnin lähtökohdaksi otettiin tavanomainen, nimellistilavuudeltaan 100 m³:n kamari-kuivaamo, jonka lämpöpatterin teho on 65 °C:n mitoituslämpötilassa 400 kW. Kuivaamon puhallussyvyys oli 6 m ja ilman nopeus rimavälissä keskimäärin 3 m/s. Puhallussuuntaa vaihdettiin kahden tunnin välein. Alkulämmitysvaiheen simuloinnit suoritettiin ulkoilman lämpötilan suhteen ääritapauksessa (-20 °C:ssa), jolloin kaiken puun soluonteloissa olevan veden oletettiin olevan jäätyneenä. Simuloitavaksi sahatavaraksi valittiin halkeiluherkkä männyn tyvitukista 2-exlog -asetteella sahattu 50 x 150 mm² ja 75 x 150 mm² tavara.

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty käytettävän höyrykattilan tehon vaikutus alkulämmitysvaiheeseen kuluvaan aikaan käytettäessä erilaisia kuivan ja märän lämpötilan erotuksia.



Kuva 9. Alkulämmitysvaiheeseen kuluva aika eri höyrytehoilla ja alkulämmitysvaiheen lämpötilaerotuksilla 50 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla.

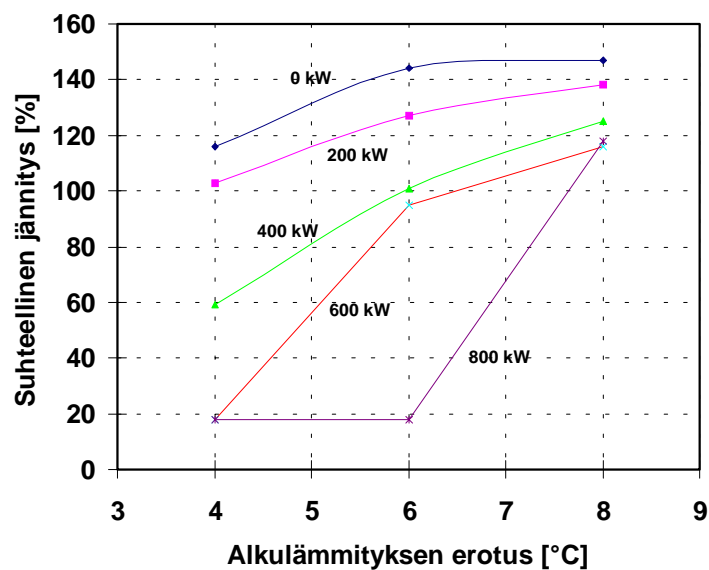


Kuva 10. Alkulämmitysvaiheeseen kuluva aika eri höyrytehoilla ja alku­lämmitysvaiheen lämpötilaerotuksilla 75 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla.

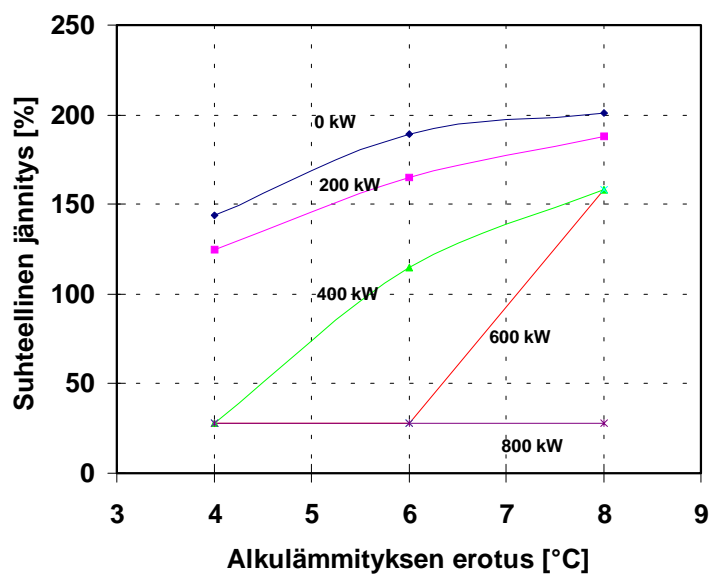
On kuitenkin selvää, että yksinomaan käytettävä lämpötilaerotus ei määrää syntyvää mikrohalkeilua, vaan asiaan vaikuttaa olennaisena tekijänä myös lämpötilan nousunopeus. Jos nimittäin märkälämpötila kohoaa niin nopeasti, että puun pinta on koko ajan kuivaamossa vallitsevaa kastepistettä kylmempi, ei kuivumista voi tapahtua suurellakaan kuivan ja märän lämpötilan erotuksella. Puun suuren lämpökapasiteetin vuoksi onkin siis virheellinen ajatus puhua kuivausvoimasta ja sen halkeilua aiheuttavasta vaikutuksesta, jos lämpötila ei tarkastelutilanteessa pysy vakiona. Kuivausvoima-käsitteen käyttö tulisikin rajoittaa isotermisiin tilanteisiin.

Paremmän tiedon puutteessa mikrohalkeilun synnystä voidaan olettaa, että puun välittömällä pinnalla vaikuttavan suhteellisen vetojännityksen saavuttama suurin arvo aiheuttaa halkeilun. Tämän hypoteesin mukainen tulos tarkastelluille dimensioille on esitetty kuvissa 11 ja 12. Kuten todettua, kuivauksen myöhemmissä vaiheissa virheellisen kuivauskaavan vuoksi syntyvän halkeilun simulointi on eri asia.

Johtopäätöksenä suoritetuista simulointiajoista voidaan esittää, että sydänpuuvaltaisen lankkutavaran kuivauksessa järkevä höyryteho on luokkaa 5 kW/m³. Pienemmillä tehoilla voidaan kyllä säästää alkulämmitysvaiheeseen kuluva aikaa, mutta halkeilun mahdollisimman suurta vähentymistä haettaessa kovin paljon alhaisempi teho ei riitä. Kuvan 7 mukaisesti tämä tulos ei ole herkkä puun alku­lämpötilalle, koska jäätyneen puun lämmitykseen kuluva energia on vain pieni osa alkulämmitysvaiheen kokonaisenergian tarpeesta.



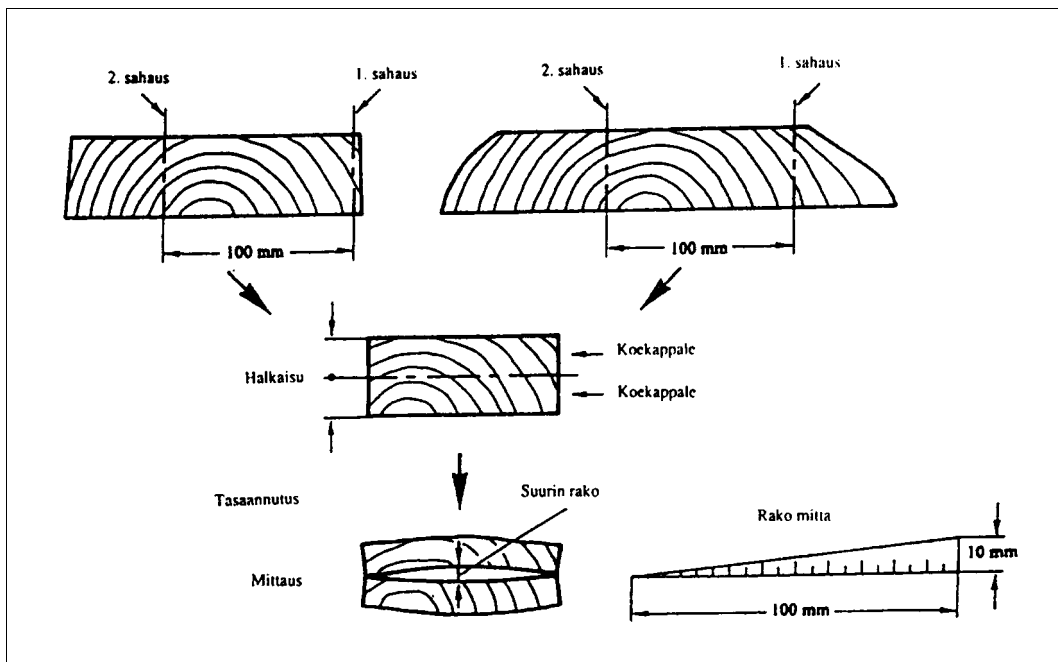
Kuva 11. Alkulämmitysvaiheessa sahatavaran pinnassa vaikuttavan suhteellisen jännityksen suurin arvo erilaisilla höyrytehoilla ja lämpötilaerotuksilla 50 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla.



Kuva 12. Alkulämmitysvaiheessa sahatavaran pinnassa vaikuttavan suhteellisen jännityksen suurin arvo erilaisilla höyrytehoilla ja lämpötilaerotuksilla 75 x 150 mm²:n mäntysahatavaralla.

5 HÖYRYN KÄYTTÖ LOPPUTASAANNUTUKSESSA

Välittömästi kuivauksen jälkeen sahatavarassa on normaalisti selvä kosteusgradientti, eli sen keskiosa on huomattavasti kosteampi kuin pinta, josta kuivuminen on tapahtunut. Tämän vuoksi sahatavaran poikkileikkauksessa vallitsee kuivaamosta otettaessa yleensä myös selvä jännitystila. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta poikkileikkauksen muoto pyrkii muuttumaan, kun sahatavara halkaistaan tai kun sitä höylätään. Muodonmuutostaipumusta voidaan tutkia kuvan 13 mukaisella halkaisukokeella, jossa kappaleen toisistaan irtileikattujen puoliskojen annetaan tasaantua ympäröivän ilman määräämään tasapainokosteuteen. Puoliskojen väliin näin syntyvä rako kuvaa sahatavaran muodonmuutostaipumusta eli sen soveltuvuutta jatkojalostukseen. Koemenettely on osa European Drying Groupin (EDG) suosituksia sahatavaran kuivauslaadun määrittämiseksi ja sitä ollaan valmistelemissa yleiseurooppalaiseksi kuivauslaatustandardiksi.

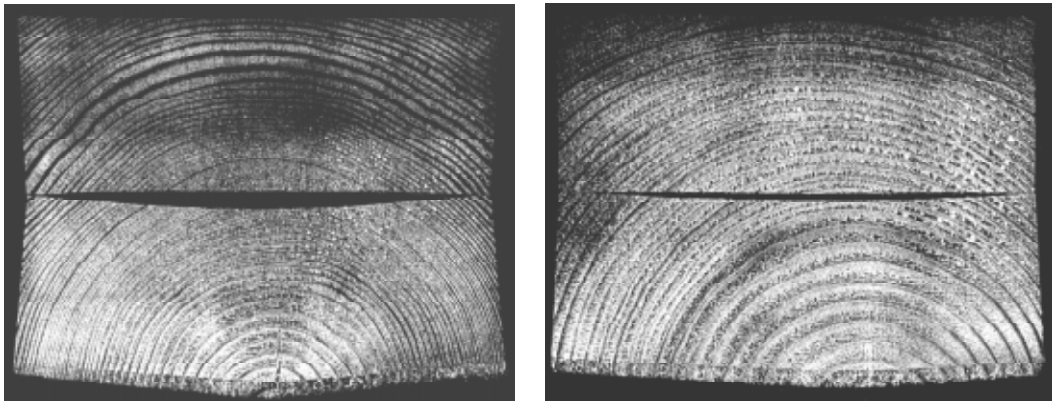


Kuva 13. European Drying Groupin (EDG) suositus menettelyksi sahatavaran muodonmuutostaipumuksen määrittämiseksi.

Kuvatun muodonmuutosilmiön kohdalla puhutaan usein yksinomaan kuivumisjännityksistä, jotka sahatavarassa ovat jäljellä kuivauksen päätyttyä. Näiden jäännösjännitysten vapautuminen ilmenee kuitenkin vain välittömänä halkaisun jälkeisenä muodonmuutoksena, joka kokeiden mukaan on kosteusgradientin tasaantumisen aiheuttamaan hitaampaan muodonmuu-

tokseen verrattuna hyvin vähäinen. Samaan tulokseen päästään tarkastelemalla asiaa laskennallisesti: hyvin tavanomaisen 10 prosenttiyksikön kosteuseron tasaantuminen 25 mm paksun puun pintojen välillä riittää aiheuttamaan niiden välille 100 mm leveässä kappaleessa 2,7 mm:n pituuseron. Tämä vastaa 2,6 mm:n rakoa kahden vastakkain asetetun palan välillä, mikä on hyvin tyypillinen 50 mm paksun sahatavaran halkaisukokeessa saatava tulos. Jo pelkkä kosteusgradientti riittää siis aiheuttamaan muodonmuutoksen, joka on suuruudeltaan samaa luokkaa kuin halkaisukokeessa havaittava tulos.

Sekä sahatavaran kuivumisjännitykset että sen kosteusgradientti voidaan poistaa kuivauksen loppuvaiheessa tai sen jälkeen tapahtuvalla tasaannutuksella. Edellä esitetyn perusteella käytännön merkitystä on lähinnä kosteusgradientin poistamisella, mikä jo huoneenlämpötilassa on hyvin hidasta ja kylmemmässä ulkoilmassa vie kuukausia. Lopputasaannutuksen ajatuksena on kostuttaa puun pintaa samalla, kun sen keskiosa vielä jatkaa kuivumistaan. Puun keskimääräinen kosteus kasvaa prosessissa 1 - 2 prosenttiyksikköä, joten puu on kuivattava sen verran tavoitekosteutta kuivemmaksi ennen tasaannutusvaihetta. Tyypillinen tasaannutuksen avulla saatava tulos on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Tyypillinen loppuhöyrytyksellä saatava tulos. Vasemmalla halkaisumuodonmuutos heti kuivauksen päätyttyä, oikealla höyryllä suoritettun lopputasaannutuksen jälkeen.

Aikaisemmin tehtyjen tutkimusten mukaan erityisesti kuivumisjännitysten poistaminen on tehtävä korkeassa lämpötilassa (Ranta-Maunus ym. 1995), koska esimerkiksi 20 °C lämpötilassa jännitykset eivät ainakaan vielä kaksi kuukautta kestäneiden kokeiden mukaan vapaudu, vaikka kosteusgradientti lähes kokonaan poistuisikin. Ilmeisesti tällä ei siis kuitenkaan ole käytännön jatkojalostuksessa syntyvien muodonmuutosten kannalta niin suurta merkitystä kuin aikaisemmin on ajateltu, vaan korkean lämpötilan merkitys on pääasiassa tasaantumisen nopeutumisessa.

5.1 LOPPUTASAANNUTUKSEN SUORITUS: TEOREETTINEN TARKASTELU

Lopputasannutuksessa puun on imettävä itseensä vettä, jotta sen pinnan kosteus voisi kasvaa. Suomalaisen havupuun solujen väliset huokokset ovat kuivauksen seurauksena kuitenkin poikkeuksetta niin tiiviisti sulkeutuneet, että puun kosteudenjohtavuus on tuoreeseen puuhun verrattuna jo varsin huono. Tämä merkitsee sitä, että puun tasaantuminen ympäröivän ilman määräämään tasapainokosteuteen tapahtuu hyvin hitaasti, ja niinpä tällainen puun hygroskooppisuuden pohjautuva tasaantumisprosessi kestää sahatavaradimensioilla tyypillisessä kuivauslämpötilassakin useita kymmeniä tunteja. Tässä suhteessa kaikkein epäedullisin tilanne vallitsee kuusen sydänpuussa, jonka huokosten aspiroituminen on voimakkainta.

Puun huonosta kosteudenjohtavuudesta johtuva heikko tasaantumiskyky voidaan kiertää kondensoimalla vettä nestemäiseksi kerrokseksi puun pinnalle. Tällöin puun välittömän pinnan läheisyyteen saadaan aikaan olennaisesti voimakkaampi kosteusgradientti kuin ilman veden tiivistymistä olisi mahdollista, minkä lisäksi etenkin paksuilla dimensioilla muodostuu myös suuri lämpötilagradientti. Nämä molemmat aiheuttavat voimakkaan kosteuden tunkeutumisen puun pinnalta sen sisäosiin ja nopeuttavat näin tasaantumista olennaisesti.

Jotta ilmassa oleva kosteus voisi tiivistyä puun pinnalle, puun on oltava ympäristössään vallitsevaa kastepistelämpötilaa kylmempi. (Tässä yhteydessä tarkasteltuna kastepistelämpötilan arvo on olennaisesti sama kuin märkälämpötilan arvo, vaikkakin käsitteellisellä tasolla näillä asioilla on olennainen periaatteellinen ero.) Tiivistyessään puuhun vesi kuitenkin luovuttaa sille höyrystymislämpöään vastaavan lämpömäärän aivan samoin kuin kuivauksen alkulämmitysvaiheessa, joten tasaannutuksessa puu myös lämpenee nopeasti. Jotta puun lämpötilaero kastepisteeseen säilyisi koko ajan riittävän suurena, on kastepiste saatava nousemaan mahdollisimman nopeasti. Tämä vaatii käytettävältä laitteistolta niin suurta kostutuskykyä, että käytännössä sitä ei ole mahdollista saavuttaa ilman runsaan matalapaineisen höyryn käyttöä.

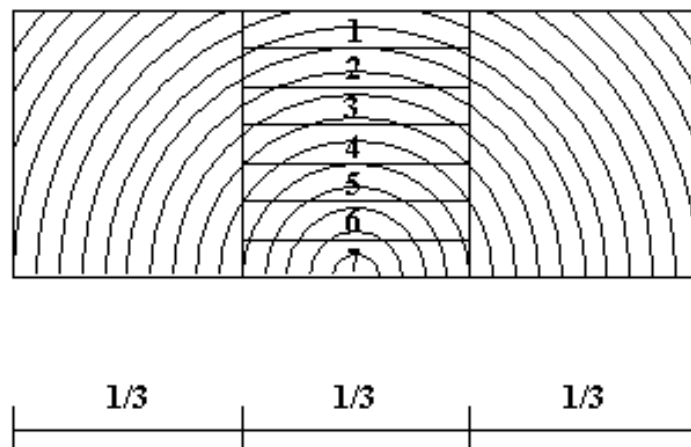
Edellä olevan perusteella tehokkaan loppuhöyrytyksen toteuttamiselle on näin ollen kaksi vaihtoehtoa:

1. Tasaannutus tapahtuu varsinaisessa kuivaamossa kuivauskaavan välittömänä jatkona siten, että kuivaamon märkälämpötila nostetaan nopeasti olennaisesti varsinaisen kuivausvaiheen lopussa vallitsevaa lämpötilaa korkeammaksi.
2. Tasaannutus toteutetaan erillisenä vaiheena sen jälkeen, kun sahatavara on jäähtynyt kuivauksen jälkeen. Tällöin sahatavaraa ei tarvitse välttämättä lämmittää tavanomaista kuivauslämpötilaa lämpimämmäksi, vaikkakin tasaantuminen on sitä tehokkaampaa, mitä enemmän puu sen aikana lämpenee.

Itse kuivaamossa välittömästi kuivauskaavan jatkona toteutettava loppuhöyrytys edellyttää sitä, että kuivaamon rakenne ja sen toimilaitteet kestävät 100 °C:n lämpötilan ja lähes kylläisen höyryn. Tavanmukaisesti laitteet on kuitenkin mitoitettu vain 80 °C:n lämpötilaa varten, eikä niiden vaihtaminen tasaannutustarkoitusta varten ole kannattavaa. Hyvin kuumen, kylläisen höyryn kohdalla ongelmia syntyy tavanomaisessa kuivaamossa myös rakennuksen riittämättömän tiiviyyden takia. Erillinen tasaannutuskammio on selvästi helpompi suunnitella alusta alkaen siten, että se kestää tarvittavat olosuhteet. Myös taloudellisesti tällainen toimintatapa on ilmeisesti järkevämpi kuin kuivaamoiden korjaustoimilla saavutettava suurimman sallitun lämpötilan korotus.

5.2 LOPPUHÖYRYTYKSEN KOKEELLINEN TUTKIMUS

Loppuhöyrytystutkimuksen kokeellisessa osassa käytettiin materiaalina mahdollisimman hiljattain teollisuudessa kuivattua sahatavaraa, jonka kosteus oli pääasiassa 16-18 %. Höyrytykset suoritettiin VTT:n pienellä Vanicek-koekuivaamolla, joka on varustettu 12 kW:n höyrykehittimellä. Päätvaikutusten eliminoimiseksi koekappaleiden päät suojattiin ennen kokeita polyuretaanimassalla ("Sikaflex"). Keskimääräisen kosteuden ja kosteushajonnan muutokset määritettiin punnitsemalla koekappaleet ennen ja jälkeen höyrytyksen, koska punnitus-kuivausmenetelmällä saatavat tulokset ovat sahatavaran sisäisen kosteusvaihtelun vuoksi tähän tarkoitukseen liian epätarkkoja. Gradientti määritettiin punnitus-kuivausmenetelmällä kuvan 15 mukaista viipalointimenettelyä käyttäen. Otettavien palojen lukumäärä vaihtelee sahatavaran paksuuden mukaan siten, että yhden viipaleen paksuus on 6 - 9 mm.



Kuva 15. Gradienttipalojen viipalointi sahatavaran poikkileikkauksesta.

5.2.1 Kuusisahatavara, ensimmäinen koesarja

Eri toimintatapojen vaikutusta sahatavaran loppuhöyrytyksessä tutkittiin höyryttämällä $50 \times 125 \text{ mm}^2$:n kuusisahatavaraa neljän tunnin ajan erilaisilla menetelmillä ja vertaamalla tulosta höyryttämättömään lähtötilaan. Koetavara oli teollisuuden normaalissa tuotannossa kuivattua sahatavaraa.

Eri kokeissa käytettiin samasta lankusta sahattuja rinnakkaiskoekappaleita siten, että kussakin erässä oli yhtä paljon lankun tyvipäästä, keskiosasta ja latvapäästä otettuja kappaleita. Koekappaleista mitattiin vallitsevat kuivumisjännitykset kuvan 13 mukaisilla EDG-paloilla sekä kosteusgradientti ja keskimääräisen kosteuden muutos. Erilaisia höyrytystapoja oli kolme:

1. Lämpötilan nosto neljässä tunnissa arvoon $100 \text{ }^\circ\text{C}$, minkä jälkeen puut otettiin välittömästi kuumina huonetilaan.
2. Lämpötilan nosto neljässä tunnissa arvoon $100 \text{ }^\circ\text{C}$, minkä jälkeen sahatavara sai jäähtyä kuivaamossa.
3. Lämpötilan nosto kahdessa tunnissa arvoon $70 \text{ }^\circ\text{C}$, minkä jälkeen 2 tuntia tässä lämpötilassa. Jäähdytys suljetussa kuivaamossa.

Kaikissa kokeissa höyrytys suoritettiin siten, että kuormiin puhallettavassa ilmassa vallitseva kuivan ja märän lämpötilan erotus oli vakio $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Puiden alkulämpötila oli noin $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Osa puista oli kuivattu juuri ennen höyrytystä ja osa jo edellisellä viikolla. Molempien ryhmien puiden keskimääräinen kosteus välittömästi kuivauksen jälkeen oli 16% . Kappaleet oli kuitenkin varastoitu huonetilassa, joten aiemmin kuivattu ryhmä oli kuivunut ennen höyrytystä noin 2 prosentti-yksikköä lisää. Koekappaleita oli aiemmin kuivatusta erästä 6 kpl/höyrytys ja jälkimmäisestä erästä 10 kpl/höyrytys.

Eri höyrytysten yksityiskohtaiset vaikutukset kuivauksen laatuun käyvät ilmi taulukosta 3. Kaikki kokeillut höyrytykset vähensivät sekä kosteusgradienttia että jännityspaloista mitattua rakoa höyryttämättömään lähtötilanteeseen verrattuna selvästi. Kosteusgradientti vähentyi kaikissa kokeissa olennaisesti yhtä paljon, kun otetaan huomioon se, että kokeet tehtiin peräkkäin ja että myöhemmissä kokeissa käytetty sahatavara oli näin saanut tasaantua huonetilassa hieman pidempään.

Sahatavaran muodonmuutostaipumus tasaantui huonoimmin ensimmäisessä kokeessa, mutta ero muihin kokeisiin ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Kahden jälkimmäisen kokeen välillä ei ollut havaittavissa eroa, kuten ei ollut myöskään eri aikoina kuivattujen ryhmien välillä. Sahatavaran pinnan väri ei tehdyissä kokeissa muuttunut, mutta pinnan halkeilu lisääntyi ensimmäisessä kokeessa selvästi.

Taulukko 3. Höyrytyksessä käytettävän toimintatavan vaikutus keskimääräiseen kosteusgradienttiin ja kuivumisjännityksiin 50 x 125 mm:n kuusisahatavaralla.

Höyrytyksen suoritus	Kosteusgradientti		Jännityspalat	
	Höyrytys heti	Höyrytys 10 vrk jälk.	Höyrytys heti	Höyrytys 10 vrk jälk.
Alkutila	6.6	3.7	3.5	2.9
4 h ==> 100 °C, kuumana ulos	3.9	3.2	1.5	1.3
4 h ==> 100 °C, jäähdytys kuivaamossa	4	3.6	1.2	0.9
2 h ==> 70 °C, jossa 2 h, jäähdytys kuivaamossa	3.2	2.5	1.2	0.9

Voidaan päätellä, että suoritettu neljän tunnin höyrytys on 50 mm:n kuusisahatavaralle riittävä, jos kosteusgradientille ja muodonmuutos-
taipumukselle ei aseteta kovin suuria vaatimuksia. Höyrytyksessä ei ole
tarpeen käyttää 70 °C:ta korkeampia lämpötiloja, jos tavara on prosessin
alkaessa kylmää. Höyrytyksen jälkeen sahatavaran on annettava jäähtyä
kuivaamossa. Sekä kosteusgradientin että muodonmuutostaipumuksen
osalta tehtyjen kokeiden tuloksena saatu sahatavara täyttää EDG-suositusten
Q-luokan (quality-dried) vaatimukset. On kuitenkin huomattava, että tulos
koskee vain yhdellä tietyllä kuivauskaavalla kuivattua sahatavaraa.

5.2.2 Kuusisahatavara, toinen koesarja

Ensimmäisen koesarjan tulosten vahvistamiseksi höyrytettiin VTT:n
pienellä koekuivaamolla kolmea erilaista kuusisahatavaraa kolmella erilai-
sella kaavalla. Kokeissa käytettiin äskettäin vientikuivattua 38 x 200 mm²,
50 x 150 mm² ja 63 x 175 mm²:n sahatavaraa, jota ennen kokeita säilytettiin
viileässä (noin +5 °C) ja hyvin kosteassa ulkoilmassa. Erilaiset höyrytys-
kaavat olivat seuraavat:

- Lämpötilan nosto kolmessa tunnissa arvoon 70 °C siten, että kuivan ja
märän lämpötilan erotus oli 2 °C.
- Lämpötilan nosto kuudessa tunnissa arvoon 70 °C siten, että kuivan ja
märän lämpötilan erotus oli 2 °C.
- Lämpötilan nosto tunnissa arvoon 70 °C käyttäen kuivaamon täyttä
höyrytehoa (12 kW). Tätä lämpötilaa pidettiin tunti siten, että kuivan ja
märän lämpötilan erotus oli 2 °C.

Kaikkien kokeiden jälkeen suoritettiin jäähdytys suljetussa kuivaamossa,
jolloin lämpötila laski hitaasti lähelle huoneenlämpötilaa Alkutilassa puu oli
viileää (noin + 10 °C). Eri kokeiden yksityiskohtaiset tulokset käyvät ilmi
taulukosta 4. Mitatut ilman ja puun lämpötilat on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 4. Toisen kuusikoesarjan loppuhöyrytyskokeet.

Dimensio ja käsittely	Kosteus- muutos	Kosteus- hajonta	Gradientti	Jännitys- pala	Jännitysten EDG-LUOKKA
Kuusi 38x200 mm					
Alkutila (14.8 %)	-	0.5	3.4	2.9	hylky
Koe 5: 3h ==> 70 °C	0.6%	0.9	1.3	0.3	Q
Koe 6: 6h ==> 70 °C	0.5%	0.9	2.2	0.8	Q
Koe 7: 1h ==> 70 °C	1.4%	0.5	0.2	-0.2	Q
Kuusi 50x150 mm					
Alkutila (17.2 %)	-	1.4	6.6	2.8	hylky
Koe 5: 3h ==> 70 °C	0.3%	1.0	3.8	0.7	Q
Koe 6: 6h ==> 70 °C	0.3%	1.1	4.2	1.1	S
Koe 7: 1h ==> 70 °C	1.5%	1.1	1.9	0.5	E
Kuusi 63x175 mm					
Alkutila (18.8 %)	-	0.7	7.5	2.8	hylky
Koe 5: 3h ==> 70 °C	0.7%	0.8	4.0	0.8	Q
Koe 6: 6h ==> 70 °C	0.6%	0.8	3.6	1.3	Q
Koe 7: 1h ==> 70 °C	1.6%	1.1	2.0	0.9	Q

Johtopäätös koesarjasta on se, että tehokkain höyrytys aikaansaadaan mahdollisimman nopealla lämpötilan nostolla. Se, että sahatavara ei muodonmuutostaipumuksen suhteen tehokkaimmankaan höyrytyksen jälkeen välttämättä täytä EDG-luokituksen parhaan luokan (E=exclusive) vaatimuksia, kuvaa luokituksen vaativuutta: 90 %:n tutkituista kappaleista on täytettävä ao. luokan vaatimus (rako korkeintaan 1 mm). On kuitenkin huomattava, että tässä suhteessa kokeissa käytetty kymmenen rinnakkaiskoe-kappaleen sarja on huomattavan suppea.

5.2.3 Mäntysahatavara

Mäntysahatavaralla loppuhöyrytystä tutkittiin dimensioilla 32 x 125 mm², 44 x 150 mm², 50 x 100 mm², 75 x 225 mm² ja 75 x 150 mm². Tavoitteena oli kuusella suoritettuihin kokeisiin perustuen selvittää, onko vastaavanlainen mahdollisimman nopea höyrytys paras mahdollinen toimintatapa myös mäntysahatavaran kosteusgradientin poistamiseksi. Kokeita suoritettiin kullakin dimensiolla kolme kappaletta lukuun ottamatta viimeksi mainittua, jolla tehtiin vain yksi koe. Kokeissa käytettiin jälleen samoista sahatavarakappaleista otettuja rinnakkaiskoe-kappaleita. Suoritetut kokeet ja niiden tulokset on yksityiskohtaisesti esitetty taulukossa 5. Termoelementeillä mitatut kostean ilman olosuhteet ja puun lämpötilat on esitetty liitteessä 3. Sahatavaran kosteushajonnasta ja -gradientista ennen kokeita nähdään, että tavara on ollut sahalla varastossa jonkin aikaa kuivauksen jälkeen lukuun ottamatta viimeistä koetta, jonka tavara oli kuivattu laboratoriossa juuri ennen kokeen suoritusta.

Taulukko 5. Mäntysahatavaralla suoritettut loppuhöyrytyskokeet.

Sahatavara ja höyrytys	Kosteusmuutos	Kosteusgradientti	Jännityspala	Jännitysten EDG-LUOKKA	Kosteushajonta
Mänty 32x125 mm					
Alkutila (15,6 %)	-	1.7	2.6	hylky	1.0
Koe 8: 1 h ==> 70 °C, 1 h, ulos	2.3	-0.7	-1.5	Q	0.7
Koe 10: 1 h ==> 70 °C, 1h	2.3	0.2	-1.7	S	0.6
Koe 12: 3 h ==> 70 °C	0.8	1.0	-1.4	hylky	1.2
Mänty 44x150 mm					
Alkutila (15,9 %)	-	3.3	2.7	hylky	1.0
Koe 8: 1 h ==> 70 °C, 1 h, ulos	1.9	1.4	0.3	S	1.0
Koe 10: 1 h ==> 70 °C, 1h	2.0	1.7	-0.8	Q	1.1
Koe 12: 3 h ==> 70 °C	1.5	0.9	0.5	Q	0.7
Mänty 50x100 mm					
Alkutila (11,7 %)	-	1.2	2.1	S	0.8
Koe 8: 1 h ==> 70 °C, 1 h, ulos	2.2	-3.7	-0.3	E	0.5
Koe 10: 1 h ==> 70 °C, 1h	2.7	-2.2	-1.2	S	0.5
Koe 12: 3 h ==> 70 °C	1.5	-1.6	-0.9	Q	0.7
Mänty 75x225 mm					
Alkutila (18,7 %)	-	7.7	2.3	S	0.8
Koe 9: 1h==> 70 °C, 2 h	1.4	6.3	1.0	Q	0.8
Koe 11: 2 h==> 70 °C, 2h	0.9	5.0	-0.1	Q	1.3
Koe 13: 2 h==> 70 °C, 2h	1.2	5.7	0.8	Q	0.6
Mänty 75x150 mm					
Alkutila (19,2 %)	-	11.3	2.7	hylky	1.5
Koe 14: 2h ==> 95 °C	0.9	8.8	1.5	S	1.2

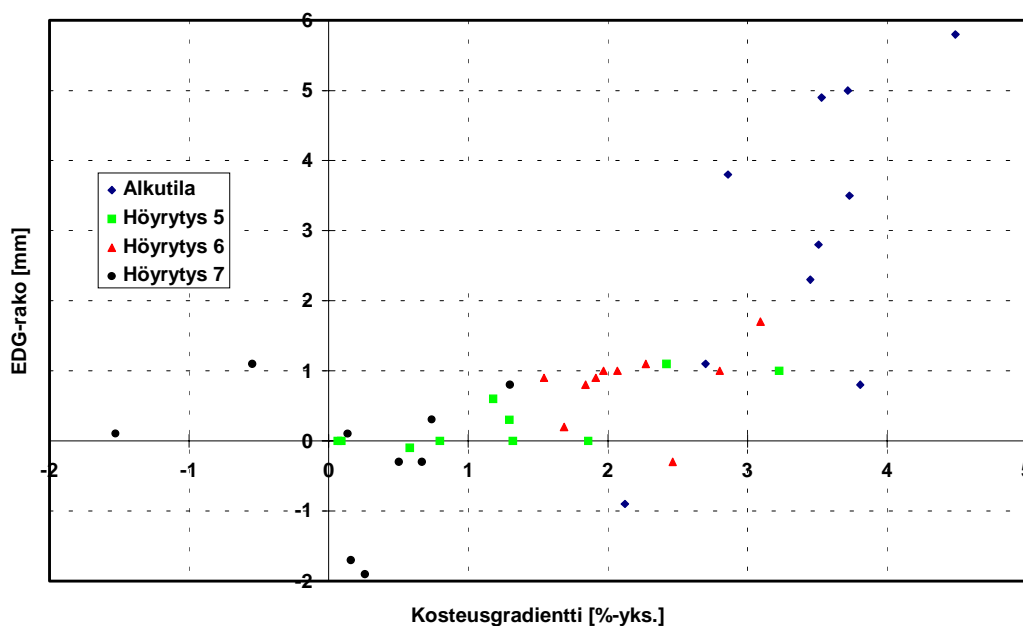
Johtopäätöksenä tehdyistä kokeista voidaan esittää, että nimenomaan nopein mahdollinen höyrytys on myös mäntysahatavaran lopputasaannutuksessa kaikkein tehokkain. Sahatavaran keskimääräinen kosteus kasvaa jopa lähes 3 prosentti-yksikköä, jos sahatavara on puusepätkuivattua, mutta tällöin tasaantuminen on jo selvästi liiankin tehokasta eli tuloksena on negatiivinen kosteusgradientti. Etenkin paksudeltaan 75 mm:n sahatavaran kohdalla EDG-paloilla mitattu muodonmuutostaipumus lähestyy nolaa jo selvästi ennen kuin kosteusgradientti on poistunut. Kokeen 14 muita 75 mm:n tavaran kokeita huonommalle tulokselle ei ole löydetty tyydyttävää selitystä.

Suoritetuissa kokeissa käytetty ilman nopeus oli noin 3 m/s lukuun ottamatta koetta 11, jossa nopeus oli vain 1,5 m/s ja jonka suoritus oli muutoin sama kuin kokeessa 13. Näiden vertailusta nähdään, että suuremmalla ilman nopeudella saavutetaan suurempi keskimääräisen kosteuden kasvu, mutta siitä huolimatta keskimääräinen kosteusgradientti ja poikkeileikkauksen muodonmuutostaipumus jäävät huonommiksi kuin käytettäessä alhaista ilman nopeutta. Parillista T-testiä käyttämällä voidaan kuitenkin todeta, että tilastollisesti merkitsevä ero vallitsee vain keskimääräisen

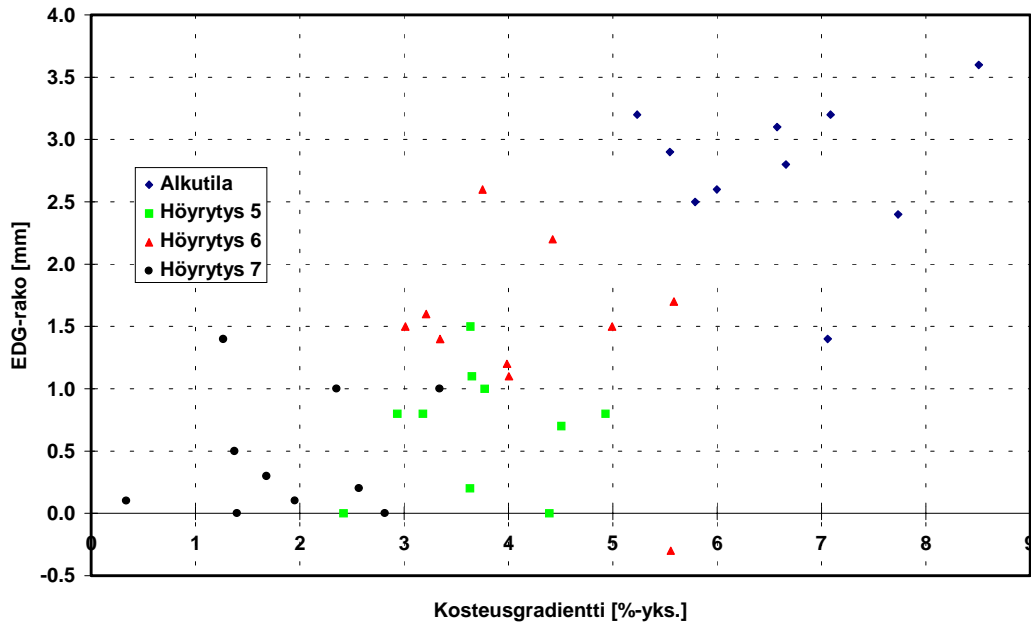
kosteusmuutoksen kohdalla. Höyrytyksessä käytettävällä ilmannopeudella on siis vähäinen vaikutus keskimääräiseen kosteusmuutokseen, mutta gradientin ja muodonmuutostaipumuksen suhteen merkitsevää eroa ei voida tehtyjen kokeiden perusteella havaita. Ilman nopeus ei siis ainakaan yhden lankun tasaantumisen kohdalla ole tärkeä muuttuja, mutta puhallussyvyyden kasvaessa tilanteen voidaan odottaa tässä suhteessa muuttuvan.

5.2.4 Muodonmuutostaipumuksen ja kosteusgradientin välinen yhteys

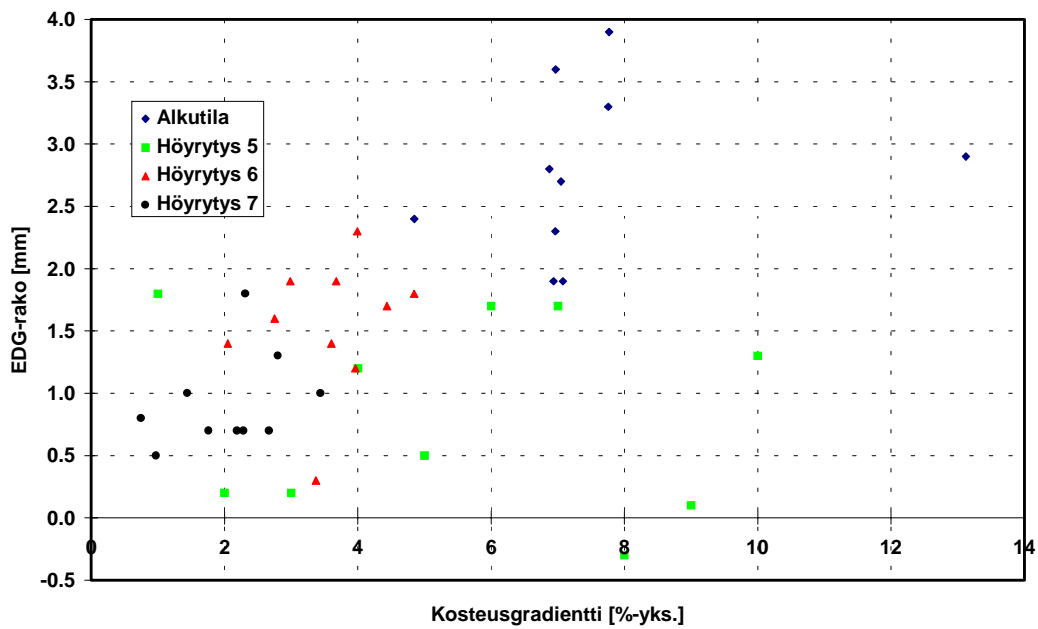
Suoritettujen kokeiden perusteella voidaan hahmottaa kuva kuivatun sahatavaran poikkileikkauksen muodonmuutostaipumuksen riippuvuudesta siinä vallitsevasta kosteusgradientista. Edellä esitetyn laskennallisen tarkastelun mukaan kosteusgradientti yksin riittää aiheuttamaan sellaisen halkaisumuodonmuutoksen, joka tyypillisesti kokeiden tuloksena havaitaan. Tätä hypoteesia on tutkittu kuvissa 16 - 22, joissa on esitetty tehtyihin kokeisiin perustuva riippuvuus halkaisumuodonmuutoksen ja kosteusgradientin välillä. Gradientti on määritelty kappaleen keskiosan ja pintojen kosteuksien keskiarvon erotuksena, jolloin kunkin kohdan arvona on käytetty kuvan 15 mukaisten gradienttipalojen punnitus-kuivausmenetelmällä määritettyä kosteutta.



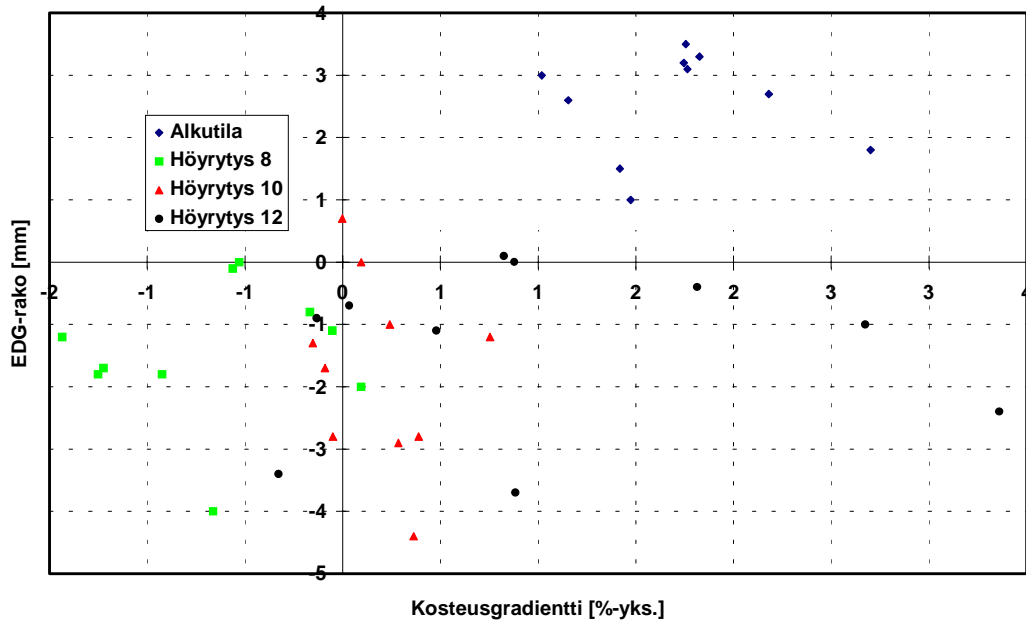
Kuva 16. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 38 x 200 mm kuusisahatavaralla.



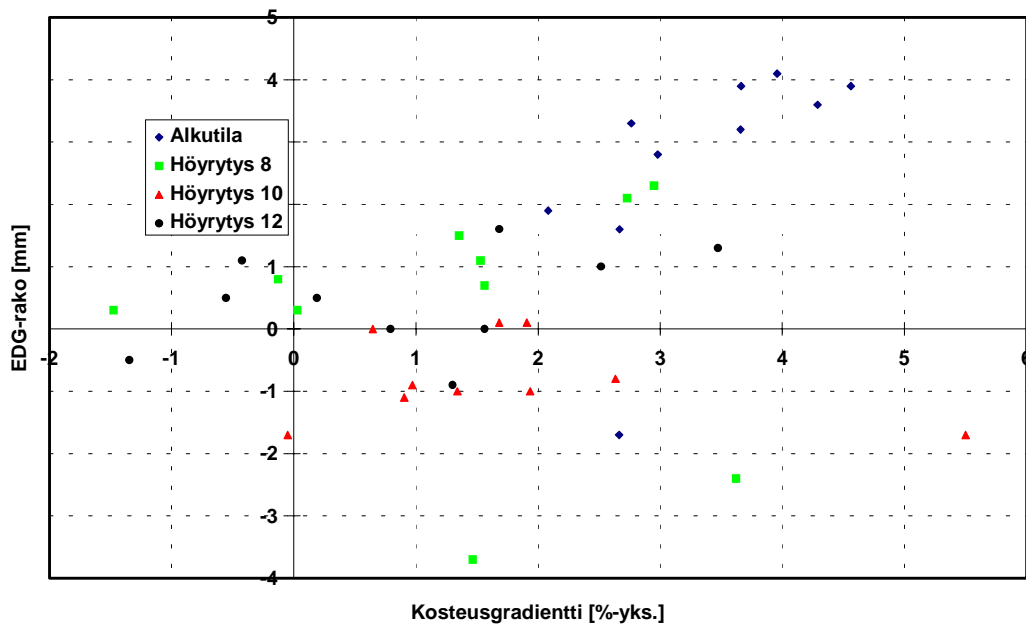
Kuva 17. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 50 x 150 mm kuusisahatavaralla.



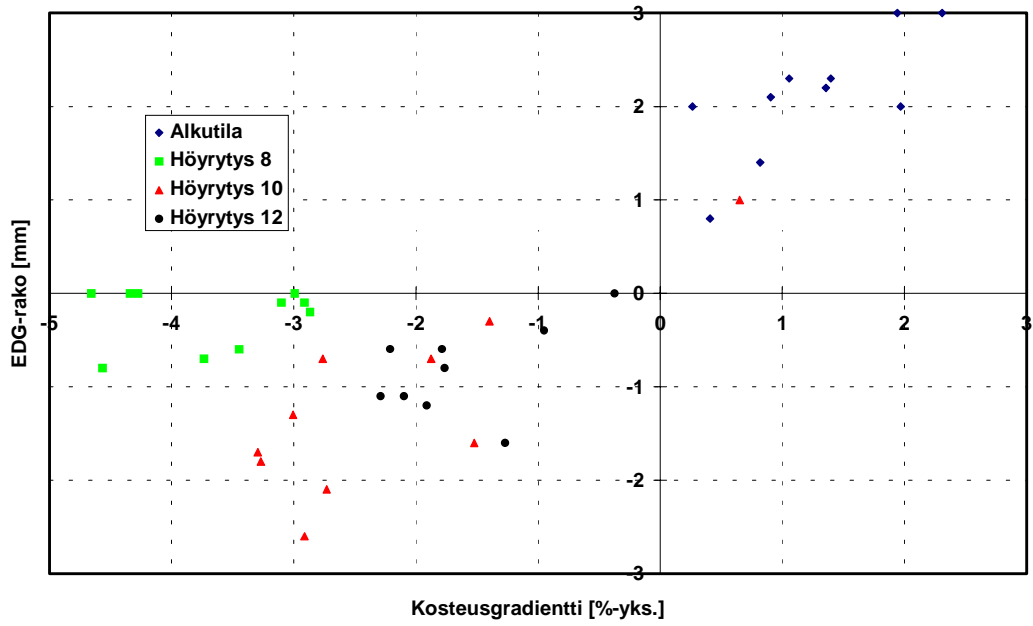
Kuva 18. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 63 x 175 mm kuusisahatavaralla.



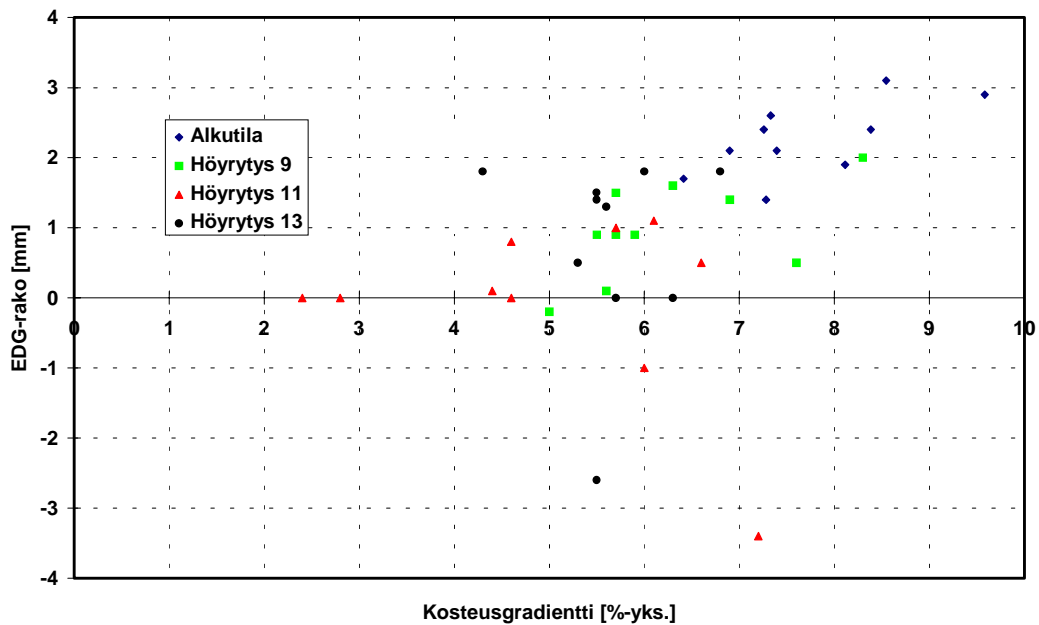
Kuva 19. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 32 x 125 mm mäntysahatavaralla.



Kuva 20. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 44 x 150 mm mäntysahatavaralla.



Kuva 21. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 50 x 100 mm mäntysahatavaralla.



Kuva 22. Muodonmuutostaipumuksen riippuvuus kosteusgradientista 75 x 225 mm mäntysahatavaralla.

Tuloksista nähdään, että muodonmuutostaipumuksen ja kosteusgradientin välillä on selvä tilastollinen riippuvuus. Korrelaatio on kuitenkin niin heikko, että selvästikään gradientti ei ole halkaisumuodonmuutoksen yksinomainen syy, vaan se yhdessä sahatavaran poikkileikkauksessa vallitsevan jännitystilän kanssa aiheuttaa EDG-palojen raon. Näyttäisi siltä, jännitystila pienentää muodonmuutostaipumusta, koska halkaisukokeessa mitatun raon 0-kohta useimmissa tapauksissa osuu selvästi gradienttiakselin positiiviselle puolelle. Tämän ilmiön merkitys korostuu sahatavaran dimension kasvaessa.

5.3 TEHOKKAIN TAPA TOIMIA: ERILLINEN TASAANNUTUSKAMMIO

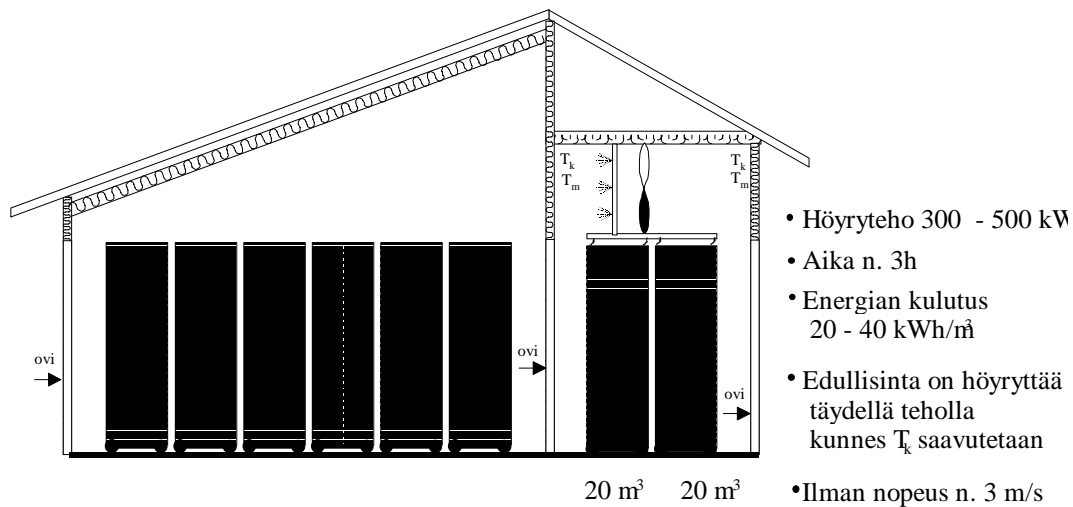
Sekä edellä esitetyn teoreettisen tarkastelun että raportoitujen loppuhöyrytykskokeiden tulosten perusteella voidaan päätellä, että ollakseen tehokas sahatavaran kuivauksessa käytettävän loppuhöyrytyksen on oltava mahdollisimman nopea. Olennaisin tekijä asiassa on märkälämpötilan nousunopeus, joka yhdessä puun alkulämpötilan kanssa varsin suoraviivaisesti määrää kuivausilman kastepisteen ja puun pinnan välisen lämpötilaerotuksen suuruuden höyrytyksen aikana. Tämä erotus on se, joka aiheuttaa höyryn kondensoitumisen puun pinnalle ja siten mahdollistaa sahatavaran tehokkaan tasaantumisen. Pitkällä, vähäisellä höyrytyksellä ei voida saada aikaan samaa vaikutusta, vaan tällöin tasaantuminen perustuu yksinomaan puumateriaalin hygroskooppisuuteen ja jää hyvin tehottomaksi.

Käytännössä nykyisin käytävissä olevissa kuivaamoissa ei voida saada aikaan niin nopeaa märkälämpötilan nousua kuin tehokkaan tasaannutuksen toteuttamiseksi on tarpeen. Kuivaamoita ei myöskään ole suunniteltu kestäämään tätä tarkoitusta, joten ilmeisesti tehokkain tapa hoitaa asia olisi rakentaa erillinen tasaannutuskammio. Tällainen on hahmoteltu kuvassa 23. Rakennus koostuu varsinaisesta höyryllä lämmitettävästä kammio-osasta, josta paketit siirretään jatkona olevaan jäähdytysosaan. Laitos muistuttaa ajatukseltaan kanavakuivaamo, eli tavara kulkee vaunuilla toisesta päästä sisään ja tulee toisesta tasaannutettuna ulos.

Tässä ratkaisussa höyrytyksessä on vain 1 - 2 kuivaustornia (20 -40 m³) kerrallaan, jolloin voidaan helposti saavuttaa sahatavaratilavuutta kohti riittävän suuri höyryteho. Muuta lämmitystä ei välttämättä vaadita. Ratkaisussa on myös helppo saavuttaa se tilanne, että höyrytettävänä on vain yhtä paksuutta kerrallaan. Prosessi toimii joustavasti, koska läpimenoaika on vain noin ½ vuorokautta. Systemin kapasiteetti täydellä teholla toimittaessa on noin 300 m³/vrk.

Tasaannutuskanava kosteusgradientin ja jännitysten

Kapasiteetti n. 300 m³/vrk



Kuva 23. Hahmotelma erillisestä höyryllä toimivasta tasaannutuskammioista kosteusgradientin ja kuivumisjännitysten poistamiseksi.

Loppuhöyrytykseen tarvittavan höyrytehon määrittämiseksi voidaan olettaa, että kaikki puun lämpenemiseen tarvittava energia tuodaan tasaannutuskammioon höyryn avulla. Näin voidaan varmistaa se, että kammiossa oleva ilma on koko ajan mahdollisimman kylläistä ja tasaantuminen siis tehokasta. Kiertoilmalle virtausvastusta tuottavia lämpöpattereita ei tällaisessa konstruktiossa tarvita lainkaan. Kuvattujen laboratoriokoetulosten perusteella järkevänä tavoitteena voidaan pitää märkälämpötilan nousunopeutta 40 °C/h, jolloin siis myös kuivalämpötila nousee tällä nopeudella. Kun kosteudeltaan 18 % olevan sahatavaran ominaislämpökapasiteetti on noin 1 800 J/kg/K, voidaan tähän tavoitteeseen pääsemiseksi laskea höyrytehoa tarvittavan noin 12 kW/m³. Kuivatun sahatavaran tiheydeksi on tällöin oletettu 500 kg/m³ ja höyrykattilan hyötysuhteeksi 80 %.

Jos näin laskettua höyrytehoa verrataan sahatavaran alkulämmitysvaiheessa vaadittavaan tehoon, huomataan, että loppuhöyrytys vaatii tehoa likimain kaksinkertaisen määrän. Huolimatta kuivauksessa alentuneesta sahatavaran lämpökapasiteetista tämä on selitettävissä toisaalta nopeammalla lämpenemisellä ja toisaalta sillä, että höyry on lopputasaannutuksessa nyt ainoa energianlähde.

Esitetyllä tavalla toimittaessa lämpöenergiaa tarvitaan höyrynä lopputasaannutuksessa noin 30 kWh/m³, mikä seuraavan kappaleen taulukon 7 mukaisilla hinnoilla laskettaessa merkitsee käyttökustannuksia suuruusluokkaa 3 - 6 mk/m³. Tätä voidaan verrata taulukossa 6 esitettyihin sahatavaran pääomakustannukseen joka syntyy, jos sahatavaran kosteusgradientin annetaan tasaantua varastossa. Jo alhaisellakin korkokannalla varastointi aiheuttaa helposti samat kustannukset kuin loppuhöyrytys,

vaikka laskelmissa otettaisiin huomioon ainoastaan itse sahatavaran pääomakustannukset.

Taulukko 6. Sahatavaran varastoinnin aiheuttama pääomakustannukset (mk/m^3), kun sahatavaran arvo on $1\ 000\ mk/m^3$.

korkokanta	Varastointiaika		
	1 kk	2 kk	3 kk
4 %	3,3	6,7	10,0
6 %	5,0	10,0	15,0
8 %	6,7	13,3	20,0
10 %	8,3	16,7	25,0

6 HÖYRYN TUOTANTOLAITTEISTO

Höyryn tuottamiseksi on tarjolla useita eri vaihtoehtoja. Saatavilla on polttoaineenaan sekä kevyttä polttoöljyä että kiinteää polttoainetta (hake ja kuori) käyttäviä valmiita kaupallisia ratkaisuja. Öljykäyttöiset laitteet ovat teholtaan yleensä kiinteän polttoaineen kattiloita pienempiä, mutta niistäkin löytyy kuivauksen tarpeisiin riittävän suuria sovelluksia.

Höyrykattilan kustannukset muodostuvat investointi- ja käyttökustannuksista. Näiden osalta keväällä 1997 vallitseva tilanne on kuvattu taulukossa 7. Investoinnin takaisinmaksuajaksi on laskettu kolme vuotta; laskelmissa käytettävän korkokannan merkitys näin lyhyellä ajalla on vähäinen. Laitteita on oletettu käytettävän 60 %:n jatkuvalla keskimääräisellä teholla ympäri vuoden. Oletettaessa höyrykattilan toimivan 80 %:n hyötysuhteella voidaan laskea, että 1 kWh tuottaa karkeasti ottaen 1,1 kg höyryä. Tuotettavan höyryn lämpötilalla ei ole asiaan merkittävää vaikutusta, koska vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on sangen alhainen.

Taulukko 7. Erilaisten höyrykattiloiden pääoma- ja käyttökustannukset keväällä 1997 vallitsevan hintatason mukaan.

Polttoaine	Kevyt polttoöljy	Hake ja kuori
Teho [kW]	680	2 500
Investointi [mk]	500 000	2 800 000
Pääomakustannus [mk/kg höyryä]	0,04	0,07
Lämmön hinta [mk/kWh]	0,20	0,10
Käyttökustannus [mk/kg höyryä]	0,18	0,09
Kokonaiskustannus [mk/kg höyryä]	0,22	0,16

Laitteiden käyttökustannukset muodostuvat pääosin polttoaineesta, minkä lisäksi vähäisempiä kustannuksia syntyy veden ja sen käsittelyyn tarvittavien kemikaalien vuoksi. Pääomakustannus on kiinteää polttoainetta käyttävässä laitoksessa selvästi öljykäyttöistä vaihtoehtoa korkeampi, mutta käyttökustannus vastaavasti vain noin puolet siitä. Erityisesti kiinteän polttoaineen vaihtoehdon käyttökustannukset ovat kuitenkin olennaisesti

riippuvia polttoaineena käytettävän hakkeen ja kuoren saatavuudesta ja vaihtoehtoisesta käytöstä; ääritapauksessa niiden hinta voi olla jopa negatiivinen, jos ne joudutaan jätteenä kuljettamaan kaatopaikalle.

Höyrykattilan riittävän tehon lisäksi olennaista höyryn käytön suunnittelussa on höyryn jakamiseen käytettävän putkiston riittävä mitoitus. Toimiakseen tehokkaasti ja halutulla tavalla putkiston tulee olla suunniteltu siten, että kuhunkin kuivauskamariin voidaan johtaa sellainen hetkellinen höyryteho, joka edellä esitetyn mukaan on tarpeen. Jotta myös vähäisemmän höyrytehon käyttö olisi joustavasti mahdollista, tulisi höyryn jakoputkessa olevan venttiilin olla mieluummin tyypiltään moottoriventtiili. Tavanomaista auki/kiinni -tyyppistä magneettiventtiiliä käytettäessä höyryn tulon säätö on epätarkkaa, koska saatava teho on ylösajon loppuvaiheessa voimakkaasti ylimitoitettu.

Kuivauksen alkulämmitysvaiheessa puu ei kykene imemään itseensä kuin pienen osan sen pinnalle tiivistyvistä höyryistä, joten valtaosa siitä valuu vetenä kuivaamon lattialle. Lattialle tiivistyvän veden määrä voi olla tuhansia litroja, joten höyryä käytettäessä on erittäin tärkeää, että kuivaamossa on lattiakaivon kautta toimiva vedenpoistojärjestelmä. Muussa tapauksessa lattialle valuva vesi joudutaan poistamaan ilmanvaihdon kautta, mikä lisää kuivauksen energiankulutusta jopa 15 %. Lisäksi ongelmia on tällaisessa tapauksessa odotettavissa lämpöpattereiden riittämättömän tehon vuoksi.

Käytettäessä ulkopuolista höyryä kuivaamossa on aina kiinnitettävä erityinen huomio kuivaamon tiiviyteen. Sen lisäksi, että vuodot aiheuttavat höyryn kulutuksen lisääntymistä ja siten tarpeettomia lisäkustannuksia, vuotava höyry aiheuttaa herkästi myös vaurioita kuivaamorakennukselle. Vuotava höyry tiivistyy kosteudeksi ullakon kattorakenteisiin, mistä aiheutuva rakenteen altistuminen jatkuvalle sisäpuoliselle kosteuskuormitukselle aiheuttaa herkästi ainakin homeongelman, minkä lisäksi voi olla olemassa riski jopa lahon kasvun alkamisesta. Jonkinlaisena minimivaatimuksena kuivaamon tiiviydelle voidaan pitää sitä, että halutun kuivauskaavan tulee toteutua myös varsinaisessa kuivausvaiheessa ilman, että kuivausilma tarvitsee kostutusta. Jos näin ei ole, on höyryn käyttöä kannattavampaa tiivistää kuivaamo, jolloin asia saadaan tältä osin kuntoon kertakustannuksella. Tämän jälkeen höyryn käytön kannattavuutta voi tutkia uudelta pohjalta.

6.1 ENERGIAN KOKONAISKULUTUS

Sahatavarakuivaamossa käytettävä lämpöenergia kuluu ilmanvaihtoon, kuormien lämmittämiseen, niissä olevan jään sulattamiseen ja lämpöhäviöihin. Suurimman osan energian kokonaiskulutuksesta vie ilmanvaihto, jonka kulutus tiettyä sahatavaraa kuivattaessa riippuu lähinnä käytettävästä kuivauslämpötilasta ja ulkoilman lämpötilasta. Kuormien lämmittämiseen kuluva energia riippuu puun alkulämpötilan lisäksi yksinomaan kuivaus-

lämpötilasta. Lämpöhäviöt ovat asianmukaisesti lämpöeristetyssä kamari-kuivaamossa yleisesti ottaen suoraan verrannollisia kuivausaikaan, eli häviöihin kuluva teho on kuivauksen kuluessa vakio. Näin kaikki kuivaamossa tapahtuva energiankulutus on riippumatonta höyryn käytöstä, eikä sen käyttö siis vaikuta kuivauksessa kuluvan lämpöenergian kokonaisuuteen. Edellytyksenä on kuitenkin tiivis kuivaamo.

6.2 LAINSÄÄDÄNTÖ

Höyrykattila on aina paineastia, jonka suunnittelua, valmistusta, käyttöä, tarkastusta ja näiden valvontaa säätelevät kulloinkin voimassa olevat paineastialaki ja -asetus. Sama pätee tavanomaisiin nestekattiloihin, joilla sahan lämpökeskus tuottaa kuivaamoiden lämpöpattereissa kiertävän yli-paineisen veden. Asetuksen 8. luvun mukaan kullakin kattilalaitoksella on oltava tarkoitukseen nimetty käytön valvoja, jolta vaaditaan kattilalaitoksen tehosta ja käyttöpaineesta riippuva muodollinen pätevyys. Käytön valvojan on henkilökohtaisesti valvottava paineastian käyttöä ja kuntoa sekä pidettävä sen tarkastusta koskevissa asioissa yhteyttä tarkastuslaitokseen. Kuitenkaan käytön valvojan ei tarvitse fyysisesti olla kattilalaitoksella läsnä, vaan tätä tarkoitusta varten kullakin kattilalla on oltava yksi tai useampia laitteen toimintaan perehdytettyjä käyttäjiä, joiden tehtävänä on henkilökohtaisesti hoitaa paineastiaa käytön aikana.

Nestekattiloiden osalta sahoilla kysymykseen tulevissa teholuokissa käytön valvojalta ei kuitenkaan edellytetä muodollista pätevyyttä, vaan kattilalaitoksen valvojana saa toimia kuka tahansa tehtävään kykenevä 18 vuotta täyttänyt henkilö. Höyrykattiloiden osalta ilman muodollista pätevyyttä on mahdollista valvoa paineastia-asetuksen 26. pykälän mukaan laitoksia, jotka täyttävät seuraavat vaatimukset:

Kattilalaitoksen käyttöpaine on enintään 10 bar ja teho on enintään 0,8 MW tai kattilalaitoksessa on yksinomaan läpivirtauskattiloita, joiden käyttöpaine on enintään 16 bar ja laitoksen teho enintään 1,6 MW.

Muussa tapauksessa höyrykattilan käytön valvojalta vaaditaan B-koneenhoitajakirja, jonka saamiseksi vaaditaan (Asetus kattilalaitosten käytönvalvojen pätevyyskirjoista (213/78)):

1. vähintään 19 vuoden ikä
2. vähintään 12 kuukautta työkokemusta höyrykattilan lämmittäjänä kattilalaitoksessa, jonka käytön valvojalta paineastia-asetuksen mukaan vaaditaan ainakin B-koneenhoitajakirja
3. vähintään kolme kuukautta työkokemusta paineastiain, voimalaitoskoneiden tai vastaavien valmistus-, asennus- tai korjaustöissä sekä

4. todistus siitä, että hakijalla on riittävät tiedot höyrykattilan rakenteesta, varusteista ja käytöstä sekä paineastioita koskevista tärkeimmistä säännöksistä.

Valmistus-, asennus- tai korjaustyökokemuksen korvaa yleisen ammattikoulun metallityö- tai koneenkorjauslinjan, sähköosaston sähköasentajalinjan tai koneenhoitajan opintolinjan oppimäärän suorittaminen. Ammattikasvatushallitus voi hyväksyä myös muun koulun kurssin tai muun opintolinjan vastaavan oppimäärän suorittamisen korvaamaan tässä momentissa tarkoitetun työkokemuksen.

Edellä olevan perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä voimassa oleva lainsäädäntö ei aseta esteitä matalapaineisen höyryn käytölle sahatavaran kuivauksessa. Ilman muodollista käytön valvojan pätevyyttä hoidettavia höyrykehittäjiä on saatavissa valmiina kaupallisina tuotteina ainakin öljykäyttöisinä.

7 YHTEENVETO

Matalapaineisen höyryn käyttö Suomessa käytössä olevan tavanomaisen sahatavaran kamarikuivauksen yhteydessä on mielekäs tapa tehostaa kuivausprosessia sekä kuivauksen alkulämmitysvaiheessa että sahatavaran lopputasaannuksessa.

Alkuhöyrytyksen vaikutukset kuivaustulokseen:

- Vältetään puun pinnan mikrohalkeilu, joka saattaa aiheuttaa jopa 50 % lopullisista halkeamista. Saadaan olennaisesti vähemmän halkeamia kuin ilman höyryä ja voidaan lisäksi säästää kuivausajassa kuivaamalla varsinaisessa kuivausvaiheessa rajummalla kuivauskaavalla.
- Lisätään kuivauskapasiteettia nopeuttamalla kuivauksen ylösajovaihetta, joka etenkin ohuen sahatavaran vientikuivauksessa saattaa viedä 20 % koko kuivaukseen kuluvasta ajasta. Tapauksesta riippuen kapasiteetin kasvu on vuositasollakin jopa 10 %.
- Vähennetään lämmityspattereiden korroosiota, kun ne eivät altistu vesisumun vaikutukselle.
- Ei vaikuta energian kokonaiskulutukseen.
- Halkeilun aiheuttaman sahatavaran arvonalennuksen väheneminen kattaa sekä höyrykattilan pääoma- että käyttökustannukset.

Lopputasaannutus höyryllä:

- Parantaa kuivauksen laatua olennaisesti, kun lyhyessä ajassa saadaan tehokkaasti poistetuksi sahatavaran jatkojalostusta vaikeuttavat kosteusgradientti ja kuivumisjännitykset.
- Ei vaikuta kappaleiden välisiin kosteuseroihin eli kosteuden hajontaan.
- Erillisessä tasaannutuskammiossa toteutettuna vie aikaa noin ½ vuorokautta.
- Kustannukset yleensä pienemmät kuin käytännön vaihtoehtona olevan kylmässä varastossa tapahtuvan tasaantumisen pääomakustannukset.

Taloudellisessa tarkastelussa höyryn käyttö kokonaisuutena jää kaikki kustannukset huomioiden positiiviselle puolelle, jos sen käyttöönoton myötä parantuneelle sahatavaran kuivauslaadulle lasketaan rahallista arvoa.

Lopputuotteen laadun parantumisen lisäksi höyryn käyttö tuo säästöä lisääntyvänä kuivauskapasiteettina, koska etenkin talviaikaan kamari-kuivaamon alkulämmitysvaiheeseen kuluva aika lyhentyy olennaisesti. Pidemmällä tähtäimellä myös valmius asiakaslähtöisen kuivauslaadun tuottamiseen kasvaa ja sen myötä asiakastyytyväisyys paranee.

LÄHDELUETTELO

Alexiou, P. N., Wilkins, A. P. & Hartley, J., 1990. Effect of pre-steaming in drying rate, wood anatomy and shrinkage of regrowth *Eucalyptus pilularis* Sm. *Wood Science and Technology*, vol 24, s. 103 - 110.

Hukka, A. 1996. A Simulation Program for Optimisation of Medium Temperature Drying on an Industrial Scale. 5th International IUFRO Wood Drying Conference, Quebec City, Canada, August 13 - 17, 1996.

Hukka, A. 1997. Simulation of the warm-up phase in kiln drying of sawn timber. (Julkaisematon käsikirjoitus.)

Morén, T. 1994a. Steam conditioning after low temperature drying. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol 52, s. 77 - 82.

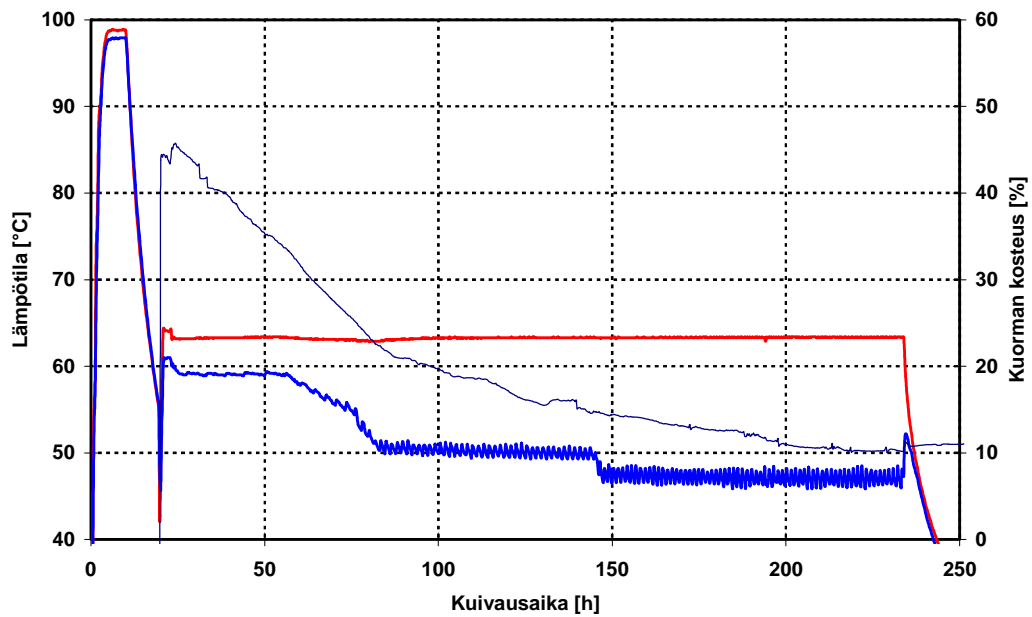
Morén, T. J. 1994b. Heating and conditioning by steaming during low temperature drying. 4th International IUFRO Wood Drying Conference, Rotorua, New Zealand, August 9 - 13th, 1994.

Ranta-Maunus, A., Forsén, H., Hanhijärvi, A., Hukka, A. & Partanen, J. 1995. Sahatavaran kuivauksen simulointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Julkaisuja 805. 62 s. + liitt. 50 s.

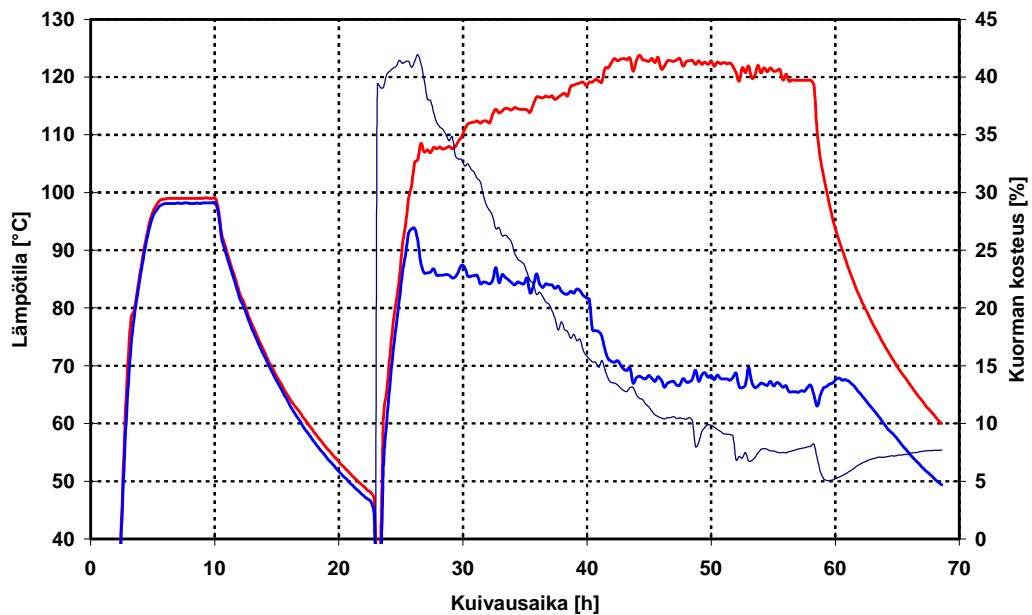
Siimes, H. 1983. Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980 - 1982. Sahatavaran kuivauskäsikirja. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 243. 146 s. + liitt. 1 s.

ESIHÖYRYTYSKOKEISSA KÄYTETYT KUIVAUSKAAVAT

Koe 1



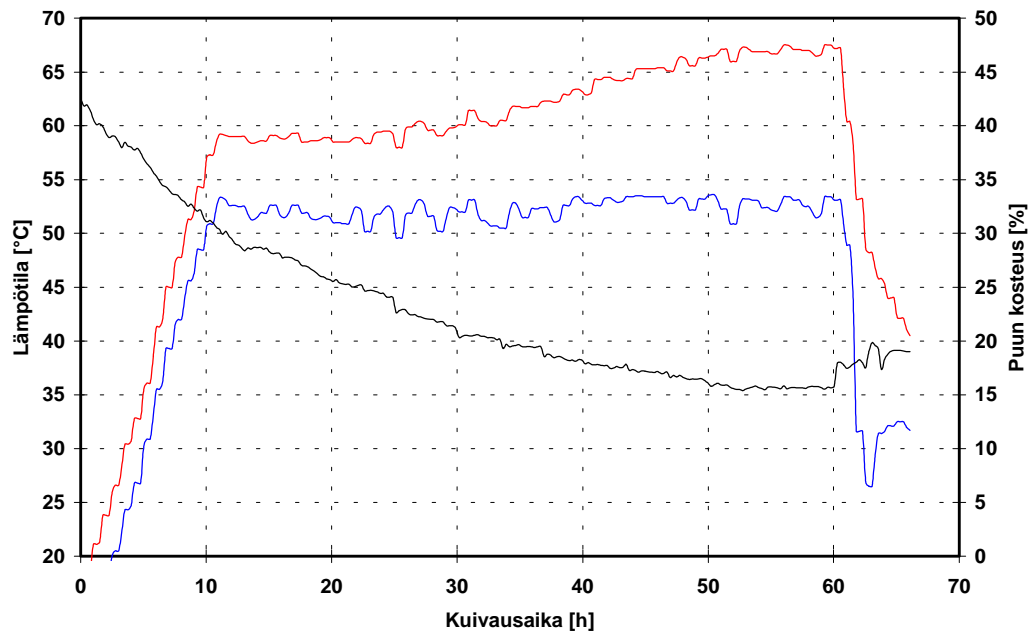
Koe 2



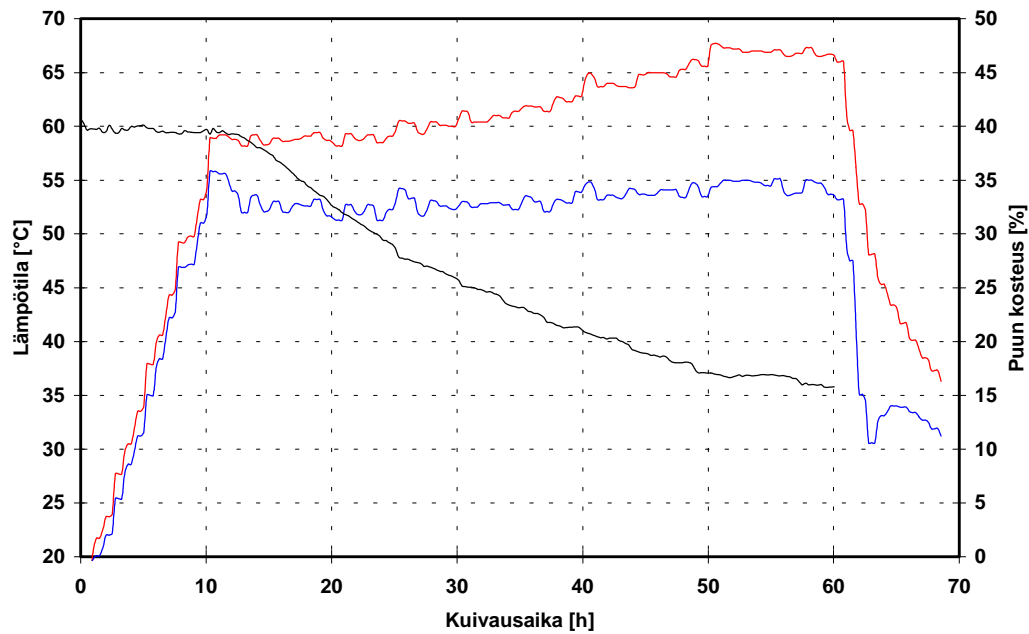
MIKROHALKEILUKOKEISSA KÄYTETYT KUIVAUSKAAVAT

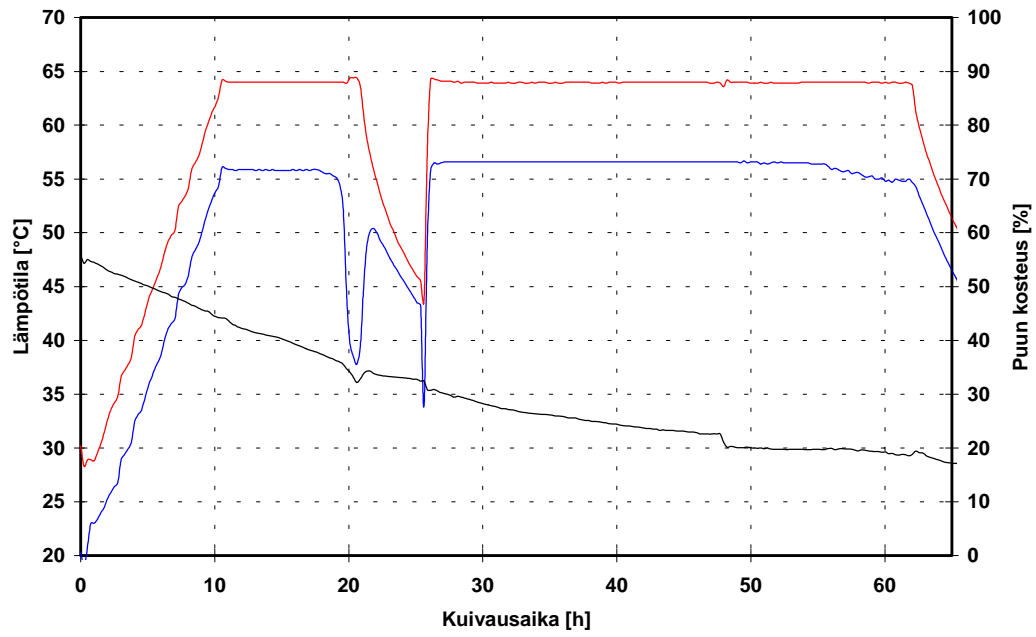
LIITE 2/1

Koe 1a

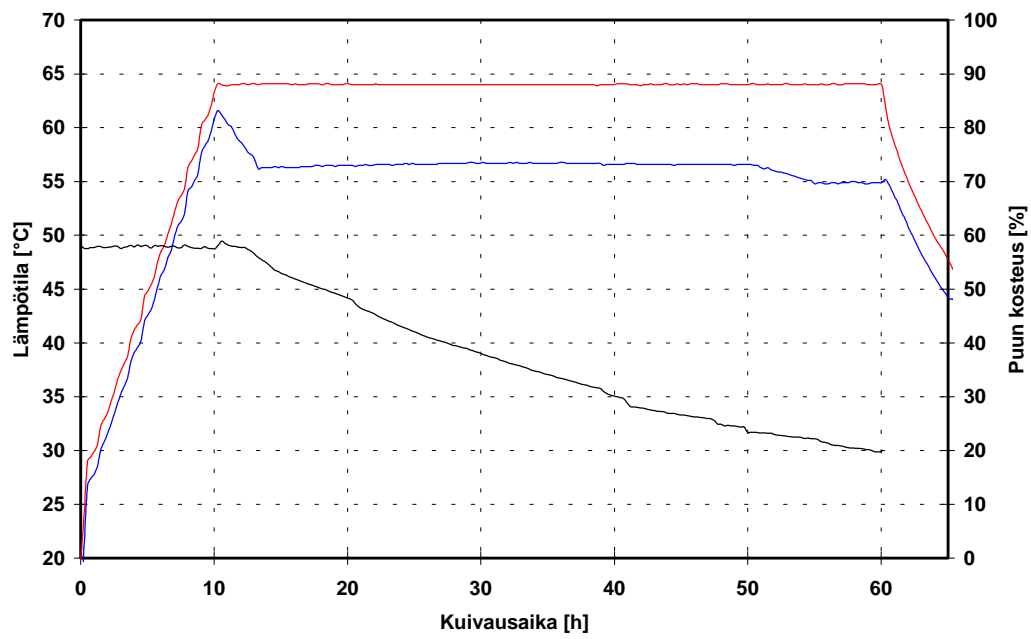


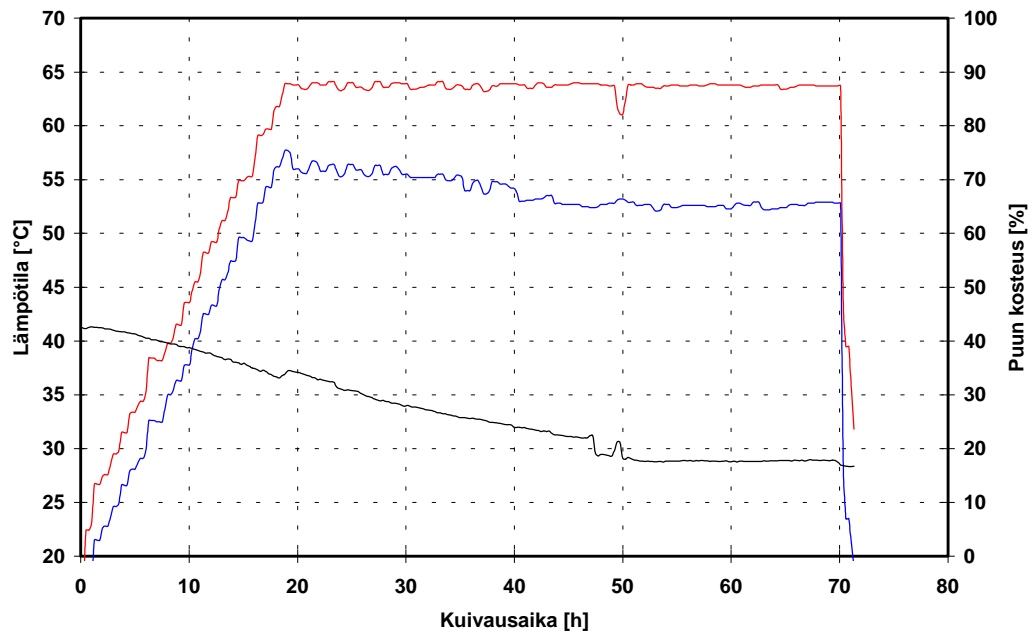
Koe 1b



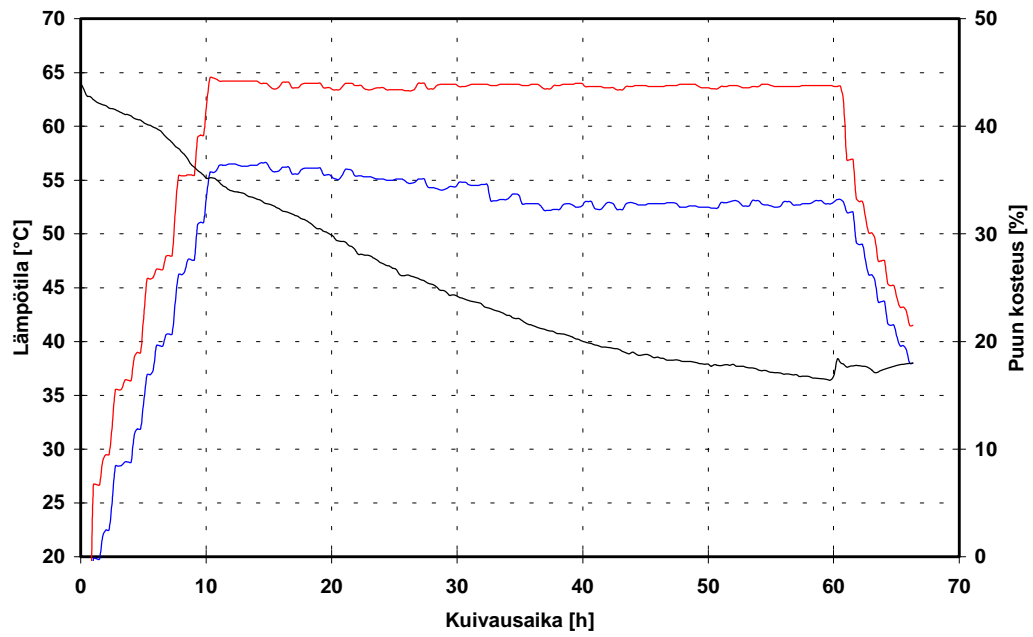


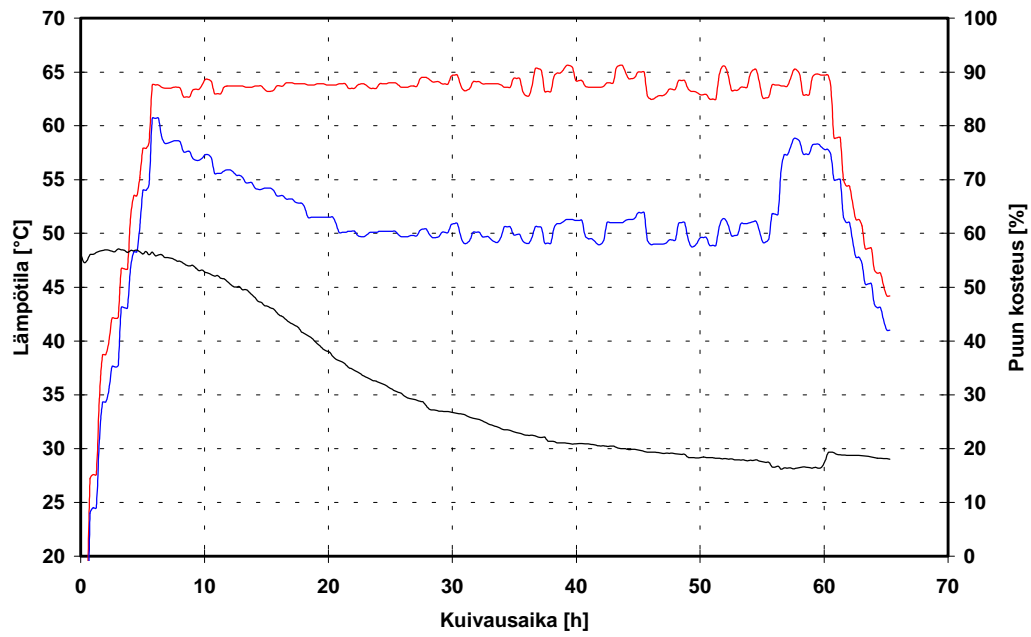
Koe 2b



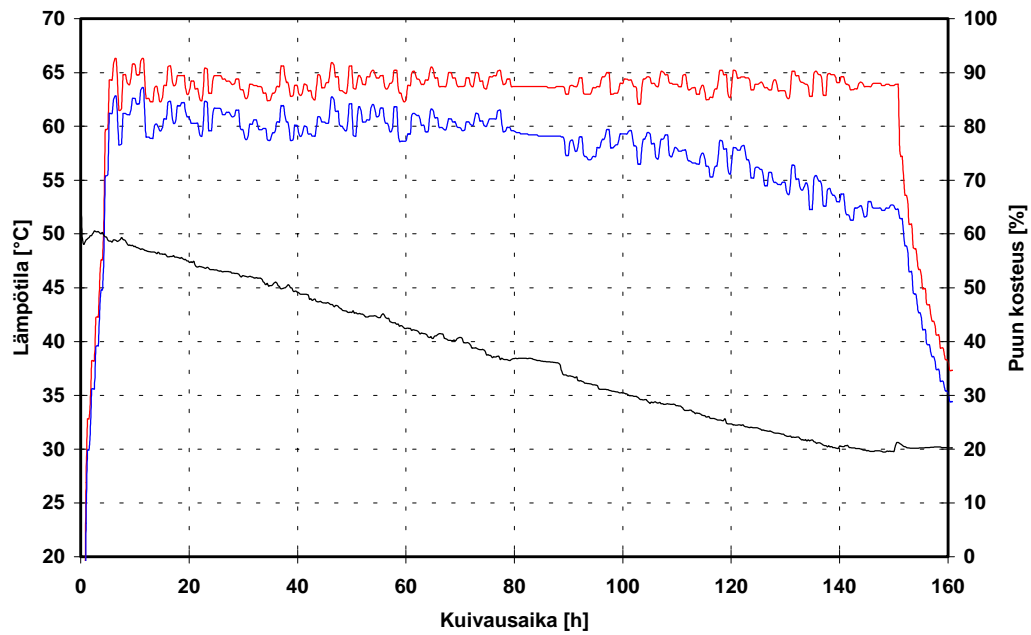


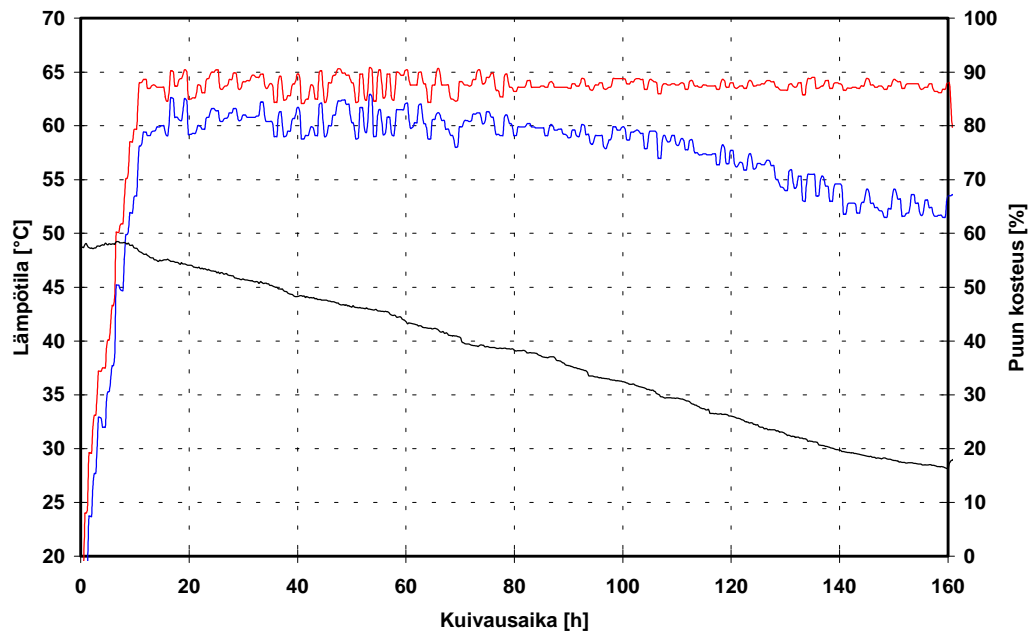
Koe 3b



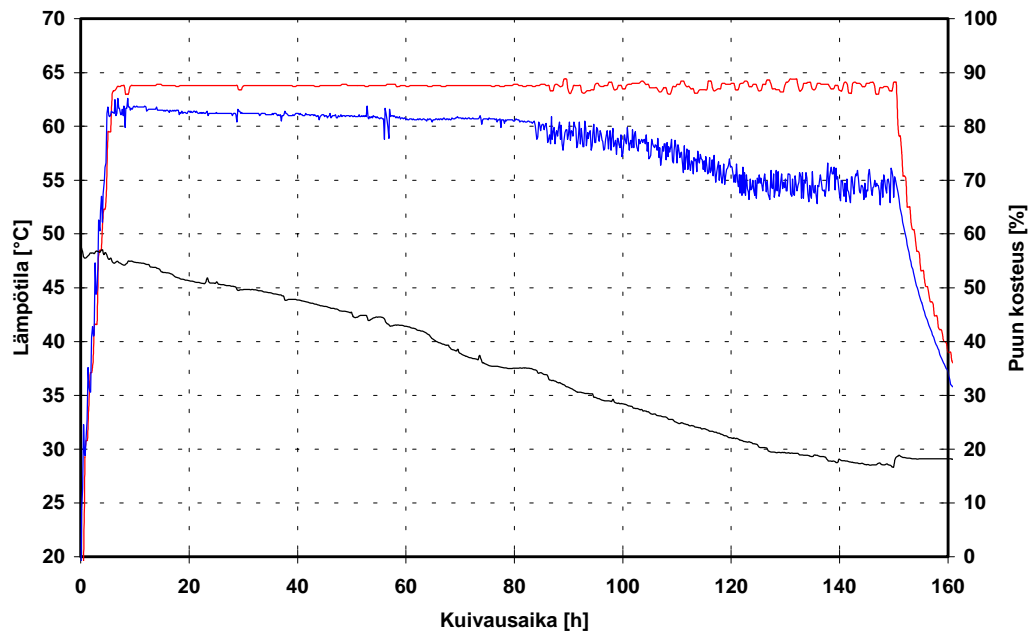


Koe 4a



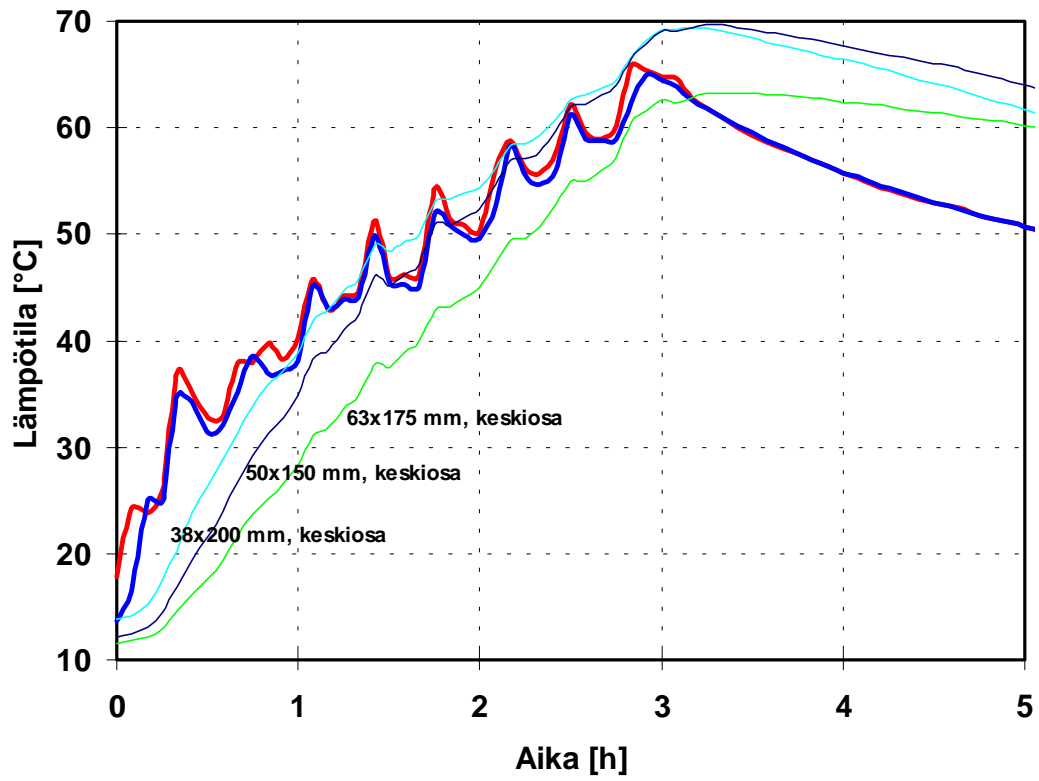


Koe 4c

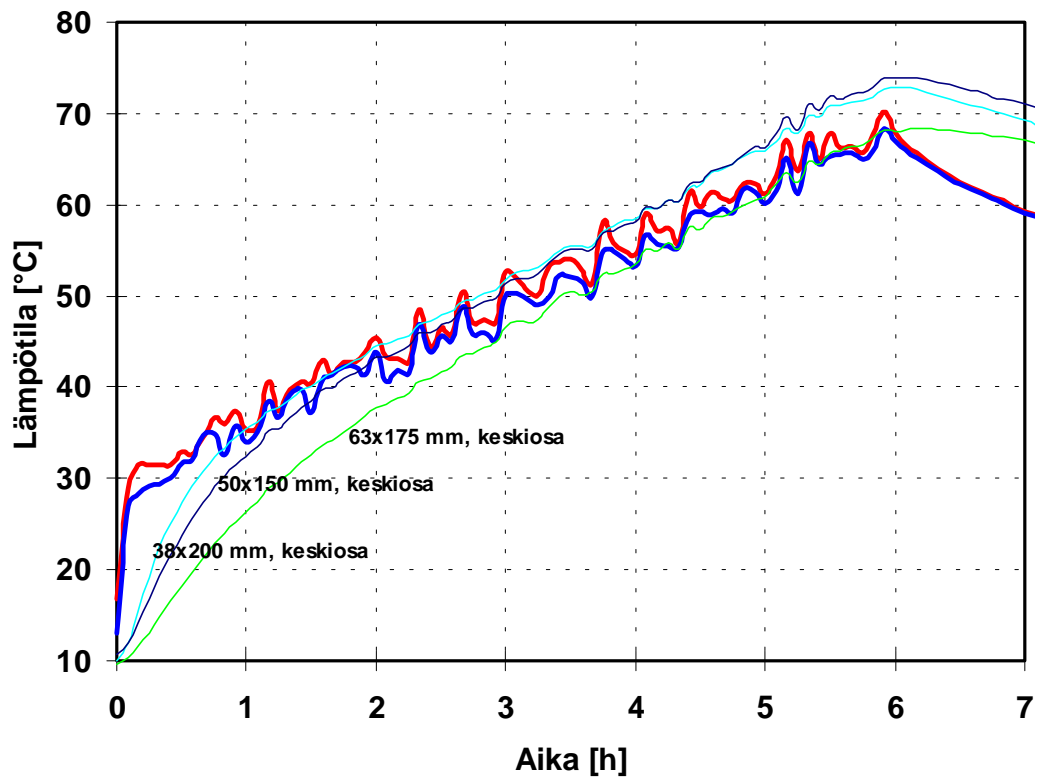


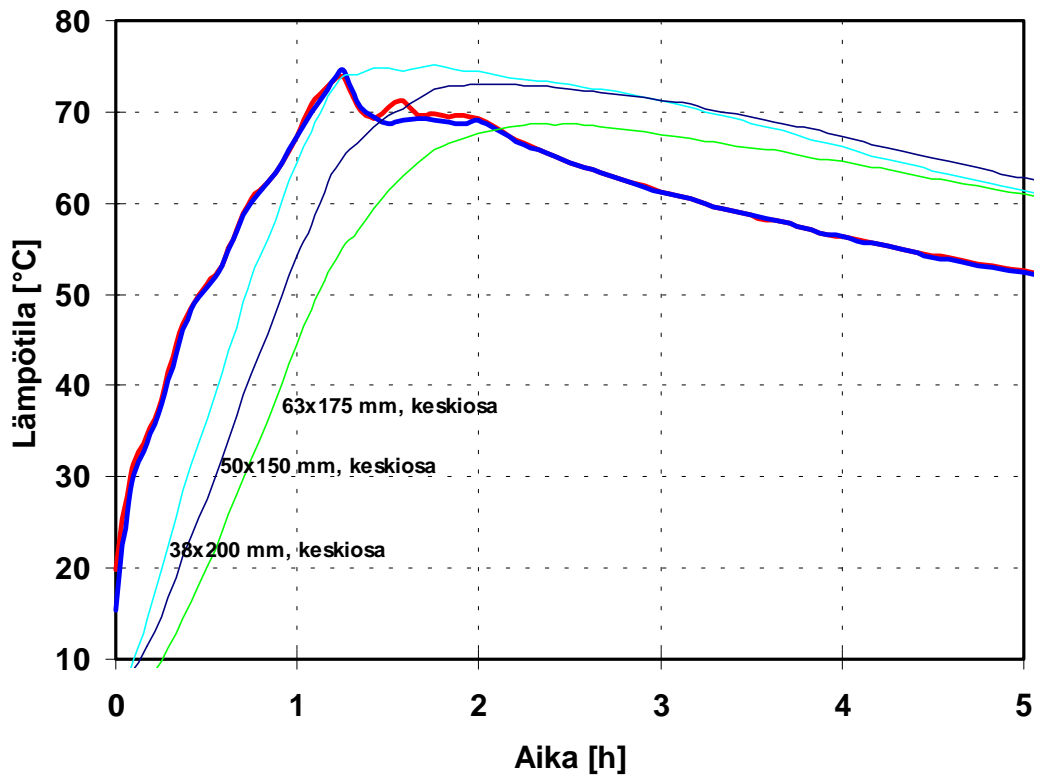
LOPPUHÖYRYTYSKOKEISSA KÄYTETYT KUIVAUSKAAVAT

Koe 5

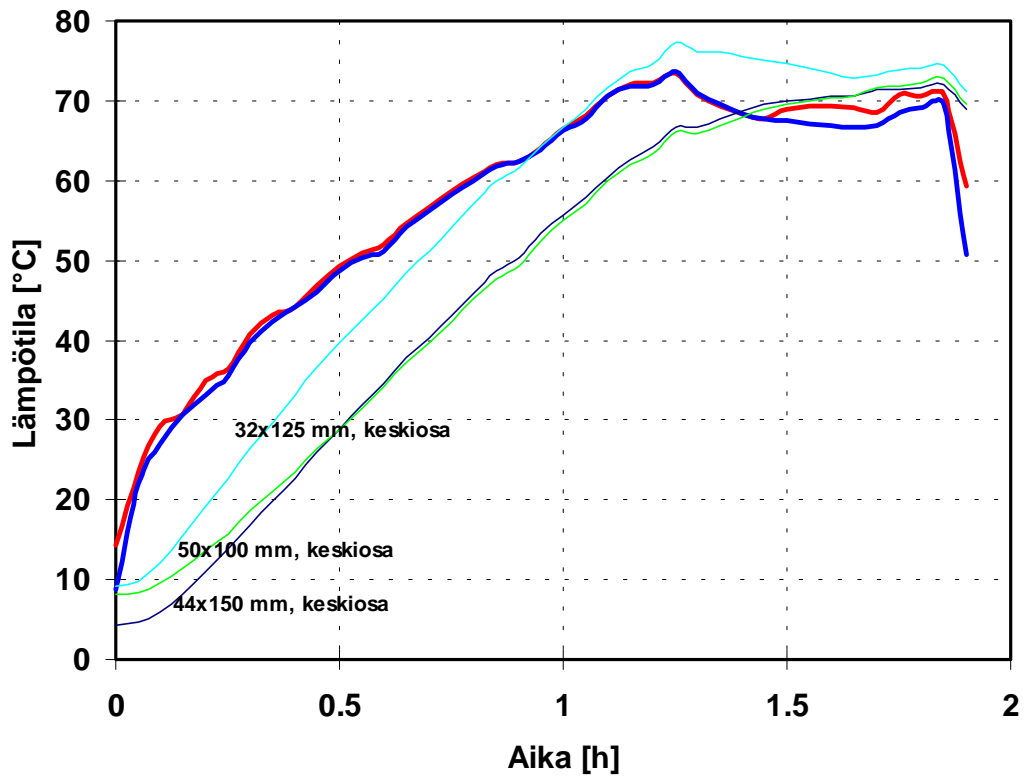


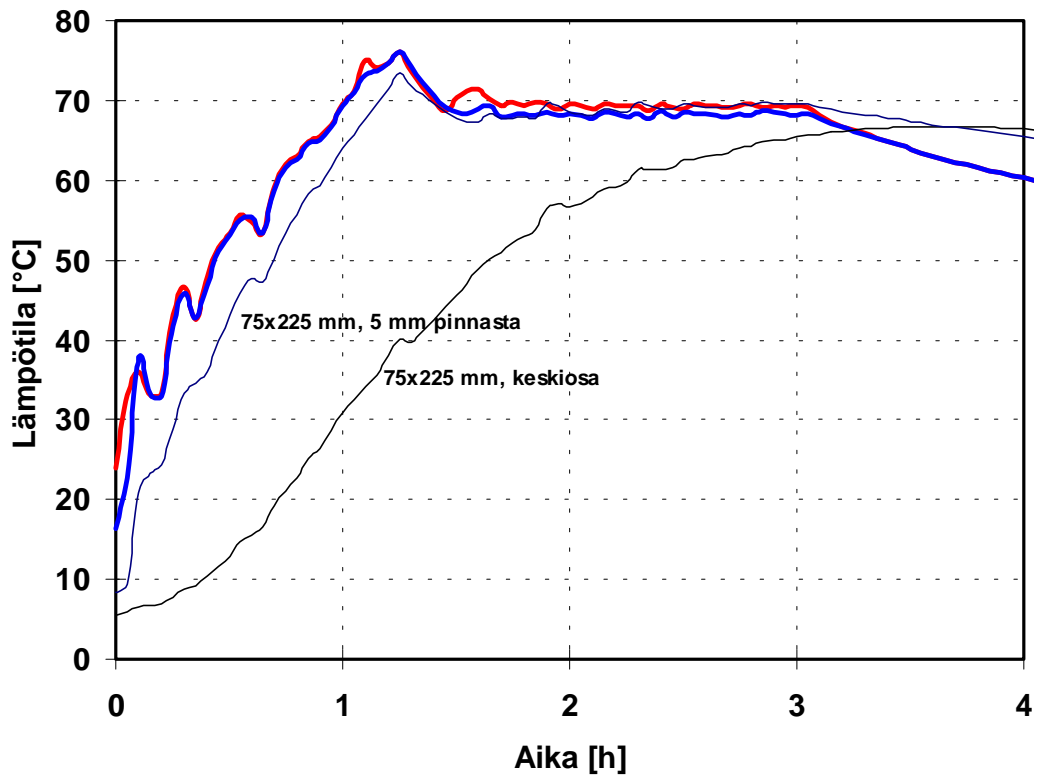
Koe 6



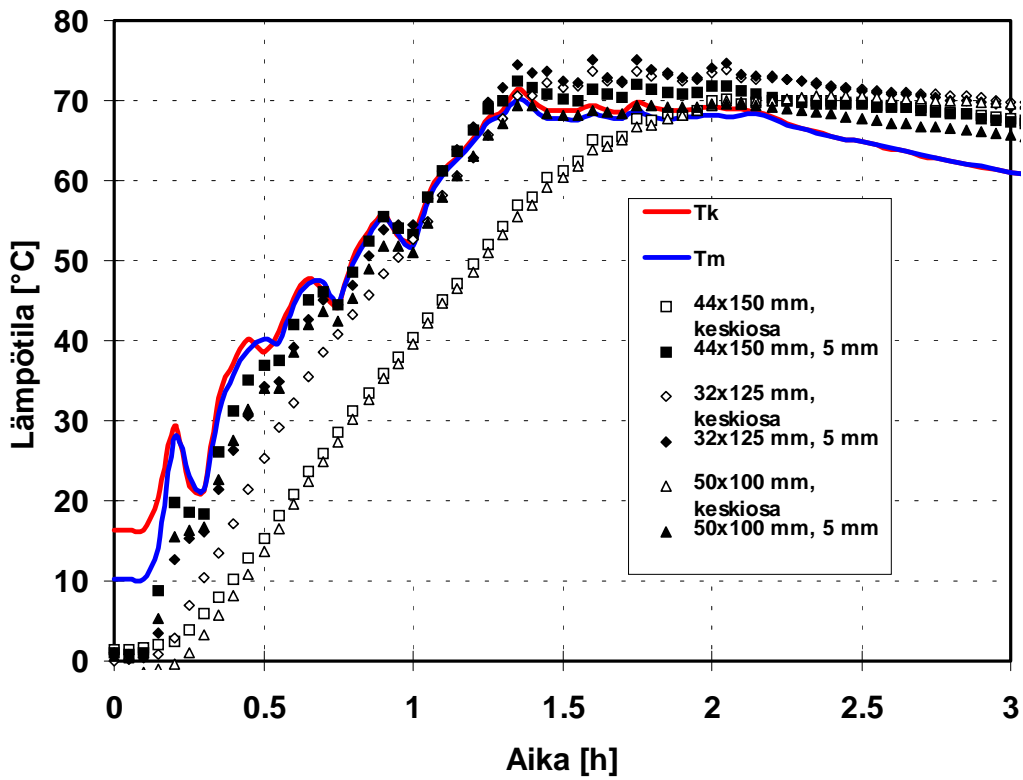


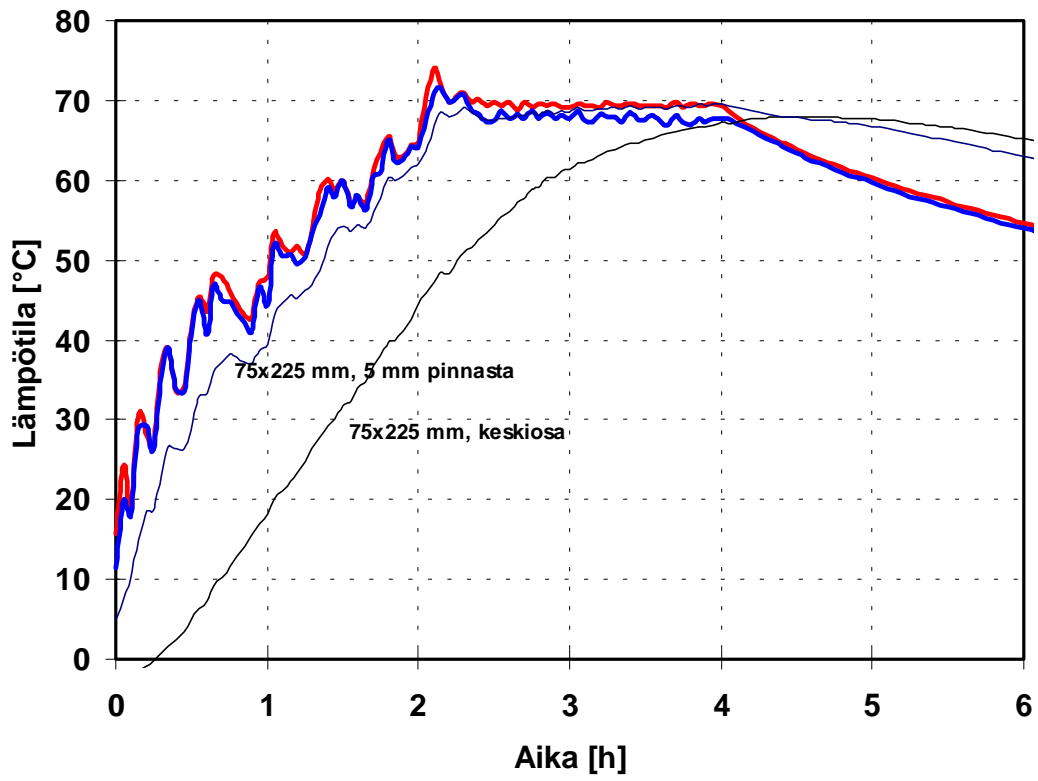
Koe 8



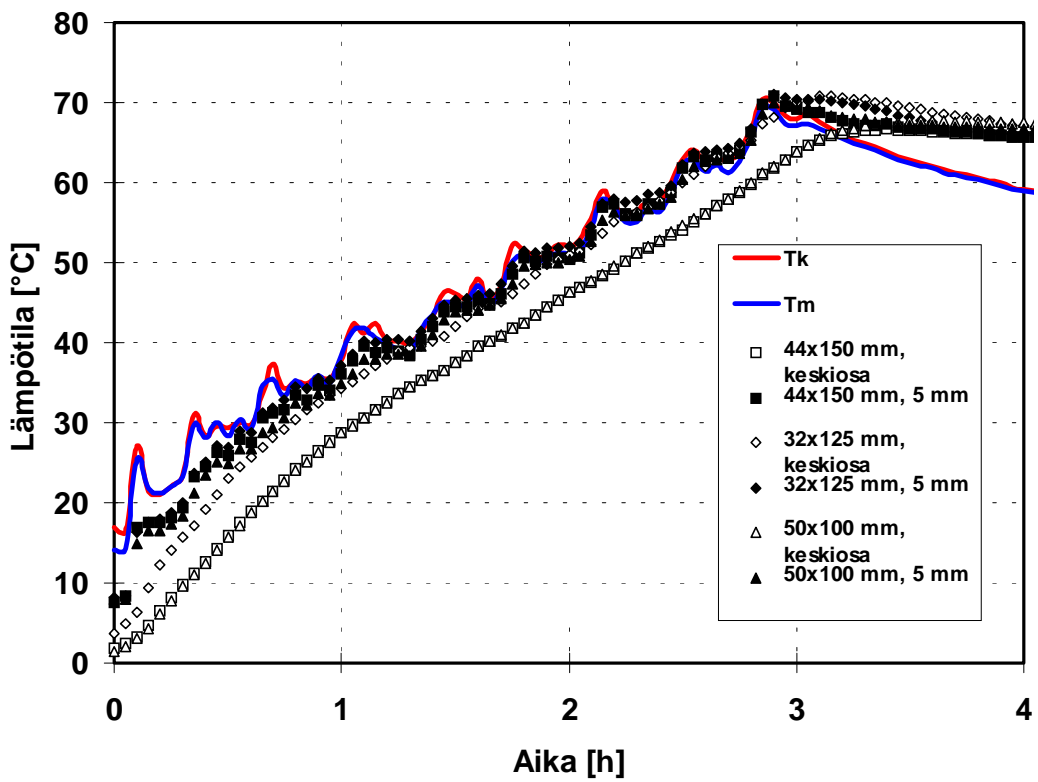


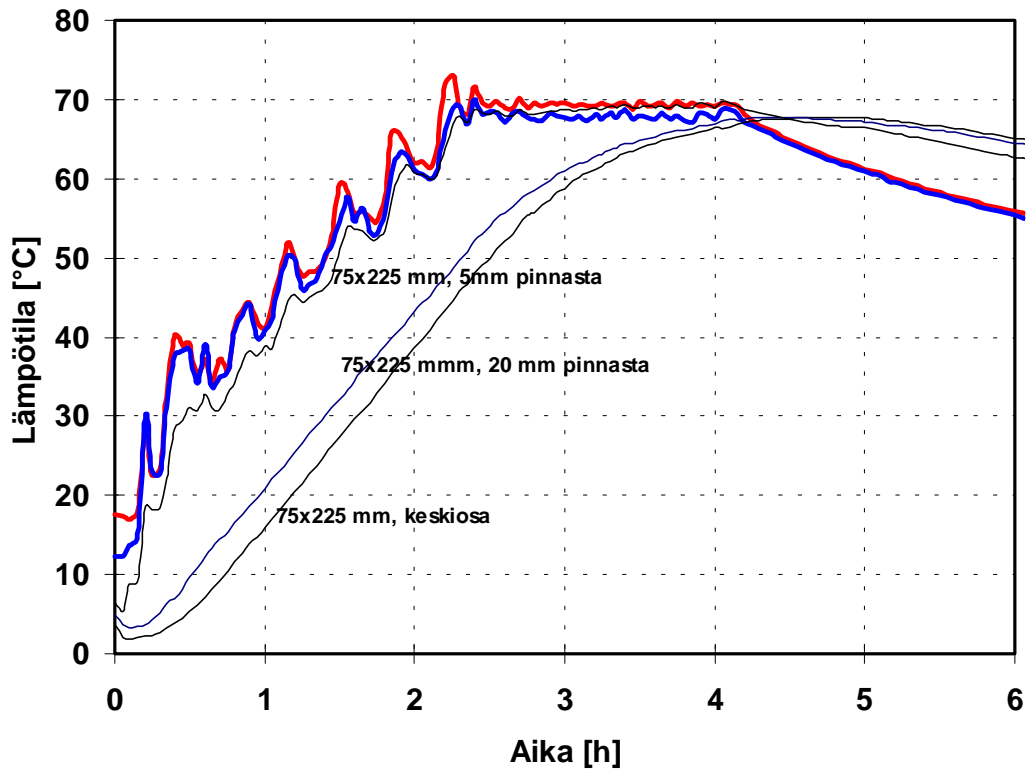
Koe 10





Koe 12





Koe 14

