



Henna Punkkinen, Nea Teerioja, Elina Merta, Katja Moliis,  
Ulla-Maija Mroueh & Markku Ollikainen

# Pyrolyysin potentiaali jätemuovin käsittelymenetelmänä

| Ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset

ISBN 978-951-38-7518-3 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2011

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

Tekijä(t) Henna Punkkinen, Nea Teerioja, Elina Merta, Katja Moliis, Ulla-Maija Mroueh & Markku Ollikainen		
Nimeke <b>Pyrolyysin potentiaali jätemuovin käsittelymenetelmänä Ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset</b>		
Tiivistelmä Julkaisussa käsitellään muovijätteen tertiäärinen kierrätyksen mahdollisuuksia ja erityisesti rumpupyrolyysimenetelmän potentiaalia kehittyä varteenotettavaksi sekalaisen muovijätteen kierrätysmenetelmäksi sen ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset huomioiden. Tarkastelua varten muovia ja puuta sisältävälle jätevirralle muodostettiin kaksi vertailtavaa konseptia, joista toinen perustui muovin rumpupyrolyysiin sekä puun energiahyödyntämiseen ja toinen puolestaan koko tarkastellun jätevirran energiahyödyntämiseen. Ympäristökuormituksista laskennassa huomioitiin kasvihuonekaasut, rikkidioksidi, typen oksidit ja hiukkaspäästöt. Tarkastelun perusteella vaikuttaa siltä, ettei muovin pyrolyysi ja puun poltto paperitehtaan kattilassa kannata saman jätevirran energiahyödyntämiseen verrattuna. Tulokset ovat kuitenkin varsin epävarmoja muiden kuin kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Tarkastelussa ei voitu huomioida pyrolyysin tuotteena syntyvän muoviöljyn käyttöä, koska muoviöljyn käytön päästöt ei tunnettu. Alustavasti on kuitenkin arvioitu tuotetun muoviöljyn mahdollista soveltuvuutta korvaamaan raskasta polttoöljyä. Lopullisen soveltuvuuden ja kysynnän selvittämiseksi tulisi suorittaa käytännön koeajoja muovijätteellä. Kustannustarkastelun perusteella muovin pyrolysointi ei yllä yhteiskunnallisesti yhtä suureen kannattavuuteen kuin teollisuusalueella sijaitseva energiantuotantolaitos. Muovin pyrolysointi ohitti kuitenkin kannattavuudessaan yhdyskunta-alueella sijaitsevat energiantuotantolaitokset, mikä kertoo oletetun sijainnin suuren vaikutuksen tuloksiin. Yhteiskunnan näkökulmasta katsottuna pyrolyysilaitoksen voidaan katsoa olevan kilpailukykyinen vaihtoehto energiantuotantolaitoksille etenkin sellaisilla alueilla, joissa energiantuotantolaitosten tuottamalle lämmölle ei ole tasaisesti jatkuvaa kysyntää. Pyrolyysilaitoksen liiketaloudellinen kannattavuus sen sijaan jäi kannattavuuden rajamaille ja selkeästi heikommaksi kuin teollisuusalueen energiantuotantolaitoksilla.		
ISBN 978-951-38-7518-3 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 28163
Julkaisu-aika Kesäkuu 2011	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 79 s. + liitt. 15 s.
Projektin nimi Yhdyskuntien kestävän jätehuollon tulevaisuuden liiketoimintamahdollisuudet	Toimeksiantaja(t) Tekes, Kestävä yhdyskunta -ohjelma	
Avainsanat Plastic waste, rotary kiln pyrolysis, incineration, environmental loads, cost effects	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 176  
VTT-WORK-176

Author(s) Henna Punkkinen, Nea Teerioja, Elina Merta, Katja Moliis, Ulla-Maija Mroueh & Markku Ollikainen		
Title <b>Pyrolysis as a method to treat plastic waste Environmental loads and cost effects</b>		
Abstract <p>In this publication, the feasibility of tertiary recycling of plastic waste is discussed, and the possibility of rotary kiln pyrolysis to develop as a potential method for treating mixed plastic waste is studied. For the comparison of environmental loads and economics, two alternative concepts to treat a waste flow containing plastic and wood were established. One is based on the rotary kiln pyrolysis of plastic wastes to produce plastic oil and the incineration of residual wood, whereas in the other concept the entire waste flow is incinerated.</p> <p>The calculation of environmental loads includes air emissions of greenhouse gases, nitrogen oxides, sulphur dioxides and fine particles. Evaluation of the two concepts on the basis of environmental loads showed that pyrolysing plastic and incinerating residual wood seems to be a weaker option. However, with the exception of GHG emissions, there were major uncertainties with respect to the evaluation results. Furthermore, the loads from the usage phase of the plastic oil formed as a product of pyrolysis are not taken into account as there is no data available on the actual emissions generated when such oil is used to fuel engines. The preliminary estimation is, however, that the plastic oil produced would be suitable for replacing heavy fuel oil. Trial runs in practice would be crucial for better analysis of the feasibility of and demand for such a product.</p> <p>According to the cost analysis, a plastic pyrolysing plant is not as socially beneficial as an energy production plant located in an industrial area. However, it seems to be a more cost-effective option than an energy production plant located in an urban area. This highlights the significant effect of the assumed plant location on the analysis results. From the social point of view, a pyrolysis plant may be considered as a competitive alternative to energy production plants, particularly in areas where there is no constant demand for power plant produced heat energy. Nevertheless, the commercial profitability of pyrolysis plants is borderline and clearly lower than that of energy production plants located in industrial areas.</p>		
ISBN 978-951-38-7518-3 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Project number 28163
Date June 2011	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 79 p. + app. 15 p.
Name of project Sustainable waste management – future business prospects	Commissioned by Tekes, Sustainable community programme	
Keywords Plastic waste, rotary kiln pyrolysis, incineration, environmental loads, cost effects	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374	

## Alkusanat

Tämän Tekesin (Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus) rahoittaman hankkeen Yhdyskuntien kestävä jätahuollon tulevaisuuden liiketoimintamahdollisuudet (SUSWASTE) tavoitteena oli tunnistaa, arvioida ja kuvata yhdyskuntien energia- ja materiaalitehokkaan, muihin toimintoihin integroidun jätahuollon suunnittelun ja toteutuksen uusia yhteistyö- ja liiketoimintakonsepteja sekä arvioida niiden käyttöpotentiaalia ja uusia sovellusmahdollisuuksia niiden ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset huomioiden. Tässä julkaisussa esitetään toinen jatkotarkasteluun valituista konsepteista.

Tutkimusta rahoittivat Tekesin lisäksi BMH Technology Oy, Ecosir Group, Ekokem Oy Ab, Helsingin talous- ja suunnittelukeskus, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto, Helsingin seudun ympäristöpalvelut – HSY, Kuusakoski Oy, Lassila & Tikanoja Oyj, Tana Oy, YIT Kiinteistötekniikka Oy, Helsingin yliopisto ja Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt: Jorma Manninen, Ekokem Oy Ab, puheenjohtaja; Pentti Jarkko, BMH Technology Oy; Mauri Leponen, Ecosir Group; Pekka Nurmi, Ecosir Group; Jukka Tarkkala, Helsingin kaupunkisuunnitteluvirasto; Kyösti Oasmaa, Helsingin talous- ja suunnittelukeskus; Reetta Anderson, HSY; Niina Tanskanen, HSY; Antero Vattulainen, Kuusakoski Oy; Lassi Hietanen, Lassila & Tikanoja Oyj; Kari Kangas, Tana Oy; Risto Kiljala, Tekes; Jarmo E. Heinonen, Tekes; Petri Pouttu, YIT Kiinteistötekniikka Oy; Markku Ollikainen, Helsingin yliopisto; Esa Mäkelä, VTT; Ulla-Maija Mroueh, VTT, sihteeri.

Tutkimuksen toteuttamisesta vastasivat VTT ja Helsingin yliopiston taloustieteen laitos. Tutkimuksen vastuullisena johtajana toimi asiakaspäällikkö Esa Mäkelä VTT:stä ja tutkimusorganisaatioiden projektipäällikköinä erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh VTT:stä sekä professori Markku Ollikainen Helsingin yliopistosta. Tutkimusryhmässä olivat mukana VTT:stä tutkijat Henna Punkkinen ja Elina Merta sekä Helsingin yliopistosta tutkijat Nea Teerioja ja Katja Moliis. Konseptien suunnittelussa avustivat lisäksi erikoistutkija Jussi Ranta ja tutkija Vesa Arpiainen VTT:stä.

Espoo, kesäkuussa 2011

Tekijät

# Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
Määritelmät ja lyhenteet.....	8
1. Johdanto .....	10
2. Muovijätteet ja niiden käsittely .....	12
2.1 Muovijätteen määrä .....	13
2.2 Keinoja jätemäärien hallintaan .....	13
2.3 Muovijätteen kierrätyksen ja energiahyödyntämisen nykytila.....	16
3. Tutkimusmenetelmien esittely .....	21
3.1 Ympäristökuormitusten arviointi.....	21
3.2 Yhteiskunnallisten kustannusten määrittäminen .....	22
4. Vertailtavat konseptit lähtötietoineen .....	24
4.1 Pyrolyysitekniikan valinta .....	24
4.2 Tarkastelun lähtökohdat.....	25
4.3 Konseptien kuvaus.....	26
4.3.1 Peruskonsepti: energiahyödyntäminen .....	26
4.3.2 Vertailukonsepti: muovin pyrolyysi ja puun energiahyödyntäminen .....	27
4.4 Toiminnallinen yksikkö ja rajaukset.....	28
4.5 Ympäristökuormitusten laskennan lähtötiedot .....	30
4.5.1 Peruskonsepti.....	32
4.5.2 Vertailukonsepti.....	34
4.6 Kustannustarkastelun lähtötiedot.....	35
4.6.1 Yksityiset kustannukset.....	35
4.6.2 Vältetyn tuotannon kustannukset .....	37
4.6.3 Ympäristönnettokustannukset .....	38
4.6.4 Lopputuotteiden myyntihinnat ja verot .....	38
5. Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset .....	40
5.1 Ympäristökuormitusten laskennan tulokset ja tarkastelu .....	40
5.1.1 Kasvihuonekaasupäästöt, CO <sub>2</sub> -ekvivalentit.....	41
5.1.2 Rikkidioksidipäästöt, SO <sub>2</sub> .....	44
5.1.3 Typen oksidit, NO <sub>x</sub> .....	46
5.1.4 Hiukkaset, PM .....	49
5.1.5 Tuhkat .....	51
6. Vaihtoehtojen kustannukset.....	52
6.1 Kustannuslaskennan tulokset ja tulosten tarkastelu.....	52
6.1.1 Teollisuusalueen energiahyödyntämisvaihtoehto P1.....	52
6.1.2 Yhdyskunta-alueen energiahyödyntämisvaihtoehto P2.....	53
6.1.3 Teollisuusalueen energiahyödyntämisvaihtoehto P3.....	54
6.1.4 Yhdyskunta-alueen energiahyödyntämisvaihtoehto P4.....	55
6.1.5 Teollisuusalueen pyrolyysivaihtoehto V1.....	57
6.1.6 Yhdyskunta-alueen pyrolyysivaihtoehto V2.....	58

6.2	Käsittelyketjujen kustannusten vertailu .....	59
6.2.1	Yhteiskunnallinen kannattavuus .....	59
6.2.2	Liiketaloudellinen kannattavuus .....	60
6.3	Kustannustarkastelun herkkyyshanalyysi .....	61
6.3.1	Puu-muovijätteen hankintakustannuksen ja hinnan vaikutus yhteiskunnalliseen ja liiketaloudelliseen kannattavuuteen.....	61
6.3.2	Lämmön hyötykäyttöosuuden vaikutus yhteiskunnalliseen ja liiketaloudelliseen kannattavuuteen.....	62
6.3.3	Muoviöljyn myyntihinnan vaikutus pyrolyysilaitoksen liiketaloudelliseen kannattavuuteen.....	63
7.	Muoviöljyn laatu ja käyttökohteet.....	65
8.	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	67
	Lähdeluettelo .....	73

## Liitteet

Liite A: Kartoitetut kierrätysvaihtoehdot

Liite B: Metso Mineralsin rengasjätteiden pyrolyysiprosessin toiminta

Liite C: Ympäristökuormitusten laskennassa käytetyt päästökertoimet

Liite D: Vaihteluvälien määrittelyssä käytetyt minimi- ja maksimiarvot sekä laskennassa käytetty arvioitu keskimääräinen kuormitus

## Määritelmät ja lyhenteet

<b>ABS</b>	Akryylinitriilibutadienistyreeni.
<b>Annuiteettimenetelmä</b>	Menetelmä, jossa investoinnin hankintameno jaetaan investoinnin pitoajan eri vuosille tasaeriksi eli annuiteeteiksi käyttäen vakioista laskentakorkokantaa.
<b>CO<sub>2</sub>-ekvivalentti</b>	Kasvihuonekaasupäästöjen karakterisointikertoimilla painotettu yhteismitta, jonka avulla voidaan kuvata eri kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua vaikutusta ilmastoon.
<b>EU-27</b>	Kaikki EU:n nykyiset 27 jäsenvaltiota (Alankomaat, Belgia, Bulgaria, Espanja, Irlanti, Iso-Britannia, Italia, Itävalta, Kreikka, Kypros, Latvia, Liettua, Luxemburg, Malta, Portugali, Puola, Ranska, Romania, Ruotsi, Saksa, Slovakia, Slovenia, Suomi, Tanska, Tšekki, Unkari ja Viro).
<b>HDPE</b>	Suurtiheyspolyeteeni.
<b>Ilmaluokitin</b>	Erottelee partikkelit eri painoluokkiin ilmapvirtauksen avulla.
<b>Kasvihuonekaasut</b>	Aiheuttavat ilmaston lämpenemistä haittaamalla auringon lämpösäteilyn pääsyä ilmakehästä takaisin avaruuteen. Tärkeimmät ilmakehässä luonnostaan esiintyvät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli ja otsoni. Lisäksi ihmiset ovat tuottaneet ilmakehään kokonaan uusia siellä luonnostaan esiintymättömiä kaasuja, esimerkiksi halogenoituja hiilivetyjä.
<b>Katalyytti</b>	Nopeuttaa kemiallista reaktiota ja madaltaa reaktion vaatimaa lämpötilaa. Ei kulu reaktiossa.
<b>Komprimointi</b>	Yhteen puristaminen.
<b>Krakkaus</b>	Pitkäketjuisten hiilivetyjen kemiallinen pilkkominen.
<b>Lämpöarvo</b>	Ilmaisee täydellisessä palamisessa kehittyvän lämmön energiamäärän polttoaineen massaa kohti.
<b>Marginaalisähkö</b>	Markkina-alueen kallein sähköntuotantomuoto tietyllä ajanhetkellä. Pohjoismaissa suurimman osan ajasta marginaalissa on kivihiihilauhteella tuotettu sähkö.
<b>Massapoltto</b>	Lajittelemattoman jätteen poltto.
<b>Masuuni</b>	Rauta- ja terästeollisuuden käyttämä kemiallinen reaktori, jossa rautamalmin sisältämät rautaoksidit pelkistetään metalliseksi raudaksi hiilen ja hiilimonoksidin avulla.



<b>Monomeerinen muovi</b>	Vastaa alkuperäistä muoviraaka-ainetta. Ks. myös polymeeri.
<b>Polttoaineteho</b>	Saadaan kertomalla polttoaineen tehollinen lämpöarvo polttoaineen syöttömäärällä aikayksikössä.
<b>Polymeeri</b>	Molekyyli, jossa useat pienet molekyylit eli monomeerit ovat liittyneet toisiinsa kemiallisin sidoksin katalyyttien vaikutuksesta prosessissa, jota kutsutaan polymeraatioksi. Muovi on yhden tai useamman polymeerin seos, johon on lisätty tämän ominaisuuksia parantavia aineita.
<b>Pulpperi</b>	Säiliö, jossa lietetään kiinteitä aineita nesteeseen, jotta aine saadaan lietemäiseen muotoon.
<b>Päästökauppa</b>	Järjestelmä, jossa haitallisia päästöjä tuottavat laitokset ovat velvollisia osoittamaan tuottamaansa päästömäärää vastaavan määrän päästöoikeuksia, joita laitokset voivat ostaa ja myydä keskenään. Päästökaupalla pyritään kustannustehokkaalla tavalla rajoittamaan haitallisia päästöjä.
<b>Päästökerroin</b>	Poltto- tai raaka-aineen käytössä syntyvä päästön määrä.
<b>Päästöoikeus</b>	Ks. päästökauppa.
<b>Reologia</b>	Sisältää mm. muovien mekaanisten ominaisuuksien tutkimisen reologisilla mittauksilla. Mittauksilla saadaan tietoa fluidien juoksevuusominaisuuksista, jotka vaikuttavat aineiden käyttäytymiseen prosessissa silloin, kun niitä siirretään tai sekoitetaan. Toisin sanoen reologia tutkii fluidien viskositeetteja.
<b>Rinnakkaispoltto</b>	Jätteen poltto voima- tai lämpökattilassa tai prosessiuunissa samanaikaisesti tavanomaisen polttoaineen kanssa.
<b>Synteesikaasu</b>	Yleisnimitys vetyä ja hiilimonoksidia sisältävälle kaasulle.

# 1. Johdanto

Jätehuoltoa ollaan liittämässä yhä tiiviimmin osaksi yhteiskunnan energia- ja materiaalihoitoa. Tätä pyrkimystä edesauttavat muun muassa lainsäädännölliset tavoitteet, jotka edellyttävät kaatopaikkasijoituksen vähentämistä ja kierrätyksen lisäämistä. Samalla painotetaan jätehuollon toimenpiteiden suunnittelua elinkaarikestäviksi, mikä kattaa kustannus-, energia- ja materiaalitehokkuuden sekä sosiaalisen kestävyuden. Myös kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoite vaikuttaa kehitykseen merkittävästi.

Lisääntynyt muovijätteen määrä on aiheuttanut yhä kasvavan yhteiskunnallisen ongelman, sillä muovijätteet muun muassa saastuttavat ympäristöä ja kuluttavat kaatopaikkojen kapasiteettia. Lisäksi muovien valmistus kuluttaa fossiilisia polttoaineita sekä muita luonnonvaroja. Keinot jätteenhallintaan löytyvät jätehierarkiasta eli EU:n jätestrategiassa määritellyistä toimintamallista, jossa eri jätehuollon vaihtoehdot on asetettu keskinäiseen paremmuusjärjestykseen. Hierarkian mukaan ensisijainen ja paras keino on estää tai vähentää jätteen syntyä. Tämä on kuitenkin varsin haasteellista ja usein jopa mahdotonta. Jos jätettä kuitenkin syntyy, jätteen haltijan on ensisijaisesti valmistettava se uudelleenkäyttöä varten ja toissijaisesti kierrätettävä se. Jos kierrätys ei ole mahdollista, on jätteen haltijan hyödynnettävä jäte muulla tavoin, esimerkiksi energiana. Jos hyödyntäminen ei onnistu, jäte on loppusijoitettava esimerkiksi kaatopaikalle. Ensisijaisuusjärjestyksestä voidaan jätehierarkian mukaan kuitenkin poiketa, mikäli jokin toinen järjestys osoittautuu elinkaaritarkastelussa ympäristön kannalta paremmaksi.

Pyrkimys lainsäädännöllisten kierrätystavoitteiden täyttämiseen tuo mukanaan kysymyksen muovijätteen kierrätystavasta. Suositaanko erilliskeräystä ja mekaanista kierrätystä, kierrätystä kemiallisin prosessein uusiksi raaka-aineiksi vai kenties jätteen polttoa teollisten prosessien rinnakkaispolttona tai erillisissä jätteenpolttolaitoksissa ja näin syntyneen energian hyödyntämistä? Vaihtoehtojen paremmuutta voidaan arvioida esimerkiksi eri menetelmävaihtoehtojen ympäristövaikutuksia ja taloudellisia kustannuksia vertailemalla.

Jättehierarkian mukaan ensisijainen keino muovijätteen kierrättämiseksi on mekaaninen kierrätys, joka tarkoittaa muovin talteenottoa ja muokkausta uusiin käyttötarkoituksiin sopivaksi (Hind 1999) niin, ettei muovin kemiallinen rakenne muutu (Plastics Eu-

rope 2009a). Mekaaninen kierrätys on elinkaariarvioinnilla mitattuna ympäristön ja yhteiskunnan kannalta paras hyödyntämismuoto, kun kierrätetään laadultaan tasaista ja puhdasta teollisuusmuovia (Myllymaa et al. 2008a). Ongelman yhdyskunnissa syntyvien muovijätteen kierrätyksen kannalta muodostaa kuitenkin jätteen epäpuhtaus ja sekalainen koostumus, minkä vuoksi mekaaninen kierrätys ei sovellu suuren sekalaisen muovijätevirran käsittelymenetelmäksi. Suurempaa epähomogeenisuutta salliva tertiäärinen kierrätys, eli muovin kemiallinen tai raaka-ainekierrätys, on sen sijaan usein nostettu potentiaaliseksi keinoksi kierrätyksen tehostamiseen lähitulevaisuudessa, vaikka vielä toistaiseksi eri tekniikoiden käyttö on ollut vähäistä. Näiden kierrätysmuotojen elinkaari vaikutuksia suhteessa muihin hyödyntämisvaihtoehtoihin ei ole myöskään laajemmin selvitetty.

Tämän tarkastelun tavoitteena on selvittää muovijätteen tertiäärisen kierrätyksen mahdollisuuksia ja tarkasteluun valitun pyrolyysimenetelmän potentiaalia kehittyä varteenotettavaksi kierrätysmenetelmäksi sen ympäristökuormitukset ja yhteiskuntataloudelliset kustannusvaikutukset huomioiden. Pyrolyysiin päädyttiin eri kierrätysvaihtoehtojen kartoituksen jälkeen, sillä erityisesti valitun menetelmän arvioitua soveltuvuutta myös sekalaiselle muovijätteelle pidettiin kiinnostavana. Tutkimus on osa SUSWASTE-hanketta, jossa pyritään löytämään kestäviä ja kannattavia liiketoimintaratkaisuja tulevaisuuden jätehuollon tarpeisiin.

Selvityksen alkuosassa paneudutaan yleisellä tasolla muovien kierrätyksen mahdollisuuksiin ja kierrätyksen nykytilaan. Tämän jälkeen kuvataan lyhyesti ympäristökuormitusten arvioinnin ja yhteiskuntataloudellisten kustannusten määrittämisen peruseräatteen sekä käydään läpi tutkimukseen valittu pyrolyysikonsepti ja vertailun mahdollistamiseksi muovijätteen polttoon perustuva toimintakonsepti lähtötietoineen ja tuloksineen. Lopuksi tarkastellaan menetelmien ympäristö- ja kustannusvaikutuksia sekä arvioidaan muovijätteen pyrolysoinnin tuotteena saatavan muovioöljyn laatua ja käyttösoveltuvuutta.

## 2. Muovijätteet ja niiden käsittely

Muovit koostuvat polymeereistä sekä erityyppisistä seos- ja apuaineista, jotka parantavat muovien työstettävyyttä ja käyttöominaisuuksia. Muovituotteilla on monia etuja muihin materiaaleihin verrattuna, sillä ne ovat monikäyttöisiä, kestäviä, kevyitä, vastustuskykyisiä esimerkiksi kemikaalien ja veden vaikutuksille, niillä on hyvä lämmön- ja sähkön eristyskyky sekä niiden tuotanto on halpaa. (Waste Online 2006.) Muoveja käytetään runsaasti esimerkiksi pakkausmateriaaleina. Vuonna 2009 EU-27-maissa jatkojalostetuista muoveista noin 40 % päätyi tuotteiden pakkausmateriaaliksi. (Plastics Europe 2010.) Muovien laajamittainen käyttö synnyttää kuitenkin suuren määrän jätettä ja jätteen määrää lisää myös muovituotteiden lyhyt käyttöikä. Esimerkiksi ruuan muovipakkaukset ovat kertakäyttöisiä ja synnyttävät jätettä nopeasti. (Waste Online 2006, Al-Salem et al. 2009.) Jätteeksi päätyvistä muovituotteista noin 40 %:lla käyttöikä on keskimäärin alle kuukauden mittainen (Achilias et al. 2007).

Muovien valmistus kuluttaa fossiilisten polttoaineiden varastoja, sillä muovin tuotannon pääraaka-aine on öljy. Muoveilla on myös haitallisia ympäristövaikutuksia, joita voitaisiin vähentää tai ehkäistä joko vähentämällä syntyvän muovijätteen määrää tai kierrättämällä muovimateriaaleja. Muovijätteiden on esimerkiksi havaittu aiheuttaneen vaurioita ekosysteemeille. (Sekine et al. 2009.) Lisäksi jätteiden huolimattoman hävittämisen on todettu aiheuttaneen valtamerien ja niiden ranta-alueiden laaja-alaisen saastumisen mikroskooppisilla muovisiruilla. Arviolta noin 60–80 % maailman valtamerien roskamääristä on muovia. (Hammond 2007.) Kaatopaikalle loppusijoitetut muovit myös hajoavat hitaasti, sillä hajoamiseen tarvittava aika voi olla jopa satoja vuosia (Waste Online 2006, Hammond 2007).

Muovijätteet voidaan jaotella alkuperänsä perusteella kotitalousjätteisiin ja teollisuusjätteisiin. Teollisuusjätemuovit ovat yleensä puhtaita ja saatavina suurissa määrissä. Suurin osa teollisuuden tuottamasta muovijätteestä on myös homogeenistä ja näin ollen helpommin kierrätettävissä kuin kotitalousmuovijäte. (Panda et al. 2010.) Suomessa suurin osa hyödynnettävästä muovijätteestä onkin juuri teollisuuden ja kaupan pakkausjätettä. Kotitalouksien muovijäte puolestaan on usein likaista ja sisältää monia erilaisia muovilaatuja. (Eerola 2006.) Kaatopaikalle päätyvästä muovijätteestä yli 99 % on peräisin yhdyskunnista. Näiden muovien kierrättämisessä on runsaasti haasteita. (Myllymaa et al. 2006.)

## 2.1 Muovijätteen määrä

Vuonna 2009 muoveja tuotettiin Euroopassa noin 55 miljoonaa tonnia tuotantomäärän ollessa maailmanlaajuisesti noin 230 miljoonaa tonnia. Euroopassa tuotevalmistajat hankkivat edelleen eri käyttötarkoituksiin noin 45 miljoonaa tonnia muoveja. Tuotanto on lisääntynyt merkittävästi vuodesta 1950, jolloin globaalin tuotantomäärän arvioitiin olevan noin 1,5 miljoonaa tonnia. (Plastics Europe 2010.) Muovin kysynnän ja kulutuksen odotetaan edelleen lisääntyvän voimakkaasti talouskasvun myötä erityisesti Aasian kehittyvissä maissa ja Itä-Euroopan uusissa EU-valtioissa (Panda et al. 2010).

Muovijätteen osuuden arvioidaan olevan noin 15–25 % koko yhdyskuntajätteen määrästä Euroopassa (Panda et al. 2010). Suomessa määrä vuonna 2007 oli noin 10 % (Moliis et al. 2009). Vuonna 2009 noin 24,3 miljoonaa tonnia muovia päätyi jätteeksi Euroopassa (Plastics Europe 2010). Suomessa yhdyskunnista peräisin olevaa muovijätettä syntyi noin 275 000 tonnia vuonna 2007 (Moliis et al. 2009). Yleensä yhdyskuntajätteen jätemuovimääriin lasketaan vain varsinainen sataprosenttinen muovi, jolloin esimerkiksi erilaisten muovipinnoitteiden ja muiden osittain muovia sisältävien tuotteiden osuuksia ei tilastoissa huomioida (Hietanen 2011). Esimerkiksi edellisen kaltaisista tilastointitapojen eroista johtuen eri lähteissä esitetyt muovijättemäärät saattavat poiketa toisistaan huomattavasti.

## 2.2 Keinoja jätemäärien hallintaan

Muovijättemäärien kokonaisvaltaiseen hallintaan on olemassa vaihtoehtoisia keinoja, jotka tähtäävät kaatopaikalle loppusijoitettavan jätemäärän vähentämiseen (Plastics Europe 2010, Panda et al. 2010). Neljän R:n sääntö: ”reduce, reuse, recycle and recover”, eli ”vähennä, käytä uudelleen, kierrätä ja ota talteen” on hyvä ohjenuora myös kamppailuun lisääntyvien muovimäärien kanssa (mm. Subramanian 2000, Plastics Europe 2009a, Panda et al. 2010). Muoveihin sovellettuna:

- **Vähentämisellä** tarkoitetaan esimerkiksi muovisten juomapullojen painon alentamista, jolloin pullon valmistamiseen kuluu aiempaa pienempi määrä muovia, ja samalla säästyy energiaa. Myös jätettä kertyy tällöin vähemmän. (Subramanian 2000, Plastics Europe 2009a.)
- **Uudelleenkäyttö** tarkoittaa pakkauksen käyttämistä sellaisenaan uudelleen puhdistuksen jälkeen. Esimerkkinä uudelleenkäytöstä toimii juomapullojen uudelleenkäyttö, jota Suomessakin harjoitettiin aiemmin varsin tuloksekkaasti. (Pakkausalan Ympäristörekisteri 2004.) Vuonna 2008 siirryttiin kuitenkin laajemmin juomapullojen kierrätykseen, jolloin muovipulloja ei käytetä uudelleen sellaisenaan, vaan niistä otetaan talteen muovi uusiokäyttöä varten (Suomen Palautuspakkaus 2009). Lisäksi maassamme käytetään uudelleen muovikoreja

ja -laatikoita (Pakkausalan Ympäristörekisteri 2004). Uudelleenkäytön etuja ovat säästöt energiankulutuksessa sekä resurssien säästyminen ja jätemäärän väheneminen (Waste Online 2006, Siddique et al. 2008).

- Muovien **kierrätysmäärät** ovat jatkuvassa kasvussa (Subramanian 2000, Plastics Europe 2010). Muovituotteet voidaan kierrättää takaisin raaka-aineeksi joko mekaanisesti tai kemiallisesti (Myllymaa et al. 2006). Materiaalikierrätyksen on todettu vähentävän kasvihuonekaasupäästöjen määrää (Myllymaa et al. 2006, Korhonen ja Dahlbo 2007).
- Muovijätteen sisältämän **energian talteenotto** on keino kaatopaikalle päätyvän jätemäärän vähentämiseen, jos muovituotetta ei voida hyödyntää millään muilla keinoin (Subramanian 2000, Plastics Europe 2009a). Muovijätteet voidaan polttaa polttolaitoksissa yhdessä muun jätteen kanssa, jolloin voidaan vähentää loppusijoitettavan yhdyskuntajätteen määrää (Subramanian 2000, Siddique et al. 2008). Muovijätteet ovat hyviä polttoaineita, sillä useimpien jakeiden lämpöarvo on lähes yhtä suuri kuin hiilellä. Poltto synnyttää vaihtoehdoisen energialähteen uusiutumattomien polttoaineiden tilalle ja näin säästää luonnonvaroja, sillä poltossa syntyvä energia voidaan käyttää hyväksi sähkön- ja lämmöntuotannossa. Polttoprosessi synnyttää lentotuhkaa ja pohjatuhkaa, jotka vaativat edelleen loppusijoitusta. Prosessissa syntyy lisäksi jonkin verran myrkyllisiä kaasuja. Syntyneet kaasut kyetään kuitenkin nykykeinoin käsittelemään. (Siddique et al. 2008.) Lisäksi poltto synnyttää verrattain runsaasti hiilidioksidipäästöjä, eikä muovijätteellä tuotettua energiaa kohdella uusiutuvana energiana. Vaikka suuri osa muoveista soveltuu poltettavaksi, on muovilaatujen joukossa silti myös sellaisia, jolle poltto ei sovellu. Näistä yleisin on klooripitoinen PVC. Energian talteenottoa ei kutsuta kierrättämiseksi, sillä siinä ei tuoteta uudelleen hyödynnettävää materiaalia.

Keinot muovijätteen vähentämiseksi voidaan esittää myös toisentyyppisellä jaottelulla, jossa kierrätysmenetelmät jaetaan primäärisiin, sekundäärisiin, tertiäärisiin ja kvartäärisiin menetelmiin (Hind 1999, Al-Salem et al. 2009).

- **Primäärisellä kierrätyksellä** tarkoitetaan prosessia, jonka tuloksena muovijäte voidaan käyttää alkuperäiseen tai vastaavanlaiseen tarkoitukseen uudelleen. Primääriseen kierrätykseen soveltuva materiaali koostuu yleensä yksittäisestä muovilaadusta ja sen tulee olla melko puhdasta. Näiden vaatimusten vuoksi primäärisesti kierrätettävät muovit ovat yleensä teollisuuden prosessijätemuoveja, eikä menetelmää kyetä käyttämään laajemmalti kotitalousmuovien kohdalla. (Al-Salem et al. 2009.) Lisäksi myös muovipakkausten uudelleenkäyttö voidaan lukea primääriksi kierrätykseksi (Hind 1999).

- **Sekundäärisellä** eli mekaanisella kierrätyksellä tarkoitetaan muovin talteenottoa ja muokkausta uusiin käyttötarkoituksiin sopivaksi (Hind 1999). Tekniikka soveltuu kuitenkin vain yksittäisten muovilaatujen kierrättämiseen (Al-Salem et al. 2009). Mekaanista kierrätystä voidaan käyttää lähinnä teollisuusjättemuovien käsittelyssä ja joidenkin harvojen kotitalouksista kerättyjen muovijätteiden (kuten PET-muovien) käsittelyssä, sillä mekaaninen kierrätys sallii vain vähän epäpuhtauksia ja vaatii muovin lajittelun ennen prosessointia tai sen aikana. (Sekine et al. 2009, Al-Salem et al. 2009.) Erottelun jälkeen muovi voidaan sulattaa suoraan ja muovata uuteen muotoon (Siddique et al. 2008). Usein kuitenkin käytetään monivaiheisempaa tekniikkaa, jossa muovi rouhitetaan ensin hiutaleiksi tai raemaiseen muotoon. Tämän jälkeen epäpuhtaudet poistetaan, muovaines pestään ja kuivataan sekä lopulta puristetaan pelleteiksi tai muiksi muovituotteiksi. (Korhonen ja Dahlbo 2007, Al-Salem et al. 2009.) Huolellinen esikäsittely on edellytyksenä ominaisuuksiltaan korkeatasoisen lopputuotteen saavuttamiseksi (Al-Salem et al. 2009).
- **Tertiäärinen kierrätys** pitää sisällään sekä kemiallisen että raaka-ainekierrätyksen (Hopewell et al. 2009). Kemiallinen kierrätys (engl. chemical recycling) muuttaa materiaalin kemiallista rakennetta siten, että tuloksena syntyneet kemikaalit voidaan käyttää uudelleen alkuperäisen materiaalin valmistamiseen. Raaka-ainekierrätys (engl. feedstock recycling) puolestaan muuttaa materiaalin kemiallista rakennetta ja syntyneet kemikaalit voidaan käyttää muussa tarkoituksessa kuin alkuperäisen materiaalin valmistamiseen. (Tukker 2002.) Näitä tuotteita voidaan käyttää syöteaineina monissa teollisuuden jatkojalostusprosesseissa tai polttoaineissa (Panda et al. 2010). Muovijätteitä voidaan myös käyttää pelkistimenä masuuneissa rautamalmien tuotannossa raskaan polttoöljyn sijaan. Nykyisellä raudan tuotantomäärällä voitaisiin muovijätteitä käyttää noin 220 tuhatta tonnia vuodessa Euroopassa. (Plastics Europe 2009a.)
- **Kvartaarisessa menetelmässä** muovituotteen sisältämä energia otetaan talteen sen jälkeen kun muovi on päätynyt jätteeksi. Energian talteenotto selitetään sivulla 14.

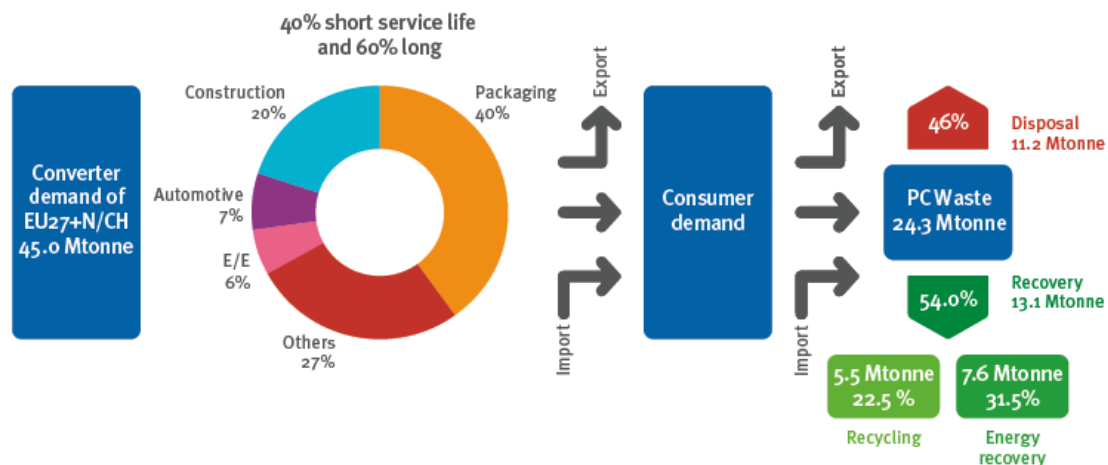
Muovien haitallisten vaikutusten vähentämiseksi on kehitetty myös erilaisia hajoavia muoveja sekä biomuoveja. Muovien valmistaminen kasvien tärkkelyksestä on jo yleistä, ja on hyvinkin mahdollista, että tulevaisuudessa muoveja valmistetaan suoraan itse kasveissa (Seppänen 2008). Hajoavat muovit ovat joko niin kutsuttuja biohajoavia muoveja, jotka sisältävät pienen osan ei-öljypohjaista materiaalia, joka pilkkoutuu luonnossa ja hajottaa muovin, tai valohajoavia muoveja, jotka hajoavat joutuessaan tekemisiin auriongonvalon kanssa. Biohajoavia muoveja on käytetty muun muassa biohajoavissa kertakäyttöaterimissa, jotka hajoavat noin kuudessa viikossa. Lisäksi on suunniteltu, että

hajoavia muoveja voitaisiin käyttää tulevaisuudessa myös esimerkiksi tietokoneissa ja autojen osissa. (Waste Online 2006).

Hajoavien muovien käytössä on kuitenkin omat hankaluutensa, sillä muovit hajoavat vain niille sopivissa olosuhteissa. Esimerkiksi kaatopaikoilla muovi voi hautautua muun jätteen alle eikä tällöin altistu auringonvalolle, jolloin myöskään hajoamista ei tapahdu. Lisäksi biomuovien anaerobinen hajoaminen voi lisätä metaanipäästöjen määrää ja muovijätteiden lajittelu saattaa hankaloitua, kun sekaisin on sekä hajoamattomia että hajoavia muoveja. On myös mahdollista, että muovijätteen määrä lisääntyisi tulevaisuudessa hajoavien muovien myötä, koska kuluttajat olettaisivat kaikkien muovien hajoavan biologisesti ja häviävän jälkiä jättämättä. (Waste Online 2006).

### 2.3 Muovijätteen kierrätyksen ja energiahyödyntämisen nykytila

Euroopassa vuonna 2009 syntyneen muovijätteen määrästä 54 % (13,1 miljoonaa tonnia) hyödynnettiin materiaalina tai energiana ja 46 % (11,2 miljoonaa tonnia) päättyi loppusijoitettavaksi kaatopaikalle (kuva 1). Hyödyntämättömän ja hyödynnetyn muovijätteen määrä on siis tällä hetkellä karkeasti noin puolet ja puolet. Hyödynnettäväksi päätyneestä muovista 5,5 miljoonaa tonnia kierrätettiin ja 7,6 miljoonaa tonnia hyödynnettiin energiana. (Plastics Europe 2010.)



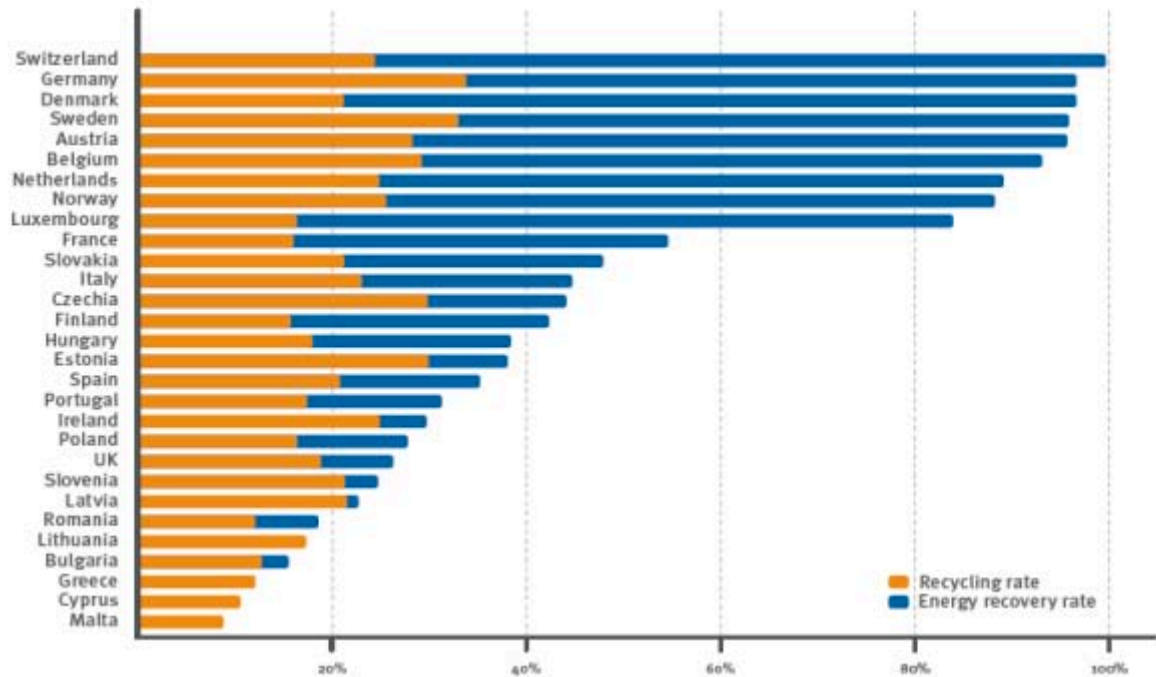
Kuva 1. Muovituotteiden elinkaari EU-27-maissa vuonna 2009 (Plastics Europe 2010).

Kuvassa 2 on esitetty maakohtaisesti Euroopassa vuonna 2009 joko energiana tai materiaalina hyödynnetty muovijätteen määrä suhteutettuna muovijätteen kokonaismäärään. Maiden väliset erot ovat varsin suuria. Esimerkiksi Sveitsissä, Tanskassa, Saksassa ja Ruotsissa vain hyvin pieni osa muovijätteestä päättyy kaatopaikoille, kun taas Kreikassa,



## 2. Muovijätteet ja niiden käsittely

Liettua ja Kyproksella muovijätteen hyödyntämisen osuus jää noin 10 %:iin. (Plastics Europe 2010.) Suomi sijoittuu kuvassa kaavion keskivaiheille. Verrattuna edelliseen vuoteen on kokonaishyödyntämisaste Suomessa noussut yli 40 %:iin, kun vielä vuonna 2008 se jäi noin 35 %:n tienoille. Hyödyntämisastetta nostaa etenkin kasvanut energiahyödyntämisen osuus. (Plastics Europe 2009a ja 2010.)



Kuva 2. Hyödynnetyn muovijätteen osuus kaikesta syntyvästä muovijätteestä Euroopan maissa vuonna 2009 (Plastics Europe 2010).

Suomessa vuosittain yhdyskunnissa syntyvän muovijätteen määrästä kaatopaikalle päätyy noin 130 000–244 000 tonnia, kierrätykseen noin 10 000–32 000 tonnia ja energiahyötykäyttöön noin 21 000–35 000 tonnia (Moliis et al. 2009, Kärhä 2010a). Näissäkin osuuksissa esiintyy lähdekohtaista vaihtelua. Vertailun vuoksi Euroopan ulkopuolisissa maissa, esimerkiksi Japanissa, muovijätettä syntyi vuonna 2007 noin 9,9 miljoonaa tonnia, josta hyödynnettiin 73 % eli 7,2 miljoonaa tonnia (Plastic Waste Management Institute 2009). Japanissa hyötykäyttöaste on verrattain korkea moniin muihin maihin nähden (Sekine et al. 2009), koska maan korkea väestötiheys ja käsittelymäärien koko luovat skaalaetua. Yhdysvalloissa muovijätettä syntyi noin 30 miljoonaa tonnia, joka edusti noin 12 %:a maan yhdyskuntajätteen määrästä vuonna 2008. Muovijätteestä kierrätettiin kuitenkin vain 6,8 % eli noin 2,1 miljoonaa tonnia. (EPA 2009.)

Suomen kaikista muovijätteistä noin neljännes hyödynnetään tällä hetkellä energiana (kuva 2). Energiahyödyntämisen osuus on Suomessa verrattain pieni esimerkiksi moneen muuhun Euroopan maahan verrattuna. Euroopassa toimii tällä hetkellä yli 400 jä-

tettä polttavaa laitosta, jotka käsittelevät 64 miljoonaa tonnia yhdyskuntien, kaupan ja rakentamisen jätteitä vuosittain (Plastics Europe 2009a).

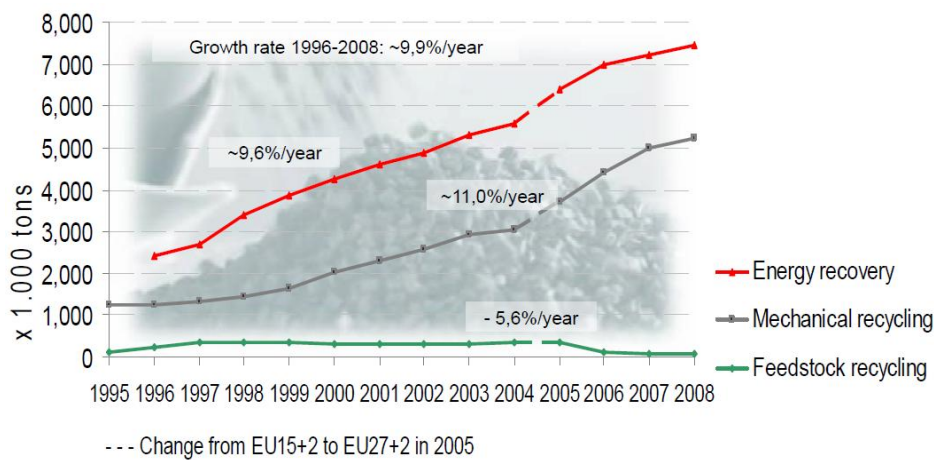
Erilaisia muovilaatuja on noin 50 erilaista, joista jokainen on kierrätettävissä (Waste Online 2006). Yleisimmin käytetty muovi on polyeteeni (PE); lisäksi polypropeenin (PP), polystyreenin (PS), polyvinyylikloridin (PVC) ja polyeteenitereflaatin (PET) käyttö on yleistä. Nämä viisi yleisintä muovilaatua kattavat noin 75 % koko Euroopan muovitarpeesta. (Plastics Europe 2010.) Vaikka teoriassa puhtaita muovilaatuja voidaan kierrättää, on tänä päivänä usein taloudellisesti kannattavampaa hankkiutua eroon osasta muoveja kuin kierrättää niitä. Käytännössä vain PET- ja HDPE-muovien kierrätys on laajamittaista. (Hammond 2007.) Kierrätettyjä muoveja voidaan käyttää monissa erilaisissa käyttötarkoituksissa. Sekalaisesta muovijätteestä voidaan kuitenkin valmistaa vain toisarvoisia tuotteita, eikä niitä voida käyttää kuten alkuperäistä raakaainetta. (Naumanen 2005.) Kierrätettyjä muoveja ei myöskään yleensä käytetä ruuan pakkauksessa hygieniasyiden vuoksi (Waste Online 2006). Muovijätteitä voidaan käyttää myös täyteaineina betonin ja asfaltin valmistuksessa. Tässä käyttötarkoituksessaan muovien kemiallisella koostumuksella ei juuri ole merkitystä. (Rebeiz ja Craft 1995.)

Vuodesta 1995 mekaanisesti kierrätetyn muovijätteen määrä Euroopassa on noussut keskimäärin 11 % vuodessa (Plastics Europe 2009a). Vuonna 2008 mekaanisesti kierrätettiin reilu 5 miljoonaa tonnia muovijätettä, joka vastaa hieman yli 20 %:a Euroopan muovijätteen kokonaismäärästä (Kärhä 2010b). Mekaanisen kierrätyksen rajoitusten vuoksi sekalaisen muovijätteen kierrätystä mietittäessä vaihtoehtona usein esiintyy tertiäärinen kierrätys. Se pitää sisällään useita eri tekniikoita, joiden avulla polymeerit voidaan hajottaa kemiallisiksi raaka-aineiksi tai polttoaineiksi (Aguado et al. 2008) lämmön, katalyyttien ja erilaisten kemikaalien avulla. Tällä hetkellä tertiäärisistä kierrätystekniikoista pääasiallisessa käytössä on kolme erilaista tekniikkaa, depolymerointi eli polymeerien hajottaminen, kaasutus eli osittainen hapetus ja krakkaus (terminen, katalyyttinen ja hydrokrakkaus). (Panda et al. 2010.) Terminen ja katalyyttinen krakkaus ovat pyrolyysimenetelmiä. Menetelmistä kaasutus vaatii vähiten esikäsittelyä, tätä seuraavat termiset käsittelyt ja katalyyttinen krakkaus. Eniten käsittelyjä tarvitaan depolymeroinnissa. Lopputuotteen kaupallinen arvo seuraa lähes päinvastaista järjestystä, eli eniten esikäsittelyä vaativan depolymerisaation lopputuotteena saatavat monomeerit ovat kaupallisesti arvokkaimpia. Vastaavasti synteesikaasujen ja termisten öljyjen hinta on matalammalla kuin katalyyttisten öljyjen hinta. (Aguado ja Serrano 1999.)

Raaka-ainekierrätys soveltuu useammille muovilaaduille kerrallaan, eikä monimutkaisia esikäsittelyjä yleensä tarvita. Toisaalta menetelmät ovat kalliita ja vaativat suuria jätemääriä käsittelyyn ollakseen taloudellisesti kannattavia. Taloudellinen kannattamattomuus olikin pitkään tekniikoiden käytön esteenä. (Aguado ja Serrano 1999.) Raaka-ainekierrätyksen eri tekniikat ovat kuitenkin viime vuosikymmenen aikana muuntuneet lupaavasta ideasta lähes toteuttamiskelpoisiksi ja potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi kasvavien muovijättemäärien käsittelemiseksi. Monia kaupallisia prosesseja on kehitetty viime

vuosien aikana maailmalla. Useimmat näistä prosesseista ovat tähdänneet dieselpolttoaineen valmistukseen. Seuraavana askeleena tekniikoiden yleistymiselle olisi aikaansaada läpimurto suuremmassa kaupallisessa mittakaavassa. (Aguado et al. 2008.)

Vaikka raaka-ainekierrätys mainitaan usein merkittävänä keinona kierrätyksen tehostamiseksi lähivuosina, on eri tekniikoiden käyttö toistaiseksi ollut runsaasta tutkimuksesta huolimatta vähäistä (kuva 3, feedstock recycling), kun taas energiahyödyntämisen ja mekaanisen kierrätyksen osuudet ovat nousseet tasaisesti. Vain noin 2 % muovijätteistä kierrätetään tertiäärisin menetelmin. Esimerkiksi Japanissa tertiäärisesti kierrätetty muovijätteen osuus on samaa luokkaa kuin Euroopassa (2,7 %). (Shioya et al. 2007 Aguado et al. 2008 mukaan.) Jotta raaka-ainekierrätystä voitaisiin tehostaa, tulisi menetelmien teknisten ja taloudellisten ongelmien selvittämiseen kiinnittää riittävästi huomiota (Aguado et al. 2007). Kierrätysprosessin kannattavuus riippuu useista usein toisiinsa liittyvistä tekijöistä, joita ovat esimerkiksi muovijätteen puhtaus, prosessi-investointien kustannukset ja lopputuotteen arvo (Aguado ja Serrano 1999). Myös raakaöljyn hinnan nousun on arvioitu lisäävän kiinnostusta esimerkiksi pyrolyysitekniikoi- ta kohtaan tulevaisuudessa (Aguado et al. 2008).



Kuva 3. Materiaalina, raaka-aineena ja energiana hyödynnetyn jätteen määrän kehitys Euroopassa (Kärhä 2010b).

Muovijätteiden kierrätyksellä on useita teknisiä ja taloudellisia rajoituksia. Muovit ovat usein likaisia sekä kontaminoituneita muilla materiaaleilla, kuten metalleilla. Tämä voi vahingoittaa jätteenkäsittelyssä käytettävää laitteistoa. Muovijäte on usein luonteeltaan epähomogeenista eli sisältää useita eri muovilaatuja. Muovilaaduilla on toisistaan poikkeavat terminen stabiilitetti, sulamiskäyttäytyminen ja reologia, mikä vaikeuttaa käsittelyä. Epähomogeenisesta muovijätteestä valmistettujen kierrätysmuovituotteiden mekaaninen kestävyys voi jäädä huonoksi. Lisäksi kierrätysprosessin tulisi olla riittävän jous-

tava, jotta jätteen vaihteleva koostumus ei aiheuttaisi ongelmia prosessissa. Alhaisen tiiviytensä vuoksi jätteet on myös yleensä puristettu pienempään tilavuuteen, jotta kuljetuskuluissa voitaisiin säästää, mutta tällöin kuitenkin jätteen käsittely hankaloituu. (Rebeiz ja Craft 1995.)

Jotta yhdyskuntien sekalaisia muovijätteitä voitaisiin kierrättää, ne pitäisi erottaa muista kotitalousjätteistä. Jätteiden erottelemiseksi onkin kehitetty erilaisia mekaanisia ja automaattisia erotustekniikoita; käytössä on muun muassa muovijätteiden erilaisen tiheyden tunnistamiseen perustuva erotusmenetelmä. (Al-Salem et al. 2009.) Toistaiseksi ei kuitenkaan ole onnistuttu kehittämään taloudellisesti kannattavaa menetelmää muovilaatujen erottamiseksi toisistaan (Panda et al. 2010), ja esimerkiksi Suomessa kotitalouksien muovijätteistä lajitellaan erikseen lähinnä vain palautettavat muovipullot (Korhonen ja Dahlbo 2007). Kotitalouksien jätemuovit päätyvätkin yleensä joko poltettaviksi tai sijoitettaviksi kaatopaikoille (Siddique et al. 2008).

Muovien uusiokäyttömahdollisuuksia parantaisi muovivalikoiman vähentäminen, muovijätteen suurempi puhtaus, muovien talteenoton parempi mitoittaminen sekä hallittu jatkoprosesointi (Savonlinnan Seudun Jätehuolto 2003). Kierrätyksen kannalta prosessia yksinkertaistaisi hieman se, että pakkaukset olisivat joko pelkästään paperia tai muovia, eikä näiden kahden sekoitusta (Myllymaa et al. 2006). Lisäksi muovijätteiden erottelumenetelmiä tulisi kehittää (Naumanen 2005).

### 3. Tutkimusmenetelmien esittely

Yksi SUSWASTE-projektin tavoitteista oli arvioida valittujen, uusien jätehuoltoteknologioiden ympäristömyötävyyttä ja taloudellista kannattavuutta. Ympäristömyötävyyden arvioimiseksi suoritettiin teknologian aiheuttamiin ympäristökuormitukseen perustuva elinkaari-inventaario. Elinkaari-inventaarion tarkastelurajauksia noudattaen määritettiin myös vertailtavien teknologioiden yhteiskunnalliset elinkaarikustannukset, jotka sisältävät hintajärjestelmän piiriin kuuluvien yksityisten kustannuksien lisäksi rahamääräistetyt ympäristökuormitukset sekä korvaushyödyt vältetyn tuotannon kustannuksista. Lisäksi tarkasteltiin vaihtoehtojen liiketaloudellista kannattavuutta. Seuraavissa alaluvuissa esitellään tarkemmin ympäristökuormitusten arviointiin ja yhteiskuntataloudellisten kustannusten määrittämiseen käytettyjä menetelmiä.

#### 3.1 Ympäristökuormitusten arviointi

Elinkaari-inventaario (LCI, life cycle inventory) kuuluu osana elinkaariarviointiin (LCA, life cycle assessment), jolla tarkoitetaan järjestelmän koko elinkaaren aikana syntyneiden ympäristökuormitusten tunnistamista, määrällistämistä, arviointia ja tulkitusta. Elinkaari-inventaariossa varsinaista vaikutusarviointia ei kuitenkaan tehdä. Elinkaaren vaiheita ovat tuotteiden tai niiden raaka-aineiden tuotantoon liittyvät valmistus- ja jalostusprosessit, kuljetukset, käsittelyt, hyödyntäminen ja loppusijoitus. Jokaisesta järjestelmään kuuluvasta yksiköstä kerätään tiedot kulutettavien luonnonvarojen tai muiden raaka-aineiden sekä energian määrästä ja selvitetään vaiheissa syntyvät päästöt. Näin voidaan arvioida erilaisten ympäristöä kuormittavien tekijöiden aiheuttamien potentiaalisten ympäristökuormitusten suuruus. (Myllymaa et al. 2005.) Jätteiden hyödyntämistä koskevissa elinkaaritarkastelussa ei kuitenkaan ole tarpeen huomioida ympäristökuormituksia prosesseista, joissa jäte syntyy, vaan tarkastelu aloitetaan jätteen syntyhetkestä. Tämä tarkoittaa sitä, että jätteet huomioidaan niin sanotusti nollapäästöisinä. Menettely on perusteltua, kun tarkoituksena on verrata erilaisten jätteenkäsittelyketjujen välisiä eroja, jolloin jätettä synnyttävillä prosesseilla ei ole merkitystä. (Myllymaa et al. 2008b.)

Jätteenkäsittelyketjuista syntyy sekä suoria päästöjä että epäsuoria korvaushyötyjä. Syntyneet päästöt muodostavat tarkasteltavan järjestelmän kuormitukset. Korvaushyöty-

jä syntyy, jos jäteperäisellä materiaalilla tai energialla voidaan korvata ympäristöä enemmän kuormittavia materiaalin- tai energiantuotantoprosesseja. Korvattavissa prosesseissa vältetyt päästöt vähennetään tutkittavassa järjestelmässä syntyneistä kuormituksista. Erotuksena saatavat nettopäästöt ovat negatiiviset, jos tutkittava järjestelmä on ympäristökuormituksiltaan korvattavaa järjestelmää edullisempi. Vastaavasti nettopäästöt ovat positiiviset, jos tutkitun vaihtoehdon kuormitus ylittää vertailussa olevan järjestelmän kuormitukset, jolloin järjestelmä on ympäristön kannalta epäsuotuisampi vaihtoehto. Aina tutkittavalle järjestelmälle ei kuitenkaan löydy korvaavuutta olemassa olevista materiaalin- tai energiantuotantoprosesseista.

Elinkaariarvioinnissa tutkittavan järjestelmän syötteet (tulevat aine- ja energiavirrat), tuotokset (lähtevät aine- ja energiavirrat sekä päästöt) ja mahdolliset muut vaikuttavat tekijät lasketaan toiminnallista yksikköä (FU, functional unit) kohti. Toiminnallinen yksikkö valitaan siten, että se perustuu tutkimuksen kohteena olevan järjestelmän ensisijaiseen toimintoon. Jätehuoltoon liittyvissä elinkaariarvioinneissa toiminnallisena yksikkönä käytetään yleisesti joko yhtä tuotettua jätelajitonna tai tietyn ajan kuluessa syntyntä jätteiden kokonaismäärää. (Myllymaa et al. 2008b.)

## 3.2 Yhteiskunnallisten kustannusten määrittäminen

Yhteiskunnallisen ja yksityisen päätöksenteon tukena tarvitaan tietoa ratkaisujen elinkaarikustannuksista. Elinkaarikustannusten laskentamenetelmä (SLCC, social life cycle costs) määrittää tutkittavan järjestelmän elinkaaren aikaiset nettokustannukset elinkaariarviointia ja sen rajoituksia noudattaen (Dahlbo et al. 2007, Myllymaa et al. 2008b). Tämä mahdollistaa kahden menetelmän tulosten rinnastamisen. Menetelmässä elinkaaren eri ajanjaksoille kohdistuvat tulot ja menot nykyarvoistetaan ja investointien vuotuiset kustannukset määritetään konventionaalisen käytännön mukaan annuiteetilaskelmilla.

Yhteiskunnallisia nettokustannuksia laskettaessa näkökulma on liiketaloudellista kannattavuutta laajempi, jolloin tarkasteltavat kustannuserät poikkeavat yritystoiminnan kannalta relevanteista kustannuseristä. Elinkaarisia yhteiskunnallisia nettokustannuksia laskettaessa otetaan huomioon yksityisten taloudenpitäjien nettokustannusten lisäksi ympäristövaikutusten yhteiskunnassa synnyttämät nettokustannukset. Tämä tehdään rahamääräistämällä todetut potentiaaliset ympäristövaikutukset. Liiketaloudellisesta tarkastelusta etäännyttäessä ei ole myöskään tarpeen ottaa huomioon siirtosummaa, kuten veroja, jotka toisen toimijan menoina ja toisen tuloina kumoutuvat yhteiskunnallisen tason laskelmassa.

Kuten ympäristökuormituksia määritettäessä, myös yhteiskunnallisten elinkaarikustannusten laskennassa, voidaan eritellä toiminnan aiheuttamat suorat kustannukset ja epäsuorat kustannussäästöt. Kustannuksia syntyy jätteenkäsittelystä niin markkinoilla havaittavina yksityistaloudellisina kustannuserinä kuin negatiivisten ympäristövaikutusten synnyttäminä kustannuksina. Kustannussäästöjä puolestaan saadaan, jos jäteperäi-

sellä materiaalilla tai energialla voidaan olettaa korvattavan jotain toista tuotantomuotoa. Vältetyt kustannukset sisältävät sekä korvattavan toiminnan yksityistaloudelliset kustannuserät että vältettyjen ympäristövaikutusten rahallisen arvon. Yhteiskunnallinen nettokustannuslaskelma koostuu siten kuvan 4 mukaisista kustannuseristä. Nettokustannukset ilmaistaan jätetonnina kohden laskettuina. Tuloksissa negatiivinen arvo tarkoittaa yhteiskunnan kannalta kannattavaa järjestelmää. Positiivinen arvo kertoo, että yhteiskunnassa syntyvä nettokustannusmuutos lisää yhteiskunnan kokonaiskustannuksia poistuvaan järjestelmään verrattuna.

$$\begin{array}{c}
 \text{Yhteiskunnalliset nettokustannukset} \\
 = \\
 \text{Yksityistaloudelliset nettokustannukset} \\
 (= \text{Tarkasteluvaihtoehdon kustannukset} - \text{Vältetyn tuotannon kustannukset}) \\
 + \\
 \text{Ympäristönettokustannukset} \\
 (= \text{Ympäristökustannukset} - \text{Ympäristöhyvytykset})
 \end{array}$$

Kuva 4. Yhteiskunnallisten nettokustannusten kustannuserät.

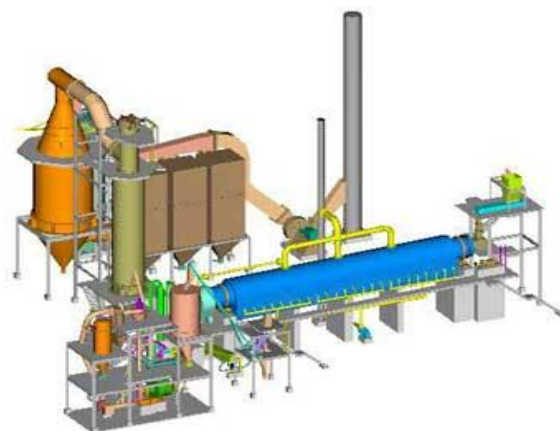
Tässä selvityksessä kannattavuustarkastelu tehdään yhteiskunnallisen tarkastelun lisäksi myös liiketaloudellisesta näkökulmasta, jolloin toiminnan kannattavuus määrittyy toiminnanharjoittajan kohtaamista menoista ja tuloista. Toiminnanharjoittajan nettotuotto määräytyy yksityistaloudellisten kustannusten ja myynnistä saatavan tulon erotuksena. Liiketaloudellista kannattavuutta määritettäessä laskelmaan sisältyvät myös toiminnanharjoittajalle lankeavat verot ja tuet. Kustannuslaskelmissa käytetään elinkaaren eri ajanjaksoille kohdistuvia tulojen ja menojen nykyarvoa, ja investointien vuotuiset kustannukset määritetään konventionaalisen käytännön mukaan annuiteetilaskelmilla.

## 4. Vertailtavat konseptit lähtötietoineen

### 4.1 Pyrolyysitekniikan valinta

Tavoitteena oli valita jatkotarkastelua varten menetelmä, jota voitaisiin soveltaa yhdyskunnissa syntyvän sekalaisen muovijätteen kierrättämiseen. Koska mekaaninen kierrätys soveltuu vain yksittäisille puhtaille muovilaaduille, keskitytään tarkastelemaan tertiääristen kierrätysvaihtoehtojen tuomia mahdollisuuksia muovijätteen hallintaan. Käsitellyt vaihtoehdot on kuvattu tarkemmin liitteessä A.

Koska toiminnassa olevia muovijätteen pyrolyysiprosesseja ei juuri ole käytössä ja useimmat liitteessä A esitetyt menetelmät pitivät sisällään erilaisia ongelmakohtia tai lähtötietoja ei saatu, päädyttiin tarkasteluun ottamaan hypoteettinen, teknisesti mahdollisimman toteuttamiskelpoinen ja sekalaisen muovijätteen käsittelyyn soveltuva pyrolyysitekniikka. Konseptin luonteen vuoksi tarkastelu sisältää paljon oletuksia, sillä menetelmä ei ole käytössä muovijätteen pyrolysoinnissa. Tarkasteluun valittu pyrolyysimenetelmä on muokattu Metso Mineralsin (aik. Svedala Industries) kehittämästä menetelmästä rengasjätteen pyrolysointiin. Metson prosessissa käytetään epäsuorasti eri lämpötila-alueille lämmitettyä rumpu-uunia (kuva 5) (Metso Minerals 2010). Menetelmän eri vaiheet on kuvattu tarkemmin liitteessä B.



Kuva 5. Kaupallisen mittakaavan rumpupyrolyysilaitos voisi näyttää tältä (Metso Minerals 2010).



Menetelmän toimivuuden edellytyksenä on, että pyrolysoitava muovimateriaali saadaan erotettua riittävän puhtaana muusta jätevirrasta. Periaatteessa erottelu ei ole välttämätöntä, sillä menetelmä prosessoi kaiken siihen syötettävän materiaalin. Käytännössä kuitenkin muusta aineksesta, kuten vaikkapa puusta, syntyy tervaa ja vettä, jotka heikentävät tuotteen laatua ja vaikeuttavat jatkoprosessointia. (Ranta 2011.) Muovijätteen erottelu voitaisiin periaatteessa suorittaa eri tavoin, esimerkiksi erilliskeräyksen tai erottelulaitoksen avulla, tai jäte voidaan ottaa talteen sivutuotteena muusta jätteen käsittely- tai teollisuusprosessista. Tähän tarkasteluun valittua integroitua lähestymistapaa voidaan pitää mielekkäämpänä kuin erillistä erottelulaitosta, sillä tällöin pystytään säästämään erottelukustannuksissa.

Pyrolysoitavan muovijätteen arveltiin sisältävän 99-prosenttisesti PE-, PP- ja PS-muoveja (Hietanen 2010a), jolloin lisälajittelua pyrolyysiprosessia varten ei tarvittaisi. Kuitenkin haitta-aineiden, esimerkiksi PVC:n, erotusta voidaan todellisuudessa tarvita, sillä niiden esiintyminen suhteellisen pieninäkin pitoisuuksina heikentää tuotteena syntyvän öljyn laatua. Pyrolyysiprosessi saattaa myös edellyttää kuivausta, mikäli vesipitoisuus on liian korkea. Pieni määrä kosteutta (< 5 %) voitaneen hyväksyä ja ajaa prosessin läpi höyrynä (Ranta 2010). Tässä tarkastelussa ei oleteta tarvittavan kuivausta.

Tarkastelussa oletetaan, että prosessi voisi toimia muovijätteille pääpiirteissään samoin kuin rengasjätteille, vaikka todellisuudessa prosessien välillä olisi ainakin laitekniisiä eroja. Muovien syötön onnistuminen on prosessin toimivuuden kannalta ensiarvoisen tärkeitä. Koska muovi on kevyttä rengasmurskeeseen verrattuna, voi syöttimien suunnittelu muodostua isoksi ongelmaksi tai muovi vaatii komprimointia ennen syöttöä reaktoriin. Muita mahdollisia eroavaisuuksia voi syntyä esimerkiksi muovien helpomasta hajoamisesta, jolloin rummun koko vs. laitoksen kapasiteetti ei ole sama kuin rengaspyrolyysissä. Myös lauhdutinosa on suhteessa erikokoinen kuin renkaiden tapauksessa, koska öljysaanto on suhteessa suurempi. Muovien pyrolyysi ei kuitenkaan vaatine metallien erotusta toisin kuin rengaspyrolyysi, joten tätä kautta prosessi voisi toimia hieman yksinkertaisemmin. (Ranta 2010.)

## 4.2 Tarkastelun lähtökohdat

Tarkastelun lähtökohtana on, että prosessointiin soveltuvaa muovijätettä tulee olla sopivien kuljetusetäisyyksien päässä saatavilla riittävän suuri määrä toiminnan jatkuvuuden mahdollistamiseksi. Lisäksi muovijätteen tulee olla riittävän puhdasta, jolloin prosessi voisi ainakin teoriassa toimia ongelmitta. Koska kotitalouksissa muodostuva muovijäte on laadultaan hyvin epähomogeenista ja likaista, jouduttiin kotitalousjätemuovit hylkäämään. Tarkastelussa oletetaan käytettäväksi teollisuuden ja kaupan muovijätevirtoja niiden tasaisemman laadun ja helpomman saatavuuden vuoksi.

Koska muovijätteitä erilliskerätään Suomessa verrattain vähän, oletetaan riittävän muovimateriaalin saannin takaamiseksi sekä perus- että vertailukonseptin kohdalla, että

muovijäte saataisiin sivutuotteena etanolintuotantoprosessista. Ajatus perustuu UPM:n ja Lassila & Tikanojan yhdessä Pöyryn ja VTT:n kanssa kehittämään uuteen konseptiin bioetanolin valmistamiseksi kaupan ja teollisuuden jätteistä. Prosessissa hyödynnettävä kaupan ja teollisuuden jäte sisältää puuta, paperia ja kartonkia sekä muovia. Paperi- ja kartonki käytetään etanolin valmistuksessa ja loppuosa jätteestä, eli sen sisältämä puu- ja muovifraktio, voidaan ohjata voimalaitokselle, jossa siitä tuotetaan energiaa. (Similä 2010.) Energiantuotantoon johdettu muovijäte voitaisiin kuitenkin periaatteessa käyttää myös pyrolyysiprosessin raaka-aineena ja jäljelle jäävä puuaines hyödyntää energiana (Arpiainen 2010). Tämä tarkastelu nojaa bioetanolintuotantoprosessiin, jotta voidaan esittää potentiaalinen menettely muovijätteen saatavuuden varmistamiseksi. Todellisuudessa bioetanolikonseptin puu-muovijätteet on ajateltu hyödynnettäväksi toisin.

### 4.3 Konseptien kuvaus

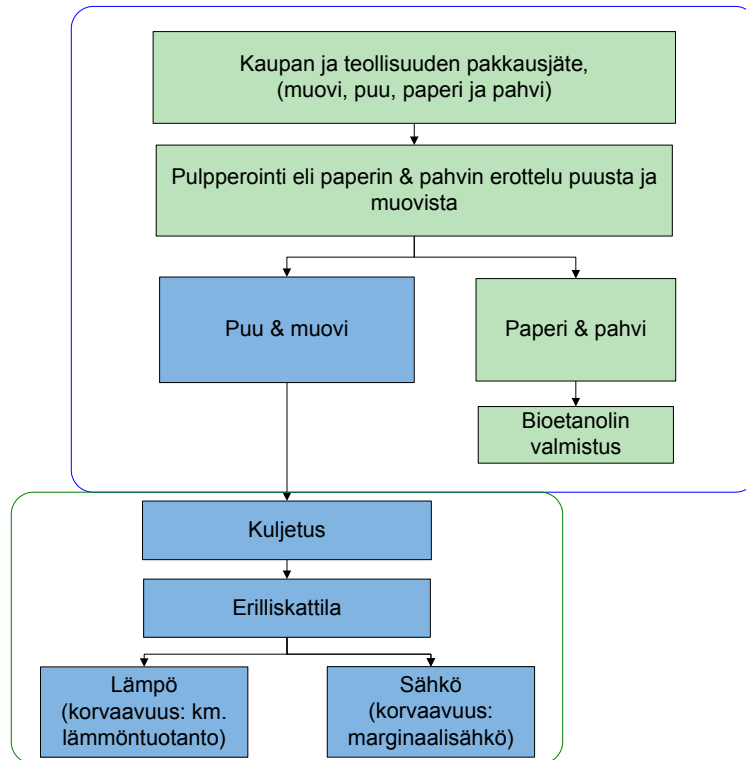
Ympäristökuormitusten arviointia ja taloudellisen kannattavuuden vertailua varten luotiin kaksi konseptia, joiden valinnassa ja kehittämisessä avustivat Jussi Ranta ja Vesa Arpiainen VTT:stä. Niin kutsutulla peruskonseptilla tarkoitetaan tällä hetkellä käytössä olevaa menetelmää muovijätteen käsittelyä. Tässä tarkastelussa peruskonseptina on jätemuovifraktion energiahyödyntäminen. Vertailukonseptiksi valittiin muovijätteen pyrolysointi, jonka synnyttämiä kuormituksia ja kustannuksia verrataan peruskonseptin vastaaviin tuloksiin.

#### 4.3.1 Peruskonsepti: energiahyödyntäminen

Energiahyödyntämiseen perustuvassa peruskonseptissa oletetaan, että bioetanoliprosessiin menevä kaupan ja teollisuuden jäte kuljetetaan paperitehtaalle, jossa prosessointi bioetanoliksi tapahtuu. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa jäte johdetaan pulpperiin, jossa paperi ja pahvi lietetään veteen. Samalla muovi ja puu saadaan erilleen bioetanolin tuotantoon päätyvästä paperi-pahvijakeesta, jota on jätemäärästä noin kolmannes. Erotettu puu-muovijäte kuljetetaan prosessin seuraavassa vaiheessa polttolaitokseen. Tarkastelussa oletetaan, että puu-muovifraktion energiahyödyntäminen vaatisi toimiakseen käytännössä uuden jätteenpolttodirektiivin mukaisen polttolaitoksen, jonka oletetaan käyttävän polttoaineenaan vain puu-muovijätettä. Konseptin suunnitteluvaiheessa keskusteltiin myös siitä, olisiko tarkastelussa mahdollista käyttää olemassa olevaa metsäteollisuuden kattilaa. Jätettä todettiin kuitenkin syntyvän niin suuri määrä, ettei sitä pystyttäisi syöttämään moneenkaan tällä hetkellä olemassa olevaan kattilaan ilman, että kattilan olosuhteet muuttuisivat merkittävästi.

Puu-muovijätteen poltto synnyttää sähkö- ja lämpöenergiaa. Sähkön oletetaan korvaavan kivihiililauhteella tuotettua marginaalisähköä ja tuottavan korvaushyötyjä. Jätteen kuljettaminen paperitehtaan yhteydestä muualle mahdollistaa sen, että myös poltos-

sa syntynyt lämpöenergia voidaan hyödyntää mielekkäästi yhdyskunnan tai teollisuuden tarpeisiin. Periaatteessa erilliskattila voi sijaita myös paperitehtaan yhteydessä, jos tuotetulle lämmölle löytyy tehdasalueelta sopiva käyttökohde. Tuotetun lämmön ajatellaan puolestaan korvaavan Suomen keskimääräistä lämmöntuotantoa. Peruskonseptin päävaiheet esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Bioetanoli-prosessista ylijäävän puu-muovijätteen hyödyntäminen energiantuotannossa. Vaaleanvihreällä merkityt vaiheet on rajattu elinkaaritarkastelun ulkopuolelle.

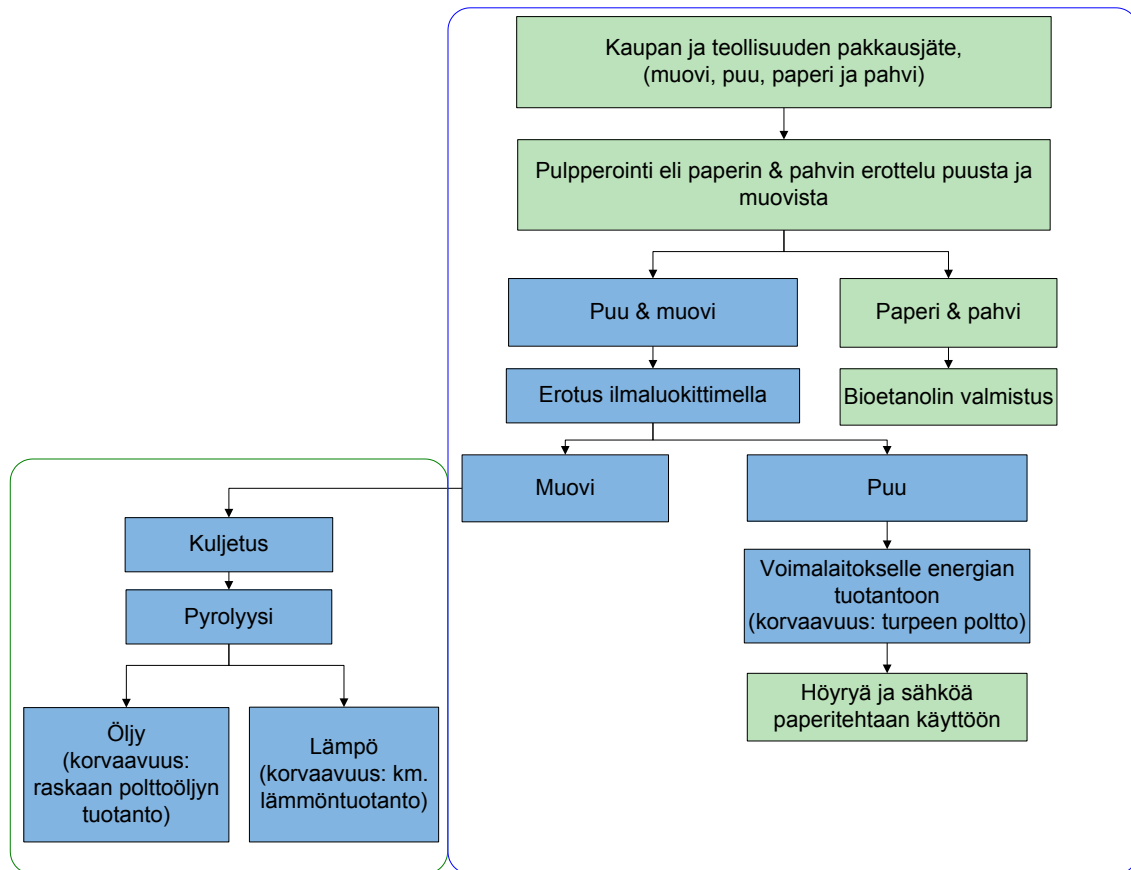
#### 4.3.2 Vertailukonsepti: muovin pyrolyysi ja puun energiahyödyntäminen

Vertailukonseptissa alkuasetelma on sama kuin peruskonseptissa, eli kaupan ja teollisuuden jätteet on valmiiksi kuljetettu paperitehtaalalle, jossa tapahtuu prosessointi bioetanoliksi. Prosessin ensimmäinen vaihe on niinkään samanlainen kuin peruskonseptissa, eli jäte johdetaan pulpperiin. Tällöin muovi ja puu saadaan erilleen paperipahvijakeesta.

Jäljelle jäävästä puu-muovijätteestä voidaan muovi edelleen erotella melko tehokkaasti esimerkiksi ilmaluokittimen avulla. Muovin ja puun erottelun jälkeen jäljelle jäävä puuainekas hyödynnetään energiana. Koska puuta on melko vähän, voidaan se ohjata paperitehtaan pääkattilaan, josta saadaan edelleen höyryä ja sähköä paperitehtaan käyttöön. Puufraktion poltolla voidaan korvata esimerkiksi turpeen osuutta paperitehtaan

kattilassa, jolloin kyetään välttämään turpeen poltosta syntyvät päästöt. Tehtaan kattilan tulee olla jätteenpolttodirektiivin mukainen, koska siellä poltettava kaupan ja teollisuuden puujäte luokitellaan jätepuuksi.

Tarkasteltavassa konseptissa muovijäte kuljetetaan pyrolysoitavaksi tehtaan ulkopuolelle erilliseen laitokseen. Periaatteessa pyrolyysiyksikkö voi kuitenkin sijaita myös tehtaan yhteydessä. Pyrolyysiprosessi sisältää oman pyrolyysikaasua käyttävän jätteenpolttodirektiivin mukaisen kattilansa. Pyrolysoinnin tuotteena syntyy muoviöljyä ja lämpöä. Muovifraktion pyrolysoinnin oletetaan korvaavan raskaan polttoöljyn tuotantoa niin, että muoviöljy korvaa raskasta polttoöljyä suhteessa 1:1. Lämmöntuotanto korvaavudeksi oletetaan tässäkin konseptissa keskimääräinen lämmöntuotanto. Vertailukonseptin vaiheet esitetään pelkistetyksi kuvassa 7.



Kuva 7. Bioetanolinprosessin muovijätteen pyrolyysi ja puun energiahyödyntäminen. Vaaleanvihreällä merkityt vaiheet on rajattu elinkaaritarkastelun ulkopuolelle.

#### 4.4 Toiminnallinen yksikkö ja rajaukset

Tarkastelun tulokset raportoidaan toiminnallista yksikköä eli yhtä pulperissa erotettua puu-muovijätetonnia kohti. Tarkastelun rajaukseen ei sisälly pakkausjätteiden kuljetus

laitokselle, sillä tämä vaihe on kummassakin vaihtoehdossa sama, jolloin kuljetuksista aiheutuvat kuormitukset kumoutuvat. Myös ensimmäisessä vaiheessa tapahtuva pahvin ja paperin erottelu pulpperoimalla on kummassakin vaihtoehdossa sama, eikä sitä huomioida laskennassa. Bioetanoliprosessia ja sen aiheuttamia ympäristökuormituksia tai kustannuksia ei ole sisällytetty tarkastelun rajaukseen, sillä ensisijainen tarkoitus on tarkastella nimenomaan muovijätteen pyrolysointia.

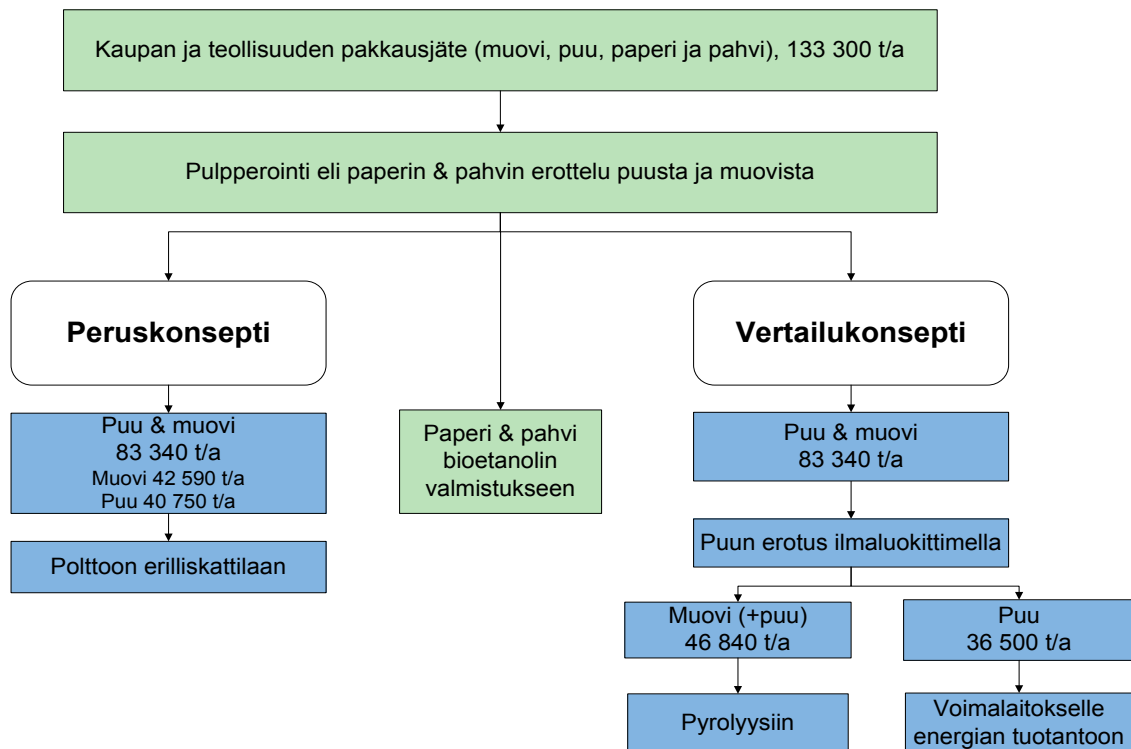
Tarkastelua ei haluttu sitoa mihinkään olemassa olevaan tehtaaseen, joskin tehtiin oletus, että bioetanolia tislavaa paperitehdasyksikkö sijaitsisi eteläisessä Suomessa. Kuljetusmatkaksi muovin ja puun polttolaitokselle tai muovin pyrolysointiyksikölle oletetaan 200 km, joka kattaa melko hyvin eteläisen Suomen kuljetusetäisyydet. Jäte ajatellaan kuljetettavaksi täysperävaunurekalla kuormakoon ollessa noin 30 tonnia jätettä (Hieta-nen 2010b). Autojen oletetaan käyttävän polttoaineenaan dieselöljyä. Päästöjä syntyy polttoaineen käytön lisäksi myös muun muassa polttoaineena käytettävän dieselin valmistuksessa ja kuljetuksessa, jonka vaikutukset on myös huomioitu tarkastelussa. Kuljetusajoneuvojen valmistamisesta aiheutuvia ympäristökuormituksia ei kuitenkaan tarkastella, sillä kuljetuskaluston voidaan kummassakin vaihtoehdossa olettaa olevan samankaltaista. Myöskään tuhkien loppusijoitusta ei huomioida. Tuhkat oletetaan sijoitettavaksi kaatopaikalle, eikä ongelmajätteen ja tavanomaisen jätteen kuljetuksia eritellä toisistaan. Yhdensuuntaisen kuljetusmatkan pituuden arvioidaan olevan 50 km. Tuhkien kuljetukseen arvioidaan käytettävän täysperävaunuyhdistelmää, jonka kantavuus on 40 tonnia. Lisäksi korvattavien prosessien polttoaineiden hankinnan (kivihiilen louhinnan ja turpeen oton) kuormituksia ei huomioida korvaushyötyjen laskennassa. Vertailukonseptin ensimmäisessä vaiheessa pulpperoitu jäte erotellaan ilmaluokittimella erillisiksi muovi- ja puufraktioiksi. Ilmaluokituksen aiheuttamat ympäristökuormitukset katsottiin kokonaisuuden kannalta merkityksettömän pieniksi, eikä niitä huomioida laskennassa. Prosessien tuotantoajaksi määritettiin 8 000 h/a ja järjestelmien käyttöikäksi 20 vuotta. Pyrolyysi- ja voimalaitoskattilan rakentamista ja elinkaaren loppua eli laitosten pääty-mistä jätteeksi, jätteen käsittelyä ja hyödyntämistä ei ole tarkastelussa huomioitu.

Muovifraktion pyrolysoinnin seurauksena syntyvän muoviöljyn käytöstä syntyviä päästöjä ei tunneta ja tästä syystä niiden vaikutus jouduttiin jättämään pois tarkastelun rajauksesta. Muoviöljyn laatua arvioidaan kuitenkin luvussa 7. Koska muoviöljyn käytössä syntyviä päästöjä ei tarkastella, ei voida huomioida myöskään öljyn kuljetusten päästöjä eikä korvaushyötyinä niitä päästöjä, joita muoviöljyn käytöllä mahdollisesti voitaisiin säästää.

## 4.5 Ympäristökuormitusten laskennan lähtötiedot

Tarkastelun syötemateriaalista eli kaupan ja teollisuuden jätteistä noin kolmanneksen oletetaan olevan puuta, toisen kolmanneksen paperia sekä kartonkia ja loppuosan muovina (Similä 2010). Konsepteissa oletetaan hyödynnettäväksi kuiva-aineena noin 75 000 tka/a kaupan- ja teollisuuden pakkausjätettä. Määrä katsottiin melko realistisesti Suomen olosuhteissa kerättäväksi. Puun ja muovin osuus jätteestä on 50 000 tka/a. Kokonaisjättemäärän viimeinen kolmasosa, eli 25 000 tka/a paperia ja kartonkia, erotetaan pulpperoinnilla ja johdetaan bioetanolin valmistusprosessiin.

Kuvassa 8 havainnollistetaan konseptien alkuvaiheisiin sisältyvät vuosittaiset jätemäärät jätteen sisältämä kosteus mukaan lukien. Huomioitaessa jätteen sisältämä kosteus, joka on muovilla 20,9 % ja puulla 60 %, saadaan prosessoitavan puun ja muovin määräksi 83 340 t/a, josta muovia 42 590 t/a (33 700 tka/a) ja puuta 40 750 t/a (16 300 tka/a). Kokonaiskosteus on tällöin noin 40 % (vettä yhteensä 33 340 t/a). Jos pahvin ja kartongin kosteudeksi oletetaan noin 50 %, on alkuperäinen syötevirta runsas 130 000 t/a, kun ajatellaan, ettei puu-muoviosuuden kosteus merkittävästi lisääny pulpperoinnin seurauksena. Tarkastelussa oletetaan pulpperoinnin toimivan täydellisesti, jolloin lähes kaikki paperi ja kartonki poistuu prosessissa. Näin jakeet voitaisiin hyödyntää bioetanolin tuotannossa.



Kuva 8. Prosessien alkuvaihe ilman kuljetuksia, ja niihin päätyvät jätemäärät vuodessa. Vaaleanvihreät laatikot eivät sisälly tarkastelun rajaukseen.

#### 4. Vertailtavat konseptit lähtötietoineen

Puu-muovifraktio päätyy peruskonseptissa kokonaisuudessaan poltettavaksi. Vertailukonseptissa muovin joukosta erotetaan puu ilmaluokittimella. Pyrolyysiin päätyy tällöin noin 46 840 t/a jätettä, josta noin 4 250 tonnia arvioidaan olevan puuta, loppuosa muovia. Loppuosa puusta, eli noin 36 500 tonnia, ohjataan poltettavaksi paperitehtaan kattilassa muun polttoaineen seassa.

Taulukkoon 1 on listattu käytettyjen lähtötietojen viitteet. Tarkemmat laskennassa käytetyt ympäristölähtötiedot löytyvät liitteestä C.

Taulukko 1. Ympäristökuormitusten laskennassa käytetyt lähtötiedot.

Peruskonsepti	
Kattilan päästöt	Jätteenpolttdirektiivi (2000/76/EY), Tsupari et al. 2006, Ranta ja Arpiainen 2010
Kuljetukset ja dieselin valmistus	Mäkinen et al. 2006, Lipasto 2010
Marginaalisähköntuotanto	Myllymaa et al. 2008b
Keskimääräinen lämmöntuotanto	SYKE 2005, Kasvener 2007, Tilastokeskus 2010a ja 2011
Vertailukonsepti	
Ostosähkön käyttö	Myllymaa et al. 2008b
Puun poltto, turpeen poltto	SYKE 2005
Raskaan polttoöljyn valmistus	Fortum Oil & Gas 2002
Kuljetukset ja dieselin valmistus	Mäkinen et al. 2006, Lipasto 2010
Keskimääräinen lämmöntuotanto	SYKE 2005, Kasvener 2007, Tilastokeskus 2010a ja 2011

Ympäristökuormitusten laskennassa huomioidaan kasvihuonekaasut hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O) joista on muodostettu hiilidioksidiekvivalentit (CO<sub>2</sub>-ekv.) taulukon 2 GWP-kertoimia (Global Warming Potential) käyttämällä. Ilmakehää happamoittavista päästöistä huomioidaan typen oksidit (NO<sub>x</sub>) ja rikkidioksidi (SO<sub>2</sub>). Lisäksi ilmakehään vapautuvat hiukkaspäästöt ja prosesseissa syntyvien tuhkien määrät on raportoitu. Muita päästöjä ei huomioida niiden puutteellisten lähtötietojen vuoksi. Muiden kuin hiilidioksidipäästöjen määrittämiseen liittyvien ongelmien vuoksi muiden ilmapäästöjen määrät ovat arvioita, jotka saattavat poiketa todellisuudesta. Syitä tähän käsitellään tarkemmin julkaisun tulososassa kohdassa 5.1.

Taulukko 2. Kasvihuonekaasupäästöjen GWP-kertoimet. Kerroin kuvaa kasvihuonekaasun kykyä vaikuttaa ilmastonmuutokseen verrattuna hiilidioksidiin 100 vuoden aikajaksolla. (Solomon et al. 2007.)

Kasvihuonekaasu	GWP-kerroin (100 vuotta)
hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	1
metaani, CH <sub>4</sub>	25
typpioksiduuli, N <sub>2</sub> O	298

#### 4.5.1 Peruskonsepti

Peruskonseptissa tarkastellaan puun ja muovin poltosta syntyvän sähkön ja lämmön käyttöä. Jätefraktio poltetaan tarkoitusta varten rakennetussa jätteenpolttodirektiivin mukaisessa erilliskattilassa, jonka polttoainetehoksi on järjestelmän vuosittaiseen käyttöaikaan perustuen arvioitu 60 MW. Kattilassa oletetaan poltettavan vain puu- ja muovijätteitä.

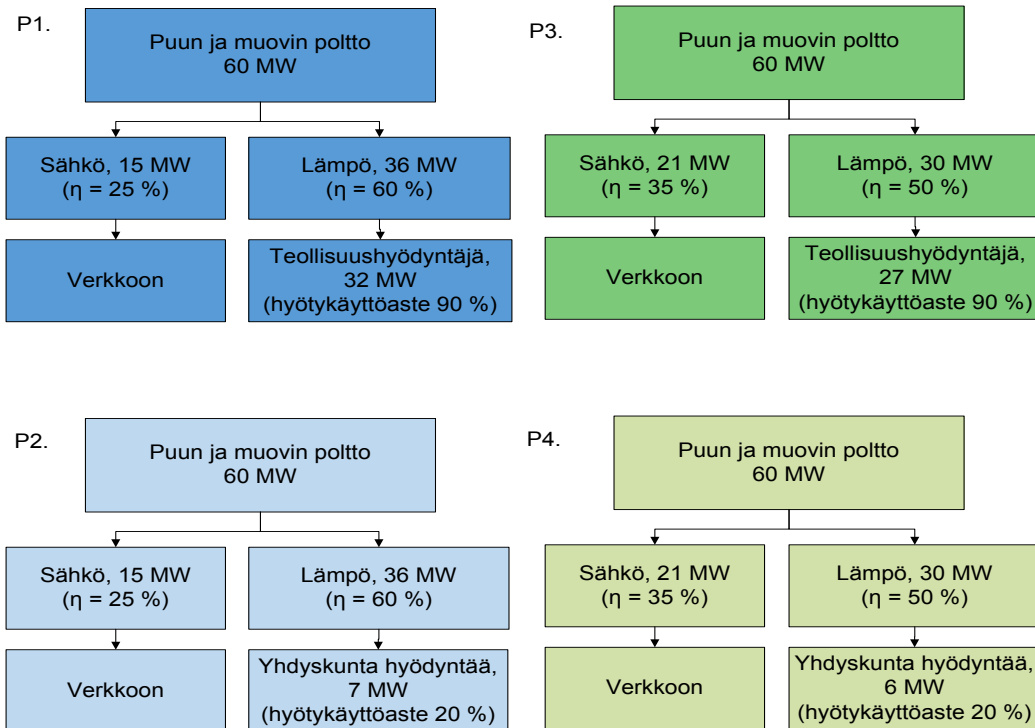
Tarkastelussa vertaillaan kahdella eri sähköntuotannon hyötysuhteella toimivaa kattilaa. Toisen polttolaitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeksi on oletettu 25 % (sähköteho 15 MW) ja lämmöntuotannon hyötysuhteeksi 60 % (lämpöteho 36 MW) (P1 ja P2). Toisessa oletuksessa ajatellaan päästävaksi korkeampaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen, joka on mahdollista esimerkiksi erikoistekniikoita käyttämällä. Tällöin hyötysuhteet ovat tarkastelussa vastaavasti 35 % (sähköteho 21 MW) ja 50 % (lämpöteho 30 MW) (P3 ja P4). Molemmilla polttolaitoksilla kokonaishyötysuhteet ovat siten 85 % (Vainikka 2010).

Tuotettu sähköenergia syötetään verkkoon. Käytettävä polttoaine on osittain biopestä, osittain fossiilista (puuta ja muovia). Bioperäisesti tuotettu sähkö on nykyisen hiilidioksidipäästöjen laskentatavan mukaisesti hiilidioksidineutraalia.

Tuotettava lämpö on ajateltu hyödynnettäväksi kahdella vaihtoehtoisella tavalla. Ensimmäisessä oletuksessa (P1 ja P3) teollisuusalueella sijaitsevan polttolaitoksen tuottama lämpöenergia hyödynnetään lähes täysin. Tämä on mahdollista, jos tuotettu lämpö ohjataan jollekin teollisuuslaitokselle käytettäväksi prosessihöyrynä ja -lämpönä. Toiminnan jatkuessa tasaisesti läpi vuoden lämmön kysyntä on jatkuvaa ja jopa 90 % tuotetusta lämmöstä voidaan hyödyntää (Myllymaa et al. 2008b). Toisessa oletuksessa (P2 ja P4) lämmön hyödyntäjänä on yhdyskunta ja laitos sijaitsee lähellä yhdyskunta-alueella. Yleensä taajamissa jo olemassa olevat energiapuolijärjestelmät vastaavat alueen lämmön tarvetta melko hyvin, ja jos jotakin toiminnassa olevaa järjestelmää ei syrjäytetä, ei tuotetulle lämmölle välttämättä löydy hyödyntäjää. Tässä tapauksessa lämmön lauhdutus-tarve saattaa hyvinkin olla jopa 80 %, jolloin vain 20 % tuotetusta lämmöstä hyötykäytetään. (Myllymaa et al. 2008b.) Vaihtoehtojen kokonaislämpöenergian saannoksi tulee näin tehdashyödyntämisvaihtoehdossa matalammalla sähköntuotannon hyötysuhteella toimivalle laitokselle (P1) 54 % ja korkeammalla hyötysuhteella toimivalle laitokselle (P3) 45 % polttoaine-energiasta. Yhdyskunnan tarpeisiin menevän lämmön tapauksessa kokonaislämpöenergian saanto jää vastaavasti vain 12 (P2) ja 10 %:iin (P4). Esitetyillä sähkön- ja lämmönkäyttöoletuksilla päädytään neljään erilaiseen tarkasteluvaihtoehtoon, jotka esitetään kuvassa 9.

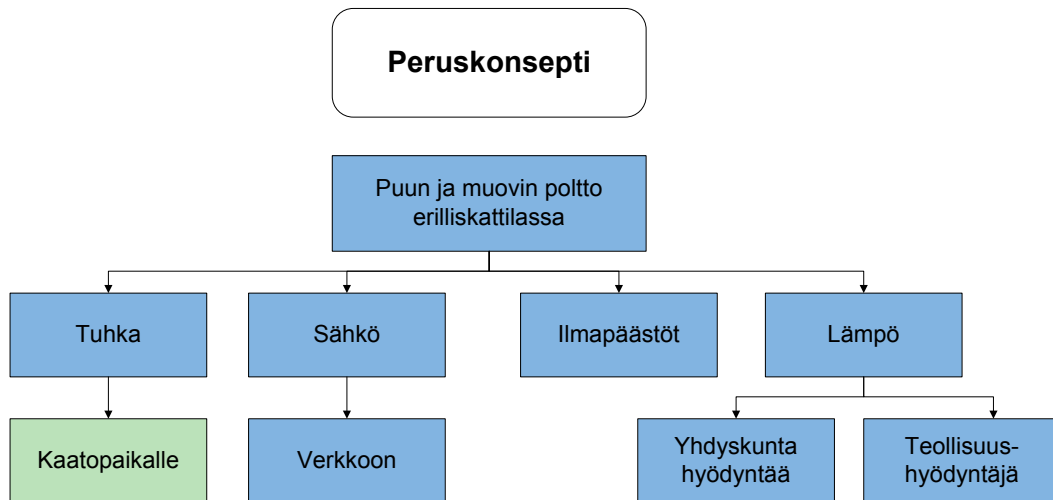


#### 4. Vertailtavat konseptit lähtötietoineen



Kuva 9. Peruskonseptin erilaiset sähkön- ja lämmönkäyttövaihtoehdot sekä käytetyt hyötysuhteet.

Muovin ja puun polton seurauksena kattilasta vapautuu hiilidioksidia arviolta 122 700 t/a, josta puun osuus 29 900 t/a on bioperäistä ja jätetään näin ollen laskematta hiilidioksiditaseeseen. Muiden ilmapäästöjen suuruudeksi on arvioitu 50 % jätteenpolttodirektiivissä määritetyistä raja-arvoista. Lisäksi syntyy tuhkaa noin 2 500 t/a, josta arvioilta 60 % on luokiteltavissa ongelmajätteeksi ja loput tavanomaiseksi tuhkaksi. Arvio muodostuvien tuhkafraktioiden osuuksista perustuu Laine-Yljoen et al. (2005) selvitykseen. Kuvassa 10 esitetään vaihtoehdossa syntyvät tuotteet ja päästöt.



Kuva 10. Peruskonseptissa syntyvät tuotteet ja päästöt. Vaaleanvihreä laatikko ei sisällä tarkastelun rajaukseen.

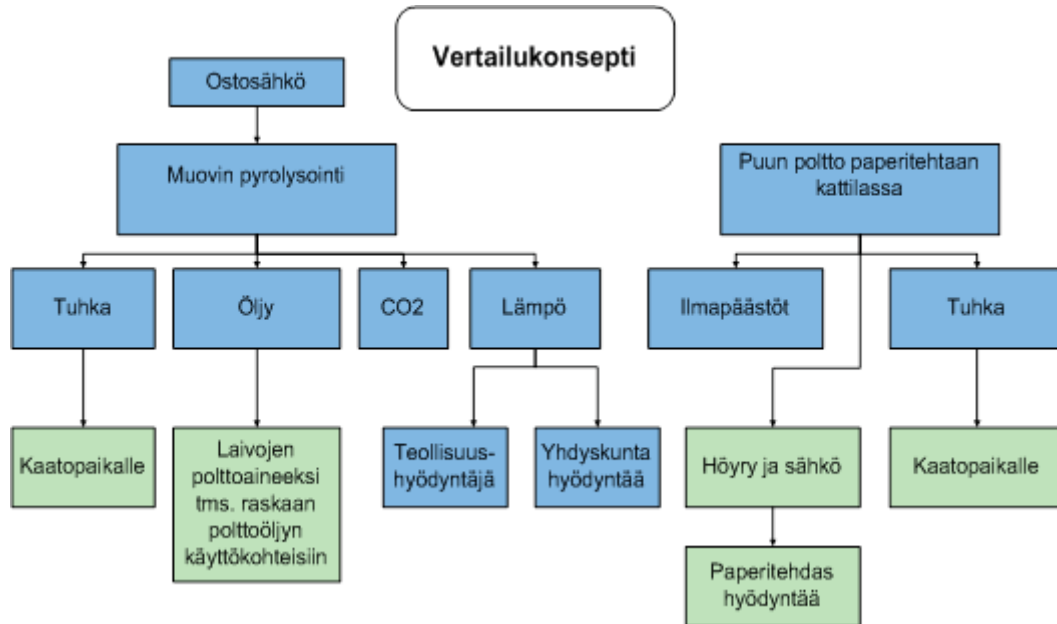
#### 4.5.2 Vertailukonsepti

Pyrolyysiprosessi sisältää oman pyrolyysikaasua käyttävän kattilan, joka on jätteenpolttodirektiivin mukainen. Muuta lämmönlähdettä ei prosessissa tarvita. Ostosähköä prosessi vaatii kuitenkin arviolta 800 kW verran. Muovien pyrolysoinnin tuotteena syntyvän öljyn saannon voidaan arvioida olevan noin 70–75 % muovisyötteen määrästä. Pyrolyysiyksiköstä, johon syötetään muovijätettä polttoainetehona ilmaistuna 52 MW, saadaan tuotteena muoviöljyä noin 38 MW. Muoviöljyn arvioidun lämpöarvon perusteella tämä vastaa noin 26 800:aa tonnia öljyä vuodessa. Öljyn lisäksi prosessissa voidaan olettaa syntyvän noin 6 MW lämpöä, joka johdetaan edelleen joko teollisuuden (V1) tai yhdyskunnan (V2) hyödynnettäväksi samoin hyötykäyttöastein kuin peruskonseptissa.

Pyrolysoinnista vapautuvien hiilidioksidipäästöjen suuruus on arviolta 17 700 t/a. Koska pyrolysoinnissa syntyvät savukaasut kiertävät kattilan kautta, ei hiilidioksidin lisäksi oleteta syntyvän muita päästöjä. Lisäksi poltossa muodostuu tavanomaista (noin 40 %) sekä ongelmajätteeksi luokiteltavaa tuhkaa (noin 60 %), yhteensä noin 2 250 t/a, jotka kuljetetaan kaatopaikalle samoin oletuksin kuin peruskonseptissa.

Ilmaluokituksen jälkeen jäljelle jäänyt puufraktio hyödynnetään energiana. Koska puuta on oletettavasti paperitehtaan polttoaineen kokonaistarpeeseen nähden melko vähän, voidaan se ohjata poltettavaksi tehtaan pääkattilaan. Tuotettu höyry ja sähkö jäävät paperitehtaan omaan käyttöön. Jätepuun polttoainetehoksi arvioidaan noin 8 MW, ja sen polton on arvioitu synnyttävän noin 26 700 tonnia hiilidioksidipäästöjä vuodessa. Puun polton hiilidioksidi on kuitenkin bioperäistä ja täten luettavissa päästöttömäksi. Puun poltto synnyttää tuhkaa noin 50 tonnia vuodessa, ja tuhkan oletetaan olevan tavanomais-

ta tuhkaa. Myös nämä tuhkat ajatellaan kuljetettavaksi kaatopaikalle. Kuvassa 11 esitetään tämän vaihtoehdon synnyttämät tuotteet ja päästöt.



Kuva 11. Vertailukonseptissa syntyvät tuotteet ja päästöt. Vaaleanvihreät laatikot eivät sisälly tarkastelun rajaukseen.

## 4.6 Kustannustarkastelun lähtötiedot

### 4.6.1 Yksityiset kustannukset

Tarkasteluvaihtoehtojen yksityiset kustannukset koostuvat syötteen hankinnasta ja kuljetuksesta, laitoksen perustamisesta ja käytöstä, syntyvien jätteiden loppusijoituksesta sekä mahdollisista päästökauppakustannuksista. Laitosten perustamisesta aiheutuvat pääomakustannukset on muunnettu vuotuisiksi kustannuksiksi annuiteettimenetelmän avulla (Pulkinen ja Holopainen 2006). Annuiteettimenetelmässä käytetään 5 %:n korko-oletusta sekä laitosten käyttöikä 20:tä vuotta. Vuotuisista kustannuksista saadaan tonnikohtaiset kustannukset jakamalla kustannukset vuotuisella syötteen määrällä.

### Kaikille tarkasteluvaihtoehdoille yhteiset lähtötiedot

Kaikille tarkasteluvaihtoehdoille yhteisiä lähtötietoja ovat puu-muovijätteen hankintahinta, kuljetuskustannusten laskennassa käytetyt polttoaine- ja henkilöstökustannukset, sekä tuhkien loppusijoitus- ja kuljetuskustannukset. Nämä kustannuserät esitellään taulukossa 3.

Taulukko 3. Tarkasteluvaihtoehtojen yksityisessä kustannuslaskennassa käytetyt yhteiset kustannuslähtötiedot.

Kaikille yhteiset verottomat lähtötiedot	Arvo	Lähde
Puu-muovijätteen hankintahinta €/t	62,80	Ranta ja Arpiainen 2010
Kuljetuksessa käytetyn dieselin hinta (veroton) €/l	0,56	Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010a
Kuljetusten henkilöstökustannukset €/h	14,17	Tilastokeskus 2010b
Tavanomaisen jätteen loppusijoitus €/t	56,00	Korpjärvi et al. 2009
Ongelmajätteen loppusijoitus €/t	85,00	Korpjärvi et al. 2009
Tuhkan kuljetuskustannukset, 50 km €/t	8,00	Korpjärvi et al. 2009

Puu-muovijätteen energiasisältöön perustuvan hankintahinnan oletetaan olevan samansuuruinen jyrshinturpeen hinnan kanssa eli 10,90 €/MWh. Tonnikohtaiseksi hinnaksi muutettuna puu-muovijätteen hinnaksi muodostuu tällöin noin 63 €/t. Yhteiskunnallisessa kustannustarkastelussa tämä hankintahinta kuvastaa puu-muovijätteen keräilystä ja mahdollisesta esikäsitteystä aiheutuvaa kustannusta.

Jätetonnikohtainen polttoaineen kulutus (l/t) on laskettu hyödyntäen Lipastotietokantaa kuljetusmatkakohtaisen (200 km) sekä kuorman koko-oletuksen (30 t) perusteella. Polttoaineen kulutus kg/t on muunnettu yksiköksi l/t suhteella 1 litra dieseliä = 0,85 kg. Kuljetusten henkilöstökustannuksen laskemiseksi on lisäksi tehty oletus kuljetusajasta (4 h). Tavanomaisen jätteen ja ongelmajätteen loppusijoitus- ja kuljetuskustannukset perustuvat lähteeseen Korpjärvi et al. (2009), jossa on oletettu tuhkien kuljetusmatkaksi 50 km.

#### Tarkasteluvaihtoehtokohtaiset lähtötiedot

Taulukossa 4 esitetään tarkasteluvaihtoehtoisissa käytettyjen laitosten yksityisten kustannusten laskennan lähtötiedot. Pääomakustannuksiin kuuluvat laitoksen perustamisen kustannukset. Käyttö- ja ylläpitokustannukset sisältävät laitoksen operoinnista aiheutuvat kustannukset ilman syötteen hankintaa, jätteiden loppusijoitusta ja mahdollista päästökauppakustannusta.

Energiantuotantolaitoksista 25 %:n hyötysuhteen laitoksen (vaihtoehtoisissa P1 ja P2) on oletettu olevan sekä pääoma- että käyttökustannuksiltaan 35 %:n hyötysuhteen laitosta halvempi, koska sen ei oleteta olevan tekniikaltaan yhtä edistynyt laitos. Tällaiset laitokset ovat pääsääntöisesti massapolttolaitoksia, jotka eivät kuulu päästökaupan piiriin. Sen sijaan suuremman hyötysuhteen laitoksen (vaihtoehtoisissa P3 ja P4) voidaan olettaa olevan esimerkiksi kierrätyspolttoaineiden polttoon erikoistunut laitos, joka kuuluu päästökaupan piiriin, jolloin se joutuu palauttamaan päästöoikeuksia fossiilisten hiili-dioksidipäästöjensä verran.

Taulukko 4. Tarkasteluvaihtoehtojen yksityisessä kustannuslaskennassa käytetyt laitoskohtaiset kustannuslähtötiedot.

Laitoskohtaiset verottomat lähtötiedot	Arvo	Lähde
Jätettä hyödyntävä laitos, sähköntuotannon hyötysuhde 25 % (P1 ja P2)		
Pääomakustannukset M€	53	Perustuu useisiin lähteisiin
Käyttö- ja ylläpitokustannukset M€/a	2,97	Perustuu useisiin lähteisiin
Jätettä hyödyntävä laitos, sähköntuotannon hyötysuhde 35 % (P3 ja P4)		
Pääomakustannukset M€	63	Perustuu useisiin lähteisiin
Käyttö- ja ylläpitokustannukset M€/a	3,12	Perustuu useisiin lähteisiin
Päästöoikeuden hinta €/tCO <sub>2</sub>	20,75	Tol 2005
Pyrolyysilaitos (V1 ja V2)		
Pääomakustannukset M€	18,15	Kiser 2002, päivitetty Chemical Engineering 2010
Käyttö- ja ylläpitokustannukset M€/a	2,96	Kiser 2002, päivitetty Chemical Engineering 2010

Pyrolyysilaitoksen pääomakustannus on arvioitu alhaisemmaksi kuin energiantuotantolaitoksilla. Toki on huomioitava, että pyrolyysilaitoksen kapasiteetti syötteen määrässä mitattuna on myös alhaisempi, koska pyrolyysilaitos käsittelee puu-muovijätteestä ainoastaan muoviosuuden. Vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannusarviot asettuvat samansuuruisiksi 25 %:n hyötysuhteen polttolaitoksen kanssa. Pyrolyysilaitoksen ei oleteta kuuluvan päästökaupan piiriin, koska öljyn jalostamista muovijätteistä voidaan pitää enemminkin jätteiden hyödyntämisenä tai hävittämisenä (Oikarinen 2010).

#### 4.6.2 Vältetyn tuotannon kustannukset

Energiantuotantovaihtoehtoissa (P1–P4) vältetyn tuotannon kustannukset muodostuvat vältetystä sähköntuotannosta sekä vältetystä lämmöntuotannosta joko teollisuusalueella tai yhdyskunta-alueella. Vältetyn energiantuotannon kustannukset huomioidaan vain siltä osin, kuin jäteperäisestä energiasta oletetaan päätyvän todelliseen hyötykäyttöön. Sähköstä oletetaan hyödynnettävän kaikki, mikä tuotetaan, mutta tuotetusta lämmöstä osan oletetaan päätyvän lauhdutukseen. Teollisuusalueella tämän lämmön hyötykäyttöosuuden on oletettu olevan korkea (90 %) tasaisen lämmön tarpeen vuoksi ja yhdyskunta-alueella matala (20 %) jo olemassa olevien kaukolämpöratkaisujen vuoksi. Pyrolyysivaihtoehtoissa (V1 ja V2) vältetyn tuotannon kustannuksiin lasketaan vältetyn raskaan polttoöljyn tuotantokustannukset ja pyrolyysiprosessissa syntyvän sivutuotelämmön hyötykäyttöosuuden suuruiset lämmön tuotantokustannukset sekä vältetyn turvepolttoaineen hankinta paperitehtaan kattilaan. Taulukossa 5 esitetään laskennassa käytettyjä lähtötietoja vältetyn tuotannon osalta.

Taulukko 5. Tarkasteluvaihtoehtojen vältetyn tuotannon kustannuslaskennassa käytetyt kustannuslähtötiedot.

Hyvityksissä käytetyt verottomat lähtötiedot	Arvo	Lähde/ perustelu
Vältetyn sähköntuotannon kustannukset (hiili) €/MWh	50,00	Rajatuotantomuoto - ei voittoa
Vältetyn lämmöntuotannon kustannukset (ka/teollisuus) €/MWh	42,22	Myllymaa et al. 2008a, Tilastokeskus 2010a
Vältetyn lämmöntuotannon kustannukset (ka/kaukolämpö) €/MWh	41,74	Myllymaa et al. 2008a, Tilastokeskus 2010a
Vältetyn polttoaineen hankintakustannukset paperitehtaalla (turve) €/MWh	10,90	Ranta ja Arpiainen 2010
Vältetyn raskaan öljyn tuotantokustannukset €/MWh	35,23	Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010b

Kivihiilen tuotantokustannusten on arvioitu olevan samansuuruiset kuin keskimääräinen sähkön pörssihinta. Arvio perustuu siihen oletukseen, että rajatuotantomuotona hiilisähkö ei tuota voittoa. Lämmön tuotantokustannukset on laskettu käyttäen Tilastokeskuksen esittämää jakaumaa teollisuus- ja kaukolämmön tuotantomuoto-osuuksista sekä Myllymaan et al. (2008a) raportoimia tuotantokustannuksia. Pyrolyysiprosessin tarkastelussa raskaan polttoöljyn markkinahinnan on oletettu kuvastavan sen tuotantokustannuksia. Laskelmissa markkinahintana on käytetty 12 kuukauden keskiarvoa.

#### 4.6.3 Ympäristönettokustannukset

Ympäristönettokustannuksissa huomioidaan kustannuksina varsinaisten tarkasteluvaihtoehtojen rahamääräistetyt ympäristökuormitukset ja korvaushyötynä vältetyn tuotannon aiheuttamat rahamääräistetyt ympäristökuormitukset. Ympäristökuormituksista rahamääräistetään vain ne päästöt, joista löytyi luotettavaksi katsottua arvotusdataa. Rahamääräistäminen tapahtuu taulukon 6 päästökomponeittain arvioitujen arvotuskertoimien avulla.

Taulukko 6. Tarkasteluvaihtoehtojen ympäristökustannus- ja ympäristökorvaushyötyjen laskennassa käytetyt kustannuslähtötiedot.

Ympäristökustannuslaskennassa käytetyt lähtötiedot	Arvo	Lähde
CO <sub>2</sub> -ekv. päästöjen ympäristökustannukset €/t	20,75	Tol 2005
SO <sub>x</sub> -päästöjen ympäristökustannukset €/t	970	Nordic Council of Ministers 2007
NO <sub>x</sub> -päästöjen ympäristökustannukset €/t	900	Heatco 2007

#### 4.6.4 Lopputuotteiden myyntihinnat ja verot

Liiketaloudellisissa kannattavuustarkasteluissa huomioidaan yksityisten kustannusten (eli syntyvän lopputuotteen tuotantokustannusten) lisäksi tarkasteluvaihtojen tuottamat

#### 4. Vertailtavat konseptit lähtötietoineen

myyntituotot sekä nettomääräiset arvonlisäverot. Lisäksi laskelmiin lisätään kuljetuksissa käytetyn polttoaineen sisältämät verot sekä kuljettajien palkkakustannusten henkilösivukulut. Energiantuotantovaihtoehdoissa myyntituotto muodostuu myydystä sähköstä ja lämmöstä. Pyrolyysivaihtoehdoissa myyntituotot muodostuvat sen sijaan myydystä muoviöljystä, jätepuun myynnistä sekä pyrolyysiprosessin sivutuotteena syntyvän lämmön myynnistä. Laskennassa käytetyt lopputuotteiden myyntihinnat ja arvonlisäverokanta esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Tarkasteluvaihtoehtojen liikeloudellisessa kannattavuuslaskennassa käytetyt lähtötiedot.

Liikeloudellisessa laskennassa käytetyt verottomat lähtötiedot	Arvo	Lähde
Sähkön myyntihinta €/MWh	50,00	Nord Pool 2010
Lämmön myyntihinta €/MWh	48,78	Energiateollisuus ry 2011
Muoviöljyn arvioitu myyntihinta €/MWh	31,71	90 % raskaan öljyn hinnasta
Puun myyntihinta €/MWh	10,90	Ranta ja Arpiainen 2010
Jätteen hankintahinnan alv. %	23	
Tuhkan loppusijoituksen alv. %	23	
Lopputuotteiden myyntihinnan alv. %	23	

Sähkön ja lämmön myyntihintoina on käytetty pörssihintoja. Muoviöljyn myyntihinnan on oletettu olevan 90 % raskaan polttoöljyn hinnasta, koska jätteestä tuotettuna polttoaineena sen soveltuvuus raskaan polttoöljyn kohteisiin on epäselvä.

## 5. Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset

Tutkimuksessa vertaillaan kaupan ja teollisuuden jätteen sisältämän muoviosan pyrolysoinnin ja puuosan energiahyödyntämisen sekä koko jätevirran energiahyödyntämisen synnyttämiä ympäristökuormituksia ja taloudellista kannattavuutta. Tässä luvussa raportoidaan ympäristökuormitukset yhdisteittäin samalla eri tarkasteluvaihtoehtoja vertailen. Kustannusvaikutukset raportoidaan luvussa 6.

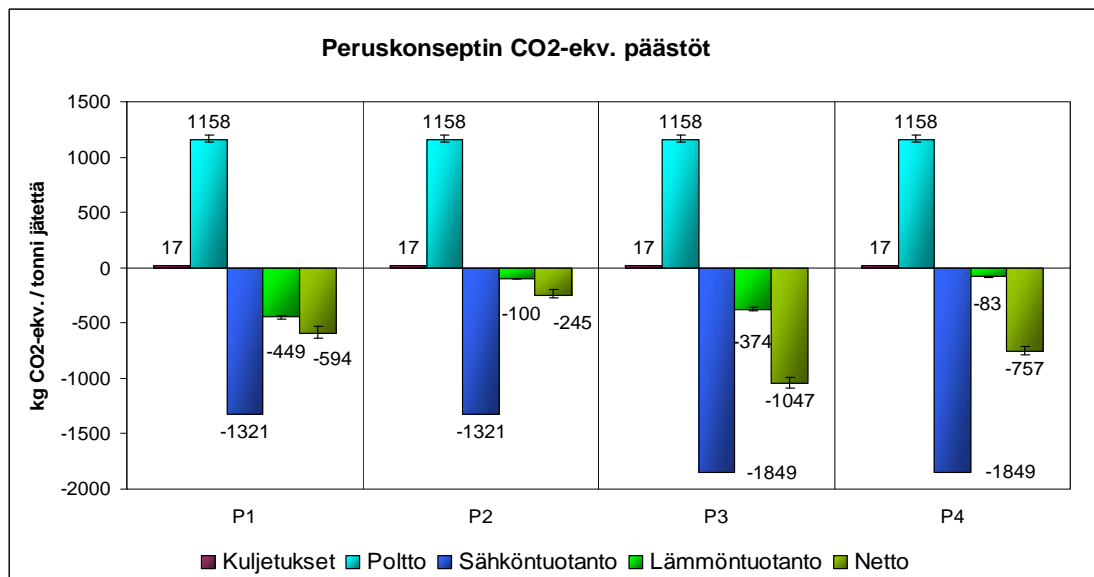
### 5.1 Ympäristökuormitusten laskennan tulokset ja tarkastelu

Ympäristökuormitusten osalta tarkastellaan kasvihuonekaasujen, rikkidioksidien, hiukkaspäästöjen ja typen oksidien muodostumista sekä prosesseissa syntyvien kiinteiden tухkien määrää. Prosesseissa muodostuvat hiilidioksidipäästöt saadaan kohtalaisen luotettavasti määritettyä käyttämällä eri polttoaineille määritettyjä päästökertoimia, joita julkaisee Suomessa Tilastokeskus. Muiden ilmapäästöyhdisteiden kohdalla tarkastelussa käytetyt oletuspäästökertoimet ja niistä lasketut tulokset ovat kuitenkin huomattavasti epävarmemmalla pohjalla. Esimerkiksi korvattaessa turvetta paperitehtaan kattilassa jätepuulla saattaa kattilan polttoaineen muuttaminen todellisuudessa vaikuttaa kattilan palamisolosuhteisiin niin, että päästöt muuttuvat suuresti (Tsupari 2010). Vastaavasti keskimääräisen lämmöntuotannon korvaamista tarkasteltaessa päästöjen laskentaan sisältyy epävarmuutta, sillä muiden kuin hiilidioksidipäästöjen osalta ei ole käytettävissä yhtenäistä lähtötietoa keskimääräisen lämmöntuotannon päästöistä. Laskennassa käytettävien päästökertoimien taustalla ovat valtakunnallisella tasolla kerätyt tiedot (Petäjä 2011). Laskenta on tämän vuoksi tehty käyttäen päästökertoimille ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , hiukkaset,  $\text{CH}_4$  ja  $\text{N}_2\text{O}$ ) vaihteluvälejä, jotka on määritetty perustuen tyypillisiin päästökertoimiin käytettäessä eri lämmöntuotantotekniikoita eri kokoluokkien laitoksissa. Tämän vuoksi on syytä muistaa, että muista kuin hiilidioksidipäästöistä seuraavassa esitettäviin tuloksiin liittyy epävarmuuksia sekä päästöjen että korvaushyötyjen osalta, ja nämä tulokset ovat näin ollen suuntaa antavia. Vaihteluvälit on määritelty liitteessä D esitettyjen tarkasteluvaiheiden päästökomponenteille ja korvaushyödyille.



### 5.1.1 Kasvihuonekaasupäästöt, CO<sub>2</sub>-ekvivalentit

Taulukon 2 karakterisointikertoimilla painotetut kasvihuonekaasupäästöt esitetään yksikössä kg/jätetonni. Kuva 12 sisältää peruskonseptin neljän eri oletuksella lasketun vaihtoehdon kasvihuonekaasupäästöt sekä korvattavasta sähkön- ja lämmöntuotannosta syntyvät korvaushyödyt. Kuvassa esiintyvät vaihteluvälit liittyvät metaani- ja typpioksiduulikomponenttien määrän epävarmuustekijöihin. Vaihtelu on kuitenkin niin pientä, ettei sillä ole tulosten kannalta merkitystä.



Kuva 12. Peruskonseptissa syntyvät kasvihuonekaasupäästöt sekä vältetystä tuotannosta syntyvät korvaushyödyt (kgCO<sub>2</sub>-ekv./t). Vaihtoehtojen kuvaukset: P1: hs. 25 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö, P2: hs. tuotettu 25 % sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö, P3: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö ja P4: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö.

Peruskonseptissa merkittävin päästövaikutus syntyy muovijätteen poltosta (1 158 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t jätettä); sen sijaan muovi- ja puufraktion kuljetus polttoon sekä tuhkien kuljetuksista syntyvät päästöt (yhdistetty kuvissa) jäävät vaihtoehdoissa merkityksettömän pieneksi (17 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t ja 0,1 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t). Puufraktion polton hiilidioksidipäästöjen suuruus on arviolta 29 900 t/a. Puun polton hiilidioksidipäästöä ei kuitenkaan huomioida kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa, sillä puun poltosta syntyvä hiilidioksidi katsotaan luonteeltaan bioperäiseksi.

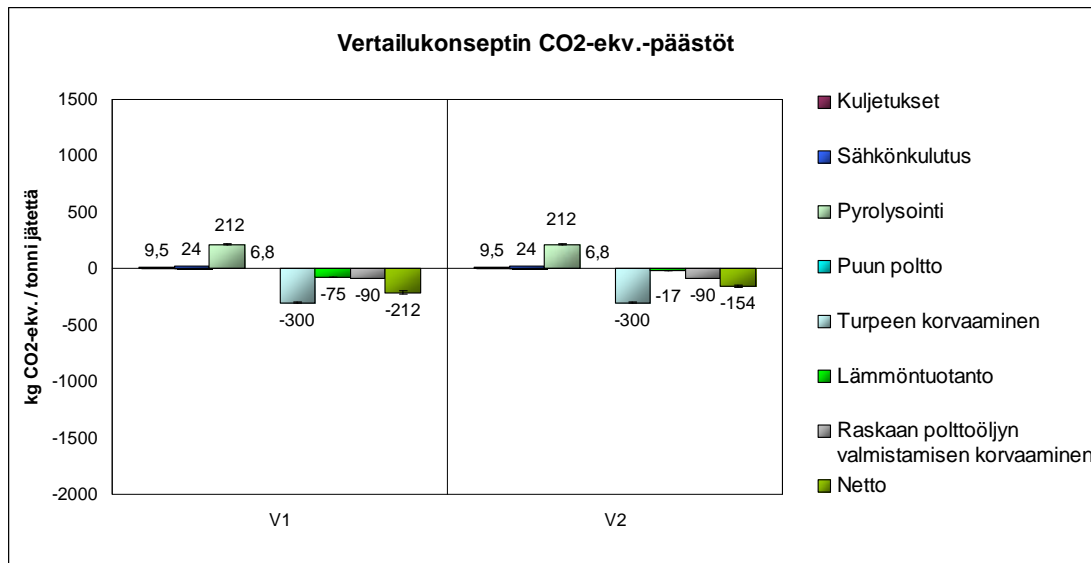
Koska muovi on luonteeltaan fossiilista polttoainetta, se tuottaa verrattain suuret hiilidioksidipäästöt sitä poltettaessa. Esimerkiksi lajittelemattoman yhdyskuntajätteen polttoon verrattuna muovin poltosta syntyvä kuormitusvaikutus on noin kaksinkertainen (lämpöarvot vertailun vuoksi: yhdyskuntajäte 10 GJ/t (Tilastokeskus 2011), puu-

muovijae: 21 GJ/t (Ranta 2010)). Puu-muovijakeen korkeasta lämpöarvosta johtuen myös korvaushyödyt kasvavat suuriksi erityisesti korvattavan sähköntuotannon osalta. Vaihtoehdolle P3 ja P4 saadaan suuremmat sähköntuotannon korvaushyödyt (1 849 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t) kuin kahdelle ensimmäiselle vaihtoehdolle P1 ja P2 (1 321 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t), sillä näiden vaihtoehtojen sähköntuotannon hyötysuhde on oletettu paremmaksi jolloin luonnollisesti myös korvattavan sähköntuotannon korvaushyödyt ovat suuremmat.

Lämmöntuotannosta saatavat korvaushyödyt jäävät pienemmiksi kuin sähköntuotannon kohdalla. Tämä johtuu siitä, että laskennassa käytetty korvattavan lämmöntuotannon hiilidioksidipäästökerroin on merkittävästi sähköntuotannon kerrointa alhaisempi (sähkö: 239,5 kg/GJ<sub>e</sub> ja lämpö: 38,1 kg/GJ<sub>th</sub>). Teollisuuskäyttöön ohjattu lämpö aiheuttaa kuitenkin yhdyskuntakäyttöä suuremman hyödyn lämmöntuotannon korvaavuuksia tarkasteltaessa. Teollisuuden käyttöön ohjattavan lämpöenergian hyödyntäminen (hyödynnettävät osuudet 54 % ja 45 % polttoaine-energiasta) aikaansaa korvaushyötyjä vaihtoehdolla P1 noin 449 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t ja vaihtoehdolla P3 noin 374 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t. Yhdyskunnan käyttöön menevän lämpöenergian (hyödynnettävät osuudet 12 % ja 10 %) vastaavat korvaushyödyt ovat käytetyillä laskentaoletuksilla vain 100 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t (P2) ja 83 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t (P4).

Peruskonseptissa suurimmat kasvihuonekaasupäästöjen säästöt saadaan näin ollen silloin, kun puun ja muovin energiasisältö hyödynnetään polttamalla mahdollisimman korkean sähköntuotannon hyötysuhteen omaavassa kattilassa. Jos tuotetulla lämpöenergialla voidaan korvata teollisuuden käyttämää lämpöä, saadaan todennäköisesti pienemmän lauhdutustarpeen seurauksena suurempi nettohyöty, kuin jos lämpö käytettäisiin esimerkiksi kaukolämpönä yhdyskunnassa.

Vertailukonseptissa (kuva 13) muovin pyrolysoinnin seurauksena syntyy kattilasta 212 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t suuruinen hiilidioksidipäästö, joka on vertailukonseptin merkittävin kuormitusvaikutus. Metaania tai typpioksiduulia ei oleteta vapautuvan optimaalisesti toimivassa pyrolyysiprosessissa, sillä prosessissa muodostuvat kaasut kiertävät takaisin kattilaan poltettavaksi. Pyrolyysiprosessi kuluttaa lisäksi hieman ostosähköä, jonka tuotanto aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä 24 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t. Myös vertailukonseptissa muoviraaka-aineen ja muodostuvien tuhkien kuljetusten tuottamien kasvihuonekaasukuormitusten osuus jää mitättömäksi, ollen muovin kuljetukselle 9,4 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t ja tuhkien kaatopaikkakuljetukselle 0,09 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t (kuvassa yhdistetty). Puun poltto paperitehtaan kattilassa synnyttää lisäksi 26 700 tonnin vuotuiset hiilidioksidipäästöt, jotka jätetään bioperäisinä laskennassa huomioimatta. metaani- ja typpioksiduulipäästö- ja muodostuu kuitenkin puun polton seurauksena hieman (6,8 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t).



Kuva 13. Vertailukonseptin tuottamat kasvihuonekaasupäästöt (kgCO<sub>2</sub>-ekv./t) sekä vältetyn energiantuotannon aikaansaamat korvaushyödyt. Vaihtoehtojen kuvaukset: V1: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö teollisuuskäyttöön V2: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö yhdyskuntakäyttöön.

Kun kaupan ja teollisuuden jätetuulla korvataan paperitehtaan kattilassa turvetta, turpeen polton välttämällä saadaan jätetonnin kohti suuruudeltaan 300 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t korvaushyöty. Pyrolysoinnista syntyvä, teollisuuskäyttöön johdettu lämpöenergia (V1) tuottaa korvaushyötyjä 75 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t ja yhdyskuntakäyttöön johdettu lämpö (V2) 17 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t vältetyn keskimääräisen lämmöntuotannon osalta. Tarkastelun kannalta hyvin mielenkiintoinen osa, eli mahdollinen raskaan polttoöljyn tuotannon korvaaminen pyrolysoinnin tuotteena syntyvällä muoviöljyllä, tuottaa suhteellisen pienen korvaushyödyn vältetystä raskaan polttoöljyn tuotannosta (90 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t). Raskaan polttoöljyn valmistuksen metaani- ja typpioksiduulipäästöjä ei tunneta, mutta näiden osuuden puuttuminen ei todennäköisesti ole merkittävää tarkastelun kokonaisuuden kannalta. Tässä vaiheessa on kuitenkin muistettava, että tämä tarkastelu koskee pelkästään polttoaineen valmistuksen korvaamista eikä öljyn käytön aikaisia kuormituksia huomioida. Polttoaineen käytölle ei ole voitu laskea päästöä eikä korvaushyötyjä, sillä muoviöljyn käytön päästöjä ei tunneta. Nettokuormitukseltaan vertailukonseptin kasvihuonekaasupäästöt jäävät hieman korvaushyötyjen puolelle 212 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t (V1) ja 154 kgCO<sub>2</sub>-ekv./t (V2).

Kuvia 12 ja 13 vertailtaessa huomataan, että osa peruskonseptissa syntyvistä päästöistä ja korvaushyödyistä on lähes kertaluokkaa suurempia kuin vertailukonseptissa. Suuri ero nettopäästöjen kohdalla näkyy varsinkin vaihtoehdoilla P3 ja P4, sekä V1 ja V2. Näin voidaan todeta, että kasvihuonekaasukuormitusten välttämisen valossa suotuisimman vaihtoehdon muodostaa P3, jossa puu ja muovi poltetaan erilliskattilassa. Tämän

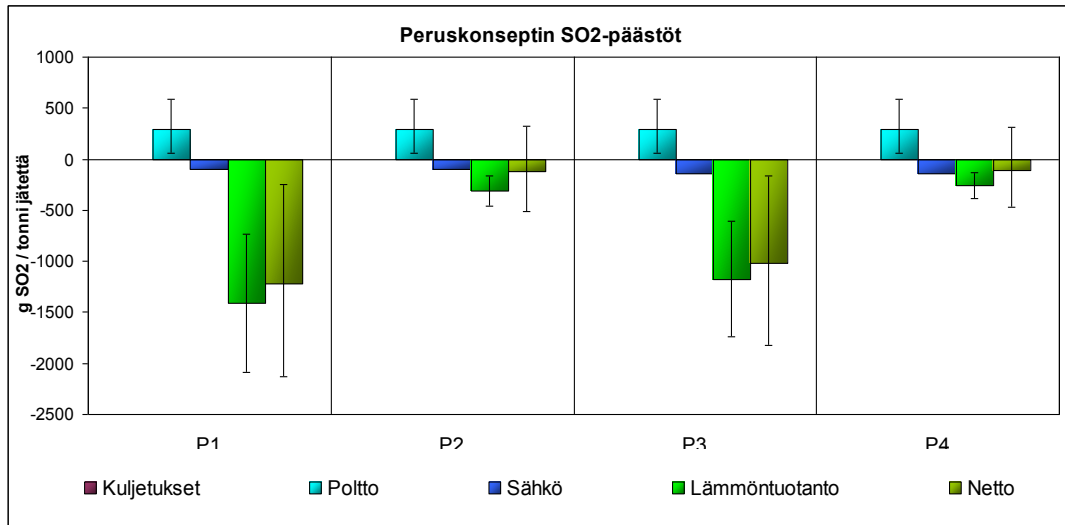
vaihtoehdon polttolaitos tuottaa sähköä 35 % hyötysuhteella ja konseptissa syntyneen lämmön hyödyntää teollisuus. Molemmat vertailukonseptin vaihtoehdot, joissa siis muovi pyrolysoidaan ja puu poltetaan, jäävät tarkasteluvaihtoehdoista heikoimmiksi muodostuvien kasvihuonekaasunettopäästöjen valossa. Kaikilla vaihtoehdoilla kasvihuonekaasujen nettopäästöt ovat kuitenkin negatiiviset, eli tarkasteluvaihtoehdoilla kyetään muodostamaan vältetystä tuotannosta syntyviä korvaushyötyjä enemmän kuin päästöjä syntyy.

### 5.1.2 Rikkidioksidipäästöt, SO<sub>2</sub>

Muodostuvilla rikkidioksidipäästöillä on ilmakehää happamoittava vaikutus. Kasvihuonekaasuista poiketen rikkidioksidin vapautumisesta aiheutuva ilmastokuormitus ja vältetyn tuotannon aikaansaamat korvaushyödyt ilmoitetaan yksikössä gSO<sub>2</sub>/t. Laskentaan liittyvästä epävarmuudesta johtuen tarkkoja lukuarvoja ei ole ilmoitettu, esitetyt luvut havainnollistavat kuitenkin päästöjen suuruusluokkaa.

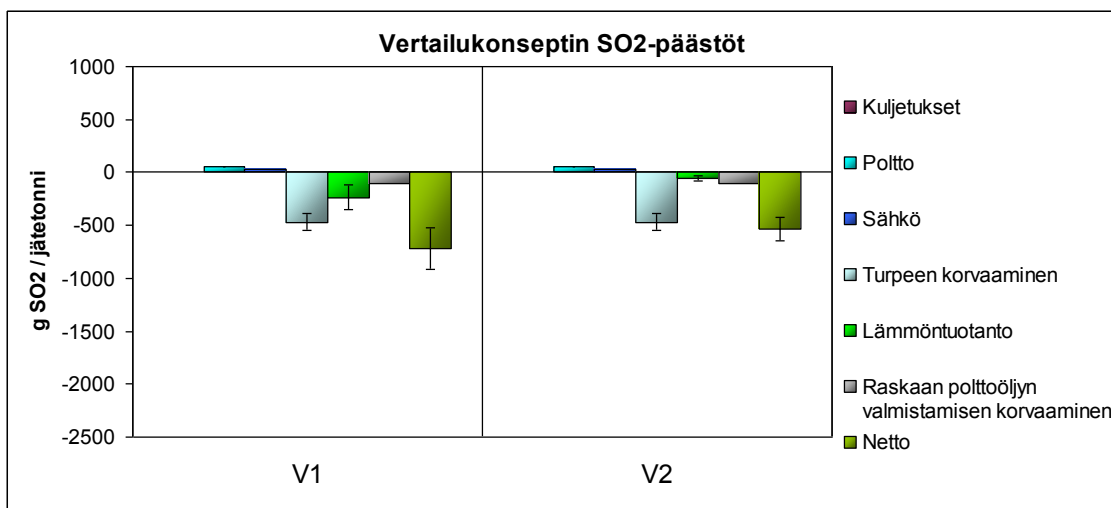
Peruskonseptissa (kuva 14) puun ja muovin energiahyödyntäminen tuottaa noin 300 g suuruisen rikkidioksidipäästön jätetonnia kohti vaihtoehdoilla P1–P4, kun vertailukonseptissa (V1 ja V2) pelkän puun poltosta seuraava rikkidioksidipäästö jää tästä arviolta vain kuudennekseen (kuva 15). Muovin pyrolysoinnista ei oleteta muodostuvan rikkidioksidipäästöjä. Peruskonseptissa puun ja muovin polton rikkidioksidipäästöjen vaihteluväli on kuitenkin huomionarvoisen suuri, jolloin voi myös olla mahdollista, ettei päästöjä muodostu käytännössä juuri lainkaan tai vaihtoehtoisesti niitä saattaa muodostua keskiarvoon nähden lähes kaksinkertaisesti.

## 5. Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset



Kuva 14. Arvio peruskonseptivaihtoehtojen rikkidioksidipäästöistä (gSO<sub>2</sub>/t), sekä vältetyn tuotannon korvaushyödyt. Vaihtoehtojen kuvaukset: P1: hs. 25 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö, P2: hs. tuotettu 25 % sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö, P3: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö ja P4: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö.

Pieni lisäkuormitus vertailukonseptille (V1 ja V2) aiheutuu pyrolyysin vaatiman osotosähkön käytön tuottamista päästöistä. Molemmille konsepteille muodostuu lisäksi marginaalinen rikkidioksidipäästö konseptien edellyttämistä raaka-aineiden ja jätteiden kuljetuksista, joka ei erotu kuvien 14 ja 15 mittakaavojen puitteissa.



Kuva 15. Vertailukonseptissa syntyvät rikkidioksidipäästöt (gSO<sub>2</sub>/t) vaihteluväleineen. Vaihtoehtojen kuvaukset: V1: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö teollisuuskäyttöön V2: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö yhdyskuntakäyttöön.

Peruskonseptin kohdalla muodostuvat korvaushyödyt tulevat ensisijaisesti lämmöntuotannosta, sillä kivihiilellä tuotetun marginaalisähkön korvaaminen jättää korvaushyötyjen määrän vähäiseksi kaikilla vaihtoehdoilla P1–P4. Lämmöntuotannon korvaushyötyjen kohdalla vaihtelua on enemmän, ja suurimmat keskiarvoiset hyödyt muodostuvat vaihtoehdoissa P1 ja P3, joissa tuotettu lämpö hyödynnetään tehokkaasti teollisuudessa. Yhdyskunnan tarpeisiin johdettua lämmöntuotantoa tarkasteltaessa (P2 ja P4) korvaushyöty jää vaatimattomammaksi oletetun matalan hyötykäyttöasteen vuoksi. Myös lämmöntuotannon korvaamisen vaihteluvälit ovat suuret, jolloin nettopäästöjen perusteella vaihtoehtoja on hankala sijoittaa paremmuusjärjestykseen. Vaihtoehtojen P2 ja P4 kohdalla on mahdollista, että nettopäästöt voivat jäädä jopa positiivisiksi, jolloin vaihtoehdoista syntyvät päästöt ylittävät korvattavasta tuotannosta aiheutuvat hyödyt. Pelkkiä keskiarvopäästöjä vertailtaessa ympäristön kannalta parhaimmaksi muodostuisi vaihtoehto P1, jossa sähkö tuotetaan 25 % hyötysuhteella ja muodostuva lämpö johdetaan teollisuuskäyttöön. Tätä seuraa paremmuusjärjestyksessä toinen lämmön teollisuuskäyttöön ohjaava vaihtoehto P3.

Koska turpeen poltto synnyttää melko suuren rikkidioksidipäästön, saadaan vertailukonseptissa turpeen korvaamisesta jätepuulla suurin korvaushyöty. Lämmön korvaamisen ja raskaan polttoöljyn valmistuksen korvaamisen kohdalla syntyvä vaikutus on turpeen korvaamista pienempi. Vaihtoehtojen paremmuutta on vertailukonseptissakin hankala vertailla vaihteluväleistä johtuen, mutta kumpikin vaihtoehdoista V1 ja V2 näyttää kuitenkin jäävän korvaushyötyjen puolelle.

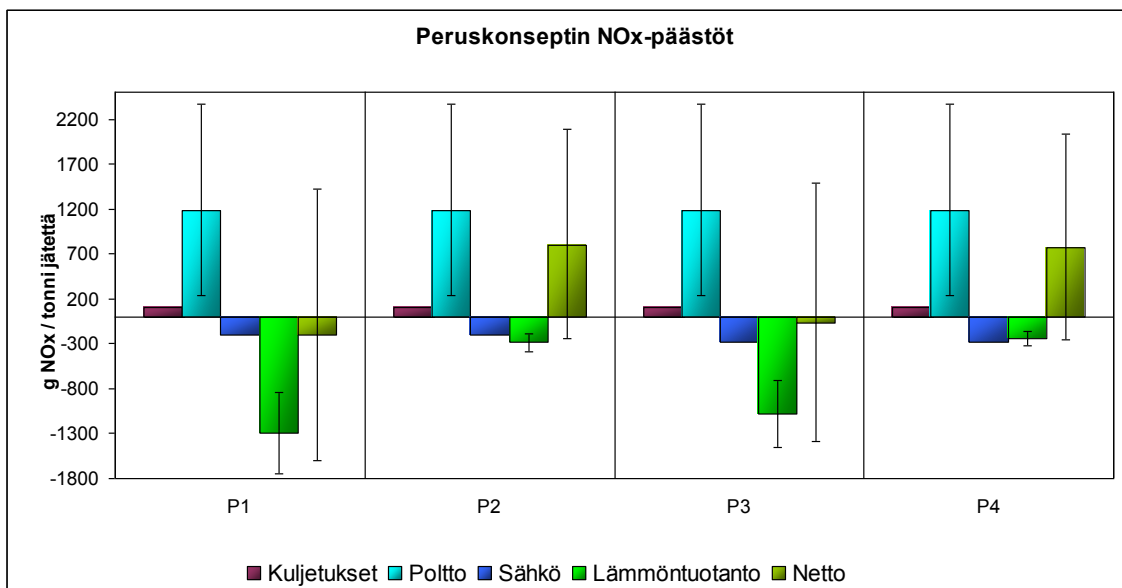
Rikkidioksidipäästöjen kohdalla ei perus- ja vertailukonseptia verrattaessa ole nähtävillä niin selvää kertaluokkaeroa kuin kasvihuonekaasupäästöjä vertailtaessa oli. Vaihteluvälin puitteissa periaatteessa mikä tahansa vaihtoehto voi olla vaikutuksiltaan edullisin tai vastaavasti heikoin.

### 5.1.3 Typen oksidit, NO<sub>x</sub>

Myös typen oksideilla on ilmakehää happamoittava kuormitusvaikutus. Muodostuvat typenoksidipäästöt ilmoitetaan tarkastelussa yksikössä gNO<sub>x</sub>/t, mutta laskentaan liittyvästä epävarmuudesta johtuen tarkkoja arvoja ei ole ilmoitettu.

## 5. Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset

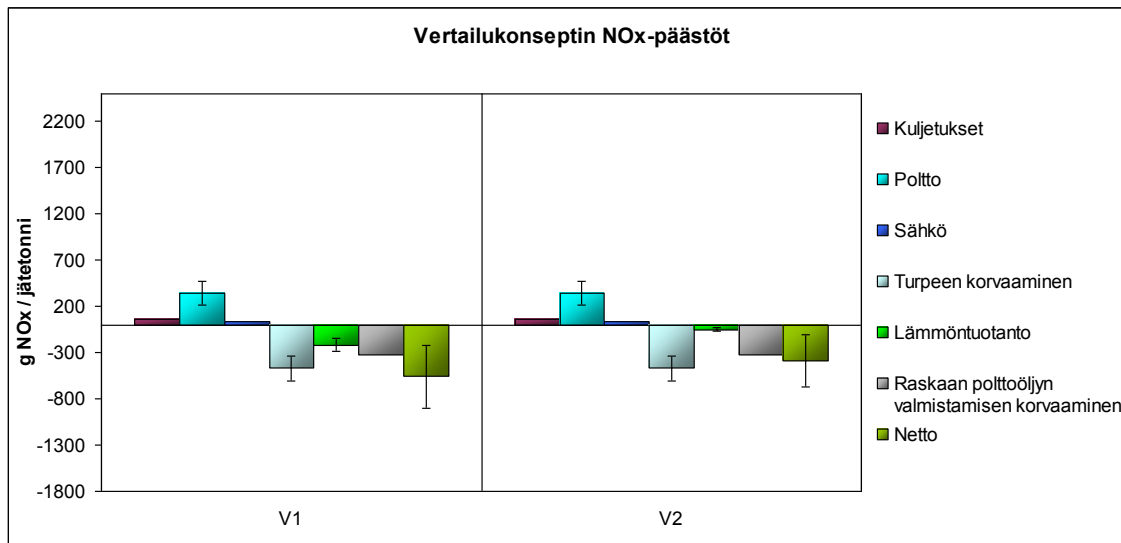
Peruskonseptin puun ja muovin polton synnyttämän typenoksidikuormituksen suuruus on kaikilla vaihtoehdoilla sama, hieman alle 1 200 gNO<sub>x</sub>/t (kuva 16). Vertailukonseptin puufraktion poltto tuottaa typenoksidipäästöjä tästä vain noin kolmanneksen ja lisäksi vaihtoehdoille muodostuu pieni päästölisä pyrolyysin vaatiman ostosähkön käytön päästöistä (kuva 17). Liikenteen suuresta päästökertoimesta johtuen kuljetusten aiheuttama typenoksidikuormitus nousee kaikilla tarkasteluvaihtoehdoilla muita tarkasteltuja ilma-päästöjä paremmin esille molemmissa konsepteissa.



Kuva 16. Typen oksidien aiheuttama kuormitus (gNO<sub>x</sub>/t) peruskonseptin eri vaihtoehdoissa vaihteluväleineen. Vaihtoehtojen kuvaukset: P1: hs. 25 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö, P2: hs. tuotettu 25 % sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö, P3: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö ja P4: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö.

## 5. Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset

Peruskonseptissa merkittävin korvaushyöty saadaan jälleen tuotetun lämmön johtamisesta teollisuuden hyödynnettäväksi (P1 ja P3). Yhdyskunnan käyttöön johdettu lämpö tuottaa puolestaan heikomman hyötysuhteen vuoksi huomattavasti vaatimattomamman korvaushyödyn vaihtoehdoissa P2 ja P4. Sähkön marginaalituotannon välttämisen tuottama korvaushyöty on kaikilla vaihtoehdoilla samaa suuruusluokkaa käytetyn kattilan ominaisuuksista riippuen.



Kuva 17. Vertailukonseptissa syntyvät typenoksidipäästöt (gNO<sub>x</sub>/t) vaihteluväleineen. Vaihtoehtojen kuvaukset: V1: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö teollisuuskäyttöön V2: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö yhdyskuntakäyttöön.

Peruskonseptin nettopäästöjä tarkasteltaessa huomataan, että puun ja muovin poltosta muodostuu suhteellisen paljon typenoksidipäästöjä ja toisaalta korvaushyödyt jäävät melko vähäisiksi varsinkin vaihtoehtojen P2 ja P4 kohdalla. Näin yhdyskuntakäyttöön johdetun lämmön kohdalla (vaihtoehdot P2 ja P4) ei suurella todennäköisyydellä saavuteta päästösäästöjä. Myös vaihtoehtojen P1 ja P3 kohdalla, joissa lämpö johdetaan teollisuuskäyttöön, on mahdollista, että vaihteluvälistä johtuen jäädään tässäkin positiiviseen nettopäästöön, jolloin vältetystä tuotannosta saatavat korvaushyödyt eivät riitä korvaamaan vaihtoehdoista syntyneitä päästökuormituksia. Keskiarvoisia nettopäästöjä tarkasteltaessa ovat P1 ja P3 nettopäästöt kuitenkin hieman korvaushyötyjen puolella.

Vaihtoehtojen paremmuutta tarkasteltaessa käy ilmi, että ainakin keskimääräisesti nettopäästöt vaihtoehdoissa V1 ja V2 ovat peruskonseptin vaihtoehtoja edullisemmat. Tämä johtuu siitä, että vertailukonseptin päästöt ovat suhteellisen pienet, ja toisaalta myös korvaushyötyjä syntyy tasaisesti sekä turpeen, raskaan polttoöljyn tuotannon, että keskimääräisen lämmön käytön välttämistä. Tällöin typen oksidien kannalta konseptit, jossa kaupan ja teollisuuden muovijäte pyrolysoidaan ja puufraktio johdetaan energia-

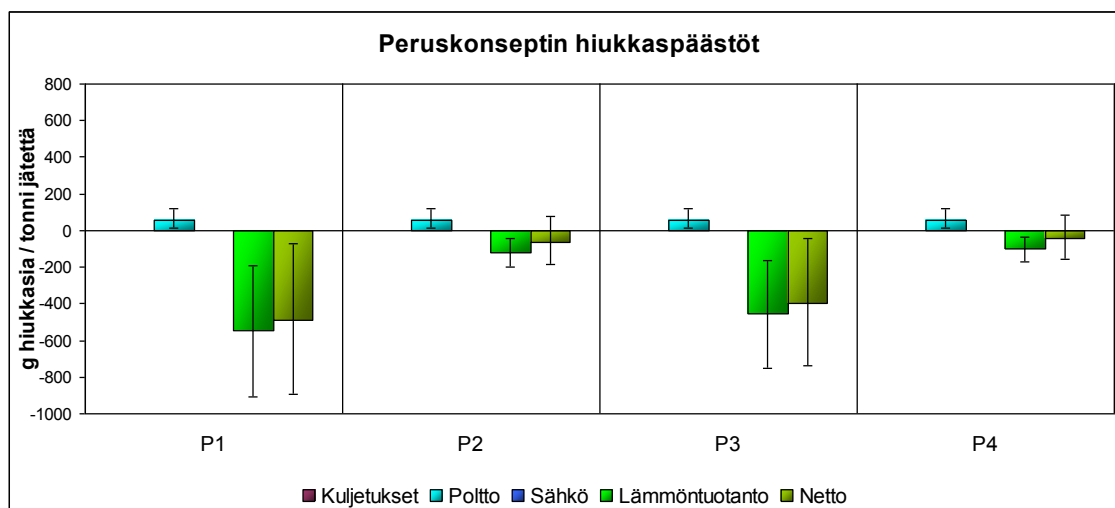


hyötykäyttöön, voivat muodostua kannattavimmaksi kuormitusten valossa kuin saman jätevirran energiahyötykäyttö. Toisaalta taas, jos vaihteluväli huomioidaan, voi paremmuusjärjestys muuttua suosimaan mitä tahansa esitetyistä vaihtoehdoista.

#### 5.1.4 Hiukkaset, PM

Hiukkaspäästöt on raportoitu hiukkasten kokonaismääränä yksikössä gPM/t. Myöskään hiukkaspäästöjen osalta ei tulosten viitteellisyydestä johtuen esitetä päästöjen ja korvaushyötyjen tarkkoja numeroarvoja.

Peruskonseptin vaihtoehdot synnyttävät vain vähäisen määrän hiukkaspäästöjä (kuva 18). Kuljetusten synnyttämä hiukkaspäästövaikutus on mitätön eikä erotu kuvassa. Kuljetusten osalta ei tunneta dieselpolttoaineen valmistuksen synnyttämiä hiukkaspäästöjä, mutta tämän tiedon puuttumisella ei ole keskeistä vaikutusta tulosten kannalta. Korvaushyötyjä peruskonseptissa syntyy vain lämmöntuotannon korvaamisesta, kivihiilellä tuotetun marginaalisähkön tuotannon korvaamisella ei saada merkittävää hyötyä. Keskiarvoisesti parempi korvaushyöty saadaan tässäkin päästöluokassa oletuksella, jossa tuotetun sähkön hyödyntää teollisuuslaitos (P1 ja P3), kuin jos lämmön käyttäisi yhdyskunta (P2 ja P4). Vaihteluvälin suuruus kuitenkin vaikeuttaa tulkintaa tässäkin päästöluokassa.



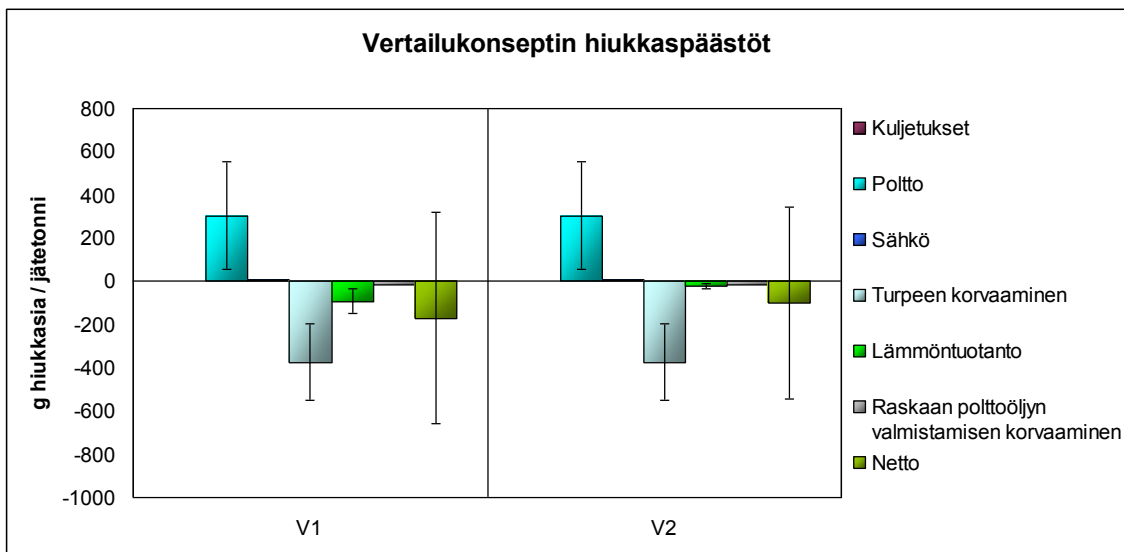
Kuva 18. Hiukkaskuormitus (gPM/t) peruskonseptin eri vaihtoehdoissa vaihteluväleineen. Vaihtoehtojen kuvaukset: P1: hs. 25 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö, P2: hs. tuotettu 25 % sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö, P3: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon teollisuuskäyttö ja P4: hs. 35 % tuotettu sähkö ja lämmöntuotannon yhdyskuntakäyttö.

Vertailukonseptin osalta kuvasta 19 nähdään, että puun poltosta muodostuu suuremmat hiukkaspäästöt kuin peruskonseptin puun ja muovin poltosta. Tämä johtuu lähtötietojen

eroista, sillä peruskonseptissa päästöjen määrittelyssä käytettiin jätteenpolttodirektiivin (Direktiivi 2000/76/EY) raja-arvoja, jotka on määritetty tiukoiksi. Vertailukonseptissa on puolestaan käytetty puun polton hiukkaspäästökerrointa, joka ei ole luonteeltaan raja-arvo vaan eri lähteiden mukaan määritetty ja näin ollen jätteenpolton päästökerrointa väljempi. Vertailukonseptissa sekä kuljetusten että ostonsähkön käytöstä aiheutuva hiukkasvaikutukset ovat pieniä.

Muodostuvia korvaushyötyjä tarkasteltaessa ovat lämmöntuotannon ja turpeen korvaamisesta aiheutuvat keskiarvoiset hyödyt korostuneet vertailukonseptien vaihtoehdoilla, varsinkin turpeen korvaushyöty on merkittävä. Raskaan polttoöljyn valmistuksen korvaamisesta muovioljyllä ei kuitenkaan saada mainittavaa hyötyä.

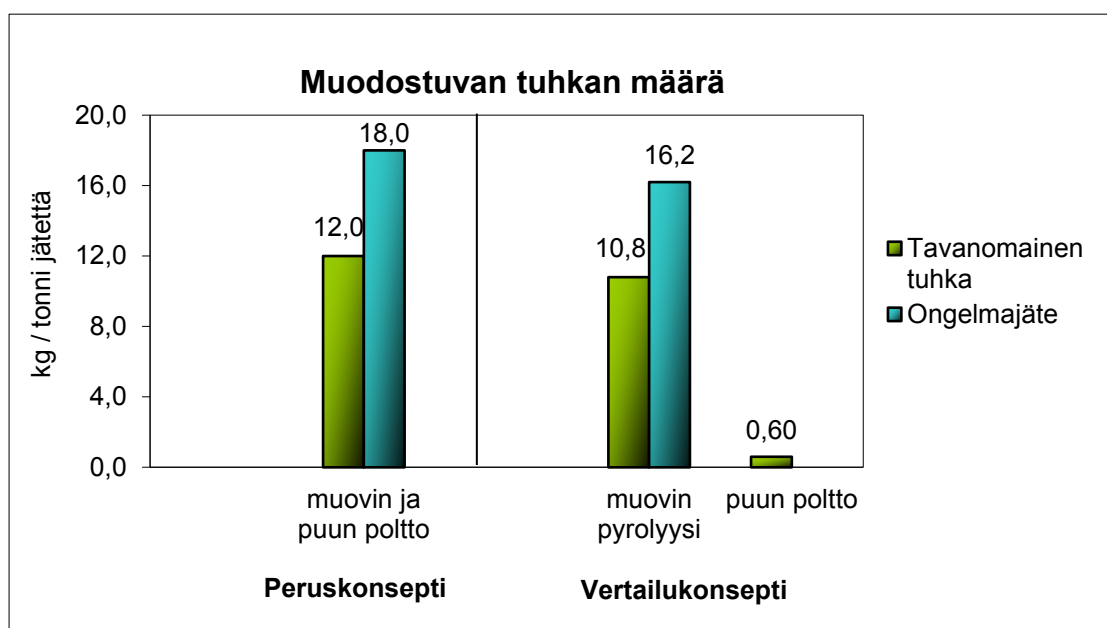
Keskimääräisiä nettohyötyjä tarkasteltaessa nettokuormituksiltaan edullisimmaksi muodostuvat energiahyödyntämisvaihtoehdot P1 ja P3. Näitä seuraavat vertailukonseptin vaihtoehdot V1 ja V2, kun puolestaan heikoimmaksi jäisivät vaihtoehdot P2 ja P4, joissa tuotetun lämmön hyödyntää yhdyskunta ja suuren lauhdutustarpeen vuoksi saatava korvaushyöty on vähäinen. Suuret vaihteluvälit tekevät kuitenkin tässäkin tulkinnasta kovin epävarman.



Kuva 19. Vertailukonseptin hiukaspäästöt (gPM/t) vaihteluväleineen. Vaihtoehtojen kuvaukset: V1: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö teollisuuskäyttöön V2: muovin pyrolyysi ja puun poltto, lämpö yhdyskuntakäyttöön.

### 5.1.5 Tuhkat

Peruskonseptissa syntyvän tuhkan määräksi on arvioitu 2 500 tonnia vuodessa. Tästä määrästä noin 1 000 tonnia on varsinaista tuhkaa, 1 470 tonnia kalkkia ja 30 tonnia aktiivihiihtä, joita käytetään savukaasujen puhdistuksessa. Jätetonna kohti laskettuna tuhkaista 12 kg on tavanomaista tuhkaa ja 18 kg ongelmajätettä, jolloin päästään yhteensä tuhkamäärään 30 kg/jätetonna (kuva 20).



Kuva 20. Konsepteissa syntyvän tavanomaisen ja ongelmajätteeksi luokiteltavan tuhkan määrät (kg/t).

Vertailukonseptissa tuhkaa arvioidaan syntyvän 2 300 t/a; tästä pyrolyysiprosessin tuhkien määräksi on arvioitu 2 250 t/a ja puun poltossa syntyväksi 50 t/a. Jätemuovia pyrolysoitaessa tavanomaista tuhkaa syntyy noin 10,8 kg/jätetonna ja ongelmajätteeksi luokiteltavaa tuhkaa 16,2 kg/t. Puun poltosta syntyy lisäksi 0,6 kg tavanomaista tuhkaa jätetonna kohti, ongelmajätteeksi luokiteltavaa tuhkaa ei synny. Yhteenlaskettuna vertailukonseptin tuhkamäärä 27,6 kg/jätetonna on noin 8 % pienempi kuin peruskonseptin tuhkamäärä.

Konseptien välisissä tuhkamäärissä ja niiden jakautumisessa ei ole nähtävissä merkittävää eroa. Kuvista voidaan kuitenkin huomata, että lähes kaikki muodostuva tuhka on peräisin muovijätteestä ja savukaasujen käsittelystä.

## **6. Vaihtoehtojen kustannukset**

Vaihtoehtojen taloudellista kannattavuutta yhteiskunnallisesta ja liiketaloudellisesta näkökulmasta tarkastellaan alaluvussa 6.1. Alaluvussa 6.2 esitetään eri vaihtoehtojen kannattavuuden vertailu ja lopuksi alaluvussa 6.3 raportoidaan kustannuslaskennan herkkyystarkastelut.

### **6.1 Kustannuslaskennan tulokset ja tulosten tarkastelu**

#### **6.1.1 Teollisuusalueen energiahyödyntämisvaihtoehto P1**

Vaihtoehdossa P1 jätettä polttava laitos sijaitsee teollisuusalueella ja sen tuottamasta lämmöstä 80 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi vaihtoehdossa P1 on oletettu laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeksi 25 % (ks. kuva 9, s. 33). Taulukossa 8 on eritelty energiahyödyntämisvaihtoehdon P1 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen kannattavuustarkastelun tulokset. Siirtyminen kivihiilellä tuotetusta energiasta tarkasteluvaihtoehdon P1 energiantuotantoon aiheuttaa yhteiskunnalle negatiiviset nettokustannukset (-59,20 €/t), mikä tarkoittaa, että siirtyminen on yhteiskunnallisesti kannattavaa. Tarkemmassa tarkastelussa havaitaan, että kivihiilellä tuotetun energian korvaaminen puu-muovijätteellä tuotetulla energialla aiheuttaa sekä negatiiviset yksityiset nettokustannukset että negatiiviset ympäristönettokustannukset. Tämä tarkoittaa, että puu-muovijätteen polttaminen hyödyttää yhteiskuntaa sekä vältettyjen kustannusten että vältettyjen ympäristökuormitusten muodossa. Laitoksen näkökulmasta katsottuna toiminta on myös liiketaloudellisesti kannattavaa, sillä toiminnanharjoittajalle koituu voittoa 28,03 € syötetonnin kohden.

Taulukko 8. Vaihtoehdon P1 kustannuslaskennan tulokset.

Jätettä hyödyntävä laitos (hyötysuhde: S 25 %, L 60 %, hyö- tykäyttöosuus tuotetusta energiasta: S 100 %, L 90 %)	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan teollisuuslämpöä</b>		
Pääomakustannukset	4,24	50,84
Kuljetuskustannukset (200 km, 4 h, 30 t kuorma)	0,40	4,80
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	2,97	35,65
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,20	2,44
Päästökaupakustannukset	0,00	0,00
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	13,04	156,51
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-16,94	-203,31
Yksityiset nettokustannukset	-3,90	-46,80
<i>Ympäristökustannukset</i>	2,26	27,11
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-3,29	-39,51
Ympäristönettokustannukset	-1,03	-12,40
Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä	-4,93	-59,20
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan teollisuuslämpöä</b>		
Myyntituotot	18,64	223,71
Yksityiset tuotantokustannukset	-13,04	-156,51
Alv. 23 % (netto)	-3,26	-39,17
<b>Voitto</b>	<b>2,34</b>	<b>28,03</b>

### 6.1.2 Yhdyskunta-alueen energiahyödyntämisvaihtoehto P2

Vaihtoehdossa P2 jätettä polttava laitos sijaitsee yhdyskunta-alueella, jolloin sen tuotamasta lämmöstä 20 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi vaihtoehdossa P2 on oletettu laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeksi 25 % (ks. kuva 9 sivulla 33). Taulukossa 9 on esitetty energiahyödyntämisvaihtoehdon P2 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen kannattavuustarkastelun tulokset. Siirtyminen kivihiehellä tuotetusta energiasta tarkasteluvaihtoehdon P2 energiantuotantoon aiheuttaa yhteiskunnalle positiiviset nettokustannukset (52,53 €/t), eikä siirtyminen ole yhteiskunnallisesti kannattavaa. Positiiviset yksityiset nettokustannukset tarkoittavat, että energian tuottaminen kivihiehellä on edullisempaa kuin energian tuottaminen puu-muovijätteellä. Negatiiviset ympäristönettokustannukset sen sijaan osoittavat, että tarkasteluvaihtoehdon P2 energiantuotanto on ympäristön kannalta hieman edullisempi valinta kuin kivihiehellä tuotettu energia. Näin on, koska kivihiehellä tuotetun energian päästöt ovat suuremmat kuin mitä puu-muovijätteellä tuotetussa energiassa. Liiketaloudellinen tarkastelu puolestaan osoittaa, että energian tuottaminen vaihtoehdossa P2 aiheuttaa toiminnanharjoittajalle tappiota.

Taulukko 9. Vaihtoehdon P2 kustannuslaskennan tulokset.

Jätettä hyödyntävä laitos (hyötysuhde: S 25 %, L 60 %, hyötykäyttöosuus tuotetusta energiasta: S 100 %, L 20 %)	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan kaukolämpöä</b>		
Pääomakustannukset	4,24	50,84
Kuljetuskustannukset (200 km, 4 h, 30 t kuorma)	0,40	4,80
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	2,97	35,65
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,20	2,44
Päästökauppakustannukset	0,00	0,00
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	13,04	156,51
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-8,40	-100,84
Yksityiset nettokustannukset	4,64	55,67
<i>Ympäristökustannukset</i>	2,26	27,11
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-2,52	-30,25
Ympäristönettokustannukset	-0,26	-3,14
Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä	4,38	52,53
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan kaukolämpöä</b>		
Myyntituotot	10,20	122,35
Yksityiset tuotantokustannukset	-13,04	-156,51
Alv. 23 % (netto)	-1,00	-12,03
<b>Voitto</b>	<b>-3,85</b>	<b>-46,19</b>

Erot vaihtoehdon P1 tuloksiin johtuvat siitä, että yhdyskunta-alueella sijaitsevalle laitokselle ei voida laskea lämmöntuotannon osalta yhtä paljon korvaushyötyjä, koska ai-noastaan 20 % tuotetusta lämmöstä todella päätyy hyötykäyttöön ja loput lauhdutetaan. Lauhdutuksen suuri osuus johtuu puolestaan siitä, että yhdyskunta-alueella voidaan olettaa olevan jo hyvin saturoituneet kaukolämpöverkostot, eikä tarvetta ylimääräiselle lämmölle siten ole. Vaihtoehto P2 ei myöskään yllä yhtä suuriin ympäristösäästöihin kuin vaihtoehto P1.

### 6.1.3 Teollisuusalueen energiahyödyntämisvaihtoehto P3

Vaihtoehdossa P3 jätettä polttava laitos sijaitsee teollisuusalueella, jolloin sen tuottamasta lämmöstä 80 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi vaihtoehdossa P3 on oletettu laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeksi 35 % (ks. kuva 9 sivulla 33). Taulukosta 10 nähdään energiahyödyntämisvaihtoehdon P3 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen kannattavuustarkastelun tulokset. Siirtyminen kivihiehellä tuotetusta energiasta vaihtoehdon P3 energiantuotantoon on yhteiskunnallisesti kannattavaa, koska yhteiskunnalliset nettokustannukset ovat negatiiviset (-17,26 €/t). Vaihtoehto ei kuiten-

## 6. Vaihtoehtojen kustannukset

kaan ole yhtä kannattava kuin samalla alueella sijaitseva 25 %:n hyötysuhteen laitos (vaihtoehto P1). Vaihtoehtoon P1 verrattuna yksityisissä kustannuksissa ei saavuteta yhtä suuria säästöjä, mutta ympäristöhyötyjä saadaan vaihtoehtoa P1 enemmän. Myös liiketaloudellisesta näkökulmasta katsottuna toiminta on juuri ja juuri kannattavaa, sillä toiminnanharjoittajalle koituu voittoa 1,27 € syötetonna kohden. Voitto jää pienemmäksi kuin vastaavalla 25 %:n hyötysuhteen laitoksella, koska 35 %:n hyötysuhteen laitoksen pääomakustannukset sekä käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat suuremmat.

Taulukko 10. Vaihtoehdon P3 kustannuslaskennan tulokset.

Jätettä hyödyntävä laitos (hyötysuhde: S 35 %, L 50 %, hyötykäyttöosuus tuotetusta energiasta: S 100 %, L 90 %)	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan teollisuuslämpöä</b>		
Pääomakustannukset	5,08	61,01
Kuljetuskustannus (200 km, 4 h, 30 t kuorma)	0,40	4,80
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	3,12	37,43
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,20	2,44
Päästökaupakustannukset	1,92	23,06
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	15,96	191,52
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-17,52	-210,22
<b>Yksityiset nettokustannukset</b>	<b>-1,56</b>	<b>-18,70</b>
<i>Ympäristökustannukset</i>	2,26	27,11
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-4,01	-48,13
<b>Ympäristönettokustannukset</b>	<b>-1,75</b>	<b>-21,02</b>
<b>Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä*</b>	<b>-1,44</b>	<b>-17,26</b>
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan teollisuuslämpöä</b>		
Myyntituotot	18,94	227,22
Yksityiset tuotantokustannukset	-15,96	-191,52
Alv. 23 % (netto)	-2,87	-34,43
<b>Voitto</b>	<b>0,11</b>	<b>1,27</b>

\*Päästökaupan piiriin kuuluvan polttolaitoksen aiheuttamat fossiiliset hiilidioksidipäästöt aiheuttavat ympäristökustannuksia kasvihuoneilmiötä kiihdyttävänä kaasuna. Noudattaen elinkaariarvioinnin periaatteita hiilidioksidipäästöistä aiheutuvat ympäristökustannukset raportoidaan myös osana muita ympäristökustannuksia. Näitä ei kuitenkaan lasketa mukaan yhteiskunnallisiin kokonaiskustannuksiin, koska ne sisältyvät jo laitoksen yksityisiin kustannuksiin päästöoikeuskaupan kautta.

### 6.1.4 Yhdyskunta-alueen energiahyödyntämisvaihtoehto P4

Vaihtoehdossa P4 jätettä polttava laitos sijaitsee yhdyskunta-alueella, jolloin sen tuottamasta lämmöstä 20 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi laitoksen sähköntuotannon hyötysuhteeksi on oletettu 35 % (ks. kuva 9 sivulla 33). Taulukossa 11 eritellään energiahyödyntämisvaihtoehdon P4 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen

## 6. Vaihtoehtojen kustannukset

kannattavuustarkastelun tulokset. Nähdään, että siirtyminen kivihiilellä tuotetusta energiasta vaihtoehdon P4 energiantuotantoon ei ole yhteiskunnallisesti kannattavaa, koska se aiheuttaa yhteiskunnalle kustannuksia (69,60 €/t). Tulokset ovat yhdenmukaiset vaihtoehdon P2 kanssa. Yksityiset nettokustannukset ovat positiiviset, mikä tarkoittaa, että energian tuottaminen kivihiilellä on edullisempaa kuin energian tuottaminen puumuovijätteestä vaihtoehdon P4 mukaisella tavalla. Ero tarkasteluvaihtoehdon P3 tulokseen johtuu samasta syystä kuin vaihtoehtojen P1 ja P2 välinen ero, sillä yhdyskunta-alueella sijaitsevalle laitokselle ei voida laskea lämmöntuotannon osalta yhtä paljon korvaushyötyjä, koska ainoastaan 20 % tuotetusta lämmöstä todella päätyy hyötykäyttöön ja loput lauhdutetaan.

Taulukko 11. Vaihtoehdon P4 kustannuslaskennan tulokset.

Jätettä hyödyntävä laitos (hyötysuhde: S 35 %, L 50 %, hyötykäyttöosuus tuotetusta energiasta: S 100 %, L 20 %)	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan kaukolämpöä</b>		
Pääomakustannukset	5,08	61,01
Kuljetuskustannukset (200 km, 4 h, 30 t kuorma)	0,40	4,80
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	3,12	37,43
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,20	2,44
Päästökaupakustannukset	1,92	23,06
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	15,96	191,52
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-8,40	-100,79
<b>Yksityiset nettokustannukset</b>	<b>7,56</b>	<b>90,73</b>
<i>Ympäristökustannukset</i>	2,26	27,11
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-3,41	-40,93
<b>Ympäristönettokustannukset</b>	<b>-1,15</b>	<b>-13,82</b>
<b>Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä*</b>	<b>5,80</b>	<b>69,60</b>
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan kaukolämpöä</b>		
Myyntituotot	10,74	128,89
Yksityiset tuotantokustannukset	-15,96	-191,52
Alv. 23 % (netto)	-0,98	-11,81
<b>Voitto</b>	<b>-6,20</b>	<b>-74,45</b>

\*Päästökaupan piiriin kuuluvan polttolaitoksen aiheuttamat fossiiliset hiilidioksidipäästöt aiheuttavat ympäristökustannuksia kasvihuoneilmiötä kiihdyttävänä kaasuna. Noudattaen elinkaariarvioinnin periaatteita hiilidioksidipäästöistä aiheutuvat ympäristökustannukset raportoidaan myös osana muita ympäristökustannuksia. Näitä ei kuitenkaan lasketa mukaan yhteiskunnallisiin kokonaiskustannuksiin, koska ne sisältyvät jo laitoksen yksityisiin kustannuksiin päästöoikeuskaupan kautta.

Ympäristönettokustannukset kuitenkin osoittavat, että energiantuotannossa vaihtoehto P4 on muiden tarkasteluvaihtoehtojen tapaan ympäristön kannalta edullisempi valinta kuin kivihiili, koska vältetyn tuotannon päästöt ovat suuremmat kuin mitä puu-



muovijätteellä tuotetussa energiassa. Pelkkiä ympäristönnettokustannuksia vertailtaessa vaihtoehto P4 asettuu toiseksi kannattavimmaksi vaihtoehdoksi P3:n jälkeen. Liiketaloudellisesta tarkastelusta huomataan, että tässäkin tapauksessa lauhdutukseen päätyvä lämpö aiheuttaa laitokselle sen verran tulonmenetyksiä, että toiminta jää tarkasteluvaihtoehtodossa tappiolliseksi.

### 6.1.5 Teollisuusalueen pyrolyysivaihtoehto V1

Vaihtoehtodossa V1 muovia pyrolysoiva laitos sijaitsee teollisuusalueella, jolloin sen tuottamasta sivutuotelämmöstä 80 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi vaihtoehtodossa V1 on oletettu, että puu hyödynnetään paperitehtaan yhteydessä sijaitsevassa kattilassa (ks. kuva 11 sivulla 35). Taulukossa 12 esitetään pyrolyysivaihtoehdon V1 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen kannattavuustarkastelun tulokset.

Taulukko 12. Vaihtoehdon V1 kustannuslaskennan tulokset.

Pyrolyysi + poltto	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan raskasta öljyä ja teollisuuslämpöä</b>		
Pääomakustannukset	1,46	17,48
Kuljetuskustannukset, 200 km, 4 h	0,15	1,81
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	2,96	35,54
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,19	2,24
Päästökauppakustannukset	0,00	0,00
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	9,99	119,84
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-13,16	-157,94
Yksityiset nettokustannukset	-3,17	-38,10
<i>Ympäristökustannukset</i>	0,48	5,80
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-0,94	-11,32
Ympäristönnettokustannukset	-0,46	-5,52
Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä	-3,64	-43,62
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan raskasta öljyä ja teollisuuslämpöä</b>		
Öljyn myyntituotot	9,64	115,66
Puun myyntituotot	0,69	8,27
Lämmön myyntituotot	2,11	25,29
Yksityiset tuotantokustannukset	-9,99	-119,84
Alv. 23 % (netto) + muut verot	-2,49	-29,89
<b>Voitto</b>	<b>-0,04</b>	<b>-0,52</b>

Siirtyminen raskaan polttoöljyn tuotannosta muovijätteen pyrolysointiin on yhteiskunnallisesti kannattavaa, koska vaihtoehdon yhteiskunnalliset nettokustannukset ovat negatiiviset (-43,62 €/t). Vaihtoehtodossa sekä yksityiset nettokustannukset että ympäristönnettokustannukset saavat negatiivisen arvon. Verrattuna siis raskaan polttoöljyn tuot-

tamiseen neitseellisistä raaka-aineista muovin pyrolysointi hyödyttää yhteiskuntaa sekä vältettyjen kustannusten että vältettyjen ympäristökuormitusten muodossa.

Sen sijaan laitoksen liiketaloudellinen kannattavuus on epävarmaa. Tulosten mukaan toiminta jäisi juuri ja juuri tappiolliseksi (voitto -0,52 €/t). Koska syntyvä tappio on kuitenkin hyvin pieni, sen voidaan katsoa sisältyvän laskennan epävarmuushaarukkaan. Pienet muutokset laskennan oletuksissa voisivat muuttaa vaihtoehdon V1 voitolliseksi.

### 6.1.6 Yhdyskunta-alueen pyrolyysivaihtoehto V2

Vaihtoehdossa V2 muovia pyrolysoiva laitos sijaitsee yhdyskunta-alueella, jolloin sen tuottamasta sivutuotelämmöstä 20 % päätyy hyötykäyttöön. Lisäksi vaihtoehdossa V2 on oletettu, että puu hyödynnetään paperitehtaan yhteydessä sijaitsevassa kattilassa (ks. kuva 11 sivulla 35). Taulukosta 13 nähdään pyrolyysivaihtoehdon V2 yhteiskunnallisen kustannuslaskennan ja liiketaloudellisen kannattavuustarkastelun tulokset.

Taulukko 13. Vaihtoehdon V2 kustannuslaskennan tulokset.

Pyrolyysi + poltto	M€/a	€/t puu-muovijätettä
<b>Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan raskasta öljyä ja kaukolämpöä</b>		
Pääomakustannukset	1,46	17,48
Kuljetuskustannukset, 200 km, 4 h	0,15	1,81
Jätteen hankintakustannukset	5,23	62,78
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	2,96	35,54
Tuhkan loppusijoituskustannukset	0,19	2,24
Päästökaupakustannukset		0,00
<i>Yksityiset tuotantokustannukset</i>	9,99	119,84
<i>Vältetyn tuotannon kustannukset</i>	-11,74	-140,86
<b>Yksityiset nettokustannukset</b>	<b>-1,75</b>	<b>-21,02</b>
<i>Ympäristökustannukset</i>	0,48	5,80
<i>Ympäristöhyvitykset</i>	-0,82	-9,79
<b>Ympäristönettokustannukset</b>	<b>-0,33</b>	<b>-3,99</b>
<b>Yhteiskunnalliset nettokustannukset yhteensä</b>	<b>-2,08</b>	<b>-25,01</b>
<b>Liiketaloudellinen kannattavuustarkastelu, kun korvataan raskasta öljyä ja kaukolämpöä</b>		
Öljyn myyntituotot	9,64	115,66
Puun myyntituotot	0,69	8,27
Lämmön myyntituotot	0,47	5,62
Yksityiset tuotantokustannukset	-9,99	-119,84
Alv. 23 % (netto) + muut verot	-2,11	-25,36
<b>Voitto</b>	<b>-1,31</b>	<b>-15,67</b>

Siirtyminen raskaan polttoöljyn tuotannosta muovijätteen pyrolysointiin on yhteiskunnallisesti kannattavaa, vaihtoehdon yhteiskunnallisten nettokustannusten ollessa negatiiviset (-25,01 €/t). Vaihtoehto ei kuitenkaan ole yhtä kannattava kuin teollisuusalueen pyrolyysivaihtoehto V1 suuremmasta hukkalämmöstä johtuen. Liiketaloudellinen kannattavuus on tässä tapauksessa selkeästi tappiollinen (-15,67 €/t), koska kaikkea tuotettua lämpöä ei saada yhdyskunta-alueella myydyksi.

## 6.2 Käsittelyketjujen kustannusten vertailu

### 6.2.1 Yhteiskunnallinen kannattavuus

Taulukossa 14 on tarkasteltu eri vaihtoehtojen yhteiskunnallista kannattavuutta eli yhteiskunnallisia nettokustannuksia. Sininen väri viittaa yhteiskunnallisen kannattavuuden parantumiseen ja vaaleanpunainen väri päinvastaiseen. Taulukosta havaitaan, että yhteiskunnan kannalta kannattavin vaihtoehto on teollisuusalueella sijaitseva 25 %:n hyötysuhteen polttolaitos eli vaihtoehto P1. Myös vaihtoehdon V1 (muovin pyrolysointi teollisuusalueella) yhteiskunnalliset kustannukset ovat vahvasti negatiiviset, mikä tarkoittaa, että yhteiskunnan näkökulmasta katsottuna vaihtoehdolla on potentiaalia kehittyä varteenotettavaksi kilpailijaksi P1:lle. Yhteiskunnan kannalta kannattamattomia ratkaisuja ovat yhdyskunta-alueelle sijoitetut energiantuotantolaitokset, joissa lämmöstä saadaan hyödynnettyä vain pieni osa jo olemassa olevien kaukolämpöratkaisujen vuoksi.

Taulukko 14. Tarkasteluvaihtoehtojen yhteiskunnallinen kannattavuusvertailu (edullisin ratkaisu lihavoitu).

€/ t puu-muovijätettä	Yhteiskunnallinen kannattavuustarkastelu		
	Yksityiset nettokustannukset	Ympäristönettokustannukset	Yhteiskunnalliset nettokustannukset
P1: sähkö 25 % + teollisuuslämpö	<b>-46,80</b>	-12,40	<b>-59,20</b>
P2: sähkö 25 % + kaukolämpö	55,67	-3,14	52,53
P3: sähkö 35 % + teollisuuslämpö	-18,70	<b>-21,02</b>	-17,26*
P4: sähkö 35 % + kaukolämpö	90,73	-13,82	69,60*
V1: Pyrolyysi + teollisuuslämpö	-38,10	-5,52	-43,62
V2: Pyrolyysi + kaukolämpö	-21,02	-3,99	-25,01

\* Päästökaupan piiriin kuuluvan polttolaitoksen aiheuttamat fossiiliset hiilidioksidipäästöt aiheuttavat ympäristökustannuksia kasvihuoneilmiötä kiihdyttävänä kaasuna. Noudattaen elinkaariarvioinnin periaatteita hiilidioksidipäästöistä aiheutuvat ympäristökustannukset raportoidaan myös osana muita ympäristökustannuksia. Näitä ei kuitenkaan lasketa mukaan yhteiskunnallisiin kokonaiskustannuksiin, koska ne sisältyvät jo laitoksen yksityisiin kustannuksiin päästö-oikeuskaupan kautta.

Vaihtoehdon P1 yhteiskunnallinen kannattavuus perustuu pääosin siihen, että vaihtoehdossa on muita vaihtoehtoja suuremmat negatiiviset yksityiset nettokustannukset. Vaikka kivihiilen polton korvaamisesta saatavat korvaushyödyt ovat alhaisemmat 25 %:n

hyötysuhteen laitoksessa kuin 35 %:n laitoksessa, ovat 25 %:n laitoksen pääoma- ja käyttökustannukset kuitenkin alhaisemmat kuin edistyneemmällä polttolaitoksella. Pääoma- ja käyttökustannukset ovat vältettyjä kustannuksia merkittävämpi kustannuserä, minkä seurauksena yksityiset nettokustannukset ovat alhaisemmat vaihtoehdossa P1.

Jos tarkastellaan pelkästään ympäristönnettokustannuksia, havaitaan, että ympäristön kannalta suurin parannus tapahtuisi vaihtoehdossa P3 (eli tuotettaessa energiaa teollisuusalueella sijaitsevassa 35 %:n hyötysuhteen laitoksessa). Kaikki tarkasteluvaihtoehdot tuottavat kuitenkin jonkin verran ympäristökorvaushyötyjä.

### 6.2.2 Liiketaloudellinen kannattavuus

Taulukossa 15 esitetään eri tarkasteluvaihtoehtojen liiketaloudellinen kannattavuusvertailu. Tässä selvityksessä liiketaloudellisesti kannattaviksi ratkaisuiksi on tulkittu ne vaihtoehdot, jotka tuottavat positiivisen voiton.

Taulukko 15. Tarkasteluvaihtoehtojen liiketaloudellinen kannattavuusvertailu (edullisin ratkaisu lihavoitu).

€/ t puu-muovijätettä	Voitto
P1: sähkö 25 % + teollisuuslämpö	<b>28,03</b>
P2: sähkö 25 % + kaukolämpö	-46,19
P3: sähkö 35 % + teollisuuslämpö	1,27
P4: sähkö 35 % + kaukolämpö	-74,45
V1: Pyrolyysi + teollisuuslämpö	-0,52
V2: Pyrolyysi + kaukolämpö	-15,67

Liiketaloudellisesti kannattaviksi vaihtoehdoiksi osoittautuvat teollisuusalueella sijaitsevat energiantuotantolaitokset (vaihtoehdot P1 ja P3), koska ne saavat sähkön lisäksi suurimman osan tuottamastaan lämmöstä myydyksi. Erot yhdyskunta-alueilla sijaitseviin energiantuotantolaitoksiin ovat suuret, mistä voidaan päätellä, että oletukset lämmön hyötykäytöstä vaikuttavat olennaisesti liiketaloudelliseen kannattavuuteen. Taulukoista 11 ja 12 havaittiin, että 35 %:n hyötysuhteen polttolaitoksen myyntituotot ovat suuremmat kuin 25 %:n hyötysuhteen polttolaitoksessa nimenomaan suuremman sähköntuotannon vuoksi. Suurin voitto syntyy kuitenkin 25 %:n hyötysuhteen polttolaitoksen oletettujen alhaisempien tuotantokustannuksien takia.

Tuloksista havaitaan teollisuusalueella sijaitsevan pyrolyysilaitoksen (vaihtoehto V1) voiton olevan juuri ja juuri negatiivinen. Vaihtoehdon voidaan siten katsoa sijoittuvan kannattavuuden rajamaille, jolloin esimerkiksi hieman erilaisilla kustannusoletuksilla pyrolyysilaitos voisi olla myös liiketaloudellisesti kannattava.

## 6.3 Kustannustarkastelun herkkyyshanalyysi

### 6.3.1 Puu-muovijätteen hankintakustannuksen ja hinnan vaikutus yhteiskunnalliseen ja liiketaloudelliseen kannattavuuteen

Taulukossa 16 esitetään jätteen hankintahinnan vaikutus tarkasteluvaihtoehtojen yhteiskunnallisiin kustannuksiin. Yhteiskunnallisessa tarkastelussa tämä hinta kuvastaa hankintakustannuksia, jotka muodostuvat jätteen keräyksestä, kuljetuksesta ja mahdollisesta esikäsitteystä. Taulukossa on laskettu, mitä jätteen hankinta saisi korkeintaan maksaa yhteiskunnalle, jotta vaihtoehto olisi yhteiskunnan kannalta edelleen kannattava.

Taulukko 16. Tarkasteluvaihtoehtojen yhteiskunnalliset kustannukset jätteen eri hankintakustannuksella (perustarkastelussa käytetty arvo lihavoitu).

Yhteiskunnalliset kustannukset €/ t puu-muovijätettä	Jätteen hankintakustannukset €/ t puu-muovijätettä				Hankinta- kustannukset, joilla vaihtoehto- don kustannus = 0	Muutos perus- tarkasteluun %
	0	31	63	94		
P1: sähkö 25 % + teollisuuslämpö	-122	-91	<b>-59</b>	-28	122	94
P2: sähkö 25 % + kaukolämpö	-10	21	<b>53</b>	84	10	-84
P3: sähkö 35 % + teollisuuslämpö	-80	-49	<b>-17</b>	14	80	27
P4: sähkö 35 % + kaukolämpö	7	38	<b>70</b>	101	-	-
V1: Pyrolyysi + teollisuuslämpö	-110	-77	<b>-44</b>	-11	104	65
V2: Pyrolyysi + kaukolämpö	-91	-58	<b>-25</b>	8	87	38

Taulukosta 16 havaitaan, että jätteen hankintakustannusten aleneminen parantaa vaihtoehtojen yhteiskunnallista kannattavuutta. Tämä on looginen tulos, koska hankintakustannusten aleneminen tarkoittaa tässä yhteydessä käytännössä sitä, että puu-muovijätteen keräilystä aiheutuvat kustannukset alenevat esimerkiksi keräilyn tehostumisen myötä. Käytännössä jätteen hankintakustannukset eivät voi koskaan laskea nolnaan asti, koska jätteen keräys, kuljetus ja mahdollinen esikäsitteily maksavat väistämättä jollekin yhteiskunnan toimijalle jotakin. Taulukossa esitetyt nollahinnalla vallitsevat tulokset edustavat siis teoreettista ääripäätä.

Jätteen hankintakustannusten muutokset eivät vaikuta vaihtoehtojen paremmuusjärjestykseen. Vaihtoehto P1 säilyy kannattavana vielä lähes kaksinkertaisilla jätteen hankintakustannuksilla, kun taas vaihtoehto P4 ei ole yhteiskunnallisesti kannattava millään positiivisilla jätteen hankintakustannuksilla. Taulukossa 17 on puolestaan esitetty jätteestä maksettavan hinnan vaikutus toiminnanharjoittajien saamaan liiketaloudelliseen voittoon. Taulukkoon on myös laskettu korkein jätteen hinta, jolla toiminnan harjoittaminen on vielä liiketaloudellisesti kannattavaa.

Taulukko 17. Toiminnanharjoittajan saama voitto jätteen eri hankintahinnoilla (perustarkastelussa käytetty arvo lihavoitu).

Liiketaloudellinen voitto €/ t puu-muovijätettä	Jätteen hankintahinta €/ t puu-muovijätettä				Hinta, jolla voitto = 0	Muutos perus- tarkasteluun %
	0	31	<b>63</b>	94		
P1: sähkö 25 % + teollisuuslämpö	76	52	<b>28</b>	3	99	57
P2: sähkö 25 % + kaukolämpö	2	-22	<b>-46</b>	-71	3	-95
P3: sähkö 35 % + teollisuuslämpö	50	25	<b>1</b>	-23	64	2
P4: sähkö 35 % + kaukolämpö	-25	-49	<b>-74</b>	-98	-	-
V1: Pyrolyysi + teollisuuslämpö	51	25	<b>-1</b>	-26	62	-2
V2: Pyrolyysi + kaukolämpö	36	10	<b>-16</b>	-41	44	-30

Yhdenmukaisesti yhteiskunnallisen kannattavuustarkastelun kanssa jätteen hankintahinnan aleneminen kasvattaa vaihtoehtojen liiketaloudellista kannattavuutta mutta ei muuta vaihtoehtojen kannattavuusjärjestystä. Teollisuusalueella sijaitseva pyrolyysilaitos muuttuisi liiketaloudellisesti kannattavaksi 2 % alhaisemmalla jätteen hankintahinnalla ja yhdyskunta-alueella sijaitseva pyrolyysilaitos 30 % alhaisemmalla jätteen hankintahinnalla. Ainoastaan teollisuusalueella sijaitseva 25 %:n hyötysuhteen polttolaitos säilyisi liiketaloudellisesti kannattavana, mikäli jätteen hinta kasvaisi yli 2 %. Mikäli laitokset saisivat jätteen ilmaiseksi, olisivat kaikki laitokset liiketaloudellisesti kannattavia yhdyskunta-alueella sijaitsevaa 35 %:n hyötysuhteen polttolaitosta lukuun ottamatta.

### 6.3.2 Lämmön hyötykäyttöosuuden vaikutus yhteiskunnalliseen ja liiketaloudelliseen kannattavuuteen

Perustarkastelussa tarkasteltiin energiantuotanto- ja pyrolyysilaitosten kannattavuutta kahdella eri lämmön hyötykäyttöoletuksella. Teollisuusalueella sijaitsevilla laitoksilla oletettiin 90 % lämmöstä päätyvän hyötykäyttöön, ja yhdyskunta-alueella sijaitsevilla laitoksilla oletettiin vain 20 % lämmöstä päätyvän hyötykäyttöön. Perustarkastelun tuloksista havaittiin, että tämä oletus vaikutti merkittävästi vaihtoehtojen kannattavuuteen. Taulukossa 18 esitetään eri laitosvaihtoehtojen yhteiskunnalliset kustannukset lämmön eri hyötykäyttöoletuksilla. Oikeimman puoleinen sarake (90 % lämmön hyötykäyttöoletus) kuvastaa tarkasteluvaihtoehtojen P1, P3 ja V1 varsinaisia tuloksia ja vasemman puoleisin sarake (20 % lämmön hyötykäyttöoletus) kuvastaa tarkasteluvaihtoehtojen P2, P4 ja V2 varsinaisia tuloksia.

Taulukko 18. Tarkasteluvaihtoehtojen yhteiskunnalliset kustannukset lämmön eri hyötykäyttöoletuksilla.

Yhteiskunnalliset kustannukset €/ t puu-muovijätettä	Lämmön hyötykäyttöoletus % tuotetusta lämmöstä				
	20	35	70	80	90
Jätettä hyödyntävä laitos (25 %)	53	29	-27	-43	-59
Jätettä hyödyntävä laitos (35 %)	70	50	9	-4	-17
Pyrolyysilaitos	-25	-29	-38	-41	-44

Taulukosta 18 havaitaan, että mikäli lämmön hyötykäyttöoletus lasketaan 80 %:iin, on puu-muovijätteen hyödyntäminen 25 %:n hyötysuhteen polttolaitoksessa enää vain hie- man kannattavampaa kuin muoviöljyn pyrolysoiminen muoviöljyksi ja puuosan hyö- dyntäminen energiana. Hyötykäyttöoletuksen laskiessa 70 %:iin on pyrolyysivaihtoehto muuttunut jo yhteiskunnallisesti kannattavimmaksi vaihtoehdoksi. Johtopäätöksenä voi- daan todeta, että puu-muovijätteen energiahyödyntäminen on yhteiskunnallisesti kannat- tavin ratkaisu ainoastaan silloin, kun tuotetusta lämmöstä saadaan vähintään 80 % hyö- dynnettyä.

Taulukossa 19 on puolestaan esitetty lämmön hyötykäyttöoletuksen vaikutus tarkaste- luvaihtoehtojen liiketaloudelliseen kannattavuuteen sekä laskettu se lämmön hyötykäyt- töön päätyvä vähimmäismäärä, jolla vaihtoehto on vielä liiketaloudellisesti kannattava.

Taulukko 19. Tarkasteluvaihtoehtojen voitot lämmön eri hyötykäyttöoletuksilla.

Voitto €/ t puu-muovijätettä	Lämmön hyötykäyttöoletus % tuotetusta lämmöstä					Hyötykäyttöoletus, jolla voitto = 0 %
	20	35	70	80	90	
Jätettä hyödyntävä laitos (25 %)	-46	-27	2	15	28	68
Jätettä hyödyntävä laitos (35 %)	-74	-58	-20	-10	1	88
Pyrolyysilaitos	-16	-12	-5	-3	-1	92

Taulukosta 19 havaitaan, että puu-muovijätteen energiahyödyntäminen polttolaitokses- sa, jonka hyötysuhde on 25 %, on liiketaloudellisesti kannattavaa niin kauan, kun tuote- tusta lämmöstä saadaan myydyksi 68 %. Pyrolyysilaitoksen liiketaloudellinen kannatta- vuus sen sijaan heikentyy sitä mukaa, mitä alhaisemmaksi lämmön hyötykäyttöosuus laskee.

### 6.3.3 Muoviöljyn myyntihinnan vaikutus pyrolyysilaitoksen liiketaloudelliseen kannattavuuteen

Muoviöljyn myyntihintaan vaikuttaa sekä sen laatu että markkinoilla vallitseva käsitys jätteestä tuotetun öljyn soveltuvuudesta raskaan polttoöljyn korvikkeeksi. Näiden syiden

## 6. Vaihtoehtojen kustannukset

takia perustarkastelussa oletettiin, että muovista pyrolysoitua öljyä myytäisiin 10 % halvemmalla kuin raskasta polttoöljyä. Taulukoissa 20 ja 21 tarkastellaan muoviöljyn myyntihinnan vaikutusta pyrolyysilaitoksen liiketaloudelliseen kannattavuuteen.

Taulukko 20. Muoviöljyn myyntihinnan vaikutus teollisuusalueella sijaitsevan pyrolyysilaitoksen voittoon.

V1: Pyrolyysiyksikön voitto €/ t puu-muovijätettä		Jätteen hankintahinta €/ t puu-muovijätettä				Hinta, jolla voitto = 0
		0	31	63	94	
Muoviöljyn myynti- hinta	80 % raskaan öljyn hinnasta	38	12	-13	-39	47
	<b>90 % raskaan öljyn hinnasta</b>	51	25	<b>-1</b>	-26	62
	raskaan öljyn hinta	64	38	12	-14	78

Taulukosta 20 havaitaan, että vaihtoehto V1 muuttuu perusskenaarion jätteen hankintahinnalla liiketaloudellisesti kannattavaksi, mikäli muoviöljystä on mahdollista saada sama hinta kuin raskaasta polttoöljystä. Sen sijaan, mikäli muoviöljyn laatu tai markkinoiden käsitys muoviöljyn soveltuvuudesta on perustarkastelussa oletettua heikompi, täytyisi jätteen hankintahinnan laskea 47 euroon tonnilta, jotta vaihtoehto V1 säilyisi liiketaloudellisesti kannattavana.

Taulukko 21. Muoviöljyn myyntihinnan vaikutus yhdyskunta-alueella sijaitsevan pyrolyysilaitoksen voittoon.

V2: Pyrolyysiyksikön voitto €/ t puu-muovijätettä		Jätteen hankintahinta €/ t puu-muovijätettä				Hinta, jolla voitto = 0
		0	31	63	94	
Muoviöljyn myynti- hinta	80 % raskaan öljyn hinnasta	23	-3	-29	-54	28
	<b>90 % raskaan öljyn hinnasta</b>	36	10	<b>-16</b>	-41	44
	raskaan öljyn hinta	49	23	-3	-29	59

Taulukosta 21 nähdään, että mikäli muoviöljystä on mahdollista saada raskaan polttoöljyn myyntihinta, vaihtoehto V2 muuttuu liiketaloudellisesti kannattavaksi hieman perustarkastelun oletusta alhaisemmalla jätteen hankintahinnalla (59 €/t). Myyntihinnan ollessa 20 % raskaan polttoöljyn myyntihintaa alhaisempi olisi jätteen hankintahinnan oltava alle 28 €/t, jotta vaihtoehto tuottaisi voittoa.



## 7. Muoviöljyn laatu ja käyttökohteet

Pyrolyysissä syntyvän muoviöljyn voidaan olettaa soveltuvan raskaan polttoöljyn käyttökohteisiin eli esimerkiksi lämmön ja sähkön yhteistuotantoon tai kattilapolttoaineeksi. Lisäksi on esitetty, että muoviöljy voisi mahdollisesti ominaisuuksiensa puolesta soveltua myös laivojen polttoaineeksi. Kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n ehdotuksen mukaan rikin määrä polttoaineessa laskettaisiin globaalilla tasolla nykyisestä 4,5 %:sta alle 0,5 %:iin aikaisintaan vuoteen 2020 mennessä, kun taas Itämeren, Pohjanmeren ja Englannin kanaalin alueella rikkiraja alennettaisiin nykyisestä 1,5 %:sta alle 0,1 %:iin jo vuoteen 2015 mennessä. Jos ehdotuksen mukainen laivojen polttoaineiden asteittainen rikkipitoisuusrajojen lasku toteutuisi lähivuosien aikana, voisi muoviöljyn käyttö laivoissa olla taloudellisesti houkuttelevaa. Toteutuessaan IMO:n ehdotus voisi avata markkinoita muovijätteistä tehdyille pyrolyysiöljylle, sillä muoviöljyn rikkipitoisuus on pieni. Muovin pyrolysoinnista saatava öljy saattaisi soveltua laivojen moottoreihin sellaisenaan ilman jatkoprosessointia. (Arpiainen 2010.) Soveltuvuutta laivamoottoreihin ei ole vielä testattu käytännössä, mutta odotukset soveltuvuudesta ovat korkeat muoviöljyn suotuisten ominaisuuksien takia (Ranta 2010).

Muoviöljyn käyttö laivoissa voisi olla taloudellisesti houkuttelevampi vaihtoehto kuin esimerkiksi sen käyttö moottorivoimaloissa. Jos merenkulkujärjestö IMO:n päätös tulee voimaan, nousisivat laivapolttoaineiden hinnat arviolta 70–85 % nykyisestä ja vastaavasti merikuljetusten kustannukset kasvaisivat arviolta 35–50 %. Suomessa Teknologiateollisuus kuitenkin vastustaa päätöstä jyrkästi, sillä toteutuessaan se heikentäisi merkittävästi Pohjois-Euroopan teollisuuden kilpailukykyä ja kasvattaisi logistiikkakuluja. Lisäksi alle 0,1 % rikkiä sisältävän polttoaineen saatavuus on epävarmaa. (Sahiluoma 2010.)

Muoviöljyn laatua ja soveltuvuutta mainittuihin käyttökohteisiin voidaan vain arvioida, ennen kuin todellisia öljyn ominaisuuksien testaustuloksia on saatavilla tai käyttökokeita tehty. Tarkastelussa pyrolyysiin päätyvän muovijätteen arvioidaan olevan koostumukseltaan 99-prosenttisesti PE-, PP- ja PS-pitoista. Vaikka muuta ainesta on vain prosentti, voi se silti muodostaa öljyn käytettävyyden suhteen ongelmia. Esimerkiksi muoviöljyn klooripitoisuuden jääminen alle 0,01 painoprosenttiin on epävarmaa. PVC-muovin sisältämä kloori voi heikentää tuotetun pyrolyysiöljyn käytettävyyttä laivapol-

toaineena, sillä PVC muodostaa moottorissa korrodisoivaa suolahappoa. PVC voitaisiin kuitenkin ainakin teoriassa erotella muusta jätteestä pulpperointivaiheessa, mutta käytännössä erotusteho voi jäädä riittämättömäksi.

Muoviöljyn saannon voidaan arvioida olevan noin 70–75 % muovisyötteen määrästä. Pyrolyysiprosessilla tapahtuvan muoviöljyn tuotannon on tässä tarkastelussa oletettu korvaavan raskaan polttoöljyn valmistusta. Anhavan et al. (2001) mukaan kierrätysmuovista voidaan pyrolysoimalla valmistaa myös esimerkiksi erikoisraskasta polttoöljyä (ERP). Etuja tavalliseen ERP:n verrattuna tuo muoviöljyn rikittömyys, jolloin sillä voidaan säätää ERP:n rikkivaihteluita. Raskasta polttoöljyä voidaan korvata joko puhtaana tai polttoöljyyn seostettuna, jos jätemuovi on klooritonta. Muoviöljystä saadaan tällöin erikoisraskaan polttoöljyn hinta eli noin puolet raskaan polttoöljyn hinnasta. Muoviöljyn jatkojalostus muihin käyttötarkoituksiin lienee liian kallista.

Muoviöljy on rikkipitoisuudeltaan alhaista ja sen lämpöarvo on suuri (noin 42–43 MJ/kg). Turusen ja Aakko-Saksan (2010) mukaan muoviöljyn käytöstä syntyvät hiukaspäästöt voivat olla alhaisemmat kuin raskaalla polttoöljyllä. Myöskään öljyn viskositeetti ei ole haitallisen korkea. Nämä seikat puoltavat öljyn soveltuvuutta polttoaineeksi. Ongelman voivat kuitenkin muodostaa öljyn sisältämät kaksoissidokset, jotka voivat uudelleenpolymerisoitua moottorissa. Lisäksi on huolehdittava, etteivät muovien lisäaineet sisällä raskasmetalleja, jotka voivat päätyä öljyyn. Öljyn laadullisia seikkoja on kuitenkin vaikea arvioida, ja luotettavampi arvio vaatisi koeajojen tekemistä määrätellyllä jätevirralla.

## 8. Yhteenveto ja johtopäätökset

Muovijätteen kasvava määrä on synnyttänyt tarpeen löytää menetelmiä, joilla muovijätteitä voidaan kierrättää tai hyödyntää nykyisin käytettävän kaatopaikkasijoituksen tai polton sijaan. Muovijätteiden hankala kierrätettävyys ja ennen kaikkea vaikea eroteltavuus muusta jättemateriaalista tekee kuitenkin teknisesti toimivan ja kustannustehokkaan prosessin löytämisestä haastavan. Koska mekaaninen kierrätys ei sovellu koostumukseltaan sekalaiselle muovijätteelle, on vaihtoehtona lähinnä kierrätys raaka-aineena tai kemiallisesti, eli niin sanottu tertiäärinen kierrätys. Tertiääriseen kierrätykseen luettavia prosesseja on maailmalla tutkittu runsaasti, ja Euroopassa suunnitellaan tälläkin hetkellä uusia laitoksia. Toistaiseksi toimivaa ja samaan aikaan taloudellisesti tehokasta prosessia ei ole kuitenkaan onnistuttu kehittämään.

Tämän tarkastelun tavoitteena oli selvittää muovijätteen tertiäärisen kierrätyksen mahdollisuuksia erityisesti muovijätteen pyrolyysimenetelmän avulla. Rumpupyrolyysi valittiin tarkastelun kohteeksi eri kierrätysvaihtoehtojen kartoituksen jälkeen, koska sen soveltuvuutta sekalaiselle muovijätteelle pidettiin mahdollisena. Koska pyrolyysimenetelmän potentiaalia haluttiin verrata sekalaisen muovijätteen hyödyntämisen nykykäytäntöihin, tarkastelua varten laadittiin kaksi toisiinsa verrattavissa olevaa konseptia. Peruskonseptissa kaupan ja teollisuuden jätteestä erotettu puu-muovijäte ohjataan polttoon eli energiahyödyntämiseen. Vertailukonseptissa jätteen puuosa poltetaan mutta muoviosa ohjataan pyrolysoitavaksi laitokselle, joka käyttää alun perin rengasjätteiden pyrolysoimiseksi kehitettyä menetelmää. Tämä tekniikka ei tiettävästi ole käytössä muovijätteen pyrolysoinnissa mutta voisi mahdollisesti soveltua siihen.

Peruskonseptissa muovijätteelle oletettiin erilaisia energiantuotantovaihtoehtoja (P1–P4), jotka eroavat toisistaan sijainniltaan ja oletetulta sähköntuotannon hyötysuhteeltaan. Vertailukonseptissa, eli muovijätteen pyrolysoinnissa (V1–V2), oletettiin niinkään kaksi vaihtoehtoista laitossijoittelua. Tarkasteltavat vaihtoehdot olivat seuraavat:

- P1: Teollisuusalueen jätteenpolttolaitos, jossa sähköntuotannon hyötysuhde 25 %
- P2: Yhdyskunta-alueen jätteenpolttolaitos, jossa sähköntuotannon hyötysuhde 25 %
- P3: Teollisuusalueen jätteenpolttolaitos, jossa sähköntuotannon hyötysuhde 35 %
- P4: Yhdyskunta-alueen jätteenpolttolaitos, jossa sähköntuotannon hyötysuhde 35 %
- V1: Teollisuusalueen muovin pyrolyysilaitos, puun poltto paperitehtaan kattilassa
- V2: Yhdyskunta-alueen muovin pyrolyysilaitos, puun poltto paperitehtaan kattilassa.

Oletettu laitossijainti määritti tarkastelussa tehdyn oletuksen hyötykäyttöön päätyvän lämmön määrästä siten, että teollisuusalueella suurin osa tuotetusta lämmöstä päätyy hyötykäyttöön tasaisen lämmön kysynnän vuoksi, kun taas yhdyskunta-alueella suuri osa tuotetusta lämmöstä lauhdutetaan. Peruskonseptin tarkasteluvaihtoehdossa oletettiin, että tuotettu sähkö korvaa sähkön marginaalituotantoa eli kivihiilellä tuotettua sähköä. Konsepteissa tuotetun lämmön puolestaan oletettiin korvaavan Suomen keskimääräistä lämmöntuotantoa. Vertailukonseptin muovin pyrolyysin lopputuotteena syntyvän muoviljyn oletettiin korvaavan raskaan polttoöljyn tuotantoa. Jätteen puuosa ajateltiin vertailukonseptissa poltettavaksi paperitehtaan kattilassa, jossa se korvaisi turpeen osuutta.

Pyrolyysin potentiaalia sekalaisen muovijätteen varteenotettavana kierrätysmenetelmänä ja vaihtoehtona nykykäytännön mukaiselle energiahyödyntämiselle tarkasteltiin laskemalla prosessin elinkaaren aikaiset ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset. Ympäristökuormitusten osalta tutkimusmenetelmänä käytettiin elinkaari-inventaariota, jolla laskettiin tarkasteltavien konseptien oleellisimpina pidettyjen elinkaarivaiheiden aiheuttamat kasvihuonekaasu-, typenoksidi-, rikkidioksidi- sekä hiukaspäästöt. Kustannusvaikutuksia tarkasteltiin sekä yhteiskunnan että yksityisen toiminnanharjoittajan näkökulmasta. Yhteiskuntataloudellisessa tarkastelussa käytettiin elinkaarikustannusten laskentamenetelmää, joka määrittää tutkittavien konseptien elinkaaren aikaiset nettokustannukset huomioiden ympäristökuormitusten yhteiskunnassa synnyttämät rahamääräiset vaikutukset. Liiketaloudellisessa tarkastelussa vertailtiin konseptien kannattavuutta toisiinsa toiminnanharjoittajan voittojen kautta.

### Ympäristökuormitukset

Ympäristökuormitusten elinkaari-inventaario osoitti, että kasvihuonekaasupäästöjen osalta kaikki tarkasteluvaihtoehdot synnyttivät negatiiviset nettopäästöt, eli kaikilla käytetyillä oletuksilla kyettiin muodostamaan vältetystä tuotannosta syntyviä korvaushyötyjä enemmän kuin päästöjä syntyi. Selkeä ero oli kuitenkin havaittavissa konsepteja vertailtaessa, sillä jätemuovin pyrolysointi ja puun poltto aiheuttivat lähes kertaluokkaa pienemmän kuormituksen ja korvaushyödyn kuin koko puu-muovijätefraktion energiahyödyntäminen. Molemmat vertailukonseptin vaihtoehdot, joissa siis muovi pyrolysoidaan ja puu poltetaan, jäivät siten kasvihuonekaasupäästöjen tarkastelussa energiahyödyntämistä heikoimmaksi.

Energiahyödyntämisvaihtoehdoissa merkittävin kasvihuonekaasupäästövaikutus syntyi muovijätteen poltosta sen fossiilisen alkuperän takia. Kääntöpuolena on kuitenkin muovin korkea lämpöarvo, joka tuotti myös suuret korvaushyödyt korvattavista prosesseista. Suurin korvaushyöty saatiin sähköntuotannosta, jolla on lämmöntuotantoa korkeampi hiilidioksidin päästökerroin. Peruskonseptissa suurimmat kasvihuonekaasupäästöjen säästöt saatiin näin ollen silloin, kun puun ja muovin energiasisältö hyödynnetään polttamalla jäte kattilassa, jossa on mahdollisimman korkea sähköntuotannon hyötysuh-

de. Nettohyödyt olivat lisäksi suuremmat tilanteessa, jossa tuotetulle lämpöenergialle löytyi teollisuushyödyntäjä kuin, jos lämpö olisi ohjattu esimerkiksi kaukolämmöksi yhdyskuntiin.

Muiden kuin kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen liittyi suuria epävarmuuksia sekä päästöjen että korvaushyötyjen osalta, ja tulokset ovat näin ollen vain suuntaa antavia. Päästökertoimien laskennassa onkin näiden päästöjen osalta käytetty vaihteluväliä. Tästä syystä vaihtoehtojen paremmuutta oli hankala vertailla. Jos kuitenkin tarkastellaan tutkimuksessa määritetyillä keskiarvoisilla päästökertoimilla laskettuja rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöjä, puu-muovijätteen energiahyödyntäminen oli tutkituista konsepteista ympäristöä säästävämpi, ainakin mikäli lämmölle löytyi teollisuushyödyntäjä. Poikkeuksen nettopäästöjen vertailussa muodostivat typen oksidit. Niiden osalta vertailukonseptin kaksi vaihtoehtoa, joissa muovijäte pyrolysoidaan ja puu johdetaan energiahyödyntämiseen, olivat keskimääräisiltä nettopäästöiltään edullisempia kuin peruskonseptien energiahyödyntämisvaihtoehdot.

Vaihtoehtojen ympäristökuormitukset osoittavat, ettei muovin pyrolysointi ja puun poltto paperitehtaan kattilassa kannata koko jätevirran energiahyödyntämiseen verrattuna. Edelleen on kuitenkin syytä muistaa, että muiden kuin kasvihuonekaasupäästöjen osalta tulokset ovat varsin epävarmoja. Tarkastelussa ei myöskään huomioitu pyrolyysin tuotteena syntyvän muoviöljyn käytön päästöjä eikä vastaavasti raskaan polttoöljyn käytön välttämisestä syntyviä korvaushyötyjä, koska muoviöljyn käytön päästöjä ei tunnettu. Tämän näkökohdan vaikutus tarkasteltujen vaihtoehtojen keskimääräiseen paremmuusjärjestykseen jää kiinnostavaksi jatkotutkimuksen kohteeksi.

### Yhteiskuntataloudellinen kannattavuus

Kun tarkasteltiin vaihtoehtojen kustannusvaikutuksia, yhteiskunnallisesti kannattavin ratkaisu oli vaihtoehto P1, jossa puu-muovijäte hyödynnetään teollisuusalueella sijaitsevassa jätteenpolttolaitoksessa. Teollisuusalueella sijaitseva pyrolyysilaitos V1 on kuitenkin varteenotettava kilpailija tälle jätteenpolttolaitokselle, koska myös tämän vaihtoehdon yhteiskunnalliset kustannukset olivat vahvasti negatiiviset. Yhdyskunta-alueella sijaitsevat energiantuotantolaitokset P2 ja P4 olivat sen sijaan yhteiskunnan näkökulmasta kannattamattomia ja vaihtoehdot P3 ja V2 selkeästi vähemmän kannattavia kuin vaihtoehdot P1 ja V1.

Tuloksiin vaikutti eniten oletus laitoksen sijainnista, mikä määritti hyötykäyttöön päätyvän lämmön määrän. Tulokset osoittivat, että kaikki yhdyskunta-alueelle sijoittuvaksi oletetut vaihtoehdot (P2, P4, V2) olivat huomattavasti kannattamattomampia kuin teollisuusalueella sijaitsevat vaihtoehdot (P1, P3, V1). Oletus hyötykäyttöön päätyvän lämmön osuudesta vaikutti merkittävästi myös tarkasteluvaihtoehtojen keskinäiseen kannattavuuteen. Herkkyystarkastelussa havaittiin, että mikäli lämmön hyötykäyttöoletus laskettaisiin teollisuusalueen oletetusta 90 %:sta 80 %:iin, olisi puu-muovijätteen

hyödyntäminen 25 %:n hyötysuhteen polttolaitoksessa enää vain vähän kannattavampaa kuin muovin pyrolysointi muoviöljyksi ja puun hyödyntäminen energiana. Jos hyötykäyttöön päätyvän lämmön osuus laskettaisiin 70 %:iin, olisi pyrolyysi jo noussut yhteiskunnallisesti kannattavimmaksi ratkaisuksi. Puu-muovijätteen energiahyödyntäminen oli yhteiskunnallisesti kannattavin ratkaisu siis ainoastaan silloin, kun tuotetusta lämmöstä saadaan vähintään 80 % hyödynnettyä.

### Liiketaloudellinen kannattavuus

Liiketaloudellisessa kannattavuustarkastelussa siirryttiin yhteiskunnallisen kannattavuuden sijasta vertaamaan kannattavuutta toiminnanharjoittajan näkökulmasta. Tällöin oli huomioitava yksityisten kustannusten lisäksi lopputuotteesta saatavat myyntituotot sekä toimintaan liittyvät verot. Toiminnanharjoittajalle voittoa tuottaviksi ratkaisuksi osoitautuivat ainoastaan teollisuusalueella sijaitsevat energianhyödyntämisvaihtoehdot P1 ja P3, mikä selittyy myytävän lämmön suuremmalla määrällä. Vaikka suurimmat myyntitulot saatiin 35 %:n hyötysuhteella toimivasta laitoksesta P3, niin suurin voitto oli kuitenkin vaihtoehdossa P1, koska 25 %:n hyötysuhteella toimivan laitoksen tuotantokustannukset olivat alhaisemmat kuin 35 %:n hyötysuhteella toimivan laitoksen. Vertailussa kolmanneksi asetui teollisuusalueella sijaitseva pyrolyysilaitos, joka oli kannattavuuden rajamailla. Pienet muutokset pyrolyysilaitoksen kustannuksiin liittyvissä oletuksissa saattaisivat muuttaa vaihtoehdon liiketaloudellisesti kannattavaksi.

Liiketaloudelliseen kannattavuuteen vaikuttivat olennaisesti tuotantokustannusten lisäksi raaka-aineiden hankintahinnat, lopputuotteiden myyntihinnat sekä lopputuotteiden kysyntä, joka on reunaehto jätteiden kierrättämiseen liittyvässä liiketoiminnassa. Kysynnän syntymiseksi kierrätystuotteen on oltava sekä hinnaltaan että laadultaan kilpailukykyinen neitseellisestä raaka-aineesta tuotetun tuotteen kanssa.

Tässä tarkastelussa raaka-aine eli puu-muovijäte oli sama kaikissa tarkasteluvaihtoehdoissa. Muutokset puu-muovijätteen hinnassa eivät siten vaikuttaneet tarkasteluvaihtoehtojen keskinäiseen kannattavuuteen, vaan hankintahinnan muutos vaikutti kaikkien vaihtoehtojen kannattavuuteen saman verran. Tarkastelussa oletettiin, että vaadittava määrä puu-muovijätettä on tarjolla markkinoilla vakioisella hinnalla. On hyvä huomioda, että todellisuudessa raaka-aineen saatavuudesta ei ole kuitenkaan ole täyttä varmuutta, jolloin vakaata markkinahintaakaan ei välttämättä pääse syntymään.

Tarkastelussa lopputuotteina saatiin perustarkasteluissa sähköä ja lämpöä sekä pyrolyysivaihtoehdossa lämpöä ja muoviöljyä (sekä puujätteen energiahyödyntämisestä pieni määrä sähköä ja lämpöä). Lopputuotteena saatu sähkö oletettiin myytävän verkkoon täysimääräisesti, mutta laitosten sijainnin sen sijaan oletettiin vaikuttavan tuotetun lämmön kysyntään. Yhdyskunta-alueella suurimman osan lämmöstä oletettiin päätyvän lauhdutukseen, ja koska lauhdutettavasta lämmöstä ei saada myyntituottoja, oli kannattavuus heikompi kuin teollisuusalueella sijaitsevissa laitoksissa. Sijainnin vaikutus lai-

tosten liiketaloudelliseen kannattavuuteen oli suhteellisesti suurempi energiantuotantolaitoksissa, koska lämmön myyntituotot olivat niissä suuremmassa asemassa kuin pyrolyysilaitoksessa.

Pyrolyysistä saatavan lopputuotteen eli muoviöljyn kysyntään vaikuttavat lopputuotteen soveltuvuus raskaan polttoöljyn käyttökohteisiin sekä mahdolliset jäteperäisyyden synnyttämät mielikuvat. Kummallakin tekijällä on suora vaikutus tuotteesta saatavaan hintaan. Tässä tarkastelussa muoviöljyn oletetulla myyntihinnalla (90 % raskaan polttoöljyn hinnasta) teollisuusalueella sijaitseva pyrolyysilaitos jäi kannattavuuden rajamaille ja yhdyskunta-alueella sijaitseva laitos selkeästi tappiolliseksi. Herkkyysanalyysi kuitenkin osoitti, että pyrolyysilaitos tuottaa positiivista voittoa, mikäli raaka-ainetta saadaan ostettua hieman halvemmalla tai jätteestä tuotetun öljyn myyntihinta nousee raskaan polttoöljyn tasolle. Energia- ja hiilisisällöltään muoviöljyn oletetankin vastaavan raskasta polttoöljyä, mutta sen etuina ovat alhaisempi rikkipitoisuus ja mahdollisesti alhaisemmat hiukkaspäästöt.

Parhaimpana käyttökohteena on esitetty laivojen moottoreita, koska meriliikenteelle asetettaneen lähitulevaisuudessa tiukemmat rikkidioksidipäästörajoitukset. Muovijätteen sisältämä PVC ja muovien lisäaineiden sisältämät raskasmetallit saattavat aiheuttaa kuitenkin epäpuhtauksia syntyvään polttoaineeseen, joka heikentäneen sen laatua verrattuna raakaöljystä jalostettuun tuotteeseen. Ongelmia saattaa muodostua myös öljyn sisältämisestä kaksoissidoksista, jotka voivat polymerisoida uudelleen moottorissa. Soveltuvuutta raskaan polttoöljyn käyttökohteisiin on kuitenkin hankala arvioida, sillä öljyä ei ole käytännössä valmistettu tämän tarkastelun kohteena olevasta muovijätteestä. Muoviöljyn todellisen laadun arviointi vaatisi koeajon tekemistä määritetyllä jätevirralla, mikä toisi selville myös rumpupyrolyysiprosessin teknisen onnistumisen mahdollisuuksiin kun pyrolysoitavana on sekalaista muovijätettä. Keskeinen tuotteen laatuun vaikuttava tekijä on PVC-muovin esiintyminen jätevirrassa, joten käytännön koeajojen yhteydessä olisi tärkeää pyrkiä monitoroimaan syötteen laatua ja sen muutoksia.

### Tulevaisuuden näkymät

Onko pyrolyysitekniikoilla todellisia mahdollisuuksia toimia jätemuovin käsittelymenetelmänä tulevaisuudessa? Jotain painoarvoa voitaneen antaa sille tosiseikalle, ettei muovin pyrolysointi ole useista kokeiluista ja laajasta tutkimuksesta huolimatta onnistunut edelleenkään vakiinnuttamaan asemaansa käyttökelpoisten jätemuovinkäsittelytekniikoiden joukossa. On kuitenkin kiinnostavaa seurata, miten tällä hetkellä Euroopassa meneillään olevat uudet kokeilut onnistuvat. Tähän tarkasteluun valitun rumpupyrolyysimenetelmän todellista potentiaalia sekalaisen muovijätevirran käsittelyssä voidaan vain arvailla, sillä tekniikkaa ei tällä hetkellä käytetä muovijätteiden prosessoinnissa.

Viime aikoina on kuitenkin ollut havaittavissa orastavaa kiinnostusta jätteiden pyrolyysiä kohtaan. Suomeen on nimittäin perusteilla autonrenkaiden pyrolyysilaitos, jonka

## 8. Yhteenveto ja johtopäätökset

tavoitteena on tuottaa rengasromusta vuosittain noin 9 000 tonnia nestemäistä polttoöljyä. Ensimmäisessä vaiheessa rakennettavan koelaitoksen asennuksen on tarkoitus käynnistyä kesällä 2011. (Peatec Oy 2011.) Etuja rengasöljyn käyttöön verrattuna toisi esimerkiksi muoviöljyn vähäinen rikkipitoisuus. Jos tuotteen laatu osoittautuu hyväksi ja tekniikka toimivaksi teollisessa mittakaavassa, voi kiinnostus myös esimerkiksi muovimateriaalien pyrolysointia kohtaan kasvaa.



## Lähdeluettelo

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A. & Antonakou, E. V. 2007. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials* 149. S. 536–542.
- Aguado, J. & Serrano, D. P. 1999. *Feedstock Recycling of Plastic Wastes*. Cambridge: Royal Society of Chemistry. 206 s.
- Aguado, J., Serrano, D. P. & San Miguel, G. 2007. European trends in the feedstock recycling of plastic wastes. *Global NEST Journal* 9. S. 2–19.
- Aguado, J., Serrano, D. P. & Escola, J. M. 2008. Fuels from waste plastics by thermal and catalytic processes: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47. S. 7982–7992.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P. & Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29. S. 2625–2643.
- Anhava, J., Ekholm, E., Ikäheimo, E., Koskela, K., Kurvi, M. & Walavaara, M. 2001. Jätehuollon ja materiaalikierrätyksen teknologiat ja niiden kehittämistarpeet. *TEKES, Teknologia katsaus* 102/2001. 45 s.
- ArcelorMittal Bremen 2011. [viitattu 14.2.2011]  
[http://www.arcelor-bremen.com/production\\_process.html?&L=1](http://www.arcelor-bremen.com/production_process.html?&L=1)
- Arena, U. & Mastellone, L. 2006. Fluidized bed pyrolysis of plastic wastes. Teoksessa: Scheirs, J. & Kaminsky, W. (toim.). *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. Wiley Series in Polymer Science. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, s. 436–474.
- Arpiainen, V. 2010. VTT. Henkilökohtainen tiedonanto 26.8.2010.
- Bagri, R. & Williams, P. T. 2002. Catalytic pyrolysis of polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63. S. 29–41.
- Buekens, A. 2006. Introduction to feedstock recycling of plastics. Teoksessa: Scheirs, J. & Kaminsky, W. (toim.). *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. Wiley Series in Polymer Science. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd. S. 3–41.
- Chemical Engineering 2010. Chemical engineering plant cost index (CEPCI). *Chemical Engineering* 117. S. 72.
- Ciliz, N. K., Ekinci, E. & Snape, C. E. 2004. Pyrolysis of virgin and waste polypropylene and its mixtures with waste polyethylene and polystyrene. *Waste Management* 24. S. 173–181.

- CynarPlc 2011. [viitattu 18.6.2011]. <http://www.cynarplc.com>
- Dahlbo, H., Ollikainen, M., Peltola, S., Myllymaa, T. & Melanen, M. 2007. Combining ecological and economic assessment of options for newspaper waste management. *Resources Conservation and Recycling* 51, s. 42–63.
- Eerola, S. 2006. RePlast FinEst Muovien kierrätys Suomessa. II Koulutusseminaari, Hiidenmaa 31.5.–1.6.2006. Muovipoli Oy.
- Energiateollisuus ry 2011. Kaukolämmön hinta 1.1.2010 alkaen. [viitattu 27.6.2011]. <http://www.energia.fi/fi/tilastot/kaukolampotilastot/kaukolammonhinta> > Kaukolämmön hinnat 1.1.2010.
- EPA 2009. Plastics. U.S. Environmental Protection Agency. [viitattu 29.12.2009]. <http://www.epa.gov/osw/conserva/materials/plastics.htm>
- Fortum Oil & Gas 2002. Ekotasetiedote 1.3.2002. Raskas polttoöljy.
- Garforth, A.A., Ali, S., Hernández-Martínez, J. & Akah, A. 2004. Feedstock recycling of polymer wastes. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 8. S. 419–425.
- Hammond, R. 2007. *The World in 2030*. Editions Yago, Zarautz. 318 s.
- Heatco 2007. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment, Annex D. [viitattu 2.5.2011]. <http://heatco.ier.uni-stuttgart.de>
- Hietanen, L. 2010a. Lassila & Tikanoja. Henkilökohtainen tiedonanto 7.6.2010.
- Hietanen, L. 2010b. Lassila & Tikanoja. Henkilökohtainen tiedonanto 21.12.2010.
- Hietanen, L. 2011. Lassila & Tikanoja. Henkilökohtainen tiedonanto 5.5.2011.
- Hind, J. 1999. Recycling of polymers. Plastics Consultancy Network. [viitattu 4.1.2010]. <http://www.pcn.org/Technical%20Notes%20-%20Recycle1.htm>
- Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E. 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364. S. 2115–2126.
- Direktiivi 2000/76/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi jätteenpoltosta. EURLex – Euroopan unionin oikeuden asiakirjat. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0076:FI:HTML>
- Kasvener 2007. Kuntatason kasvihuonekaasu- ja energiatasemalli. Päivitys 10.5.2007. Suomen ympäristökeskus, Jouko Petäjä.
- Kiser, J. V. L. 2002. Scrap-Tire Pyrolysis: The Impossible Dream? *Scrap* 59. S. 34–41.

- Korhonen, M.-R. & Dahlbo, H. 2007. Reducing Greenhouse Gas Emissions by Recycling Plastics and Textiles into Products. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Suomen ympäristö 30/2007. 59 s.
- Korpijärvi, K., Mroueh, U.-M., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kivikoski, H., Järvelä, E., Wahlström, M. & Mäkelä, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. Espoo: VTT Tiedotteita 2499. 75 s.
- Kärhä, V. 2010a. Muovipakkaukset Suomessa. Esitys. Muoviteollisuus ry. 5.5.2010, Turku.
- Kärhä, V. 2010b. Growing business around the recovery of polymer wastes (mainly plastics). Esitys. Muoviteollisuus ry. 22.6.2010, Espoo.
- Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S., & Havukainen, J. 2005. Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita. Kansainvälinen esiselvitys. Espoo: VTT Tiedotteita 2291, 83 s.
- Lipasto 2010. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Tutkimusraportti VTT-R-08701-09. Espoo: VTT.
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F. & Adrados, A. 2010. Pyrolysis of municipal plastic wastes: Influence of raw material composition. Waste Management 30. S. 620–627.
- Lord, K. 2010. Cynar Recycling Limited. Henkilökohtainen tiedonanto 4.6.2010.
- Metso Minerals 2010. Scrap tire pyrolysis system. [viitattu 12.8.2010]. [http://www.metso.com/miningandconstruction/mm\\_pyro.nsf/WebWID/WTB-041108-2256F-F5E00/\\$File/Tire%20Flyer.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_pyro.nsf/WebWID/WTB-041108-2256F-F5E00/$File/Tire%20Flyer.pdf)
- Moliis, K., Teerioja, N. & Ollikainen, M. 2009. Ennuste yhdyskuntajätteen kehityksestä vuoteen 2030. SUSWASTE-hankkeen esiselvitys. Helsingin yliopisto, Taloustieteen laitos, Discussion Papers n:o 41. 53 s.
- Motiva 2004. Yksittäisen kohteen CO<sub>2</sub>-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO<sub>2</sub>-päästökertoimet [viitattu 1.3.2011]. [http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje\\_CO2\\_kohde\\_040622.pdf](http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf)
- Myllymaa, T. Dahlbo, H., Ollikainen, M., Peltola, S. & Melanen, M. 2005. Menettely jätehuoltovaihtoehtojen ympäristö- ja kustannusvaikutusten elinkaaritarkasteluun. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Suomen ympäristö 750. 108 s.
- Myllymaa, T., Tohka, A., Dahlbo, H. & Tenhunen, J. 2006. Ympäristönäkökulmat jätteen hyödyntämisessä energiana ja materiaalina. Valtakunnallinen jättesuunnitelma vuoteen 2016, Taustaselvitys Osa III. Suomen ympäristökeskus (SYKE). 72 s.
- Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Isoaho, S., Zevenhoven, M., Ollikainen, M. & Dahlbo, H. 2008a. Jätteiden kierrätyksen ja polton ympäristövaikutukset ja kustannukset – jäte-

- huollon vaihtoehtojen tarkastelu alueellisesta näkökulmasta. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Suomen ympäristö 39. 192 s.
- Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M. & Dahlbo, H. 2008b. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaarioraportti. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28. 80 s.
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. VTT tiedotteita 2357. 134 s.
- Naumanen, M. 2005. Materiaalitekniikoiden kehityskohteita. Teknologiateollisuus ry, Tampere. 84 s.
- Nordic Council of Ministers 2007. Nordic guideline for cost-benefit analysis in waste management. Tema Nord 2007:574. [viitattu 2.5.2011].  
<http://www.norden.org/pub/miljo/ekonomi/sk/TN2007574.pdf>
- Nord Pool 2010. Sähkön keskihinta [viitattu 06/2010].  
<http://www.nordpoolspot.com/reports/areaprice/Post.aspx>
- Oikarinen, S. 2010. TEM. Henkilökohtainen tiedonanto 14.10.2010.
- Ozmotech 2004. ThermoFuel Overview: Waste Plastics to Diesel Fuel. ThermoFuel Master overview. 12 s.
- Panda, A. K., Singh, R. K. & Mishra, D. K. 2010. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products – A world prospective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, s. 233–248.
- Pakkausalan Ympäristörekisteri PYR Oy 2004. Muovipakkausten hyötykäyttötavoitteet Suomessa erityisen kovat. PYR tiedottaa 3. S. 11–12.
- Pat. EP 163092B1. 2005. Pyrolysis process for reclaiming desirable materials from vehicle tires. Metso Minerals, Inc. (Faulkner, B. P., Unterweger, R. J. & Hansen, R. W.) Appl. 00913652.4, 19.12.2001. Publ. 3.8.2005. 17 s.
- Pat. EP 1190014B1. 2003. Condensation and recovery of oil from pyrolysis gas. Svedala Industries, Inc. (Weinecke, M. H & Unterweger, R. J.) Appl. 00928601.4, 28.4.2000. Publ. 2.7.2003. 14 s.
- Peatec Oy 2011. [viitattu 19.6.2011] <http://www.peatec.eu>
- Petäjä, J. 2011. Suomen ympäristökeskus. Henkilökohtainen tiedonanto 18.2.2011.
- Plastics Europe 2009a. The compelling facts about plastics 2009. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008. 24 s. [viitattu 26.11.2010].

<http://www.plasticseurope.org/document/the-compelling-facts-about-plastics-2009.aspx>

Plastics Europe 2009b. Plastics convert iron ore to steel: Feedstock recycling in blast furnaces. 7 s. [viitattu 28.6.2011].

[http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100514144658-FINAL\\_Recycling\\_in\\_Blast\\_Furnace\\_2009\\_LR\\_300909.pdf](http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100514144658-FINAL_Recycling_in_Blast_Furnace_2009_LR_300909.pdf)

Plastics Europe 2009c. Plastics: Too valuable to be thrown away: Recovery, recycling and resource conservation. 7 s. [viitattu 14.2.2011].

<http://www.plasticseurope.org/document/plastics-too-valuable-to-be-thrown-away.aspx?Page=DOCUMENT&FoIID=2>

Plastics Europe 2010. Plastics: the Facts 2010. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2009. 32 s. [viitattu 26.11.2010].

<http://www.plasticseurope.org/document/plastics---the-facts-2010.aspx?FoIID=2>

Plastic Waste Management Institute 2009. Plastic products, plastic waste and resource recovery (2007). PWMI Newsletter 38, 10 s. [viitattu 28.12.2009].

[http://www2.pwmi.or.jp/siryoei/ei\\_pdf/ei38.pdf](http://www2.pwmi.or.jp/siryoei/ei_pdf/ei38.pdf)

Pulkkinen, P. & Holopainen, M. 2006. Talous- ja rahoitusmatematiikka. WSOY Oppimateriaalit Oy. 263 s.

Ranta, J. 2010. VTT. Henkilökohtaisia tiedonantoja 25.–27.8.2010.

Ranta, J. 2011. VTT. Henkilökohtainen tiedonanto 25.4.2011.

Ranta, J. & Arpiainen, V. 2010. VTT. Henkilökohtaisia tiedonantoja 20.–22.9.2010.

Rebeiz, K. S. & Craft, A. P. 1995. Plastic waste management in construction: technological and institutional issues. Resources, Conservation and Recycling 15. S. 245–257.

Sahiluoma, V. 2010. Laivojen tiukat rikkimääräykset iskisivät raskaasti Suomeen. Kauppalehti 19.8.2010.

Savonlinnan Seudun Jätehuolto 2003. Kotitalousmuovien hyötykäyttö. Loppuraportti. 37 s.

Scheirs, J. 2006. Overview of Commercial Pyrolysis processes for Waste Plastics. Teoksessa: Scheirs, J. & Kaminsky, W. (toim.). Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. Wiley Series in Polymer Science. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd. S. 383–433.

Sekine, Y., Fukuda, K., Kato, K., Adachi, Y. & Matsuno, Y. 2009. CO2 reduction potentials by utilizing waste plastics in steel works. The International Journal of Life Cycle Assessment 14. S. 122–136.

Seppänen, R. 2008. Uudet muovit kasvavat pellolla. Tiede-lehti 4/2008.

- Shioya, M., Wakai, M., Fukushima, M. & Ibe, H. 2007. Towards Maximizing Recycling rate in Sapporo Waste Plastics Liquefaction Plant. Teoksessa: Proceedings of the 4th International Symposium on Feedstock Recycling of Plastics & Other Polymeric Materials. ISFR 2007, September 16–20, 2007. Jeju, Korea.
- Siddique, R., Khatib, J. & Kaur, I. 2008. Use of recycled plastic in concrete: A review. Waste Management 28. S. 1835–1852.
- Similä, T. 2010. UPM selvittää bioetanolin valmistusta. [viitattu 9.8.2010]. [http://www.upm.com/fi/upm/media/artikkelit/upm\\_selvittaa\\_bioetanolin\\_valmistusta](http://www.upm.com/fi/upm/media/artikkelit/upm_selvittaa_bioetanolin_valmistusta)
- Sipilä, K. 2003. (toim.) Jättemuovin pyrolyysitekniikan esiselvitys. TEKES, Jätteiden energiakäyttö-tekniologiaohjelma 1998–2001. Tekniologiaohjelmaraportti 14/2003. Loppuraportti. 149 s.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (toim.) 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge, UK ja New York, NY, USA: Cambridge University Press. 996 s.
- Subramanian, P. M. 2000. Plastics recycling and waste management in the US. Resources, Conservation and Recycling 28. S. 253–263.
- Suomen Palautuspakkaus Oy 2009. Kierrätysmuovipullojen kierrätysjärjestelmä. [viitattu 4.1.2010]. <http://www.palpa.fi>
- SYKE 2005. Päästötietojen tuottamismenetelmät. Energiantuotanto 6.10.2005. Ympäristöhallinto – Energiantuottajat.
- Tilastokeskus 2010a. Sähkön ja lämmön tuotanto 2009. Tilastojulkaisu, Helsinki 29.9.2010.
- Tilastokeskus 2010b. Palkka- ja työvoimakustannukset. Yksityisen sektorin tuntipalkat. [viitattu 30.08.2010]. <http://tilastokeskus.fi/til/ystp/tau.html>
- Tilastokeskus 2011. Polttoaineluokitus ja päästökertoimet 2011. [viitattu 23.2.2010]. [http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)
- Tol, R. 2005. The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. Energy Policy 33, s. 2064–2074.
- Tsupari, E., Tormonen, K., Monni, S., Vahlman, T., Kolsi, A. & Linna, V. 2006. Dityppioksidin (N<sub>2</sub>O) ja metaanin (CH<sub>4</sub>) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle. Espoo: VTT Working Papers 43. 101 s.
- Tsupari, E. 2010. VTT. Henkilökohtainen tiedonanto 18.10.2010.
- Tukker, A., de Groot, H., Simons, L. & Wieggersma, S. 1999. Chemical recycling of plastics waste (PVC and other resins). European commission, DG III, Final report, STB-99-55 Final.

- Tukker, A. 2002. Plastics Waste – Feedstock recycling, Chemical recycling and Incineration. Rapra Review Reports 148, vol. 13, no. 4.
- Turunen, R. & Aakko-Saksa, P. 2010. VTT. Henkilökohtainen tiedonanto 1.11.2010.
- UNEP 2009. Converting Waste Plastics into a Resource – Compendium of Technologies. United Nations Environmental Programme, Osaka/Shiga, Japan. 51 s.
- Vainikka, P. 2010. VTT. Henkilökohtainen tiedonanto 21.12.2010.
- Waste Online 2006. Plastics recycling information sheet. [viitattu 26.11.2010]. <http://www.wasteonline.org.uk/resources/InformationSheets/Plastics.htm>
- Zadgaonkar, A. 2006. Process and Equipment for Conversions of Waste Plastics into Fuels. Teoksessa: Scheirs, J. & Kaminsky, W. (toim.) Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. Wiley Series in Polymer Science. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd. S. 709–728.
- Ziębik, A. & Stanek, W. 2001. Forecasting of the energy effects of injecting plastic wastes into the blast furnace in comparison with other auxiliary fuels. Energy 26. S. 1159–1173.
- Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010a. Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. [viitattu 20.06.2010]. [http://www.oil-gas.fi/files/728\\_Kuluttajahintaseuranta.pdf](http://www.oil-gas.fi/files/728_Kuluttajahintaseuranta.pdf)
- Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010b. Raskaan polttoöljyn hinta Suomessa. [viitattu 18.10.2010]. [http://www.oil-gas.fi/files/729\\_por.pdf](http://www.oil-gas.fi/files/729_por.pdf)





## Liite A: Kartoitetut kierrätysvaihtoehdot

Tavoitteena oli löytää jatkotarkastelua varten menetelmä, jota voitaisiin soveltaa yhdyskunnissa syntyvän sekalaisen muovijätteen kierrättämiseen. Koska mekaaninen kierrätys soveltuu vain yksittäisille puhtaille muovilaaduille, keskityttiin tarkastelemaan tertiääristen kierrätysvaihtoehtojen tuomia mahdollisuuksia muovijätteiden hallintaan. Tarkemman tarkastelun kohteeksi valittiin hydrolyysi ja pyrolyysi. Erilaiset pyrolyysiprosessit ovat pääsääntöisesti raaka-aineena kierrätystä, kun taas esimerkiksi hydrolyysiprosessi voidaan lukea kemialliseksi kierrätykseksi (Tukker 2002).

### Hydrolyysi

Hydrolyysi on eräs muovijätteen kemialliseen depolymerisointiin käytetyistä tekniikoista. Depolymerisoinnilla tarkoitetaan erilaisia kemiallisia reagensseja lisäämällä aikaansaataavaa palautuvaa synteesireaktiota, jonka seurauksena muovin polymeerit hajoavat takaisin monomeeriseen muotoonsa. Hydrolyysin tapauksessa hajotuksessa käytetään hyväksi vettä tai höyryä. Tekniikan etuna on, että sen avulla voidaan tuottaa kaupallisesti arvokas monomeerinen lopputuote. Monomeerit vastaavat alkuperäistä raaka-ainetta, ja niistä valmistettujen muovien oletetaan olevan ominaisuuksiltaan ja laadultaan ensiömuovia vastaavia. (Aguado ja Serrano 1999.)

Tekniikan toinen tärkeä etu on, että sen avulla voidaan tuottaa suuri määrä uutta tuotetta pieneltä jätemäärästä (Al-Salem et al. 2009). Ongelmana on kuitenkin depolymerisoinnin soveltuvuus vain tiettytyyppisille polymeereille (Aguado ja Serrano 1999). Depolymerisointi ei käytännössä juuri sovellu additiopolymeereille (mm. polyeteeni, polypropeeni ja polyvinyylikloridi), jotka muodostavat valtaosan, noin 60–70 %, yhdyskuntajätteen muovimäärästä, sillä tekniikat ovat käytettävissä lähinnä vain kondensaatiopolymeerien kierrätykseen. Kondensaatiopolymeerejä ovat esimerkiksi polyamidit, polyesterit, nylonit ja polyeteenitereflaattit. (Panda et al. 2010.) Toinen käyttöä rajoittava tekijä on, että monet depolymerisointiprosessit ovat erittäin herkkiä epäpuhtauksille ja vaativat voimakkaita esikäsitteilyprosesseja kontaminoivien tekijöiden poistamiseksi ennen varsinaista depolymerisointivaihetta (Aguado ja Serrano 1999). Tekniikan soveltamattomuus sekalaiselle muovijätteelle sekä herkkyys epäpuhtauksille ovat niitä syitä, joiden vuoksi hydrolyysin ei katsottu soveltuvan yhdyskuntien muovijätteen kierrätykseen ja sitä ei valittu lopulliseen tarkasteluun.

### Pyrolyysi

Pyrolyysiä pidetään erityisen sopivana sellaisille jätevirroille, jotka sisältävät erilaisia muovilaatuja sekä muita orgaanisia ja epäorgaanisia komponentteja, joille mekaaninen kierrätys ei sovellu (López et al. 2010). Pyrolyysissä muovi pilkkoutuu käsittelyn seu-

rauksena halutun mittaisiksi hiilivetyketjuiksi. Parhaiten käsittelyyn sopivat polyolefiinit, joiden päätuotteena syntyy muoviöljyä. Pyrolyysi ei edellytä jättemateriaalilta täydellistä puhtautta, vaan prosessi itsessään toimii myös epäpuhtauksien poistajana. Prosessin seurauksena epäorgaaninen aines kulkeutuu tuhkaan. (Sipilä 2003.)

Pyrolyysillä voidaan aikaansaada toiminnallisia, ympäristöllisiä, ja taloudellisia hyötyjä. Toiminnallista hyötyä syntyy lopputuotteen hyödyntämismahdollisuudesta polttoaineena tai petrokemiallisissa prosesseissa. Ympäristön kannalta hyötyä syntyy, jos prosessin seurauksena jätettä päätyy vähemmän kaatopaikalle ja syntyvällä lopputuoteöljyllä voidaan välttää esimerkiksi fossiilisen öljyn porausta, jolloin myös kasvihuonepäästöt pienenevät. Taloudellisten hyötyjen muodostumista edesauttaa esimerkiksi lopputuotteen korkea lämpöarvo, joka helpottaa sen markkinointia polttoaineena sekä sähkön että lämmön tuotannossa. (Al-Salem et al. 2009.) Pyrolyysin toiminnallisia haasteita ovat syntyneen hiilen (Ciliz et al. 2004) ja lopputuotteena syntyneen polttoaineen käsittely, jos halutaan saada aikaan tietynlaisia lopputuotteita (Al-Salem et al. 2009).

Pyrolyysissä polymeerien hajotus tapahtuu korkeassa lämpötilassa ilman hapen läsnäoloa (Aguado ja Serrano 1999, Garforth et al. 2004). Hajotus tapahtuu usein typpi-atmosfäärissä (Achilias et al. 2007) lämpötilan ollessa tavallisesti 350–900 °C välillä (Panda et al. 2010). Polymeerien alhainen lämmönjohtavuus ja prosessin endoterminen luonne aikaansaavat suuren energiankulutuksen. Tämän vuoksi on kehitetty katalyyttisiä menetelmiä. (Achilias et al. 2007.) Näissä menetelmissä polymeeri hajoaa reagoidessaan katalyytin kanssa, ja sopivan katalyytin valinnalla voidaan alentaa prosessin vaatimaa lämpötilaa. (Panda et al. 2010.) Lämpötilan alentaminen johtaa pienemmän energiankulutuksen lisäksi suurempaan konversionopeuteen (Aguado et al. 2007). Lisäksi katalyyttisellä menetelmällä saadut lopputuotteet ovat ominaisuuksiltaan korkeampilaatuisia kuin termisellä hajotuksella aikaansaadut (Aguado ja Serrano 1999), esimerkiksi bensiini- ja dieselfraktioita (Aguado et al. 2007).

Katalyyttisessä pyrolyysissä hajoaminen voidaan aikaansaada kahdella eri tekniikalla. Yksinkertaisimmillaan se tapahtuu suoraan reaktorissa polymeerin ja katalyytin reagoidessa keskenään (Aguado et al. 2007). Toinen tapa on suorittaa kaksivaiheinen prosessi, jossa jäte ensin hajotetaan termisesti ja tämän jälkeen syntyneet höyryt krakataan katalyyttisesti (Bagri ja Williams 2002). Katalyytit kuitenkin menettävät aktiivisuuttaan ajan myötä. Lisäksi niiden talteenotto ja uudelleenkäyttö on hankalaa. Näiden syiden vuoksi menetelmää on lähinnä käytetty polyolefiinijätteillä, joita on esikäsitelty voimakkaasti epäsuotuisten vaikutusten estämiseksi. Tutkimuksia myös sekalaisen muovijätteen katalyyttisestä hajotuksesta on tehty. (Aguado ja Serrano 1999.)

Terminen hajotus synnyttää joukon erilaisia lopputuotteita, joille on yhteistä alhainen monomeeripitoisuus (Aguado ja Serrano 1999). Prosessissa syntyy joko vahamainen, nestemäinen tai kaasumainen lopputuote (Sipilä 2003). Muita syntyviä tuotteita voivat olla muun muassa polttoöljyt ja tisleet, pitkäketjuiset parafiinit sekä koksi. Lämpötila on tärkein lopputuotteen koostumukseen vaikuttava tekijä, mutta myös polymeerin tyyppin,

muiden reaktio-olosuhteiden ja reaktorityypin on osoitettu vaikuttavan tuotteen laatuun. (Aguado ja Serrano 1999.) Pyrolyysin lopputuotteen ominaisuuksiin vaikuttavat olennaisesti myös käsiteltävän jätteen sisältämät epäpuhtaudet (López et al. 2010).

Pyrolyysitekniikoita on tutkittu runsaasti, ja lukuisia kokeilulaitoksia on ollut toiminnassa viimeisten vuosikymmenten aikana. Laitoksia ei kuitenkaan ole Euroopassa saatu yleensä toimimaan kannattavasti, ja kokeilut on lopetettu pilottivaiheen jälkeen. Kannattamattomuus johtuu markkinoiden epävarmuudesta ja liian pienistä muovijättemääristä; tekninen toimivuus on osoittautunut yleensä hyväksi. (Tukker et al. 1999.) Uuden laitoksen perustaminen on kallis investointi, johon ei epävarmassa markkinatilanteessa ole halukkuutta ryhtyä. Muita tekniikan yleistymistä heikentäviä tekijöitä on lopputuotteen alhainen hinta, sillä yleisemmille muovilaaduille tuotteesta saatava voitto ei ole tarpeeksi suuri kaupallisen potentiaalin varmistamiseksi. Lisäksi jätteen ominaisuudet vaikuttavat tuotteen laatuun ja arvoon. (Buekens 2006.)

Eräs pyrolyysilaitoksen toiminnan kannattavuuden edellytyksistä on syötämateriaalin riittävä saatavuus, jotta liian pieni laitospotentiaali ei nostaisi tuotantokustannuksia suhteessa alhaiseen lopputuotteen myyntihintaan. Tarpeeksi laadukasta muovijätettä on harvoin helposti ja riittävästi saatavilla, jolloin muovijätteen keräämisen, logistiikan sekä esikäsittelyn kustannukset saattavat nousta liian korkealle, mikä puolestaan heijastuu syötteen hankintahintaan. (Buekens 2006.)

Muovin pyrolysoinnin liiketoiminnallista kannattavuutta heikentävät samat esteet kuin muitakin vaihtoehtoisia hyödyntämistekniikoita: muovijätteen likaisuus ja sekalaisuus. Buekensin (2006) mukaan muovijätteiden pyrolyysi on kiistatta teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoinen tekniikka vain tietyille harvinaisemmille polymeerilaaduille (esimerkiksi polymetyylimetakrylaatti (PMMA) ja suulakepuristettu polyamidi (PA6)), joiden pyrolysointi tuottaa suoraan markkinakelpoisen monomeerisen lopputuotteen. Todennäköisesti näistä syystä johtuen kiinnostus on painottunut taloudellisesti arvokkaampia lopputuotteita synnyttäviin tekniikoihin, kuten esimerkiksi polymeerien hajottamiseen monomeereiksi. (Buekens 2006.)

Euroopan ulkopuolella, esimerkiksi Japanissa, on kuitenkin useita kaupallisessa mitakaavassa toimivia pyrolyysilaitoksia, joissa muovijätteistä valmistetaan nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita (UNEP 2009). Myös Suomessa on tutkittu jätemuovin pyrolysoinnin potentiaalia. VTT:ssä vuosina 1998–1999 toteutetussa Jätemuovin pyrolyysitekniikan esiselvityksessä tutkittiin mahdollisuuksia, joiden avulla jätemuoveja kyettäisiin hyödyntämään rikittömän polttoöljyn valmistamiseen niin raskas- kuin kevytöljysovellutuksiin puhtaana tai seostettuna (Sipilä 2003). Uudempaa aineistoa kokeilukelpoisista tekniikoista on niukasti, ja myös uudet artikkelit viittaavat pääsääntöisesti Tukkerin et al. vuonna 1999 laatiman selvityksen tuloksiin, jossa esitellään potentiaalisempien kemiallisten kierrätystekniikkojen tulevaisuudennäkymiä Euroopassa. Laajaan tutkimukseen on valittu mukaan useita kymmeniä kemialliseen kierrätykseen kehitettyjä teknologioita ja näihin liittyviä aloitteita. Käytännössä potentiaalisia tekniikoita on kui-

tenkin vain kourallinen. Nämä tekniikat ovat joko käytössä olleita, materiaalin puutteen vuoksi tilapäisesti suljettuja tai muuten lupaavaksi katsottuja. Tekniikat soveltuvat joko sekalaiselle muovijätteelle, joilla on matala klooripitoisuus, tai erityisesti PVC-pitoiselle jätteelle. Tekniikoiden toimivuus kaupallisessa mittakaavassa sisältää monia epävarmuustekijöitä ja vaatisi riittävän muovijättemäärän turvaamisen laitoksille lainsäädännöllisillä kierrätystavoitteilla. Tukkerin raportin perusteella esiteltävät prosessit ovat BP, BASF, Azko ja NKT. Lisäksi esiteltävä Ozmotechin Thermofuel-prosessi edustaa uudempaa tekniikkaa, jonka mukaisesti toimivia laitoksia ollaan parhaillaan perustamassa Eurooppaan. Liitteen lopussa kerrotaan muovijätteen käytöstä pelkistimenä masuunissa. Muita tätä tutkimusta varten läpikäytyjä prosesseja olivat PYROPLEQ®, ConTherm®, PKA, PyroMelt, KDV, Noell, Wayne, Berliner ja Toshiba.

### **BP-prosessi**

Eräs potentiaalisista pyrolyysitekniikoista kehitettiin 1990-luvulla British Petroleumin johtamassa konsortioprojektissa. Tutkimusvaiheen jälkeen tekniikkaa tutkittiin pilottimittakaavassa vuosina 1994–1998. Grangemouthin koelaitoksen syöteaineena käytettiin sekalaista pakkausmuovijätettä, ja se toimi noin 50 kg/h kapasiteetilla. Vuonna 1998 perustettiin Skotlantiin 25 000 t/a laitos. (Tukker et al. 1999.)

Ennen käsittelyn aloitusta BP-prosessi vaatii epäpuhtauksien erottelun sekä jätemuovin hienontamisen. Prosessi perustuu krakkaukseen leijukerosreaktorissa. Noin 85 % syötetystä muovijätteestä muuttuu käsittelyn seurauksena nestemäisiksi ja kaasumaisiksi hiilivedyiksi. Kaikki prosessissa syntyvät hiilivetytuotteet voidaan käyttää edelleen jatkojalostukseen. BP-prosessissa lähes kaikki jätemuovi kyetään hyödyntämään ja jätettä muodostuu vain vähän. Syntyvästä kaasusta vain noin 15 % on metaania muun ollessa korkean monomeeripitoisuuden omaavaa kaasua tai muita käyttökelpoisia hiilivetyjä. (Tukker et al. 1999.)

Prosessiin syötetty muovijäte sisälsi polyeteeniä, polypropeenia, PVC:tä, PET-muovia sekä polystyreeniä. Muovien osuuden on oltava vähintään 90 painoprosenttia syötteestä. Klooripitoisuus on tavallisesti noin 2 painoprosenttia, suurempi kloorimäärä prosessissa kasvattaa käyttö- ja investointikuluja, jotta kyettäisiin tuottamaan laadullisesti kelvollinen lopputuote. (Tukker et al. 1999.)

### **BASF-konversio**

BASF-prosessia (The BASF Conversion Process) pidetään eräänä merkittävimmistä pyrolyysitekniikoista (Al-Salem et al. 2009). Pilottilaitos avattiin Saksaan vuonna 1994. Laitoksen jätteenkäsittelykapasiteetti oli 15 000 t/a, ja se toimi vuoteen 1996 asti, jonka jälkeen kokeilu lopetettiin. Tarkoituksena oli rakentaa myös suuremman mittakaavan laitos (kapasiteetti 300 000 t/a), mutta tämäkin hanke hylättiin. Syynä tähän oli epävar-

muus muovijätteen riittävydestä pitkällä aikavälillä ja näin taloudellisten riskien kasvaminen liian suuriksi. (Tukker et al. 1999.)

Esikäsittelyvaihe on välttämätön ennen prosessin aloitusta. Esikäsittelyn jälkeen jäte johdetaan kolmivaiheiseen sulatus- ja pelkistysprosessiin. Prosessin tuotteena syntyy petrokemiallisia raaka-aineita, noin 60–70 painoprosenttia hiilivetyöljyä sekä 20–30 painoprosenttia kaasua. Tuotteena syntynyt nafta käsitellään höyrykrakkerissa ja syntyneet monomeerit (kuten eteeni ja propeeni) otetaan talteen. Näitä monomeereja voidaan hyödyntää ensiömuovien valmistuksessa. Korkealla kiehuvat öljyt voidaan prosessoida synteetikaasuiksi tai konversiokoksiksi ja siirtää käytettäväksi muualle. (Tukker et al. 1999.) Prosessi vaatii kuitenkin hyvin suuren määrän muovijätettä sekä porttimaksun muoveille toimiakseen taloudellisesti (Buekens 2006), joten se ei todennäköisesti soveltuisi toimimaan kannattavasti Suomessa vuosittain syntyvillä muovijättemäärillä.

### **Akzo-prosessi**

Akzo-tekniikka (Akzo Nobel Steam Gasification) soveltuu erityisen hyvin suuren PVC-pitoisuuden omaavalle jätteelle. Akzo Nobel perusti vuonna 1994 pienen mittakaavan pilottilaitoksen tekniikan kokeilua varten. Syötemateriaalina käytettiin PVC-kaapeleita ja putkijätettä. Suuremman mittakaavan kokeet suoritettiin sekalaisella PVC-jätteellä lupaavin tuloksin. Tarkoituksena oli myös rakentaa kaupallisen mittakaavan laitos (kapasiteetti 50 000 t/a) taloudellisten järjestelyjen selvittyä. (Tukker et al. 1999.) Laitosta ei kuitenkaan ollut perustettu ainakaan vielä vuoteen 2006 mennessä, ja prosessi oli yhä pilottiasteella. Tämän vuoksi prosessin tekninen toimivuus sekä ympäristölliset ja taloudelliset näkökohdat ovat suurien epävarmuustekijöiden peitossa. (Arena ja Mastellone 2006.)

Itse prosessi koostuu kahdesta erillisestä normaalissa ilmanpaineessa toimivasta kiertoleijupetireaktorista. Toinen reaktoreista konvertoi jätteen tuotekaasuksi (polttokaasu sekä HCl) ja jäännöstuotteena syntyväksi tervaksi. Toinen reaktoreista on polttoreaktori, jossa jäännösterva palaa tuottaen lämpöä kaasutusta varten. Syntynyt kaasumainen tuote jäähdytetään ja HCl saadaan kerättyä talteen. Tekniikan oletetaan soveltuvan monen tyyppiselle jätteelle, esimerkiksi puu, biomassa, sekalainen muovijäte sekä puhdas PVC-muovijäte ovat todennäköisesti käyviä vaihtoehtoja syötemateriaaliksi. (Tukker et al. 1999.)

### **NKT-pyrolyysiprosessi**

NKT-prosessi (NKT Pyrolysis Process) on osoittautunut lupaavaksi muovijätteiden ja erityisesti PVC-kaapelijätteen käsittelyssä (Al-Salem et al. 2009). Tämän pyrolyysiprosessin esitutkimusvaihe aloitettiin vuonna 1993, ja projektia jatkettiin vuosina 1998–1999 optimoimalla kehitettyä prosessia sekalaisen PVC-pitoisen rakennusjätteen käsittelyyn soveltuvaksi puoliteknisessä mittakaavassa. Vuonna 1998 käynnistettiin koelai-

toksen rakentaminen, ja lisäksi rakennettiin 1 000 tonnin vuosikapasiteetilla toimiva sekalaisen muovijätteen käsittelyyn soveltuva esikäsittelylaitos sekä PVC-jätteen käsittelyyn soveltuva reaktori, jonka kapasiteetti oli 200 t/a. Tarkoituksena oli myöhemmin rakentaa 15 000 tonnia sekalaista PVC-jätettä vuodessa käsittelevä laitos. (Tukker et al. 1999.)

Menetelmä vaatii kevyiden muovilaatujen (kuten PE:n ja PP:n) ja muiden prosessia haittaavien aineiden erottelua ennen prosessointia. Tarkoituksena on HCl:n sijaan tuottaa lopputuotteena  $\text{CaCl}_2$ :a, jota syntyy, kun PVC-jätteen sisältämä kloori reagoi täyteaineiden kanssa. (Tukker et al. 1999.)

Menetelmän soveltuvuutta erityyppisille PVC-materiaaleille on kokeiltu. Kaikki testatut materiaalit osoittautuivat käyttökelpoisiksi syötemateriaaleiksi prosessiin, eikä jätteen klooripitoisuus muodostanut ongelmaa. Myös sekalaista PVC-jätettä voidaan pyrolysoida NKT-prosessilla. Tarkoituksena oli kuitenkin käyttää mahdollisimman puhdasta PVC-jätettä. (Tukker et al. 1999.) Tästä syystä prosessin ei katsottu soveltuvan tähän tarkasteluun.

### **Ozmotechin Thermofuel-prosessi**

Thermofuel-prosessin avulla muovijätteet voidaan muuntaa dieselpolttoaineeksi nesteytyksen, pyrolyysin ja tislauksen avulla (CynarPlc 2011). Muovijäte ei vaadi esikäsittelyä pesua tai lajittelua, vaan se voidaan syöttää murskauksen ja/tai granuloinnin jälkeen suoraan prosessiin (Ozmotech 2004). Prosessin kannalta tärkein osuus on katalyyttinen reaktiotorni, joka muuntaa pyrolyyttisten kaasujen alkuperäisen koostumuksen ja synnyttää dieselpolttoainetta vastaavan seoksen (Scheirs 2006, Aguado et al. 2008). Avain tehokkaaseen pyrolyysiprosessiin löytyy muovien nopeasta ja tasaisesta lämmityksestä ja negatiivisen paineen (tai osittaisen vakuumin) käytöstä (CynarPlc 2011).

Prosessin merkittävimpiin etuihin kuuluu sen sopivuus kontaminoituneiden muovien käsittelyyn. Jätemuovit voidaan kerätä useista eri lähteistä, mm. teollisuudesta, maataloudesta, kotitalouksista, kaupasta ja muovien tuotannosta. Prosessin syötteeksi sopivat parhaiten polyolefiinit kuten PE, PP ja PS. (Ozmotech 2004). Polyuretaanit, nylonit, PVC, PET, polykarbonaatit ja fenolit eivät puolestaan sovellu prosessiin. Niiden käyttö heikentää tuotteen laatua sekä aiheuttaa korroosiota laitteistoon (Zadgaonkar 2006). Toimiakseen tehokkaasti laitos vaatii jatkuvaa muovijätteen syöttöä. Yksi laitos kykenee tuottamaan 19 000 l/d korkealaatuista dieseliä 20 tonnista muovijätettä, jolloin laitos kykenee muuttamaan vuosittain noin 6 000 tonnia muovijätettä tavanomaista dieseliä rikkipitoisuudeltaan alhaisemmaksi korkean setaaniluvun synteettiseksi dieseliksi, joka soveltuu kaikkiin polttomoottoreihin. Polttoaineen saanto kohoaa näin jopa 95 % syötetyn jätteen määrästä. (CynarPlc 2011.)

Iso-Britanniaan on tarkoitus perustaa lähivuosina 10 tekniikkaa hyödyntävää laitosta, jolloin laitosten kapasiteetti riittäisi käsittelemään noin 60 000 tonnin muovijätettä vuo-

nessa. Ensimmäisen laitoksen on tarkoitus aloittaa toimintansa vuoden 2011 lopussa. (CynarPlc 2011.) Tekniikka toimii kaupallisena myös Aasiassa. Vuonna 2006 Japanissa toimi kuusi prosessia hyödyntävää laitosta. (Scheirs 2006.) Prosessi vaikutti mielenkiintoiselta, muttei sitä voitu valita jatkotarkasteluun, sillä Ozmotechin Thermofuel-tekniikan kaupallistamiseen yksinkäyttöoikeuden Isossa-Britanniassa ja Irlannissa omistava ja laitoksia parhaillaan käynnistävä CynarPlc ei ollut halukas antamaan prosessista tarkempia lisätietoja (Lord 2010).

### **Muovijätteen käyttö pelkistimenä masuunissa**

Raakaraudan tuotantoprosessissa rautamalmi pelkistetään masuunissa metalliseksi raudaksi. Pelkistämiseen käytetään normaalisti koksia, hiiltä ja raskasöljyä. Nämä materiaalit voidaan kuitenkin korvata käyttämällä sekalaista muovijätettä. (Tukker 2002.) Tässä vaihtoehdossa päätarkoituksena ei ole siis ole energiantuotanto vaan tuottaa pelkistimiä raudantuottoprosessiin (Plastics Europe 2009b). Muovi voidaan syöttää masuuniin joko sellaisenaan tai nestemäisessä muodossa muoviöljynä. Myös muoviöljyn ja polttoöljyn sekoittamista keskenään ennen injektointia masuuniin on kokeiltu. (Ziębik ja Stanek 2001.)

Saksalainen Stahlwerke Bremen (nyk. ArcelorMittal Bremen) aloitti menetelmän keuhon vuonna 1994. Vuonna 1998 kapasiteettia lisättiin 162 500 tonniin vuodessa. (Tukker 2002.) Menetelmä on käytössä yhä (ArcelorMittal Bremen 2011). Muovijätettä käyttää myös itävaltalainen Voestalpine (Plastics Europe 2009b).

Muovijäte vaatii epäpuhtauksien poistoa ennen injektointia masuuniin (Tukker 2002). Masuunissa muovi kaasuuntuu synteesikaasuksi, joka pelkistää rautaoksidit kuumaksi raudaksi (Plastics Europe 2009b). Plastics European (2009c) mukaan tämänhetkessä markkinatilanteessa raaka-ainekierrätysmenetelmistä vain muovijätteen syöttö hapettimiksi masuuniin on osoittautunut taloudellisesti kannattavaksi teollisessa mittakaavassa. Osaltaan tämä varmasti johtuu myös siitä, ettei uuden laitoksen rakentamiseen tarvitse masuunikäytön tapauksessa investoida.



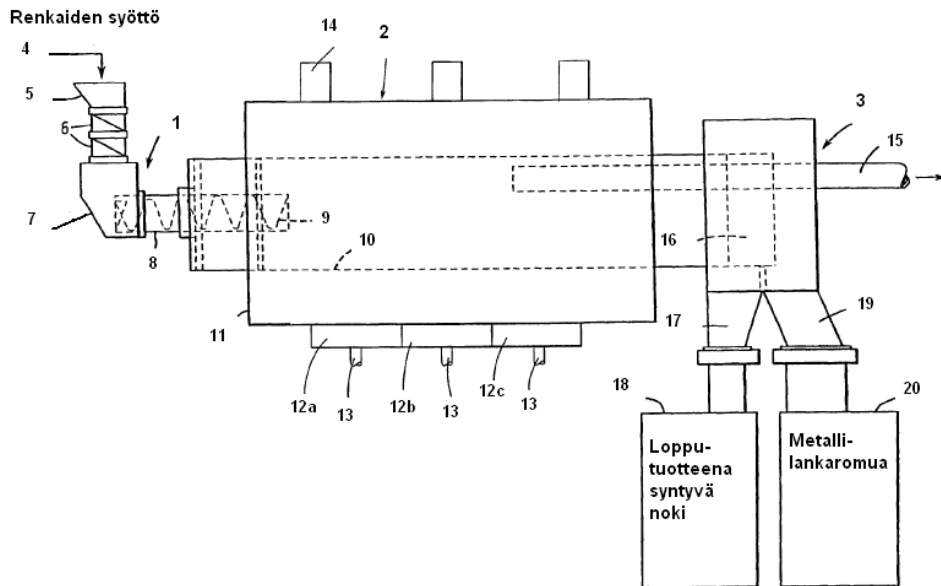


## Liite B: Metso Mineralsin rengasjätteiden pyrolyysiprosessin toiminta

Metso Mineralsin rengaspyrolyysimenetelmässä alle 50 mm kokoon murskatut renkaat syötetään epäsuorasti lämmitettyyn rumpu-uuniin (Metso Minerals 2010). Prosessi on patentoitu murskattujen autonrenkaiden pyrolyysiin (Pat. EP 163092B1), mutta sen kerrotaan soveltuvan muullekin hiilivetytypitoiselle materiaalille. Prosessi tapahtuu hapettomissa olosuhteissa 500–800 °C lämpötilassa (Pat. EP 1190014B1), ja sen seurauksena syntyy nokea, terästä, öljyksi kondensoitavaa kaasua, sekä tiivistymättömiä kaasuja joita voidaan hyödyntää esimerkiksi energiantuotannossa. (Metso Minerals 2010.) Prosessin arvioidaan tuottavan 35 tonnia nokea ja 11 tonnia romuterästä 100 tonnista rengasromua. Määrä on huomattavasti suurempi kuin aiemmin kehitetyissä prosesseissa, joissa rumpu-uunin lämpötila on vakio. Myös lopputuotteena saatu hiili on laadullisesti parempaa. (Pat. EP 163092B1.) Pyrolyysiprosessiin liittyen Metso on patentoinut myös menetelmän öljyn kondensoimiseksi pyrolyysikaasusta. Tämän kaksivaiheisen kondensoinnin seurauksena kaasuvirran mukana kulkeutuva öljy saadaan talteen yli 95-prosenttisesti. (Pat. EP 1190014B1.)

Menetelmä on kuvattu eurooppalaisten patenttien EP 163092B1 ja EP 1190014B1 mukaan. Pyrolyysisysteemi (kuva B1) sisältää materiaalin syöttöosan (1), pyrolyysiosan tai reaktorin (2) sekä erotteluosan (3). Laitoksella murskatut tai erilliseltä murskauslaitokselta kuljetut renkaanpalat syötetään (4) syöttösuppilon (5) kautta syöttöosaan. Pari tyhjennysventtiilejä (6) on sijoitettu syöttösuppilon yhteyteen, ja niiden tarkoituksena on toimia ilmalukkoina, jotka estävät hapen pääsyn pyrolyysiosaan. Kun renkaanpalat ovat kulkeneet venttiilien läpi, ne putoavat syöttökammioon (7) odottamaan syöttöä pyrolyysiosaan. Syöttökammioon on kytketty typpivirtaus, minkä tarkoituksena on poistaa loputkin ilmat kammioista. Syöttökammion ja pyrolyysiosan välillä sijaitsee pyörivä syöttösylinteri (8), jossa ruuvimainen sisäosa (9) kytkeytyy pyrolyysiosaan Arkhimedeen ruuvin tapaan ja kuljettaa rengasmateriaalin pyrolysoitavaksi.

Pyrolyysiosa sisältää pyörivään rumpu-uunin (10), joka sijaitsee eristetyn uunin (11) sisällä. Rumpu-uuni kiertyy pitkittäisen akselinsa mukaan ja on sijoitettu niin, että uunin syöttöosa sijaitsee tyhjennyspäästä ylempänä, jolloin rengaspalat saadaan liikkumaan painovoiman avulla. Rumpua ympäröivä uuni sisältää useita polttimia (12a–c), jotka lämmittävät rumpu-uunia. Jokainen poltin kykenee lämmittämään uunin osia eri lämpötiloihin, jolloin rumpu-uuniin saadaan muodostumaan toisistaan riippumattomia erilaisia lämpövyöhykkeitä. Jokaiseen polttimeen syötetään polttoaineeksi maakaasua erillisten syöttöputkien (13) kautta. Lämmityksessä syntyneet pakokaasut poistetaan uuniin liitettyjen poistoputkien (14) kautta.



Kuva B1. Kaavakuva Metso Mineralsin rengaspyrolyysiprosessin vaiheista. Numeroiden selitykset löytyvät tekstistä (Pat. EP 163092B1 mukaan).

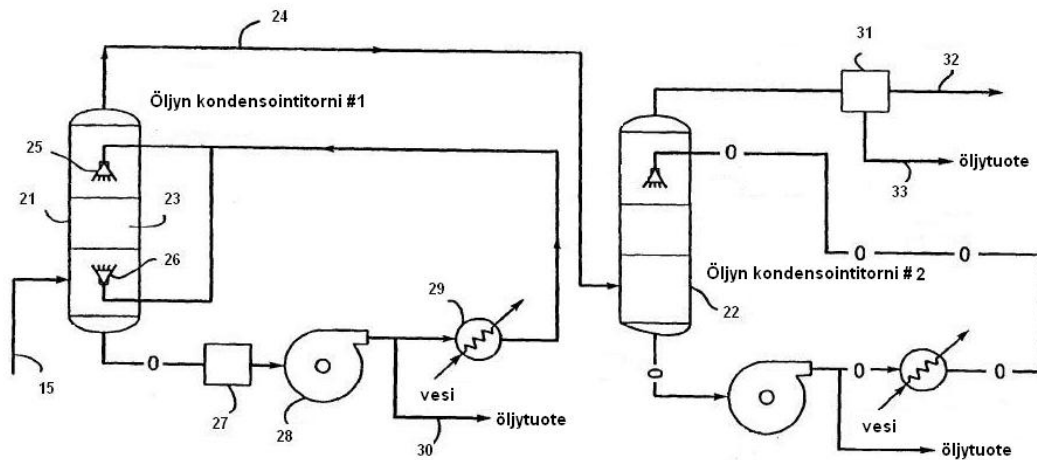
Patentoidussa menetelmässä uunin osat lämmitetään eri lämpötiloihin niin, että lämpötila on korkeimmillaan uunin syöttöosan puoleisessa päässä, ja matalammillaan erotteusosan puoleisessa päässä. Rumpu-uunin ensimmäiseen osaan saapunut rengasmateriaali lämmitetään 700–800 °C lämpötilaan; optimaalisimmillaan lämpötila on 700–750 °C välillä. Uunin korkea lämpötila lämmittää renkaanpalat nopeasti, jolloin hajoaminen tehostuu ja kevyet hiilivetyfraktiot höyrystyvät. Höyrystyneet hiilivedyt vapautetaan rumpu-uunin sisätilaan. Uunin toisen osan lämpötila on 600 ja 700 °C välillä ja on optimaalisimmillaan noin 600 °C. Lämpötila on ensimmäistä osaa alhaisempi, mutta edelleen riittävän korkea pyrolysoitumisen jatkumiseksi. Rumpu-uunin kolmannessa osassa uunin lämpötila on 500–600 °C välillä, ideaalisin lämpötila on noin 500 °C. Lämpötilassa haihtuvien yhdisteiden erottuminen renkaanpaloista jatkuu edelleen. Vaihteleva lämpötila aikaansaa rengasmurskeen tehokkaamman pyrolysoitumisen ja parempilaatuisten lopputuotteiden syntymisen. Kun rengasmateriaali on kulkenut kolmivaiheisen lämmitysprosessin läpi ja poistuu uunista, se sisältää enää arviolta 1 % haihtuvia yhdisteitä.

Pyrolyysiosan läpi kulkeutuneiden renkaanpalojen sisältämät hiilivedyt johdetaan poistokaasuina ulos tyhjennysputken (15) kautta. Putkessa loppupäässä vallitsee alipaine, jonka avulla prosessissa muodostuneet kaasut saadaan johdettua ulos uunin sisältä. Nämä kaasut sisältävät arvokkaita hiilivetyjä, kondensoitavissa olevaa öljyä, pieniä määriä vesihöyryä ja kiinteitä partikkelimaisia hiukkasia, jotka voidaan edelleen kerätä talteen sekä jatko-prosessoida. Koska kaasut johdetaan pois ennen varsinaista erotte-

luosaa, ne sisältävät paljon vähemmän ilmassa kulkeutuvia kontaminaatteja kuin sellaiset pyrolyysisysteemit, joissa kaasujen poisto tapahtuu vasta erotteluosassa. Lisäksi koska kaasut poistetaan korkeamman lämpötilan vallitessa, ei kaasujen sisältämä öljy erotu ja likaa erottelusysteemin sisäosia.

Rumpu-uunin tyhjennyspää ulottuu uunin ulkopuolelle jossa se liittyy erotteluosaan. Myös erotteluosa sisältää ilmalukot, joilla estetään hapen pääsy pyrolyysirumpuun. Pyrolysoinnin jälkeen jäljelle jäävä kiinteä aines on lähinnä hiiltä ja metallilankaa, jotka erotellaan erillisiksi lopputuotteiksi tyhjennyspäässä sijaitsevan rumpuseulan (16) avulla. Hiiliaines mahtuu seulassa olevien aukkojen lävitse kulkeutuen alla olevaan kuiluun (17), ja sieltä edelleen keräysastiaan (18). Koska pieni osa metalleista pääsee läpi rumpuseulan aukoista, hiilipitoinen aines johdetaan magneettierotteluun ennen jatkoprosesointia. Suurin osa metallilangasta ei kuitenkaan mahdu läpi seulan aukoista, vaan jää rumpuun, josta se kulkeutuu edelleen oman kuilunsa (19) kautta keräysastiaan (20). Nämä lopputuotteet voidaan edelleen prosessoida myyntikelpoisiksi tai uudelleen käytettäviksi tuotteiksi, esimerkiksi noki prosessoidaan kauppalaatuiseksi ja metallilangasta valmistetaan muita käyttökelpoisia tuotteita.

Renkaita pyrolysoimalla saadaan talteen noen ja hiiliteräksen lisäksi öljymäinen fraktio joka vastaa koostumukseltaan kakkosluokan (diesel)öljyä sekä tiivistymättömän kaasumainen fraktio. Tämä kaasumainen fraktio voidaan edelleen johtaa syöttöputken (15) kautta öljyn kondensointisysteemiin, joka koostuu kahdesta sylinterimäisestä tornista (21 ja 22) (kuva B2). Tornin keskiosa on pakattu täyttekappaleilla (23), joilla on suuri pinta-ala, ja joiden välinen huokoisuus on iso. Noin 400–800-asteiset pyrolyysikaasut syötetään tornin alaosaan, josta ne kulkevat pakatun osan läpi tornin yläosaan ja poistuvat viilenneinä 100–105 °C:n välille linjastoa (24) pitkin. Ruiskuttamalla jäähdytettyä öljyä pakatun osan pinnalle (25) pystytään kuumat kaasut lauhduttamaan niiden kulkiesä tornin pakatun osan lävitse. Lauhduttamisen seurauksena tornissa kulkevat pyrolyysikaasut erottuvat kondensoitunutta öljyä ja hiukkasia sisältäväksi primääriksi öljyfraktioksi, sekä primääriksi höyryfraktioksi, joka sisältää öljyä, hiilivetykaasuja ja vesihöyryä. Vesi pidetään höyrymäisenä, jottei tornin pohjalta talteen kerättävä kondensoitunut öljy sekoittuisi veden kanssa. Kontrolloimalla lauhduttimen lämpötilaa ja kokoa sekä virtaavan öljyn määrää voidaan säädellä tornista poistuvan kaasun lämpötilaa sekä lopputuotteena saatavan öljyn ja kaasun koostumusta. Kontaminaation estämiseksi myös pakatun osan alapinnalle (26) ruiskutetaan öljyä, joka kerää kaasun sisältämät partikkelit, jotka edelleen kulkeutuvat tornin pohjalle.



Kuva B2. Pyrolysoidun kaasun kondensointisysteemi. Numeroiden selitykset löytyvät tekstistä. (Pat. EP 119014B1 mukaan.)

Tornin pohjalta talteen kerätystä öljystä erotetaan partikkelimainen aines suodattamalla (27). Öljy imeytyy suodattimen läpi imupumpun (28) avustamana. Suodatuksen jälkeen öljy johdetaan lämmönsiirtimen (29) kautta joko jäähdetyttynä uudelleen ruiskutettavaksi torniin tai se poistetaan lopputuotteena linjan (30) kautta. Kaasumainen osa johdetaan edelleen seuraavaan torniin (22), jossa se käsitellään samalla lailla kuin ensimmäisessä vaiheessa. Torniin saapuvien 105-asteisten kaasujen annetaan kuitenkin jäähtyä alle veden tiivistymispisteen, jolloin vesihöyrystä muodostunut juokseva vesi sekoittuu öljyn kanssa muodostaen sekundäärisen öljyfraktion, josta vesi on edelleen erotettavissa. Toisesta tornista poistuessaan 49-asteinen kaasu sisältää enää alle 5 % tiivistettävissä olevaa höyryä, jolloin yli 95 % kaasun sisältämästä öljystä on saatu kerättyä talteen. Pisaraerotin (31) poistaa suurimman osan muodostuneesta öljysumusta, joka poistuu putken (32) kautta. Puhdistettu kaasu kulkee toisen putken kautta (33) joko varastoitavaksi tai polttoainekäyttöön.

Kaupallisessa mittakaavassa toimiva renkaiden pyrolysointilaitos vaatisi renkaiden syöttösystemin, joka pystyy kuljettamaan alle 50 mm:n kokoisia renkaanpaloja, halkaisijaltaan 2,4 metriä leveään ja 29 metriä pitkään rumpu-uunin tuotteiden poistosysteemeineen, öljyn kondensointisysteemin, hiilen jäähdetyssysteemin, magneettierottimen, hiilen jauhatussysteemin tasalaatuisen lopputuotteen saamiseksi, sekä mahdollisen valvontajärjestelmän käytettäväksi syntyvien ilmapäästöjen valvontaan. (Kiser 2002.)

## Liite C: Ympäristökuormitusten laskennassa käytetyt päästökertoimet

Tuhkien ja syötteen kuljetuksen päästöt Lipasto-tietokannan (2010) mukaan. Varsinaisella perävaunulla varustetut yhdistelmät, kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t, Päästöt keskimäärin v. 2009.

### **Maantieajo**

#### *Tyhjänä*

CO <sub>2</sub>	879	g/km
CH <sub>4</sub>	0,010	g/km
N <sub>2</sub> O	0,026	g/km
SO <sub>2</sub>	0,006	g/km
NO <sub>x</sub>	7	g/km
CO <sub>2</sub> -ekv.	887	g/km
hiukkaset	0,066	g/km

#### *Täydellä kuormalla*

CO <sub>2</sub>	1 334	g/km
CH <sub>4</sub>	0,010	g/km
N <sub>2</sub> O	0,035	g/km
SO <sub>2</sub>	0,009	g/km
NO <sub>x</sub>	10	g/km
CO <sub>2</sub> -ekv.	1 345	g/km
hiukkaset	0,100	g/km

#### *Arvioitu 75 % kuorma, 30 t*

CO <sub>2</sub>	1 220	g/km
CH <sub>4</sub>	0,010	g/km
N <sub>2</sub> O	0,033	g/km
SO <sub>2</sub>	0,008	g/km
NO <sub>x</sub>	9,25	g/km
CO <sub>2</sub> -ekv.	1231	g/km
hiukkaset	0,092	g/km

Dieselin tuotannon ja kuljetusten päästökertoimet tuotettua energiayksikköä kohti (Mäkinen et al. 2006 mukaan).

CO <sub>2</sub>	13,8	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,001	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,000	g/MJ
CO <sub>2</sub> -ekv.	13,8	g/MJ

Kivihiilellä tuotetun sähkön päästökertoimet tuotettua energiayksikköä kohti (Myllymaa et al. 2008b mukaan).

CO <sub>2</sub>	253,9	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,003	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,003	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,020	g/MJ
NO <sub>x</sub>	0,039	g/MJ
hiukkaset	0,0000001	g/MJ

Suomen keskimääräisen lämmöntuotannon päästökertoimet v. 2009 tuotettua energiayksikköä kohti.

CO <sub>2</sub>	38,1	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,006	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,006	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,126	g/MJ
NO <sub>x</sub>	0,116	g/MJ
hiukkaset	0,049	g/MJ

Oletuksia

- 1) Polttoainejakaumana käytetty Tilastokeskuksen polttoainejakaumaa lämmöntuotannolle v. 2009 (Tilastojulkaisu Sähkön ja lämmön tuotanto 2009)
- 2) Teollisuuslämpö ja kaukolämpö laskettu yhteen
- 3) Yhteistuotantolaitosten lämmöntuotantoon kohdistuva polttoaineen kulutus on laskettu hyödynjakomenetelmällä (esim. Motiva 2004, [http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje\\_CO2\\_kohde\\_040622.pdf](http://www.motiva.fi/files/209/Laskentaohje_CO2_kohde_040622.pdf))
- 4) Hiilidioksidin osalta päästökertoimet ovat Tilastokeskuksen polttoaineluokituksen 2011 mukaiset
- 5) Muiden päästöjen päästökertoimet on määritetty SYKEN laatiman Kasvenermallin perusteella (keskiarvoina tuotantomuodoista: kaukolämmitys, kaukolämpövoima, yhteistuotanto, teollisuuden lämmöntuotanto, muu lämmöntuotanto).
- 6) Jotta Tike:n tilastoimille polttoaineille on saatu määritettyä päästökertoimet Kasvenermallin pohjalta on oletettu seuraavasti: öljy=raskas pö, muut fossiiliset = raskas pö, metsäteollisuuden jäteliemet = mustalipeä, muut puupolttoaineet = muu puu, muut uusiutuvat = biokaasu ja muut energialähteet = teollisuuden jäte-lämpö.

Ilmapäästöt jätteenpolttodirektiivin mukaisesta erilliskattilasta sisään syötettyä energiayksikköä kohti Jätteenpolttodirektiivin (2000/76/EY) mukaan. Metaani- ja typpioksi-duulipäästöt arvioitu Tsupari et al. (2006) mukaan.

CH <sub>4</sub>	0,003	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,007	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,029	g/MJ
NO <sub>2</sub>	0,114	g/MJ
hiukkaset	0,006	g/MJ

Liite C: Ympäristökuormitusten laskennassa käytetyt päästökertoimet

Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimet tuotettua energiayksikköä kohti Myllymaa et al. (2008b) mukaan.

CO <sub>2</sub>	81	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,293	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,007	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,123	g/MJ
NO <sub>x</sub>	0,149	g/MJ
hiukkaset	0,020	g/MJ

Raskaan polttoöljyn valmistamisen päästöt tuotettua öljykiloa kohti (Fortum Oil & Gas 2002).

CO <sub>2</sub>	280	g/kg
SO <sub>2</sub>	0,31	g/kg
NO <sub>x</sub>	1,00	g/kg
hiukkaset	0,05	g/kg

Puun polton päästökertoimet sisään syötettyä energiayksikköä kohti (Kasvener 2007).

CO <sub>2</sub>	0	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,027	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,006	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,020	g/MJ
NO <sub>x</sub>	0,125	g/MJ
hiukkaset	0,110	g/MJ

Turpeen polton päästökertoimet sisään syötettyä energiayksikköä kohti (Kasvener 2007 ja Tilastokeskus 2011).

CO <sub>2</sub>	105,9	g/MJ
CH <sub>4</sub>	0,008	g/MJ
N <sub>2</sub> O	0,009	g/MJ
SO <sub>2</sub>	0,170	g/MJ
NO <sub>x</sub>	0,170	g/MJ
hiukkaset	0,135	g/MJ





## Liite D: Vaihteluvälien määrittelyssä käytetyt mi- nimi- ja maksimiarvot, sekä laskennassa käytetty arvioitu keskimääräinen kuormitus

	ka	lähde	min	max
<b>Peruskonsepti</b>				
Muovin ja puun poltto (mg/MJpa)				
SO <sub>2</sub>	14	Jätteenpolttodirektiivi 2000, 50 %	10 %	100 %
NO <sub>2</sub>	57	Jätteenpolttodirektiivi 2000, 50 %	10 %	100 %
hiukkaset	3	Jätteenpolttodirektiivi 2000, 50 %	10 %	100 %
CH <sub>4</sub>	3	Tsupari et al. 2006	-60 %	+ 60 %
N <sub>2</sub> O	7	Tsupari et al. 2006	-50 %	+100 %
Km.lämmöntuotanto (mg/MJth)				
SO <sub>2</sub>	126	SYKE 2005, Kasvener 2007	66	187
NO <sub>x</sub>	116		76	156
hiukkaset	49		17	81
CH <sub>4</sub>	6		1	11
N <sub>2</sub> O	6		1	11
<b>Vertailukonsepti</b>				
Km. lämmöntuotanto		kts. peruskonsepti		
Puun poltto (mg/MJpa)		Kasvener 2007		
SO <sub>2</sub>	20		20	20
NO <sub>x</sub>	125		80	170
hiukkaset	110		20	200
CH <sub>4</sub>	27		3	50
N <sub>2</sub> O	6		2	10
Turpeen poltto (mg/MJpa)				
SO <sub>2</sub>	170	Kasvener 2007	140	200
NO <sub>x</sub>	170		120	220
hiukkaset	135		70	200
CH <sub>4</sub>	8		1	15
N <sub>2</sub> O	9		2	15



## VTT Working Papers

- 158 Hannes Toivanen. From ICT towards information society. Policy strategies and concepts for employing ICT for reducing poverty. 2011. 38 p. + app. 1 p.
- 161 Sebastian Teir, Toni Pikkarainen, Lauri Kujanpää, Eemeli Tsupari, Janne Kärki, Antti Arasto & Soile Aatos. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Teknologiaakatsaus. 2011. 106 s. + liitt. 6 s.
- 162 Mikael Haag, Tapio Salonen, Pekka Siltanen, Juha Sääsä & Paula Järvinen. Työohjeiden laadintamenetelmiä kappaletavaratuotannossa. Loppuraportti. 2011. 40 s.
- 163 Marko Nokkala, Kaisa Finnilä, Jussi Rönty & Pekka Leviäkangas. Financial performance of Finnish technical networks. 2011. 56 p. + app. 90 p.
- 164 Jussi Rönty, Marko Nokkala & Kaisa Finnilä. Port ownership and governance models in Finland. Development needs & future challenges. 2011. 104 p.
- 165 Aira Hast, Tommi Ekholm & Ilkka Savolainen. Suomen kansallisten päästövähennystoimien epävarmuuksien ja riskien arviointi. 2011. 44 s. + liitt. 3 s.
- 166 Mustafa Hashmi. Survey of smart grids concepts worldwide. 2011. 74 p.
- 167 Aimo Tiilikainen, Kyösti Pennanen & Maarit Heikkinen. Tulevaisuuden elintarvikepakkaus. Kvantitatiivinen kuluttajatutkimus pakkausprototyyppien ja kaupallisten verrokkituotteiden eroista. 2011. 36 s. + liitt. 8 s.
- 168 Pekka Leviäkangas, Anu Tuominen, Riitta Molarius & Heta Kajo (Eds.). Extreme weather impacts on transport systems. 2011. 119 p. + app. 14 p.
- 169 Luigi Macchi, Elina Pietikäinen, Teemu Reiman, Jouko Heikkilä & Kaarin Ruuhilehto. Patient safety management. Available models and systems. 2011. 44 p. + app. 3 p.
- 170 Raine Hautala, Pekka Leviäkangas, Risto Öörni & Virpi Britschgi. Perusopetuksen tietotekniikkapalveluiden arviointi. Kauniaisten suomenkielinen koulutoimi. 2011. 67 s. + liitt. 16.
- 171 Anne Arvola, Aimo Tiilikainen, Maiju Aikala, Mikko Jauho, Katja Järvelä & Oskari Salmi. Tulevaisuuden elintarvikepakkaus. Kuluttajalähtöinen kehitys- ja tutkimushanke. 152 s. + liitt. 27 s.
- 172 Sauli Kivikunnas & Juhani Heilala. Tuotantosimuloinnin tietointegraatio. Standardikatsaus. 2011. 29 s.
- 173 Eetu Pilli-Sihvola, Mikko Tarkiainen, Armi Vilkmann & Raine Hautala. Paikkasidonnaiset liikenteen palvelut. Teknologia ja arkkitehtuurit. 2011. 92 s.
- 174 Eetu Pilli-Sihvola, Heidi Auvinen, Mikko Tarkiainen & Raine Hautala. Paikkasidonnaiset liikenteen palvelut. Palveluiden nykytila. 2011. 60 s.
- 176 Henna Punkkinen, Nea Teerijoki, Elina Merta, Katja Moliis, Ulla-Maija Mroueh & Markku Ollikainen. Pyrolyysin potentiaali jätemuovien käsittelymenetelmänä. Ympäristökuormitukset ja kustannusvaikutukset. 79 s. + liitt. 15 s.