

Hanna Lindholm

MUSTAN PELLETTIN POLTTOAINEKETJUN
ENERGIANKULUTUS,
ILMASTOVAIKUTUKSET SEKÄ
KUSTANNUKSET

Opinnäytetyö
Energiatekniikan insinööri

Syyskuu 2015



KYAMK
University of Applied Sciences

| Tekijä | Tutkinto | Aika |
|---|---------------|--------------------------|
| Hanna Lindholm | Insinööri AMK | Syyskuu 2015 |
| Opinnäytetyön nimi | | 53 sivua 3 liitesivua |
| Mustan pelletin polttoaineketjun energiankulutus, ilmastovaikutukset sekä kustannukset | | |
| Toimeksiantaja | | |
| Cursor Oy | | |
| Ohjaaja | | |
| Tutkimusinsinööri Hannu Sarvelainen | | |
| Tiivistelmä | | |
| <p>Energiatehokkuus ja polttoaineiden ympäristövaikutukset ovat jatkuvasti esillä maailman energiakeskusteluissa. Energiantuotannosta pyritään koko ajan tekemään entistä energia- ja kustannustehokkaampaa sekä ympäristöystävällisempää.</p> | | |
| <p>Tämän työn tarkoituksena oli selvittää suomalaisen mustan pelletin energiankulutus, ilmastovaikutukset sekä kustannukset. Musta pelletti tuotettiin Suomessa ja kuljetettiin Alankomaihin voimalaitokseen poltettavaksi rinnakkaispolttona venäläisen kivihiilen kanssa. Venäläistä kivihiltä käytettiin työssä mustan pelletin vertailukohteena.</p> | | |
| <p>Työn menetelminä käytettiin energiankulutus-, ilmastovaikutus- ja kustannuslaskelmia sekä herkkyysanalyysejä. Energiankulutuksessa selvitettiin polttoaineiden tuottamiseen ja kuljettamiseen kulunut energia. Ilmastovaikutusten osalta selvitettiin, mitkä ovat tuotannossa, logistisessa ketjussa ja poltossa syntyvät ilmastovaikutukset. Kustannusten osalta selvitettiin tuotannossa ja kuljetusketjussa syntyvät euromääräiset kulut. Herkkyysanalyyseillä tarkasteltiin vielä, miten kustannusten muutokset vaikuttavat polttoaineiden loppuhintaan.</p> | | |
| <p>Laskelmien perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä ja näillä kustannuksilla musta pelletti on energiatehokkaampi ja kalliimpi polttoaine kuin kivihiili. Polttoaineketjun energiankulutuksen osalta kivihiilen kulutus on kymmenesosa mustan pelletin kulutuksesta. Toisaalta, jos otetaan huomioon vain ulkopuolinen energia, ovat polttoaineiden energiankulutukset jokseenkin samat. Suuri kustannusero polttoaineiden loppuhintojen välillä johtuu päästöoikeuden poikkeuksellisen matalasta hinnasta. Muiden kustannusten pysyessä ennallaan ja vain päästöoikeuden hinnan noustessa tasolle 45 €/tCO₂, on musta pelletti kustannustehokkaudeltaan samaa luokkaa kuin kivihiili. Ympäristöystävällisyyden perusteella musta pelletti on ylivoimainen polttoaine verrattuna kivihiiheen. Kivihiilen aiheuttamat päästöt ovat noin 25-kertaiset mustaan pellettiin nähden.</p> | | |
| <p>Vaikka työn kokonaislopputulokset olivat ennalta ennustettavissa, tarjoaa työ yksityiskohtaisemman tarkastelun mustan pelletin tuotantoprosessiin ja kuljetuksiin. Työn tulokset annetuilla lähtöarvoilla ovat luotettavia, sillä työssä käytettiin tunnettuja yhtälöitä.</p> | | |
| Asiasanat | | |
| musta pelletti, kivihiili, torrefiointi, energiankulutus, ilmastovaikutus, kustannus | | |

| | | |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
| Author | Degree | Time |
| Hanna Lindholm | Bachelor of Engineering | September 2015 |
| Thesis Title | | |
| Energy Consumption, Climate Impacts and Costs of Black Pellet's Fuel Chain | | 53 pages 3 pages of appendices |
| Commissioned by | | |
| Cursor Oy | | |
| Supervisor | | |
| Hannu Sarvelainen, Research Engineer | | |
| Abstract | | |
| <p>Energy efficiency and climate impacts of fuels are constantly featured in energy debates all around the world. Energy production is all the time aiming for more energy- and cost effective and more eco-friendly practices.</p> <p>The objective of the thesis was to study the energy consumption, climate impacts and costs of Finnish black pellet. Black pellet was produced in Finland and shipped to a power plant in the Netherlands, where it was co-fired with Russian coal. Russian coal was used as a comparison for the Finnish black pellet in this thesis.</p> <p>The methods used in this work were energy consumption-, climate impact- and cost calculations along with sensitivity analysis. In the energy consumption part, the consumed energy during production and transportation was studied. As far as climate impacts were concerned, the study focused on emissions from production, logistics and combustion. In the cost calculations the focus was on production and logistics. Finally the sensitivity analysis studied how the changes in the costs affect the final prices of the fuels.</p> <p>According to the calculations, at this moment and with the current costs, coal is a more energy and cost effective fuel than black pellet. The energy consumption in coal's fuel chain is only one tenth of black pellet's energy consumption. On the other hand if only external energy is taken into consideration, the energy consumption of both fuels is somewhat the same. The large difference in the final prices of the fuels is a result of the currently exceptionally low price of emission allowances. If the other costs remain the same and only the price of emission allowances rises to 45 €/tCO₂, will black pellet's cost effectiveness be at the same level as coal's. On the grounds of environmental friendliness black pellet is a superior fuel compared to coal. The emissions of coal are about twenty-five-fold to those of black pellet.</p> <p>Even though the results were foreseeable, the thesis offers more detailed inspection of black pellet's production process and transportation. The results can be considered reliable with the given starting values, because the equations used are well-known.</p> | | |
| Keywords | | |
| black pellet, coal, torrefaction, energy consumption, climate impact, cost | | |

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Cursor Oy:lle kevään, kesän ja syksyn 2015 aikana. Haluan kiittää vinkeistä, kommentteista ja avusta toimeksiantajan puolelta ohjelmapäällikkö Antti Nummea ja asiantuntija Esa Partasta.

Haluan kiittää erityisesti ohjaavaa opettajaani, tutkimusinsinööri Hannu Sarvelaista, joka toimi työssäni asiantuntijana, avunantajana, tukijana sekä inspiraation lähteenä. Kiitokset työn onnistumisesta ja läpiviemisestä kuuluu myös Kymenlaakson ammattikorkeakoulun lehtori Jyri Mularille.

Lisäksi kiitoksen ansaitsevat Janne Lindholm ja Anna Falck. Ilman heitä työ ei olisi alkanut eikä päättynyt. Kiitos myös Jari Lindströmille, Jorma Lindströmille, Petri Paavolalle sekä Ahti Pakkaselle.

Kotkassa 26.9.2015

Hanna Lindholm

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Työn tarkoitus | 7 |
| 1.2 | Työn toteutus | 7 |
| 1.3 | Aiheen rajaus | 8 |
| 1.4 | Toimeksiantaja | 9 |
| 2 | YLEISTÄ POLTTOAINEISTA | 9 |
| 2.1 | Pelletti | 10 |
| 2.1.1 | Musta pelletti | 10 |
| 2.1.2 | Torrefiointiprosessi | 11 |
| 2.2 | Kivihilli | 12 |
| 3 | MENETELMÄT | 13 |
| 4 | LÄHTÖTIEDOT LASKENTAMALLEIHIN | 14 |
| 4.1 | Mustan pelletin kuljetus | 14 |
| 4.2 | Mustan pelletin raaka-aineet ja tuotanto | 14 |
| 4.2.1 | Kuivatus | 15 |
| 4.2.2 | Torrefiointi, jauhatus ja pelletointi | 18 |
| 4.2.3 | Esimerkkilaskelma | 18 |
| 4.3 | Kivihillen hinta ja kuljetus | 21 |
| 4.4 | Liikennepolttoaineet | 21 |
| 4.5 | Sähkön hinta | 22 |
| 4.6 | Ilmastovaikutukset | 22 |
| 4.6.1 | Hiilidioksidipäästöt | 23 |
| 4.6.2 | Päästökauppa | 23 |
| 4.6.3 | Päästökertoimet | 24 |
| 5 | KULJETUSVÄLINEET JA VOIMALAITOS | 24 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.1 | Täysperävaunun yhdistelmä | 24 |
| 5.2 | Juna | 25 |
| 5.3 | Pyöräkuormaaja | 25 |
| 5.4 | Satamanosturi | 26 |
| 5.5 | Alus | 26 |
| 5.6 | Rotterdamin satama ja Maasvlakten voimalaitokset | 27 |
| 6 | LASKENTATULOKSET | 28 |
| 6.1 | Polttoaineketjun energiankulutus | 28 |
| 6.2 | Ilmastovaikutukset | 30 |
| 6.3 | Polttoaineketjun kustannukset | 33 |
| 6.4 | Herkkyysanalyysi | 37 |
| 7 | LOPPUTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU | 40 |
| 7.1 | Energiatehokkuus | 40 |
| 7.2 | Ympäristöystävällisyys | 42 |
| 7.3 | Kustannustehokkuus | 43 |
| 7.4 | Mustan pelletin tuotantoprosessin jatkokehitys | 44 |
| 7.5 | Päästöoikeuden vaikutus kustannuksiin | 45 |
| 8 | POHDINTA | 45 |
| 8.1 | Jatkotutkimusaiheet | 45 |
| 8.2 | Tutkimuksen luotettavuus ja hyödynnettävyys | 46 |
| 8.3 | Yhteenveto | 46 |
| | LÄHTEET | 47 |

LIITTEET

Liite 1. Lähtöarvot laskelmiin

1 JOHDANTO

Energiaa halutaan tuottaa ja sitä pitää tuottaa jatkossa entistä puhtaammin. Yksi vaihtoehto hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on polttaa nykyisissä kivihiilivoimalaitoksissa kivihiilen seassa puupellettiä. Energiatohokkuuden lisäämiseksi puupelletit kannattaa vielä lämpökäsitellä höyryräjäyttämällä tai paahattamalla eli torrefioimalla. Lämpökäsittelystä pelletistä käytetään nimitystä musta pelletti. Kun mustaa pellettiä poltetaan yhdessä kivihiilen kanssa, jäävät myös voimalaitosinvestoinnit pieniksi, koska musta pelletti on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaista kuin kivihiili.

Koska päästöoikeuksien kokonaismäärääkin vähennetään vuosittain ainakin vuoteen 2020 asti, kannustaa se edelleen siirtymään puuperäisiin ja muihin uusiutuviin polttoaineisiin. Tämä siirtäminen huolimatta, että päästöoikeuden hinta on tällä hetkellä poikkeuksellisen matala.

1.1 Työn tarkoitus

Työn tarkoituksena on selvittää suomalaisen mustan pelletin vientimahdollisuus Euroopan voimalaitoksiin energiankulutuksen, ilmastovaikutusten ja kustannusten kannalta. Vertailukohteena suomalaiselle mustalle pelletille käytetään venäläistä kivihiiltä. Varsinainen tutkimuskohde on mustan pelletin eli biohiilen energia- ja kustannustehokkuus sekä ympäristöystävällisyys.

Aiheeksi valittiin musta pelletti, koska siitä on saatavilla toistaiseksi melko vähän tietoa, ja pellettien käyttö maailmalla rajoittuu lähes kokonaan tavalliseen, ei torrefioituun pellettiin. Mustan pelletin hyödyt ovat yleisesti tiedossa, mutta sen tuotantoon kuuluva energiantarve ja euromäärä eivät. Lisäksi haluttiin vertailla mustan pelletin ja kivihiilen ilmastovaikutuksia.

1.2 Työn toteutus

Työn teoreettinen viitekehys muodostuu laskelmien lähtöarvoista. Laskelmina työssä käytetään polttoaineketjun energiankulutus-, ilmastovaikutus- sekä kus-

tannuslaskelmia. Teoreettisen viitekehyksen lähdeaineisto koostuu alan kirjallisuudesta, aiemmista tutkimuksista, haastatteluista sekä internetistä saadusta tiedosta.

Työn empiirinen osa toteutettiin esimerkkilaskelmalla sekä varsinaisilla energiankulutus-, ilmastovaikutus- ja kustannuslaskelmilla. Lisäksi mahdollisia kustannusmuutosten vaikutuksia polttoaineiden loppuhintaan tutkittiin herkkyysoanalyysin avulla.

1.3 Aiheen rajaus

Työssä keskitytään mustan pelletin vientiin Suomesta ja kivihiilen vientiin Venäjältä sekä niiden polttoon voimalaitoksella Rotterdamissa, Alankomaissa. Musta pelletti tulee 200 km:n päästä Kotkan satamasta ja kivihiili 5 000 km:n päästä Pietarin satamasta, jossa ne lastataan laivaan. Rotterdamin satamassa olevat Maasvlakten voimalaitokset pystyvät polttamaan sekä kivihiiltä että biomassaa (du Mez & van Klaveren-Pleumeekers 2013, 24). Uusia voimalaitosinvestointeja ei näin ollen tarvitse tehdä.

Pelletin osalta tarkastellaan ainoastaan torrefioitua mustaa pellettiä. Mustan pelletin raaka-aineena työssä käytetään kosteaa sahanpurua. Laskelmat lähtevät pelletin osalta kuljetuksella sahalta pellettitehtaalle ja kivihiilen osalta lastauksella kuljetusyksikköön louhimolla. Energiankulutus- ja kustannuslaskelmat päättyvät molempien polttoaineiden osalta kuljetukseen voimalaitokselle. Kustannuslaskelma tehdään vain raaka-aineen ja polttoaineen osalta. Ilmastovaikutuslaskelmassa otetaan voimalaitokselle kuljetuksen lisäksi huomioon polton aiheuttamat päästöt.

Työssä otetaan huomioon päästökauppa sekä päästökertoimet, mutta ei puututa bioenergialle mahdollisesti maksettaviin tukiin.

1.4 Toimeksiantaja

Cursor Oy on Kotkan-Haminan seudulla toimiva kehittämissyhtiö, jonka tarkoituksena on vahvistaa seudun osaamista, kilpailukykyä ja vetovoimaisuutta kehittämällä yritystoimintaa. Se vastaa seudun kuntien yritysneuvonnasta sekä aloittavien, seudulla toimivien ja seudulle tulevien yritysten palveluista. Lisäksi Cursor Oy vastaa seudun kehittämishankkeista ja elinkeinopainotteisesta markkinoinnista. Cursor Oy:n omistavat seudun kunnat Kotka, Hamina, Pyhtää, Virolahti ja Miehikkälä yhdessä teollisuusyritysten ja rahoituslaitosten kanssa. (Cursor.)

Vuonna 2014 Cursorin henkilöstön määrä oli 66 ja asiakkaiden määrä 1 787. Seudulle syntyi 958 työpaikkaa ja Cursorin toteuttamia ja kehittämisrahastosta rahoitettuja hankkeita oli 73 kpl. (Cursor lukuina.)

2 YLEISTÄ POLTTOAINEISTA

Torrefioitu puupelletti on polttoaineena käyttökelpoinen korvaaja kivihillelle. Se on hiilineutraali energianlähde ja on oikeutettu uusiutuvan energian tukiin monissa maissa. Torrefioidut materiaalit jauhaantuvat ja palavat samantapaisesti kuin hiili. Niitä voidaan helposti käyttää jo olemassa olevissa hiililaitoksissa pienellä pääomasijoituksella. Torrefioidussa puupelletissä on huomattavasti pienempi rikkipitoisuus kuin kivihilessä sekä pienempi tuhkapitoisuus, joten se tuottaa poltettaessa vähemmän tuhkan sivutuotteita. (Torrefied wood pellets 2014.)

Useat uusiutuvat energianlähteet, kuten tuulivoima ja aurinkovoima, soveltuvat huonosti peruskuormalle, koska ne eivät voi tuottaa energiaa tasaisesti ja ennustettavasti. Tästä johtuen torrefioidut puupelletit ovat yksi harvoista uusiutuvista energianlähteistä, jotka voivat korvata kivihillen peruskuormalaitoksilla. (Torrefied wood pellets 2014.) Lisäksi näiden polttoaineiden energiatiheddet ovat samaa luokkaa: biohiilen (torrefioidun pelletin) energiatiheys on 4,8 MWh/i-m³ ja kivihillen 5,6 MWh/i-m³. Torrefioidun pelletin irtotiheys on 750–850 kg/i-m³ (keskiarvo 800 kg/i-m³) ja tehollinen lämpöarvo 6 MWh/t. Vastavat arvot kivihillelle ovat 800–900 kg/i-m³ (keskiarvo 850 kg/i-m³) ja 7 MWh/t.

(Sonninen 2014.) Tässä työssä kivihiilen tehollisena lämpöarvona käytetään 6,6 MWh/t, joka on laskettu suoraan kivihiilen energia- ja irtotiheydestä.

Jos 10 % nykyisissä eurooppalaisissa voimalaitoksissa käytetystä kivihiilestä korvataan torrefioidulla pelletillä, on pelletin arvioitu tarve 60–70 Mt/a. Tämän seurauksena tarvitaan myös 600–700 uutta torrefioidun tai tavallisen pelletin tuotantolaitosta, jonka kapasiteetti on 100 000 t/a. Pellettimarkkinoiden koko vuonna 2010 oli 10,8 Mt ja vuonna 2020 sen ennustetaan olevan 40–50 Mt. (Wilén, Sipilä, Tuomi, Hiltunen, Lindfors, Sipilä, Saarenpää & Raiko 2014, 8.)

2.1 Pelletti

Puupelletti on polttoainetta, joka on valmistettu puumurskeesta puristamalla. Sen raaka-aineena käytetään yleensä metsäteollisuuden sivutuotteita, kuten purua, hiontapölyä ja kutterinlastuja. Pelletti voidaan myös puristaa tuoreesta biomassasta, kuoresta ja metsähakkeesta, jolloin raaka-aine pitää kuivata murskauksen lisäksi ennen pelletointia. (Alakangas & Paju 2002, 7–8.) Kuivaus nostaa pelletin tuotantokustannuksia (Virkkunen, Flyktman & Raitila 2012, 6).

Suomessa valmistettujen pellettien halkaisija on yleensä 8 mm ja pituus 10–30 mm. Pellettiä käytetään sekä pientalojen lämmitykseen, että voimalaitoksissa. (Alakangas & Paju 2002, 7–8.) Suomessa on tuotettu puupellettiä 1990-luvun lopulta lähtien. Vuonna 2014 toiminnassa oli 27 pellettitehdasta. (Pelletin tuotanto.)

2.1.1 Musta pelletti

Kun mustaa pellettiä (kuva 1) valmistetaan, puumassa lämpökäsitellään ennen pelletointia. Lämpökäsittelylle on kaksi erilaista tapaa: höyryräjäytys, ja paahdaminen eli torrefiointi. Höyrypelletit ja paahdopelletit poikkeavat jonkin verran toisistaan mutta kumpikin lämpökäsittely lisää pelletin energiatiheyttä ja parantaa sen kosteudensietokykyä. Tästä johtuen musta pelletti on helpommin va-

rastoiva kuin valkoinen (tavallinen) pelletti. (Kantola 2014.) Muita mustan pelletin etuja ovat sen tasalaatuisuus ja helppo jauhaminen sekä sen käyttökelpoisuus kastuneenakin (Biomassan uusi jalostettu muoto: biohiili 2014).



Kuva 1. Musta pelletti (Kantola 2014).

2.1.2 Torrefiointiprosessi

Torrefiointiprosessissa puuainetta lämmitetään hapettomissa olosuhteissa 250–300 °C:n lämpötilassa noin puolen tunnin ajan. Tämän johdosta puuainesta haihtuu vesi ja osa haihtuvista aineista. (Virkkunen ym. 2012, 8.) Prosessin aikana biomassa muuttuu kuituisesta materiaalista tuotteeksi, jolla on erinomaiset polttoaineominaisuudet (What is torrefaction).

Torrefioidulla biomassalla on useita etuja käsittelemättömään biomassaan verrattuna. Torrefioidulla biomassalla on korkeampi kalorinen lämpöarvo ja se on homogeenisempi tuote. Sillä on suurempi tilavuuspaino sekä erinomainen jauhattavuus ja kestävyys. Lisäksi torrefioitu biomassa kestää paremmin vettä eikä siihen kerääny biologista kasvustoa. (What is torrefaction.)

2.2 Kivihiili

Kivihiili (kuva 2) on syntynyt maakerrosten väliin puristukseen jääneistä kasveista satojen miljoonien vuosien aikana. Sitä käytetään sähköntuotannon polttoaineena eniten maailmassa. Hieman alle kolmasosa sähköntuotannosta katetaan hiilellä. Hiili on myös maailman toiseksi tärkein energianlähde, ja viidesosa maailman energiantarpeesta tuotetaan hiilellä. Suomessa kivihiiltä käytetään lähinnä isoissa lauhde- ja kaukolämpövoimalaitoksissa. Teollisuuden sähkön ja lämmön tuotannossa sen käyttö on vähäistä. (Kivihiili.)

Kivihiiltä poltettaessa syntyy huomattavia määriä rikkidioksidi-, typen oksidi- ja hiukkaspäästöjä. Lisäksi ilmakehään vapautuu hiilidioksidia. Tästä johtuen kivihiilen käyttökustannukset ovat kohonneet päästökaupan myötä, mikä voi johtaa kivihiilen käytön vähenemiseen tulevien vuosien aikana. Tällä hetkellä sen etuja ovat kuitenkin kohtuullinen hinta, hyvä saatavuus monesta maasta sekä helppo varastoitavuus. Se ei myöskään ole kriisiherkkä polttoaine. (Kivihiili.) Hiilen suurimmat tunnetut esiintymät ovat Kiinassa, Venäjällä sekä Yhdysvalloissa. Vuonna 2007 Venäjä oli maailman kolmanneksi suurin hiilen viejä. (Hiilivarannot.)



Kuva 2. Kivihiili (Jaccard 2013).

3 MENETELMÄT

Energiankulutuslaskelma

Energiankulutuksessa selvitetään mustan pelletin ja kivihiilen tuotannossa ja kuljetuksessa kulunutta energiamäärää tuotettua energiayksikköä kohden. Energiankulutuksessa otetaan huomioon myös mustan pelletin käyttämä lämpöenergia, vaikka osa raaka-aineesta käytetään sen tuottamiseen eikä se siten ole ulkopuolista energiaa.

Ilmastovaikutuslaskelma

Ilmastovaikutuslaskelmassa selvitetään, mitkä ovat mustan pelletin ja kivihiilen tuotannossa, logistisessa ketjussa ja poltossa syntyvät ilmastovaikutukset. Ilmastovaikutukset ilmoitetaan yleensä energiayksikköä kohden, tässä tapauksessa verrattuna valmiin polttoaineen energiaan.

Kustannuslaskelma

Kustannuslaskelmassa selvitetään mustan pelletin ja kivihiilen tuotannossa ja logistisessa ketjussa syntyviä euromääräisiä kuluja tuotettua energiayksikköä kohden. Kustannusten osalta otetaan huomioon vain raaka-ainekustannukset sekä tuotannossa ja kuljetuksessa syntyvät polttoainekustannukset. Lisäksi otetaan huomioon päästöoikeuden hinta. Henkilöstö-, käyttö- ja kunnossapitokustannuksia ei oteta huomioon. Myöskään laitoksen investointikustannuksia ei huomioida.

Herkkyyshanalyysi

Herkkyyshanalyysissä tarkastellaan miten kustannusten mahdolliset vaihtelut vaikuttavat mustan pelletin ja kivihiilen loppuhintaan. Vain yhtä kustannusarvoa muutetaan kerralla, jolloin saadaan selville juuri kyseisen tekijän vaikutus loppuhintaan.

4 LÄHTÖTIEDOT LASKENTAMALLEIHIN

4.1 Mustan pelletin kuljetus

Mustan pelletin osalta kuljetukset sahalta pellettitehtaalle ja tehtaalta satamaan hoidetaan täysperävaunuyhdistelmällä. Matkan pituudeksi oletetaan 100 km/suunta sekä sahalta tehtaalle että tehtaalta satamaan. Lisäksi oletetaan, että täysperävaunuyhdistelmä ei saa kuormaa paluumatkalle vaan ajaa aina tyhjänä takaisin. Kosteaa sahanpuru tehtaalle ja musta pelletti satamaan puretaan yhdistelmästä ketjupurulla, jolloin yhdistelmä käy tyhjäkäynnillä. Kotkan satamassa pelletti lastataan irtolastialukseen ja kuljetetaan Rotterdamiin. Alukseen oletetaan mahtuvan 10 000 t tavaraa. Aluksen lastaus ja purku hoidetaan Mantsinen satamanosturilla. Aluksen oletetaan saavan lastia paluumatkalle.

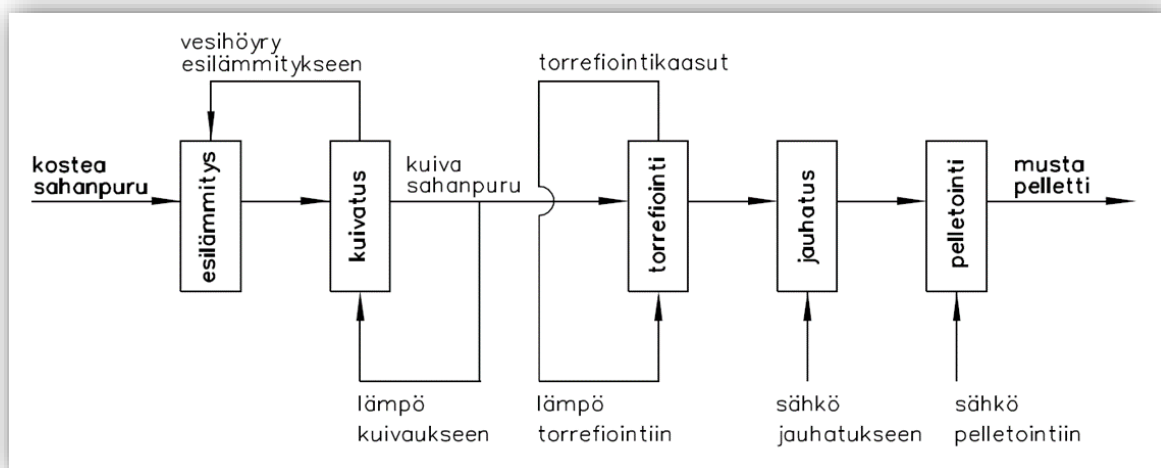
4.2 Mustan pelletin raaka-aineet ja tuotanto

Raaka-aineena pelletin tuotannossa voidaan käyttää muun muassa havupuiden kuivaa kutteria, sahanpurua tai hiontapölyä. Nämä ovat mekaanisen puunjalostusteollisuuden puhtaita puusivutuotteita. Lisäksi pelletin tuotantoa on kokeiltu oljesta, ruokohelpistä, puun kuoresta sekä näiden sekoituksista. (Raaka-aineet.)

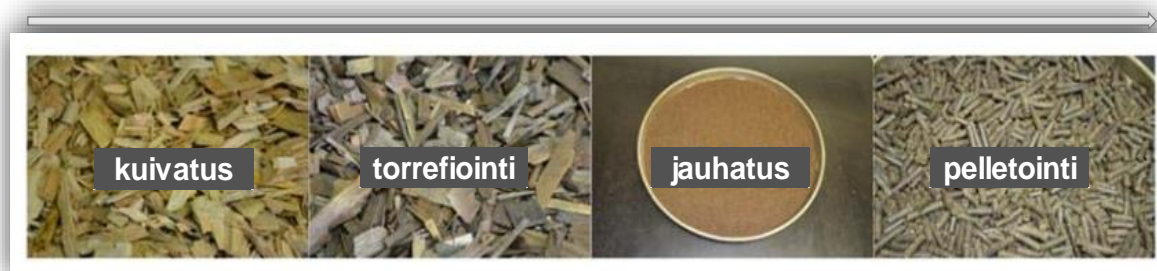
Jos tuotannossa käytetään kosteaa sahanpurua, joka tässä työssä on valittu raaka-aineeksi, se pitää kuivattaa ennen pelletointia. Yhden pellettitonnin (valkoinen pelletti) valmistus vaatii noin 7 i-m³ kosteaa sahanpurua. (Ihalainen & Sikanen 2010, 12.) Kosteaa sahanpurua, jonka kosteusprosentti on 45–60, irtotiheys on 250–350kg/i-m³ (keskiarvo 300 kg/i-m³) ja energiatiheys 0,45–0,7 MWh/i-m³ (keskiarvo 0,575 MWh/i-m³) (Alakangas 2000, 152).

Kosteaa sahanpurua hinta on 17,70 €/MWh (Ihalainen & Sikanen 2010, 7). Lämmöntuotannossa käytetyn metsähakkeen ja metsämurskeen hinnankehitys on viime vuosina pysynyt samalla tasolla, hieman yli 20 €/MWh. Vuosina 2009–2012 hinta oli hieman alle 20 €/MWh. (Energian hinnat 2015.)

Mustan pelletin tuotantoprosessi on esitelty kuvissa 3 ja 4. Mustan pelletin tuotantoprosessi voidaan aloittaa esilämmittämällä kostea sahanpuru, jonka jälkeen kostea sahanpuru kuivatetaan. Osa kuivatusta sahanpurusta menee tämän jälkeen takaisin kuivaukseen, jossa se käytetään hyödyksi. Suurin osa kuivatusta sahanpurusta menee torrefiointiin. Torrefiointi hoidetaan torrefiointi-prosessissa vapautuvilla kaasuilla. Torrefioinnin jälkeen kuiva, torrefioitu sahanpuru jauhetaan ja lopuksi pelletoidaan. Jauhamisessa ja pelletoinnissa käytetään sähköä.



Kuva 3. Mustan pelletin tuotantoprosessi



Kuva 4. Mustan pelletin tuotantoprosessi kuvina (Ghiasi, Sokhansanj, Kumar & Lim 2013).

4.2.1 Kuivatus

Lämpöenergian tarve kuivatuksessa riippuu kuivurityypistä ja sen käyttämästä polttoaineesta sekä raaka-aineen kosteudesta (Ihalainen & Sikanen 2010, 12). Tässä työssä tarkastellaan raaka-ainetta, jonka kosteusprosentti on 55 % ja joka halutaan kuivata kosteusprosenttiin 0 % jo ennen torrefiointiä.

Jos haluttu loppukosteusprosentti on yli 23, on kaikki puussa oleva vesi vapaata vettä ja lämpöenergiantarve on veden kiehattamiseen tarvittava 0,68 kWh/kg. Vapaalla vedellä tarkoitetaan veden sijaintia itse puun soluonteloissa. Jos haluttu loppukosteusprosentti on alle 23, on lämpöenergiantarve huomattavasti suurempi, koska vesi on sidottuna eli vesi on imeytynyt puun syiden soluonteloiden seinämiin. Puusta poistettavan veden massa saadaan yhtälöllä 1. (Härkönen 2011.)

$$m_{vesi} = \frac{m_{puu} \left[X_1 - \frac{X_2(100 - X_1)}{100 - X_2} \right]}{100} \quad (1)$$

| | | |
|-------|------------|--------------------------------|
| jossa | m_{vesi} | veden massa [t] |
| | m_{puu} | kostean puun kokonaismassa [t] |
| | X_1 | alkukosteus [%] |
| | X_2 | tavoiteltava loppukosteus [%] |

Kun kuivataan 1 000 tonnia kostea sahanpurua, jonka alkukosteus on 55 % ja tavoiteltava loppukosteus 0 %, poistettavan veden kokonaismassa on 550 t. Puun kuivatus ensin alkukosteudesta 55 % loppukosteuteen 23 % edellyttää, että vettä poistetaan 415,6 t. Kuivatus 23 %:sta 0 %:iin edellyttää, että vettä poistetaan vielä 134,4 t.

Lämpöenergiantarve ensimmäisen vaiheen vedenpoistossa on 282,6 MWh, kun vettä pitää poistaa 415,6 t. Yhden vesitonnin poistoon kuluu energiaa 0,68 MWh (Härkönen 2011).

Kun kuivatusta jatketaan vaiheessa kaksi, saadaan lämpöenergiantarve yhtälöllä 2 (Härkönen 2011).

$$E_{lämpö} = 2,036 - 4,524 \cdot \frac{(U_1 + U_2)}{2} \quad (2)$$

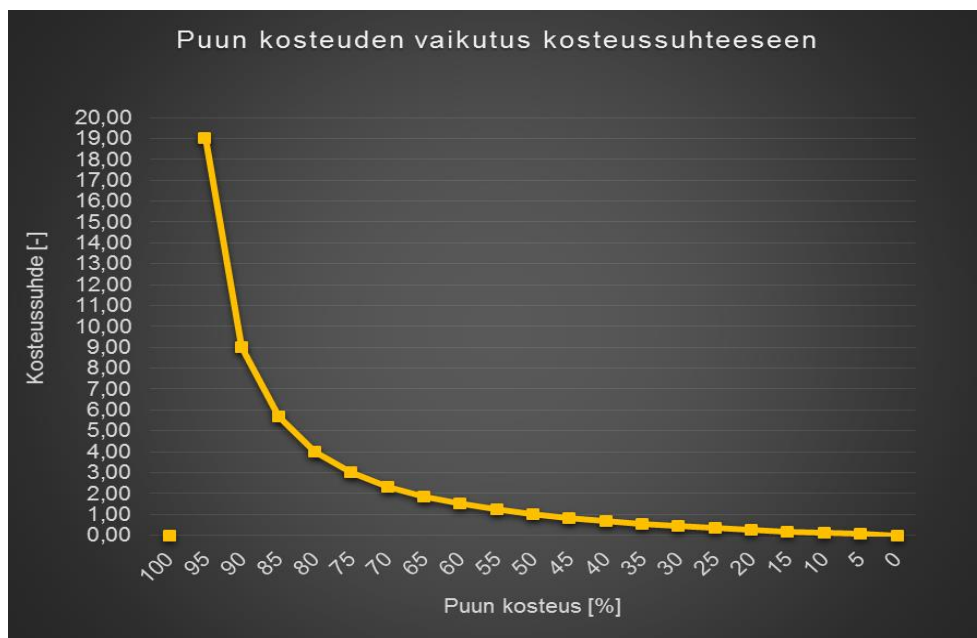
| | | |
|-------|--------------------|---|
| jossa | $E_{\text{lämpö}}$ | veden poistamisen tarvittava lämpöenergia [MWh/t] |
| | U_1 | kosteussuhde alkutilassa [-] |
| | U_2 | kosteussuhde lopputilassa [-] |

Kosteussuhde voidaan määrittää yhtälöstä 3.

$$U = \frac{\text{kosteus}_{\text{puu}}}{100 - \text{kosteus}_{\text{puu}}} \quad (3)$$

| | | |
|-------|-------------------------------|------------------|
| jossa | U | kosteussuhde [-] |
| | $\text{kosteus}_{\text{puu}}$ | puun kosteus [%] |

Kuvassa 5 on esitelty puun kosteusprosentin vaikutus kosteussuhteeseen. Puun kosteusprosentin ollessa 80, on kosteussuhde 4. Kosteudessa 50 %, kosteussuhde on tasan yksi ja kosteudessa 23 %, noin 0,3. Ilmeistä on, että kosteussuhde on 0, jos puun kosteus on 100 % tai 0 %.



Kuva 5. Puun kosteusprosentin vaikutus kosteussuhteeseen

Sidotun veden poistamiseen tarvittava lämpöenergiamäärä on 1,36 MWh/t. Kun vettä toisessa vaiheessa poistetaan 134,4 t, on lämpöenergiantarve 182,8 MWh.

Kostean sahanpurun (1 000 t), jonka kosteusprosentti on 55 ja joka halutaan kuivata kosteusprosenttiin 0, kokonaislämpöenergiantarve on 465,4 MWh. Kuivatukseen syötetystä kosteasta sahanpurusta on kuivatuksen jälkeen jäljellä 450 t kuivaa sahanpurua.

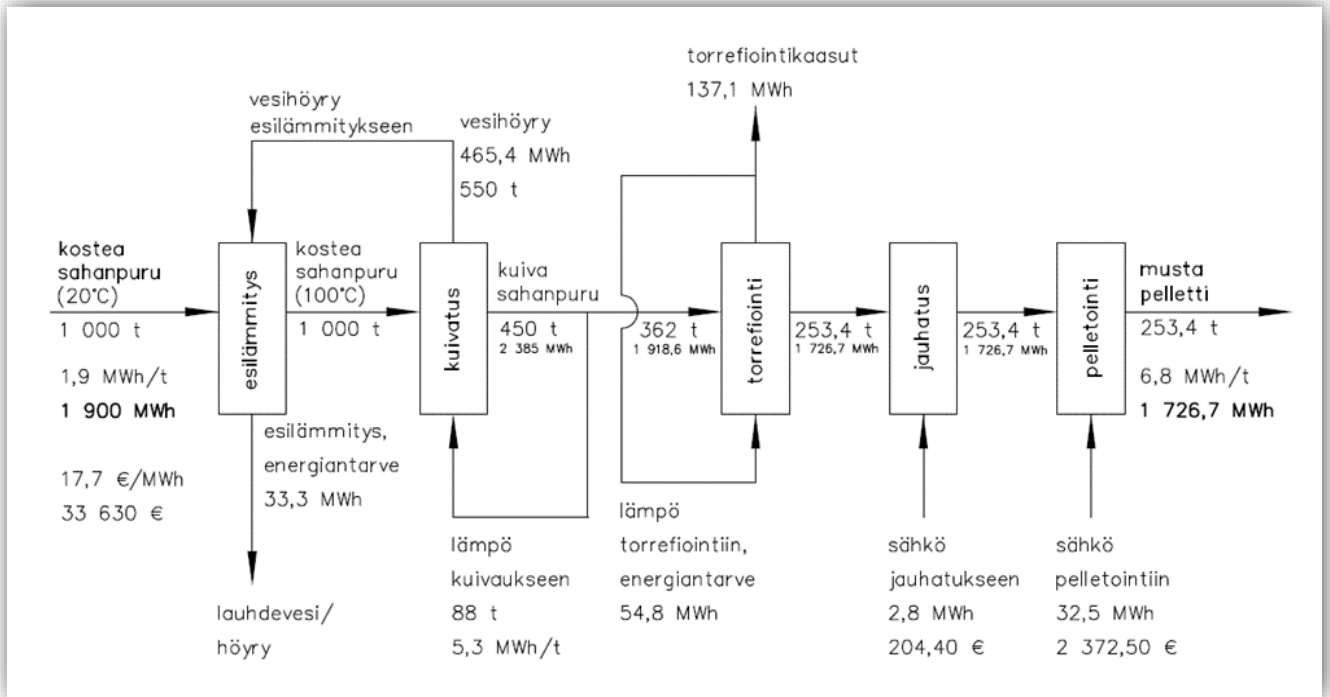
4.2.2 Torrefiointi, jauhatus ja pelletointi

Torrefiointi kannattaa tehdä ennen jauhatusta, koska se tutkimuksen mukaan säästää energiaa. Kuivan sahanpurun torrefiointin energiantarpeeksi on ilmoitettu 545,1 kJ/kg. Torrefioidun sahanpurun jauhatus kuluttaa kaikkein vähiten energiaa (39,1 kJ/kg). Lisäksi torrefioidun, jauhetun sahanpurun pelletoinnin energiantarve on 461,1 kJ/kg. (Ghiasi ym. 2013.)

4.2.3 Esimerkkilaskelma

Kuvassa 6 on esitelty esimerkki, jos prosessiin syötetään 1 000 tonnia kosteaa sahanpurua. Tuotantoprosessissa ei ole otettu huomioon prosessissa esiintyviä lämpöhäviöitä eikä myöskään ruuvi- tai hihnakuljettimien käyttämää sähköenergiaa.

Kostean sahanpurun tehollinen lämpöarvo on 1,9 MWh/t, joten prosessiin syötetään sisään 1 900 MWh energiaa. Kostean sahanpurun hinta on 17,70 €/MWh eli yhteensä 33 630,00 €. Prosessista tulee ulos 253,4 tonnia mustaa pellettiä, jonka energiamäärä on 1 726,7 MWh.



Kuva 6. Esimerkkilaskelma mustan pelletin tuotantoprosessista

Kostea sahanpuru (20 °C) menee ensin esilämmitykseen. Kuivatuksesta vapautuva vesihöyry kierrätetään takaisin esilämmitykseen, jossa se lämmittää kostean sahanpurun lämpötilaan 100 °C. Kun puun ominaislämpökapasiteetti on 1,5 kJ/kg°C ja esilämmityksessä puu lämmitetään 20 °C:sta 100 °C:een, kuluu energiaa yhteensä 120 000 000,0 kJ eli 33,3 MWh.

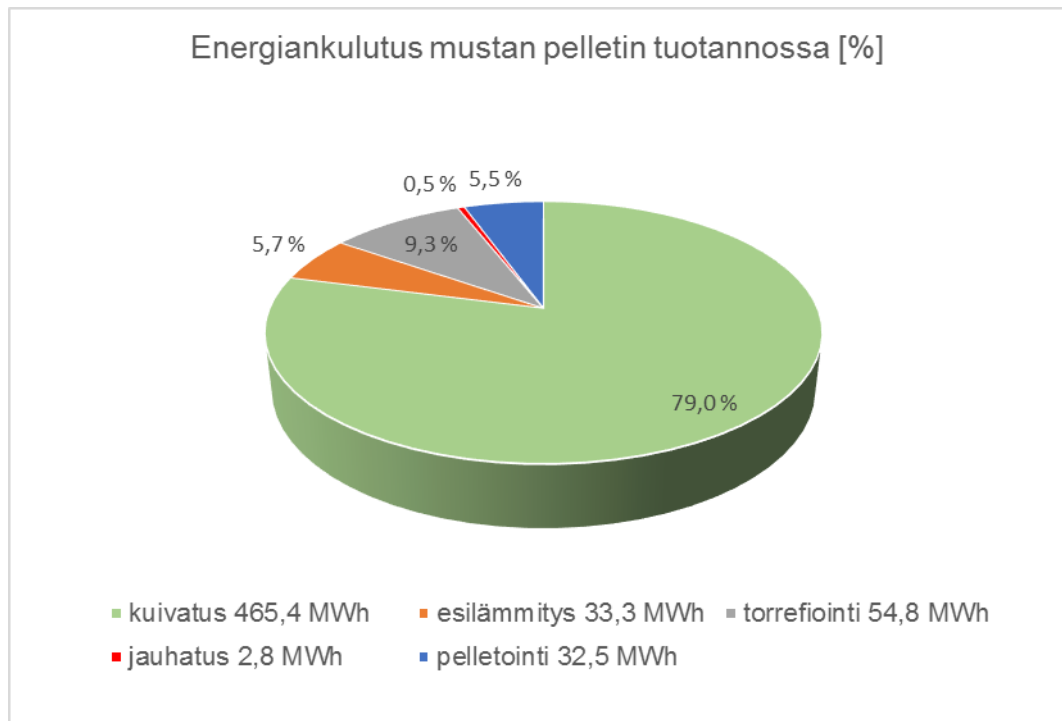
Kuivatukseen menee energiaa 465,4 MWh ja kun kaikki vesi poistuu, puun massasta häviää tässä vaiheessa 550 tonnia. Kuivatuksen jälkeen ulos tulee 450 t kuivaa sahanpurua, josta osa kierrätetään takaisin kuivatukseen. Kuivan sahanpurun lämpöarvo on 18,9–19,2 MJ/kg eli noin 5,3 MWh/t (Alakangas 2000, 69). Kuivatuksen tarvitsema lämpöenergianmäärä 465,4 MWh saadaan siten katettua 88 tonnilla kuivaa sahanpurua. Prosessiin ei siis tuoda ulkopuolista lämpöenergiaa, vaan osa raaka-aineesta käytetään prosessilämmön tuottamiseen. Jos kuivatus hoidettaisiin sähköllä, maksaisi se noin 34 000 €, sähkön hinnan olleessa 73 €/MWh. Käytettäessä sahanpurua kuivatukseen maksaa se hieman alle 6 600 €, koska kuivatus vaatii 195,6 t kosteaa sahanpurua.

362 tonnia kuivaa sahanpurua jatkaa eteenpäin torrefiointiin. Torrefiointiprosessissa 30 % massasta häviää kaasujen mukana, mutta vain 10 % energiasta. Massa muuttuu torrefioinnin aikana 362 tonnista 253,4 tonniin, ja energiamäärä 1 918,6 MWh:sta 1 726,7 MWh:iin. Mustan pelletin lämpöarvoksi saadaan siten noin 6,8 MWh/t. Prosessissa vapautuvien torrefiointikaasujen avulla pystytään kattamaan torrefioinnin vaatima energiantarve. Torrefiointikaasujen energiasisältö on 191,9 MWh ja torrefiointi vaatii 54,8 MWh energiaa.

253,4 tonnin sahanpuruerän jauhatus vie energiaa 2,8 MWh (10,9 kWh/t) ja pelletointi 32,5 MWh (128,1 kWh/t). Sähkön hinnan ollessa 73,00 €/MWh, maksaa jauhatus 204,40 € ja pelletointi 2 372,50 €. Ulos prosessista tulee 253,4 tonnia mustaa pellettiä energiamäärältään 1 726,7 MWh. Mustan pelletin raaka-aineen ja sähköenergian (jauhatus ja pelletointi) osuus hinnasta on 21,00 €/MWh.

Esimerkkilaskelmassa saatu mustan pelletin tehollinen lämpöarvo on 6,8 MWh/t, mikä poikkeaa hieman Sonnisen (2014) antamasta arvosta 6,0 MWh/t. Tämä voi johtua muun muassa erilaisista lähtöarvoista. Esimerkiksi tavallisen pelletin tuotannossa energiankulutus riippuu tehtaan kokonaiskapasiteetista, käytetystä raaka-aineesta ja sen kosteudesta sekä erilaisista laitosratkaisuista (Ihalainen & Sikanen 2010, 12). Jäljempänä työssä käytetään kuitenkin arvoa 6,0 MWh/t. Lisäksi lähdeaineistossa oli annettu valkoisen pellettitonin valmistuksen kostean sahanpurun tarpeeksi 7 i-m³ (Ihalainen & Sikanen 2010, 12). Vastaavasti mustan pellettitonin valmistukseen tarvittu kostean sahanpurun määrä on laskelman mukaan 13,2 i-m³.

Esimerkkilaskelman energiankulutuksen jakauma mustan pelletin tuotantoprosessi on esitelty kuvassa 7. Kuivatus, joka on suurin energiankuluttaja, vastaa lähes 80 % kokonaisenergiatarpeesta. Jauhatus kuluttaa vähiten energiaa, ollessa vain puoli prosenttia kokonaisenergiatarpeesta.



Kuva 7. Esimerkkilaskelman energiankulutus

4.3 Kivihiilen hinta ja kuljetus

Vuonna 2014 kivihiilen hinta oli 60,00 \$/t eli 9,09 €/MWh (Herrala 2014). Kivihiilen hinta euroissa on 53,25 €/t tai 8,07 €/MWh, kun euro on 1,1268 dollaria (Valuuttakurssit 2015). Lisäksi kivihiilen loppuhintaan vaikuttaa päästöoikeus, jonka hinta vuonna 2014 oli 5 €/tCO₂ (Keeton 2014).

Kivihiilen osalta kuljetukset satamaan hoidetaan sähköjunalla. Matkan pituuden oletetaan olevan 5 000 km/suunta ja junan oletetaan saavan kuorman myös paluumatkalle. Kivihiili lastataan louhimolla ja puretaan satamaan pyöräkuormaajalla. Satamassa (Pietari) se lastataan irtolastialukseen ja kuljetetaan Rotterdamiin. Myös kivihiilen osalta kuljetettavan tavaran maksimipainoksi oletetaan 10 000 t. Aluksen lastaus ja purku hoidetaan Mantsinen satamanosturilla. Lisäksi oletetaan, että alus saa lastia paluumatkalle.

4.4 Liikennepolttoaineet

Dieselöljyn tehollinen lämpöarvo on 41,50 GJ/t tai 11,528 MWh/t (1 MWh = 3,6 GJ). Dieselöljyn tiheys on 0,845 t/m³. (Energia-arvot ja muuntokertoimet

2015.) Dieselöljyn hinta Suomessa maaliskuussa 2015 oli 1,351 €/l (Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta). Dieselin hinta Venäjällä huhtikuussa 2015 oli 0,61 €/l (Venäjä - dieselin hinnat). Hinta Alankomaissa huhtikuussa 2015 oli 1,34 €/l (Alankomaat – dieselin hinnat). 1 litra dieselöljyä raskaassa ajoneuvokalustossa tuottaa hiilidioksidipäästöjä 2 660 g:n verran (Raskaan ajoneuvokaluston energiakäyttö 2013).

Kevyen polttoöljyn tehollinen lämpöarvo on 42,50 GJ/t tai 11,806 MWh/t. Sen tiheys on myös 0,845 t/m³. (Energia-arvot ja muuntokertoimet 2015.) Kevyt polttoöljy, jonka rikkipitoisuus on alle 0,1 %, maksaa 470–500 €/t (keskiarvo 485 €/t) (Kalli, Karvonen & Makkonen 2009, 12).

4.5 Sähkön hinta

Sähkön hinta teollisuudessa on Suomessa 0,073 €/kWh (Eurostat 2014). Venäjällä sähkön hinta on 0,071 \$/kWh (Russian electricity market 2014). Euron ollessa 1,1268 dollaria, on sähkön hinta Venäjällä 0,063 €/kWh (Valuuttakurssit 2015).

4.6 Ilmastovaikutukset

Ilmaston lämpenemiseen merkittävästi vaikuttavat kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) sekä typpioksiduuli (N₂O). Kasvihuonekaasujen pitoisuuksia ilmakehässä säätelee sekä ihmisen toiminnasta johtuvat suorat päästöt että ilmakehän ja ekosysteemien väliset vuorovaikutukset. Kaasujen pitoisuudet ovat selvästi kasvaneet esiteollisesta ajasta. (Kasvihuonekaasut 2014.)

Hiilidioksidiekvivalentti (CO₂ekv) on suure, jota käytetään kasvihuonepäästöjen yhteismittana. Sen avulla voidaan laskea yhteen miten eri kasvihuonekaasupäästöt vaikuttavat kasvihuoneilmiön voimistumiseen. (Tieteen termipankki 2014.) Kasvihuonekaasupäästöt ovat luvun 6.2 laskelmissa käytännössä kuitenkin pelkästään hiilidioksidia.

4.6.1 Hiilidioksidipäästöt

Puut ja kasvit sitovat hiiltä ilmakehästä fotosynteesin avulla, muodostaen näin uutta biomassaa. Hiili varastoituu biomassaan. Kun biomassaa poltetaan, hiili palautuu ilmakehään hiilidioksidin (CO₂) muodossa. Biomassan poltossa ilmakehän hiilidioksidimäärä ei lisäännä. Tosin jos biomassan keruussa tai käsitelyssä käytetään fossiilisia polttoaineita, pitää ylimääräistä biomassaa kasvat-
taa, jotta saadaan korvattua fossiilisten polttoaineiden vapauttama hiili, ja näin ollen ylläpidettyä hiilitasapaino. (Spellman 2012, 329.)

Polttoainekohtainen CO₂-päästökerroin on kivihielelle 0,341 tCO₂/MWh ja puu-
peräisille polttoaineille, tässä tapauksessa mustalle pelletille, 0 tCO₂/MWh. Päästökertoimessa ei oteta huomioon polttoaineen tuotannon, raaka-aineen hankinnan eikä kuljetuksen välillisiä hiilidioksidipäästöjä vaan ainoastaan pol-
ton aiheuttamat päästöt. (Hippinen & Suomi 2012, 6–7.) Tässä työssä tarkas-
tellaan kuitenkin lisäksi myös näitä välillisiä päästöjä, ja tuloksena saadaan koko toimitusketjun päästökerroin.

4.6.2 Päästökauppa

Päästökauppa tarkoittaa kaupankäyntiä päästöoikeuksilla. EU:n päästökaup-
pajärjestelmässä kasvihuonekaasupäästöille on asetettu kiintiö. Yritykset jotka
kuuluvat päästökauppajärjestelmään palauttavat viranomaisille vuosittain omia
todellisia päästöjään vastaavan määrän päästöoikeuksia. Vähentämällä omia
päästöjä tai ostamalla päästöoikeuksia saadaan päästöt vastaamaan käytettä-
vissä olevia päästöoikeuksia. (Päästökauppa.)

Päästöoikeuksia on rajallinen määrä ja niitä vähennetään vuosittain. Päästö-
kauppakaudella 2013–2020 päästöoikeuksien määrää vähennetään vuosittain
37,4 miljoonalla kappaleella. Yksi päästöoikeus vastaa yhtä tonnia hiilidioksi-
dia. Vuoden 2013 päästöoikeuksien kokonaismäärä oli 2039 miljoonaa oi-
keutta. (Päästökauppakausi 2013–2020.) Päästöoikeus yhdelle hiilidioksiditon-
nille maksoi vuonna 2014 noin 5 euroa. Hiilidioksidin hinta oli noin 10 €/t vielä
vuonna 2012 ja 30 €/t vuonna 2008 (Keeton 2014.)

4.6.3 Päästökertoimet

Suomen keskimääräistä sähkönhankintaa kuvaava päästökerroin on 207 gCO₂ekv/kWh ja sähköjunakuljetusten keskimääräinen päästökerroin 9,2 gCO₂ekv/tkm (Energialähteet 2014). Päästökerroin pyöräkuormaajalle on 2 685 gCO₂ekv/l ja nostureille ja pyöräalustaisille kaivukoneille 2 686 gCO₂ekv/l (Työkoneiden päästöt 2013). Keskisuuren irtolastialuksen (bulk) päästökerroin on 16 gCO₂ekv/tkm tai 132 431 gCO₂ekv/laiva km (Irtolastialusten yksikköpäästöt 2009).

Grammaa laivakilometriä kohden (g/laiva km) tarkoittaa päästöjen määrää, kun laiva kulkee yhden kilometrin matkan (Irtolastialusten yksikköpäästöt 2009). Tonnikilometri (tkm) tarkoittaa yhden tonnin (nettolasti) kuljetusta yhden kilometrin matkan. Nettolastilla tarkoitetaan hyötykuorman määrää. Esimerkiksi konttien osalta se tarkoittaa niiden sisällä olevan kuorman määrää sekä pakkausmateriaaleja ja kuormalavoja. Tonnikilometripäästö (g/tkm) tarkoittaa päästömäärää joka aiheutuu kun yksi tonni kuljetetaan yhden kilometrin matkan (Laivaliikenteen yksikköpäästöjen määrittämisperusteet 2009.)

5 KULJETUSVÄLINEET JA VOIMALAITOS

5.1 Täysperävaunuyhdistelmä

Suomessa kotimaan tavaraliikenteestä maanteitse kulkee kaksi kolmasosaa ja rautateitse neljäsosa. Maantiekuljetukset pitävät sisällään muun muassa teollisuuden raaka-aineita kuten nesteitä, maa-ainesta ja puuta. Lisäksi kuljetetaan näiden jatkojalosteita. (Maantiekuljetukset – käyttötilanteet.) Yleensä kaikissa rautatie-, meri- ja lentokuljetuksissa on mukana myös maantiekuljetusosuus (Yhdistetyt kuljetukset ja intermodaalikuljetukset).

9-akselisen Volvo FH16 täysperävaunuyhdistelmän omamassa on 22 200 kg ja kuorman massa 58 800 kg. Kuorman kokonaistilavuus on noin 150 m³, josta noin 54 m³ on vetoautossa ja noin 95 m³ perävaunussa. (Pakkanen 2015.)

Tyhjän yhdistelmän kulutus maantieajossa on 35 l/100 km ja täydessä kuormassa olevan yhdistelmän kulutus 70 l/100 km (Pakkanen 2015). Ajettaessa täytenä tehtaalle ja tyhjänä takaisin tai vastaavasti täytenä satamaan ja tyhjänä takaisin, keskipulutus on 52,5 l/100 km.

Täysperävaunuyhdistelmän kuorma voidaan purkaa ketjupurkuna. Maksimikuorman purku kestää noin 1 h, ja auto käy silloin tyhjäkäynnillä. Tyhjäkäynnillä ollessaan yhdistelmä kuluttaa noin 5 l/h (Pakkanen 2015).

5.2 Juna

Koska Venäjä on pinta-alaltaan maailman suurin maa ja välimatkat raaka-ainetoimittajien ja loppuasiakkaiden välillä ovat suuria, on rautatieverkosto maan tärkein kuljetusmuoto. Operatiivista pituutta Venäjän rautateillä on 85 000 km. Rautateillä kuljetetaan muun muassa hiiltä, öljyä ja öljytuotteita sekä metalleja. (Rail industry and market 2015.)

Sähköveturin, jonka maksimiteho on 6 100 kW ja omamassa 83 t, pystyy vetämään 2 000 tonnien tavarajunaa. 2 000 tonnia painavan junan nettoenergiankulutus on 49 kWh/km, kun juna kulkee keskinopeudella 90 km/h. (Ilikkanen 2013, 26, liite 2.)

Neliakselisen avovaunun taarapaino on noin 23 tonnia ja vaunun kokonaispaino on enintään 90 tonnia (Ilikkanen 2013, 27). Tavarain paino on näin ollen 67 t/vaunu. 2 000 tonnin tavarajuna kuljettaa yhteensä 21 avovaunua ja 1 407 tonnia tavaraa.

5.3 Pyöräkuormaaja

Pyöräkuormaajat ovat monikäyttöisiä työkoneita. Niitä käytetään muun muassa lastauksessa, purussa, kuljetuksessa, puhdistamisessa ja auraamisessa. (Pyöräkuormaajat.)

Volvo L90E pyöräkuormaajalla, jonka työpaino on 17 tonnia, voidaan käsitellä muun muassa haketta. 8 m³:n kauhalla sen käsittelyteho on noin 250 tonnia

tunnissa, kun siirtomatka ei ole pitkä. Pöyräkuormaaja kuluttaa polttoainetta (diesel) 16,4 litraa tunnissa. (Paavola 2015.)

5.4 Satamanosturi

Mantsinen on kansainvälinen yritys, joka on keskittynyt materiaalinkäsittelykoneiden ja lisälaitteiden valmistukseen ja logistiikkapalveluihin. Se tarjoaa logistiikkapalveluita Suomessa ja Venäjällä. Mantsisen materiaalinkäsittelykoneilla lastataan ja puretaan muun muassa hiiltä ja muuta irtotavaraa. (Mantsinen Group.)

Tela-alustainen Mantsinen 120 R Hybrilift satamanosturi käsittelee muun muassa sahatavaraa, sellupaaleja, puupylväitä, pellettiä ja teräs- ja paperituotteita. Se kuluttaa polttoaineena dieseliä 16 litraa tunnissa. (Ylivoimaista polttoainetehokkuutta.) Vastaava materiaalinkäsittelykone pyöräalustalla käsittelee 500 tonnia tunnissa (Kapasiteetti kasvuun Mantsinen 120 avulla).

5.5 Alus

Kotkasta on matkaa Rotterdamiin 1 823 km ja matka-aika on 2,8 vrk. Pietarista matkaa Rotterdamiin on 1 981 km ja matka-aika on 3,2 vrk. (Distances and time.) Matka-aika on saatu kuljettaessa 14 merimailia tunnissa, mikä on tyypillinen nopeus irtolastialukselle (Similä 2012, 16). 1 km vastaa 0,54 merimailia (Convertworld.com).

Vuoden 2015 alussa tiukentuivat laivojen rikkidioksidipäästöjä koskevat määräykset. Polttoaineen rikkipitoisuusraja laski 0,1 painoprosenttiin Itämerellä, Pohjanmerellä ja Englannin kanaalissa sekä Pohjois-Amerikan mantereeseen alueella. Myöhemmin alemmat rikkipitoisuudet tulevat koskemaan laajempaa aluetta. Aiemmin laivojen polttoaineena on käytetty pääasiassa raskasta polttoöljyä. Nyt vaihtoehtona on vähärikkinen laivapolttoöljy, jonka rikkipitoisuus on enintään 0,1 % tai muut polttoaineet, kuten nesteytetty maakaasu (LNG). Jos halutaan edelleen käyttää runsasrikkistä raskasta polttoöljyä, on laivaan asennettava rikkipesuri. (Rikkidirektiivi ja laivapolttoaineet.)

Hiilen ja biomassan merikuljetukseen käytetään irtolastialuksia. Hiiltä kuljetaan Panamax-kokoluokan aluksissa (60 000–80 000 dwt) ja Capesize-kokoluokan aluksissa (yli 80 000 dwt). Pellettien mantereiden välisissä merikuljetuksissa käytetään pienempiä Handymax-kokoluokan aluksia (40 000–60 000 dwt) tai Panamax-kokoluokan aluksia. Pellettikuljetuksissa keskimääräinen lasti on 20 000–30 000 tonnia/rahti mantereiden välisissä kuljetuksissa ja 4 000–6 000 tonnia/rahti kuljetuksissa Baltiasta ja Venäjältä Pohjoismaihin. (Similä 2012, 14, 19, 25.)

Keskisuuri irtolastialus kuluttaa polttonestettä 41 157 g/laiva km tai 4,9 g/tkm. Grammaa laivakilometriä kohden tarkoittaa polttoaineen kulutusta laivan kulkiessa yhden kilometrin matkan. Grammaa tonnikilometriä kohden tarkoittaa polttoaineen kulutusta kuljetettaessa yksi lastitonni yhden kilometrin matkan. (Irtolastialusten yksikköpäästöt 2009.)

5.6 Rotterdamin satama ja Maasvlakten voimalaitokset

Rotterdamin satama, joka sijaitsee Alankomaissa, on Euroopan suurin satama. Sen läpi kulkee vuosittain 450 miljoonaa tonnia tavaraa. (Port in general.) Rotterdamin satama käsitteli vuonna 2012 noin 1 miljoonaa tonnia biomassaa ja se haluaa käsitellä 8–10 miljoonaa tonnia biomassaa vuonna 2020. Tällä hetkellä Rotterdamiin tuleva biomassa on pääosin Yhdysvalloista ja Kanadasta. Tulevaisuudessa biomassaa voitaisi tuoda myös muun muassa Brasiliasta ja Venäjältä. (European hub for biomass.)

Maasvlakte on osa Rotterdamin satamaa. Sataman tavoitteena on, että vuonna 2020 Maasvlakten kivihiilivoimalaitoksissa poltetaan kivihiilen seassa 20–30 % biomassaa. (European hub for biomass.) Voimalaitoksia on tällä hetkellä kolme. Maasvlakte 1 ja 2 ovat molemmat kapasiteetiltaan 500 MW ja uusien laitoksista, Maasvlakte 3, on 1 100 MW. (Vuorinen 2013, 8.) Kaikki näistä kolmesta voimalaitoksesta pystyvät polttamaan biomassaa rinnakkaispolttona (du Mez & van Klaveren-Pleumeekers 2013, 24). Vuoden aikana Maasvlakten voimalaitokset päästävät ilmakehään 1,1 miljoonaa tonnia hiilidioksidia (Keeton 2014).

6 LASKENTATULOKSET

Laskelmien pohjana käytetyt lähtöarvot ja oletukset, on otettu luvuista 2, 4 ja 5. Lisäksi lähtöarvot on koottu liitteeseen 1. Mustan pelletin tuotantoon vaaditut energiamäärät on otettu luvun 4.2.3 esimerkkilaskelmasta. Laskelmien tulokset ovat ilmoitettu tuotettua energiayksikköä kohden. Energiankulutuksessa tulokset ovat kWh per tuotettu MWh, ilmastovaikutuslaskelmassa kgCO₂ekv per tuotettu MWh ja kustannuslaskelmassa tulokset ovat € per tuotettu MWh.

6.1 Polttoaineketjun energiankulutus

Mustan pelletin energiankulutuksen tarkastelussa käytetyt energiamäärät on esitelty taulukossa 1. Kun tuotetaan 1 MWh:a vastaava energiamäärä ja siihen kuluu yhteensä noin 0,42 MWh:a energiaa, on mustan pelletin hyötysuhde noin 58 %. Mustan pelletin osalta suurin energiantarve (noin 390 kWh) kuluu sen tuotannossa. Tuotannon energiantarpeesta 364 kWh on lämpöenergiaa, joka kuluu esilämmityksessä, kuivatuksessa ja torrefioinnissa, ja 23,2 kWh sähköenergiaa, joka kuluu jauhatuksessa ja pelletoinnissa. Lisäksi koko logistiikkaketjuun menee energiaa 36,6 kWh.

Taulukko 1. Mustan pelletin polttoaineketjun energiankulutus

| Energiankulutus, musta pelletti | kWh/MWh |
|--|----------------|
| maantiekuljetus tehtaalle, yhdistelmä | 14,99 |
| purku tehtaalle, ketjut | 0,71 |
| tuotanto | 387,27 |
| lastaus tehtaalla, pyöräkuormaaja | 0,11 |
| maantiekuljetus satamaan, yhdistelmä | 2,90 |
| purku satamaan, ketjut | 0,14 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,05 |
| merikuljetus, irtolastialus | 17,58 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,05 |
| | 423,80 |

Mustan pelletin maantiekuljetusten (sahalta tehtaalle) energiankulutus on saatu yhtälöllä 4.

$$E_{maantie} = \frac{\left(\frac{V_{diesel} \cdot \rho_{diesel} \cdot H_{diesel}}{\frac{V_{puru}}{V_{tarve}}} \right)}{H_{mp}} \quad (4)$$

| | | |
|-------|-----------------|---|
| jossa | $E_{maantie}$ | maantiekuljetuksen energiankulutus [kWh/MWh] |
| | V_{diesel} | matkan aikana tarvittavan dieselin tilavuus [m ³] |
| | ρ_{diesel} | dieselin tiheys [t/m ³] |
| | H_{diesel} | dieselin lämpöarvo [kWh/t] |
| | V_{puru} | kostean sahanpurun tilavuus yhdistelmässä [m ³] |
| | V_{tarve} | kostean sahanpurun tarve / tonni musta pelletti [m ³] |
| | H_{mp} | mustan pelletin lämpöarvo [MWh/t] |

Kivihiilen energiankulutuksessa käytetyt energianmäärät per tuotettu 1 MWh energiaa on esitelty taulukossa 2. Kivihiilen hyötysuhde on noin 96 %, kun koko logistiikkaketjuun kuluu noin 44 kWh:a energiaa ja se on ainoa energiaa kuluttava kokonaisuus. Kivihiilen louhintaan tarvittavaa energianmäärää ei ole otettu huomioon.

Taulukko 2. Kivihiilen polttoaineketjun energiankulutus

| Energiankulutus, kivihiili | kWh/MWh |
|--------------------------------------|----------------|
| lastaus louhimolla, pyöräkuormaaja | 0,10 |
| rautatiekuljetus satamaan, sähköjuna | 26,43 |
| purku satamaan, pyöräkuormaaja | 0,10 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,05 |
| merikuljetus, irtolastialus | 17,39 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,05 |
| | 44,11 |

Junan käyttämä sähköenergianmäärä on saatu yhtälöllä 5.

$$E_{rautatie} = \frac{\left[\frac{(E_{sähkö} \cdot l)}{m} \right]}{H_{kh}} \quad (5)$$

| | | |
|-------|----------------|---|
| jossa | $E_{rautatie}$ | rautatiekuljetuksen energiankulutus [kWh/MWh] |
| | $E_{sähkö}$ | sähköjunan energiankulutus [kWh/km] |
| | l | matkan pituus [km] |
| | m | kuorman massa [t] |
| | H_{kh} | kivihiilen lämpöarvo [MWh/t] |

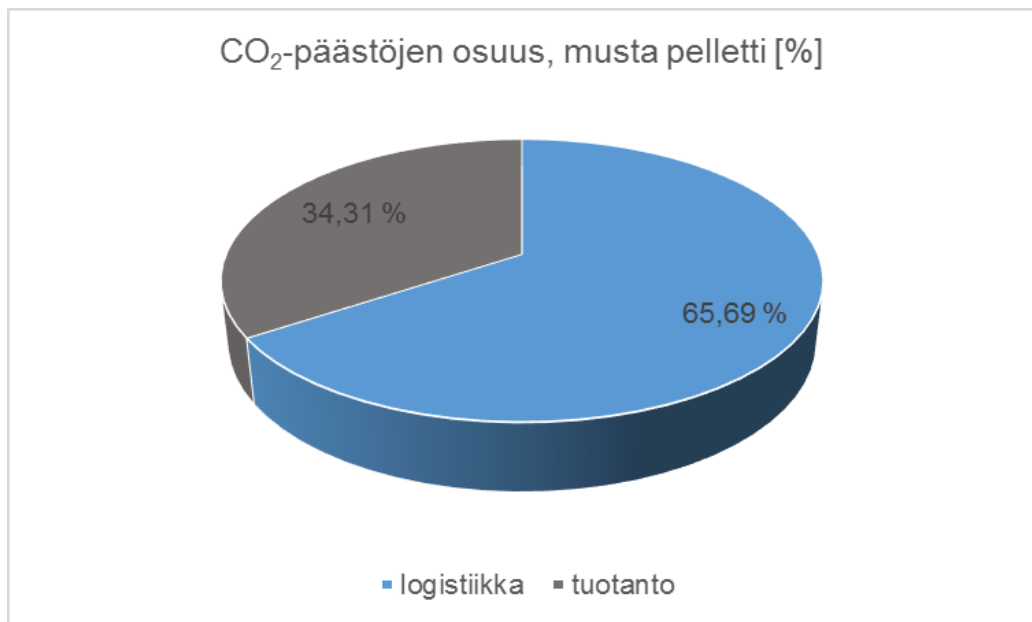
6.2 Ilmastovaikutukset

Taulukossa 3 on esitelty päästömäärät jotka syntyvät, kun mustalla pelletillä tuotetaan 1 MWh energiaa. Ilmastovaikutuksissa on huomioitu polttoaineketju sekä poltto. Yhteensä päästöjä syntyy 14 kgCO₂ekv.

Taulukko 3. Mustan pelletin ilmastovaikutukset

| Ilmastovaikutukset, musta pelletti | kgCO ₂ ekv/MWh |
|---------------------------------------|---------------------------|
| maantiekuljetus tehtaalle, yhdistelmä | 4,10 |
| purku tehtaalle, ketjut | 0,20 |
| tuotanto | 4,81 |
| lastaus tehtaalla, pyöräkuormaaja | 0,03 |
| maantiekuljetus satamaan, yhdistelmä | 0,79 |
| purku satamaan, ketjut | 0,04 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,01 |
| merikuljetus, irtolastialus | 4,02 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,01 |
| poltto | 0,00 |
| | 14,01 |

Mustan pelletin osalta hiilidioksidipäästöjä synnyttävät ainoastaan mustan pelletin tuotanto (noin 5 kgCO₂ekv) ja logistiikka (noin 9 kgCO₂ekv). Tuotannossa vain sähköenergiaa käyttävät jauhatus ja pelletointi lisäävät päästöjä. Logistiikan osalta päästöjä syntyy lähes yhtä paljon kuljetusketjussa ennen tuotantoa (4,3 kgCO₂ekv) ja tuotannon jälkeen (4,9 kgCO₂ekv). Poltossa ei synny päästöjä ollenkaan, koska mustan pelletin päästökerroin on 0. Kuvassa 8 näkyy päästöjen prosentuaalinen jakauma suhteessa kokonaisilmastovaikutukseen. Kuljetukset tuottavat 60 % kokonaispäästöistä ja tuotanto 40 %.



Kuva 8. CO₂-päästöjen jakauma mustan pelletin osalta

Mustan pelletin merikuljetuksen aiheuttama päästömäärä on saatu yhtälöllä 6, kun lastin enimmäiskooksi on oletettu 10 000 t.

$$CO_{2alus} = \frac{\left[\frac{(CO_{2kerroin} \cdot l)}{m} \right]}{H_{mp}} \quad (6)$$

| | | |
|-------|-----------------|---|
| jossa | CO_{2alus} | merikuljetuksen aiheuttamat päästöt [kgCO ₂ ekv/MWh] |
| | $CO_{2kerroin}$ | aluksen päästökerroin [kgCO ₂ ekv/laiva km] |
| | l | matkan pituus [km] |

m mustan pelletin massa aluksessa [t]

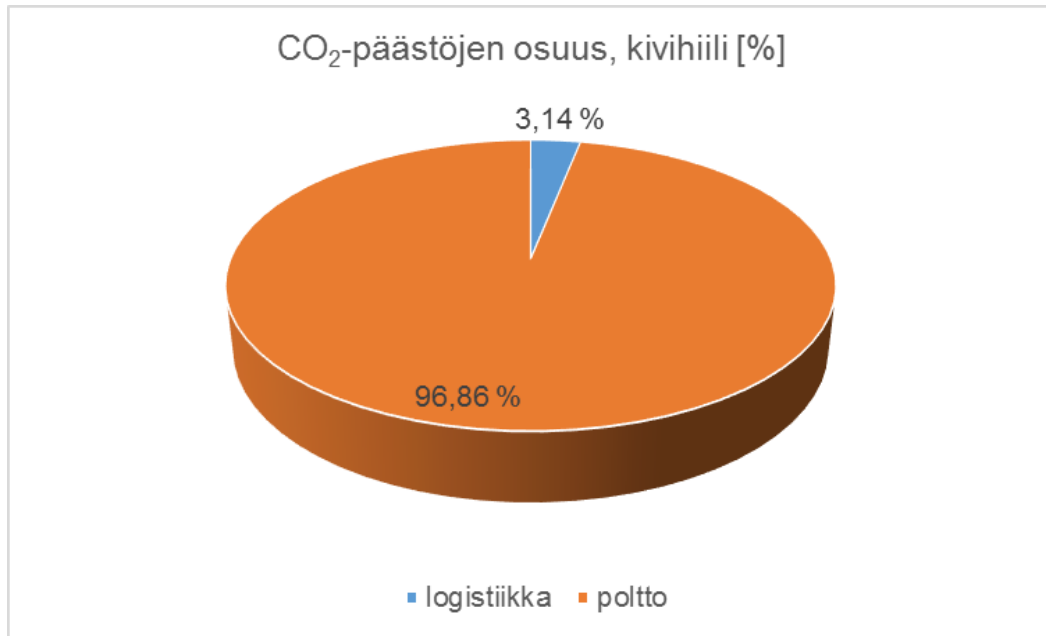
H_{mp} mustan pelletin lämpöarvo [MWh/t]

Myös kivihiilen osalta on ilmastovaikutuksissa huomioitu sekä polttoaineketju että poltto. Taulukossa 4 on esitelty kivihiilen synnyttämät hiilidioksidipäästöt. Yhteensä hiilidioksidipäästöjä syntyy noin 350 kgCO₂ekv, kun tuotetaan 1 MWh energiaa.

Taulukko 4. Kivihiilen ilmastovaikutukset

| Ilmastovaikutukset, kivihiili | kgCO ₂ ekv/MWh |
|--------------------------------------|---------------------------|
| lastaus louhimolla, pyöräkuormaaja | 0,03 |
| rautatiekuljetus satamaan, sähköjuna | 6,98 |
| purku satamaan, pyöräkuormaaja | 0,03 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,01 |
| merikuljetus, irtolastialus | 3,98 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,01 |
| poltto | 341,00 |
| | 352,04 |

Kivihiilen osalta suurin hiilidioksidin tuottaja on kivihiilen poltto (341 kgCO₂ekv), joka vastaa lähes 97 prosentista kokonaispäästöjä. Myös rautatie- ja merikuljetukset tuottavat hiilidioksidipäästöjä (11 kgCO₂ekv), mutta niiden osuus kokonaisuudesta on vain vähän yli 3 %. Kuvassa 9 on esitelty hiilidioksidipäästöjen jakauma.



Kuva 9. CO₂-päästöjen jakauma kivihiilen osalta

Pyöräkuormaajan louhimolla aiheuttamat päästöt on saatu yhtälöllä 7.

$$CO_{2kuormaaja} = \frac{\left[\frac{(q)}{P}\right] \cdot CO_{2kerroin}}{H_{kh}} \quad (7)$$

| | | |
|-------|-------------------|--|
| jossa | $CO_{2kuormaaja}$ | pyöräkuormaajan aiheuttamat päästöt [kgCO ₂ ekv/MWh] |
| | q | kulutus [l/h] |
| | P | käsittelyteho [t/h] |
| | $CO_{2kerroin}$ | pyöräkuormaajan päästökerroin [kgCO ₂ ekv/l _{diesel}] |
| | H_{kh} | kivihiilen lämpöarvo [MWh/t] |

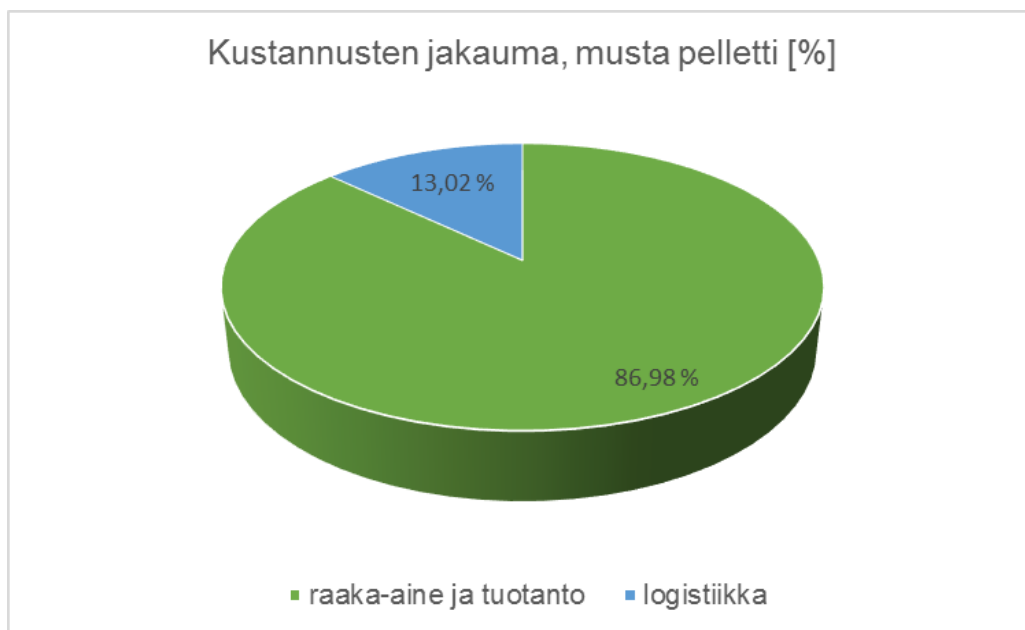
6.3 Polttoaineketjun kustannukset

Taulukossa 5 on esitelty mustan pelletin euromääräiset kustannukset per MWh. Logistisissa kustannuksissa vain polttoainekustannukset on otettu huomioon. Mustan pelletin kokonaishinta on lähes 26 €/MWh.

Taulukko 5. Mustan pelletin kustannuslaskelma

| Kustannukset, musta pelletti | €/MWh |
|---------------------------------------|--------------|
| raaka-aine ja tuotanto | 22,39 |
| maantiekuljetus tehtaalle, yhdistelmä | 2,08 |
| purku tehtaalle, ketjut | 0,10 |
| lastaus tehtaalla, pyöräkuormaaja | 0,01 |
| maantiekuljetus satamaan, yhdistelmä | 0,40 |
| purku satamaan, ketjut | 0,02 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,01 |
| merikuljetus, irtolastialus | 0,72 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,01 |
| päästöoikeus | 0,00 |
| | 25,74 |

Suurin kustannuserä ovat raaka-aine ja tuotanto (22,39 €/MWh). Lisäksi logistiikkiin kustannuksiin menee yli 3 €/MWh. Kustannusten prosentuaalinen jakauma on nähtävissä kuvassa 10. Raaka-aineen ja tuotannon osuus kokonaiskustannuksista on lähes 90 % ja kuljetusketjun hieman yli 10 %.



Kuva 10. Kustannusten jakauma mustan pelletin osalta

Raaka-aineen ja tuotannon hinta per tuotettu MWh on saatu yhtälöllä 8.

$$\epsilon_{r-a+tuotanto} = \frac{\epsilon_{kost.puru} \cdot E_p \cdot V_{tarve}}{H_{mp}} \quad (8)$$

| | | |
|-------|---------------------------|---|
| jossa | $\epsilon_{r-a+tuotanto}$ | raaka-aineen hinta per tuotettu MWh [€/MWh] |
| | $\epsilon_{kost.puru}$ | kostean sahanpurun hinta [€/MWh] |
| | E_p | kostean sahanpurun energiatiheys [MWh/m ³] |
| | V_{tarve} | kostean sahanpurun tarve / tonni musta pelletti [m ³] |
| | H_{mp} | mustan pelletin lämpöarvo [MWh/t] |

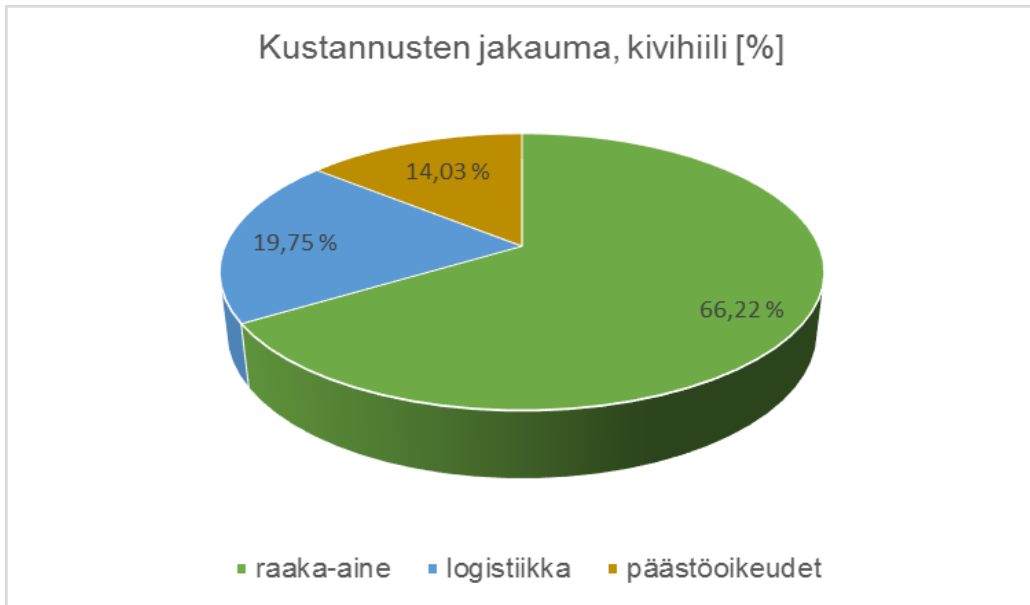
Taulukossa 6 on esitelty kivihiilen euromääräiset kustannukset per MWh. Logistisissa kustannuksissa on kivihiilenkin osalta otettu huomioon vain polttoainekustannukset. Kivihiilen kokonaishinta on noin 12 €/MWh.

Taulukko 6. Kivihiilen kustannuslaskelma

| Kustannukset, kivihiili | €/MWh |
|--------------------------------------|--------------|
| raaka-aine | 8,07 |
| lastaus louhimolla, pyöräkuormaaja | 0,01 |
| rautatiekuljetus satamaan, sähköjuna | 1,67 |
| purku satamaan, pyöräkuormaaja | 0,01 |
| lastaus laivaan, satamanosturi | 0,003 |
| merikuljetus, irtolastialus | 0,71 |
| purku laivasta, satamanosturi | 0,01 |
| päästöoikeus | 1,71 |
| | 12,19 |

Kivihiilen osalta suurin kustannuserä tulee raaka-aineesta (noin 8 €/MWh). Raaka-aineen lisäksi kustannuksia aiheuttaa logistiikka (noin 2,4 €/MWh) ja päästöoikeudet (lähes 2 MWh). Kivihiilen kustannusten prosentuaalinen jakauma on nähtävissä kuvassa 11. Kuvasta nähdään että raaka-aineen osuus

kokonaiskustannuksista on lähes 70 %, kuljetusten 20 % ja päästöoikeuden lähes 15 %.



Kuva 11. Kustannusten jakauma kivihiilen osalta

Satamanosturin kustannukset Rotterdamin satamassa per tuotettu MWh on saatu yhtälöllä 9.

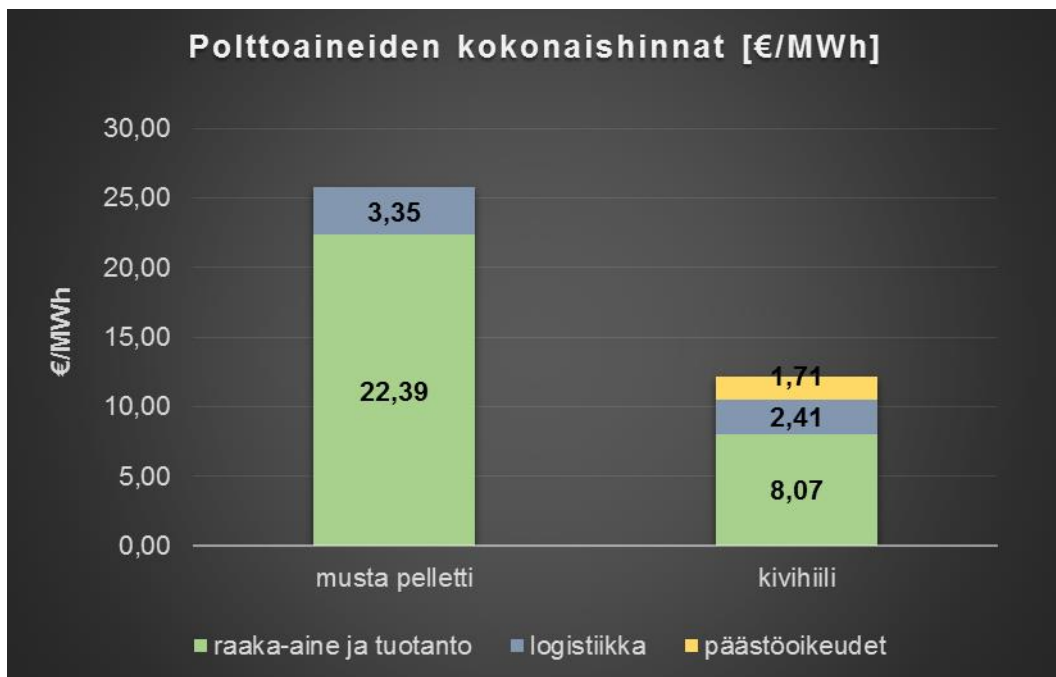
$$\epsilon_{nosturi} = \frac{\left[\frac{(q)}{P}\right] \cdot \epsilon_{diesel}}{H_{kh}} \quad (9)$$

| | | |
|-------|----------------------|-------------------------------------|
| jossa | $\epsilon_{nosturi}$ | satamanosturin kustannukset [€/MWh] |
| | q | kulutus [l/h] |
| | P | käsittelyteho [t/h] |
| | ϵ_{diesel} | dieselin hinta Alankomaissa [€/l] |
| | H_{kh} | kivihiilen lämpöarvo [MWh/t] |

6.4 Herkkyysanalyysi

Mustan pelletin kokonaishintaan vaikuttaa itse raaka-aine eli tässä tapauksessa kostea sahanpuru ja mustan pelletin tuotanto sekä logistiset kustannukset. Raaka-aine ja tuotanto ovat merkittävimpin mustan pelletin kokonaishintaan vaikuttava tekijä. Logistiset kustannukset vaikuttavat vähiten kokonaishintaan.

Kivihiihen kokonaishintaan vaikuttaa raaka-aine (kivihili), logistiset kustannukset sekä päästöoikeudet. Kivihiihen osalta merkittävimmät kokonaishintaan vaikuttavat tekijät ovat raaka-aine ja päästöoikeudet. Myös tässä tapauksessa logistiset kustannukset vaikuttavat vain vähän kokonaishintaan. Molempien polttoaineiden kokonaishinnan muodostuminen on esitelty kuvassa 12.



Kuva 12. Polttoaineiden kokonaishinnat

Taulukoissa 7 ja 8 on esitelty polttoaineiden herkkyysanalyysit. Keskimääräinen, harmaa solu on tämänhetkinen kustannustaso. Taulukossa 7 muutetaan mustan pelletin osalta ensin raaka-aineen eli kostean sahanpurun hintaa, ja seurataan miten se vaikuttaa kokonaishintaan. Seuraavaksi muutetaan vain kostean sahanpurun tarvetta ($i\text{-m}^3$) mustan pellettitonin valmistukseen.

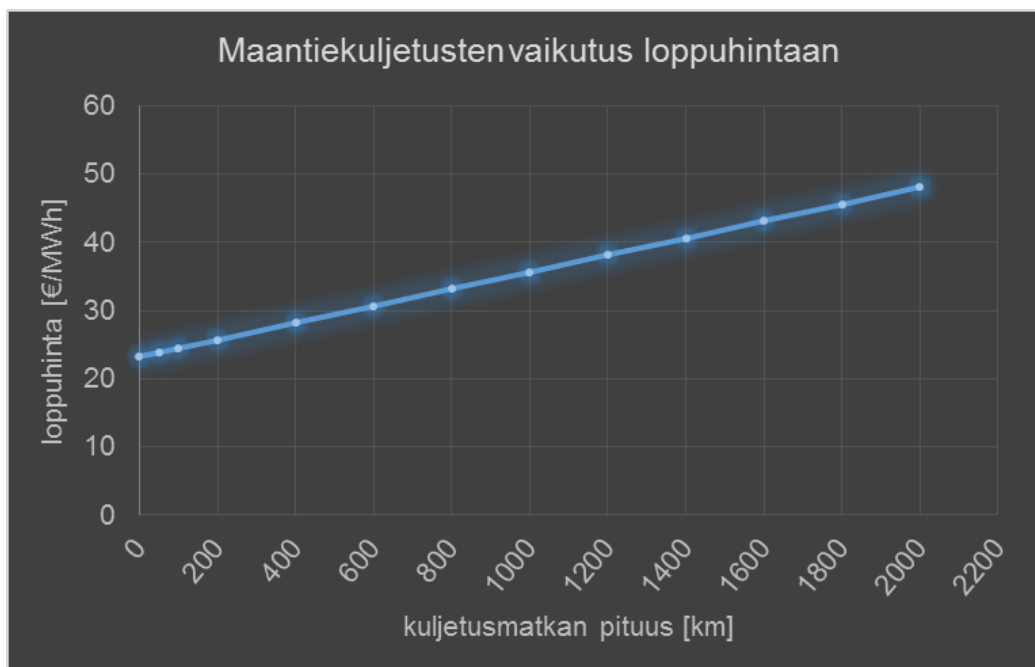
Taulukko 7. Mustan pelletin herkkyyshanalyysi

| musta pelletti | raaka-aine | kokonaishinta | kostean sahanpurun tarve | kokonaishinta |
|----------------|------------|---------------|--|---------------|
| | [€/MWh] | [€/MWh] | (i-m ³ /t _{musta pelletti}) | [€/MWh] |
| | 12,00 | 18,53 | 10,0 | 19,79 |
| | 14,00 | 21,06 | 11,0 | 21,65 |
| | 16,00 | 23,59 | 12,0 | 23,51 |
| | 17,70 | 25,74 | 13,2 | 25,74 |
| | 20,00 | 28,65 | 14,0 | 27,23 |
| | 22,00 | 31,18 | 15,0 | 29,09 |
| | 24,00 | 33,71 | 16,0 | 30,95 |

Jos kostean sahanpurun hinta nousee 2,00 €/MWh, nousee se mustan pelletin kokonaishintaa noin 2,5 €/MWh. Sahanpurun hinnan ollessa 24 €/MWh, on mustan pelletin kokonaishinta jo lähes 34 €/MWh. Toisaalta, jos kostean sahanpurun hinta laskee, laskee myös mustan pelletin hinta. Jotta mustan pelletin kokonaishinta olisi samalla tasolla kivihillen tämän hetkisen kokonaishinnan (noin 12 €/MWh) kanssa, pitäisi kostean sahanpurun hinta olla noin 7 €/MWh.

Kostean sahanpurun tarve on tällä hetkellä 13,2 i-m³/t_{musta pelletti}. Jos mustan pelletin valmistamiseen voitaisi käyttää kuutio vähemmän kosteaa sahanpurua, putoaisi mustan pelletin loppuhinta noin 1,9 eurolla. Jos sahanpurun tarve kasvaa, nousee loppuhinta 1,96 eurolla per kuutio.

Vaikka kuljetuskustannukset ovatkin vain pieni osa mustan pelletin tämä hetkisiä kokonaiskustannuksia, voi tarpeeksi suuri matkan pituuden muutos vaikuttaa loppuhintaan. Kuvassa 13 on nähtävissä miten maantiekuljetusten pituudet vaikuttavat mustan pelletin loppuhintaan. Kuljetusmatkan pituus (km) pitää sisällään kuljetukset sahalla tehtaalle ja tehtaalla satamaan. Jos matkan pituudet viisinkertaistuisivat (yhteensä 1 000 km), korottaisi tämä loppuhintaa lähes 10 €/MWh. Jo pelkästään matkapituuksien kaksinkertaistuminen (yhteensä 400 km) maantieliikenteen osalta, korottaisi loppuhintaa noin 2,5 €/MWh.



Kuva 13. Maantiekuljetusten pituuden muutosten vaikutus mustan pelletin loppuhintaan

Taulukossa 8 muutetaan kivihiilen osalta raaka-aineen ja päästökaupan päästöoikeuden hintaa, ja seurataan vaikutuksia.

Taulukko 8. Kivihiilen herkkyyshanalyysi

| | raaka-aine [€/MWh] | kokonaishinta [€/MWh] | päästöoikeus [€/tCO ₂] | kokonaishinta [€/MWh] |
|-----------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| kivihiili | 2,00 | 6,12 | 1,00 | 10,81 |
| | 4,00 | 8,12 | 2,00 | 11,15 |
| | 6,00 | 10,12 | 3,00 | 11,49 |
| | 8,07 | 12,19 | 5,00 | 12,19 |
| | 10,00 | 14,12 | 10,00 | 13,88 |
| | 12,00 | 16,12 | 20,00 | 17,29 |
| | 14,00 | 18,12 | 30,00 | 20,70 |

Kivihiilen raaka-ainehinta vaikuttaa suoraan euro euroilta kivihiilen kokonaishintaan. Jos kivihiilen raaka-ainehinta nousee kahdella eurolla, nousee myös kivihiilen kokonaishinta kahdella eurolla.

Päästöoikeuden hintataso vaikuttaa paljon kivihiilen kokonaishintaan. Päästöoikeuden hinnan noustessa tasolle 20,00 €/tCO₂, olisi kivihiilen kokonaishinta

yli 17 €. Muiden kustannusten pysyessä ennallaan, pitäisi päästöoikeuden hinnan nousta tasolle 45,00 €/tCO₂, jotta kivihiilen ja mustan pelletin hinnat olisivat samat.

Vaikka kivihiilen kuljetusmatka rautateitse kaksinkertaistuisi (10 000 km), vaikuttaisi se korottavasti kivihiilen loppuhintaan vain 1,5 €/MWh. Kuljetusmatkan pituuden lyhentyessä viidesosaan (1 000 km) nykyisestä, vaikuttaisi se myös loppuhintaan 1,5 €/MWh, tosin loppuhintaa alentavasti.

7 LOPPUTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Energiatehokkuus

Musta pelletti häviää kivihiillelle polttoaineiden energiatehokkuudessa, mikä johtuu pääosin mustan pelletin tuotantoon kuluvaan energianmäärästä. Mustan pelletin osalta energiaa koko polttoaineketjussa kuluu noin 420 kWh kun tuotetaan 1 MWh energiaa, ja vastaavasti kivihiili kuluttaa vain 44 kWh/MWh (taulukko 9).

Taulukko 9. Polttoaineketjujen kokonaisenergiankulutus

| Polttoaineketjun energiankulutus | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | sähköenergia [kWh/MWh] | nettolämpöenergia [kWh/MWh] | liikennepolttoaineet [kWh/MWh] | yhteensä [kWh/MWh] |
| musta pelletti | 23,2 | 364,0 | 36,6 | 423,8 |
| kivihiili | 26,4 | 0,0 | 17,7 | 44,1 |

Suurin osa mustan pelletin energiantarpeesta on lämpöenergiaa (364 kWh/MWh), joka kuluu esilämmitykseen, kuivatukseen ja torrefiointiin. Esilämmityksen lämpöenergiatarve on noin 22 kWh/MWh, kuivatuksen noin 306 kWh/MWh ja torrefioinnin 36 kWh/MWh. Prosessiin ei tuoda ollenkaan ulkopuolista lämpöä, vaan osa raaka-aineesta käytetään prosessilämmön tuottamiseen. Jos energiankulutuksessa huomioidaan vain ulkopuoliset energiankulutukset eikä ollenkaan lämpöenergiaa, kuluttaisi mustan pelletin polttoai-

neketju kokonaisuudessaan vain noin 60 kWh energiaa. Kivihiili ei kuluta lämpöenergiaa ollenkaan. Yksityiskohtaisempi listaus polttoaineiden energiankulutuksesta löytyy taulukosta 10.

Taulukko 10. Polttoaineketjujen yksityiskohtaisempi energiankulutus

| MUSTA PELLETTI | kWh/MWh | KIVIHIILI | kWh/MWh |
|------------------------------|--------------|---------------------|-------------|
| maantiekuljetukset | 17,9 | rautatiekuljetukset | 26,4 |
| purut ja lastaukset | 1,1 | purut ja lastaukset | 0,3 |
| merikuljetukset | 17,6 | merikuljetukset | 17,4 |
| tuotanto | | | |
| - esilämmitys, lämpöenergia | 21,9 | | |
| - kuivatus, lämpöenergia | 306,1 | | |
| - torrefiointi, lämpöenergia | 36,0 | | |
| - jauhatus, sähköenergia | 1,8 | | |
| - pelletointi, sähköenergia | 21,4 | | |
| YHTEENSÄ | 423,8 | YHTEENSÄ | 44,1 |

Sähköenergian tarve on molemmilla polttoaineilla likimäärin sama. Mustan pelletin osalta sähköenergiaa (23,2 kWh/MWh), kuluu jauhatukseen ja pelletointiin. Jauhatuksen sähköenergiantarve on 1,8 kWh/MWh ja pelletoinnin 21,4 kWh/MWh. Kivihiilen osalta sähköenergiaa kuluu kuljetukseen louhimolta satamaan. Kuljetukseen käytetään junaa, jonka sähköenergiantarve on 26,4 kWh per tuotettu MWh. Sähköenergiantarve junalla on näin suuri, koska Venäjällä oletetaan olevan pitkät välimatkat raaka-ainevarastojen ja satamien välillä.

Sähkö- ja lämpöenergian lisäksi, energiaa kuluu myös liikennepolttoaineisiin. Mustan pelletin osalta liikennepolttoainetta käyttää täysperävaunuyhdistelmä, pyöräkuormaaja, satamanosturi sekä irtolastialus. Kivihiilen osalta liikennepolttoainetta käyttää pyöräkuormaaja, satamanosturi sekä irtolastialus. Mustan pelletin kuljetuksessa maantiekuljetukset kuluttavat energiaa 17,9 kWh/MWh, ja merikuljetus 17,6 kWh/MWh. Kivihiilen merikuljetus vie energiaa 17,4 kWh/MWh. Mustan pelletin ja kivihiilen purut ja lastaukset kuluttavat lähes saman verran energiaa. Kivihiili on tässä hieman energiatehokkaampaa, koska sen energiatiheys on vähän suurempi, ja koska se ei käy tuotannossa, yksi purku ja lastaus jäävät pois sen kuljetusketjusta.

7.2 Ympäristöystävällisyys

Musta pelletti on ylivoimainen ympäristöystävällisyydessä kivihiileen verrattuna. Kun tuotetaan 1 MWh energiaa, mustan pelletin päästöt ovat 14 kgCO₂ekv/MWh. Kivihiilen päästöt ovat 25-kertaiset (352 kgCO₂ekv/MWh) verrattuna mustaan pellettiin (taulukko 11).

Taulukko 11. Polttoaineiden kokonaisilmastovaikutukset

| Ilmastovaikutukset | | | | |
|--------------------|---|---|---------------------------------------|---|
| | liikenne [kgCO ₂ ekv/MWh] | tuotanto [kgCO ₂ ekv/MWh] | poltto [kgCO ₂ ekv/MWh] | yhteensä [kgCO ₂ ekv/MWh] |
| musta pelletti | 9,2 | 4,8 | 0,0 | 14,0 |
| kivihiihi | 11,0 | 0 | 341,0 | 352,0 |

Liikenteen osalta molempien polttoaineiden päästöt ovat lähes samaa luokkaa, sillä mustan pelletin kuljetuksessa syntyy 9,2 kg päästöjä ja kivihiilen kuljetuksessa 11 kg. Tarkemmat ilmastovaikutukset löytyvät taulukosta 12. Merikuljetukset tuottavat 4 kg päästöjä tuotettua MWh:a kohden molempien polttoaineiden osalta. Sen lisäksi mustan pelletin maantiekuljetukset tuottavat 4,9 kgCO₂ekv/MWh ja purut ja lastaukset 0,3 kgCO₂ekv/MWh. Kivihiilen osalta päästöjä syntyy merikuljetuksen lisäksi rautatiekuljetuksesta 7 kgCO₂ekv/MWh ja purusta ja lastauksesta 0,1 kgCO₂ekv/MWh.

Taulukko 12. Polttoaineiden yksityiskohtaisemmat ilmastovaikutukset

| MUSTA PELLETTI | kgCO ₂ ekv/MWh | KIVIHIIHI | kgCO ₂ ekv/MWh |
|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| maantiekuljetukset | 4,9 | rautatiekuljetukset | 7,0 |
| purut ja lastaukset | 0,3 | purut ja lastaukset | 0,1 |
| merikuljetukset | 4,0 | merikuljetukset | 4,0 |
| tuotanto | | poltto | 341,0 |
| - esilämmitys | 0,0 | | |
| - kuivatus | 0,0 | | |
| - torrefiointi | 0,0 | | |
| - jauhatus | 0,4 | | |
| - pelletointi | 4,4 | | |
| poltto | 0,0 | | |
| YHTEENSÄ | 14,0 | YHTEENSÄ | 352,0 |

Mustan pelletin tuotannossa syntyy päästöjä 4,8 kgCO₂ekv/MWh. Tästä jauha-
tuksen osuus on 0,4 kg ja pelletoinnin osuus 4,4 kg. Molemmat näistä kulutta-
vat sähköenergiaa. Esilämmitys, joka hoidetaan kuivatuksesta tulevalla vesi-
höyryllä, ei tuota päästöjä. Myöskään kuivatus, joka hoidetaan sahanpuruista
saadulla lämpöenergialla ja torrefiointi, joka hoidetaan torrefiointikaasuilla, ei-
vät tuota päästöjä. Kivihiili ei käy tuotannossa eikä päästöjä sen osalta synny.

Tarkasteltaessa ilmastovaikutuksia polttoaineiden polton osalta, on musta pel-
letti yliverlainen. Mustan pelletin polttoainekohtainen CO₂-päästökerroin, ja
näin ollen myös poltosta aiheutuvat päästöt, ovat 0. Kivihiilen polttoainekohtai-
nen CO₂-päästökerroin on 0,341 tCO₂/MWh. Jokaista tuotettua MWh:a kohden
kivihiilen aiheuttamat päästöt ovat 341 kg.

7.3 Kustannustehokkuus

Kivihiili on näillä raaka-aine- ja päästöoikeushinnoilla huomattavasti halvempi
polttoaine kuin musta pelletti. Musta pelletti on halvempaa polttoainetta aino-
astaan päästöoikeuden osalta, mutta kalliimpaa raaka-aineen ja tuotannon ja
logistiikan osalta. Mustan pelletin kokonaishinta on 25,7 €/MWh ja kivihiilen
12,2 €/MWh (taulukko 13).

Taulukko 13. Polttoaineiden kokonaiskustannukset

| Kustannukset | | | | |
|----------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| | raaka-aine ja tuotanto [€/MWh] | logistiikka [€/MWh] | päästöoikeus [€/MWh] | yhteensä [€/MWh] |
| musta pelletti | 22,4 | 3,4 | 0,0 | 25,7 |
| kivihiili | 8,1 | 2,4 | 1,7 | 12,2 |

Mustan pelletin ja kivihiilen kokonaishintojen yksityiskohtaisempi muodostumi-
nen on esitelty taulukossa 14. Raaka-aineen osalta kivihiili on tällä hetkellä
noin 14 euroa per tuotettu MWh halvempaa kuin musta pelletti.

Taulukko 14. Polttoaineiden yksityiskohtaisemmat kustannukset

| MUSTA PELLETTI | €/MWh | KIVIHILI | €/MWh |
|------------------------|-------------|---------------------|-------------|
| raaka-aine ja tuotanto | 22,4 | raaka-aine | 8,1 |
| maantiekuljetukset | 2,5 | rautatiekuljetukset | 1,7 |
| purut ja lastaukset | 0,1 | purut ja lastaukset | 0,02 |
| merikuljetukset | 0,7 | merikuljetukset | 0,7 |
| päästöoikeus | 0,0 | päästöoikeus | 1,7 |
| YHTEENSÄ | 25,7 | YHTEENSÄ | 12,2 |

Kuljetuskustannukset nostavat mustan pelletin hintaa hieman yli 3 eurolla ja kivihiilen hintaa noin 2,5 eurolla. Tästä merikuljetusten osuus molemmilla polttoaineille on 0,7 €/MWh. Sen lisäksi mustan pelletin maakuljetuksiin menee 2,5 €/MWh, ja purkuhin ja lastauksiin 0,1 €/MWh. Kivihiilen rautatiekuljetukset maksavat 1,7 €/MWh, ja purkuun ja lastaukseen menee ainoastaan 0,02 €/MWh.

Päästöoikeuden hinta, joka vielä muutama vuosi sitten oli iso tekijä kivihiilen loppuhinnassa, vaikuttaa tällä hetkellä vain 1,7 euron edestä loppuhintaan. Mustan pelletin osalta päästöoikeutta ei tarvitse maksaa.

7.4 Mustan pelletin tuotantoprosessin jatkokehitys

Torrefioinnissa ylijääneet torrefiointikaasut voidaan käyttää hyödyksi kuivatuksessa. Koko kuivatusta ei pystytä kattamaan ylijääneillä kaasuilla, mutta osa pystytään. Jos esimerkiksi 100 MWh kuivatuksesta katetaan torrefiointikaasuilla, tarvitaan kuivaukseen enää noin 69 t kuivaa sahanpurua (153 t kosteaa sahanpurua). Alkuperäisen suunnitelman mukaiseen kuivatukseen tarvittiin 196 t kosteaa sahanpurua, joten säästöä tulisi 0,84 €/MWh.

Jos ylijääneet torrefiointikaasut muunnetaan sähköksi kaasuturbiinin avulla, voidaan jopa jauhatuksen ja pelletoinnin kokonaisenergiatarve kattaa. Tämän jälkeen torrefiointiprosessi olisi täysin omavarainen eikä siihen tulisi yhtään ulkopuolista energiaa. Se olisi myös kokonaan hiilidioksidivapaa, kun koko mustan pelletin tuotantoprosessi voitaisi hoitaa uusiutuvalla energialla. Kun ulkopuolista sähköä ei tarvittaisi, tulisi säästöä noin 1,5 €/MWh.

7.5 Päästöoikeuden vaikutus kustannuksiin

Hiilidioksiditonin päästöoikeuden hinta on tällä hetkellä poikkeuksellisen alhaalla. Jos päästöoikeuden hinta nousisi tasolle 45 €/tCO₂, alkaisi Euroopan kivihillivoimalaitoksissa puupohjaisen mustan pelletin polttaminen olla taloudellisesti kannattavampaa kuin kivihillen.

Keetonin (2014) mukaan, Maasvlakten voimalaitosten hiilidioksidipäästöt ovat vuoden aikana 1,1 miljoonaa tonnia. Jos kivihillestä korvattaisi edes 10 prosenttia mustalla pelletillä, vähenisivät hiilidioksidipäästöt 0,99 miljoonaan tonniin. Tämän ansiosta päästöoikeuksia voitaisi myydä 550 000 euron edestä. Yhden hiilidioksiditonin hinta on tällä hetkellä noin 5 € (Keeton 2014). Jos neljäsosa kivihillestä korvattaisi mustalla pelletillä, vähenisivät päästöt 825 000 tonniin ja päästöoikeuksia voitaisi myydä lähes 1,4 miljoonan euron edestä.

8 POHDINTA

8.1 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheena voisi selvittää suomalaisen mustan pelletin käyttömahdollisuuksia myös muualla maailmassa. Tarve hiilidioksidipäästöjen vähentämiselle kasvaa joka puolella, ja asia on viime aikoina puhuttanut ainakin Yhdysvalloissa ja Aasiassa.

Yhdysvallat on julkaissut ohjelman maan voimalaitosten hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä. Ohjelman tavoitteena on voimalaitosten hiilidioksidipäästöjen leikkaaminen 32 prosentilla vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. (Yhdysvallat kiristää tavoitteitaan hiilidioksidipäästöjen leikkaamiseksi 2015.)

Myös Kiina, joka on tällä hetkellä maailman suurin kasvihuonepäästöjen tuottaja, on ilmoittanut tavoitteekseen kasvihuonepäästöjen kääntämisen laskuun vuoden 2030 jälkeen. Vaikka hiilen käyttö Kiinassa laskikin vuonna 2014, on monien Kiinan kaupunkien ilma saastunut erittäin pahasti hiilen polton takia. (Kiinan päästöt voivat lähteä laskuun ennakoitua aiemmin 2015.)

8.2 Tutkimuksen luotettavuus ja hyödynnettävyys

Työssä pyrittiin käyttämään lähdeaineistona mahdollisimman uusia kirjallisuus- ja internet-lähteitä. Lisäksi lähdeaineistoon yritettiin suhtautua kriittisesti ja käyttää ainoastaan tieteellisiä tekstejä. Tutkimustulokset voidaan toistaa ja ne ovat luotettavia annetuilla lähtöarvoilla. Lähtöarvojen muuttuessa, voidaan uudet tutkimustulokset selvittää käyttämällä samoja yhtälöitä.

Uskon, että työ hyödyttää toimeksiantajaa, koska toimeksiantajan tehtävänä on toimia seudun yritystoiminnan kehittäjänä. Lisäksi työ voi hyödyttää myös muuta elinkeinoelämää, kuten puuteollisuuden yrityksiä ja uusyrittäjiä.

8.3 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää suomalaisen mustan pelletin vientimahdollisuus Alankomaissa sijaitsevaan voimalaitokseen energiankulutuksen, ilmastovaikutusten ja kustannusten kannalta. Alkuperäiset tavoitteet saavutettiin, vaikka jotkut laskelmat jouduttiinkin jättämään hyvin yleiselle tasolle. Haasteelliseksi työn teki mustan pelletin huono tunnettuus, ja siitä johtuva varsinaiseen mustaan pellettiin keskittyvän lähdeaineiston puute. Tosin yhdistämällä tietoa useista eri lähteistä, tietoa saatiin riittävästi.

Tutkimustulokset olivat ennalta ennustettavissa. Kivihiihi on tällä hetkellä halvempaa ja energiatehokkaampaa viedä Eurooppaan, mutta sen ilmastovaikutukset ovat mittavat verrattuna mustaan pellettiin. Vaikka kokonaislopputulokset olivatkin tiedossa, niin työ tarjoaa kuitenkin yksityiskohtaiset laskelmat mustan pelletin tuotantoprosessista ja kuljetuksista.

LÄHTEET

Alakangas, E. & Paju, P. 2002. Puupellettien tuotanto-, jakelu- ja käyttöketjun tekniikka, talous ja markkinat. OPET Raportti 1. Jyväskylä: VTT Energia.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf> [viitattu 17.5.2015].

Alankomaat - dieselin hinnat. GlobalPetrolPrices. Saatavissa: http://fi.globalpetrolprices.com/Netherlands/diesel_prices/ [viitattu 21.4.2015].

Biomassan uusi jalostettu muoto: biohiili. 2014. Bioenergia ry. Bioenergiauutiset 2 / 15.4.2014. Saatavissa: <http://www.bioenergia.fi/default.asp?si-vuld=30404> [viitattu 20.3.2015].

Convertworld.com. Saatavissa: <http://www.convertworld.com/fi/pituus/> [viitattu 21.4.2015].

Cursor lukuina. Cursor Oy. Saatavissa: <http://www.cursor.fi/fi/cursor-yhtio/cursor-lukuina> [viitattu 19.3.2015].

Cursor. Cursor Oy. Saatavissa: <http://www.cursor.fi/fi/cursor> [viitattu 19.3.2015].

Distances and time. SeaRates. Saatavissa: <http://www.searates.com/reference/portdistance/> [viitattu 21.4.2015].

Energia-arvot ja muuntokertoimet. 2015. Bioenergianeuvoja. Saatavissa: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/biopolttoaineiden-muuntokertoimia/> [viitattu 5.5.2015].

Energialähteet. 2014. Ilmastolaskurissa käytetyt oletuskertoimet ja -arvot. Motiva Oy. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/6515/Ilmastolaskurissa_kaytetyt_oletuskertoimet_ja_-arvot.pdf [viitattu 16.4.2015].

Energian hinnat. 2015. Tilastokeskus. Päivitetty: 17.9.2015. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_tie_001_fi.html [viitattu 29.9.2015].

European hub for biomass. Port of Rotterdam. Saatavissa: <http://www.portof-rotterdam.com/en/news/events/documents/biomass.pdf> [viitattu 10.4.2015].

Eurostat. 2014. Half-yearly electricity and gas prices 2014. Saatavissa: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Half-yearly_electricity_and_gas_prices_2014s1.png [viitattu 15.4.2015].

Ghiasi, B., Sokhansanj, S., Kumar, L. & Lim, J. 2013. Production of "high quality torrefied wood pellets" with minimum energy consumption. UBC biomass and bioenergy research group. Päivitetty 17.10.2013. Saatavissa: <http://biomass.ubc.ca/wp-content/uploads/2013/12/TORREFACTION-PRESENTATION-17-NOVEMBER-2013.pdf> [viitattu 24.5.2015].

Herrala, O. 2014. Kivihillen hinta laskee lisää ensi vuonna -ennuste. Kauppalehti 23.12.2014. Saatavissa: <http://www.kauppalehti.fi/uutiset/kivihillen-hintalaskee-lisaa-ensi-vuonna--ennuste/j55Mwjz5> [viitattu 12.9.2015].

Hiilivarannot. Hiilitieto ry. Saatavissa: <http://hiilitieto.fi/perustietoa-hiilesta/hiilivarannot/> [viitattu 24.3.2015].

Hippinen, I. & Suomi U. 2012. Yksittäisen kohteen CO₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät CO₂-päästökertoimet 12/2012. Motiva Oy. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8886/CO2-laskentaohje_Yksittainen_kohde.pdf [viitattu 26.3.2015].

Härkönen, M. 2011. Puun kosteus no 1016. Päivitetty 13.9.2011. Saatavissa: http://www.forestpower.net/data/liitteet/112323=1016_puun_kosteus.pdf [viitattu 24.5.2015].

Ihalainen, T. & Sikanen, L. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset pelletintuotannon arvoketjuissa. Metlan työraportteja 181. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp181.pdf> [viitattu 14.4.2015].

likkanen, P. 2013. Rautatieliikenteen kustannusmallit. Liikenneviraston kustannuksia ja selvityksiä 15/2013. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2013-15_rautatieliikenteen_kustannusmallit_web.pdf [viitattu 21.4.2015].

Irtolastialusten yksikköpäästöt. 2009. LIPASTO liikenteen päästöt. Päivitetty 26.3.2009. Saatavissa: <http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/vesiliikenne/bulk.htm> [viitattu 7.5.2015].

Jaccard, M. 2013. New unabated coal is not compatible with keeping global warming below 2°C. Päivitetty 19.11.2013. Saatavissa: <http://theenergycollective.com/markjaccard/305631/new-unabated-coal-not-compatible-keeping-global-warming-below-2-c> [viitattu 15.5.2015].

Kalli, J., Karvonen, T. & Makkonen, T. 2009. Laivapolttoaineen rikkipitoisuus vuonna 2015. Selvitys IMO:n uusien määräysten vaikutuksesta kuljetuskustannuksiin. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 20/2009. Saatavissa: http://www.lvm.fi/docs/fi/339549_DLFE-7317.pdf [viitattu 21.4.2015].

Kantola, A. 2014. Helsingin Energia testaa mustaa pellettiä. Maaseudun tulevaisuus 4.4.2014. Saatavissa: <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/mets%C3%A4/helsingin-energia-testaa-mustaa-pelletti%C3%A4-1.59982> [viitattu 19.3.2015].

Kapasiteetti kasvuun Mantsinen 120 avulla. Mantsinen Group. Saatavissa: <http://www.mantsinen.com/fi/tuotteet/materiaalinkasittelykoneet/120/schuster/> [viitattu 5.5.2015].

Kasvihuonekaasut. 2014. Ilmatieteen laitos. Päivitetty 10.3.2014. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-tutkimus> [viitattu 12.9.2015].

Keeton, R. 2014. Europe's dysfunctional carbon-pricing system is keeping coal dirt cheap. Next City. Päivitetty 20.5.2014. Saatavissa: <https://next-city.org/daily/entry/europes-dysfunctional-carbon-pricing-system-is-keeping-coal-dirt-cheap> [viitattu 26.5.2015].

Kiinan päästöt voivat lähteä laskuun ennakoitua aiemmin. 2015. Pohjalainen 8.6.2015. Saatavissa: <http://www.pohjalainen.fi/uutiset/ulkomaat/kiinan-p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6t-voivat-l%C3%A4hte%C3%A4-laskuun-ennakoitua-aiemmin-1.1849380> [viitattu 8.9.2015].

Kivihiihi. Energiateollisuus ry. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/kivihiihi> [viitattu 24.3.2015].

Laivaliikenteen yksikköpäästöjen määrittäminen. 2009. LIPASTO liikenteen päästöt. Päivitetty 14.4.2009. Saatavissa: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavari liikenne/vesiliikenne/maaritysperusteet_tavara_vesi.htm [viitattu 4.5.2015].

Maantiekuljetukset – käyttötilanteet. Logistiikan Maailma. Saatavissa: http://www.logistiikanmaailma.fi/wiki/Maantiekuljetukset_%E2%80%93_k%C3%A4ytt%C3%B6tilanteet [viitattu 8.5.2015].

Mantsinen Group. Saatavissa: <http://www.mantsinen.com/fi/yritys/> [viitattu 21.4.2015].

du Mez, H. & van Klaveren-Pleumeekers, N. 2013. Rotterdam: Hub port for wood pellets. World Biomass. The International Review of the Biomass Industry. Saatavissa: <http://www.rotterdamclimateinitiative.nl/documents/Documents/World-Biomass-PortofRotterdam.pdf> [viitattu 11.9.2015].

Paavola, P. 2015. Puhelinhaastattelu 19.5.2015.

Pakkanen, A. 2015. Volvo Truck Center. Haastattelu 7.5.2015.

Pelletin tuotanto. Bioenergia ry. Saatavissa: <http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20tuotanto> [viitattu 19.3.2015].

Port in general. Port of Rotterdam. Saatavissa: <http://www.portofrotterdam.com/en/Port/port-in-general/Pages/default.aspx> [viitattu 10.4.2015].

Pyöräkuormaajat. Suomen Rakennuskone Oy. Saatavissa: <http://www.sro.fi/Koneet/Pyorakuormaajat> [viitattu 24.6.2015].

Päästökauppa. Energiateollisuus ry. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ilmastonmuutos/paastokauppa> [viitattu 26.3.2015].

Päästökauppakausi 2013–2020. Energiateollisuus ry. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ilmastonmuutos/paastokauppa/paastokauppakausi-2013-2020> [viitattu 26.3.2015].

Raaka-aineet. Bioenergia ry. Saatavissa: <http://www.pellettienergia.fi/Raaka-aineet> [viitattu 11.9.2015].

Rail industry and market. 2015. Globaltrans. Päivitetty 6.5.2015. Saatavissa: <http://www.globaltrans.com/investors/rail-industry-market/industry-overview/> [viitattu 8.5.2015].

Raskaan ajoneuvokaluston energiakäyttö. 2013. Taloudellisen ajotavan koulutus. Motiva Oy. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/3404/Taloudellisen_ajotavan_koulutus.pdf [viitattu 16.4.2015].

Rikkidirektiivi ja laivapolttoaineet. Öljy- ja biopolttoaineala ry. Saatavissa: <http://www.oil.fi/fi/ymparisto/rikkidirektiivi-ja-laivapolttoaineet> [viitattu 21.4.2015].

Russian electricity market. 2014. Enerdata. Energy research estore. Saatavissa: <https://estore.enerdata.net/power-market/russia-electricity-report.html> [viitattu 15.4.2015].

Similä, L. 2012. Energiahyödykkeiden merikuljetukset. VTT technology 22. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T22.pdf> [viitattu 16.4.2015].

Sonninen, H. 2014. Torrec-biohiiliteknologia mahdollistaa puun käytön hiililaitoksissa. Miktech Oy. Päivitetty 13.10.2014. Saatavissa: http://biosaimaa.fi/wp-content/uploads/2014/10/Torrec_Sonninen.pdf [viitattu 21.4.2015].

Spellman, F.R. 2012. Forest-based biomass energy, concepts and applications. Yhdysvallat: Taylor & Francis Group, LLC. CRC Press.

Tieteen termipankki. 2014. Hiilidioksidiekvivalentti. Päivitetty 4.12.2014. Saatavissa: <http://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:hiilidioksidiekvivalentti> [viitattu 12.9.2015].

Torrefied wood pellets. 2014. Solvay biomass energy. Saatavissa: <http://solvaybiomassenergy.com/our-products/torrefied-wood-pellets/> [viitattu 14.4.2015].

Työkoneiden päästöt. 2013. Opasnet. Terveysten ja hyvinvoinnin laitos. Päivitetty 27.11.2013. Saatavissa: http://fi.opasnet.org/fi/Ty%C3%B6koneiden_p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6t [viitattu 21.4.2015].

Valuuttakurssit. 2015. Suomen Pankki. Päivitetty 11.9.2015. Saatavissa: <http://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/valuuttakurssit/Pages/default.aspx> [viitattu 12.9.2015].

Venäjä - dieselin hinnat. GlobalPetrolPrices. Saatavissa: http://fi.globalpetrolprices.com/Russia/diesel_prices/ [viitattu 21.4.2015].

What is torrefaction. Topell energy. Saatavissa: <http://www.topellenergy.com/technology/what-is-torrefaction/> [viitattu 16.4.2015].

Wilén, C., Sipilä, K., Tuomi, S., Hiltunen, I., Lindfors, C., Sipilä, E., Saarenpää, T-L & Raiko, M. 2014. Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry. VTT technology 163. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T163.pdf> [viitattu 15.4.2015].

Virkkunen, M., Flyktman, M. & Raitila, J. 2012. Puuhiilen tuotanto Suomessa – mahdollisuudet ja haasteet. VTT. Päivitetty 9.2.2012. Saatavissa: http://www.balbic.eu/fi/ajankohtaista/2012/fi_FI/aloitusseminaarin_esitykset/_files/87145337845471165/default/Puuhiilen_tuotanto_Suomessa_VTT.pdf [viitattu 16.4.2015].

Vuorinen, L. 2013. Tuotantotuet biomassan ja kivihiilen yhteispoltolla tuotetulle sähkölle. Alankomaiden, Belgian, Puolan, Saksan, Tanskan ja Yhdistyneen kuningaskunnan tuotantotukien vertailu. Julkaisu 1/2013. Päivitetty 30.8.2013. Saatavissa: <http://www.miktech.fi/media/getfile.php?file=345> [viitattu 30.6.2015].

Yhdistetyt kuljetukset ja intermodaalikuljetukset, Logistiikan Maailma. Saatavissa: http://www.logistiikanmaailma.fi/wiki/Yhdistetyt_kuljetukset_ja_intermodaalikuljetukset [viitattu 8.5.2015].

Yhdysvallat kiristää tavoitteitaan hiilidioksidipäästöjen leikkaamiseksi. 2015. Helsingin Sanomat 3.8.2015. Saatavissa: <http://www.hs.fi/ulkomaat/a1438484907662> [viitattu 4.8.2015].

Ylivoimaista polttoainetehokkuutta. Mantsinen Group. Saatavissa: <http://www.mantsinen.com/fi/tuotteet/materiaalinkasittelykoneet/120/ylivoimaista-polttoainetehokkuutta/#ad-image-0> [viitattu 21.4.2015].

Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. Öljy- ja biopolttoaineala ry. Saatavissa:
<http://www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta> [viitattu 16.4.2015].

POLTTOAINEIDEN JA LIIKENNEMOLTTTOAINEIDEN OMINAISUUDET**Musta pelletti**

| | | |
|--------------------------|---|-----|
| - energiatiheys | 4,8 MWh/i-m ³ | (1) |
| - irtotiheys | 800,0 kg/i-m ³ | (1) |
| - tehollinen lämpöarvo | 6,0 MWh/t | (1) |
| tuotanto: | | |
| - esilämmitys, lämmöllä | 131,4 kWh/t _{musta pelletti} | (2) |
| - kuivatus, lämmöllä | 1 836,6 kWh/t _{musta pelletti} | (2) |
| - torrefiointi, lämmöllä | 216,3 kWh/t _{musta pelletti} | (2) |
| - jauhatus, sähköllä | 11,0 kWh/t _{musta pelletti} | (2) |
| - pelletointi, sähköllä | 128,3 kWh/t _{musta pelletti} | (2) |

Kivihili

| | | |
|------------------------|---------------------------|-----|
| - energiatiheys | 5,6 MWh/i-m ³ | (1) |
| - irtotiheys | 850,0 kg/i-m ³ | (1) |
| - tehollinen lämpöarvo | 6,6 MWh/t | (2) |

Diesel ja kevyt polttoöljy

| | | |
|--|------------------------|-----|
| - tehollinen lämpöarvo, diesel | 11,5 MWh/t | (1) |
| - tiheys, diesel | 0,845 t/m ³ | (1) |
| - tehollinen lämpöarvo, kevyt polttoöljy | 11,8 MWh/t | (1) |

Kostea sahanpuru

| | | |
|--------------------|---|-----|
| - irtotiheys | 300,0 kg/i-m ³ | (1) |
| - sahanpurun tarve | 13,2 i-m ³ _{sahanpuru} /t _{musta pelletti} | (2) |
| - energiatiheys | 0,575 MWh/i-m ³ | (1) |

HINNAT**Diesel**

| | | |
|----------------------------|-----------|-----|
| - diesel hinta, Suomi | 1,351 €/l | (1) |
| - diesel hinta, Venäjä | 0,61 €/l | (1) |
| - diesel hinta, Alankomaat | 1,34 €/l | (1) |

Sähkö

| | | |
|----------------------------------|-------------|-----|
| - teollisuussähkön hinta, Suomi | 0,073 €/kWh | (1) |
| - teollisuussähkön hinta, Venäjä | 0,063 €/kWh | (1) |

Laivapolttoöljy

| | | |
|--------------------------|------------|-----|
| - laivapolttoöljyn hinta | 485,00 €/t | (1) |
|--------------------------|------------|-----|

Raaka-aine

| | | |
|--------------------------------|-------------|-----|
| - raaka-aine, kostea sahanpuru | 17,70 €/MWh | (1) |
| - raaka-aine, kivihili | 8,07 €/MWh | (1) |

KULJETUSVÄLINEET**Täysperävaunuyhdistelmä**

| | | |
|---------------------------------------|----------------------|-----|
| - polttoaineen keskikulutus | 0,525 l/km | (2) |
| - polttoaineen kulutus tyhjäkäynnillä | 5,0 l/h | (1) |
| - maksimikuorman purkuaika | 1 h | (1) |
| - kuorman maksimipaino | 58,8 t | (1) |
| - kokonaistilavuus | 150,0 m ³ | (1) |
| - massa, musta pelletti | 58,8 t | (2) |
| - tilavuus, musta pelletti | 73,5 m ³ | (2) |
| - massa, kostea sahanpuru | 45,0 t | (2) |
| - tilavuus, kostea sahanpuru | 150,0 m ³ | (2) |
| - matkan pituus sahalta tehtaalle | 100,0 km | (3) |
| - matkan pituus tehtaalta satamaan | 100,0 km | (3) |

Juna

| | | |
|-------------------------------------|-------------|-----|
| - sähkön kulutus | 49,0 kWh/km | (1) |
| - kuorman maksimipaino | 1 407,0 t | (2) |
| - matkan pituus louhimolta satamaan | 5 000,0 km | (3) |

Pyöräkuormaaja

| | | |
|------------------------|-----------|-----|
| - polttoaineen kulutus | 16,4 l/h | (1) |
| - käsittelyteho | 250,0 t/h | (1) |

Satamanosturi

| | | |
|------------------------|-----------|-----|
| - polttoaineen kulutus | 16,0 l/h | (1) |
| - käsittelyteho | 500,0 t/h | (1) |

Laiva

| | | |
|--------------------------------------|------------------|-----|
| - polttoaineen kulutus | 41,157 kg/km | (1) |
| - polttoaineen kulutus | 0,0049 kg/tkm | (1) |
| - lastin enimmäiskoko | 10 000,0 t/rahti | (3) |
| - matkan pituus, Kotka - Rotterdam | 1 823,0 km | (1) |
| - matkan pituus, Pietari - Rotterdam | 1 981,0 km | (1) |

HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT

| | | |
|--|---|-----|
| - täysperävaunuyhdistelmä | 2,66 kgCO ₂ ekv/l _{diesel} | (1) |
| - sähköjuna | 0,0092 kgCO ₂ ekv/tkm | (1) |
| - pyöräkuormaaja | 2,685 kgCO ₂ ekv/l _{diesel} | (1) |
| - satamanosturi | 2,686 kgCO ₂ ekv/l _{diesel} | (1) |
| - laiva | 132,431 kgCO ₂ ekv/laiva km | (1) |
| - sähkö | 0,207 kgCO ₂ ekv/kWh | (1) |
| - polttoainekohtainen CO ₂ -päästökerroin, musta pelletti | 0,00 tCO ₂ /MWh | (1) |
| - polttoainekohtainen CO ₂ -päästökerroin, kivihiili | 0,341 tCO ₂ /MWh | (1) |
| - päästöoikeus, kivihiili | 11,23 €/t | (2) |
| - päästöoikeus, musta pelletti | 0,00 €/t | (2) |
| - päästökaupan päästöoikeus | 5,00 €/tCO ₂ | (1) |

⁽¹⁾ lähdeaineistossa annettu arvo⁽²⁾ laskemalla saatu arvo⁽³⁾ oletettu arvo