

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Matti Turunen

ALUELÄMMÖNTUOTANNON  
ELINKAARIYMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2020



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2020**  
**Energia- ja ympäristötekniikan**  
**koulutus**  
Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä  
Matti Turunen

Nimeke  
Aluelämmöntuotannon elinkaariympäristövaikutukset

Toimeksiantaja  
Karelia-ammattikorkeakoulu, UusiutuWat-hanke

Tiivistelmä

Opinnäytetyöni tavoite oli havainnollistaa hakkeella tuotetun aluelämmöntuotannon päästöjä, ja kuinka niitä kertyy hakeketjun eri vaiheissa. Tutkimuksessa hyödynnettiin elinkaarianalyysin metodeja, joiden avulla luotiin aluelämmöntuotantoa tuottavalle laitokselle päästökerroin tuotettua megawattituntia kohden.

Tutkimusmetodeina käytettiin tietojen keruussa haastatteluja sekä valmisaineistoa. Kerättyjen tietojen avulla luotiin SimaPro-ohjelmalla elinkaari, jolla laskettiin hakeketjun kuluttama energia sekä hiilidioksidiekvivalentti jokaista tuotettua megawattituntia kohden. Työhön sisältyy myös päästö- ja pienhiukkasmittaukset savukaasuista Enon alakylän aluelämpölaitokselta sekä niiden arvioiminen.

Hakkeella tuotetussa aluelämmössä päästöjä syntyy jokaisessa hakeketjun vaiheessa, mutta varsinkin polttolaitoksen merkitys korostuu, sillä se kulutti noin puolet hakeketjussa käytetystä energiasta ja käytetty energia tuotti myös suurimman osan päästöistä. Täten eniten energiankulutukseen ja päästöjen määrään voidaan vaikuttaa polttolaitoksella, sillä sen energian kulutus on suurin ja tämän energian tuotosta koostuu suurin osa päästöistä.

Kieli  
suomi

Sivuja 36  
Liitteet 3  
Liitesivumäärä 3

Asiasanat

Hake, elinkaariarviointi, hiilijalanjälki, aluelämmitys



**THESIS**  
**May 2020**  
**Energy and environmental engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Author  
Matti Turunen

Title  
Environmental lifecycle impacts of district heating  
Commissioned by  
Karelia university of applied sciences, UusiutuWat-project

Abstract

Goal of this thesis is to illustrate emission production within the life cycle of district heating produced with wood chips. Research uses life cycle analysis methods using which allowed creation of emission multiplier, per produced megawatt hour of energy.

Research methods used in this thesis include interviews with the staff members within all steps of the life cycle. Data used in the thesis also includes material from existing data-banks of SimaPro-application. With the data collected and existing data from SimaPro life cycle was produced in SimaPro-application with which could the emissions and energy consumption of the life cycle and each of its parts be calculated from. Thesis also includes emission- and particle measurements from the woodchip power plant and evaluation on them.

With district heating produced with wood chips emissions are created on every step of the life cycle. Thesis highlights the importance of the power plant has on emissions produced and energy consumed as it uses about half of the energy needed in entirety of the life cycle and produces over half of the emissions. Greatest results in lowering emissions can be achieved in the power plant.

Language

Finnish

Pages 36

Appendices 3

Pages of Appendices 3

Keywords

Woodchips, life cycle analysis, carbon footprint, district heating

## Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Hakkeella tuotettu aluelämpö.....	6
2.1	Aluelämmöntuotanto .....	6
2.2	Hakeketju.....	7
2.3	Palamisen prosessi.....	8
2.4	Polttotekniikka.....	9
2.5	Elinkaari .....	10
2.6	Elinkaarianalyysi .....	11
3	Tarkoitus ja tavoitteet.....	13
4	Aineisto ja menetelmät.....	15
4.1	Inventaarioanalyysi hakeketjusta .....	15
4.2	Elinkaari.....	18
4.3	Savukaasu ja pienhiukkasmittaukset .....	22
4.4	Hakkeen analysointi.....	24
5	Tulokset .....	26
5.1	Savukaasut ja pienhiukkaset .....	26
5.2	Lämmityspotentiaali .....	29
5.3	Kumulatiivinen energiantarve.....	30
6	Pohdinta.....	32
6.1	Savukaasumittausten ja polttoaineanalyysin arviointi .....	32
6.2	Elinkaarianalyysin tulosten arviointi .....	34
6.3	Luotettavuus .....	35
6.4	Jatkotutkimusmahdollisuudet.....	35
	Lähteet.....	36

## Liitteet

Liite 1	Kumulatiivisen energiantarpeen kulkukaavio
Liite 2	GWP 100a hiilidioksidiekvivalentin kulkukaavio
Liite 3	GWP 20a hiilidioksidiekvivalentin kulkukaavio

# 1 Johdanto

Toimeksianto opinnäytetyöhön tuli UusiutuWat-hankkeesta, jota toteutetaan Kareliala-ammattikorkeakoulun ja Suomen metsäkeskuksen yhteistyössä. Hankkeen tavoitteena on maaseudun elinkeinotoiminnan vahvistaminen ja monipuolistaminen parantamalla yritysten energiaomavaraisuutta, -tehokkuutta ja uusiutuvien energiaressurssien hyödyntämistä. Hanke toimii Pohjois-Karjalan alueella ja se keskittyy erityisesti maaseudun yrityksiin, joille pyritään parantamaan kilpailukykyä ja kannattavuutta uusiutuvilla energian lähteillä. Lisäksi hanke tähtää parempaan huoltovarmuuteen, ympäristöhyötyihin sekä aluekehityshyötyihin. [1.]

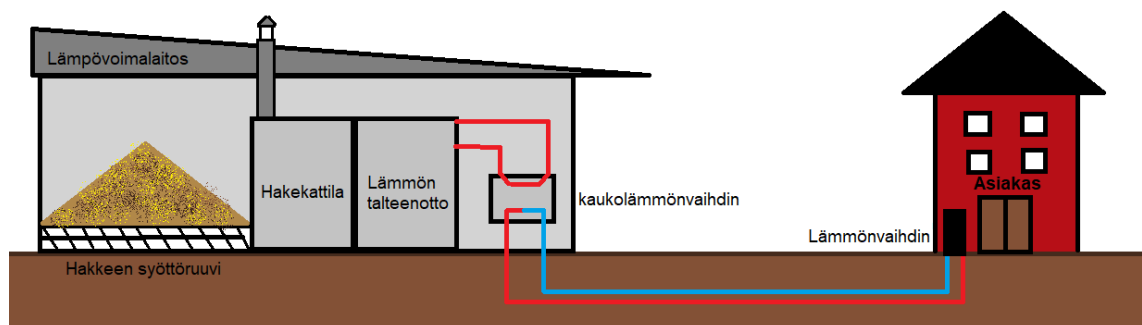
Työssä määritettiin hakkeella tuotetun lämmön elinkaari vaikutukset, yhdelle laitokselle, tuotettua megawattituntia kohden. Työhön kuuluu myös päästömittaukset savukaasuista ja pienhiukkasista. Työn mittaukset tehtiin Enon alakylän voimalaitokselle ja siihen liittyvät haastattelut, sekä tutustumiset tehtiin laitoksen hakeketjun työmaille. Työtä tehtiin laitoksen henkilökunnan mielenkiinnosta hakeketjun ja -ketjun kokonaisympäristö vaikutuksista. Työ auttaa tuomaan valoa hakeketjun päästöille muillakin osa-alueilla, kuin polton aiheuttamilta päästöiltä ja auttaa täten sen vertailuissa muiden energiamuotojen kanssa. Täysin vastaavaa tutkimusta ei ole saatavilla ja Pohjois-karjalassa hakkeen ollessa isossa osassa lämmöntuotantoa on työ varsin hyödyllinen tiedonlähde usealle varsinkin pienemmälle lämpöyritykselle. Selvitettyjä tietoja voidaan myös käyttää pohjana päästövähentämissuunnitelmissa, sekä viestinnässä.

## 2 Hakkeella tuotettu aluelämpö

### 2.1 Aluelämmöntuotanto

Aluelämmön tuotannolla käsitellään kaukolämpöä tuottavia voimalaitoksia. Kaukolämpö on Suomessa yleisin lämmitysmuoto kaupungeissa, sillä se on edullisempaa erityisesti tiheään rakennetuilla alueilla ja suurikokoisissa kiinteistöissä. Kaukolämpöä tuottavat voimalaitokset ovat voivat olla: CHP-laitoksia (combined heat and power), jotka tuottavat sähköä ja lämpöä, tai aluelämpölaitoksia, jotka tuottavat pääasiallisesti vain lämpöenergiaa. Lämpöenergiaa voidaan myös ottaa talteen teollisuuden hukkalämmöstä. [13.]

Lämpöenergia kuljetetaan kaukolämpöverkossa, joka koostuu eristetyistä putkista, joiden sisällä kiertää vesi. Vesi kierrätetään lämmityskohteisiin, jossa se luovuttaa lämpöenergiaa kohteen lämmittämiseksi, tämän jälkeen viilentynyt vesi kierrätetään takaisin lämpölaitokselle uudelleen lämmittämistä varten. Normaali kaukolämpöveden lämpötila on 65–115 °C menoputkessa ja 40–60 °C paluuputkessa. [13.] Työssä tutkittava lämpövoimalaitos on Enon alakylän voimalaitos, joka tuottaa pääasiallisesti vain lämpöä. Polttotekniikkana on kaksi kappaletta arinakattiloita, teholtaan 1,2 MW ja 0,8 MW ja niissä poltetaan haketta. Varapolttimona on 1MW:n tehoinen öljypoltin.



Kuva 1. Kaukolämmön toimintaperiaate.

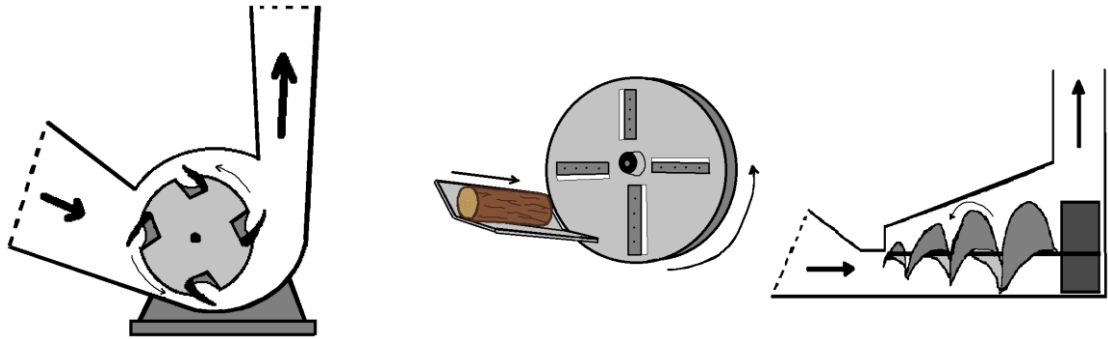
## 2.2 Hakeketju

Hakeketju on koko prosessi, jonka puu käy läpi, kun siitä tuotetaan energiaa hakkeena. Hakeketju alkaa puiden hakkuusta metsässä, mutta metsäkoneiden kulutuksiin lasketaan mukaan jo kulut sekä päästöt, jotka syntyvät laitteiden kuljetuksesta työmaalle. Puiden kaatamisen jälkeen tulee niiden kuivaus, joka tapahtuu yleisesti tien varressa kasakuivauksena ja siirto haketustyömaalle. Haketuksen kulutuksiin lasketaan myös mukaan laitteiston työmaalle kuljetuksen kulut. Yleisesti Suomessa haketustavat lajitellaan hakkurityypin mukaan, näitä ovat: laikkahakkuri, rumpuhakkuri ja kartioruuvihakkuri (kuva 2) [14].

Rumpuhakkurit toimivat pyörittämällä terärumpua, johon puutavara syötetään ja rummun terät pilkkovat tavaran hakkeeksi. Rumpuhakkurit tuottavat laadultaan tasaisempaa tavaraa kuin muut hakkurit ja sietävät parhaiten epäpuhtauksia, minkä vuoksi suuren kokoluokan hakkurit ovat yleisesti rumpuhakkureita. Laikkahakkurissa tavara syötetään vinosti laikkaa vasten, jossa olevat terät pilkkovat aineksen hakkeeksi. Laikkahakkurit sietävät huonosti epäpuhtauksia, mutta ovat edullisia ja siksi suhteellisen yleisiä pienluokan haketuksessa. Ruuvihakkureissa tavara syötetään vauhtipyörään kiinnitettyä kartioruuviterää vasten, joka hakettaa syötetyn tavaran. Ruuvihakkurit tuottavat vaihtelevan laatuista haketta isommalla palakoolla kuin muut hakkurityypit, ovat herkkiä epäpuhtauksille ja työläitä huoltaa. Ruuvihakkurit ovat kuitenkin suhteellisen edullisia. [14.]

Työssä tarkasteltu Kesla 1060c hakkuri on tyypiltään rumpuhakkuri. Haketuksen jälkeen hake kuivataan, minkä jälkeen se kuljetetaan voimalaitokselle. Tilanteesta riippuen hake saatetaan välissä myös varastoida myöhempää käyttöä varten. Mikäli haketta joudutaan varastoimaan, voidaan sitä joutua kuivaamaan myös keinotekoisesti, jotta vältetään suuremmilta kuiva-aine tappioilta. Voimalaitoksella hake poltetaan kattilassa, josta otetaan talteen lämpöenergia. Lopuksi puusta jää jäljelle tuhka, jonka loppusijoitus työssä tarkisteltavassa tilanteessa on metsälannoite. Tuhkaa kuljetetaan traktorilla

loppusijoituskohteeseen kerran kuussa. Haketuksen yhteydessä puhutaan yleisesti kiinto-, pino- ja kuutiometreistä puutavaran suhteen. Kiintokuutiometrillä tarkoitetaan kuutiometrillistä umpipuuta, pinokuutiolla kuutiometriä kasattuja puunrunkoja tai halkoja ja irtokuutiometrillä tarkoitetaan kuutiometriä hakettua puuta. Yksi kiintokuutio-m<sup>3</sup> vastaa tilavuudeltaan keskimäärin 1,49 pinokuutiometriä puuta ja 2,5 irtokuutiometriä puuta. [26.]



Kuva 2. Rumpu-, laikka- ja kartioruuvihakkurin toimintaperiaatteet.

### 2.3 Palamisen prosessi

Palaminen on aineen kemiallista yhtymistä happeen. Palaminen on jaoteltavissa useisiin vaiheisiin, jotka alkavat polttoaineen lämpenemisellä kuivumislämpötilaan. Puun palaessa ensin palaa hiili, josta syntyy kattilassa hiilimonoksidia. Tätä seuraa pyrolyysi, jossa orgaanisia kiinteitä aineita hajoaa korkean lämmön vaikutuksesta. Pyrolyysissä syntynyt hiilimonoksidi pitoinen kaasu poltetaan ylempänä kattilassa, minkä jälkeen jäännöshiili palaa tai kaasuuntuu. Palamista hallitaan hapensyöttämällä, jolloin tarkastellaan lambda -arvoa, joka on ilman ja polttoaineen suhdeluku. [15.]

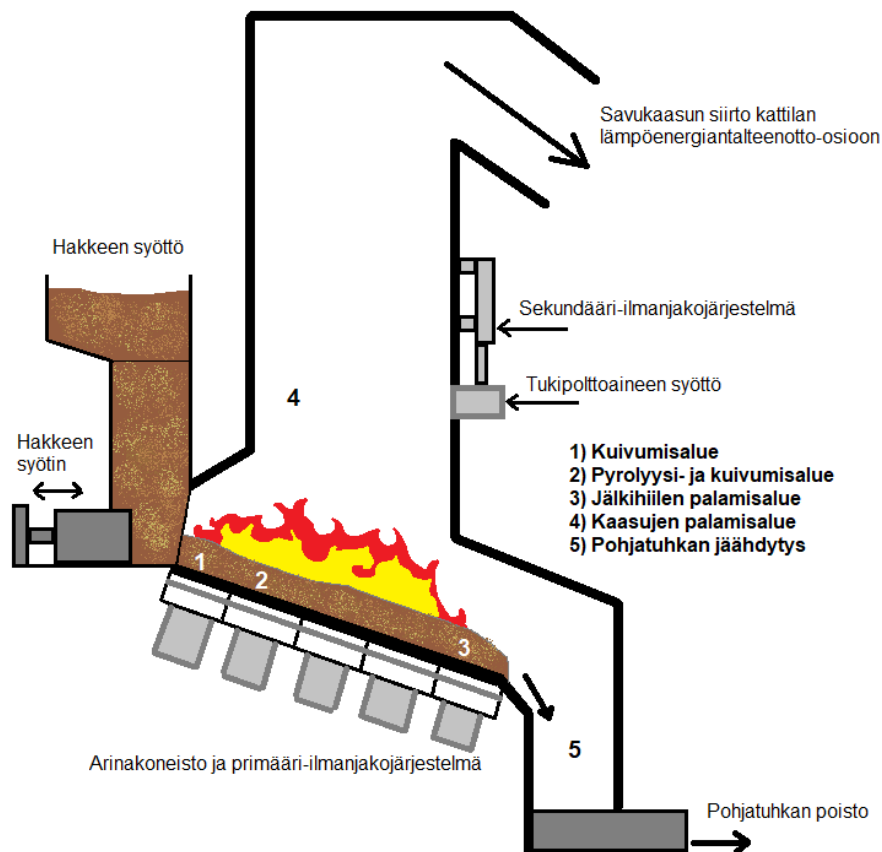
Oikein säädetty hapen määrä parantaa hyötysuhdetta pitämällä riittävästi ilmaa paloprosessissa ja minimoi ylimääräisen hapen hukkaaman lämpöenergian. Hyötysuhteella kuvataan, paljonko polttoaineen potentiaalisesta energiasta voidaan hyödyntää lopulliseen tarkoitukseen. [15.] Palaminen aiheuttaa päästöjä ilmakehään hiilimonoksidin, typpioksidien, hiilidioksidin ja pienhiukkasten muodossa. Hiilimonoksidi, eli häkä, on myrkyllinen hajuton ja mauton kaasu [28]. Typpioksidi



on alahengitysteitä ärsyttävä kaasu [16]. Pienhiukkaset aiheuttavat keuhko-, sydän- ja verisuonisairauksia [27].

## 2.4 Polttotekniikka

Työssä tarkasteltava kattila on arinakattila (kuva 3). Arinakattilat ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia. Niissä polttoaine syötetään arinalle, jossa palamisen vaiheet käydään läpi ja arinan alapäästä valuu ulos tuhka. Palamisilma syötetään arinasauvojen välissä sijaitsevista ilma-aukoista sekä tarpeen mukaan ylempänä kattilassa sijaitsevista lisäilma-aukoista, mikäli se on kaasujen polttoa varten tarpeellista. Arinoiden välistä tuleva ensiöilma tunnetaan myös nimellä primääri-ilma ja myöhemmin syötettävä lisäilma vastaavasti nimillä sekundääri- ja tertiääri-ilma. Arinoita on mahdollista liikuttaa polttoaineen tasaamista ja liikuttamista varten. Joissakin kattiloissa voi olla kiinteät arinat. Arinakattilan etuja ovat edulliset investointikustannukset sekä monipuolinen käypä polttoaine, sillä arinakattilat soveltuvat kaikkien kiinteiden polttoaineiden polttoon. Arinakattilat ovat yleisesti käytössä alle 10 MW:n luokassa, sillä suuremmassa kokoluokassa leijupetikattiloiden korkeammat investointi- ja ylläpitokustannukset kattautuvat paremmalla hyötysuhteella. [17.]



Kuva 3. Arinakattilan toimintaperiaate.

## 2.5 Elinkaari

Elinkaarella tarkoitetaan tuotteen koko käyttöä sen valmistamisesta jätteiden loppusijoitukseen asti. Hakkeella elinkaari alkaa hakkuiden suunnittelusta ja etenee puiden hakkuulla, kuivauksella, haketuksella, hakkeen kuivauksella, poltolla ja lopuksi tuhkan loppusijoituksella. Väliin kuuluvat myös kaikki mahdolliset kuljetukset, joita puutavara käy läpi. Jokainen elinkaaren vaihe sisältää omat päästönsä. Hyvin suunnitelluilla hakkuilla voidaan säästää huomattavat määrät polttoainetta laitteiden kuljetuksista, ja helppokulkuinen leimikko parantaa laitteiden tuottavuutta. Samoin haketuksien suunnittelulla on vastaavat hyödyt, sillä suurin

osa haketuksista on tienvarsihaketuksia, joiden suunnittelussa voidaan säästää logistiikasta aiheutuviissa kuluissa ja päästöissä.

## 2.6 Elinkaarianalyysi

Työssä käytetty Simapro-ohjelma on kehitetty elinkaarianalyysiä varten. Työssä sitä käytettiin hakeketjun elinkaaren mallintamiseen, jossa nähtiin päästöjen kumulatiivinen kasvu, lähteet sekä energian tarve hakeketjun eri vaiheissa. SimaPro:n tietopankista työssä käytettiin prosessia poltosta, Enon aluelämpölaitosta vastaavassa laitoksessa. Tietopankkia jouduttiin käyttämään, sillä päästöistä oli mahdollista kerätä vain pitoisuudet, muttei kokonaispäästöjä lämpölaitokselta. Muiden prosessien, kuten haketuksen, laitteista päästötiedot kerättiin Liikenteen päästöinventaarion sivuilta, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n tekemästä tietokannasta.

Aluelämmön tuotannolla, jota työssä käsiteltiin, tarkoitetaan pienen mittaluokan (alle 5MW) laitoksia, jotka tuottavat ainoastaan lämpöenergiaa lähialueelle. Lämpöenergia kuljetetaan aluelämpöputkistoa pitkin lähialueiden rakennuksiin. Polttoaineena kattiloissa toimii hake ja kattilat itsessään ovat arinakattiloita. Toimeksiannossa tarkasteltiin elinkaariympäristövaikutuksia koko hakeketjulta. Hakeketju kartoitettiin kannosta kattilaan periaatteella. Vaikutuksien laskenta aloitettiin jo koneiston kuljetuksesta hakkuualueelle ja ketjuun laskettiin tämän jälkeen koneiden omat päästöt hakkuun, haketuksen ja hakkeen kuljetuksen aikana. Lisäksi kerättiin tiedot polton savukaasuista ja tuhkan kuljetuksista sekä loppusijoituksesta.

Näistä luotiin elinkaari, josta nähdään kuinka, paljon syntyy päästöjä koko ketjun aikana jokaista tuotettua energiayksikköä kohden. Elinkaarianalyysiä tehdessä on käytävä läpi neljä vaihetta:

- tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely
- inventaarioanalyysi
- vaikutusarviointi
- tulosten tulkinta

Määrittelyvaiheessa käydään läpi elinkaarianalyysin tavoitteet sekä laajuus. Opinnäytetyössä näkökulmana ovat ympäristövaikutukset. Inventaarianalyysin vaiheessa systeemi jaetaan osasysteemeihin (haketus muuttuu koneiden kuljetukseksi, koneiden käytöksi sekä hakkeen kuljetukseksi), jolloin tiedon keruu helpottuu ja kokonaisvaikutukset ovat riittävän tarkkoja sekä vertailukelpoisia vastaavien tutkimusten kanssa. Vaikutusarvioinnissa on kolme osaa itsessään: luokittelu, kvantifiointi ja arvottaminen. Luokittelussa tiedot luokitellaan vaikutusten mukaan, minkä jälkeen kvantifioinnissa vaikutusten suuruus määritetään ja arvottamisessa vaikutukset järjestetään painoarvon mukaan. [4.]

### 3 Tarkoitus ja tavoitteet

Tavoitteena opinnäytetyöllä on parantaa ymmärrystä hakkeella tuotetun lämmön päästöistä, joka onnistuu ympäristövaikutusten mallinnuksella hyödyntäen elinkaariarvioinnin menetelmiä. Tällä luotiin vertailukelpoista dataa muihin lämmitysmenetelmiin ja niiden ympäristörasitukseen nähden. Yleisesti puupolttoaineet nähdään hiilineutraaleina polttoaineina, eikä tutkimuksissa niiden käytöstä oteta välttämättä aina huomioon koko hakeketjua, jolla polttoaine on tuotettu ja kuljetettu laitokselle. Työssä tarkasteltiin yhtä laitosta, minkä hakeketjulle mallinnettiin elinkaari laitokselta kerätyistä tiedoista, missä mahdollista, sekä tietopankkien tiedoista.

Opinnäytetyöllä havainnollistettiin koko hakeketjun kuluttamaa energiaa sekä sen tuottamia päästöjä alkaen puun kaadosta jatkuen tuhkan loppusijoitukseen saakka. Työ mallinsi vaihekohtaisesti energian kulumisen sekä päästöjen tuoton aluelämmön tuottoprosessissa. Työ antoi päästöille sekä energian kulutukselle vertailukelpoisen yksikön muiden polttoaineiden ja lämmitysmuotojen kanssa vertailtavaksi.

Työn tutkimuskysymyksinä olivat:

- Kuinka paljon hiilidioksidiekvivalenteja päästöjä syntyy aluelämmöntuotannosta?
- Kuinka paljon energiaa kuluu aluelämmöntuotannossa?
- Kuinka päästöt ja energian kulutus jakautuvat hakeketjun eri vaiheissa?
- Missä hakeketjun kohdissa on eniten parannettavaa päästöjen osalta ja missä kohdin niihin voidaan tehokkaimmin vaikuttaa?

Tavoitteisiin työssä vastattiin keräämällä tietoa hakeketjun eri kohteista tutustumiskäynneillä. Näillä käynneillä kerättiin tietoja käytetystä laitteistosta, niiden tuottavuudesta, päästöistä sekä kuluista. Tietoja, joita ei voitu kerätä riittävän tarkasti tai mitata käytössä olevalla laitteistolla, kerättiin valmiista tietokannoista, joista valitaan mahdollisimman vastaavat laitteet ja käyttökohteet. Tiedot kerättiin

yhteen SimaPro-ohjelmaan, jonne elinkaari mallinnettiin ja ohjelmalla saatiin laskettua elinkaaren ympäristörasitukset sekä hiilijalanjälki. Lisäksi osana opinnäytetyötä suoritettiin päästömittaukset Enon alakylän aluelämpölaitoksella, millä saatiin tietoa päästöpitoisuuksista. Työssä esitellään hakeketjussa kulunut energia yhtä tuotettua megawattituntia aluelämpöä kohden, samoin kuin päästöt esitellään yhtä tuotettua megawattituntia (aluelämpöä) kohden. Työ rajautui yhden hakeketjun tutkimiseen rajallisella määrällä dataa, se on tästä syystä parhaimmillaan vertailukohtana vastaaville tuleville tutkimuksille.

## 4 Aineisto ja menetelmät

### 4.1 Inventaarioanalyysi hakeketjusta

Inventaarioanalyysi, eli tarvittavien tietojen keräys elinkaaren mallintamista varten suoritettiin tutustumiskäynneillä. Niiden yhteydessä voimalaitoksen ylläpitäjiltä, konekuskailta ja muilta työntekijöiltä kerättiin tietoa käytössä olevista laitteista ja niiden päästöistä sekä kuluista. Samoin yleiset työmäärät, tuottavuustiedot, kuljetusmatkat laitteille sekä puutavaralle selvitettiin samojen haastattelujen yhteydessä. Tarvittavia lisätietoja kerättiin sähköpostitse sekä puhelimitse. Haastatteluja tehtiin hakkuulla sekä haketustyömaalla ja sen lisäksi voimalaitoksella savukaasumittauksien yhteydessä. Työkoneiden päästöjä ei ollut mahdollista mitata käytössä olevalla kalustolla, joten työssä käytetyt tiedot ovat Lipasto liikenteen päästöt-tietokannan tuloksia vastaavien koneiden tiedoilla. Kattilan päästöt ovat SimaPro-ohjelman tietokannan tuloksia kokoluokaltaan sekä iältään vastaavan kattilan ja polttoaineen päästöistä.

Enon Alakylän voimalaitoksella oli kaksi hakekattilaa, jotka olivat teholtaan 1,2 MW ja 0,8 MW. Kattiloiden hyötysuhde oli 80 % - 90 %. 5 vuoden keskiarvolla laitos kulutti 11700 irtokuutiota haketta vuodessa ja tuotti 6600 MWh energiaa vuodessa. 3 vuoden keskiarvolla laitos kulutti 103000 kWh sähköä vuodessa. Lisäksi laitoksella oli aurinkosähköpaneelit, jotka tuottivat 12760 kWh sähköä vuonna 2018, josta verkkoon myytiin 4587 kWh. Huomioitavia kulutuksia laitoksella oli myös tuhkan kuljetus. Tuhka kuljetettiin noin 15 kilometrin päähän metsälannoitteeksi. Tuhka kuljetettiin 100 hv traktorilla, joka kulutti 15 l/h ja kulki noin 30 km/h, jolloin koko kuljetuslenkki kulutti noin 15 litraa polttoainetta. Tuhkaa kuljetettiin noin kerran kuussa.

Hakkuutyömaalle tehtiin tutustumiskäynti ja konekuljettajan haastattelu 5.4.2019. Haastattelulla kerättiin konekuljettajalta tiedot koneessa kuluvista aineista ja osista sekä laitteen tuottavuudesta ja käyttöajasta. Työkoneena toimi Komatsu 901tx c93 (kuva 4).

Laitteiden kuljetusmatkat työmaille vaihtelivat reilusti, mutta kuljetuskoneisto joutui jokaisella kerralla ajamaan 100 kilometrin huoltokierroksen kaikille laitteille. Vastaavasti hakkuulaitteistojen kuljetustiheys vaihteli reilusti työmaiden koon mukaan. Hakkuina toimivat suurimmilta osin energiapuuleimikot ja vähäisiltä määrin kuitupuuleimikot. Hakkuutähteeksi jäivät alle 3 cm paksuiset latvat ja oksat. Suurimpia tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat maasto, puiden keskipaksuus, poistuma ja hakkuiden välimatkat.

Komatsu 901tx c93 harvesteri (kuva 4) tuotti 10 mottia kaadettua puutavaraa tunnissa ja kulutti 3.2 litraa polttoöljyä kaadettua kiintokuutiota kohden. Muita kuluvia aineita laitteessa olivat:

- 400 g vaseliinia / 20 h
- 1 kg keskusvoiteluainetta / 100 h
- 24 litraa koneöljyä / 500 h
- 300 litraa hydraulikkaöljyä / 2000 h
- 160 litraa peräöljyä / 2000 h

Hakkuulaitteiden kuljetuslenkissä kului noin 30–40 litraa polttoainetta. Kaadetun tavarankuljetusmatkat olivat 35 km luokkaa ja kulutus kuljetusvälineillä oli 60–70 litraa 100 kilometriä kohden.



Kuva 4. Komatsu 901tx c93 harvesteri.



Haastattelu suoritettiin haketustyömaalle 27.5.2019. Haketuskoneena toimi Kesla c1060 rumpuhakkuri (kuva 5), joka oli asennettu kuorma-auton päälle ja haketti suoraan kuljetusauton lavalle. Tuotannon vaihtelutekijöinä olivat epäpuhtaudet, hakettava tavara ja kuinka se oli ajettu sekä talvisin lumi ja jää. Hakkurilla on tehoa 540 hevosvoimaa ja tuotokapasiteetti on 100–150 irtokuutiota tunnissa vaihdellen hakettavan aineksen laadusta. Vuotuisesti laitteella tuotetaan 25 000–30 000 irtokuutiota haketta, josta suurin osa myydään Enon energiakunnalle. Keskimäärin laite kuluttaa 0,5 litraa polttoöljyä hakettua irtokuutiota kohden.

Hakkurin kuljettaminen kuluttaa 30–40 litraa polttoöljyä 100 kilometriä kohden ja kuljetusvälit vaihtelevat reilusti, mutta ovat yleisesti alle 20 km. Hakkeen kuljetus hoidetaan kuorma-autolla, johon mahtuu 55 irtokuutiota haketta. Hakkeen kuljetus välimatkat vaihtelevat työmaan sijainnin perusteella ja kuljetuskalusto kuluttaa 30–40 litraa dieseliä 100 km matkalla. Samoin haketustyömaan kesto vaihtelee paljon alle päivän mittaisista työmaista yksittäisiin viikkoihin samalla työmaalla. Hakkuri kuluttaa 20 kg vaseliinia ja 40 litraa moottoriöljyä vuodessa.



Kuva 5. Kesla c1060 hakkuri.

## 4.2 Elinkaari

Työssä hyödynnettiin SimaPro-ohjelmistoa elinkaaren mallintamiseen sekä sen tietokannasta löytyviä tietoja käytettiin työssä aineistona. Tällaisia aineistoja olivat polttoaineiden, liukasteiden ja polton päästötiedot. Näitä tietoja jouduttiin käyttämään, sillä käytettävissä ei ollut tarvittavia laitteita näiden mittaamiseen sekä suuremmalta osin sen vuoksi, että tiedot olivat tarkkuudeltaan sekä luonteeltaan sellaisia, että ne eivät olleet työn tarkkuuteen merkittävästi vaikuttavia. Tietokannasta otetut tiedot olivat standardin mukaan mitattuja päästöjä. Suurin epätarkkuus, joka tämän takia on tärkeä huomioida, on polttokattilan päästöissä, sillä vaikka savukaasu mittaukset tehtiin laitoksella itsessään, käytettävissä ei ollut kaasun massavirtaa mittaavia laitteita, jonka vuoksi näistä päästöistä ei voitu laskea juuri kyseisen kattilan päästöjä kokonaisuudessa vain ne olivat hyödyllisiä ainoastaan varmentamaan päätasojen olevan samassa linjassa tietopankin tietojen kanssa. On oletettavissa, että laskennallisesti saatava massavirta ei olisi ollut tarkka, kun kyseessä on hakkeen palamisen mittaaminen, jossa polttoaineen sekä palamisen laatu vaihtelee jatkuvasti.

Ohjelmaan luotiin useita erillisiä prosesseja kuvastamaan hakeketjun eri vaiheita. Nämä prosessit yhdistettiin omaksi ketjukseen, johon laskettiin jokaisen ketjun vaiheen päästöt tuotettua megawattituntia kohden. Ohjelmaan luotiin useita erillisiä prosesseja kuvastamaan hakeketjun eri vaiheita. Nämä prosessit yhdistettiin omaksi ketjukseen, jossa laskettiin jokaisen ketjun vaiheen päästöt tuotettua megawattituntia kohden.

Elinkaarianalyysissä käytettiin GWP 20a ja GWP 100a-menetelmiä laskemaan kokonaispäästöjen vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen. GWP (global warming potential) eli lämmityspotentiaali, ilmaisee kasvihuonekaasun päästöjen aiheuttaman lämmitysvaikutuksen suhteellisen voimakkuuden tietylle ajanjaksolle verrattuna hiilidioksiidiin massayksikköä kohden [22]. GWP 20a laskee päästöt 20 vuoden jaksolle ja GWP 100a 100 vuoden jaksolle. Lyhytaikaiset päästöt, kuten metaani, korostuvat GWP 20a metodilla. Metodi laskee hiilidioksidiekvivalentin (CO<sub>2</sub>e) arvon kullekin päästölle, jonka avulla voitiin muodostaa hiilijalanjälki koko tuotantoketjulle.

Hiilijalanjälki on tuotteen, toiminnan tai palvelun aiheuttamien kasvihuonekaasujen määrä tietyn ajanjakson aikana ja se ilmaistaan hiilidioksidiekvivalentin avulla [21]. Hiilidioksidiekvivalentti on kasvihuonekaasupäästöjen yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasujen päästöjen vaikutus kasvihuoneilmaston voimistumiseen. Hiilidioksidiekvivalenttia varten päästöt yhteismitallistetaan eli muunnetaan ekvivalenttiseksi hiilidioksidiksi lämmityspotentiaalikerroimen avulla. [20.] Sekä GWP 20a, että GWP 100a käyttävät IPCC 2013 metodologia laskeakseen tulokset. IPCC (International Panel on Climate Change) määrittelee eri päästöjen potentiaalin ilmaston lämpenemiselle. Elinkaarianalyyssissä laskettiin myös kumulatiivinen energiantarve, joka kului yhden megawattitunnin (kaukolämpöä) tuottamiseen.

Hakeketju katsotaan alkavan työkoneiden tuomisesta hakkuulle ja työssä on laskettu, että harvesteria siirretään keskimäärin yhden kerran 40 tuntisen työviikon jälkeen. Tällöin kuljetuskalusto ajaa täyden 100 kilometrin lenkin, johon kuluu aikaa 75 minuuttia. Hakkuu koneiden tuottavuus on 10 pinokuutiota kaadettua tavaraa tuntia kohden puiden pinoaminen mukaan lukien. Puut kuljetetaan nosturillisella kuorma-autolla, jonka kantavuus on 16500 kg. Tämä vastaa 47,1 pinokuutiota puuta olettaen pinokuution tiheyden olevan  $350 \text{ kg/p-m}^3$  [3]. Puiden keskimääräinen kuljetusmatka on 35 km. Hakkuri siirretään kerran viikossa, 40 tuntisen työviikon jälkeen yleisesti 20 kilometrin päähän seuraavalle työmaalle, johon kuluu aikaa 15 minuuttia. Hakkuri tuottaa 125 irtokuutiota haketta tunnissa. Hake kuljetetaan tästä voimalaitokselle kuorma-autolla, johon mahtuu 55 irtokuutiota haketta. Huomioitavaa on, että hakeketjun kaikki vaiheet eivät ole jatkuvasti käytössä, sillä esimerkiksi hakkuri pystyisi hakettamaan voimalaitoksen vuosittaisen polttoainetarpeen monin kertaisesti vuoden aikana. Laskemisen mahdollistamiseksi on vain merkitty, että jokainen hakeketjun osa on täydellä tuotantokapasiteetilla juuri kyseisellä hetkellä.

Työssä energian tarve on laskettu tuotettua megawattituntia (aluelämpöä) kohden, jonka selvittäminen aloitettiin laskemalla tarvittavan hakkeen määrä. Hakkeen keskimääräisen kosteuden ollessa ~32 % voidaan kaavalla 1 laskea hakkeen tehollinen lämpöarvo.

$$Q_{\text{net, ar}} = Q_{\text{net, d}} \times ((100 - M_{\text{ar}})/100) - 0,02443 \times M_{\text{ar}}$$

$Q_{\text{net, ar}}$  = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg)

$Q_{\text{net, d}}$  = tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg)

$M_{\text{ar}}$  = kosteus saapumistilassa [p- %]

0,02443(MJ/kg) on veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (+ 25 °C)

Kaava 1. Kosteuden vaikutus energiapuun polton kannattavuuteen. [3.]

Kuiva-aineen lämpöarvona on käytetty 19,6 MJ/kg ja keskiarvollinen kosteus hakkeella näytteissä on 32,3 %, jolloin:

$$Q_{\text{net, ar}} = 19,2 \times ((100 - 32,025) : 100) - 0,02443 \times 32,025$$

$$Q_{\text{net, ar}} = 12,269 \text{ MJ/kg eli } 3,408 \text{ kWh/kg.}$$

Tällöin yhtä tuotettua megawattituntia kohden tarvitaan 293,43 kg haketta. Männyhakkeen tiheys 32,3 %:n kosteudessa on 214,5 kg/i-m<sup>3</sup>. Tiedoilla voidaan laskea, että haketta tarvitaan 293,43 kg : 214,5 kg/i-m<sup>3</sup> = 1,368 i-m<sup>3</sup>. Ottaen huomioon laitoksen 85 % hyötysuhteen nousee tarvittavan hakkeen määrä 1,609 i-m<sup>3</sup>. Näillä tiedoilla voidaan laskea SimaPro-ohjelmaa varten, jokaisen hakeketjun vaiheeseen kuluva aika, joiden avulla ohjelma laskee jokaisen vaiheen osuuden päästöistä, kun kunkin osa-alueen omat kulutukset on syötetty ohjelmaan. Laskemalla ensin viikossa tuotettavan hakkeen määrä saadaan pohjatieto, jolla voidaan laskea muita hakeketjun vaiheiden kuluttamia aikoja. Kun hakkuri tuottaa 125 irtokuutiota tunnissa tarvittavan hakkeen tuottaminen vie:

$$(1,609 \text{ i-m}^3) : (125 \text{ i-m}^3/\text{h}) = 0,012872 \text{ h}$$

Tarvittava hake : tuntituotanto = haketuksen osuus 1 MWh tuotannossa

Metsäkoneiden kuljetukseen työmaalle kuluu 1 tunti 15 minuuttia oletuksella, että harvesteria siirretään kerran viikossa täyden 40 tuntisen työviikon jälkeen. Työviikosta tarvittavan hakkeen tuottamiseen kuluu:

$$0,012872 : 40 = 0,000322 \text{ h}$$

Tarvittavan hakkeen haketus : työviikko = työkoneiden siirron osuus työviikon tuotannosta

josta voidaan laskea koneiden kuljetukseen kuluvan ajan osuus per tuotettu megawattitunti.

$$1,25 \text{ h} \times 0,0003218 = 0,000402 \text{ h}$$

Kuljetukseen kulunut aika x Tarvittavan hakkeen haketukseen kulunut osuus työviikosta = metsäkoneiden kuljetuksen osuus 1 MWh tuotannossa.

Puiden kaadossa ja kasaamisessa haketusta tuottavuus on 10 pinokuutiota tuntia kohden, joka vastaa 16,7 irtokuutiota. Tarvittava hakkeen tuottamiseen kuluu tällöin:

$$(1,609 \text{ i-m}^3) : (16,7 \text{ i-m}^3/\text{h}) = 0,0963 \text{ h}$$

Tarvittava hake : tuntituotanto = puiden kaatamisen ja pinoamisen osuus 1 MWh tuotannossa

Puiden kuljetus hakkuulta haketustyömaalle tapahtuu nosturillisella kuorma-autolla, jolla on kantavuutta 16,500 kg, joka vastaa 76,92 i-m<sup>3</sup>. Tarvittavan hakkeen osuus tästä kuormasta on 0,021. Täysi kuorma on ajettavissa 4,714 tunnin välein ja kuormaa oletetaan ajettavan 80 km/h nopeudella 35 km suuntaansa, jolloin koko lenkille tulee pituutta 70 km, johon kuluu 0,875 h. Tarvittavalle hakkeelle matkan osuudeksi jää:

$$((0,875 \text{ h}) : (76,92 \text{ i-m}^3)) \times 1,609 = 0,0183 \text{ h}$$

(Lenkkiin kuluva aika : kuorma-auton tilavuus) x tarvittava hakkeen määrä = puiden kuljetuksen osuus 1 MWh tuotannossa

Hakkuria oletetaan kuljetettavan haketustyömaalle kerran viikossa täyden 40 tunnisen työviikon jälkeen 20 km pituinen matka, johon kuluu 15 minuuttia 80 km/h nopeudella. Tällöin tarvittavan hakkeen tuotolle koostuvaksi osaksi jää:

$$(1,609 \text{ i-m}^3) : 5000 \times 0,25 \text{ h} = 0,00008 \text{ h}$$

Tarvittavan hakkeen määrä : viikkotuotanto x kuljetukseen kulunut aika = hakkuurin kuljetuksen osuus 1 MWh tuotannossa

Hakkeen kuljetus auto täyttyy 0,44 tunnin välein, jonka jälkeen se kuljettaa hakkeen laitokselle 20 km päähän ja ajaa takaisin 80 km/h nopeudella. Kuorma-autoon mahtuu 55 i-m<sup>3</sup> haketta. Kuormasta 0,029 osuus kuuluu hakkeelle, joka tarvitaan megawattitunnin tuottamiseksi, jolloin ajoon kuluvasta ajasta tarvittavalle hakkeelle jää osuudeksi:

$$0,5 \text{ h} \times 0,029 = 0,0145 \text{ h}$$

Lenkkiin kulunut aika x kuorman osuus = hakkeen kuljetuksen osuus 1 MWh tuotannossa

Tuhkaa kuljetetaan kerran viikossa, jolloin traktori kiertää tunnin kestävästä kuljetuskierroksena.

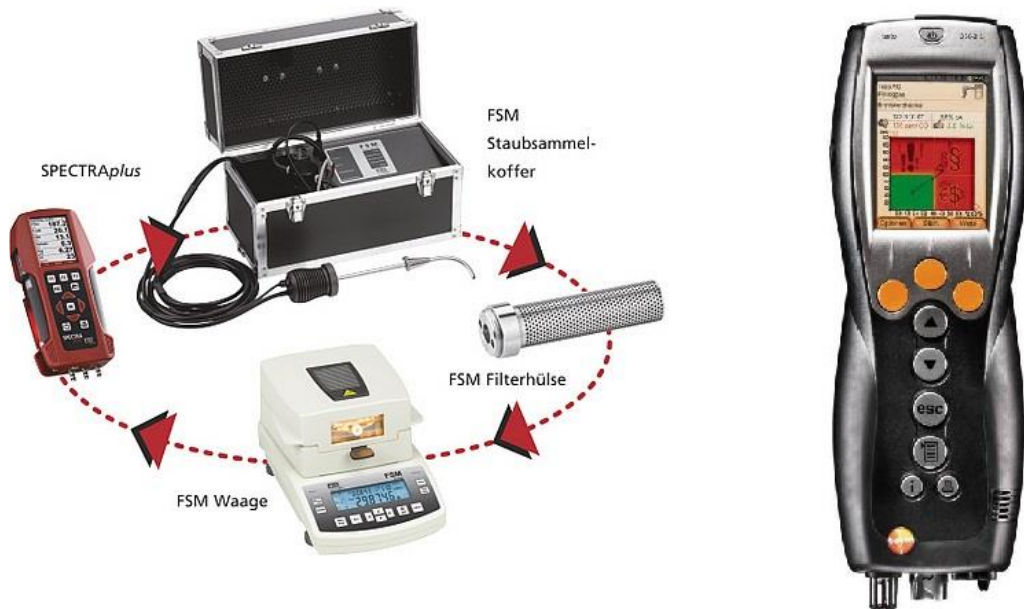
$$1,609 \text{ i-m}^3 : 5000 \text{ i-m}^3 \times 1 \text{ h} = 0,000322 \text{ h}$$

Tarvittavan hakkeen määrä : viikkotuotanto x kuljetukseen kulunut aika = tuhkan kuljetuksen osuus 1 MWh tuotannossa

Saadut ajat syötetään SimaPro-ohjelmaan, jolla voidaan mallintaa päästöjen kertyminen ja energian kulumisen hakeketjussa. Tiedoista laskettiin ohjelman 100 vuoden kumulatiivisen energiantarpeen kaavalla kokonaisenergiatarve hakeketjulle ja saadaan mallinnettua, kuinka energian tarve jakautuu prosessin eri vaiheissa.

### **4.3 Savukaasu ja pienhiukkasmittaukset**

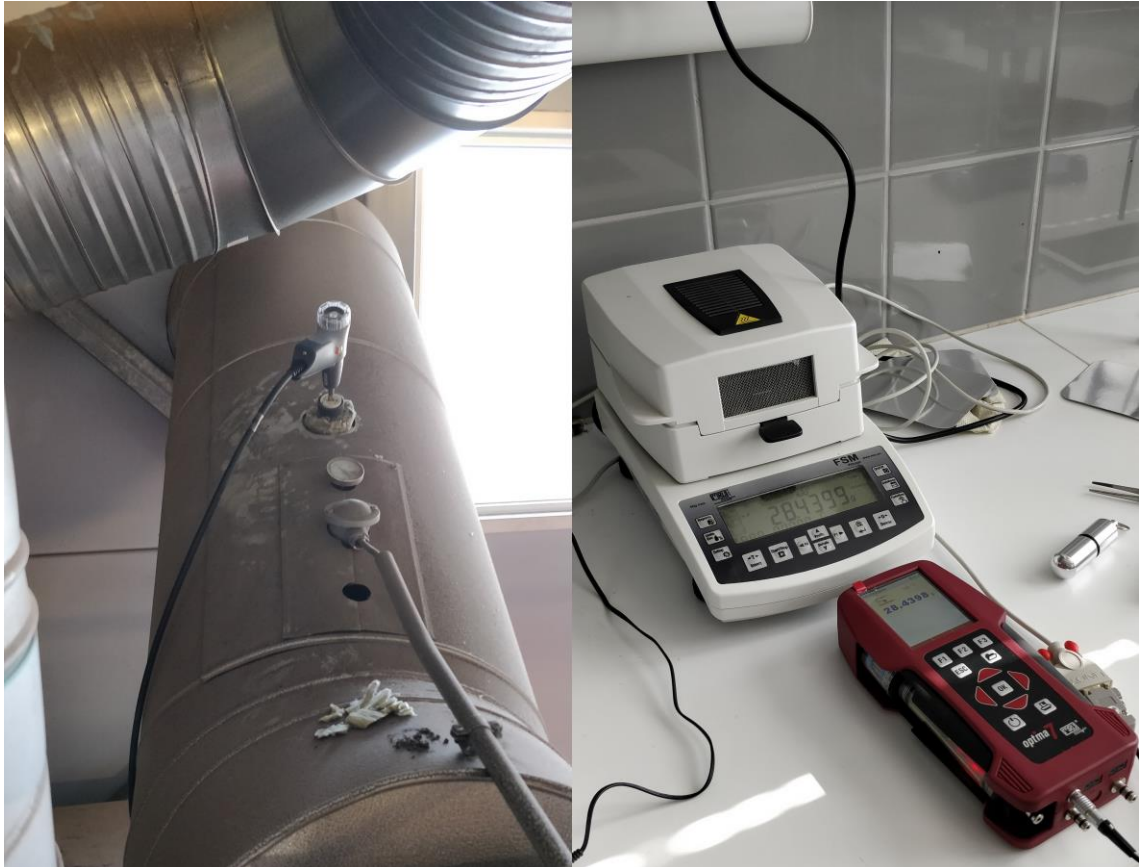
Opinnäytetyöhön tarvittavia savukaasumittauksia toteutettiin lämmityskauden lopulla 4.4.2019. Savukaasumittaukset suoritettiin Testo 330-2 LL mittarilla (kuva 6), joka kykenee mittaamaan typenoksidit, hapen, lambda ja häkäarvot, lisäksi mittari kykenee selvittämään hyötysuhteen laskennallisesti. Pienhiukkaset mitattiin MRU FSM mittarilla (kuva 6).



Kuva 6. Vasemmalla MRU FSM mittarin keskusyksikkö, näytteenottoyksikkö, pienhiukkaskeräyssiivilän kotelo ja vaaka. Oikealla Testo 330-2 LL mittarin keskusyksikkö.

Huomioitavaa on, että mittaukset tehtiin Enon Alakylän voimalaitoksen isommasta 1,2 MW kattilasta, joka pyöri mittausten aikana 1MW teholla. Savukaasu mittaukset suoritettiin liittämällä Testo 330-2 LL mittari tietokoneeseen, jolloin tietokone sai otettua tuloksia 10 sekunnin välein ja kirjasi ne suoraan tietokoneen muistiin.

Savukaasuja mitattiin puhdistussyklonin jälkeisestä, aiemmin valmiiksi poratusta näytteenottoreiästä. Näytteenottoreikä tiivistettiin anturin ympärille lämpövillalla kuten kuvassa 7 näkyy. MRU FSM mittarilla tehtiin pienhiukkasmittauksista kaksi otosta mutta laitteessa kävi toimintahäiriö toisen näytteen ottamisen aika, joka huomattiin vasta näytteitä punnittaessa. MRU FSM mittarin mittaukset tehtiin 50 %:n polttoaineen kosteuden esiasetuksella. Myös MRU FSM mittarilla pystyttiin mittaamaan savukaasujen arvoja vertailua varten, joista todettiin molempien olevan samassa linjassa. Näyte kerättiin valmiiksi tehdyltä näytteenottoaikalta, joka näkyy kuvassa 7. Tarkkuuden vuoksi se oli punnittava kuvassa 7 näkyvässä vaa'assa, joka kuumentaa ampullin mittauksen aikana, jotta kosteus ei vaikuta tuloksiin.



Kuva 7. Näytteenottoaika ja Testo 330-2LL mittarin anturi sekä MRU FSM pienhiukkasvaaka ja keskusyksikkö.

#### 4.4 Hakkeen analysointi

Mittauspäivänä poltettavasta hakkeesta otettiin näytteet tiiviissä astioissa, joista analysoitiin polton aikana käytettävän hakkeen laatu, palakoon ja kosteuden mukaan. Hakkeen analysointi suoritettiin ensin punnitsemalla otetut näytteet 2 g tarkkuudella, mikä todettiin riittäväksi tarkkuudeksi tälle työlle. Näytteet asetettiin kahdelle etukäteen punnitulle folioastialle, joissa näytteitä kuivattiin 105 asteisessä uunissa 16 tuntia. Tämän jälkeen näytteiden sekä folioastioiden painot mitattiin uudelleen, jotta kosteusprosentti pystyttiin määrittämään.

Kosteusprosentti hakkeelle määritettiin kaavalla  $[(\text{märkápaino} - \text{kuivapaino}) : \text{märkápaino} \times 100]$ .

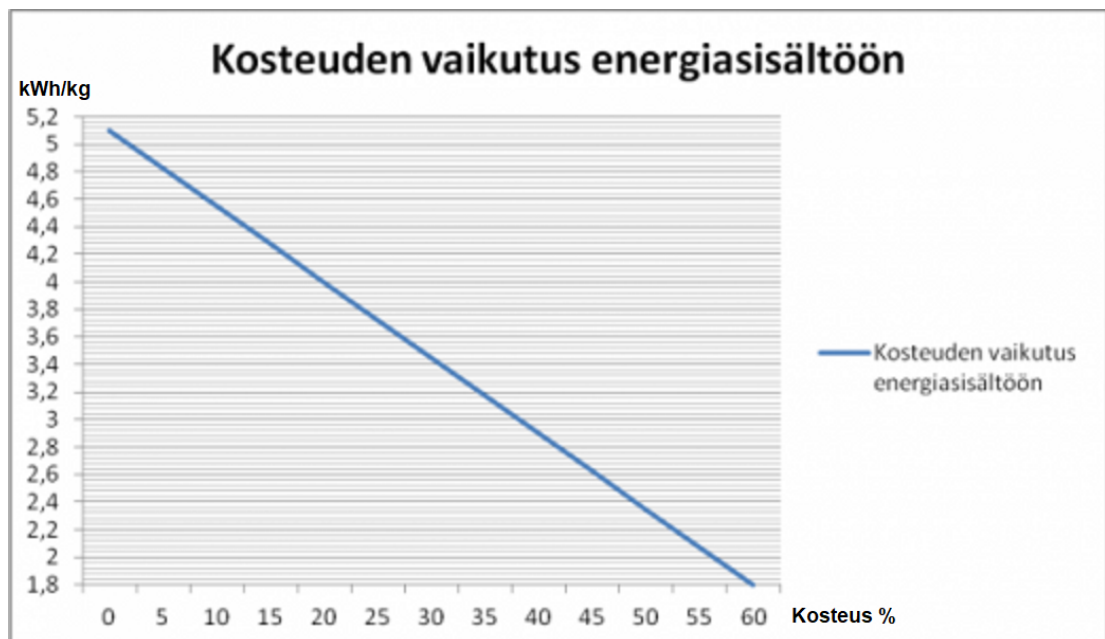
Ensimmäinen näyte painoi ennen kuivausta 728 g ja kuivauksen jälkeen 518 g antaen hakkeelle noin 28,9 % kosteuden. Toinen näyte painoi ennen kuivausta



800 g ja kuivauksen jälkeen 518 g antaen hakkeelle 35,3 % kosteuden. Keskimääräinen kosteus oli täten 32,3 %. Palakoko mitattiin kuivauksen jälkeen seullalla (kuva 8), jota täristettiin käsin 15 minuuttia per näyte ja kuhunkin seulan kerrokseen jääneet hakkeet mitattiin samalla 2 g tarkkuudella kuin kuivatessa. Taulukosta 1 näkyy hakkeen kokojakauma näytteiden mukaan ja kuviosta 1 näkyy kosteuden vaikutus hakkeen energiasisältöön.

Taulukko 1. Hakkeen kokojakauma.

Seulan koko	Vuoka 1	Vuoka 2
100 mm	0 g	0 g
63 mm	0 g	0 g
45 mm	0 g	0 g
16 mm	240 g 46,88 %	184 g 35,94 %
8 mm	178 g 34,77 %	182 g 35,55 %
3,15 mm	70 g 13,67 %	106 g 20,70 %
alle 3,15 mm	24 g 4,69 %	40 g 7,81 %



Kuvio 1. Kosteuden vaikutus hakkeen energiasisältöön kWh/kg [8].



Kuva 8. Hakkeen mittausseulat sekä Enon Alakylän voimalaitoksen hakevarasto.

## 5 Tulokset

### 5.1 Savukaasut ja pienhiukkaset

Kuviosta 2 näkyy savukaasu mittauksien tulokset häkäpitoisuuden osalta sekä savukaasujen lämpötiloista ja lambda-arvoista ja hapen osuudesta mitattuna MRU FSM laitteella. Taulukoissa 2 ja 3 ovat esillä keskiarvot molemmista Testo 330-2LL laitteella tehdyistä mittauksista. Pienhiukkasia MRU FSM mitauslaite keräsi onnistuneella 15 minuutin mittausjaksolla 0,00594 g. Optimaalista

polttua korkeammat arvot hapen osuudessa (%O<sub>2</sub>, λ) on selitettävissä pienellä laituskoolalla, jonka vuoksi hapen määrää poltossa on lisättävä häkäarvojen laske-  
miseksi. Savukaasu on lämpötilaltaan normaali hyötysuhteeseen nähden, kun  
1,2 MW kattila toimii 1 MW teholla.

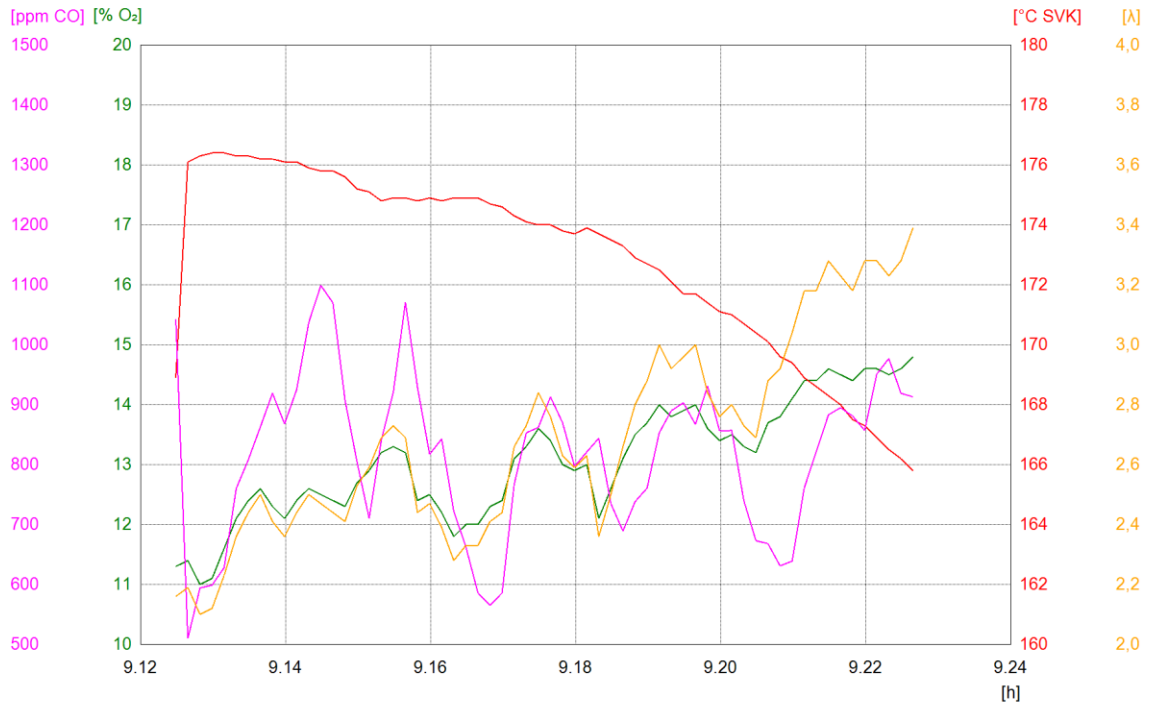
Taulukko 2. Hapen %, savukaasujen lämpötila, hiilimonoksidi, lambda, ulkoilman lämpötila sekä hiilimonoksidin ja lambdan kerroin.

	% O <sub>2</sub>	°C SVK	ppm CO	λ	°C Pilma	ppm COxλ
Keskiarvo	13,14589	167,6875	1187,889	2,719201	22,53695	3276,85
keskihajonta	1,023522	3,94568	240,1597	0,350997	1,210656	868,833
minimi	11,2	161,35	631	2,145	19,05	1407
maksimi	14,65	176,65	1622,5	3,31	25,3	4941

Ensisijainen palamisen puhtauden indikaattori on savukaasujen häkäpitoisuus. Ty-  
pen oksidien päästöjä lukuun ottamatta häkäpitoisuuden alentaminen vähen-  
tää muiden haitallisten ja erityisesti terveydelle haitallisten päästöjen määrää.  
Pienissä kattiloissa häkäpitoisuuden alentaminen edellyttää ilmakertoimen kas-  
vattamista, mikä useimmiten heikentää hyötysuhdetta enemmän, kuin CO-  
päästön pienentämisestä saatu pieni häviövähennys. Hyötysuhteen ja päästöjen  
optimointiarvot ovat kaukana toisistaan. Keskimääräisen häkäpitoisuuden  
alentaminen ja sen vaihteluiden hallinta ovat tärkein päästöihin vaikuttava asia  
alle 5 MW kattiloissa. [19.]

Taulukko 3. Laskennallinen hyötysuhde, pumpun nopeus, kastepiste, Typpioksidit ja typpimonoksidi.

	% η	l/min Pumppu	°C td	ppm NOx	ppm NO
Keskiarvo	85,66503	0,697742	20,85345	94,92522	90,37023
keskihajonta	1,550047	0,124272	0,510227	14,18217	13,52852
minimi	83	0	20,1	71	68
maksimi	88,5	0,76	21,8	119,5	113,5

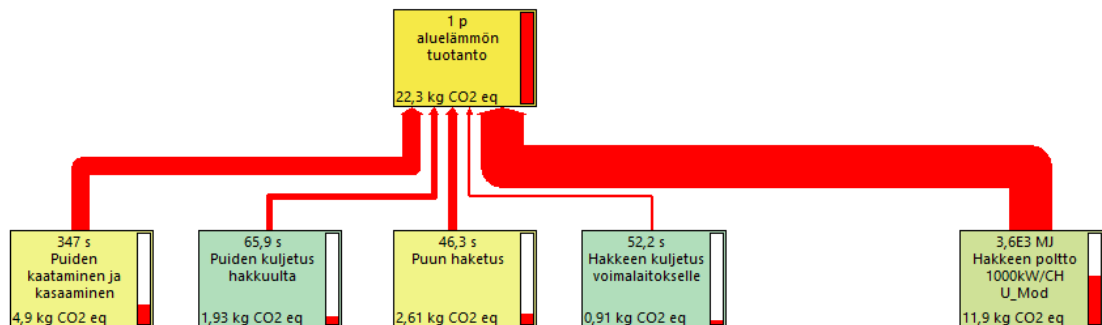


Kuvio 2. Savukaasumittaukset MRU FSM-laitteella. Näkyvissä on häkä, happi, savukaasujen lämpötila sekä lambda.

Kuviosta 2 voidaan havaita, että lambda-arvoa nostamalla liiallinen happi laskee hyötysuhdetta ja laskee savukaasujen lämpötilaa. Kuviosta näkyy myös ylijäämä-hapen sekä hään osuus savukaasuista. Suurin osa vaihteluista johtuu polttoaineen vaihtelusta, sillä hakkeen poltossa palamisen ja polttoaineen laatu vaihtelee koko palamisprosessin ajan.

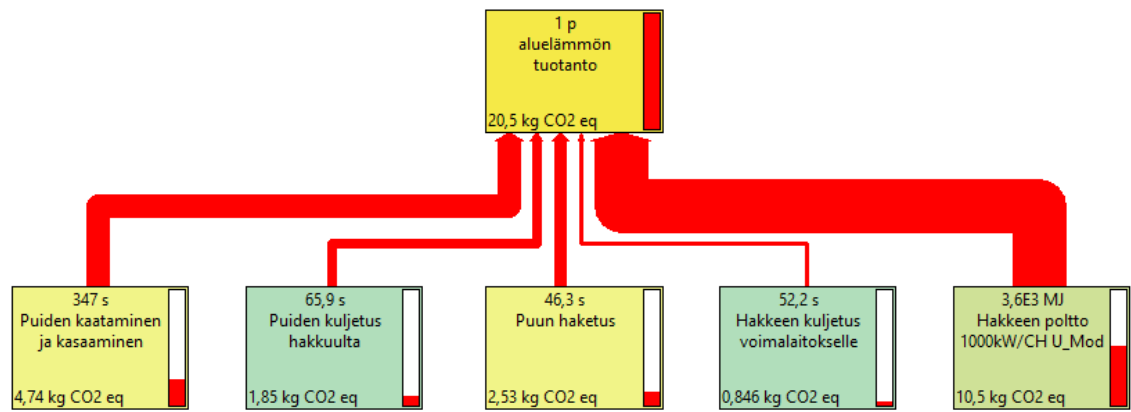
## 5.2 Lämmityspotentiaali

Ilmastonlämmitysvaikutuksia kuvaavalla GWP 20a metodilla hiilidioksidiekvivalentiksi tulee 22,3 kg CO<sub>2</sub>e yhtä tuotettua megawattituntia (aluelämpöenergiaa) kohden. Kuviosta 3 havaitaan, mistä hakeketjun vaiheista se kertyy. Polton korkea hiilidioksidiekvivalentti koostuu Suomen sähkössä käytetyistä sähköntuottotavoista. Sähköntuotto on laskettu Suomen keskimääräisillä sähköntuoton metodeilla, jotka jakautuvat kuvion 5 mukaisesti. Kuviossa 5 näkyvät ainoastaan hiilidioksidiekvivalenttiltaan merkittävässä roolissa olevat sähköntuotannon muodot, minkä vuoksi uusiutuvat energiamuodot eivät esiinny listassa.

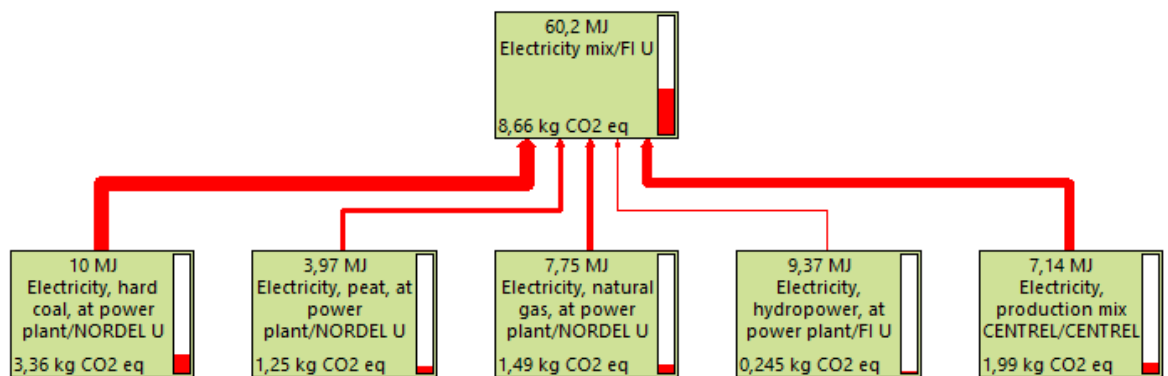


Kuvio 3. Hiilidioksidiekvivalentin jakauma GWP 20a metodilla.

GWP 100a metodilla hiilidioksidiekvivalentti on alhaisempi 20,5 kg CO<sub>2</sub>e, sillä GWP 20a korostuvat päästöt, kuten metaani, eivät vaikuta 100 vuoden arvioissa yhtä vahvasti. Sekä GWP 20a, että GWP 100a metodeilla on huomattavissa, että suurin päästöjen tuottaja on hakkeen polttoprosessi, jossa syntyy yli puolet päästöistä.



Kuvio 4. Hiilidioksidiekvivalentin jakauma GWP 100a metodilla.

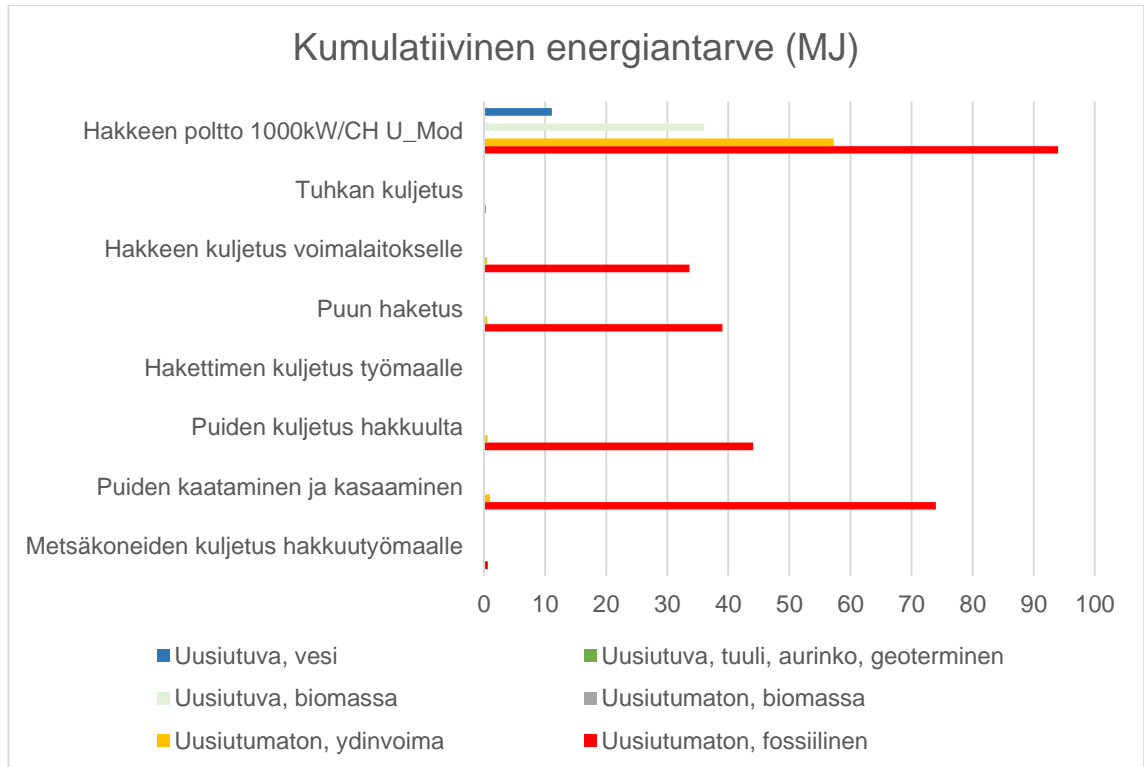


Kuvio 5. Suomen sähköntuoton metodien jakauma merkittävimpien CO<sub>2</sub>e päästöjen mukaan ja niiden vaikutusten kumuloituminen hakkeen poltossa GWP 20a metodilla.

### 5.3 Kumulatiivinen energiantarve

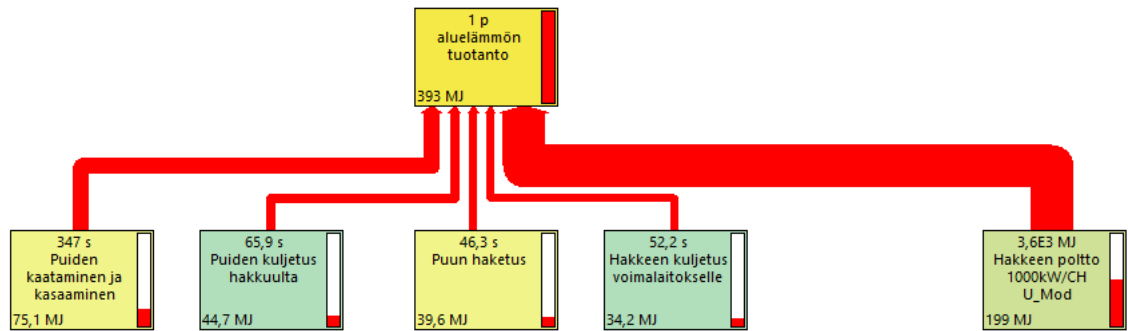
Koko hakeketju kuluttaa 393 MJ energiaa tuottaakseen 1 MWh aluelämpöenergiaa. Hakeketjun tarvitsemasta energiasta suurin osa kuluu ketjun loppupäässä voimalaitoksella hakkeen poltossa, joka kuluttaa 199 MJ energiaa. Laitoksen energiankulutuksessa on otettu huomioon laitoksella olevat aurinkopaneelit, joiden tuotto on vähennetty kulutuksesta, kesällä myyntiin menevää ylimääräistä sähköä lukuun ottamatta. Vaikkei työssä ole ollut mahdollista mitata juuri kyseisen laitoksen kokonaispäästöjä on tutkielma pätevä, sillä prosessitiedot ovat hyvin samankaltaisesta voimalaitoskattilasta ja mallinnus muista laitoksen hakeketjun osista havainnollistaa hyvin kokonaispäästöistä ja energian kulutuksesta.

Jäljelle jäävästä energiantarpeesta suurin osa tulee kevytpolttoöljystä ja dieselistä, joita käyttävät muut hakeketjun laitteet, kuten hakkurit, harvesterit ja kuljetuslaitteisto.



Kuvio 6. Kumulatiivinen energiantarve ja sen tuottamistavat.

Kuviosta 6 on havaittavissa energian jakautuminen hakeketjun eri osapuolien mukaan energianmuodon kulutustavoittain. Voimalaitoksella energian kulutus kattilan, kuljetus- ja valvontalaitteiston kuluttamasta energiasta. Voimalaitoksen kuluttaman energiantuottotapojen jakauma perustuu suomalaisen energian keskimääräisiin tuottotapoihin. Huomioitavaa on, kuinka suuri osa energiasta tulee uusiutumattomista energianlähteistä. Kuviosta 7 näkyy, kuinka energian kulutus jakautuu eniten energiaa käyttävien hakeketjun osioiden kesken.



Kuvio 7. Kumulatiivinen energiantarve hakeketjussa.

## 6 Pohdinta

### 6.1 Savukaasumittausten ja polttoaineanalyysin arviointi

Käytetty polttoaine oli 32,3 % kosteusprosentiltaan varsin hyvälaatuista luonnonolosuhteissa kuivatuksi hakkeeksi, jonka keskimääräinen kosteus on 30 % - 50 % [14]. Palakooltaan käytetty hake oli suurimmalta osin hyvälaatuista, sisältäen ainoastaan palakooltaan alle 45 mm:n haketta, mutta alle 5 mm:n kokoista haketta oli huomattavan paljon, näytteiden keskimäärän ollessa 23, %. Sopiva hakkeen palakoko vaihtelee välillä 5–50 mm. Heikko hakkeen laatu voi aiheuttaa seuraavia ongelmia:

- suuri osa energiasta menee puun kuivattamiseen, pienempi osa itse lämmittämiseen
- kattilan nokeutuminen
- tuhkan tavanomaista suurempi kertyminen
- korkeammat päästöarvot
- takapalovaaran uhkan lisääntyminen
- ääritapauksessa itsestään palamaan syttyminen
- polttoaineen holvaantuminen, turha lämpöhäviö
- säilyvyysongelmat -polttoaineen homehtuminen tai jäätyminen varastossa
- polttoaineen suurempi kulutus
- kasvavat kuljetuskustannukset



- laitoksen lisääntynyt sähkönkulutus
- erittäin huono lämpöhyötysuhde.

Pääasiallisesti hakkeen palakoosta ilmenisi ongelmia, jos se olisi liian suurta. Alimittaisen hakkeen vaikutukset ovat yleisesti merkittävästi pienemmät. [23.]

Noin 2 000 ppm:n CO-pitoisuus alentaa hyötysuhdetta noin yhden prosenttiyksikön. Pienissä kattiloissa täytyy häkäpitoisuuden alentamiseksi nostaa ilmakerointia, mikä usein laskee hyötysuhdetta enemmän, kuin CO-päästön vähentäminen sitä nostaa. Alle 5 MW:n kattiloissa häkäpitoisuuden hallinta on kuitenkin tärkein päästöihin vaikuttava tekijä. Alle 5 MW:n laitoksissa CO-päästöt vaihtelevat paljon. Hetkelliset pitoisuudet ovat välillä 20...10 000 mg/m<sup>3</sup> (17,4...8729,0 ppm). Hyvin toimivien kattiloiden savukaasujen CO-pitoisuus alittaa 500 mg/m<sup>3</sup> (436,5 ppm). Häkäpitoisuus vaikuttaa muun muassa PAH-yhdisteiden määrään ja pienhiukkasten koostumukseen. PAH-yhdisteet, eli polysykliset aromaattiset hiilivedyt, ovat vaarallisimpia ilmansaasteita, koska monet niistä ovat syöpää aiheuttavia. [24.] Voidaan päätellä, että polttoaineen laatu yhdistettynä laitoksen 20-vuotta vanhaan kattilaan nostaa häkäpäästöjä.

Typen oksidien päästöihin vaikuttavat polttoaineen kosteus ja typpipitoisuus sekä palamiskaasujen lämpötilan ja happipitoisuuden jakautuminen tulipesässä. Alle 30 MW:n teholuokassa päästöjä voidaan vähentää palamisilman vaiheistuksella ja savukaasujen takaisinkierrätyksellä. Lambda-arvo 2,7 on suhteellisen korkealla vaikuttaen hyötysuhteeseen laskevasti, tämä johtuu syötetystä lisäilmasta, jotta häkäarvoja saadaan laskettua. Mittarin antama laskennallinen hyötysuhde 85,7 % on täysin linjassaan laitoksen työntekijöiden arvion kanssa, joksi haastateluissa annettiin 80 % - 90 %. Rikkihapon kastepiste lämpötila on 20,9 °C, joka ei saa alittua yhdessäkään kohdassa savukanavassa, jotta vältetään niiden syöpymiseltä. [24.]

## 6.2 Elinkaarianalyysin tulosten arviointi

Hiilijalanjälkeä mallintavalla GWP 20a metodilla on nähtävissä, että tuottaakseen yhden megawattitunnin aluelämpöenergiaa, hakeketjussa syntyy 22,3 kg hiilidioksidiekvivalentteja päästöjä, vastaavasti GWP 100a metodilla hiilidioksidiekvivalentteja päästöjä syntyy 20,5 kg. Laskenta metodi GWP 100a arvo on alempi, sillä 100 vuoden mallina siinä painottuvat pitkäaikaiset päästöt, jolloin esimerkiksi metaani ei vaikuta laskentaan samalla tavalla kuin 20 vuoden mallissa. Päästöt ovat varsin vähäiset, verrattuna Suomen keskimääräisille kaukolämmön CO<sub>2</sub>-päästöille, jotka ovat viiden viimeisen vuoden keskiarvolla, yhteistuotanto jaetuna hyödynjakomenetelmällä: 164 kg CO<sub>2</sub>/MWh [25].

Kuitenkaan ei voida laskea, että hake olisi hiilineutraali polttoaine, jos otetaan huomioon koko hakeketju, sillä päästöjä tulee ketjun jokaisessa vaiheessa. Huomioitavaa on myös, että noin puolet päästöistä syntyvät polttolaitoksen energiantarpeesta. Mikäli laitos käyttäisi täysin uusiutuvista energianlähteistä peräisin olevaa sähköä, laskisivat päästöt huomattavasti. Jo laitokselle asennetuilla aurinkopaneeleilla on huomattava muutos päästöjen laskemiseen. Sama malli näkyy kumulatiivisessa energiantarpeessa. Koko hakeketju vaatii 393 MJ energiaa tuottaakseen yhden megawattitunnin aluelämpöenergiaa, kulutetusta 393 MJ:sta 199 MJ kuluu polttolaitoksella. Huomioitavaa tutkimuksessa on, että laitteiden kulumista ja valmistamista ei ole otettu huomioon laskennassa, vaan niiden kuluttamat polttoaineet, voiteluaineet sekä energia.

Kokonaisuudessaan hakeketjun suurimpina päästöinä ovat häkäpäästöt, typenoksidipäästöt sekä pienhiukkaset. Häkäpäästöjä erityisesti tarkkailemalla voidaan estää muidenkin päästöjen lisääntymistä, sillä CO-pitoisuuden kasvaessa suureksi hiilivetyjen ja N<sub>2</sub>O:n päästöt lisääntyvät jyrkästi (NO<sub>x</sub>päästöihin vaikutus on erisuuntainen ja paljon lievempi). Tästä syystä häkäpitoisuuden hallinta on päästöjen kannalta olennaisinta pienessä, alle 5 MW:n teholuokassa [19].

Näistä varsinkin pienhiukkaset voivat olla terveydelle haitallisia ja tämä tulee ottaa huomioon laitoksia suunniteltaessa. Selvästi suurimpaan päästölähteeseen tulisi panostaa eniten, mikäli päästöjä halutaan tehokkaasti laskea. Mahdollisia

parannuksia päästöjen laskemiseksi olisivat mahdolliset aurinkopaneelien lisäykset jo valmiiksi asennettujen lisäksi sekä ostosähkön vaihtaminen uusiutuvilla energianlähteillä tuotettuun sähkөөn. Ilmaan pääseviin päästöihin voi olla hyvin vaikea vaikuttaa kustannustehokkaasti, jo asennetun syklonin lisäksi, kun otetaan huomioon laitoksen pieni kokoluokka, sillä pesurit vaativat varsin isoja investointeja.

### **6.3 Luotettavuus**

Savukaasujen samoin kuin pienhiukkasten mittaustuloksien hyödyllisyyttä rajoittaa puuttuva massavirta, sillä mittauksiin tarvittavia laitteita ei ollut käytettävissä. Elinkaaren päästöjä ja energiankulutusta laskettaessa hyödynnettiin vastaavien laitosten keskimääräisiä tietoja, jotka ovat varsin luotettavia ja ovat hyvin lähellä tutkittua laitosta. Tämä on hyvä ottaa huomioon tuloksien yhteydessä. Päästömittauksissa mitatut päästöt on mitattu syklonierottimen jälkeen, mikä ilmenee varsinkin pienhiukkasten määrässä sekä savukaasujen lämpötilasta. Savukaasujen ja polttoaineen näytteissä on hyvä ottaa huomioon, että tulokset on saatu yhden päivän aikana otetuista näytteistä ja mittauksista. Lisäksi tiheyden puute hakkeen analysoinnista vaikuttaa osaltaan päästöjen määrään, sillä yhtä megawattituntia tuottoa kohden poltetun hakkeen määrällä on laskettu jokaisen vaiheen osuus elinkaaressa. Päästöjen määrät voivat vaihtua tämän takia toisessa mittauksessa, joskin jakauman tulisi olla sama ja käytettyjen arvojen tulisi olla hyvin suuntaa antavia. Useammalla otannalla tulisi tarkempia keskiarvoja, mutta tulokset ovat varsin normaaleja muihin vastaaviin laitoksiin nähden ja kuvaavat hyvin laitoksen sen hetkistä toimintaa.

### **6.4 Jatkotutkimusmahdollisuudet**

Jatkotutkimusmahdollisuuksia tehdylle työlle olisi laajentaa tietokantaa tekemällä vastaavia tutkimuksia erikokoisille ja eri polttoaineita käyttäville biolämpölaitoksille sekä uusiutumattomille energianlähteille, jotta saataisiin vertailukelpoista dataa. Myös vastaavien tutkimusten tekeminen useille samankaltaisille laitoksille ja

niiden keskeinen vertailu parantaisi tulosten luotettavuutta sekä tarkkuutta. Lisäksi tuloksia olisi hyvä saada eri vuoden ajoilta sekä eri laatusella hakkeella, jotta voitaisiin vertailla myös polttoaineen ominaisuuksien vaikutusta polttoprosessiin.

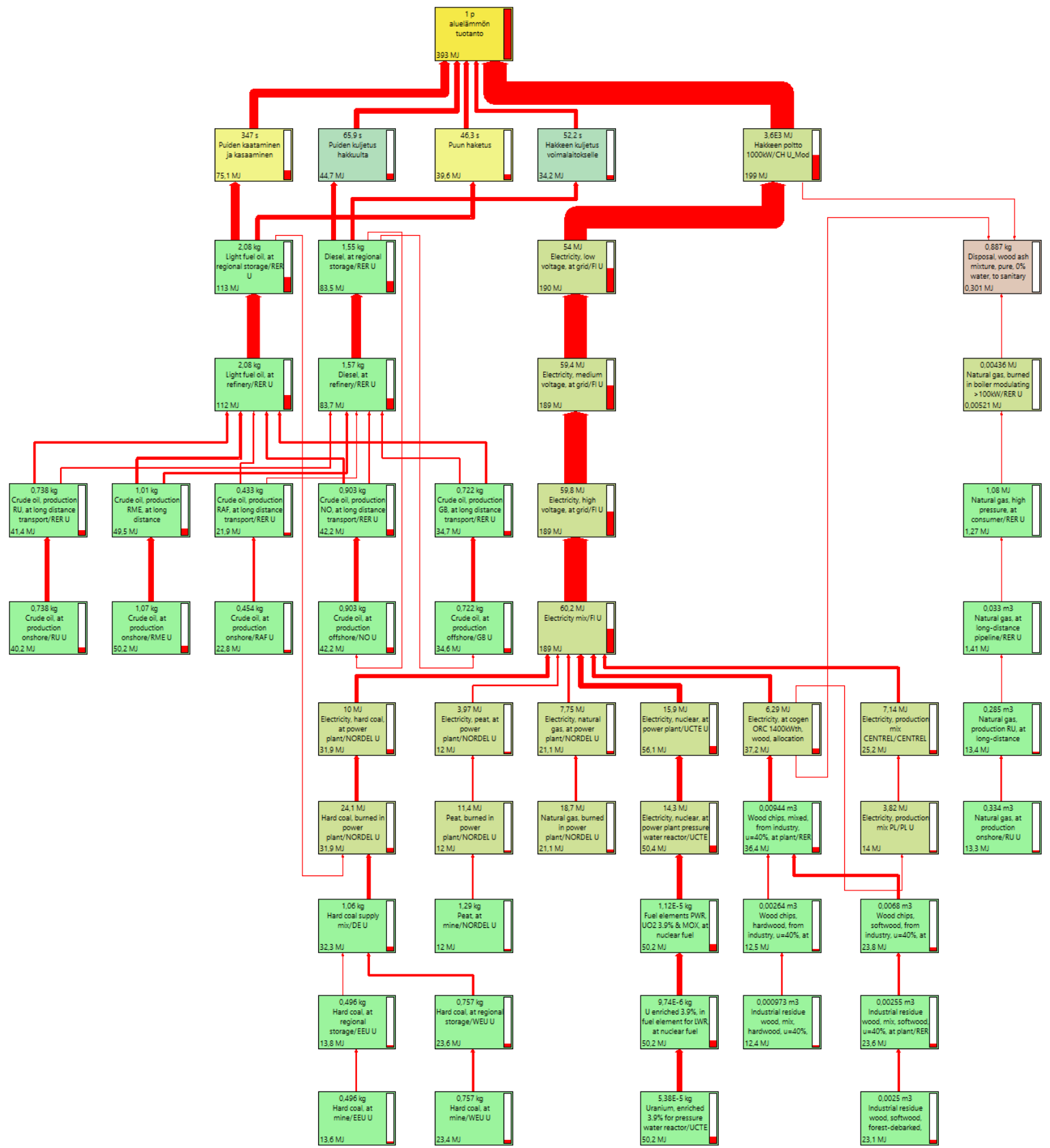
Myös hakeketjujen muita vaiheita olisi hyvä tutkia, vertailukelpoisen tiedon hankkimiseksi. Vastaavasti samalta laitokselta olisi hyvä saada tarkat päästötiedot, jolloin koko hakeketjun tulokset olisivat kohdennetummat juuri kyseiselle laitokselle. Useampi otanta samasta laitoksesta eri käyttöteholla myös parantaisi tulosten luotettavuutta. Tehdyn työn perusteella olisi hyvä tutkia mahdollisia kustannustehokkaita parannuksia pienvoimalaitoksille, sillä suurin osa päästöistä syntyy polttolaitoksissa ja niiden suuressa energian kulutuksessa. Enon laitoksella oli jo valmiiksi aurinkopaneeleita, jotka laskivat energian kulutusta ja olisi hyvä tutkia onko laitokselle kannattavaa hankkia lisää paneeleita, tai vaihtaa osittu kulutussähkö uusiutuvasti tuotettuun.

## Lähteet

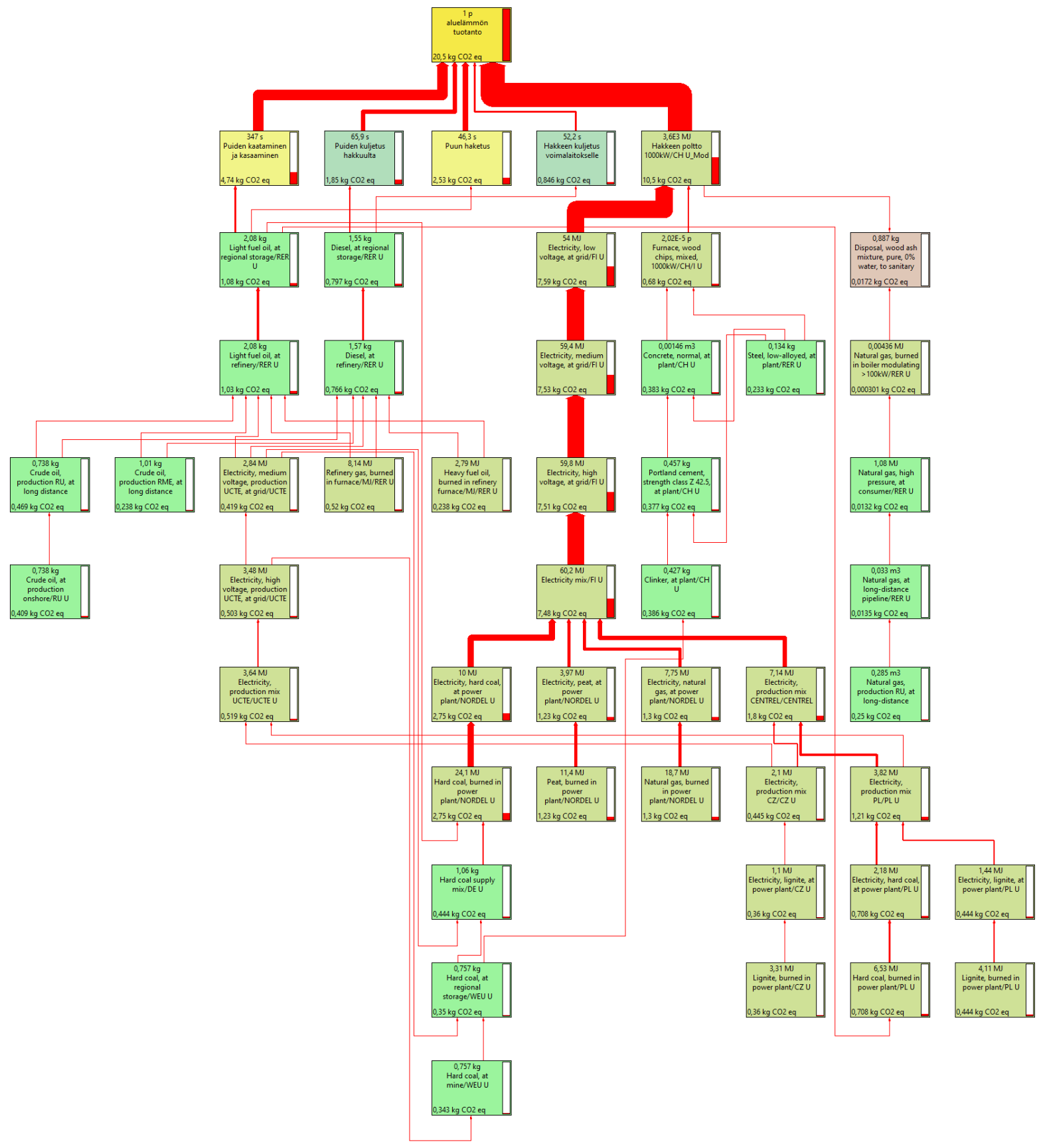
1. Energiaraitti. Osahankkeet, UusiutuWat. 2019. [Lainattu 14.04.2020] Saatavissa: <http://www.karelia.fi/energiaraitti/energiaraitti/osahankkeet/>
2. Suomen metsäkeskus. UusiutuWat 2016. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/uusiutuwat>
3. Hakonen, T. Kosteuden vaikutus energiapuun polton kannattavuuteen. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote nro. 28. 31.01.2012 Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Maa- ja metsätalouden yksikkö. Tuomarniementie 55, 63700 Ähtäri. [Viitattu 24.03.2020.] Saatavissa: <https://journal.fi/smst/article/view/75442/36865>
4. PRé Life cycle assessment: the basics. 2020. [Viitattu 10.04.2020] Saatavissa: <https://www.pre-sustainability.com/sustainability-consulting/lca-methodology-basics>
5. Testo SE & Co. KGaA. 2020. Saatavissa: <https://www.testo.com/en-UK/testo-330-2-ll/p/0563-3372-70>
6. MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH. 2020. Saatavissa: <https://www.mru.eu/en/products/detail/feinstaub-system-fsm/>
7. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarvioiti. Periaatteet ja pääpiirteet. 18.12.2006. [Standardi] Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/390596/mod\\_resource/content/1/ISO\\_14040\\_standardi.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/390596/mod_resource/content/1/ISO_14040_standardi.pdf)
8. Bioenergianeuvoja.fi, Bioenergian Pikkujättiläinen 2020. [Viitattu 6.01.2020] Saatavissa: <https://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-kosteus/>
9. Jätelaitosyhdistys ry. Jätteenpolton BREF 2006. Saatavilla: <http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31>
10. Ajoneuvojen voiteluaineet -opas. Neste Oil 10.2006. [https://www.neste.fi/sites/neste.fi/files/AVA\\_opas\\_WEB.pdf](https://www.neste.fi/sites/neste.fi/files/AVA_opas_WEB.pdf)
11. Öljycenter, voiteluaineet. 2020. <https://www.oljycenter.fi/voiteluaineet>
12. Lipasto yksikköpäästöt-tietokanta. Päivitetty 6.7.2017. Saatavilla: [http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet\\_litra.htm](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm)
13. Maansalo, J. Aluelämpölaitoksen ja verkoston esisuunnittelu, 2016. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. [Viitattu 13.02.2020] Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106954/Joonas+Maansalo.pdf?sequence=1>
14. Patula, J, Hilli, A. Hakkeen laatuun vaikuttavat tekijät. Oulun ammattikorkeakoulu. 9.10.2017. [Tutkimus- ja kehitystyön julkaisu] [Viitattu 17.04.2020] Saatavilla: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134175/ePooki%2030\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134175/ePooki%2030_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
15. Häkkinen, J. Puun pienpoltto – Palaminen ja teknologiat. Kandidaatintyö. Oulun yliopisto. Prosessitekniikka. 20.4.2017. [Viitattu 15.03.2020] Saatavilla: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201704201520.pdf>
16. Tuomisto, J. Arsenikista öljyyn - 100 kysymystä ympäristöstä ja terveydestä. Duodecim Terveyskirjasto. 3.11.2014. [Nettiartikkeli] Saatavilla: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=asy00403](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=asy00403)
17. Putkonen, T. Kattilatekniikat biopolttoaineille alle 5 MW teholuokassa. Kandidaatin työ. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikka. 14.4.2015. [Viitattu 20.03.2020] Saatavilla: [https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104483/Kandidaatinty%C3%B6\\_Tapio\\_Putkonen.pdf?sequence=2](https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104483/Kandidaatinty%C3%B6_Tapio_Putkonen.pdf?sequence=2)

18. Absent Oy. Polttopuun ominaisuudet Halkoliiteri. 2020. [Netti julkaisu] Saatavilla: <http://www.halkoliiteri.com/?id=587>
19. Juusonen, J. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Ympäristöministeriö. Jyväskylä. 10.05.2012. [Viitattu 28.03.2020] Saatavilla: <https://docplayer.fi/146087-Ymparistoministerio-kotimaista-polttoainetta-kayttavien-0-5-30-mw-kattilalaitosten-tekniset-ratkaisut-seka-palamisen-hallinta.html>
20. Tieteen termipankki 14.4.2020: Geofysiikka: hiilidioksidiekvivalentti. [Viitattu 14.04.2020] Saatavilla: <http://tieteentermipankki.fi/wiki/Geofysiikka:hiilidioksidiekvivalentti>
21. Kiinteistöliiketoiminnan sanasto, 2. laitos RAKLI, 2012. [Viitattu 12.04.2020] Saatavilla: <http://www.tsk.fi/cgi-bin/tepa/netmot.exe?Opt=256&ListWord=@40@40ID@3DRAKLI@5F2012@2DDID13&SearchWord=hiilidioksidiekvivalentti&dic=1&page=results&UI=figr&Source=Record>
22. Tieteen termipankki, 14.04.2020: Nimitys: lämmityspotentiaali. [Viitattu 14.04.2020] Saatavilla: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:l%C3%A4mmityspotentiaali>
23. Bioenergianeuvoja.fi, Bioenergian Pikkujättiläinen 2020, Biopolttoaineet, hake. [Viitattu 18.04.2020] Saatavilla: <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/laatu/>
24. Komi, T. Biopolttoainekattilan palamisilman mittausta. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energiatekniikka. 05.2015 [Viitattu 19.04.2020] Saatavilla: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97063/Komi\\_Tuomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97063/Komi_Tuomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
25. Motiva Oy, CO2-Laskentaohje. Päivitetty 12.05.2020. [Lainattu 20.04.2020] Saatavilla: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-laskentaohje\\_energian kulutuksen\\_hiilidioksidipaastojen\\_laskentaan/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet)
26. Bioenergianeuvoja.fi, Bioenergian Pikkujättiläinen 2020, Biopolttoaineet, polttopuu, puu. [Viitattu 18.04.2020] Saatavilla: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/polttopuu/puu/>
27. Huttunen, J. Hengitysilmän pienhiukkaset – savusta ja saasteista sairautta. Duodecim terveyskirjasto. 15.03.2012 [kolumni] [Viitattu 18.04.2020] Saatavilla: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=kol00207&p\\_listatyyppi=kol](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=kol00207&p_listatyyppi=kol)
28. Salomaa, E-R. Häkämyrkytys. Duodecim Terveyskirjasto. 26.08.2019. [Kolumni] [Viitattu 18.04.2020] Saatavilla: [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=dlk00759](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00759)

# Liite 1, Kumulatiivisen energiantarpeen kulkukaavio



# Liite 2, GWP 100a hiilidioksidiekvivalentin kulkukaavio





### Liite 3, GWP 20a hiilidioksidiekvivalentin kulkukaavio

