



Elinkaarimallinnusraportti 2019

Case: Puun sivuainevirtojen hyödyntäminen

Maija Massinen, Noora Haatanen

27.11.2019

BIOKASVU-hankkeen tavoitteena on työpaketti 4 (WP4) osiossa lisätä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) Kuitulaboratorio -tutkimusyksikön osaamista ja yritysyhteistyötä muun muassa kiertotalouden ja elinkaariosaamisen ratkaisuisa projektin toimialalla. Lähtökohtana on kartoittaa kiertotalouden, teollisten symbioosien ja elinkaariajattelun mahdollisuuksia, haasteita ja kehityskohteita sekä tarpeita Savonlinnan yritysten kehittämisessä.

Hankkeessa kartoitettiin mahdollisuuksia löytää Savonlinnan talousalueen yrityskannasta yhteistyöyritys, jossa voitaisiin toteuttaa elinkaarimallilaskenta jostakin yrityksen toiminnosta. Yhdeksi laskentakohteeksi valikoitui Xamk Kuitulaboratorion BIOSAHA-hanke, jossa tarkasteltiin mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtojen käyttökohteita Savonlinnan talousalueella. Kohdassa 3. on esitelty tarkemmin laskentaan liittyviä tietoja.

Sisällys

1. Laskelman lähtökohdat	3
2. Laskennassa käytetty SULCA ®mallinnusohjelma ja tietolähteet	4
3. Skenaarioiden luonti ja tehdyt oletukset	4
3.1 Skenaario 1	5
3.2 Skenaario 2	10
3.3 Skenaario 3	13
4. Tulokset ja niiden analysointi	16
4.1 Skenaario 1	20
4.2 Skenaario 2	20
4.3 Skenaario 3	21
5. Johtopäätökset ja yhteenveto	22
LÄHTEET	23
KIITOKSET	25

Termit ja lyhenteet

CO₂ ekv

Hiilidioksidiekvivalentti

Bioperäinen hiilidioksidi (CO₂-bio)

Biomassasta peräisin olevat hiilidioksidipäästöt syntyvät biomassan polttamisesta.

1. Laskelman lähtökohdat

Etelä-Savossa on tarjolla järeää mäntytukkia yli paikallisen kysynnän ja mäntytukkia viedään tällä hetkellä naapurimaakuntiin jalostettavaksi. Lähialueiden uusien selluinvestointien myötä korjattavan kuitupuun ohessa myös järeän tukkipuun määrä lähivuosina kasvaa entisestään. Alueen hyvinvoinnin ja kehityksen kannalta mahdollisimman suuri osa alueelta korjattavasta puumäärästä tulisi jalostaa omassa maakunnassa. Myös tuotteiden jalostusasteen nostaminen sekä sivuvirroista jalostettavien uusien puupohjaisten tuotteiden tuotannon aloittaminen tuo lisäarvoa ja uusia työmahdollisuuksia. (BioSaha-hankkeen nettisivut)

BioSaha -projektin tavoitteena on edistää uuden mäntytukkia jalostavan teollisuuden investointiedellytyksiä Savonlinnan alueella. Lisäksi hankkeessa tuotetaan laskelmat alueen lisääntyvän sahauskapasiteetin sekä olemassa olevan mekaanisen metsäteollisuuden sivuvirtojen raaka-ainepotentiaalista alueelle suunnitteilla oleville metsäbiojalostamoille. Toimenpiteiden kautta tuetaan alueen elinkeinopoliittista markkinointityötä uusien jalostamoinvestointien houkuttelemiseksi alueelle. (BioSaha-hankkeen nettisivut)

Hankkeeseen lähdettiin suorittamaan elinkaarilaskelmaa mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtojen hyödyntämisestä, jotta saataisiin käsitys sivuainevirtojen hyötykäytön vaikutuksista eri käyttökohteisiin. Tarkastelussa haluttiin vertailla perinteistä sivuainevirtojen polttoa energianlähteenä ja vertailla sitä sivuainevirroista valmistetun pyrolyysiöljyn polttamiseen ja raskaan polttoöljyn käyttöön energialähteenä.

Pyrolyysiöljy (käytetään myös nimitystä bioöljy), valmistetaan kaasuttamalla puubiomassaa hallitusti korkeassa lämpötilassa hapettomassa ympäristössä. Kuumennuksen seurauksena biomassa hajoaa ja muodostaa kaasuja ja hiiltä. Käytetty reaktiolämpötila on noin 500 celsiusastetta ja kaasuuntuminen kestää noin kaksi sekuntia. Reaktorissa syntynyt kaasu jäähdytetään nopeasti, jolloin se tiivistyy nesteeksi. Sivutuotteena saatava hiiltojäännös (hiili) palautetaan syklonista reaktorin petimateriaalia lämmittävään polttokammioon, jossa se palaa tuottaen prosessin tarvitseman lämpöenergian. Myös lauhdutuksessa sivutuotteena saatava tuotekaasu poltetaan polttokammiossa. Prosessilämpöä käytetään myös raaka-aineen

kuivaukseen. Prosessi on siis lämmön suhteen energiaomavarainen. Päästöjen kannalta merkittävimmät hyödykkeet pyrolyysiöljyn tuotannossa ovat sähkö ja ylös-/alasajotilanteissa tarvittava apupolttoaine (esim. nestekaasu). (Basu 2013)

2. Laskennassa käytetty SULCA[®] mallinnusohjelma ja tietolähteet

Laskennassa käytettiin SULCA[®] elinkaarimallinnusohjelmaa. SULCA[®] LCA-ohjelmisto kattaa koko elinkaariarvioinnin aikaisen mallinnuksen ja laskemisen aina virtauskaavion rakentamisesta inventaarioanalyysiin ja vaikutusarviointeihin. Tuloksia voi tarkastella ja esitellä monipuolisesti erilaisten taulukkojen ja graafien avulla.

SULCA[®] ohjelmistossa on mahdollisuus käsitellä monimutkaisia ja kompleksisia elinkaaria, jolloin suurien kokonaisuuksien tarkastelu helpottuu. Ohjelmistoa on myyty 19 maahan, ja sitä käytetään niin teollisuudessa, yliopistoissa, tutkimusinstituuteissa kuin yrityksissäkin. SULCA:n avulla voi tehdä laaja-alaisesti elinkaariarviointeja, ohjelma ei ole kytköksissä mihinkään teollisuuden alaan. Elinkaariarviointeja on tehty muun muassa koneille ja kuljetusvälineille, konepajateollisuuteen, kemianteollisuuteen, metsäteollisuuteen, medialle, kaivosteollisuuteen sekä tekstiiliteollisuuteen.

Lähtötietoja on kerätty artikkeleista, BioSaha-hankkeen materiaaleista sekä Ecoinvent tietokannasta saatavilla olevista tiedostoista.

3. Skenaarioiden luonti ja tehdyt oletukset

Tässä kappaleessa esitellään kunkin tuotantoprosessin yksikköprosessit ja ympäristövaikutuksen laskenta, sekä niissä tehdyt oletukset. Energiantuotantoa ja sen aiheuttamia ympäristövaikutuksia kuvaamaan tehtiin kolme skenaariota, joista ensimmäinen käsittelee sivuainevirtojen hyödyntämistä pyrolyysiöljyn valmistuksessa ja jatkokäyttöä energialähteenä. Toinen skenaario kuvaa sivuainevirtojen suoraa polttoa ja kolmannessa skenaariossa nähdään,

minkä verran ympäristövaikutukset muuttuvat, jos energialähteenä käytetään raskasta polttoöljyä.

Oletuksena on, että energiantuotantoon käytettävä polttolaitos sijaitsee Savonlinnassa Pääskylahdessa. Pääskylahden voimalaitoksen hyötysuhteeksi on oletettu 83 prosenttia 0,83 ja laskennallinen sähköntuotannon polttoaineentarve on vuonna 2011 laskettu olleen noin 75,4 GWh. (AVI 2013 a) Laskennassa toiminnalliseksi yksiköksi valittiin yksi megawattitunti sähköä tuotettuna valitulla polttoaineella.

3.1 Skenaario 1

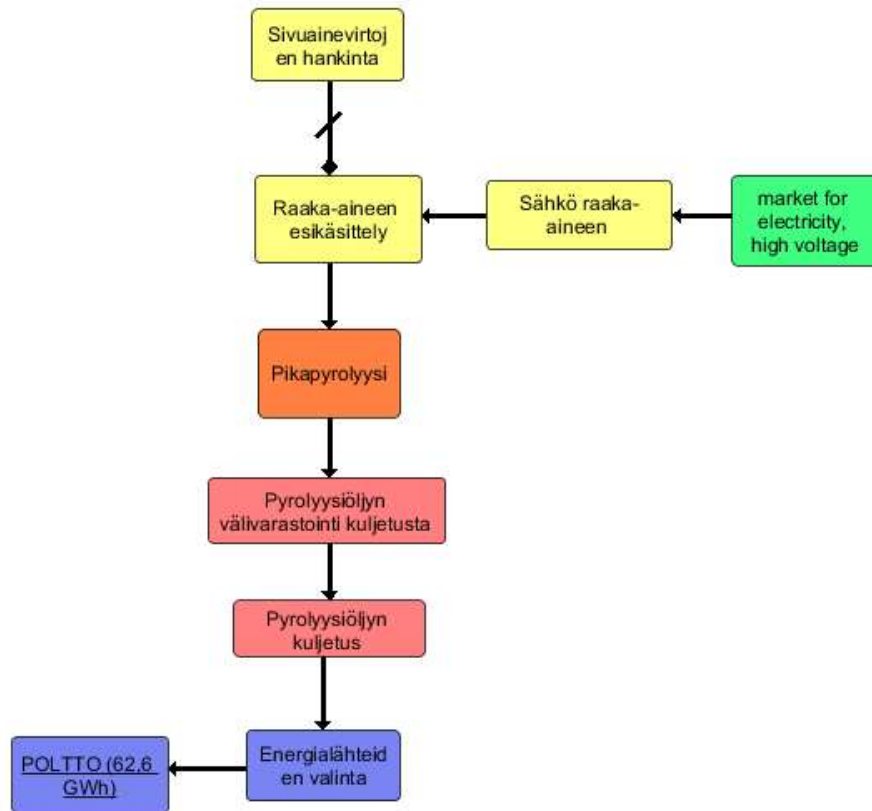
Ensimmäisen tarkastelun osalta selvitetään, minkä suuruinen ilmastovaikutus syntyy, jos mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtoja hyödynnetään energiantuotantoon käytettävän pyrolyysiöljyn valmistuksessa. Skenaario 1 merkityksellisimmät yksikköprosessit ovat; sivuainevirtojen hankinta, raaka-aineen käsittely, pikapyrolyysi, sähkön hankinta raaka-aineen esikäsittelyyn ja pyrolyysi prosessiin, pyrolyysi prosessin käyttöhyödykkeet kuten nestekaasu ja nestemäinen tyyppi sekä pyrolyysiöljyn loppukäyttö eli poltto-prosessi. Pyrolyysiöljyn välivarastoinnista tai kuljetuksesta ei tässä tarkastelussa katsota aiheutuvat päästötä koska laskennassa oletetaan tuotetun bioöljyn riittävän viereisen tontin polttolaitoksen tarpeeseen.

Ensin selvitettiin, paljonko sivuainevirtoja tarvitaan pyrolyysiöljyn valmistamiseen, jolla saadaan tuotettua haluttua toiminnallista yksikköä vastaava määrä sähköä. Pääskylahden voimalaitosta koskevien tietojen (vuoden 2011) perusteella voitiin selvittää, että halutun energiamäärän tuottamiseksi tarvittaisiin noin 15 972 tonnia pyrolyysiöljyä.

BioSaha-hankkeessa käytettyjen lähtöarvojen mukaan pyrolyysiöljyn saanto on 76 prosenttia kuivan puun painosta (Alakangas 2016). Tämän perusteella voitiin laskea, että tarvittavan biomassan eli kuivan purun tai hakkeen määrä on tällöin noin 21 015 tonnia. Saapumistilaisen biomassan kosteus on 50 %, minkä perusteella Pääskylahden laitoksella tuotettavan sähkön tuottamiseen tarvitaan raaka-ainetta (wet) noin 42 030 tonnia. Tästä voitiin laskea, että yhtä

tuotettua megawattituntia kohden tarvitaan noin 0,56 tonnia märkää biomassaa ($0,56 \text{ t/MWh}_{\text{BMwet}}$) ja 0,28 tonnia ($0,28 \text{ t/MWh}_{\text{BMdry}}$) kuivaa biomassaa.

Oletuksena oli, että sivuainevirtojen hankinta tapahtuu noin sadan kilometrin säteeltä raaka-aineen käsittelypaikasta, mikä on tässä tapauksessa Pääskylahden voimalaitoksen alueella. Sivuaainevirtojen hankinnasta ei katsota tässä tarkastelussa aiheutuvan päästöjä, koska se on toisen toimijan jäte, mikä hyödynnetään mutta sitä ei synny tämän toiminnon aikana. Märän biomassan kuljettamisesta aiheutuvat päästöt muodostuvat täydessä raaka-ainelastissa ja vuorostaan toiseen suuntaan tyhjillään kulkevista rekkakuljetuksista. Kuljetus tapahtuu tavallisella yhdistelmäajoneuvolla. Kuvassa 1 on esitetty skenaario 1 prosessikaavio ja yksikköprosessit.



Kuva 1: Skenaario 1 prosessikaavio ja yksikköprosessit.

Tieliikenteen päästöjen tarkastelu perustuu LIPASTO-tietokannasta saatuihin arvoihin eri ajoneuvotyyppien päästökertoimista. LIPASTO on Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n toteuttama ja ylläpitämä Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Se kattaa tie-, raide-, vesi- ja ilmaliikenteen sekä työkoneet. Tietokannassa tieliikenteen käytönaikaiset päästömäärät ja energiankulutus esitetään grammoina kilometriä tai esimerkiksi tonnikilometriä kohden. (LIPASTO) Tonnikilometrit on valittu tässä laskelmassa määrääväksi tekijäksi, koska Sulca-mallinnusohjelmassa päästömäärät skaalataan tonnikilometrejä kohden. Tämän perusteella voitiin määrittää kuljetussuoritteet, mitä kertyy raaka-aineen eli purun tai hakkeen kuljettamisesta. Laskennassa on käytetty maantieliikenteen kuljetuksen päästökerrointa.

Kuljetus tapahtuu yhdistelmäperävaunu rekalla, jonka kantavuus on 51 tonnia. Kuljetusten täyttöasteena käytettiin 100 prosenttia. Oletuksena on, että pyrolyysi-prosessiin päätyvät

sivuainevirrat kootaan noin 100 km säteeltä pyrolyysi-laitokseen nähden. Alla on esitetty laskelmat kuljetuspäästöistä. Pyrolyysiöljyn valmistamiseen tarvittavan biomassan kuljettamiseen tarvitaan 824 rekkakuljetusta, josta yhteen suuntaan kuljettavaa matkaa kertyy yhteensä 82 413 km.

Tonnikilometri on liikennesuorite, jolla kuvataan yhden tavaratonnin kulkemaa kilometrin pituista matkaa. Tyhjän rekan liikuttelusta aiheutuvat päästöt laskettiin LIPASTO-tietokannan laskentaohjeen mukaan. Laskennassa käytettiin yhtälöä 1 ja taulukon 1 tietoja. Tyhjän rekan kulkemisesta aiheutuvat päästöt on koottu taulukoon 2.

$$(1) e_x = (e_a + ((e_b - e_a) / l_c \times l_x)) / l_x, \text{ jossa (Taulukko 1)}$$

Laskennan perusteella saatiin taulukon 3 mukaiset arvot täydessä lastissa olevan täysperävaunurekan kuljetuksen ilmastolämmittämisvaikutusta aiheuttavista päästöistä. Tarkastelussa on otettu huomioon metaani (CH₄), typpidioksidi (N₂O) ja hiilidioksidi (CO₂) päästöt.

Taulukko 1: Laskentaparametrit tonnikilometrikohtaisten päästöjen määrittämiseen yhtälöä 1 varten.

Ex	Päästö tonnikilometriä kohden kuormalla x	[g/tkm]
Eb	Täyden auton päästö ajoneuvokilometriä kohden	[g/km]
Ea	Tyhjän auton päästö ajoneuvokilometriä kohden	[g/km]
lc	Auton kantavuus	[t]
lx	Kuorma x	[t]

Etäisyyksiä (1 suunta)		
1 matka	100	km
Kaikille kuljetuksille	82 413	km
Kuljetussuorite kaikille kuljetuksille	3 463 875 477	tkm

Taulukko 2: Kuljetuksen päästöt tyhjällä rekalla, koko vuosi, 1 suunta.

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH ₄	0,0007	0,057689
N ₂ O	0,050	4,1206530
CO ₂	857	70627,99367
CO₂ ekv		71857,39

GWP-kertoimet: (CH₄)=25, (N₂O)= 298

Taulukko 3: Kuljetusten päästöt täydellä kuormalla (42 030 t/a), koko vuosi, 1 suunta.

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH ₄	0,0008	0,06593
N ₂ O	0,052	4,285479
CO ₂	1416	116696,895
CO₂ ekv		117975,62

GWP-kertoimet: (CH₄)=25, (N₂O)= 298

Laskelmien perusteella nähdään, että koko vuoden ajalta kuljetuksen päästöt täydellä kuormalla ajettaessa ovat noin 118 t CO₂ekv. Paluukyyti sen sijaan tapahtuu tyhjällä rekalla, minkä päästöt ovat vuositasolla noin 71,9 t CO₂ekv.

Raaka-aineen esikäsitelyssä märkä puuainees kuivataan ja käsitellään pyrolyysi prosessiin sopivaksi. Sähkönkulutus tässä yksikköprosessissa on noin 36 kWh yhtä megawattituntia tuotettua pyrolyysiöljyä kohden. Laskennallisesti puun painosta puolet poistuu veden mukana. Pikapyrolyysin päästövaikutukset syntyvät pääasiassa sähkönkulutuksesta sekä käyttöhyödykkeistä kuten nestekaasu ja nestemäinen typpi. Laskennassa on käytetty kirjallisuudesta saatua päästökerrointa 30,9 kg CO₂ekv/MWh_{pyrolyysiöljyä} pyrolyysiprosessin päästövaikutuksille (Jiqing et al. 2011). Pyrolyysiöljyn väliavarastointi on vaihtoehtoinen

yksikköprosessi, mistä ei tässä tarkastelussa oleteta aiheutuvan päästövaikutusta. Pyrolyysiöljyn kuljetukset laitosalueella ovat oletuksen mukaan niin lyhyitä, ettei niitä huomioida laskelmassa päästölähteinä.

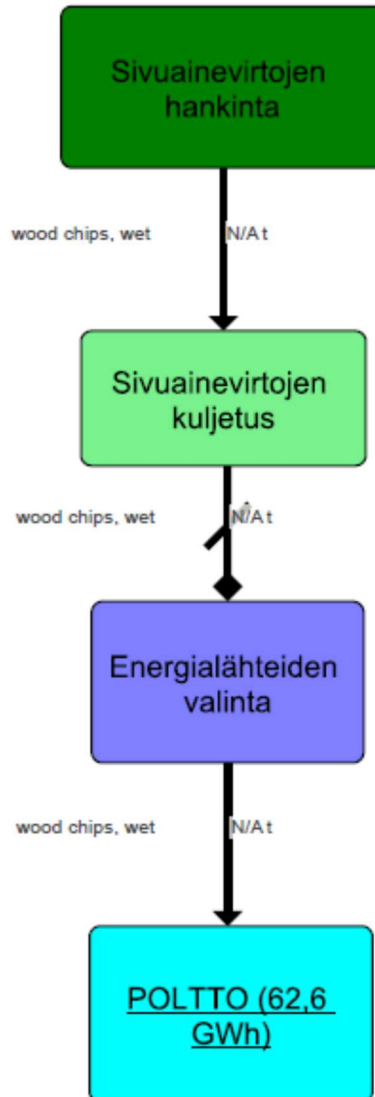
Pyrolyysiöljyn polttamisesta aiheutuvat hiilidioksidi päästöt ovat noin 0,287 t(CO₂)/MWh (79,6 tCO₂/TJ) (Tilastokeskus, Polttoaineluokitus 2019) ja vastaavasti typen oksideja vapautuu 0,26 tCO₂ ekv/MWh (AVI 2013 a). Yhteensä päästövaikutus pyrolyysiöljyn polttamisesta on 0,546 tCO₂ ekv/MWh. Päästökaupan mukaisessa tarkastelussa bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon, vain metaani ja typpipäästöt. Pyrolyysiöljyn poltosta aiheutuvat hiilidioksidi ja typpipäästöt on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Pyrolyysiöljyn poltosta aiheutuvat päästöt (lähde AVI 2013 a).

Päästö	Yksikköpäästö	Päästömäärä ekvivalenttitonneina	hiilidioksidi
CO ₂	0,28656 tCO ₂ /MWh	0,28656 tCO ₂ ekv/MWh	
Typenoksidit	0,86956 tNO _x /GWh	0,25913 tCO ₂ ekv/MWh	
Yhteensä:		0,54569 tCO₂ekv/MWh	

3.2 Skenaario 2

Toinen tarkastelu, skenaario 2, tarkastelee mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtojen aiheuttamia päästöjä, kun sitä käytetään sellaisenaan polton energialähteenä. Samoin kuin skenaariossa 1, tässä tarkastelussa sivuainevirtojen hankintaprosessista ei katsota aiheutuvan päästöjä, koska energialähteenä käytettävä puuainesaadaan toisen toiminnon sivuvirtana. Yksinkertaisuuden vuoksi skenaario 2 olettaa raaka-aineen koostuvan 100% puupohjaisista sivuvirroista. Todellisuudessa laitos käyttää noin kuudesosan myös muita energialähteitä (turve) (AVI 2013 b). Kuvassa 2 on esitetty skenaario 2 prosessikaavio ja yksikköprosessit.



Kuva 2: Skenaario 2 prosessikaavio ja yksikköprosessit.

Kuljetusten oletetaan tapahtuvat noin 100 km säteellä laitoksesta, jossa puuaines käytetään energiantuotantoon. Kuljettamiseen käytetään samanlaista täysperävaunu yhdistelmäajoneuvoa kuin pyrolyysiöljyn kuljettamiseen. Sivuainevirtojen osalta laskettiin, että vuoden aikana Pääskylahden voimalaitoksella sähköntuotantoon tarvitaan noin 25,4 tuhatta tonnia raaka-ainetta, kun sähköntuotannon polttoainetarve on 75,4 GWh ja sivuainevirtojen keskimääräinen energiasisältö on 2,97 MWh per tonni. Tämä tarkoittaa, rekka 51 tonnin kantavuudella, vuodessa 498 rekkakuljetusta. Kuljettuja kilometrejä yhteen suuntaan

vuositasolla kertyy näin ollen noin 49 756 km. Tyhjiä kuljetuksia lastinkeruupaikalle, jolloin rekka kulkee tyhjillään, on siten saman verran. Alla on esitetty laskelmat kuljetuspäästöistä, kun biomassa kuljetetaan sellaisenaan polttolaitokselle (Taulukko 5, 6 ja 7).

Taulukko 5: Skenaarion 2 laskennassa kuljetukselle käytettyjä lähtötietoja.

Etäisyyksiä (1 suunta)		
1 matka	100	km
Kaikille kuljetuksille	49 756	km
Kuljetussuorite kaikille kuljetuksille	1 262 582 700	tkm

Taulukko 6: Kuljetuksen päästöt tyhjällä rekalla, koko vuosi, 1 suunta

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH ₄	0,0007	0,034829
N ₂ O	0,050	2,487796
CO ₂	857	42640,83013
CO₂ ekv		43383,06

GWP-kertoimet: (CH₄)=25, (N₂O)= 298

Taulukko 7: Kuljetusten päästöt täydellä kuormalla (25 375 t/a), koko vuosi, 1 suunta

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH ₄	0,0008	0,0398047
N ₂ O	0,052	2,587308
CO ₂	1416	70454,39378
CO₂ ekv		71226,41

GWP-kertoimet: (CH₄)=25, (N₂O)= 298

Laskelmien perusteella nähdään, että koko vuoden ajalta mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtojen kuljetuksen päästöt täydellä kuormalla ajettaessa ovat noin 71,2 t CO₂ekv. Paluukyyti sen sijaan tapahtuu tyhjällä rekalla, minkä päästöt ovat vuositasolla noin 43,4 t CO₂ekv.

Metsäbiomassan polttamisesta aiheutuvien päästöjen osalta (Taulukko 8) on huomioitu hiilidioksidi sekä metaani ja typpipäästöt. Hiilidioksidipäästö on tilastokeskuksen polttoaineluokituksen mukaan noin 0,403 tCO₂/MWh (112 tCO₂/TJ) (Tilastokeskus. 2019). Puuperäisten polttoaineiden osalta on tehty myös oletus, että poltosta aiheutuvien metaani ja

dityppioksidin vaikutus polton aikaisiin päästöihin on luokkaa 0,56 g CO₂-ekv/MJ (2 kgCO₂-ekv/MWh) (Massinen 2017). Päästökaupan mukaisessa tarkastelussa bioperäisiä hiilidioksidipäästöjä ei oteta huomioon, vain metaani ja typpipäästöt.

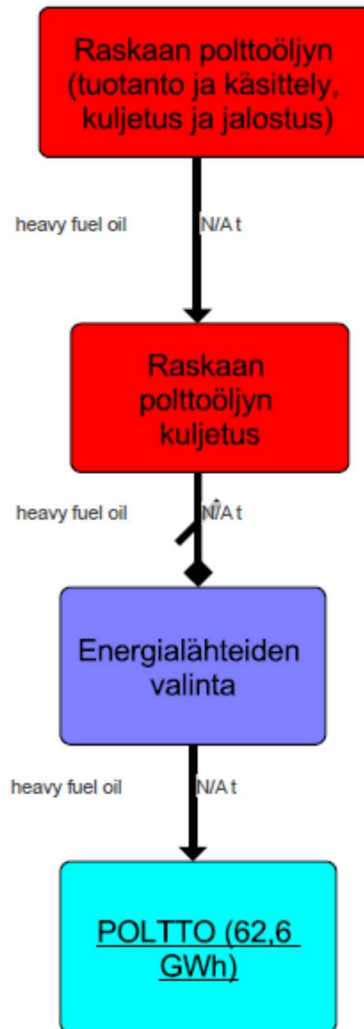
Taulukko 8: Metsäbiomassan poltosta aiheutuvat päästöt.

Päästö	Yksikköpäästö	Hiilidioksidi ekvivalentti	Lähde
CO ₂	112 tCO ₂ /TJ	0,403 tCO ₂ ekv/MWh	Tilastokeskus
Metaani ja typpi päästöt	0,56 gCO ₂ ekv/MJ	2 021,661 gCO ₂ ekv/MWh	Massinen 2017
		0,002 tCO ₂ ekv/MWh	
Yhteensä		0,405 tCO₂ekv/MWh	

3.3 Skenaario 3

Kolmannessa skenaariossa tarkasteltiin raskaan polttoöljyn käytön vaikutuksia sähköntuotannon päästöihin, kun vertailukohteena on pyrolyysiöljyn tai metsäbiomassan käyttäminen polttoaineena. Laskennassa huomioon otettavat yksikköprosessit ovat raskaan polttoöljyn tuottaminen, käsittely, kuljetus ja jalostus, kuljetus jalostamolta Savonlinnan Pääskylähteen (oletetun sähköntuotantolaitoksen sijainti) sekä raskaan polttoöljyn käyttövaihe sähköntuotannossa (poltto). Kuvassa 3 on esitetty skenaarion 3 prosessikaavio ja yksikköprosessit.

Raskaan polttoöljyn tuotannon kasvihuonekaasupäästöt on materiaaleista kerättyjen tietojen perusteella 10 gCO₂ekv/MJ, mikä tarkoittaa noin 36 kgCO₂ekv/MWh (VTT 2018). Tämä ottaa huomioon raskaan polttoöljyn tuotannon, käsittelyn, kuljetukset jalostuslaitokselle sekä jalostuksesta aiheutuvat päästöt. Tässä esimerkissä lähin jalostuslaitos sijaitsee noin 500 km päässä sähköntuotantolaitoksesta, joten huomioon on otettava vielä tästä edestakaisista kuljetuksista aiheutuvat päästöt.



Kuva 3: Skenaario 3 prosessikaavio ja yksikköprosessit.

Laskettiin, että Pääskylahden voimalaitoksen sähköntuotantoon tarvittavan raskaan polttoöljyn määrä on noin 6 721 tonnia, kun lämpöarvo on 11,2 MWh/t ja polttoaineentarve noin 75,4 GWh. Tämän perusteella voitiin laskea, että polttoöljyn kuljettamiseen tarvitaan vuoden aikana 132 rekkakuljetusta. Kuljetusten yhdensuuntainen kokonaismatka on 65 890 km, jolloin kuljetussuorite on 442 827 498 tonnikilometriä (tkm). Alla on esitetty kuljetuksesta aiheutuvat päästöt, kun raskas polttoöljy kuljetetaan jalostuslaitokselta polttolaitokselle (Taulukko 9,10,11).

Taulukko 9: Skenaarion 3 laskennassa kuljetukselle käytettyjä lähtötietoja.

Etäisyyksiä (1 suunta)		
1 matka	500	km
Kaikille kuljetuksille	65890	km
Kuljetussuorite kaikille kuljetuksille	442 827,498	tkm

Taulukko 10: Kuljetuksen päästöt tyhjällä rekalla, koko vuosi, 1 suunta.

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH4	0,0007	0,577984015
N2O	0,050	3,898031731
CO2	857	83471,645
CO2 ekv		84 647,71

GWP-kertoimet: (CH4)=25, (N2O)= 298

Taulukko 11: Kuljetusten päästöt täydellä kuormalla (25 375 t/a), koko vuosi, 1 suunta.

Päästö	Yksikköpäästö [g/km]	Päästömäärä, [kg]
CH4	0,0008	0,05271172
N2O	0,052	3,4262618
CO2	1416	93299,74528
CO2 ekv		94322,09

GWP-kertoimet: (CH4)=25, (N2O)= 298

Raskaan polttoöljyn polton aikaiset päästöt on määritetty Ecoinvent-tietokannan tietojen perusteella (Taulukko 12).

Taulukko 12: Raskaan polttoöljyn polton aikaiset päästöt. Lähde: Ecoinvent, Heavy fuel oil, burned in refinery furnace.

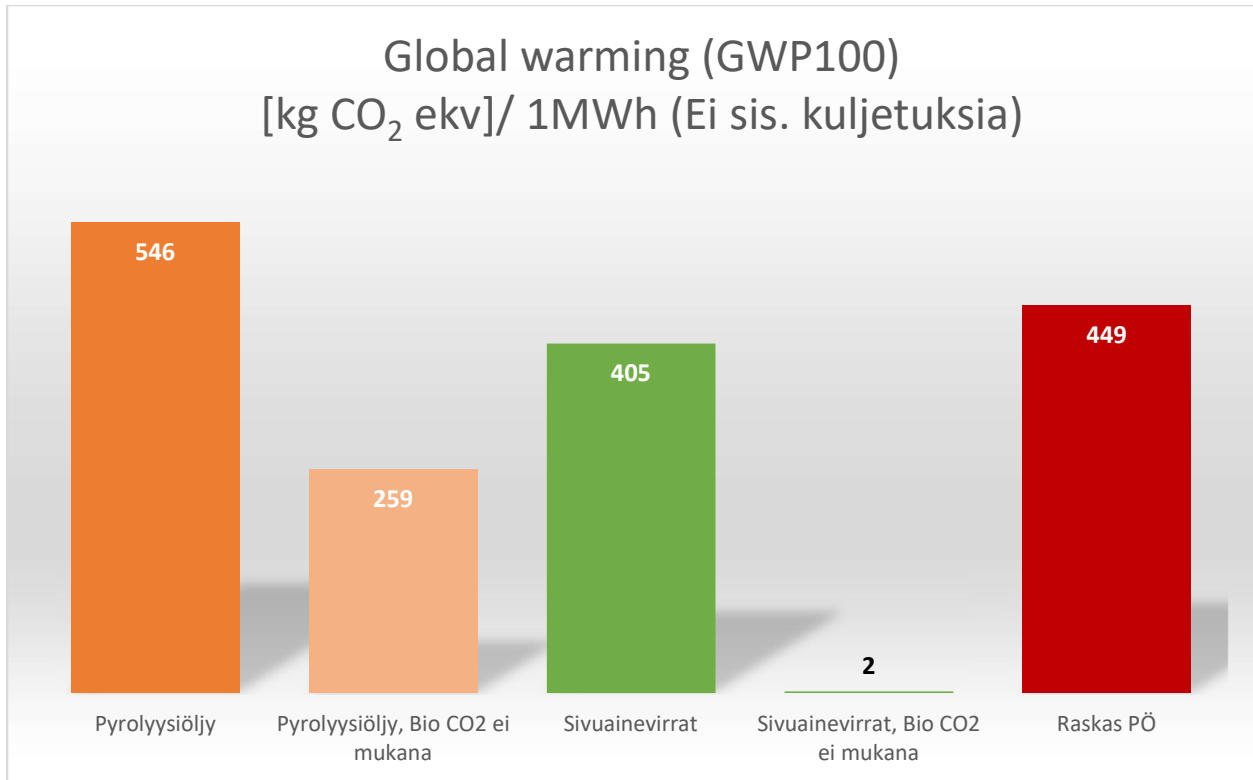
GWP-kertoimet: (CH ₄)=25, (N ₂ O)= 298	Hiilidioksidi ekvivalenttitonneina	
CO ₂	75,6	g/MJ
metaani	0,00485	g/MJ
typpi	0,131	g/MJ
Yhteensä	114,759	gCO₂ekv/MJ
	0,413	tCO₂ekv/ MWh

Tietokannan mukaan on tehty alla oleva laskelma, jonka perusteella nähdään raskaan polttoöljyn polton aikaisten päästöjen olevan noin 0,413 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia per megawattitunti.

4. Tulokset ja niiden analysointi

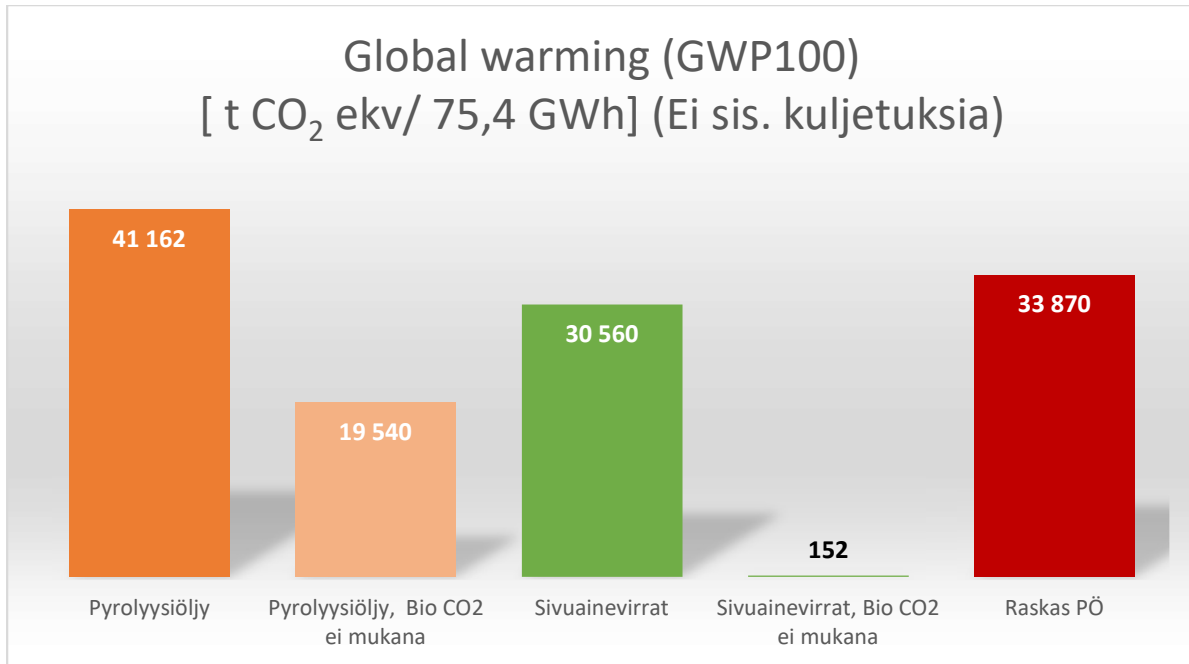
Tässä kappaleessa esitellään skenaarioiden 1-3 tulokset. Tulokset esitellään yksikköprosessikohtaisesti sekä kokonaistulosten osalta. Tarkastelussa on otettu huomioon bioperäinen hiilidioksidi, jolla tarkoitetaan biomassan polttamisesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Päästökaupanmukaisen tarkastelun perusteella bioperäistä hiilidioksidia (Bio CO₂) ei oteta huomioon kokonaispäästöjä laskettaessa. Tuloksissa on esitetty laskelmat, mikä ottaa huomioon kaikki ilmastolämmitysvaikutusta aiheuttavat päästöt sekä ns. päästökaupan mukainen tarkastelu.

Kokonaispäästöjen osalta tehtyjen laskelmien perusteella voidaan nähdä, että merkittävimmät ympäristövaikutukset muodostuvat pyrolyysiöljyn käyttämisestä energiantuotannossa. Kuvassa 4 on esitetty ilmastolämmittämisvaikutus eri polttoaineille megawattituntia kohden, kun tarkastelussa ei ole mukana kuljetusten aiheuttamia päästöjä.



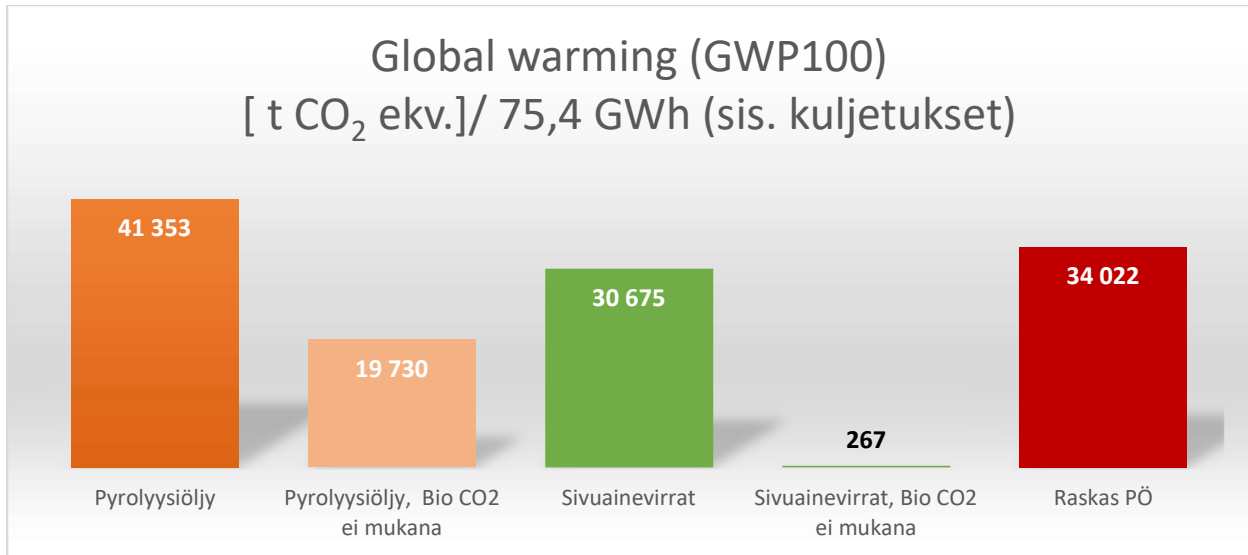
Kuva 4: Ilmastonlämmittämisvaikutus eri polttoaineille, kun tarkastelussa ei ole mukana kuljetusten aiheuttamia päästöjä [kg CO₂ ekv/ 1MWh].

Raskaan polttoöljyn käytöstä aiheutuu päästöjä megawattia tuotettua sähköä kohden noin 449 kgCO₂ekv, sivuainevirtojen käytöstä noin 405 kgCO₂ekv sekä pyrolyysiöljyn käytöstä noin 546 kgCO₂ekv. Jos laskelmissa ei oteta huomioon bioperäistä hiilidioksidia sivuainevirtojen käytöstä aiheutuu vain noin 2 kgCO₂ekv sekä pyrolyysiöljyn käytöstä noin 259 kgCO₂ekv päästöt megawattituntia kohden. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty koko vuoden osalta sähköntuotantoon tarvittavan polttoaineen polttamisesta aiheutuvat päästöt. Kuvassa 6 on mukana liikenteen päästöt.



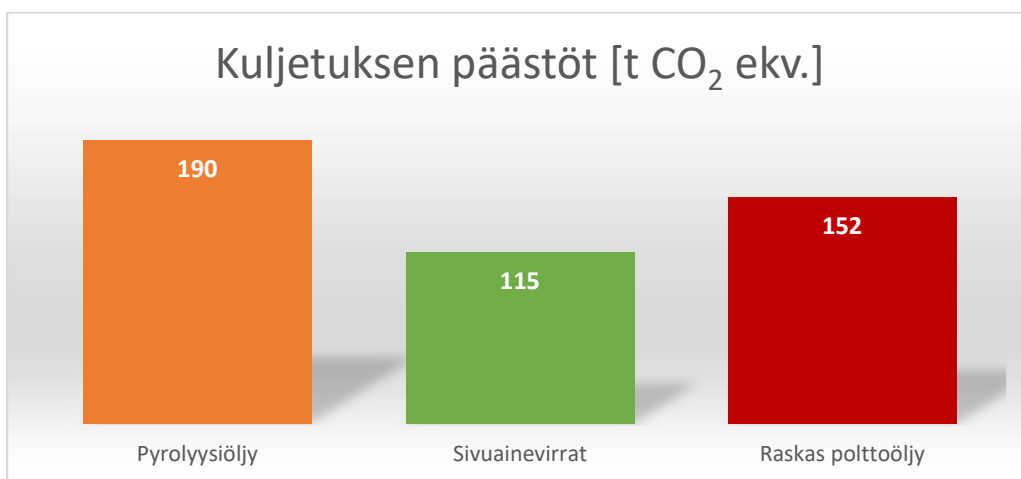
Kuva 5: Sähköntuotannon päästöt, koko vuodelta, ei sisällä kuljetuksien osuutta.

Kuvan 5 perusteella nähdään, että pyrolyysiöljyn käytöstä aiheutuu päästöjä 41 162 t CO₂ekv, ja ilman bioperäisen hiilidioksidin huomiointia 19 540 t CO₂ekv. Sivuainevirtojen käyttö aiheuttaa päästöjä 30 560 t CO₂ekv, ja jos bioperäistä hiiltä ei oteta huomioon päästö määrä on 152 t CO₂ekv. Raskaan polttoöljyn ympäristövaikutus on 33 870 t CO₂ekv.



Kuva 6: Sähköntuotannon päästöt, koko vuodelta, sisältää kuljetusten osuudet

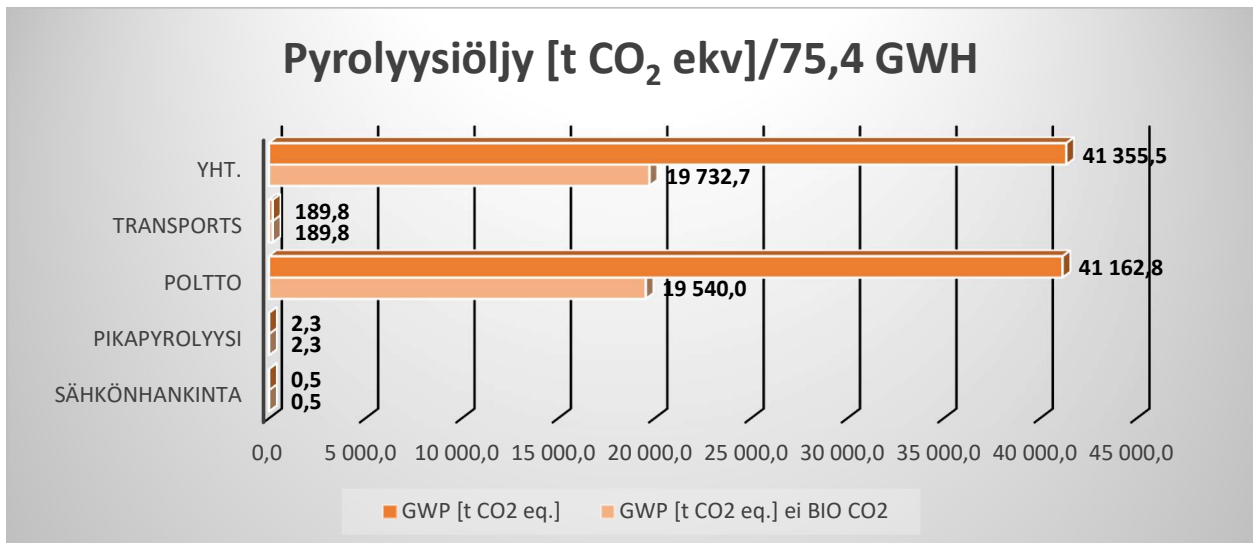
Kuljetusten osuus kuljetettaessa pyrolyysiöljyä on 0,9 prosenttia ja jos bioperäistä hiilidioksidia ei huomioida on kuljetusten osuus 1,0 prosenttia. Sivuainevirtojen osalta kuljetuksista aiheutuu vain 0,4 % kokonaispäästöistä, mutta jos bioperäistä hiilidioksidin osuutta ei polton osalta huomioida on kuljetusten osuus tällöin jopa 42,9 prosenttia. Raskaan polttoöljyn kuljettamisesta aiheutuu kuljetusten osalta päästöjä noin 0,4 prosenttia kokonaispäästöistä. Kuvassa 7 on esitetty kuljetusten päästöt koko vuoden ajalta eri energialähteille.



Kuva 7: Kuljetusten päästöt koko vuoden ajalta

4.1 Skenaario 1

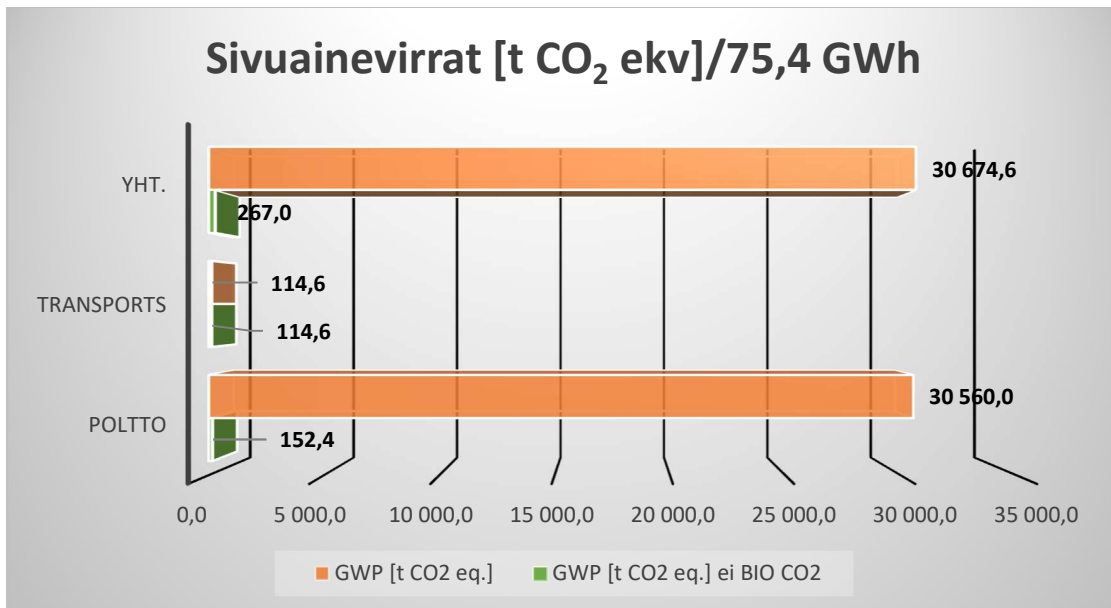
Pyrolyysiöljyn valmistamisesta ja sen käytöstä sähköntuotannossa aiheutuu päästöjä oletettua vuosituotantoa kohden noin 41 431 t CO₂ekv. Tästä suurin osa noin 41 160 t CO₂ekv aiheutuu polttovaiheesta, kuljetuksista 189,1 t CO₂ekv, pikapyrolyysistä noin 2,3 t CO₂ekv ja esikäsitteilyn sekä pikapyrolyysin sähköntarpeesta noin 0,5 t CO₂ekv. Jos tarkastelussa ei oteta huomioon bioperäistä hiilidioksidia on poltosta aiheutuvat päästöt noin 19 540 t CO₂ekv. Kuvassa 8 on esitetty pyrolyysiprosessin ja pyrolyysiöljyllä tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.



Kuva 8: Pyrolyysiprosessin ja pyrolyysiöljyllä tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.

4.2 Skenaario 2

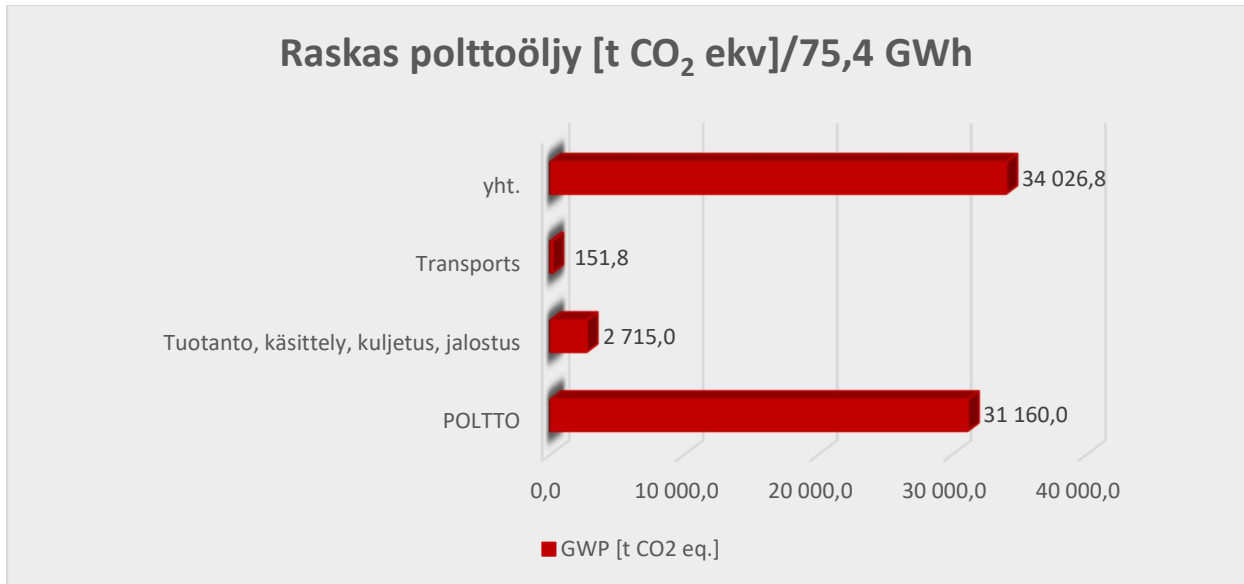
Käytettäessä sähköntuotannon energianlähteenä mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtoja ainoat laskennalliset päästöt syntyvät poltosta ja kuljetuksista. Sivuainevirtojen hankinnan päästöt eivät sisälly tähän tarkasteluun. Polttovaiheen päästöt ovat 30 560 t CO₂ekv ja kuljetusten 114,6 t CO₂ekv. Jos tarkastelussa ei oteta huomioon bioperäistä hiilidioksidia on poltosta aiheutuvat päästöt noin 152,4 t CO₂ekv. Kuvassa 9 on esitetty mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirroilla tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.



Kuva 9: Mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirroilla tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.

4.3 Skenaario 3

Käytettäessä sähköntuotannon energianlähteenä raskasta polttoöljyä päästöjä syntyy poltosta 31 160 t CO₂ekv, polttoöljyn tuotannosta, käsittelystä, jalostuksesta ja näiden työvaiheiden aikaisista kuljetuksista noin 2 715 t CO₂ekv. Kuljetusten päästöt ovat noin 151,8 t CO₂ekv. Kokonaispäästöt vuoden sähköntarpeen osalta ovat noin 34 027 t CO₂ekv. Kuvassa 10 on esitetty raskaalla polttoöljyllä tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.



Kuva 10: Raskaalla polttoöljyllä tuotetun sähkön kokonaispäästöt vuosituotantoa kohden.

5. Johtopäätökset ja yhteenveto

Energiantuotanto on murrosvaiheessa niin kansallisesti kuin kansainvälisellä tasolla. Energiantuotannon päästöjen hallinta ja vähentäminen ovat avainasemassa tartuttaessa ilmastonäkökulmiin. Fossiilisten polttoaineiden käytön minimointi ja jopa kokonaan niistä luopuminen voivat olla tulevaisuudessa hyvinkin mahdollisia, jos energiantuotannon uudistukset saadaan tehtyä yhteiskunnan toiminnot huomioon ottaen. Bioperäisten raaka-aineiden hyödyntäminen ja niiden arvonnosto jalostustoiminnan kautta on yksi mahdollisuus päästövähentämien tavoittelussa.

Tässä raportissa tehtyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että esimerkiksi mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirtojen jalostaminen korkeamman jalostusasteen tuotteeksi ja sen käyttäminen energiantuotannossa aiheuttaa tässä päästötarkastelussa vertailussa olleiden energialähteiden osalta eniten päästöjä, jos kaikki hiilidioksidi lasketaan mukaan tarkasteluun. Mekaanisen metsäteollisuuden sivuainevirroista pikapyrolyysiprosessilla valmistettu bioöljy (pyrolyysiöljy) osoittautui näiden laskennassa huomioon otettujen seikkojen puitteissa päästöjen kannalta huonommaksi verrattaessa sitä sivuvirtojen ja raskaan polttoöljyn käyttöön. Tässä on kuitenkin huomioitava, että päästökaupan mukaisessa tarkastelussa bioperäistä hiilidioksidia ei

oteta huomioon päästöjä laskettaessa. Kun tarkastelu tehdään päästökaupan mukaisesti, tilanne kääntyy aivan toiseen suuntaan. Sivuainevirtojen hyödyntäminen on päästöjen tarkastelun kannalta paras vaihtoehto energiantuotantoon, mutta myös pyrolyysiöljyn käyttö osoittautuu huomattavasti paremmaksi vaihtoehdoksi kuin raskas polttoöljy. Kokonaispäästöt ovat pyrolyysiöljyllä vain noin 58 prosenttia raskaaseen polttoöljyyn verrattuna.

Päästökaupan merkitys ympäristövaikutusten laskennassa onkin olennaisessa osassa, miltä tulevaisuus näyttää päästölaskennan osalta. Jatkammeko tarkastelua edelleen siitä näkökulmasta, että metsien uusiutumisen ja kasvun katsotaan kompensoivan puuston hakkuiden ja siitä tehtyjen jalosteiden käytön aikaiset päästöt.

LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT TECHNOLOGY 258. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

AVI 2013 a. Verkkodokumentti. Pyrolyysiöljyn polttoa koskeva koetoimintailmoitus, Joensuu. Viitattu: 15.9.2019. Saatavissa: https://www.avi.fi/documents/10191/56910/isavi_paatos_45_2013-1-2013-5-21.pdf/1f7f6550-9ae1-43a1-b5c4-82906cae9a64.

AVI 2013 b. Päätös. Savonlinnan voimalaitoksen ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Savon-linna. Verkkodokumentti. Viitattu 20.11.2019. Saatavissa: http://www.avi.fi/documents/10191/56910/isavi_paatos_22_2013_1-2013-3-20.pdf.

Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Academic Press.

Jiqing Fan a, Tom N. Kalnes b, Matthew Alward a, Jordan Klinger a, Adam Sadehvandi a, David R. Shonnard a. 2011. Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil.

Renewable Energy, 36, pp. 632-641. Verkkodokumentti. Viitattu 15.9.2019. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.045>.

LIPASTO. Tietokanta sähköisenä osoitteessa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/>.

Massinen Maija. 2017. Diplomityö. Polttoaineenhankinnan ekologinen kestävyys – case Rovaniemen energiahuolto. Viitattu: 11.11.2019. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/130785/Diplomity%C3%B6_Massinen_Maija.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Tilastokeskus. 2019. Polttoaineluokitus 2019. Verkkodokumentti. Viitattu: 11.11.2019. Saatavissa: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html.

VTT 2018. Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Verkkodokumentti. Viitattu: 11.11.2019. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2018/T336.pdf>.

Ecoinvent 3.5 tietokannan viittaukset:

Dataset documentation, Market for liquefied petroleum gas – GLO

Dataset documentation, Market for nitrogen, liquid - RER

Dataset documentation, Market for electricity, high voltage, FI (Finland)

Dataset documentation, Heavy fuel oil, burned in refinery furnace, Europe without Switzerland

KIITOKSET

Raportti on toteutettu osana seuraavia Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun hallinnoimia hankkeita.



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Biokasvu -Biotuotetekniikan kasvukosysteemin kehittäminen Savonlinnassa

Hanke on saanut rahoitusta TEM - Työ- ja elinkeinoministeriöstä sekä Savonlinnan kaupungilta.

Lisätietoja www.xamk.fi/biokasvu

Opetus- ja
kulttuuriministeriö

Biosaha - Mäntytukin sahauksen ja sivuvirtojen biojalostuksen edistäminen

Hanke on saanut rahoitusta Etelä-Savon Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus Euroopan aluekehitysrahastosta. Lisätietoja www.xamk.fi/biosaha



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020