

LUT Yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Hiilidioksidipäästöjen hallinta
sulfaattisellutehtaalla korvaamalla
meesauunin maakaasu

Työn tarkastaja: Katja Kuparinen

Työn ohjaaja: Katja Kuparinen

Lappeenranta 6.5.2019

Emma Lonka

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Emma Lonka

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Katja Kuparinen

Kandidaatintyö 2019

39 sivua, 6 kuvaa, 8 kaavaa ja 5 taulukkoa

Hakusanat: kandidaatintyö, meesauuni, maakaasu, päästökauppa, sulfaattisellu

Kyseinen kandidaatintyö tarkastelee sulfaattisellun valmistuksen fossiilisten hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen johtavaa ohjauspolitiikkaa, sekä suurinta yksittäistä fossiilisten hiilidioksidipäästöjen aiheuttajaa, meesauunia. Mittasuhteiden hahmottamiseksi työn alussa on esitelty myös metsäteollisuuden merkitys suomalaiselle kansantaloudelle sekä kokonaisvaikutus päästökaupan alaisiin hiilidioksidipäästöihin. Päästöjen vähentämiseen ohjaavista seikoista käsitellään päästökauppa ja siihen tulevat muutokset tulevalle päästökauppakaudelle 2021-2030, lainsäädännöllisiä pääpiirteitä, kansainvälisten sopimusten vaikutus sekä suurimpien metsäyhtiöiden omia tavoitteita hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Meesauunien tyypilliset pääpolttoaineet Suomessa ovat olleet maakaasu ja polttoöljy, joista tässä työssä on rajattu kohteeksi maakaasu. Maakaasun osalta työ käsittää tuotannon, kemiallisen ja polttoteknisen koostumuksen, päästövaikutukset ja hinnanmuodostumisen mukaan lukien päästökaupan mahdollinen kustannusvaikutus. Työn lopussa esitellään ratkaisuja työn alussa esitettyihin haasteisiin tarkastelemalla pääpiirteittäin teknisiä ratkaisuja maakaasun korvaamiseen joko kokonaan tai osittain.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Sulfaattisellun valmistus suomessa	7
2.1 Sulfaattisellun merkitys suomen kansantaloudelle.....	7
2.2 Kemikaalien talteenoton pääpiirteet	7
2.3 Meesauuni	8
2.4 Päästöt suomalaisilla sulfaattisellutehtailla	12
3 Päästökauppa ja Tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen	14
3.1 Päästökauppa ja ilmaiset päästöoikeudet	14
3.2 Lainsäädäntö ja kansainväliset tavoitteet hiilidioksidin vähentämiseen .	17
3.2.1 Kioton pöytäkirja ja Pariisin sopimus	18
3.3 Yhtiöiden tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen	19
4 Maakaasu polttoaineena	22
4.1 Maakaasun tuotanto.....	22
4.2 Maakaasun koostumus ja poltto-ominaisuudet	22
4.3 Maakaasun päästövaikutuksia	23
4.4 Maakaasun hinta sekä päästöjen hinnan muodostuminen	24
5 Vaihtoehtoiset menetelmät maakaasun korvaamiseen	26
5.1 LignoBoost	26
5.2 Kaasutus	27
5.3 Puru	29
5.4 Muut biopolttoaineet	29
5.4.1 Biohiili	30
5.4.2 Biokaasu.....	31
5.4.3 Raakasuopapohjaiset bioliemet.....	32
6 Johtopäätökset ja yhteenvedo	34
Lähdeluettelo	36

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet ja kemialliset merkinnät

°C	Celsiusaste
CaCO ₃	Kalsiumkarbonaatti
Ca(OH) ₂	Kalsiumhydroksidi
CaO	Kalsiumoksidi, sammutettu kalkki
CH ₄	Metaani
CO	Hiilimonoksidi, häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
ESP	Electrostatic presipitator, sähkösuodin
H ₂ O	Vesi
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitusten välinen ilmastopaneeli
LNG	Liquified Natural Gas, nesteytetty maakaasu
Na ₂ CO ₃	Natriumkarbonaatti
NaOH	Natriumhydroksidi
NO _x	Typenoksidi
NPE	Non-Process Elements, prosessiin kuulumaton haitta-aine
ppm	Parts per million, miljoonasosa
SO ₂	Rikkidioksidi
t	Tonni, 1000 kg
tCO ₂	Tonnia hiilidioksidia, yleisesti käytetty yksikkö hiilidioksidipäästöistä
TRS	Total Reduced Sulphur, haisevat rikkiyhdisteet

1 JOHDANTO

Metsäteollisuudella on Suomalaiselle kansantaloudelle merkittävä vaikutus, ja metsäteollisuuden liikevaihdon odotetaan kasvavan kansainvälisesti 200 mrd€ (Pöyry, 2018) vuoteen 2030 mennessä. Samanaikaisesti yhä tiukentuvat päästövaatimukset sekä päästöoikeuksien jakoa tiukentava lainsäädäntö aiheuttavat painetta fossiilittomien polttoaineiden käyttöön suomalaisessa metsäteollisuudessa. Tämä työ käsittelee taustaa hiilidioksidipäästöjen hallintaan korvaamalla meesauunin fossiilisia polttoaineita

Hiilidioksidi (CO₂) on väritön ja mauton kaasu, joka sopivissa pitoisuuksissa ei aiheuta ongelmia ihmiskunnalle ja on välttämätön kasvien fotosynteesin onnistumiselle. Fossiilisten polttoaineiden käytön lisääntymisen myötä ilmakehän hiilidioksidin taso on ollut jatkuvassa kasvussa. Nykyisen tietämyksen mukaan hiilidioksidin pitoisuuden nouseminen on suurin yksittäisistä ilmaston lämpenemisen syistä, joten ilmaston lämpenemisen hallitsemiseksi ainut keino on lopettaa, tai ainakin vähentää merkittävästi hiilidioksidia muodostavien, fossiilisten polttoaineiden, kuten öljyn, maakaasun, hiilen tai turpeen, käyttöä. (De Nevers 2000. 518-522).

Aiheita, jotka käsittelevät sellutehtaan tai meesauunin fossiilisten polttoaineiden korvaamista on tutkittu kansainvälisesti useaan eri otteeseen, mutta yksiselitteistä ja yleismaailmallista vastausta asiaan ei ole voitu antaa. Aiempien tutkimusten takia kyseisen työn painopiste on nykyisiin päästötavoitteisiin ohjaavissa seikoissa, jonka jälkeen esitellään sulfaattiselluprosessin eniten fossiilista polttoainetta vievä osa meesauuni, maakaasu polttoaineena sekä vaihtoehtoja meesauunin maakaasun korvaamiseen. Kokonaisuuden hahmottamiseksi taustaksi työssä on selvitetty Suomalaisen selluteollisuuden merkitys kansantaloudelle ja ympäristölle.

Työ on toteutettu kokonaisuudessaan kirjallisuuskatsauksena ja rajallisen pituuden takia työn ulkopuolelle on jätetty vertailu kustannuslaskennasta sekä polttoaineen tarkemmat vaikutukset sulfaattiselluprosessin muihin vaiheisiin. Työssä kerrotaan sulfaattisellun valmistuksen pääpiirteistä kemikaalien talteenoton osalta, sekä esitellään meesauunin toiminta. Erottuakseen muista aiheeseen liittyvistä opinnäytetöistä on näkökulmaksi otettu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ohjaava politiikka, kaudelle 2021-2030 tiukentuva päästökauppa, lainsäädäntö sekä vapaaehtoiset tavoitteet, joilla yritys pystyy

ylläpitämään ympäristömerkkejään. Hiilidioksidipäästöjen vähentämisen vaihtoehdot on käsitelty tässä työssä vain polttoaineen korvaamisen osalta työn rajaamiseksi, eikä erilaisia vaihtoehtoja hiilidioksidin sidontaan ja säilömiseen ole käsitelty.

Hiilidioksidipäästöjen vähennykseen haetaan keinoja maakaasun korvaamiseen, joten taustoitukseksi työssä esitellään maakaasun hankintaan ja käyttöön eniten merkittävät ominaisuudet sekä maakaasun hintapolitiikka. Vaihtoehtoiset menetelmät käydään lävitse teoreettisella tasolla perehtymällä aiempiin tutkimustuloksiin ja valmistajien ilmoittamien tietojen avustuksella. Työn rajallisen pituuden vuoksi tekniset ominaisuudet ja tarkempi laskenta on rajattu työn ulkopuolelle.

2 SULFAATTISELLUN VALMISTUS SUOMESSA

Nykyinen sellumassan valmistus perustuu suomessa sulfaattimenetelmään, joka on yksi kemiallisen metsäteollisuuden osa-alue.

2.1 Sulfaattisellun merkitys suomen kansantaloudelle

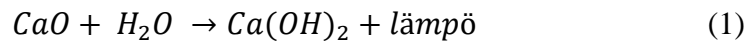
Yleisesti metsäteollisuus on merkittävässä osassa suomalaiselle kansantaloudelle ja tuottaa 20 % suomalaisista vientituotteista. Etelä-Karjalaisille metsäteollisuudella on erittäin suuri merkitys; metsäteollisuus kattaa 69 % tehdasteollisuuden bruttoarvosta alueella sekä työllistää 43 % tehdasteollisuuden työllisistä. (Metsäteollisuus ry. 2016)

Suomalaisen selluteollisuuden kokonaistuotanto oli vuonna 2017 7700 000 t, josta viennin osuus on ollut 43 %, joka oli arvoltaan noin 2 mrd EUR (Metsäteollisuus ry, Tulli, 2018) Lisäksi vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa on arvioitu metsäteollisuuden tuotteiden markkinoiden kasvavan maailmanlaajuisesti 200 mrd€:lla vuoteen 2030 mennessä (Pöyry 2018).

2.2 Kemikaalien talteenoton pääpiirteet

Sulfaattisellutehtaalla keittämöltä pumpattava mustalipeä haihdutetaan haihduttamalla riittävään kuiva-ainepitoisuuteen, jotta se pystytään polttamaan soodakattilassa. Soodakattilalla on kolme päätehtävää; kemikaalien regenerointi, orgaanisen aineksen polttaminen ympäristöystävällisesti sekä lämmön tuotanto ja talteenotto sellutehtaalle. Soodakattilassa tapahtuvissa kemikaalien regeneraatioissa mustalipeän rikki pelkistyy natriumsulfidiksi. Osa rikkiyhdisteistä jää pelkistymättä. Kattilassa onnistunutta pelkistymistä kuvataan reduktioasteella. Muussa muodossa oleva mustalipeän natrium muodostaa poltossa natriumkarbonaattia reagoidessaan hiilidioksidin kanssa. (KnowPulp 2012)

Kemikaalien talteenoton toisen osion muodostavat valkolipeän valmistus ja sen osaprosessit kalkkikierrossa. Kaustisointi koostuu kahdesta erillisestä kierrosta; lipeä- ja kalkkikierrosta. Kaustistamoprosessissa kalkki on kiertävä apukemikaali, jota käytetään muuttamisessa valkolipeäksi. Viherlipeän kanssa sammuttimissa reagoiva poltettu kalkki (CaO) reagoi viherlipeän veden kanssa muodostaen sammutettua kalkkia Ca(OH)_2 . Sammutusreaktio on esitetty reaktioyhtälössä 1. (Seppänen et al. 1999. 164)



Sammutuksen jälkeen liuos pumpataan kaustisointiastioihin, joissa sammutettu kalkki reagoi viherlipeän natriumkarbonaatin kanssa muodostaen natriumhydroksidia reaktioyhtälön 2 mukaisesti. (Seppänen et al. 1999. 164)



Muodostuva kalkkimaito käsitellään selkeytyksessä, jossa meesasakka erotetaan joko selkeyttämällä, tyhjösuodatuksella tai painesuodatuksella. Selkeytyksestä jäänyt valkolipeä pumpataan keittämölle, ja meesa siirtyy kalkkikiertoon. Kalkkikierrossa erotettu meesa pestään, sakeutetaan suotimella ja poltetaan meesauunissa. (Seppänen et al. 1999. 166)

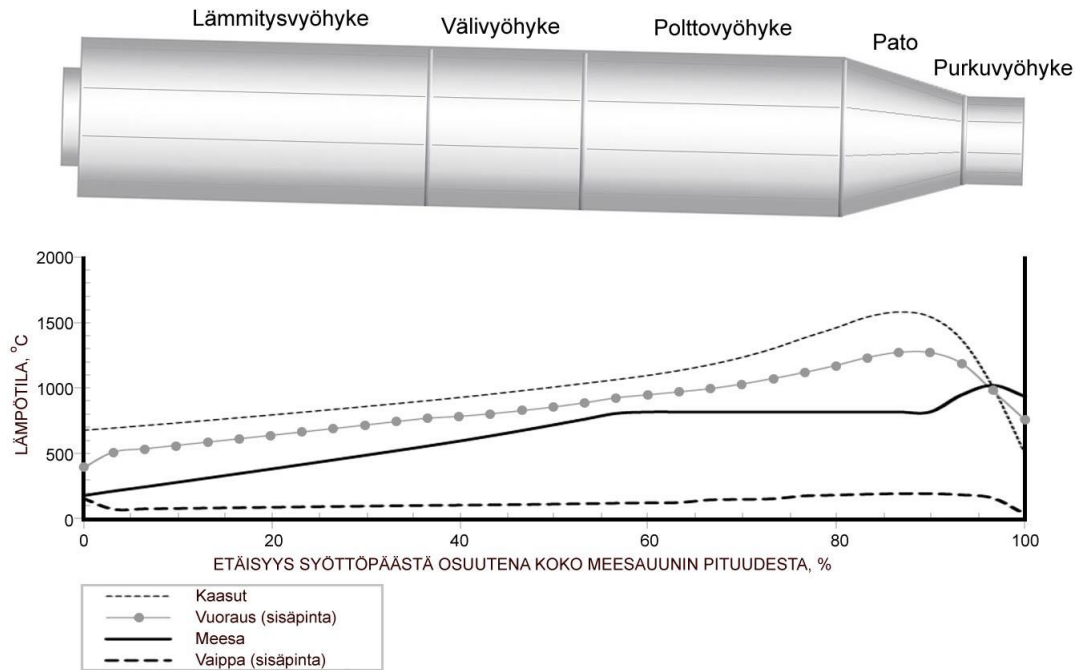
2.3 Meesauuni

Meesauuni on pitkä putki, jossa poltto tapahtuu n. 900-1300 °C. Polton aikana kalsiumkarbonaatista irtoaa hiilidioksidi (CO₂) ja muodostuu uudelleen poltettua kalkkia (CaO), joka käytetään uudelleen sammuttimilla. Meesauunin tehtävä on saada kalsiumkarbonaatti reagoimaan lämmön avulla reaktioyhtälön 3 mukaisesti. (Seppänen et al. 1999. 164) Meesan, eli kalsiumkarbonaatin (CaCO₃) hajoaminen käynnistyy, kun lämpötila ylittää 850 °C. Reaktionopeutta voidaan kasvattaa lämpötilaa nostettaessa ja yleisesti tarpeeksi nopean reaktion saavuttamiseksi polttolämpötilana pidetään noin 1100 °C. (Ahlstrom Machinery. 1995)



Meesauuni on sylinterin muotoon rakennettu, tiilivuorattu, teräsrakenteinen putki, joka on asennettu vaakatasossa 2,5 % kaltevuuteen. Uunia pyöritetään käyttökoneistolla siten, että pyörimisnopeus on 0,5-1,5 kierrosta minuutissa. Meesa syötetään sisään uunin yläpäästä ja se siirtyy syöttösiipien sekä uunin pyörimisen avulla uunissa eteenpäin kohti alapäätä. Uunin ala-, eli polttopäässä on poltin, jossa tyypillisesti käytetään polttoaineena maakaasua tai öljyä. Näiden lisäksi uunissa on myös mahdollista polttaa metanolia, väkeviä hajukaasuja, kuorta, tärpähtiä ja mäntyöljyä. Uunissa meesa ja savukaasut liikkuvat ristikkäisiin suuntiin, jolloin meesa lämpiää palamiskaasujen ansiosta oikeaan

palamislämpötilaan. Meesauunin rakenteen peruskuva sekä lämpötilakäyrät on esitetty kuvassa 2.1. (KnowPulp 2012)



Kuva 2.1 Meesauunin rakenteellinen peruskuva ja lämpötilan jakautuminen uunin pituuden mukaan. (KnowPulp 2012)

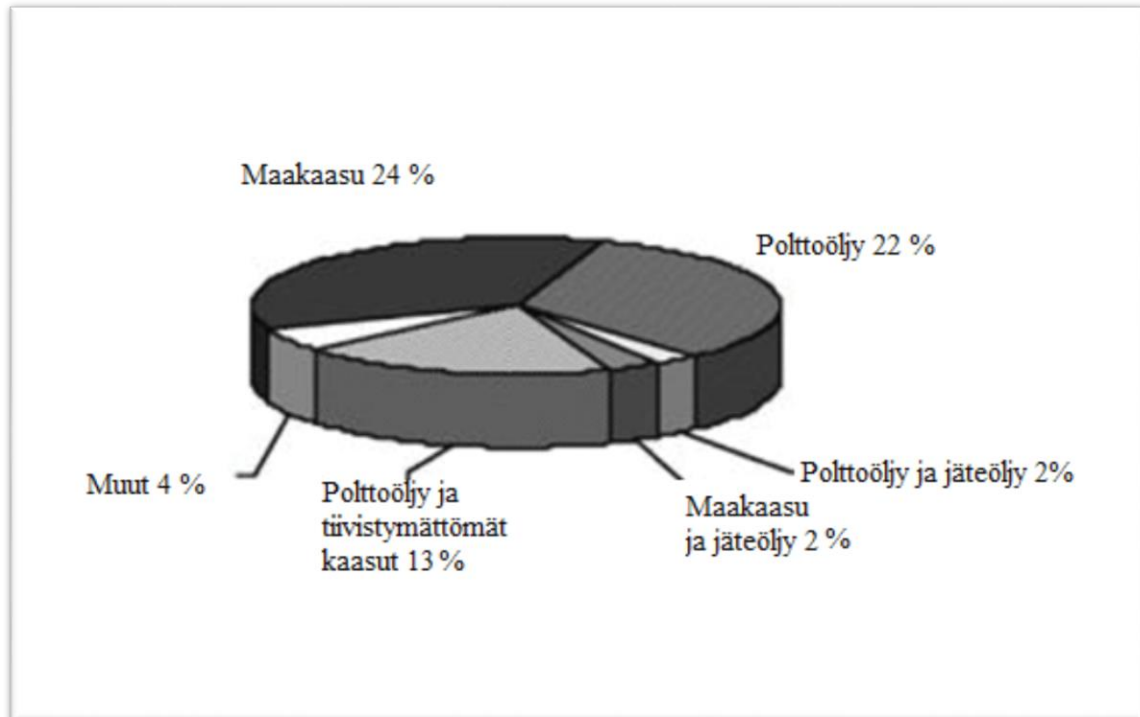
Kuten kuvasta 2.1 näkee, meesan virratessa uunissa alaspäin sen lämpötila nousee ja lopulta saavuttaa polttovyöhykkeellä noin 1100 °C: een reaktiolämpötilan. Yleisesti meesauunin prosessi voidaan jakaa neljään vaiheeseen, jotka ovat

- kuivaus, jossa meesan mukana tuleva vesi haihdutetaan
- lämmitys, jossa meesa lämpenee reaktiolämpötilaansa
- kalsinointi, jossa kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi
- loppukäsittely, jossa kalkki jäädytetään ennen kuin se poistetaan uunista

Näistä kolmen ensimmäisen vyöhykkeen vaiheet tarvitsevat onnistuakseen ulkopuolelta tuotua lämpö, joka voidaan saavuttaa sopivan polttoaineen kanssa. Polton tavoitteena on

saada mahdollisimman tasalaatuinen kalkki, joka on helposti hyödynnettävissä prosessin jatkossa sammutettavuutensa ja lipeästä erottuvuutensa takia. Kalkin oikeaan sammumisnopeuteen vaikuttavat kalkin huokoisuus ja hiukkasten pinta-ala, johon päästään vain oikeassa lämpötilassa. Myös tämä vaikuttaa polttoaineen valintaan. Liian korkea lämpötila aiheuttaa kalkin kiderakenteeseen muutoksia, jolloin lopputuotteena on huonoa, kovaksi poltettua kalsiumoksidia. Polttoilma muodostuu meesauunissa kahdesta eri paineisesta ilmasta. Primääri-ilma puhalletaan uuniin poltinputken kautta ja sekundääri-ilma virtaa uuniin savukaasupuhaltimien aiheuttaman alipaineen vaikutuksesta. Sekundääri-ilma tulee uunin huuvan sisään jo polttopään vierestä, kulkien siitä eteenpäin pudotusputkien välistä rengasrakoon vaipan ja jäähdyttimien välillä. Raon kautta ilma virtaa kohti syöttöpäätä ja jäähdyttää samalla uunin vaippaa. (KnowPulp 2012)

Polttoaineiden ominaisuuksilla on vaikutusta meesauunin käyttöön; lämmönsiirto uunissa tapahtuu pääosin säteilyn välityksellä, joten polttolämpötilan on oltava riittävän korkea. Toimiakseen oikein meesauunissa polttoaineen on oltava stabiili poltto-ominaisuuksiltaan ja helposti kontrolloitavissa polttolämpötilaltaan uunin polttopäässä. Polttoaineen laadulliset vaihtelut voivat aiheuttaa muutoksia lämmönsiirrossa ja reaktio-ongelmien lisäksi aiheuttaa vaurioita meesauunin vuorauksen rakenteeseen. (Gullichsen, Fogelholm. 2000. 190) Polttoaineen lämpöarvolla ja kosteudella on merkitys myös savukaasun virtausmäärään ja lämpötilaprofiiliin. Esimerkiksi biomassapohjaisilla polttoaineilla polttopään lämpötila alenee matalamman adiabaattisen palamislämpötilan mukana, jolloin tuotantokapasiteetin ylläpitämiseen tarvitaan suurempia polttomääriä. (Kuparinen & Vakkilainen 2017) Meesauunien käytössä olevat polttoaineet on esitetty kuvassa 2.2. Kuten kuvasta nähdään, perustuu meesauunien polttoaineen käyttö fossiilisiin polttoaineisiin. Kuvassa määritellyt ”muut” sisältävät ne meesauunit, joissa ei polteta laisinkaan fossiilisia polttoaineita. (Francey et al. 2011)



Kuva 2.2 Polttoaineiden jakautuminen meesauuneilla maailmalla (kuva muokattu lähteestä Francey et al. 2011)

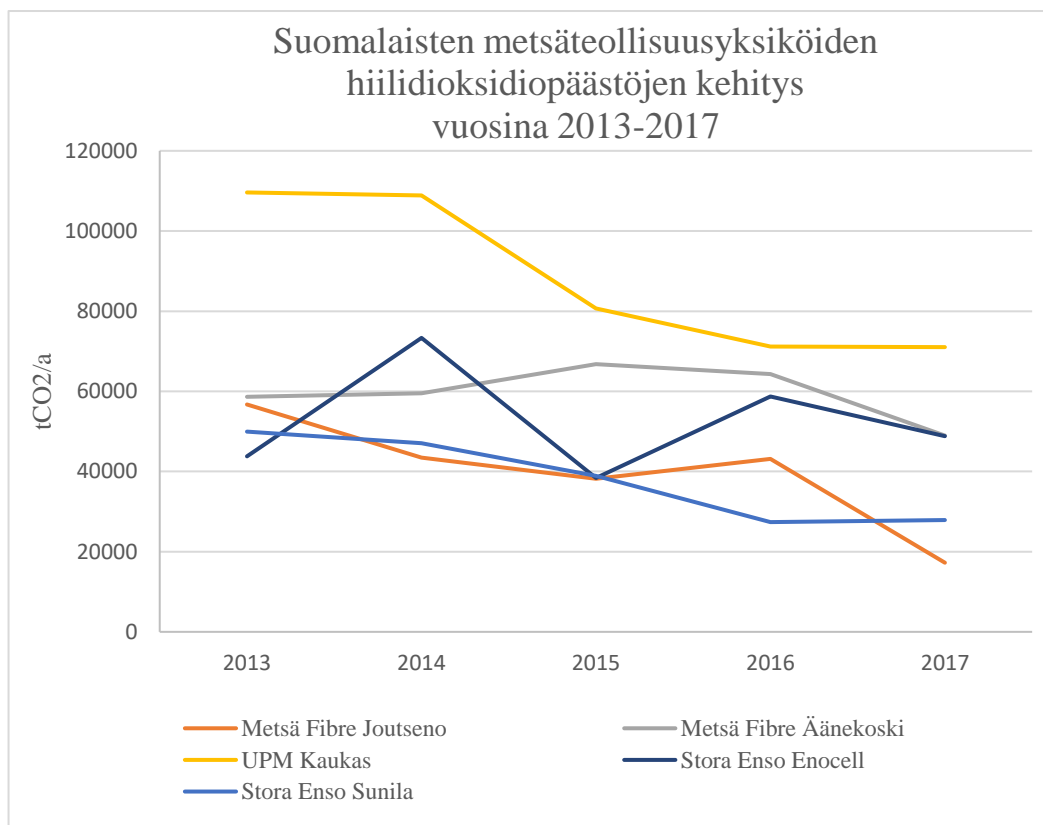
Vaihtoehtoisissa polttoaineissa on riskinä prosessiin kuulumattomien elementtien (NPE) rikastuminen prosessiin sen suljetun kierron vuoksi. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa korroosiota, renkaan muodostumista ja vaikuttaa kalkin laatuun. Epäpuhtauksien lisääntyminen voi näin vaikuttaa myös lisäkalkin käyttömäärään. (Vakkilainen & Kivistö 2008)

Meesauunien päästöistä rajoituksien alaisia ovat tyypillisesti CO, SO₂, TRS, NO_x ja hiukkaset, joita seurataan jatkuvalla mittauksella. Viranomaiset ovat asettaneet näille omat päästörajansa ja päästöjen hallinta on yksi nykypäivän meesauunien hallinnan prosesseista tärkein. Päästöjen seuranta on helpompaa, kun lähteet ovat tiedossa ja valvontalaitteet kunnossa. Meesauunin päästöjen hallintaan voidaan vaikuttaa optimoimalla poltto-olosuhteita, kuten ilmasuhdetta ja lämpötilaa säätämällä. Osa mahdollisista rikkipäästöistä voi reagoida uunin meesan kanssa, mikäli lämpötilat pysyvät riittävän alhaisena. Typenoksidipäästöt (NO_x) ovat tyypillisesti typpimonoksidia. Typpipäästöjen minimointi tapahtuu lämpötilaa säätämällä, lisäksi oikealla poltinvalinnalla voidaan välttää typenoksidipäästöjen muodostumista. Meesasta irtoavan

pölyn irrotukseen savukaasuista voidaan käyttää joko sähkösuotimia (ESP) tai pesureita. Näistä sähkösuotimet ovat erittäin tehokkaita hiukkasten poistoon, muttei niillä ole päästöjen kannalta merkitystä TRS-päästöjen osalta. (Gullichsen & Fogelholm 1999. 185, 193-194)

2.4 Päästöt suomalaisilla sulfaattisellutehtailla

Vaikka metsäteollisuus onkin merkittävä vientituote kansantaloudelle, on sillä myös merkittävä osa suomen päästökaupan alaisien päästöjen tuottajana. Vuonna 2017 Suomen paperin ja massanvalmistuksesta on tullut 2 607 586 t päästökaupan alaisia CO₂ -päästöjä, joka on noin 10,4 % kaikista todennetuista päästöistä Suomessa. (Energiavirasto 2018a) Metsäteollisuudessa hiilidioksidipäästöjen määrä on ollut jatkuvassa laskussa viimeisten vuosien aikana. Kuvassa 2.3 on esitetty hiilidioksidipäästöjen muutoksia suomalaisilla sulfaattisellutehtailla ja tehdasintegraateissa, joissa on sulfaattisellutehtaita.



Kuva 2.3 Hiilidioksidipäästöjen kehittyminen sulfattisellutehtaille sekä tehdasintegraateissa vuosina 2013-2017. Tilastojen lähde: Energiavirasto 2018

Kuvasta nähdään, kuinka yrityksestä ja yksiköstä riippumatta hiilidioksidipäästöt ovat olleet laskusuhdanteessa koko päästökaupunkauden ajan. Arvot eivät kuitenkaan ole suoraan toisiinsa verrannollisia, koska päästölupakäytännöt eriävät yksiköittäin ja osalla saman luvan yhteydessä on koko integraatin CO₂-päästöt.

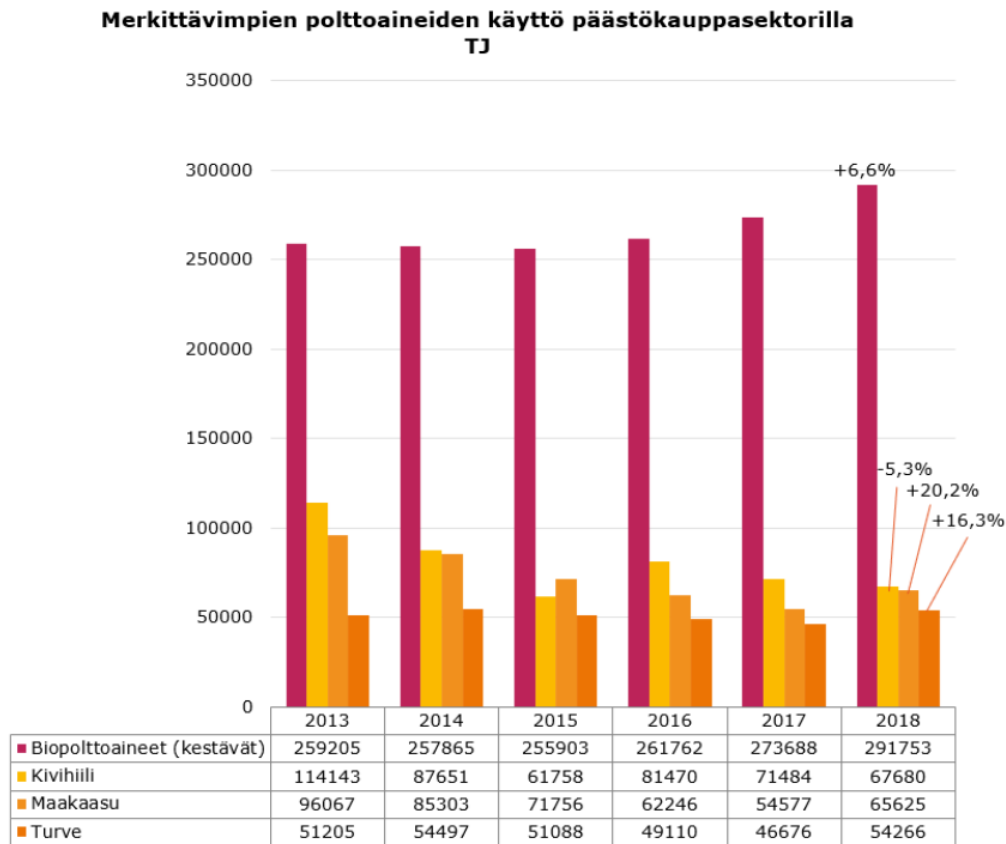
3 PÄÄSTÖKAUPPA JA TAVOITTEET HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISEEN

Suomi on osana Euroopan Unionin päästökauppajärjestelmää. Suomalaista päästökauppaa seurataan energiaviraston toimesta ja sitä säädetään päästökauppalailla, sekä asetuksilla. Päästökaupan tarkoituksena on seurata kasvihuonepäästöjä sekä ohjata niiden vähentämiseen kustannustehokkaasti. Näiden perusteella Energiavirasto myöntää Suomessa päästöluvut, sekä valvoo niiden noudattamista. Tämän lisäksi Energiavirasto ylläpitää päästökaupparekisteriä ja hyväksyy päästökaupan todentajat. Päästöoikeuksia voi saada myös huutokaupan kautta, joita pidetään Energiaviraston toimesta tietyin määräajoin. (Energiavirasto 2018b)

Kansainvälisesti ilmastonlämpenemiskysymykset nousivat entistä merkittävämmiin esille, kun IPCC julkaisi lokakuussa 2018 raportin, jonka mukaan esiteolliseen aikaan verrattuna maapallon lämpötila on noussut jo noin asteella. Raportti antaa myös selkeän merkin siitä, että päästövähennyksiin johtavia toimia on tehtävä läpi yhteiskunnan nopealla ja kauaskantoisella aikataululla. (IPCC 2018). Päästökauppa on yksi keino saavuttaa tarvittavat päästövähennykset ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kautta.

3.1 Päästökauppa ja ilmaiset päästöoikeudet

Yhteispäästömäärä EU:n päästökauppaan kuuluvien suomalaisten laitosten osalta oli 25,1 miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuonna 2017. Vuonna 2016 päästöt olivat 27,2 miljoonaa tonnia. Tähän vaikuttaa vahvasti se, että uusiutuvien polttoaineiden käyttö päästökauppasektorilla on kasvanut, ja maakaasun, kivihiilen ja turpeen kulutus on laskenut. Merkittävimmät polttoainemuutokset päästökaupan alaisilla laitoksilla vuosina 2013-2017 on esitetty kuvassa 3.1, josta nähdään maakaasun vuosittainen käytön vähentyminen päästökaupan seurauksena. (Energiavirasto 2018a) Vuosi 2018 on ollut poikkeuksellinen päästökauppasektorilla; yleisesti Suomen päästökauppasektorin alaiset päästöt ovat olleet laskussa kuluneella vuosikymmenellä, mutta vuonna 2018 päästöt nousivat. Päästöjen kehitykseen vaikuttivat mm. Pohjoismainen vesitilanne, joka vaikutti sähkön pörssihintaan ja sen kautta erillistuotannon kysyntään, sekä säästä johtuvat lämmitysenergian kysynnästä johtuvat vaihtelut. (Energiavirasto 2019)



Kuva 3.1 Merkittävimpien polttoaineiden kulutus päästökaupasektorilla vuosina 2013-2018. (kuvan lähde: Energiavirasto 2019)

Päästövähennystavoitteisiin pääsemiseksi päästökaupasektorin osalta Suomen hallitus on antanut eduskunnalle 8.11.2018 esityksen laista muuttaa päästökauppalakia. Muutos panisi täytäntöön kansallisesti EU:n päästökauppaa koskevan direktiivin muutoksen ja ohjaa valmistautumaan seuraavaan päästökauppakauteen. Muutokset koskevat erityisesti vuosia 2021-2030 kattavaa, neljättä päästökauppakautta EU:ssa. Näiden avulla toteutetaan vuoteen 2030 ulottuva päästövähennystavoite kasvihuonekaasujen osalta päästökaupasektorilla. Lain muutokset koskevat etenkin ilmaiseksi jaettavia päästökaupparioikeuksia ja niiden hakumenettelyä, tietojen toimittamista sekä päästöoikeuksien jakamista. Päästöoikeuksia on tarkoitus mitätöidä siten, että huutokauppatulot päästöoikeuksista alenisivat arviolta 160 miljoonaa euroa kaudella 2021-2030 edistämällä velvoitteen täyttymisen kustannustehokkuutta. Laissa valtioneuvostolla on myös valtuus päättää päästöoikeuksien käytöstä päästökaupan ulkopuolisella sektorilla päästövähennystavoitteen saavuttamiseksi. Lakiehdotuksen on tarkoitettu tulemaan voimaan mahdollisimman pian. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018)

Laki astuu voimaan neljännelle kaudelle ja on jaettu kahteen erilliseen hakemuskierrokseen vuosille 2021-2025 ja 2026-2030. Kokonaisuudessaan liikkeelle laskettavien päästöoikeuksien määrä laskee 2,2 % vuodessa ja osittaisen ilmaisjaon piiriin kuuluvien osuus laskee 30 %:sta 0%: in. Myös huutokauppattavien oikeuksien ja ilmaisten päästöoikeuksien rajat on määritelty tarkemmin 4. kaudelle. Suomen osalta päästökaupan valvonta siirtyy Työ- ja elinkeinoministeriöltä Energiavirastolle neljännellä kaudella siten, että Energiavirasto käsittelee ilmaisten päästöoikeuksien osalta kaudella 2021-2015 jaettavien päästöoikeuksien hakemukset ja niihin liittyvät tehtävät. (Energiavirasto 2019)

Taulukossa 3.1 on eriteltynä voimassa olevan päästökauppakauden sekä tulevan päästökauppakauden eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat päästökaupan hinnanmuodostumiseen. Taulukosta nähdään, että päästöoikeuksien määrä on ollut vähenevä jo kuluvan päästökauppakauden aikana, mutta tulevalle kaudelle sekä ilmaiseksi jaettavat, että huutokauppattavien osuus vähenee. Samalla ilmaisjaon jousto poistuu.

Taulukko 3.1 Eroavaisuuksia päästökauppakausien 3 ja 4 välillä.

	3.Päästökauppakausi	4. Päästökauppakausi
Jakokausi	2013-2020	2021-2030
Kauden pituus	8 vuotta	10 vuotta
Komission asetus	ilmaisjakopäätös (CIMS)	ilmaisjakoasetus (FAR)
Päästöoikeuksien määrän lasku	1,74 %/a	2,2 %/a
Ilmaisten osien määrä [%]	Joustaa huutokauppattavien mukaan	43 %
Huutokauppattavien osien määrä [%]	Joustava	57 %
Osittainen ilmaisjako	80 % → 30 %	30 % → 0%

Päästökaupassa on kuitenkin olemassa ilmaisjako, jonka perusteella ilmaisia oikeuksia on jaettu niille määritellyille laitoksille päästökauppalainsäädännön mukaisesti. Päästöoikeuksien jako kohdistuu niille aloille, joihin kohdistuu hiilivuotoriski.

Hiilivuodollisiksi toimialoiksi katsotaan ne, joiden toiminnalla on riskinä siirtyä päästökaupasta aiheutuvien kustannuksien johdosta maahan, jossa ei tehdä vastaavia toimintoja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Samalla hiilivuotoriskiä arvioitaessa otetaan huomioon myös mahdolliset päästökauppajärjestelmän negatiiviset vaikutukset taloudelliseen kasvuun sekä työllisyyteen. Massan, paperin, kartongin ja pahvin valmistus ovat määriteltynä Euroopan Komission päätöksellä hiilivuodon riskin alaisiksi vuosille 2021-2030. (Energiavirasto 2018c) Päästökauppajärjestelmän tiukentumisesta huolimatta ilmaisjaon kautta saatavien hyötyjen häviäminen kokonaan metsäteollisuuden osalta tulevalla kaudella on siis näillä näkymin olematon.

3.2 Lainsäädäntö ja kansainväliset tavoitteet hiilidioksidin vähentämiseen

Suomessa päästökaupan lisäksi päästötavoitteiden saavuttamiseksi toimintaa ohjaavat myös ilmastolaki sekä erinäiset kansainväliset sopimukset, joihin Suomi on sitoutunut.

Kansallinen ilmastolaki säätelee ilmastopolitiikan suunnittelujärjestelmää ja ilmastotavoitteiden toteutumisen seuranta. Suunnittelujärjestelmän tavoitteena on varmistaa kasvihuonekaasujen vähentämistä ja velvoitteiden täyttämistä, sekä hillitä ja sopeutua ilmastonmuutokseen kansallisin toimin. Laissa on asetettu pitkän aikavälin suunnitelma, jonka tavoitteena on vähentää 80 prosenttia päästöistä vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 1990 päästötasoon. Suomessa kansallinen ilmastolaki (609/2015) astui voimaan 1.6.2015. Loppuvuonna 2016 hyväksyttiin lisäksi kansallinen energia- ja ilmastostrategia, joka määrittää keskeiset tavoitteet ja linjaukset vuoteen 2030 saakka sekä päästökauppasektorin, että päästökaupan ulkopuolisen, ns. takaajasektorin osalta. Ympäristöministeriö vastaa ilmastopolitiikan valmistelusta ja koordinoinnista. (Ympäristöministeriö 2018a)

Kuten ympäristöministeriön sivuilla kerrotaan Suomen osallisuudesta yhteisten päästötavoitteiden saavuttamisessa: ” *EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään vähintään 40 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 1990. Vuoteen 2030 mennessä taakanjakosektorin päästöt vähennetään EU:n tasolla 30 prosenttia ja Suomen kansallinen päästövähennysvelvoite on 39 prosenttia. Päästökauppajärjestelmään kuuluvat toimijat vähentävät hiilidioksidipäästöt 43*

prosenttia verrattuna vuoden 2005 tasoon. Energian käyttöä tehostetaan vähintään 32,5 prosenttia ja uusiutuvan energian osuus nostetaan 32 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Jäsenvaltioille asetetaan 0,8 prosentin vuotuinen energiankäytön tehostamisvelvoite kaudelle 2021-2030. Uusiutuvan energian kansallisista tavoitteista päätetään energiaunionin hallintomallin puitteissa jäsenmaiden toimittamien energia- ja ilmastosuunnitelmien perusteella.

EU:n ilmasto- ja energiapaketin mukaisesti Suomi on hyväksynyt EU-tavoitteen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Suomen maakohtaiset tavoitteet ovat:

- Vähentää päästöjä 16 prosentilla päästökaupan ulkopuolisilla sektoreilla (esimerkiksi rakentaminen, rakennusten lämmitys, asuminen, maatalous, liikenne ja jätehuolto sekä teollisuuden fluoratut kasvihuonekaasut).
- Nostaa uusiutuvan energian osuus 38 prosenttiin energian loppukulutuksesta.” (Ympäristöministeriö 2018a)

Päästökauppajärjestelmän alaiset toimijat joutuvat siis vähentämään hiilidioksidipäästöjään merkittävästi, mutta ohjauksessa huomioidaan myös muiden sektoreiden sekä uusiutuvan energian osuus, joiden osalta on tarkoitus saavuttaa päästövähennyksiä.

EU:n päästökaupan ja lainsäädännön lisäksi Suomi on sitoutunut erillisiin kansainvälisiin sopimuksiin ja velvoitteisiin, jotka ovat osana asettamassa raja-arvoja ja tavoitteita kansalliselle ilmastopolitiikalle. Tunnetuimmat ja merkittävimmät näistä sopimuksista ovat Kioton pöytäkirja sekä Pariisin sopimus, jotka esitellään kappaleessa 3.2.1.

3.2.1 Kioton pöytäkirja ja Pariisin sopimus

Kioton pöytäkirja (Kyoto Protocol) on tehty täydentämään YK:n ilmastopuitesopimusta ja edistämään sen toteutumista. Pöytäkirjassa on asetettu oikeudellisesti sitovat velvoitteet ja tavoitteet kehittyneiden maiden kasvihuonepäästöille. Velvoitteissa otetaan huomioon myös hiilinielujen, kuten metsien ja maaperän, vaikutukset. Pöytäkirja on astunut voimaan vuonna 2005 ja on ensimmäinen sopimus, joka sitoo oikeudellisesti päästöjen vähentämiseen kansainvälisesti kasvihuonekaasujen osalta. Pöytäkirjan

ensimmäinen velvoitekausi kattoi vuodet 2008-2012, jonka aikana Suomen tavoitteena oli pitää päästöt pöytäkirjan ohjaamien laskentasääntöjen puitteissa vuoden 1990 tasolla. Suomen osalta tässä tavoitteessa onnistuttiin. Pöytäkirjan toinen velvoitekausi kattaa vuodet 2013-2020 ja se astuu voimaan, kun kolme neljäsosaa osapuolista hyväksyy ns. Dohan -muutoksen, jolla toisesta velvoitekaudesta sovitaan. Toisen velvoitekauden voimaan astumisella ei ole käytännössä vaikutusta, koska Pariisin sopimuksen toimeenpanon valmistuminen ohjaa kansainvälistä ilmastopolitiikkaa laajemmin ja pitkäjänteisemmin kuin Kioton pöytäkirja. (Ympäristöministeriö 2018b)

Pariisin sopimuksen tavoitteena on kasvihuonekaasupäästöjen huipun saavuttaminen maailmanlaajuisesti mahdollisimman pian, ja päästä vähentämään päästöjä nopeasti sen jälkeen siten, että ihmisten aiheuttamat kasvihuonekaasut ja -nielut ovat tasapainossa kuluvan vuosisadan jälkipuoliskolla. Sopimuksessa on tavoitteet ilmastomuutoksen sopeuttamiselle, sekä tavoitteet sovittaa rahoitusvirrat vähähiiliseen ja ilmastokestävään kehitykseen. Näiden toimintojen seurauksena on tarkoitus pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa verrattuna esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin siten, että lämpötilan nouseminen saadaan rajattua alle 1,5°C asteeseen. Nykyinen Pariisin sopimus on hyväksytty Suomessa vuonna 2016 ja toimeenpanoa koskeva säännöstö on hyväksytty vuonna 2018 Katowicessa. Säännöt ovat yhteisiä kaikille jäsenmaille ja niissä määritellään mm. päästövähennystavoitteiden mekanismista, kansallisten panosten ohjeista sekä teknologian kehitystä ja siirtoa koskevista toimeenpanoista. (Ympäristöministeriö 2018c)

3.3 Yhtiöiden tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen

Suomen suurimmat metsäyhtiöt, UPM Kymmene Oyj, Stora Enso Oy sekä Metsä Group ovat omissa strategioissaan määrittäneet tavoitteet, joiden avulla on tarkoitus saavuttaa yhteiset, kansainväliset tavoitteet, pienentää päästökauppojen alaisten päästöjen osuutta sekä saavuttaa mahdollisia imagollisia sekä liiketoiminnallisia hyötyjä.

Näistä Metsäyhtiö UPM on strategiassaan määrittänyt tavoitteet hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi vuoteen 2030 mennessä. Hiilineutraalius on tarkoitus saavuttaa sekä

jatkuvien toimintojen että strategisten tavoitteiden myötä. Seuraaviin tavoitteisiin kuuluvat mm.

- Uusiutuvien polttoaineiden osuus 70%
- Energiatehokkuuden parantaminen
- Kasvihuonekaasuihin liittyvien liiketoimintojen hyötyjen maksimoiminen (UPM 2018)

Stora Enso on määritellyt omassa strategiassaan fossiilisten polttoaineiden vähentämisen mahdollisuuksien mukaisesti kuluvan vuosikymmenen aikana käyttämällä teknisesti ja kaupallisesti toteutettavissa olevia keinoja. Tähän mennessä toimenpiteinä on käytetty energiatehokkuuden parantamista ja riippuvuutta fossiilisista polttoaineista on vähennetty eri toiminnoissa. Tavoite kasvihuonekaasujen vähentämiseen toiminnoista on asetettu 31% vähennykseen verrattuna vuoden 2010 tasoon tuotettua sellu-, paperi- ja kartonkitonnia kohden vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi Stora Enso raportoi julkisesti kasvihuonepäästöistä kolmessa eri kategoriassa, joista yksi on omassa valvonnassa olevat prosessit, joihin myös tässä työssä selvityksen alla oleva meesauuni kuuluu. (Stora Enso. 2019)

Suomen kolmanneksi suurin metsäyhtiö Metsä Group tiedotti 28.2.2019 uudistaneensa kestävä kehityksen strategiset tavoitteensa, joista yksi oli kokonaan fossiilittomaan tuotantoon siirtyminen vuoteen 2030 mennessä. (Metsä Group 2019)

Varsinaisten strategioiden lisäksi yrityksillä voi olla toiminnassaan vapaaehtoisia sitoumuksia sekä sertifikaatteja. Kun ympäristötavoitteet huomioidaan päätöksenteossa, kutsutaan tätä toimintaa ympäristöjohtamiseksi, jonka toiminta varmistetaan kolmannen osapuolen myöntämällä ympäristömerkeillä ja -sertifikaateilla, joilla kerrotaan tuotteiden sekä ratkaisujen ympäristösuorituskyvystä. (UPM Kaukas 2018) Ympäristöjohtamisen työkaluja käytännössä ovat ympäristöjärjestelmät, -standardit, -indikaattorit ja -laskenta. Näistä tunnetuimpia ovat ISO14001 -standardi ja EMAS-asetus. EMAS (the Eco-Management and Audit Scheme) perustuu EU:n asetukseen ja koostuu ISO 14001 -ympäristöjärjestelmästä ja erillisestä selonteosta. Ympäristöjärjestelmät eivät aseta varsinaisia rajoja, vaan ovat julkisia ja vapaaehtoisia ympäristöasioiden

hallintajärjestelmiä, joka on osa firmojen julkista ympäristö- ja yhteiskuntavastuuta. Näistä ISO14001 määrittää firmaa ympäristöjärjestelmässään seuraaviin asioihin:

- sitoutuu ympäristönsuojelun tasonsa jatkuvaan parantamiseen
- tunnistaa tuotteidensa, toimintojensa ja palveluidensa ympäristövaikutukset
- selvittää lakisääteiset velvoitteensa ja huolehtii niiden täyttämisestä
- asettaa ympäristötavoitteet ja seuraa niiden toteutumista
- varaa resurssit
- ylläpitää henkilöstön osaamista
- ohjaa prosesseja ja toimintoja
- varautuu ympäristöriskeihin ja onnettomuustilanteisiin
- tarkkailee ja seuraa ympäristövaikutuksia
- ennaltaehkäisee ympäristövahinkoja ja estää niiden toistumisen
- ylläpitää hyviä ympäristökäytäntöjä
- arvioi toimintansa tuloksia ja parantaa toimintaansa. (Ympäristöhallinnon verkkopalvelu 2019)

Esimerkiksi UPM Kymmene Oyj:n kaikki Euroopan paperi- ja sellutehtaat on sertifioitu EMAS-ympäristöjärjestelmän mukaisesti. Ympäristöjärjestelmien ja -auditointien ylläpitäminen ohjaavat lakien ja rajojen lisäksi uudistamaan toimintaa.

Sen sijaan Stora Enso Oy ei mainitse vuosikertomuksessaan tai verkkosivuillaan olevansa mukana EMAS-ympäristöjärjestelmässä.

4 MAAKAASU POLTTOAINEENA

Suomen energiankulutuksesta noin kahdeksan prosenttia tuotetaan maakaasulla. Merkittävimmät käyttökohteet ovat sähkön ja lämmön yhteistuotanto sekä teollisuuden prosessit. Pääsääntöisesti Suomeen tuotava maakaasu on peräisin Länsi-Siperiasta Venäjältä. Suomella itsellään ei ole maakaasuvaroja ja biokaasun syöttö maakaasuverkkoon on vielä verrattain vähäistä. (Energiavirasto 2018d) Maakaasun käyttöä meesauunin polttoaineena edesauttaa sen puhdas palaminen, eikä se tarvitse varastointikapasiteettia. Kemikaalikierron likaantumisen, sekä toimintahäiriöiden minimoiminen ovat mahdollisia rikittömän ja raskasmetallittoman palamisen ansiosta. (Gasum 2018)

4.1 Maakaasun tuotanto

Maakaasu on luonnonkaasuksi luokiteltava polttoaine, jota saadaan pumpattua yleisimmin öljykentiltä valmiina lopputuotteena, joka sopii polttoaineeksi ilman jatkojalostusta. Maakaasun pumppauksen yhteydessä tulee nestemäisiä ainesosia, raakaöljyä ja kondensaatteja, jotka erotetaan ja toimitetaan jatkojalostukseen. Mikäli saatava maakaasu sisältää rikkiyhdisteitä, tulee ne erottaa ennen maakaasun jatkokäyttöä. Maakaasua otetaan talteen öljykenttiä vastaavilta tuotantoalueilta, ja eri kenttien kaasujen koostumus voi olla hyvin eroavaista keskenään. Tuotantoalue määrittää kaasun koostumusta siten, etteivät ne välttämättä ole keskenään korvauskelpoisia, vaan vaativat välissä muutoksia polttoprosessissa esimerkiksi polttimien säätämisen kautta. (Gasum 1993. 1) Suomessa käytettävä maakaasu on pääsääntöisesti Venäjältä Suomeen tuotavaa, joka on 98% metaania. Kentät, joista tuotava kaasu on peräisin ovat Länsi-Siperiassa sijaitsevat Urengoi ja Jamburg. Venäläiselle kaasulle on korkean metaanipitoisuuden lisäksi ominaista alhainen typpipitoisuus sekä käytännössä täysin rikkivapaa koostumus. Kaasu olla myös nestekaasun muodossa (LNG), jota saadaan suoraan tuotantolähteistä tai raakaöljyn jalostuksen yhteydessä. (Gasum 1993. 2)

4.2 Maakaasun koostumus ja poltto-ominaisuudet

Kuten jo kappaleessa 4.1 kerrotaan, Suomessa käytettävä maakaasu on koostumukseltaan pääsääntöisesti metaania. Se on yleisesti tasalaatuista, eikä sisällä

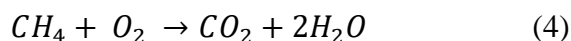
kondensaatteja tai mekaanisia epäpuhtauksia. Maakaasun koostumus ja tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Suomessa polttoaineena käytettävän maakaasun tyypillinen koostumus (mol-%) (Gasum 1993.2)

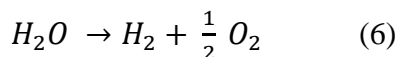
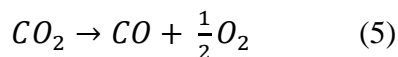
Metaani	n. 98 %
Etaani	n. 1 %
Propani ja raskaammat hiilivedyt	< 0,5 %
Typpi	< 1 %
Kokonaisrikki	< 1 mg/m ³ n
Tiheys	0,73 kg/m ³ n
Suhteellinen tiheys	0,56
Alempi lämpöarvo	10 kWh/m ³ n 36 MJ/m ³ n

4.3 Maakaasun päästövaikutuksia

Vaikka maakaasu on rikitön ja puhdas polttoaine, fossiilisenä polttoaineena maakaasu muodostaa palaessaan päästökaupan alaista hiilidioksidia. Maakaasun hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin merkittävästi pienemmät, kuin esimerkiksi öljyn tai turpeen poltossa ja vain puolet kivihiileen verrattaessa. Nykyisen tietämyksen mukaan savukaasujen jälkikäsitteilyllä ei voida vaikuttaa hiilidioksidipäästöihin. (Riikonen, 1997. 53). Koska maakaasu on lähes kokonaisuudessaan metaania, voidaan maakaasun palamisreaktio esittää reaktioyhtälö 4 mukaisesti.

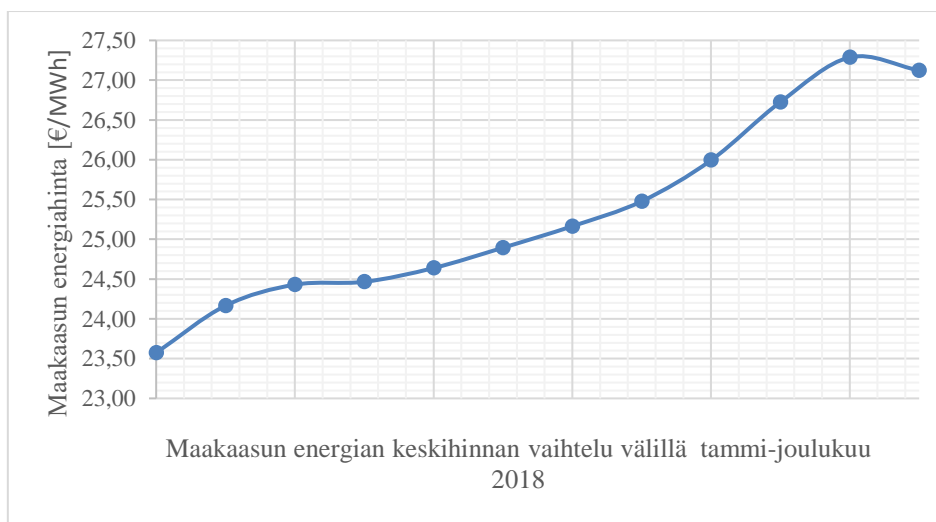


Lisäksi korkea palamislämpötila voi aiheuttaa hiilimonoksidin (CO) muodostumista savukaasuihin. Normaalisti kaasut, jotka ovat stabiileja alemmissa lämpötiloissa, voivat dissosioitua osakaasuiksi lämpötilan noustessa. Mikäli maakaasun palaessa liekin adiabaattinen lämpötila on riittävä, yli 1250 K, hajoavat hiilidioksidi ja vesi seuraavien reaktioyhtälöiden 5 ja 6 mukaisesti. (Raiko et al. 2002. 143)



4.4 Maakaasun hinta sekä päästöjen hinnan muodostuminen

Maakaasun energiahinta on sidottu kansainvälisen hiilen ja raakaöljyn hintaindeksiin sekä kotimaiseen energiahintaindeksiin. Hintaa tarkastetaan kuukausittain, jotta sen suhteellinen asema muihin energiamuotoihin nähden saadaan säilytettyä. Kokonaishinta muodostuu samaan tapaan kuin sähkön hinta; erilliseen energian myyntihintaan sekä siirtohintaan. Maakaasun hinnoittelun kohtuullisuutta valvotaan Energiaviraston toimesta. (Gasum 2019) Kuvassa 4.1 on esitetty maakaasun hinnankehitys vuoden 2018 aikana. Kuvaajasta nähdään, että energian hinta on ollut nousevassa trendissä loppuvuotta kohden ja kuinka suurta hintavaihtelu saattaa olla saman vuoden sisällä. Maakaasun hintakehityksessä on indeksiin sitomisen sekä öljyn ja hiilen hinnan seuraamisesta johtuen riski hinnan nousuun.



Kuva 4.1 Maakaasun energian keskihinnan kehitys vuonna 2018. Tilastot Energiavirasto.

Varsinaisen maakaasun hinnan lisäksi kokonaiskustannuksiin vaikuttaa myös päästökauppa, joka kohdentuu tuotettua hiilidioksiditonta kohden. Koska hiilidioksidin mittaaminen on haasteellista, perustuu hiilidioksidimäärän laskenta kulutetun energiamäärän mukaisesti.

Hiilidioksidipäästöt lasketaan yksikössä tCO₂, joka saadaan laskemalla maakaasun kulutus oikeassa yksikössä [TJ]. Kun 1 MWh on 3,6 GJ, pystytään energiamäärä saattamaan oikeaan muotoon yksikkömuunnosten kautta terajouleiksi [TJ] kaava 7 mukaisesti.

$$E [TJ] = \frac{3,6 \times E[MWh]}{1000} \quad (7)$$

Hiilidioksitonneiksi tämä energiamäärä muutetaan kertomalla se päästökertoimella, jonka laskenta esitellään tämän kappaleen lopussa. Hiilidioksidipäästöjen määrittäminen maakaasun osalta ja tarkkailu edellyttää tietoa käyttömäärästä ja maakaasun lämpöarvosta, sekä päästökertoimesta ja hapettumiskertoimesta. Myydyn polttoaineen määrä ilmaistaan kuukausittain normeerattuina kuutiometreinä (m³n) ja sen sisältämänä energiamääränä. Koska tietyn erän määrittäminen maakaasulle ei ole mahdollista, ilmoitetaan lämpöarvo ja päästökerroin tietylle ajanjaksolle. Määrittämisestä vastaa Gasum Oy alueellisten mittauksien perusteella. Päästökerroin lasketaan yhtälön 8 mukaisesti.

$$\text{Päästökerroin} = \frac{44,0098}{12,011} \times \frac{m_c}{m_{pa}} \div Q_{net} \quad (8)$$

missä 44,0098/12,011 -suhde kuvaa hiilidioksidin ja hiilen moolimassojen suhdetta

m_c on hiilen massa polttoaineessa

m_{pa} on polttoaineen massa

eli

$\frac{m_c}{m_{pa}}$ on hiilen osuus polttoaineessa

Q_{net} on polttoaineen tehollinen lämpöarvo

(Gasum 2016)

5 VAIHTOEHTOISET MENETELMÄT MAAKAASUN KORVAAMISEEN

Vaihtoehtoisia menetelmiä meesauunien polttoaineen korvaamiseen on tutkittu kansainvälisesti useaan otteeseen, sekä fossiilisten polttoaineiden korvaamista on tehty usealla eri tehtaalla. Tällä hetkellä sellutehtaan kiertotaloutta ja biopolttoaineiden käyttöä edistäviä menetelmiä, joilla meesauunin pääpolttoaine voidaan korvata, ovat mustalipeästä erotettu ligniini, puupolttoaineen kaasutus sekä purupoltto. Muut tutkitut vaihtoehdot, joista on saatu myös kokemusta polttoaineiden osittaisesta korvaamisesta, on esitetty luvun viimeisessä kappaleessa 5.4.

5.1 LignoBoost

Puukuitu koostuu kemiallisesti pääosin neljästä eri aineesta; ligniinistä, hemiselluloosasta, selluloosasta ja uuteaineista. Ligniini sitoo kuituja ja sen pilkkomiseen keiton aikana käytetään natriumhydroksidia. Tyypillisesti mustalipeään liukeneva ligniini poltetaan soodakattilalla (KnowPulp 2012), mutta nykyään ligniinin muut käyttösovellutukset polttoaineena tai fossiilisten raaka-aineiden korvaamiseen on löydetty, ja sen eriyttämiseen mustalipeästä on kehitetty omat menetelmänsä.

LignoBoost on ligniininerotuslaitos, jonka avulla voidaan erottaa ligniini mustalipeästä saostamalla ja kuivaamalla johtamalla mustalipeää haihduttamolta 30-45 % kuiva-ainepitoisuudessa erotussäiliöön. Sen lisäksi, että ligniini saadaan eristettyä polttoaineeksi, voidaan sen avulla saada ratkaisu myös tilanteeseen, jossa soodakattila on sellutehtaan tuotantoa rajoittava tekijä. Jos mustalipeän ligniinistä saadaan 25 % poistettua, saadaan myös sellutehtaan tuotantokapasiteettia nostettua 20-25 % soodakattilaan menevän mustalipeävirran sekä poltettavan orgaanisen aineen vähenemisen takia. (Valmet 2018) Tutkimuksessa on myös mainittu haihduttamon kuormituksen nouseminen suodatuksesta palautuvan veden takia sekä ligniinin poistosta johtuva mustalipeän lämpöarvon lasku, jotka on myös huomioitava prosessikokonaisuudessa. (Partanen 2015. 56)

Ligniinin erotuksen vaikutuksista sulfaattisellutehtaan rikkitasapainoon on tutkittu vuonna 2015. Kokeilut on tehty simuloimalla, mutta meesauunin kuormituksen on huomattu vähenevän Na_2S osuuden nousun myötä valkolipeän sulfiditeetin nousun

myötä. Tämän ansiosta kaustisointiprosessiin syötettävän kalkin tarve vähenee vastaavan saman alkalikonsentraation saavuttamiseksi. (Partanen 2015. 58.)

Suomessa Stora Enson Sunilan tehtaalla ligniini korvaa 70 % maakaasusta meesauunin polttoaineena, jonka tarkoituksena on laskea hiilidioksidipäästöjä 27 000 tonnia vuodessa. Hyödyntämällä puun kaikki osat voidaan parantaa resurssitehokkuutta. Tavoite on mahdollista saavuttaa muutamien uudistuksien jälkeen. Vaihtoehtoisesti osa Sunilan ligniinistä voidaan pakata ja myydä ulkopuolisille asiakkaille. (Stora Enso, viitattu 13.2.2019) Laitteistoja eri sellutehtailla on käytössä yhteensä 3 kappaletta. Ensimmäinen demonstraatiolaitos on otettu käyttöön Bäckhammerissa Ruotsissa vuonna 2006. Sen vuosikapasiteetti on 8000 tonnia ligniiniä vuodessa. Ensimmäinen täyden mittaluokan laitos on startannut Yhdysvalloissa Plymouth Mill:ssa vuonna 2013 (25 000t/a) ja uusin laitos on Suomessa Sunilan tehtaalla Kotkassa. Sunilan LignoBoost -laitoksella saavutetaan 50 000 t vuosituotanto ligniinin kuiva-aineen ollessa 95 %, kun vanhemmilla laitoksilla on päästy vain 65 % kuiva-aineeseen. (Valmet 2018)

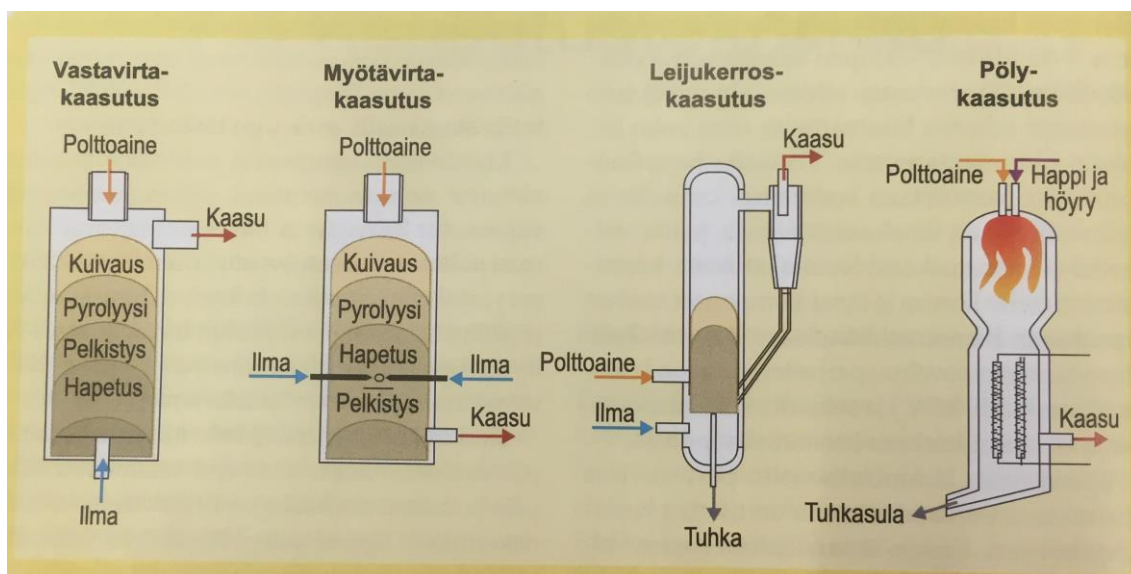
Vaikka ligniinillä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, nähdään LignoBoostin rooli suurempana biotalouskentän toimijana ja ligniinin biosovellutuksien kehitys on kiivaasti käynnissä. Valmetin sellu- ja energialiiketoimintalinjassa biomateriaaleista vastaavana johtajana työskentelevä Mäntyniemi kertoi Paperi & Puu -lehdessä vuonna 2016, että kaikki sellutehtaat voidaan varustaa LignoBoostilla, jolloin ligniinin tuotantopotentiaali voisi olla kymmeniä miljoonia tonneja vuodessa (Liikanen 2016). Stora Enson uskomuksen mukaan ligniinin käyttömahdollisuudet ovat lähes rajattomat, jos sillä voidaan korvata fossiilisia fenoleita tai esimerkiksi hiilikuituja (Yle 2018).

5.2 Kaasutus

Kaasutuksen käyttö on aloitettu jo 1980-luvulla. Kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa kiinteä tai nestemäinen polttoaine reagoi kaasuttavan aineen kanssa korkeassa lämpötilassa, jolloin muodostuu polttokaasuseosta. Kaasuttavana aineena toimii joko happi, ilma, vesihöyry tai muu aine, joka voi toimia happiatomin kantajana. Kaasutuksen edellytyksenä palamiskelpoisen tuotteen saavuttamiseksi on, että happea tuodaan prosessiin vähemmän, mitä polttoaineen stoikiometrinen (täydellinen) palaminen edellyttää, eli kaasutusprosessin ilmakerroin on alle 1. Pyrkimys kaasutuksessa on

saavuttaa polttoaineen mahdollisimman täydellinen kaasuuntuminen. Polttokaasu seos voi sisältää myös kondensoituvia nesteitä, tervoja, tuhkaa ja jäännöshiiltä. (Kara et al. 2004. 244)

Kaasutus voidaan tehdä hyvin erilaisissa olosuhteissa ja erilaisissa reaktorityypeissä. Erilaiset reaktorityypit on esitetty pääpiirteineen kuvassa 5.1. Sellutehtailla kaasutusprosesseissa on tällä hetkellä leijukerroskaasuttimia.



Kuva 5.1 Kaasutusreaktorityypit ja niiden toimintaperiaatteet (Kara et al. 2004)

Kaasuun päätyy kaasutuksessa epäpuhtauksia, jotka ovat polttoaineista peräisin. Vaikka niiden määrä on usein pieni, voivat ne aiheuttaa ongelmia kaasutuksen jälkeisissä laitteissa esimerkiksi korroosiona tai eroosiona. Poistamalla polttoaineesta epäpuhtauksia ennen polttoa voidaan myös vaikuttaa päästöjen syntymiseen, koska monet polttoaineessa olevat epäpuhtaudet ovat syynä päästöjen syntyyn. Sen sijaan, että päästökomponeentteja vähennettäisiin palamisen jälkeen savukaasuista, voidaan kaasutinlaitteistolla ja muodostuneen kaasun puhdistuksella estää päästöjen muodostuminen lähes kokonaan. Kaasutettu kaasu voidaan puhdistaa joko kylmä- tai kuumapuhdistusmenetelmällä. (Kara et al. 2004. 247)

Kaasutusprosessi on otettu käyttöön Metsä Fibren Joutsenon tehtailla syksyllä 2012 (Metsä Fibre 2018) sekä Äänekosken biotuotetehtaalla (Metsä Group 2018) joka

mahdollistaa sen, ettei tehdas tuota laisinkaan fossiilisista polttoaineista peräisin olevaa hiilidioksidia normaalikäynnin aikana. (Metsä Fibre 2018)

Suovan kaasutusta meesauunin polttoaineeksi on tutkittu 90-luvulla. Kaasutuskokeet on tehty tuolloin sekasuovalla, jolla on saatu aikaan lämpöarvoltaan juuri meesauunille riittävä polttoaine. Polttoaineeseen muodostuu kuitenkin runsaasti tervoja, jolloin natrium ja hiiltojäännökseen ja haihtuvien aineiden määrä on korkea. Tällöin yhtenä vaihtoehtona on tuottaa suovasta flash-pyrolyysillä öljyä ja johtaa hiiltojäännös soodakattilaan. (VTT. 1993. 33) Nykyisin suovalle on löydetty kuitenkin arvokkaampaa käyttöä mäntyöljyn ja biodieselin jalostukseen, joten tuoreimmista tutkimuksissa kyseistä vaihtoehtoa ei ole enää laskettu päteväksi ja kestäväksi ratkaisuksi maakaasun korvaamiseen.

5.3 Puru

Purun kosteus voi vaihdella lähes ilmakeivasta 70 %:iin. Yleisesti sahanpurua poltetaan muiden polttoaineiden ohessa lämpökeskusten sekä teollisuuslaitosten voimakattiloissa. Sahanpurun polttoon vaikuttavia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Purun keskimääräisiä polttoteknisiä ominaisuuksia (Hakkila et al. 1978)

Tyypillinen kosteus [%]	50-55
Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]	18,9-19,2
Kuiva-tuoretiheys (kg/m ³)	380-480
Kostean polttoaineen tiheys [kg/i-m ³]	250-300
Energiatiheys MWh/i-m ³	0,4-0,7
Tuhkapitoisuus [%]	0,4-1,1

5.4 Muut biopolttoaineet

Myös muiden biotuotepohjaisten polttoaineiden käyttöä on tutkittu LUT:n aiemmissakin opinnäytetoissa useampaan otteeseen. Niiden käytöstä meesauunien pääpolttoaineena ei kuitenkaan ole Suomessa vielä kokemusta, mutta ovat teoreettisesti mahdollisia

fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen, tai voivat toimia varsinaisen polttoaineen rinnalla fossiilisten hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi.

5.4.1 Biohiili

Biohiilen käyttömahdollisuuksia meesauunin polttoaineena on kartoitettu teoriatasolla vuonna 2014 tehdyssä diplomityössä, mutta tiedettävästi biohiiltä ei ole käytetty meesauunien polttoaineena. Biohiilen valmistus perustuu puuperäisten biomassojen hyödyntämiseen torrefioinnin tai höyryräjäytyksen avulla. Torrefiointitekniikassa biohiilen pölypoltto on verrannollista kuivatun puun pölypolttoon. Kuten muillakin puupohjaisilla polttoaineilla, myös biohiiltä poltettaessa voi kertyä vierasaineita sulfaattisellulosein kemikaalikiertoon. Nämä kertyvät vierasaineet (NPE, Non-Process Elements) voivat aiheuttaa mm. korroosiota, ympäristövaikutuksia ja laatuongelmia. Biohiilen polttomenetelmiksi on suunniteltu joko hiilen polttoa pölypolttona, polttoa meesauunin sekoitettuna tai puhaltamalla hiiltä meesauunin polttimen päästä. Pölypoltto on prosesseista ainoa, jolloin biohiili voi toimia meesauunin ainoana polttoaineena, muissa polttomenetelmissä sitä voidaan käyttää vain lisäpolttoaineena fossiilisten polttoaineiden rinnalla. (Kukkonen 2014. 11, 51-55)

Taulukosta 5.2 näkee, että kuoripohjaisessa biohiilessä on merkittävästi enemmän vierasaineita kuin runkopohjaisessa biohiilessä. Laskennallisesti molemmista raaka-aineista valmistetuille biohiililyypeille käytetään lämpöarvoksi 20 MJ/kg. (Kukkonen 2014. 46) Runkopuun käyttäminen polttoaineen valmistukseen sellun raaka-aineeksi käyttämisen sijaan voi olla epätaloudellinen ratkaisu, jos lähellä ei ole biohiiltä tuottavaa laitosta, vaikka epäpuhtauksien matalamman määrän takia se soveltuisi polttoaineeksi kuoripohjaista biohiiltä paremmin.

Taulukko 5.2 Biohiilen tuhka-analyyseja vierasaineiden osalta (Kukkonen 2014. 46)

ppm	Koivun runko	Männyn kuori
Kloori	80	-
Fosfori	57	1011
Natrium	8	-
Pii	103	23
Alumiini	3	1034
Magnesium	103	460
Kalium	460	2529
Mangaani	103	230
Rauta	8	-

5.4.2 Biokaasu

Orgaanisen aineksen mädäntymisen seurauksena syntyy biokaasua, joka koostuu pääosin metaanista sekä hiilidioksidista. Hiilidioksidi ja metaani ovat hajuttomia ja värittömiä kaasuja. Lähteistä ja lähtötuotteista riippuen biokaasu voi sisältää pieniä määriä rikkivetyä (0-2 %), typpeä (0-25%) sekä kloori- ja fluoriyhdisteitä. (Alakangas 2000. 143-147). Biokaasua voidaan käyttää suoraan polttoaineena tai siitä voidaan jalostaa biometaania, joka soveltuu myös liikennepolttoaineeksi tai injektoitavaksi maakaasuverkkoon. Biometaaniksi jalostettaessa biokaasusta poistetaan hiilidioksidia ja epäpuhtauksia, jolloin sen metaanipitoisuus nostetaan maakaasua vastaavalle tasolle, noin 95-98 %:in. (Kymäläinen & Pakarinen 2015. 17) Biokaasujen lämpöarvo vaihtelee 14,4-21,6 MJ/m³ välillä. Raaka-aineiksi mädätysprosessiin soveltuvat monet erilaiset orgaaniset massat ja menetelmä soveltuu hyvin myös lietemäisten jätteiden käsittelyyn, koska metaanibakteerit toimivat parhaiten vesipitoisessa ympäristössä. Myös kaatopaikat voivat tuottaa biokaasua, jota voidaan kerätä jätepenkereeseen asennettujen siiviläputkien avulla. Maataloudessa karjan lietelannasta tuotettu biokaasu tuo merkittävän avun kannattavuuteen (Alakangas 2000. 143-147), ja teollisissa prosesseissa voidaan hyödyntää aktiivilieteprosessissa syntyvää jätevesilietettä tai suoraan anaerobisilla prosesseilla hapettomissa olosuhteissa tuottamalla jätevedestä biokaasua. Jätevesien anaerobisessa hajoamisesta yhdisteen suurin osa vapautuu metaanina. (Kymäläinen & Pakarinen 2015. 13.)

Gasum syöttää jalostettua biokaasua maakaasun siirtoverkkoon, jolle se on luvannut metaanipitoisuudeksi vähintään 95 mol-%. Siirtoverkkoon sijoitetun biokaasun osuutta ei kuitenkaan analysoida kaasun analysoinnissa. Virtaus johdetaan asiakkaalle fossiilisenä ja bio-osuudet myydään erillisinä sertifikaatteina. (Gasum 2016) Mahdollisesti osa poltetusta maakaasusta voi olla biokaasua, mutta virallisesti biokaasua polttaaakseen pitäisi olla erikseen ostetut biokaasusertifikaatit. Kokonaan maakaasun korvaaminen mädätykseen pohjautuvalla biokaasulla ja siitä valmistetulla biometaanilla vaatii kuitenkin riittävää selvitystä tuotannon kapasiteetista ja mädätysaineen saatavuudesta sekä mahdollisuudesta ostaa erillisiä sertifikaatteja maakaasuverkosta saatavaan biometaaniin.

5.4.3 Raakasuopapohjaiset bioliemet

Erilaisten bioliemien, etenkin raakasuopapohjaisten polttoaineiden käyttöä on tutkittu ja hyödynnetty useammallakin Suomalaisella sulfaattiselutehtaalla.

Sulfaattiseluteprosessissa mustalipeän ollessa haihdutettuna 25-30 %:n kuiva-ainepitoisuuteen mustalipeän pinnalle erottuu saippuoituneita uuteaineita, joita kutsutaan ns. raakasuovaksi. Suopa erotetaan tässä kohdin mustalipeästä ja keitetään, jolloin saadaan mäntyöljyä sekä glaubersuolaliuosta. Raakamäntyöljystä voidaan jatkojalostaa biodieseliä erottamalla rasvahappoja tislaamalla, josta saadaan regeneroitua alkoholin kanssa haluttua polttoainetta. Tämä on mäntyrasvahapon metyyliesteri, eli mäntyöljypohjainen biodiesel. Tislauksen pohjatuotteena syntyy mäntyöljypikeä, jota voidaan käyttää raakamäntyöljyn tavoin raskaan polttoöljyn korvikkeena. (Alakangas 2000. 138) Mäntysuopapohjaisten biopolttoaineiden lämpöarvot on kerätty taulukkoon 5.3.

Taulukko 5.3 Mäntysuopapohjaisten polttoaineiden lämpöarvoja (Alakangas 2000) *Pikiöljy (Kauppinen. 2019)

Polttoaine	Lämpöarvo [MJ/kg]
Raakasuopa	19-20
Mäntyöljy	36,5-38,5
Biodiesel (mänty)	39,5
Pikiöljy	37*

Pikiöljypohjaista polttoainetta käytetään maakaasun osittaiseen korvaamiseen UPM Kymmene Oyj:n sellutehtailla Kaukaalla sekä Pietarsaareissa. (Kauppinen 2019)

Kuten kappaleessa 5.2 on mainittu, on raakasuovan käyttöä myös kaasutuksen raaka-aineena tutkittu 1990-luvulla, mutta nykyisin sen hyödynnys painottuu mäntyöljyn, ja sitä myötä biodieselin sekä pikiöljyn valmistukseen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Yleinen asenneilmapiiri syksyllä 2018 julkaistun IPCC raportin jälkeen, kansainväliset tavoitteet, yhä tiukentuvat lainsäädäntö ja ilmaisten päästöoikeuksien jakoperusteet sekä yritysten omat, sisäiset linjaukset ja strategiat ohjaavat siihen, että fossiilisten polttoaineiden vähentämiseksi on tarvetta yhä edelleen, mikäli Suomalainen metsäteollisuus halutaan pitää elinvoimaisena päästörajoitteista huolimatta sekä mahdollistaa ennustetut kasvutavoitteet. Suomen suurimmilla metsäyhtiöllä onkin olemassa tarkat, määritellyt tavoitteensa fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen ja sen myötä päästökaupan alaisten hiilidioksidipäästöjen hallintaan. Tämä kandidaatintyö keskittyi enemmän näihin ohjausvaikutuksiin, sekä kokosi tiivistelmäisesti tekniset ratkaisuvaihtoehdot työn toisella puoliskolla.

Merkittävin yksittäinen fossiilisten polttoaineiden kulutuskohde sulfaattiselutehtaalla on meesauuni, joka perinteisesti on käyttänyt polttoaineenaan maakaasua tai polttoöljyä. Maakaasu on ollut toimintavarmuudeltaan hyvä, helposti saatavilla oleva polttoaine, joka ei aiheuta rikittömyytensä vuoksi rikastumista selluprosessiin, mutta muodostaa palamisreaktioissaan kasvihuonekaasuksi kuuluvaa fossiilista hiilidioksidia. Työn lopussa punnittiin teoreettisella tasolla erilaisia vaihtoehtoja maakaasun korvaamiseen meesauunin polttoaineena.

Korvaavia menetelmiä, joilla pystytään korvaamaan erilaisia osuuksia fossiilisten polttoaineiden käytöstä, on olemassa jo useammalla Suomalaisella sulfaattiselutehtaalla, esimerkiksi LignoBoost Stora Enson Sunilan tehtaalla, kuoren kaasutus Metsä Fibren Joutsenon sekä Ääneskosken tehtailla. UPM taas hyödyntää polttoaineena sulfaattiseluprosessin sivutuotteena tulevan mäntysuovan jatkojalostetta. Menetelmien laajentaminen suurempaan käyttöön ole millään tavalla poissuljettu, mutta tarkempien päätöksien tekoon on kuitenkin tehtävä tarkempaa tutkimusta yksikkökohtaisesti, jossa huomioidaan tekniikan asettamat rajoitukset, realiteetit polttoaineiden hankintaan sekä kustannustehokkuus.

Puupohjaisissa polttoaineissa suurimpana riskinä on vierasaineiden kertyminen prosessiin sekä rikastuminen.

LignoBoost -prosessin avulla voidaan tarvittaessa mahdollistaa sellutehtaan

kapasiteetinnostoa, mikäli soodakattila toimii pullonkaulana. Ligniinin tulevaisuuden sovellutukset kuitenkin määrittävät, ovatko sen potentiaalit polttoaineena, vai fossiilisten fenoleiden ja hiilikuitujen korvauksessa. Myös muiden biopolttoaineiden käyttöä meesauunin polttoaineiden korvaamiseen on tutkittu ainakin teoreettisella tasolla, sekä käytetty fossiilisten polttoaineiden osittaiseen korvaamiseen, mutta kokonaan korvaaminen vaatisi lisätietoa vaikutuksesta selluprosessin likaantumiseen sekä selvitystä polttoaineen saatavuudesta riittävässä määrin.

Työstä olisi kokonaisuudessaan saatu helpommin luettava ja vertailukelpoisempi, jos kaikista tilastoista olisi odotettu vuoden 2018 tilastojen julkaisu ennen työn tekoa. Kuten aiemmissakin tutkimuksissa on todettu, mitään yksiselkoista vastausta oikean menetelmän valitsemiseen hiilidioksidipäästöjen hallintaan ei voida antaa, vaan jokaisen tapauksen kohdalla tarvitaan tarkempaa tehdaskohtaista tarkastelua sekä kannattavuuslaskentaa

LÄHDELUETTELO

Alakangas, Eija. VTT Tiedotteita 2045. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Jyväskylä. 2000. 172 s. ISBN 951-38-5699-2.

Ahlstrom machinery/T. Räsänen. 1996. Meesauuni: Osaston käyttökoulutusaineisto. 133s.

De Nevers, Noel. 2000. Air Pollution Control Engineering. 2. painos. Boston: McGraw-Hill cop. ISBN 0-07-116207-0.

Energiavirasto. 2018a. Tilastot ja julkaisut. Tieto saatavilla: <https://energiavirasto.fi/tilastot-ja-julkaisut>. Viitattu 19.1.2019, 13.2.2019, 8.3.2019, 10.4.2019.

Energiavirasto. 2018b. Päästökauppa. Tieto saatavilla: <https://energiavirasto.fi/paastokauppa>. Viitattu 19.1.2019, 13.2.2019.

Energiavirasto. 2018c. Päästöoikeuksien ilmaisjako. Tieto saatavilla: <https://energiavirasto.fi/paastooikeuksien-ilmaisjako>. Viitattu 19.1.2019, 6.3.2019, 10.4.2019.

Energiavirasto. 2018d. Suomen maakaasumarkkinat. Saatavilla <https://energiavirasto.fi/maakaasumarkkinat>. Viitattu 18.12.2018.

Energiavirasto. 2019. Ilmaisjakoinfojen esitysmateriaalit. Saatavilla: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Ilmaisjakoinfojen+esitysmateriaalit_tammikuu+2019.pdf/e8213820-9533-47f6-9907-a9d962f831fb. Viitattu 6.3.2019.

Francey, Sabrina. Tran, Hoghi. Berglin, Niklas. 2011. Global survey on lime kiln operation, energy consumption, and alternative fuel usage. Tappi Journal (2011). 8 s.

Gasum/ Riikonen Arto. 1993. Maakaasun ja nestekaasun koostumus ja ominaisuudet. Painos 2. Gasum. 53 s. ISSN 0785-8183.

Gasum. 2018. Maakaasu on puhtain fossiilinen energialähde. Saatavilla <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/maakaasu-energiالاhteena/>. Viitattu 18.12.2018.

Gasum. 2019. Maakaasun hinnan muodostuminen. Saatavilla <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/maakaasun-hinnoittelu/>. Viitattu 19.1.2019.

Gasum/Nuppunen A. 2016. Maakaasun polton hiilidioksidipäästöjen määrittäminen, alueelliseen mittaukseen perustuvat laatuarvot. Asiakastiedote 13.10.2016. Saatavilla <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12861400/Liite3-2017->

p%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-menettelyiden-hyv%C3%A4ksymisest%C3%A4-Gasum-Oy.pdf/d77b1d0f-5fde-e86d-9ffa-9087d72719e5/Liite3-2017-p%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-menettelyiden-hyv%C3%A4ksymisest%C3%A4-Gasum-Oy.pdf.pdf.

Gasum/Riikonen Arto. 1997. Maakaasun ja nestekaasun palaminen. Painos 2. Gasum. 55 s. ISSN 0785-8183.

Gullichen, Fogelholm. 1999. Papermaking science and technology: Chemical Pulping. Helsinki. Fapet Oy. 497 s. ISBN 952-5216-06-3

IPCC. 2018. Special Report: Global Warming of 1.5 °C. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Viitattu 20.2.2019.

Kara, Mikko. Helynen, Satu. Mattila, Lasse. Viinikainen, Seppo. Ohlström, Mikael. Lahnalampi, Milka. 2004. Energia suomessa. 3.painos. Helsinki. VTT Prosessit. 396. ISBN 951-37-4256-3.

Kauppinen, Markku. 2019. Diplomi-insinööri. Manager, Production. UPM Kymmene Oyj Kaukas. Lappeenranta. Keskustelu diplomityöhön ja meesauunin biopolttoaineisiin liittyen. 15.2.2019.

KnowPulp. 2012. Kemikaalikierto. VTT Industrial Systems. Saatavilla: http://www.knowpulp.com/extranet/suomi/pulping/lime_kiln/0_general/frame.htm (vaatii kirjautumisen LUT:n verkkoon).

Kukkonen, Olli. 2014. Biohiilen teknillistaloudelliset käyttömahdollisuudet meesauunissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 100 s.

Kuparinen, Katja. 2017. Green Pulp Mill: Renewable Alternative to Fossil Fuels in Lime Kiln Operations. Vakkilainen, Esa. BioResources 12(2). 18 s.

Kymäläinen, Maritta. Pakkanen, Outi. Suomen Biokaasuyhdistys. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. 1. painos. Hämeenlinna. Hämeen ammattikorkeakoulu. 208. ISBN 978-951-784-770-4.

Liikanen, Jaakko. 5.10.2016. Ligniini jalostuu Energiaa pidemmälle. Paperi ja Puu. Saatavilla <https://www.paperijapuu.fi/ligniini-jalostuu-energiaa-pitemmalle/>

Metsä Fibre. 2018. Joutsenon sellutehdas. Saatavilla <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Pages/Joutseno.aspx>. Viitattu 11.3.2019.

Metsä Group (1). 28.2.2019. Metsä Group uudisti kestävän kehityksen tavoitteensa. Saatavilla <https://www.metsagroup.com/fi/Media/kaikki-uutiset/Pages/Uutinen.aspx?EncryptedId=EF0E92EF2506390C&Title=MetsaGroupuudi-stikestavankehityksentavoitteensa>. Viitattu 6.3.2019.

Metsä Group (2). 2018. Uuden sukupolven biotuotetehdas Äänekoskella. Saatavilla <https://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Tuotantolaitokset/Biotuotetehdas/Documents/Biotuotetehdaan%20esite%20FIN.pdf>. Viitattu 16.4.2019.

Metsäteollisuus ry. 2019. Tilastot, metsäteollisuus. Saatavilla <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/metsateollisuus/>. 11.1.2019.

Partanen Venla. 2015. Separation of lignin in Pulp Mill process and its effect on sodium sulphur balance. Master's Thesis. Lappeenranta University of technology. 68 s.

Pöyry. 2018. Metsäteollisuustuotteiden globaalit markkinat ja kasvupotentiaali 2030. Loppuraportti. Saatavilla https://www.metsateollisuus.fi/uploads/2018/08/02154616/P%C3%B6yry_mets%C3%A4teollisuuden-tuotteiden-kasvu.pdf. Viitattu 21.2.2019.

Raiko, Risto. Saastamoinen, Jaakko. Hupa, Mikko. Kurki-Suonio, Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Helsinki. International Flame Research Foundation/Polytechnica Kustannus Oy. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Seppälä, Klemetti, Kortelainen, Lyytikäinen, Siitonen, Sironen. 1999. Paperimassan valmistus. Helsinki. Opetushallitus. 201 s. ISBN 952-13-0604-1

Suomen standardisoimisliitto SFS ry. ISO 14001 2015 Ympäristöjärjestelmästandardi. Saatavilla: https://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/tuotteet_valokeilassa/iso_14000_ymparistojohtaminen/ymparistojarjestelma

Stora Enso Oy. 2019. Annual Report 2018. Saatavilla: https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Annual-reports/2018/STORAENSO_Annual_Report_2018.ashx. Viitattu 13.2.2019.

Työ- ja elinkeinoministeriä. 8.11.2018. Päästökauppalaan muutoksella valmistaudutaan tulevaan päästökauppauteen. Saatavilla: https://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/paastokauppalaan-muutoksella-valmistaudutaan-tulevaan-paastokauppauteen. Viitattu 14.2.2019.

UPM. 2018. UPM vuosikatsaus 2017. Saatavilla: https://www.upm.com/siteassets/asset/investors/2017/upm_vuosikertomus_2017.pdf. Viitattu 23.1.2019.

UPM Kaukas. 2018. Ympäristö- ja yhteiskuntavastuu 2017. Saatavilla https://www.upm.com/siteassets/documents/responsibility/1-fundamentals/emas-reports/upm-pulp-and-paper-mills-report/local-language/kaukas_emas_2017_fi.pdf. 21.2.2019.

Valmet. 2018. LignoBoost – Lignin from kraft black liquor. Saatavilla: https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=06958000000bPJ6AAM&_ga=2.96780319.1262264376.1555422184-1458069563.1552389032. Viitattu 24.1.2019.

Yle Uutiset. 8.3.2018. Suomessa muhii jättipotti – tehdas eristi puusta aineen, josta voi tehdä ympäristöystävällisiä maaleja ja liimoja. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-10098485>. Viitattu 14.2.2019.

Ympäristöministeriö. 2018a. Kansallinen ilmastopolitiikka. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansallinen_ilmastopolitiikka Viitattu: 14.2.2019.

Ympäristöministeriö. 2018b. Kioton pöytäkirja. Saatavilla. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Kioton_poytakirja. Viitattu 13.2.2019.

Ympäristöministeriö. 2018c. Pariisin ilmastopimus. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastopimus. Viitattu 20.2.2019.

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu.1.3.2019. Emas-järjestelmä ja sen toteutuminen. Saatavilla: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Ymparistojarjestelmat_ja_johtaminen/EMASin_toteuttaminen. 3.3.2019.