

LUT Univesity

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

MEESAUUNIN FOSSIILIVAPAAAT POLTTOAINEET

LIME KILN FOSSIL FREE FUELS

Työn tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

TkT Juha Kaikko

Työn ohjaaja: DI Outi Matikainen

Imatra 30.12.2019

Janne Mäkelä

# TIIVISTELMÄ

LUT University

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Janne Mäkelä

## MEESAUUNIN FOSSIILIVAPAAAT POLTTOAINEET

Diplomityö

2019

66 sivua, 28 kuvaa ja 15 taulukkoa.

Työn tarkastajat: Professori TkT Esa Vakkilainen, TkT Juha Kaikko

Työn ohjaaja: DI Outi Matikainen

Hakusanat: meesauuni, fossiilivapaat polttoaineet, vierasaineet

Diplomityössä käsitellään sellutehtaiden suurimman fossiilisten hiilidioksidipäästöjen kohteen eli meesauunin fossiilivapaita polttoainevaihtoehtoja ja niiden vaikutuksia meesauuniin ja sellutehtaaseen. Työn tavoitteena on luoda Stora Enson Imatran tehtaille suunnitelma meesauunien maakaasun korvaamiseksi niin, että tämän esiselvityksen pohjalta on mahdollisimman hyvä valmius lähteä viemään projektia seuraavaan vaiheeseen.

Teorian osalta keskitytään valkolipeän valmistukseen, jonka tärkeänä osana meesauuni toimii. Polttoainevaihtoehtoista on keskitytty erityisesti kiinteiden biopolttoaineiden vaihtoehtoihin, jotka vaativat perinteisiä nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita huomattavasti enemmän käsittelyä sekä suuret laiteinvestoinnit.

Imatran tehtailla mahdolliseksi meesauunien pääpolttoaineeksi jää ainoastaan kuori, joka kaasutettaisiin tuotekaasuksi. Vanhoihin meesauuneihin integroidessa on molemmilla oltava omat kaasuttimet, mutta kuoren kuivaus tapahtuisi yhdellä kuivaimella. Uuden meesauunin tapauksessa vaihtoehtona on integroida uuni vanhaan kaustistamoon tai tehdä täysin uusi valkolipeätehdas.

## **ABSTRACT**

LUT University

School of Energy Systems

Degree Program of Energy Technology

Janne Mäkelä

LIME KILN FOSSIL FREE FUELS

Master's thesis

2019

66 pages, 28 figures and 15 tables.

Examiners: Professor Ph.D. (Tech) Esa Vakkilainen, Ph.D. (Tech) Juha Kaikko

Supervisor: M.Sc. (Tech) Outi Matikainen

Keywords: lime kiln, fossil free fuels, non-process elements

This Master's Thesis discusses about the pulp mill's main fossil emissions source, lime kiln, fossil free fuel options and the effects of new fuels to lime kiln and to whole pulp mill. The main goal is to create a plan for Stora Enso Imatra Mill's about the replacement of natural gas usage in lime kilns and to give good basis for continuing project onto next phase.

In theory part the focus is in white liquor plant, where lime kiln plays a major role. Within the fuel options, solid fuels get the main focus as the need for processing and equipment investments are relatively high compared to typical liquid and gaseous ones.

For Imatra Mill's the only option for the main fuel is bark, which would be gasified to product gas. With the old kilns both needs own gasifier but drying would be done with one dryer. In new kiln option there is possibility to integrate the kiln in old recausticizing plant or alternatively to build a completely new white liquor plant.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Ympäristötavoitteet</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Valkoliipeän valmistus</b>	<b>9</b>
3.1	Kaustistamo .....	10
3.2	Meesauuni .....	12
3.2.1	Polttoaineet.....	15
3.2.2	Energiankulutus .....	20
3.3	Vierasaineet .....	22
3.3.1	Ongelmat valkoliipeän valmistuksessa .....	22
3.3.2	Rikkiyhdisteet meesauunissa .....	24
<b>4</b>	<b>Kiinteiden biopolttoaineiden käsittely ja poltto</b>	<b>28</b>
4.1	Pölypoltto .....	28
4.1.1	Palamislaskut .....	28
4.1.2	Polttoaineen kulutus ja poltto.....	32
4.2	Kaasutus ja tuotekaasun poltto .....	37
4.2.1	Kaasutus- ja palamislaskut.....	37
4.2.2	Polttoaineen kulutus ja poltto.....	45
4.3	Murskaus .....	47
4.4	Kuivaus.....	48
4.5	Hankinta, vastaanotto ja käsittely.....	52
4.5.1	Sahanpuru ja kuori .....	52
4.5.2	Ligniini.....	54
<b>5</b>	<b>Vaihtoehtojen teknistaloudellinen tarkastelu</b>	<b>56</b>
5.1	Polttoainevalinnat.....	56
5.2	Prosessitekniset vaikutukset.....	58
5.3	Tarvittavat laitehankinnat ja sijoittaminen .....	61
5.4	Kannattavuus .....	64
<b>6</b>	<b>Yhteenvedo ja johtopäätökset</b>	<b>66</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>67</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Merkit

$\lambda$	ilmakerroin
$\Delta H_r$	reaktioentalpia
$C$	kapasiteetti
$E$	energian kulutus
$m$	massa
$l$	veden höyrystymislämpö
$q_m$	massavirta

### Alaindeksit

$ab$	polttoaine polttotilassa
$ad$	polttoaine kuivaimen jälkeen
$ar$	polttoaine vastaanotettuna
$d$	kuivain
$mf$	polttoaine kuivana
$mu$	meesauuni
$pa$	polttoaine
$tk$	tuotekaasu

### Lyhenteet

$AA$	vaikuttava eli aktiivinen alkali
$CE\%$	kaustisoitumisaste
$EA$	tehokas alkali
$HHV$	kalorimetrinen lämpöarvo
$LHV$	tehollinen lämpöarvo
$NO_x$	typen oksidit
TRS	haisevat rikkiyhdisteet
$TTA$	kokonaisalkali

## 1 JOHDANTO

Sellutehtaiden raaka-aineena käytettävä puu tarjoaa energiantensiiviselle teollisuudelle omavaraisen energiatuotannon. Tästä huolimatta meesauunit pitävät edelleen tehtaat usein riippuvaisina fossiilisista polttoaineista. Fossiilisille polttoaineille on kuitenkin monia eri korvausvaihtoehtoja ja näitä on muun muassa Ruotsissa käytetty jo 1970-luvun öljykriisin jälkimainingeista asti. Suomessa selluteollisuus on 2010-luvulla aloittanut investoinnit, joilla on näytetty suunta kohti täysin fossiilitonta selluteollisuutta.

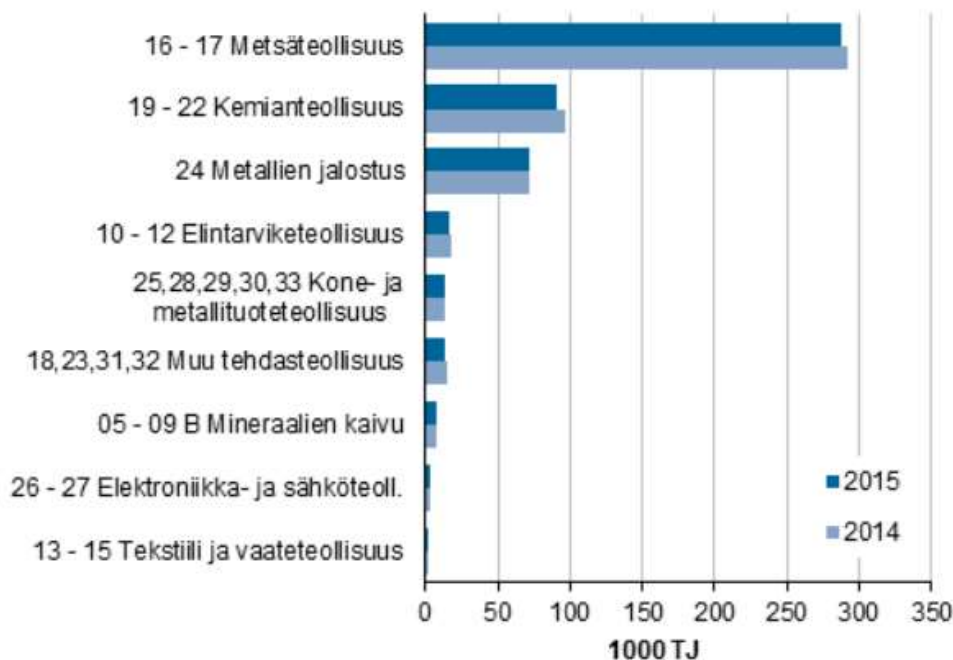
Diplomityössä avataan taustaa ympäristötavoitteista, joita aina globaalilta tasolta Stora Ensoon asti on asetettu. Ympäristötavoitteisiin pohjautuen työssä perehdytään eri polttoainevaihtoehtoihin ja käydään läpi tekijät, joita on otettava huomioon mietittäessä polttoaineen vaihtoa. Suuremmassa mittakaavassa kiinteät polttoaineet eli kuori, sahanpuru ja ligniini ovat todennäköisimpiä ja samalla vaativimpia polttoainevaihtoehtoja, joten työssä on keskitytty erityisesti niiden käsittelyyn ja polttoon. Sellutehtaan kannalta tärkein asia polttoainevaihtoehtojen esiselvitysvaiheessa on määrittää eri polttoaineiden riittävyys, jonka avulla syntyy reunaehdot eri vaihtoehdoille. Polttoaineen riittävyyden arviointia sekä muita polttoaineen muutoksen vaikutuksia varten luodaan Excel-työkalu, jolla voi kartoittaa eri vaihtoehtojen sopivuutta.

Stora Enson Imatran tehtailla käytetään tällä hetkellä kahden meesauunin polttoaineena maakaasua. Työn tavoitteena on kartoittaa sopivat vaihtoehdot maakaasun korvaamiseksi ja tehdä karkeat suunnitelmat eri vaihtoehdoista, jotta tätä esiselvitystä voidaan hyödyntää mahdollisimman hyvin aloitettaessa mahdollinen projektin seuraava vaihe.

## 2 YMPÄRISTÖTAVOITTEET

Joulukuussa 2015 YK:n ilmastopimuksen osapuolikokouksessa hyväksyttiin Pariisin ilmastopimus, jonka on määrä ohjata ja suunnata globaalit yhteisön tavoitteet ja rahoitusvirrat kohti vähähiilistä ja ilmastokestävää kehitystä. Vuonna 2016 voimaan astunut sopimus tulee koskemaan vuoden 2020 eli Kioton pöytäkirjan jälkeistä aikaa ja keskeisimpänä tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle 2 °C. Pariisin sopimus ei itsessään sisällä erityisiä päästötavoitteita, vaan jäsenvaltiot esittävät omat kansalliset panoksensa, joihin ne sitoutuvat. EU valtioilla on tällä hetkellä voimassa oleva yhteinen tavoite vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vuoden 1990 tasosta 40 % vuoteen 2030 mennessä, mutta tavoitetta tullaan tarkentamaan vielä vuoteen 2020 mennessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 7)

Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta, joten teollisuusalojen suuryritykset ovat suuressa roolissa tavoitteen toteutumisessa. Metsäteollisuus on Suomen merkittävin bioenergian tuottaja, mutta kuten kuvasta 2.1 huomataan, myös selkeästi merkittävin energian kuluttaja. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, 3; 29)



**Kuva 2.1** Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain vuonna 2014 ja 2015. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, 28)

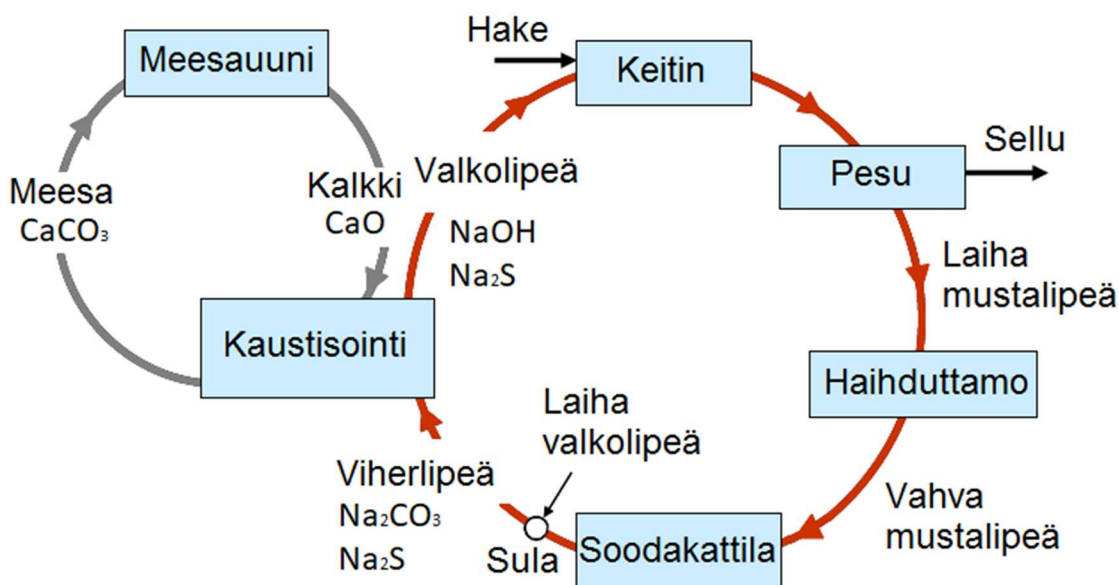
Vuonna 2015 metsäteollisuuden tehdaspolttoaineista 84 % oli uusiutuvia, kuten mustalipeää ja kuorta sekä muita kiinteitä puupolttoaineita. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2016, 29) Lähtökohdat metsäteollisuuden fossiilittomaan tuotantoon ovat siis hyvät ja bioenergian lisääminen tukee myös Suomen kansallisia tavoitteita. Suomen metsäteollisuudesta suuren osan kattavan selluteollisuuden fossiiliton tuotanto on realistinen jo seuraavan vuosikymmenen aikana. Ratkaistavat haasteet perustuvat lähinnä meesauunien polttoaineisiin sekä soodakattiloiden tukipolttoaineisiin.

Stora Enson energia- ja hiilipolitiikan mukainen tavoite on vähentää vuosikymmenen aikana fossiilisten polttoaineiden käyttö mahdollisimman lähelle nollaa hyödyntämällä teknisesti ja kaupallisesti toteutettavissa olevia keinoja. Yhtenä osana on lisätä bio- ja vähähiilisten polttoaineiden käyttöä aina, kun se on teknisesti ja kaupallisesti mahdollista. Yhtenä päätavoitteena Stora Enso on määrittänyt tuotantoon suhteutettujen hiilidioksidi ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen 31 %:lla vuoden 2010 vertailuluvuista, vuoteen 2030 mennessä. (Stora Enso 2019) Meesauunien fossiilisten polttoaineiden korvaus on siis tavoite koko Stora Enson tasolla ja tulevien investointien selkeänä painoarvona on perinteisen kannattavuuden lisäksi myös ympäristöarvot.



### 3 VALKOLIPEÄN VALMISTUS

Sulfaattisellutehtaalla haketetusta puusta pyritään irrottamaan keittämällä puukuituja sitova ligniini puukuiduista eli selluloosasta ja hemiselluloosasta. Kuvassa 3.1 on esitetty sellutehtaan keittokemikaalien kierto. Keitossa käytetään keittolipeänä tyypillisesti valkolipeää ja keittimen jälkeen sellun joukosta pestään keittokemikaalit pois ja ohjataan kemikaalien talteenottoon. Laiha mustalipeä syötetään haihduttamolle, josta haihdutettu mustalipeä ajetaan polttoon soodakattilalle ja orgaaninen aines poltetaan energiaksi sekä mustalipeän sisältä natriumsulfaatti pelkistetään takaisin keittokemikaaliksi eli natriumsulfidiksi.



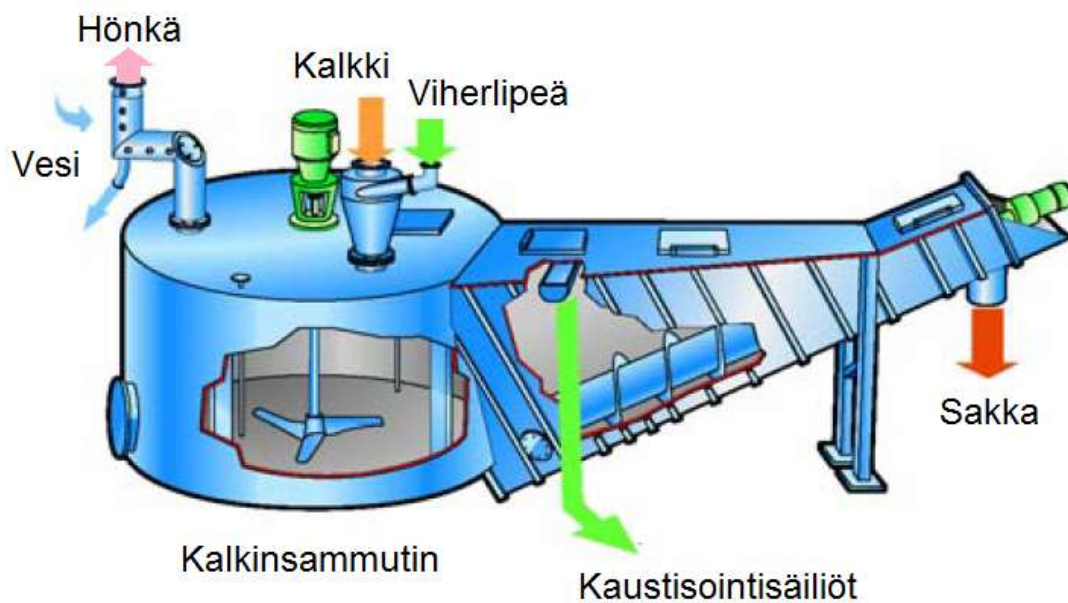
**Kuva 3.1** Sellutehtaan kemikaalikierto. (Tran, Vakkilainen 2016, 1)

Soodakattilan sulaan sekoitetaan liuotussäiliössä laihavalkolipeää ja liuos muuttuu viherlipeäksi, joka pumpataan edelleen kaustistamolle. Viherlipeän väkevyyden eli kokonaisalkalin säätö tehdään soodakattilan liuotussäiliöllä laihavalkolipeän avulla ja väkevyydessä pyritään mahdollisimman korkeaan arvoon, jotta lopputuotteesta eli valkolipeästä saadaan mahdollisimman väkevää sellun keittoa varten sekä kaustistamon läpi kulkevan veden määrä vähenee eli kapasiteetti myös nousee. Rajoittavana tekijänä on tyypillisesti viherlipeälinjojen tukkiutuminen. Kokonaisalkali kuvaa natriumhydroksidin, -sulfidin ja karbonaatin määrää liuoksessa.



### 3.1 Kaustistamo

Kaustistamon päätehtävänä on viherlipeän sisältämän natriumkarbonaatin muuttaminen takaisin toisena vaikuttavana keittokemikaalina käytettäväksi natriumhydroksidiksi. Viherlipeä on suodatettava tai selkeytettävä ennen syöttämistä kuvan 3.2 tyyppiseen kalkin sammuttimeen, jotta viherlipeän sisältämät liukenemattomat vierasaineet eli viherlipeäsakka saadaan erotettua. Sakkaa erottuu vielä kalkinsammuttimessa ja se poistetaan ruuvilla sammuttimesta.

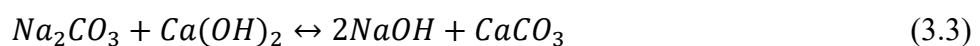


**Kuva 3.2** Kalkinsammuttimen periaatekuva. (Tran, Vakkilainen 2016, 6)

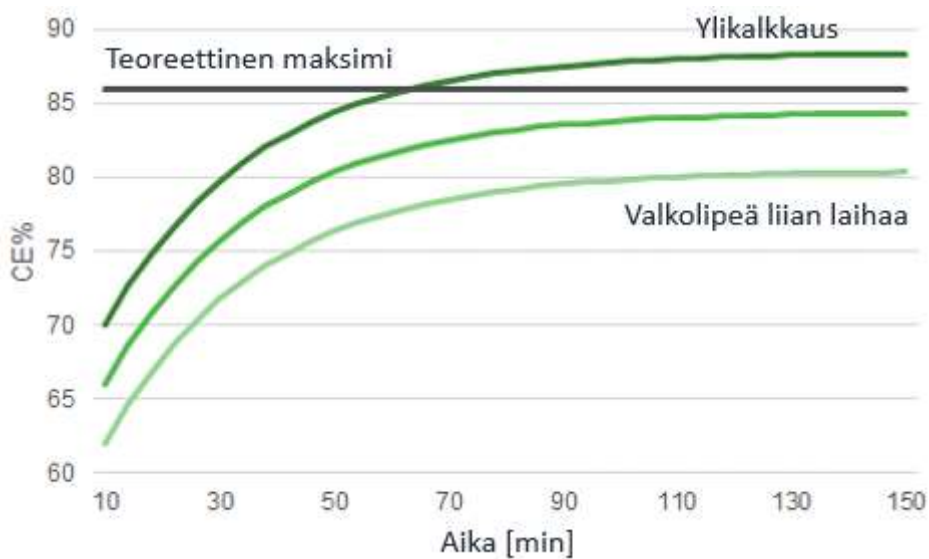
Kaustisointireaktioon käytetään kalsiumoksidia eli poltettua kalkkia, joka sekoitetaan viherlipeän joukkoon. Poltetu kalkki reagoi välittömästi viherlipeän sisältämän veden kanssa ja muodostaa eksotermisessä reaktiossa kalsiumhydroksidia eli sammutettua kalkkia.



Viherlipeän sisältämä natriumkarbonaatti alkaa reagoida sammutetun kalkin kanssa muodostaen natriumhydroksidia ja kalsiumkarbonaattia eli meesaa.



Kaustisointireaktio vaatii hitaana reaktiona viipymäaika, joten kalkinsammuttimella syntyvä kalkkimaito ajetaan kaustisointisäiliöihin, joissa reaktio siirtyy rektioyhtälössä 3.3 kohti oikeaa. Kaustisointireaktio ei siirry täysin reaktiotuotteiden puolelle, vaan tasapainotilassa liuokseen jää edelleen reagoimatonta natriumkarbonaattia, vaikka poltettua kalkkia lisättäisiin loputtomiin.

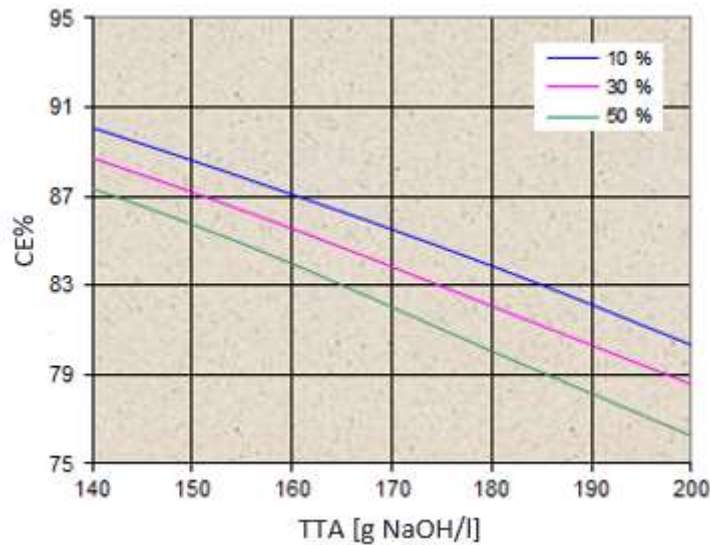


**Kuva 3.3** Kaustisuusreaktio ajan funktiona. (Valmet 2018 [2])

Kaustisoinnin onnistumista kuvaa kaustisoitumisaste, joka on natriumhydroksidin suhde natriumkarbonaattiin ja -hydroksidiin.

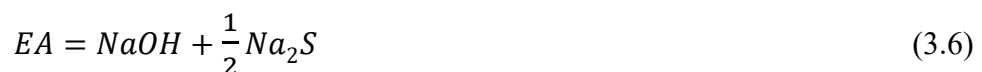
$$CE\% = \frac{NaOH}{NaOH + \frac{1}{2}CO_3} \quad (3.4)$$

Tasapainotila eli teoreettinen maksimi kaustisiteetti riippuu viherlipeän kokonaisalkalista eli natriumyhdisteiden määrästä sekä sulfiditeetistä. Korkeampi kokonaisalkali sekä sulfiditeetti, kuitenkin pudottavat kaustisiteetin teoreettisen maksimin arvoa kuvan 3.4, Goodwinin käyrän mukaisesti.



**Kuva 3.4** Viherlipeän laadun vaikutus kaustisiteetin teoreettiseen maksimiin. (Valmet 2018 [2])

Kalkkimaidosta suodatetaan kaustisointisäiliöiden jälkeen erilleen valkolipeä, laihavalkolipeä ja meesa. Valkolipeä menee keittoon, laihavalkolipeä pääasiassa soodakattilan liuotussäiliöön ja meesa meesauunille poltettavaksi uudelleen kalkiksi. Valkolipeän laatu voidaan ilmaista vaikuttavana eli aktiivisena tai tehollisena alkalina. Aktiivinen alkali kuvaa natriumhydroksidin ja natriumsulfidin määrää ja tehollisessa alkalissa natriumsulfidi lasketaan puolikkaana.



### 3.2 Meesauuni

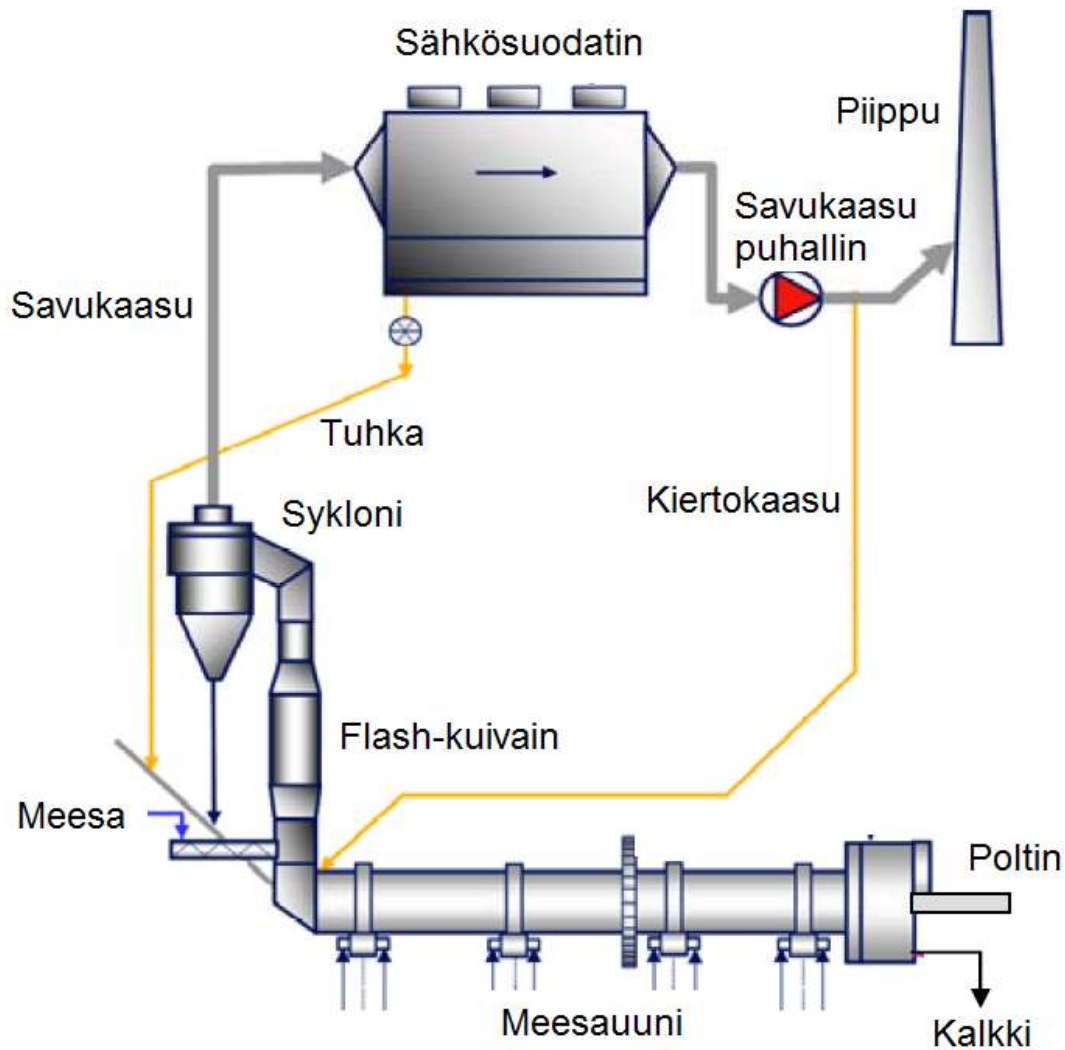
Meesa varastoidaan meesan syöttösäiliöissä noin 30 % kuiva-aineessa ja syötetään sieltä meesasuodattimelle, jossa kuiva-aine on tarkoitus nostaa yli 75 %:n. Meesasuodattimella meesaa pestään kuumalla vedellä ja kuivataan esimerkiksi kuvan 3.5 tyyppisellä rumpusuodattimella, tyhjän avulla. Pesussa meesasta irtoava alkalipitoinen suodos pumpataan talteen laihavalkolipeäsäiliöön. Meesan jäännösalkalin tavoitteena on muun muassa Andritzin suosituksissa 0,34 %:n natriumsulfaatti pitoisuus (Lehtinen 2018). Natrium yhdisteet sulavat noin 800 °C lämpötilassa, jolloin meesauunin seinämälle alkaa muodostua rengas (Tran 2007, 2). Kokonaan liukoista alkalia ei saada pestyä pois, joten

meesauuneissa syntyy ajon aikana aina rengas. Muiden osatekijöiden, kuten epästabiilin operoinnin tai vaihtelevan polttoaineen laadun kanssa, liukoinen alkali voi muodostaa jopa uunin tukkeutumiseen johtavan renkaan, mikäli pitoisuudet ovat jatkuvasti yli suositeltavien arvojen (Tran 2017).



**Kuva 3.5** Rumpumallinen meesasuodatin. (Valmet 2017 [2], 1)

Valkoliipeän valmistuksessa tarvittava poltettu kalkki tuotetaan pääasiassa kuvan 3.6 tyyppisellä meesauunilla. Moderneissa meesauuneissa meesasuodattimelta tuleva noin 80 % kuiva-aineessa oleva meesa syötetään savukaasukanavaan, josta se tempautuu savukaasujen mukana kohti sykklonia. Savukaasujen seassa meesa kuivuu ja sykklonin alaosasta se syötetään uunin syöttöpäähän. Meesa liikkuu noin 0,5 – 2,0 r/min vauhdilla pyörivässä ja noin 1,5° – 3° kallistuskulmassa olevassa uunissa kohti polttopäätä, josta jäähdyttimen kautta lopputuote eli poltettu kalkki siirretään kuljettimilla varastosiilon (Adams 1999, 1).



**Kuva 3.6** Flash-kuivaimella varustetun meesauunin periaatekuva. (Tran, Vakkilainen 2016, 6)

Meesa eli kalsiumkarbonaatti hajoaa meesauunissa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Reaktio vaatii tapahtuakseen paljon energiaa ja yli 800 °C:een lämpötilan, joten tarpeeksi suuren lämpötilan saavuttamiseksi energia on muodostettava polttamalla. (Tikka et al. 2008, 163)



Meesauunin prosessin laatua voidaan seurata määrittämällä poltetusta kalkista jäännöskarbonaatti (% CaCO<sub>3</sub>) sekä aktiivinen kalkki (% CaO) tai kaustisuusvoima (%). Jäännöskarbonaattimääritys kertoo kalsinoinnin onnistumisesta ja se määritetään tyypillisesti operaattoreiden toimesta, jolloin tietoa voidaan käyttää yhtenä meesauunin ajoparametrina. Tavoitteena on tyypillisesti noin 2 – 4 %. Mikäli jäännöskarbonaattia

pyritään saamaan pienemmäksi, niin kalkin pinta alkaa kovettua ja kalkin reaktiivisuus laskee sekä energian kulutus nousee merkittävästi. Aktiivinen kalkki kertoo koko kalkkikierron tilasta eli kalkin aktiivisuuden laskiessa kiertoon on tyypillisesti rikastunut vierasaineita. Käytetympi määrittäminen kalkin laadulle on kuitenkin kaustisuusvoima, joka kertoo kalkin tehokkuuden eli sen kuinka suuri osuus CaO ja Ca(OH)<sub>2</sub> reagoi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kanssa. (Tikka et al. 2008, 128)

Meesauunin tärkein parametri sellutehtaan kannalta on kapasiteetti, joka ilmoitetaan poltettuna kalkkina eli kalsiumoksiditonneina vuorokautta kohti. Energiankulutus ilmaistaan myös tuotettuja tonneja kohti, joten uunin tarvitsema nimellispolttoainetehto voidaan määrittää kapasiteetin ja energian kulutuksen tulona.

$$P_{mu} = C_{mu}E_{mu} \quad (3.8)$$

$P_{mu}$	meesauunin polttoteho	[MW]
$C_{mu}$	meesauunin kapasiteetti	[tCaO/d]
$E_{mu}$	meesauunin energian kulutus	[GJ/tCaO]

Meesauunin energian kulutuksessa suurin tekijä on meesasuodattimelta tulevan meesan kuiva-aine (Lundqvist 2009, 43). Meesauunin energian kulutus riippuu myös uunin energiatehokkuudesta, joissa modernit flash-kuivaimella varustetut uunit ovat kehittyneempiä vanhoihin uuneihin verrattuna, joihin meesa syötetään suoraan meesasuodattimelta uunin peräosaan. Myös muun muassa polttoaineilla sekä vierasaineilla on vaikutus energian kulutukseen ja niistä on kerrottu tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

### 3.2.1 Polttoaineet

Polttoaineet, kuten muutkin aineet ja yhdisteet esiintyvät eri olosuhteissa kaasumaisina, nestemäisinä tai kiinteinä. Kaasumaiset polttoaineet tulevat tehtaille putkistoa pitkin aina polttimelle asti, joten polttoaineet ovat hyvin käyttäjäystävällisiä. Erilliset varastosäiliöt ja -siilot puuttuvat, joten polttoaineen kuljetuksilta ja käsittelyltä vältytään. Polttoaineet ovat myös tuhkattomia ja rikittömiä eli ylimääräisiä vierasaineita ei päädy kalkin joukkoon.

Maakaasu on Etelä-Suomessa tyypillisesti käytettävä meesauunien fossiilinen pää- sekä tukipolttoaine. Maakaasun toimitusvarmuus Suomessa on myös ollut erinomainen vuosikymmenien ajan, joten mahdollista siirtymistä pois maakaasun käytöstä ajaa nykyisellään hinta sekä pyrkimykset fossiilivapaaseen sellun tuotantoon. Maakaasuverkostoon tuotetaan jatkuvasti kemiallisilta koostumuksiltaan maakaasua vastaavaa biokaasua. Biokaasu sekoittuu maakaasuun ja asiakas voi ostaa biokaasuja sertifikaattien muodossa. Sertifikaattijärjestelmällä ylläpidetään tasetta käytetyn ja tuotetun biokaasun määristä. (Gasum 2019) Meesauunien polttoaineen käyttö on suuruusluokaltaan niin suurta, että biokaasun tuotanto ei riitä pääpolttoaine käyttöön. Maakaasumarkkinat ovat kuitenkin laajenemassa vuonna 2020 käyttöön otettavan Baltic Connectorin myötä Eurooppaan, joten myös biokaasumarkkinat tulevat laajenemaan (Baltic Connector, 2019). Biokaasu on siis tulevaisuudessa mahdollinen tukipolttoaine, jolla meesauunin tuotanto perustuu täysin uusiutuviin polttoaineisiin.

Toinen käytetty kaasumainen polttoaine on vety, jota syntyy elektrolyysissä esimerkiksi valkaisu kemikaalien valmistuksessa. Vedyn käyttö meesauunin polttoaineena vaatii siis tehtaalla lähelle tuotantoprosessin, josta syntyy hyödynnettävissä olevaa vetyä, kuten Stora Enson Oulun tehtaalla. Polttoaineena vety on erinomainen, sillä palamistuotteena syntyy lähinnä vesihöyryä. Ilman lähellä olevaa hyödynnettävää ylijäämää, sähköintensiivisen elektrolyysin käyttö meesauunin polttoainetarpeisiin on nykyisillä investointikustannuksilla ja sähkön hinnoilla kannattamatonta (Kuparinen, Vakkilainen 2017).

Nestemäiset polttoaineet ovat meesauunien käytössä hyvin tyypillisiä hyvän saatavuuden ja helpon käsittelyn sekä polton vuoksi. Kaasumaisiin polttoaineisiin verrattuna nestemäiset vaativat kuitenkin käsittelyä, varastointia ja mahdollista kuljetusta. Polttoaineiden kosteus- ja tuhkapitoisuudet ovat tyypillisesti alhaisia, kun taas rikkipitoisuudet ovat tyypillisesti korkeampia verrattuna meesauunilla käytettäviin kaasumaisiin tai kiinteisiin polttoaineisiin. Taulukossa 3.1 on esitetty meesauunin polttoaineena käytettävien nestemäisten polttoaineiden tyypillisiä koostumuksia ja lämpöarvoja kuivalle (mf) sekä saapumistilassa (ar) olevalle polttoaineelle.



**Taulukko 3.1** Kiinteiden polttoaineiden tyypilliset koostumukset ja lämpöarvot. \*Suuri rikkipitoisuus vaikeuttaa metanolin koostumuksen määrittystä ja taulukon pitoisuudet ovat suuntaa antavia.

		<b>Tärpätti</b>	<b>*Metanoli</b>	<b>Pikiöljy</b>	<b>Raskas polttoöljy</b>
C	[%-mf]	83,80	30,70	77,00	85,90
H <sub>2</sub>	[%-mf]	11,30	9,60	11,00	12,00
N <sub>2</sub>	[%-mf]	0,22	2,17	0,05	0,50
S	[%-mf]	0,21	6,25	0,30	1,00
O <sub>2</sub>	[%-mf]	4,47	51,28	11,35	0,53
H <sub>2</sub> O	[%-ar]	0,95	8,80	0,10	0,35
Tuhka	[%-mf]	0,00	0,00	0,30	0,07
LHV <sub>mf</sub>	[MJ/kg]	42,51	22,49	38,04	41,00
LHV <sub>ar</sub>	[MJ/kg]	42,08	20,30	38,00	40,85

Raskas polttoöljy on tyypillinen fossiilinen polttoaine, jota käytetään myös edelleen useilla sellutehtailla pää- tai tukipolttoaineena. Suomessa raskasta polttoöljyä käytetään tehtailla, jotka eivät ole maakaasuverkoston ulottuvilla ja eivät ole siirtyneet vaihtoehtoihin uusiutuviin polttoaineisiin. Uusituvista polttoaineista metanolia ja tärpättiä syntyy sellutehtaan tuotannon sivutuotteina ja tehtaiden oma tuotanto riittää kattamaan meesauunin tukipolttoaineen roolin. Metanoli on tislaamolta tullessaan epäpuhdasta ja esimerkiksi Imatran tehtailla metanolipitoisuus on luokkaa 50 – 60 %. Rikkipitoisuus on suurimmillaan lähes 10 % luokkaa, joten metanolin kautta tuleva rikki on hyvin merkittävä tekijä.

Raakamäntyöljyn jalostuksessa sivutuotteena saatavaa pikiöljyä syntyy noin 20 – 30 % mäntyöljyn määrästä (Niemeläinen 2018, 27). Yksitaisen sellutehtaan tuottaman mäntyöljyn määrästä saatava pikiöljy ei myöskään riitä kattamaan koko tehtaan tarvetta. Mäntyöljy myydään kuitenkin tyypillisesti jalostettavaksi muualle ja pikiöljy on jalostavan yrityksen tuote, jolloin tehtaat voivat myös saatavuuden rajoissa kattaa sillä koko meesauunin energian tarpeen. Pikiöljyä käytetään esimerkiksi Stora Enson Oulun tehtaalla kattamaan suurin osa ja Skutskärin tehtaalla lähes 100 % meesauunin energian tarpeesta (Hyöky 2019, Lindström 2019).

Meesauunien polttoaineet ovat tyypillisesti olleet nestemäisiä tai kaasumaisia, mutta kiinteät biopohjaiset polttoaineet ovat nousseet korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Polttoaineiden rikki- ja tuhkapitoisuudet vaihtelevat, mutta suurin ero on kiinteille biopolttoaineille tyypillinen suuri kosteuspitoisuus. Kiinteät biopolttoaineet vaativat varastointia, mahdollisesti kuljetusta ja nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin verrattuna huomattavasti enemmän käsittelyä. Taulukossa 3.3 on vertailtu eri kiinteiden polttoaineiden ominaisuuksia.

**Taulukko 3.2** Kiinteiden polttoaineiden tyypilliset koostumukset ja lämpöarvot.

		<b>Kuori</b>	<b>Sahanpuru</b>	<b>Ligniini</b>
C	[%-mf]	53,38	51,28	63,70
H <sub>2</sub>	[%-mf]	5,71	5,92	5,50
N <sub>2</sub>	[%-mf]	0,34	0,09	0,10
S	[%-mf]	0,00	0,00	2,00
O <sub>2</sub>	[%-mf]	38,09	42,47	27,90
H <sub>2</sub> O	[%-ar]	60,42	48,42	5,00
Tuhka	[%-mf]	2,48	0,24	0,80
LHV <sub>mf</sub>	[MJ/kg]	19,13	19,27	26,40
LHV <sub>ar</sub>	[MJ/kg]	6,10	8,76	24,96

Sellutehtaan haihdukselta mustalipeän sivuvirrasta valmistettava ligniini sisältää vähän tyyppiä ja tuhkaa, mutta rikkipitoisuus on suhteellisen suuri. Lämpöarvoltaan ligniini on kuorta ja sahanpurua arvokkaampaa suuremman hiilipitoisuuden ansiosta. Ligniiniä on käytetty meesauunien pääpolttoaineena Stora Enson Sunilan tehtaalla vuodesta 2015, mutta metsäteollisuusyritykset panostavat tällä hetkellä ligniinipohjaisten tuotteiden kehittämiseen ja rooli muuttuu tulevaisuudessa todennäköisimmin korkeamman jalostusasteen käyttöön korvaamaan fossiilisia raaka-aineita monissa eri sovellutuksissa.

Kuori on tyypillisesti mekaanisen puristuksen jälkeen edelleen todella kosteaa ja sisältää huomattavan määrän tuhkaa eli vierasaineita. Vierasaineet vaikuttavat osaltaan myös kiinteiden biopolttoaineiden käsittelyyn ja polttoon ja taulukossa 3.3 on vertailtu kuivan polttoaineen vierasainepitoisuuksia eräiden kuori ja sahanpuru näytteiden osalta. Rikkipitoisuus on kuorella ja sahanpurulla marginaalinen, mutta tyyppiä kuori sisältää sahanpurua enemmän. Kuivan polttoaineen energiasisällöltään polttoaineet ovat tyypillisiä biopolttoaineita eli lämpöarvo on fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna

alhainen, suuren happipitoisuuden johdosta. Sahanpuru sisältää kuoren tapaan myös paljon kosteutta, mutta tuhkapitoisuus on kuorta huomattavasti pienempi ja rikki- ja typpipitoisuudet ovat pieniä. Sahanpurun lämpöarvo on samaa luokkaa kuoren kanssa.

**Taulukko 3.3** Kuoren ja sahanpurun kuivan polttoaineen vierasainepitoisuudet.

		<b>Kuori</b>	<b>Sahanpuru</b>
Na	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	10000	28
Mg	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	1125	264
Al	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	708	23
Si	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	904	52
P	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	586	67
S	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	159	34
K	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	628	13
Ca	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	8800	889
Ti	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	42	0
Cr	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	94	10
Mn	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	338	77
Fe	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	454	40
Ni	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	102	0
Cu	[mg/kg <sub>mf</sub> ]	102	0

Kuori on sellutehtaan kuorimolla syntyvä sivuvirta, joka poltetaan tyypillisesti tehtaan omassa voimakattilassa tai myydään muualle energiakäyttöön. Sellutehtailla kuorta on ylimäärin, joten sen hyödyntäminen meesauunilla takaa omavaraisen polttoaineen. Suurilla paperi- ja kartonkitehdasintegraateilla höyryn tarpeen vuoksi kuorta ei kuitenkaan välttämättä riitä meesauuneille ilman korvaavan polttoaineen hankintaa voimakattilalle. Ruotsissa esim. Södra Cellin Värön ja Billerudin Karlsborgin tehtailla ja Suomessa Pietarsaassa kuorta kaasutettiin tuotekaasuksi ja poltettiin meesauunissa jo 1980-luvulla (Berglin 2008). Södra Cellin Mönsteråsin tehtaalla kuorta on poltettu murskattuna pölypolttimella (Blom 2019). Myös Suomessa on lähivuosina siirrytty kuoren käyttöön ja ensimmäiset referenssit ovat kiertoleijukaasuttimet Metsä Fibren Joutsenon (2012) ja Äänekosken tehtailla (2017).

Sahanpurun osalta sellutehdas on riippuvainen mekaanisen metsäteollisuuden sahoista ja näin ollen sahanpurun käyttö on kannattavinta tilanteessa, jossa suurin osa polttoaineesta saadaan kuljettimilla samalla tehdasalueella sijaitsevalta sahalta. Sahanpurua voi osittain

korvata sellutehtaan omalla purulla, mikäli hakkeesta seulotaan erilleen puru ennen keittoa. Purua on käytetty Ruotsissa Smurfit Kappan tehtaalla kahdella meesauunilla pölypolttona jo vuodesta 1979 (Berglin 2008). Suomessa Stora Enson Varkauden tehtaan leijupetikaasutin on kaasuttanut purua meesauunin polttoaineeksi vuodesta 2001 lähtien. Stora Enson Enocellin tehtaalla aloitettiin sahanpurun pölypoltto vuonna 2015.

### 3.2.2 Energiankulutus

Meesauunissa tapahtuvaa yhtälön 3.7 kalsinointireaktiota varten uuniin on tuotava energiaa ja reaktion vaatiman suuren lämpötilan vuoksi energia tuodaan polttamalla. Suurin osa eli yli 50 % energiasta kuluu kalsinoinnissa ja loput eli lähes 50 % kuluu meesan kuivaamiseen (~ 20 – 30 %), savukaasuhäviöihin (~ 10 – 20 %) sekä uunin vaipan häviöihin (~ 10 – 20 %). Uuniin syötettävän meesan mukana tulee myös hieman lämpöä ja kalkin mukana poistuu, mutta nämä ovat suuruudeltaan melko lailla toisensa kumoavia, mikäli meesauunissa on tehokas kalkin jäähdytin ja lämpötila kyetään pudottamaan 200 – 300 °C:een. Merkittävimmin energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa meesan kuiva-aineen nostolla, jossa jo 5 %-yksikön kuiva-aineen nosto voi pienentää energian kulutusta lähes 10 %. Yli-ilman muutosten vaikutus energiatehokkuuteen on marginaalinen. (Lundqvist 2009, 42 – 44)

Savukaasuhäviöihin vaikuttaa käytettävä polttoaine, sillä lämmönsiirto savukaasuista on erilainen polttoaineiden termodynaamisten ominaisuuksien eroavaisuuksista johtuen. Termodynaamisten ominaisuuksien ero näkyy adiabaattisessa palamislämpötilassa eli liekin teoreettisen maksimilämpötilan arvossa. Adiabaattinen palamislämpötila on suurin vaikuttava tekijä tehokkuuden ja energian kulutuksen vertailussa ja esimerkiksi liekin pituuden vaikutus on huomattavasti pienempi. (Adams, Aloqaily 2009) Esimerkiksi maakaasun palaessa vapaiden hiilipartikkelien kautta syntyvää liekkisäteilyä ei esiinny ja säteilylämmönsiirto perustuu vain kaasusäteilyyn. Säteilylämmönsiirrossa suurimman osan muodostaa liekkisäteily ja näin ollen esimerkiksi öljyliekin säteilylämmönsiirto on noin 5 – 20 % suurempi kuin maakaasulla. (Suomen Kaasuyhdistys 2014, 21) Maakaasun adiabaattinen palamislämpötila on siis pienempi ja lämpö siirtyy herkemmin meesauunin syöttöpäähän konvektiolämmönsiirtoalueelle ja sitä kautta lämpimämpänä myös savukaasuihin. Taulukossa 3.4 on esitetty eri polttoaineiden adiabaattisia palamislämpötiloja sekä vertailtu polttoaineiden liekin pituutta ja energian kulutusta

esimerkki uunin tapauksessa. Taulukon arvot ovat vertailua varten ja antavat suuntaa polttoaineiden eroista.

**Taulukko 3.4** Polttoaineiden adiabaattisen palamislämpötilan, liekin pituuden ja ominaisenergiankulutuksen vertailu. (Adams, Aloqaily 2009; Isaksson 2007; Lundqvist 2009; Engineering ToolBox, 2019) \* Metanolin lukema vaihtelee paljon polttoaineen laadun vaihtelusta johtuen ja lähdemateriaalissa ei ole spesifioitu onko kyseessä esim. puhdas 100 % metanoli.

<b>Polttoaine</b>	<b>[°C]</b>	<b>[m]</b>	<b>[GJ/tCaO]</b>
Raskas polttoöljy	2210	7,8	5,92
Maakaasu	2050		6,17
Tuotekaasu (kuori 10 % H <sub>2</sub> O)	1870	13,2	6,46
Kuori	2056	14,7	
Puru	2085	14,9	
Ligniini (4 % H <sub>2</sub> O)	2127	14,1	
Tärpätti	2075	7,8	
*Metanoli	2108	7,7	
Pikiöljy	1965	8,0	
Vety	2209		

Energiankulutuksesta vertailukelpoiset tulokset flash-kuivaimella varustetun esimerkkiuunin osalta on vain raskaalle polttoöljylle, maakaasulle ja tuotekaasulle. Maakaasulle ja vedylle ei ole vertailutulosta liekin pituudelle, mutta kaasumaisten polttoaineiden liekki on lähellä nestemäisiä. Purun ja kuoren käytössä energian kulutus riippuu polttoaineen kosteudesta, mutta 10 % kosteudessa energian kulutus on maakaasuun verrattavissa (Valmet 2018 [1]). Myös ligniinin osalta energian kulutus on verrattavissa maakaasuun (Beddows et al. 2015). Tärpätti on korkean adiabaattisen lämpötilan ja lyhyen liekin vuoksi raskaan polttoöljyn ja maakaasun välissä. Pikiöljyn energiankulutus on matalamman adiabaattisen palamislämpötilan vuoksi korkeampi kuin maakaasulla. Vety on taas korkean adiabaattisen lämpötilan ansiosta lähellä raskasta polttoöljyä.

### 3.3 Vierasaineet

Sellutehtaiden prosessia on historian saatossa kehitetty koko ajan suljetumpaan suuntaa hyödyntämällä eri hyödykevirtoja tehokkaammin. Suljetumpi kierto tarkoittaa erilaisten vierasaineiden rikastumista sellutehtaan kemikaalikiertoihin ja pääasiallinen alkulähde on sellutehtaan pääraaka-aine eli puu. Muita vierasaineiden lähteitä ovat tavallisesti ostokemikaalit, valkaisu- ja kloorikemikaalit, prosessivedet sekä kaikki lipeäkiertoon johdetut jätevirrat, kuten bioliete (Tran, Vakkilainen 2016, 4).

Vaikuttavuudeltaan sellutehtaan tärkeimmät vierasaineet ovat kalsium, kalium, kloori, mangaani, alumiini, pii, fosfori ja rauta (Salmenoja et al. 2009, 1). Vierasaineet voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin eli alkaliin liukenemattomiin (Ca, Mg, Mn, Fe, Mn ja Cu), osittain liukeneviin (Al, Si ja P) sekä hyvin liukeneviin (K ja Cl) (Doldán et al. 2011, 1). Tärkein ja selektiivisin vierasaineiden poisto tapahtuu viherlipeäsakan sekä sammuttajan lajitinkairan kautta, jolloin alkaliin liukenemattomat komponentit saadaan pääasiassa poistettua. Hyvin liukenevien kaliumin ja kloorin rikastumista hallitaan perinteisesti soodakattilan sähkösuodinsuolan ulosajolla ja nykyisin on myös olemassa prosesseja, joilla suodinsuolaa saadaan selektiivisesti puhdistettua ja säästetään näin ollen arvokkaita keittokemikaaleja (Salmenoja et al. 2009, 5). Osittain liukenevien ja kalkkikiertoon rikastuvien vierasaineiden hallinta tapahtuu meesan tai meesauunin sähkösuodintuhkan eli meesatuhkan ulosajolla.

Siirryttäessä meesauunilla fossiilisista polttoaineista, kuten maakaasusta ja polttoöljystä uusiutuviin vaihtoehtoihin, tarvitaan myös uutta polttoaineen käsittelyyn sekä polttoon liittyvää tekniikkaa. Tällöin on myös otettava huomioon poltetun kalkin mukaan päätyvät ei-toivotut vierasaineet sekä niiden vaikutukset. Vierasaineiden lisäksi on syytä ottaa huomioon muun muassa mahdolliset palamattomat partikkelit, joita voi syntyä esimerkiksi kiinteiden polttoaineiden poltossa sekä polttoaineen rikki- ja klooripitoisuus.

#### 3.3.1 Ongelmat valkolipeän valmistuksessa

Valkolipeän valmistuksen kannalta merkittävimmät vierasaineet ovat alumiini, magnesium, mangaani, pii, rauta ja fosfori. Magnesiumin ja piin muodostamat yhdisteet aiheuttavat tukkoisuutta valkolipeäsuodattimilla. Magnesiumin, piin, alumiinin ja raudan yhdisteet huonontavat meesan suodatuskykyä meesasuodattimilla eli kuiva-aine voi jäädä

alhaiseksi ja meesa voi näyttää likaiselta ylimääräisen alkalin vuoksi. Magnesiumin, mangaanin, raudan ja fosforin yhdisteet taas aiheuttavat kuollutta kuormaa kalkkikiertoon, mikä rajoittaa meesauunin kapasiteettia sekä lisää energian eli polttoaineen kulutusta. Esimerkiksi 1 m-% fosforipitoisuus tarkoittaa kalsiumfosfaattiyhdisteenä, kuten Harmacin sellutehtaalla pääkomponentiksi todettuna hydroksylapatiittina, 5,4 m-% pitoisuutta (Taylor 2007, 1). Suurin osa näiden vierasaineiden pitoisuuksista tulee tyypillisesti viherlipeän joukossa puusta sekä osa mahdollisesti lipeäkiertoon syötettävästä kemiallisen veden puhdistamon biolietteestä. Viherlipeän sakanpoisto selkeyttimellä tai viherlipeäsuotella on siis tärkeässä roolissa poistamassa alkaliin liukenemattomia vierasaineita ja mikäli se onnistuu, niin suurimmilta ongelmilta vältytään. (Salmenoja et al. 2009, 2; Tran 2015, 8 – 10)

Alkaliin osittain liukeneva fosfori rikastuu kalkkikiertoon erittäin tehokkaasti ja pääasiassa fosfori on siis peräisin sellunkeiton raaka-aineesta, puusta. Mikäli puu on erittäin fosforipitoista se lisää kalkkikierron avaamisen tarvetta radikaalisti eli toisin sanoen meesan tai meesauunin sähkösuodintuhkan kalkkikierron poistettavaa määrää. Taulukossa 3.5 on vertailtu samaan aikaan otettujen meesa- ja meesatuhkanäytteen vierasainepitoisuuksia Stora Enson Imatran tehtaiden meesauuni 4:lta ja voidaan huomata, että meesatuhka sisältää noin 1,7 kertaisesti fosforia. Muut vierasainepitoisuudet ovat myös korkeampia ja etuna on lisäksi kuiva-aine, sillä meesatuhkalla kuljetukseen ei tule lainkaan vettä. Huomattavasti pienemmällä kalsiumin poistomäärällä saadaan siis poistettua sama määrä fosforia, joten ostokalkin määrä ja kustannukset myös laskevat.

Valkolipeäsuodattimien tukkeutumista voi aiheuttaa myös palamattomat hiilipartikkelit, joita on löydetty Elk Fallsin tehtaan valkolipeäsuodattimen sukkien tutkimuksissa (Taylor 2007, 3). Palamattomat hiilipartikkelit ovat tyypillisesti peräisin soodakattilalta, josta ne viherlipeän mukana kulkeutuvat kaustistamolle. Hiilipartikkelin tiheys on erittäin pieni ja partikkeli on pinta-alaltaan suurehko, mutta toisaalta ohut, joten erityisesti viherlipeäselkeyttämiä käytävillä tehtailla hiilipartikkelit eivät välttämättä poistu viherlipeäsakan mukana. Palamattomat hiilipartikkelit voivat päätyä kaustistamolle myös meesauunin kautta erityisesti pölypoltossa, mutta mahdollisesti myös kaasutuksessa. Kalkin mukana tulevien ei-toivottujen partikkelien poistuminen voi tapahtua ainoastaan

sammuttajan lajitinkairan kautta, mutta sammuttimessa kalkkimaidolla ei ole selkeytymismahdollisuutta. Viherlipeän tai kalkin mukana tulevat hiilipartikkelit jatkavat siis mahdollisesti matkaa aina valkolipeäsuodattimille, joissa ne juuttuvat suodatinkankaaseen. (Tran 2019)

**Taulukko 3.5** Meesasuoattimen jälkeisen meesan ja meesauunin sähkösuodintuhkan eli meesatuhkan vierasainepitoisuuksien vertailu.

		<b>Meesa</b>	<b>Meesatuhka</b>
Kuiva-aine	[%]	77,4	99,9
Al	[mg/kg]	120	190
Ca	[mg/kg]	402000	395300
Cd	[mg/kg]	0,58	1,1
Fe	[mg/kg]	77	140
K	[mg/kg]	180	180
Mg	[mg/kg]	3980	5860
Mn	[mg/kg]	300	430
Na	[mg/kg]	9170	8750
P	[mg/kg]	9100	15500
Si	[mg/kg]	520	780
Zn	[mg/kg]	2,9	19

Vierasaineet voivat myös aiheuttaa ongelmia meesauunin muurauksen kestävydessä. Meesauunin tulenkestävinä tiilinä käytetään tyypillisesti alumiinisilikaattitiiliä. Meesa tai poltettu kalkki eivät itsessään reagoi tiilien sisältämien yhdisteiden kanssa, mutta epäpuhtaudet eli vierasaineiden muodostamat yhdisteet, erityisesti natriumyhdisteet, voivat reagoida tiilien silikaattioksidin ( $\text{SiO}_2$ ) kanssa ja aiheuttaa muuravaurioita. (Tran 2007, 8)

### 3.3.2 Rikkiyhdisteet meesauunissa

Sellun keittokemikaalien kannalta tärkeä rikki ei ole varsinaisesti siis kemikaalikerrossa vierasaine, mutta meesauunin polttoaineiden kautta tullessa sen vaikutukset eivät ole toivottavia. Meesauuneissa on tyypillisesti poltettu rikkipitoista polttoainetta, kuten raskasta polttoöljyä ja metanolia sekä mahdollisesti myös esimerkiksi laimeita ja väkeviä hajukaasuja. Uusiutuvista polttoainevaihtoehdoista erityisesti ligniini sisältää merkittäviä määriä rikkiä (1 – 3 %). Palaessaan rikki muodostaa pääasiassa hapen kanssa



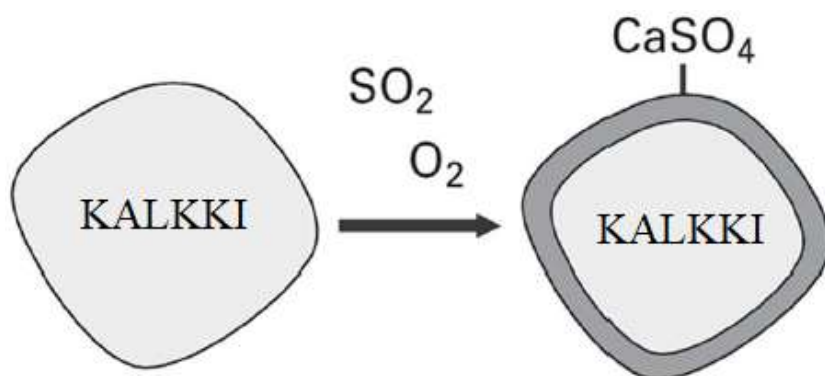
rikkidioksidia sekä epätäydellisessä palamisessa myös muita rikkiyhdisteitä, kuten rikkivetyä ja muita haisevia TRS-yhdisteitä. (Francey, Tran 2012, 32)



Kalkkia käytetään tyypillisesti muun muassa leijupetikattiloissa rikkidioksidin sitomiseen ja meesauunissa kalkki toimiikin vastaavalla tavalla. Meesauunin polttoaineen sisältämästä rikistä suurin osa muodostaa poltetun kalkin, rikkidioksidin ja ilman kanssa kalsiumsulfaattia. (Francey, Tran 2012, 32)

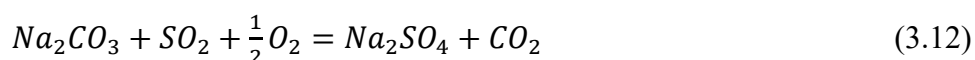
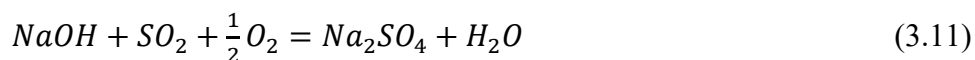


Reaktiota ei juurikaan tapahdu alle 900 °C lämpötilassa, mutta se kiihtyy huomattavasti 900 – 1200 °C lämpötiloissa saavuttaen huipun noin 1100 °C lämpötilassa. Normaali kalsinointi lämpötila on noin 800 °C, mutta kalkkia kuumennetaan tyypillisesti vielä lisää, jotta pölyävän kalkin sijaan kalkki sintraantuu palloiksi. Sintraantuminen johtuu pääasiassa poltetun kalkin uudelleen karbonoitumisesta, mutta myös korkeassa lämpötilassa eli polttopäässä tapahtuvasta sintraantumisesta. Rikkipitoisia polttoaineita polttaessa sitraantuminen johtuu osittain myös yhtälön 3.10 mukaisesti muodostuvasta kuvan 3.7 tapaisesta kalsiumsulfaattikerroksesta (Tran, 2009). Meesauunin kuumassa päässä sijaitsevilla renkailla havaitaan tyypillisesti korkeita rikkipitoisuuksia juuri tämän sulfatointireaktion lämpötila-alueen takia, vaikka rikki ei olisikaan pääsyöllinen renkaan muodostumiseen. (Francey, Tran 2012, 33)

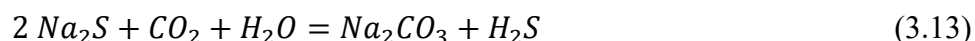


**Kuva 3.7** Rikkidioksidin reaktio kalsiumsulfaatiksi. (Francey, Tran 2012, 33)

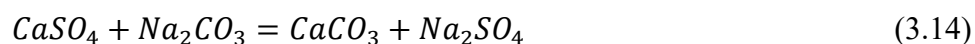
Kalsiumsulfaatin muodostama kerros estää rikkidioksidin sitoutumista pallon sisällä olevaan kalkkiin ja näin ollen poltettu kalkki ei välttämättä sido kaikkea rikkidioksidia uunin kuumassa päässä, vaikka määrällisesti kalkkia olisi reaktion tapahtumiseen riittävästi. Rikkidioksidi voi kuitenkin sitoutua vielä uunin kylmässä päässä. Meesan pesutuloksesta riippuen uuniin pääsee myös pieni määrä jäännösalkalia eli natriumyhdisteitä, kuten natriumhydroksidia (NaOH), -sulfidia (Na<sub>2</sub>S), -karbonaattia (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), -sulfaattia (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) sekä silikaattiyhdisteitä. Sulfatointi voi muodostua näistä yhdisteistä ainoastaan NaOH ja Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tapauksessa suoraan rikkidioksidin ja ilman vaikutuksesta. (Francey, Tran 2012, 33)



Sulfatointi voi myös pienessä määrin muodostua Na<sub>2</sub>S tapauksessa, jolloin sulfidi yhdisteen rikki vapautuu ja muodostaa vesihöyryn kanssa rikkivetyä (H<sub>2</sub>S) sekä sitoo tämän jälkeen hiilidioksidin muodostaen natriumkarbonaattia. Jäännösalkali aiheuttaa siis natriumsulfidin vuoksi myös rikkivety päästöjä ja natriumkarbonaatti voi reagoida yhtälön 3.12 mukaisesti edelleen natriumsulfaatiksi meesauunin kuumassa päässä. Jäännösalkalin pienestä määrästä huolimatta natriumyhdisteet voivat sitoa jopa 5 kg rikkiä tonnia poltettua kalkkia kohden. (Francey, Tran 2012, 33)



Kalsiumsulfaatti ja natriumsulfaatti kulkeutuvat kalkin mukana sammuttajaan, jossa ne eivät siis reagoi kalsiumoksidin eli poltetun kalkin tavoin viherlipeän kanssa. Kalkin aktiivisuus siis putoaa, mikä tarkoittaa siis meesauunin kapasiteetin rajoittumista. Kalsiumsulfaatti reagoi sammuttajassa viherlipeän sisältämän natriumkarbonaatin kanssa ja muodostaa meesaa ja natriumsulfaattia (Grace, Tran 2009, 20).



Sammuttajalla kalkkiin sitoutunut rikki päätyy siis kalkkimaitoon natriumsulfaatiksi sekä mahdollisesti pienissä määrin natriumkarbonaatiksi yhtälön 3.13 mukaisesti. Natriumkarbonaatti osallistuu kaustisointireaktioon, mutta natriumsulfaatti jää liukoisena

aineena valkolipeäsuotimilla valkolipeän eikä meesan mukaan ja siirtyy tällöin kuolleena kuormana mukaan lipeäkiertoon (Grace, Tran 2009, 20). Sulfaatti, jota toki reduktioasteesta riippuen on valkolipeässä jo valmiiksi, kiertää keittämön ja haihduttamon läpi ennen mahdollisuutta pelkistyä sulfidiksi vasta soodakattilassa. Lipeäkiertoon päätyessä ongelmaksi tulee lisäksi rikin määrän lisääntyminen eli rikki ja natriumtaseen sekä sulfiditeetin hallinta. Nykyaikaisilla sellutehtailla kehittyneiden hajukaasujen keräilyn ja rikkipäästöjen hallinnan vuoksi rikkiä poistuu kierrosta tyypillisesti jo valmiiksi vähemmän kuin natriumia. Sulfiditeetin hallinnassa joudutaan siis mahdollisesti lisäämään ostokemikaalin eli natriumhydroksidin määrää.

## **4 KIINTEIDEN BIOPOLTTOAINEIDEN KÄSITTELY JA POLTTO**

Meesauuneissa on Suomessa poltettu tyypillisesti nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita, jotka ovat käsittelyn ja polton kannalta huomattavasti yksinkertaisempia kuin kiinteät polttoaineet. Kiinteiden puuperäisten biopolttoaineiden poltossa on otettava huomioon esimerkiksi polttoaineen vastaanottoon ja käsittelyyn liittyvät seikat sekä ominaisuudet, kuten vieraisaineet ja biopolttoaineille tyypillinen suuri kosteus. Polttoaineen ominaisuudet, investoinnin kustannusrakenne sekä takaisinmaksuaika määrittävät voidaanko kiinteä biopolttoaine polttaa pölypolttona vai onko parempi tapa kaasuttaa se tuotekaasuksi.

Tässä kappaleessa keskitytään sahanpuruun, kuoreen ja ligniiniin, joita käytettäisiin meesauunin pääpolttoaineena. Suunniteltaessa siirtymistä uuteen polttoaineeseen on tärkeänä parametrina polttoaineen kulutus, joka luo raja-arvoja eri vaihtoehdoille sekä on tietysti yksi tärkeimmistä parametreista investoinnin kannattavuuden sekä riskien määrittämisessä. Polttoaineen kulutus määräytyy meesauunin määrittelemän poltintehon perusteella, joten prosessit on käyty läpi poltosta vaiheittain aina polttoaineen vastaanottoon ja hankintaan asti.

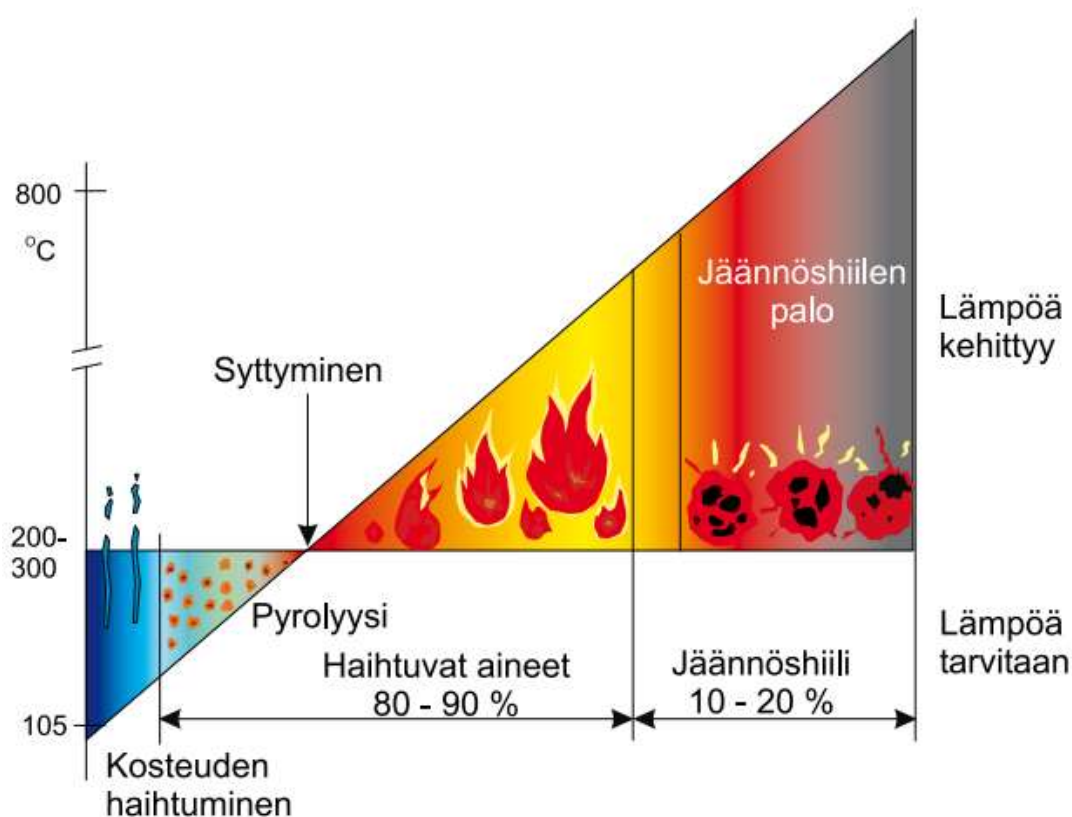
### **4.1 Pölypoltto**

Kappaleen palamiseen ja polttoaineen kulutukseen liittyvät laskut pätevät suoraan esimerkiksi jauhetun sahanpurun ja kuoren tai kuivatun ligniiniin polttoon meesauunissa. Laskut ovat pitkälti sovellettavissa myös kaasumaisten ja nestemäisten polttoaineiden tapauksiin ja suurimmat erot tulevat kiinteiden polttoaineiden olomuodon sekä kosteuden kautta.

#### **4.1.1 Palamislaskut**

Kiinteitä biopohjaisia polttoaineita poltettaessa on otettava huomioon, että polttoaineet sisältävä käsittelemättömänä huomattavan määrän vettä. Kosteus voi olla jopa yli puolet polttoaineen painosta ja kuten kuvasta 4.1 huomataan, kosteus on ensin haihdutettava pois ennen polttoaineen syttymistä. Kosteuden haihtuessa alkaa pyrolyysivaihe, jolloin

haihtuvat aineet, kuten hiilivedyt alkavat myös haihtua ja syttyvät kosteuden poistuttua. Puulla pyrolyysissä haihtuvien komponenttien osuus on noin 80 % massasta ja tämä vastaa noin 50 % lämpöarvosta. Haihtuvien jälkeen jäljelle jää vielä pääasiassa hiiltä sisältävä jäännöshiili, jonka massa on noin 20 %, mutta lämpöarvo jopa 50 %. (Raiko et al 2002, 193)



**Kuva 4.1** Kiinteän biopolttoaineen palaminen ja lämmönkehitys. (Alakangas 1992)

Poltettavan polttoaineen sisältö ilmoitetaan hiilen (C), vedyn (H<sub>2</sub>), typen (N<sub>2</sub>), rikin (S), hapen (O<sub>2</sub>), kosteuden (H<sub>2</sub>O) ja tuhkan määrien perusteella, jolloin palamislaskuilla voidaan määrittää teoreettinen savukaasujen sisältö polttoainekiloa kohti (Raiko et al. 2002, 37). Palamislaskut toimivat myös nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden tapauksessa. Pölypoltossa on otettava huomioon, että kiinteä polttoaine käy läpi käsittelyn ennen polttoa ja polttoaineen kosteus pienenee murskauksen ja kuivauksen johdosta. Polttoaineen sisältämän hiilen, vedyn ja rikin palamisreaktiot kuluttavat polttoaineen sekä palamisilman sisältämää happea ja luovuttavat eksotermisina reaktioina energiaa, joka voidaan ilmoittaa entalpian muutoksena ( $\Delta H_T$ ) paineen ja lämpötilan avulla (Raiko et al.

2002, 32, 37). Entalpiat on ilmoitettu nyt 100 *kPa*:n paineessa ja 298,15 *K*:n lämpötilassa (Raiko et al. 2002, 50).



Polttoaineen tarvitsema stökiometrinen ilmamäärä kuvaa teoreettista tarvittavaa ilmamäärää polttoaineen hiilen, vedyn ja rikin hapettamiseen. Polttoilman määrää kuvaa ilmakerroin  $\lambda$  (lambda) ja stökiometrisessä palamisessa se on yksi. Poltossa käytetään kuitenkin aina hieman yli-ilmaa, koska todellisessa palamisessa palamisilma ja polttoaine eivät sekoitu teoreettisella ilmamäärällä niin hyvin, että palamattomilta vältyttäisiin. (Raiko et al. 2002, 37 – 39) Taulukossa 4.1 on esitetty esimerkkinä polttoon tulevan kuivatun sahanpurun koostumus ja taulukossa 4.2 polttoaineen palamistaulukko. Yksinkertaistukseksi rikki voidaan olettaa palavan kokonaisuudessaan rikkidioksidiksi ja typpi oletetaan pysyvän inerttinä eli NO<sub>x</sub>:n muodostusta ei huomioida.

**Taulukko 4.1** Polttoon tulevan sahanpurun koostumus.

	m-%	m[g]	M[g/mol]	n[mol]
C	51,28 %	476,90	12,01	39,71
H <sub>2</sub>	5,92 %	55,06	2,02	27,31
N <sub>2</sub>	0,09 %	0,84	28,01	0,03
S	0,00 %	0,03	32,06	0,00
O <sub>2</sub>	42,47 %	394,94	32,00	12,34
H <sub>2</sub> O	7,00 %	70,00	18,02	3,89
Tuhka	0,24 %	2,23		
Yhteensä		1000		

**Taulukko 4.2** Sahanpurun palamistaulukko.

Sahanpuru	n[mol]	O <sub>2</sub> -tarve n[mol]	Savukaasujen koostumus [mol]					
			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
C	39,71	39,71	39,71					
H <sub>2</sub>	27,31	13,66		27,31				
N <sub>2</sub>	0,03						0,03	
S	0,00	0,00			0,00			
O <sub>2</sub>	12,34	-12,34						
H <sub>2</sub> O	3,89			3,89				
Yhteensä		41,02						
Typeä ilmasta: 3,77 * kok O <sub>2</sub> =							154,65	
Yli-ilman happi: (λ - 1) * kok O <sub>2</sub> =								6,15
Yli-ilman typpi: (λ - 1) * kok N <sub>2</sub> =							23,20	
Yhteensä			39,71	31,20	0,00	177,88	6,15	

Savukaasujen koostumus saadaan määritettyä palamislaskujen avulla ainemääränä ja taulukossa 4.3 osuudet on myös muutettu moolimassojen avulla massoiksi sekä standardi moolitilavuuksien avulla normaalitilavuuksiksi. Meesauunin operoinnin kannalta jäännöshappi pyritään yleensä pitämään noin 2 – 3 % tasolla, joten esimerkkitapauksessa valittu yli-ilman määrä ( $\lambda = 1,15$ ) on tälle polttoaineelle sopiva (Tran 2007, 7). Savukaasujen virtaukset saadaan selville kertomalla luvut polttoaineen massavirralla.

**Taulukko 4.3** Savukaasujen koostumus ainemäärinä, massoina ja normaalitilavuuksina.

	mol/kg <sub>pa</sub>	mol-%	kg/kg <sub>pa</sub>	m-%	Nm <sup>3</sup> /kmol	Nm <sup>3</sup> /kg pa	Nm <sup>3</sup> -%
O <sub>2</sub>	6,2	2,4 %	0,20	2,6 %	22,39	0,14	2,4 %
N <sub>2</sub> polttoaine	0,0	0,0 %	0,00	0,0 %	22,40	0,00	0,0 %
N <sub>2</sub> ilma	177,8	69,8 %	4,98	66,5 %	22,40	3,98	69,8 %
CO <sub>2</sub>	39,7	15,6 %	1,75	23,3 %	22,26	0,88	15,5 %
SO <sub>2</sub>	0,0	0,0 %	0,00	0,0 %	21,89	0,00	0,0 %
H <sub>2</sub> O	31,2	12,2 %	0,56	7,5 %	22,40	0,70	12,2 %
Yhteensä	254,9	100,0 %	7,49	100,0 %		5,70	100,0 %

Taulukon 4.2 palamislaskujen perusteella saadaan määritettyä tarvittava hapen määrä sekä ilman mukana tuleva typen määrä. Hapen ja typen määrät voidaan muuttaa moolimassojen avulla massoiksi ja moolitilavuuksilla normaalitilavuuksiksi. Taulukon

4.4 perusteella saadaan tällöin palamisilman määrä polttoainekiloa kohti ja polttoaineen massavirran avulla ilmamäärä voidaan muuttaa massa- tai tilavuusvirraksi.

**Taulukko 4.4** Palamisilman määrä.

	mol/kg <sub>pa</sub>	g/mol	kg/kg <sub>pa</sub>	Nm <sup>3</sup> /kmol	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>
O <sub>2</sub>	47,2	32,00	1,51	22,39	1,06
N <sub>2</sub>	177,8	28,01	4,98	22,40	3,98
Yhteensä	225,0		6,49		5,04

Palamisilmavirtaus kertoo primääri- ja sekundääri-ilmojen yhteismäärän, josta primääri-ilman osuus on tyypillisesti vain 5 – 25 %. Primääri-ilma syötetään polttimen sisään ja puhaltimen tehtävänä onkin pitää polttimen liekki stabiilina ja muodoltaan sopivana. (Adams 1999, 4) Pölypoltossa polttoaine puhalletaan ilman tai typen avulla polttimelle. Ligniinin tapauksessa syttymisherkkyuden vuoksi pneumaattinen polttoaineen kuljetus tapahtuu tyypellä, kun taas perinteisen biomassan eli kuoren tai purun tapauksessa noin 10 % kokonaisilmasta tulee polttimelle siirtoilmana ja toinen noin 10 % erillisenä primääri-ilmana (Adams, Aloqaily 2009, 20). Polttimen kokonaisilmamäärä eli palamisprosessin primääri-ilma on tällöin noin 20 % ja loput palamisilmasta tuodaan sekundääri-ilmana.

Meesauunin savukaasupuhallin säätää sekundääri-ilman määrä imemällä alipaineella palamisilmaa kalkinjäähdyttimen läpi, jolloin kalkki lämmittää palamisilmaa ja samalla jäähtyy ennen murskalle ja kuljettimille päätymistä. Savukaasupuhaltimella säädetään lämmön siirtymistä meesauunissa sekä sopivaa jäännöshappea eli yli-ilman määrää, jolloin varmistutaan palamisen onnistumisesta (Adams 1999, 4). Palamisesta kertoo myös savukaasun hiilimonoksidipitoisuus, jonka kasvaessa yli-ilmaa on liian vähän täydelliseen palamiseen. Lisäämällä savukaasupuhaltimen vetoa eli sekundääri-ilman määrää, saadaan polttoaine ja ilma sekoittumaan paremmin ja hiili saadaan hapettumaan paremmin hiilidioksidiksi.

#### 4.1.2 Polttoaineen kulutus ja poltto

Polttoaineen tärkeimpänä parametrina voidaan pitää lämpöarvoa, joka kuvaa poltettaessa vapautuvaa lämpöenergiaa. Yhtälöistä 4.1 – 4.3 huomattiin, että hiili, vety ja rikki luovuttavat palaessaan energiaa, mutta rikin määrän ollessa tyypillisesti marginaalinen, polttoaineen kemiallinen energia vapautuu pääasiassa hiilen ja vedyn palamisesta.



Kaasumaisten ja nestemäisten polttoaineiden lämpöarvo voidaan tyypillisesti laskea suoraan reaktioentalpioiden mukaan, mutta kiinteiden polttoaineiden sisältämä suuri happimäärä ei mahdollista tarkkaa määrittystä alkuainekoostumuksen perusteella. Happi voi muodostaa erilaisia yhdisteitä palavien alkuaineiden kanssa, joten tarkimmin kiinteän polttoaineen lämpöarvon määrittäminen tapahtuu pommikalorimetrillä. Eri polttoaineille on myös olemassa kirjallisuudessa korrelaatioita, mutta niiden tulokset ovat usein suuntaa antavia. (Raiko et al. 52)

Pommikalorimetrin lämpöarvon mittaus suoritetaan vakio-tilavuudessa huoneen lämmössä, joten saatavassa tuloksessa vesi on nestemäisessä olomuodossa. Saatua lämpöarvoa kutsutaan kalorimetriseksi lämpöarvoksi (higher heating value). Polttamisen yhteydessä lämpöarvolle käytännöllisempi muoto on kuitenkin tehollinen lämpöarvo (lower heating value), jolloin vesihöyry oletetaan pysyvän kaasumaisessa olomuodossaan. Tehollinen lämpöarvo voidaan määrittää kalorimetrisestä lämpöarvosta, kun tunnetaan polttoaineen vetypitoisuus. (Raiko et al. 2002, 52 – 53)

$$LHV = HHV - 21,96w_{H_2} \quad (4.4)$$

<i>LHV</i>	tehollinen lämpöarvo	[MJ/kg]
<i>HHV</i>	kalorimetrinen lämpöarvo	[MJ/kg]
$w_{H_2}$	vetypitoisuus	[-]

Kiinteän polttoaineen tehollinen lämpöarvo voidaan ilmoittaa viitaten kuiva-aineeseen tai saapumistilassa eli kosteana olevaan polttoaineeseen. Polttoaineen kosteus on pois paitsi palavan polttoaineen massasta, mutta haihduttaminen vaatii myös energiaa ja kostean polttoaineen lämpöarvo voidaankin määrittää kosteuspitoisuuden ja veden höyrystymislämmön avulla (Raiko et al. 2002, 53).

$$LHV_{ar} = LHV_{mf}(1 - w_v) - w_v l \quad (4.5)$$

$LHV_{ar}$	tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	[MJ/kg]
$LHV_{mf}$	tehollinen lämpöarvo kuiva polttoaine	[MJ/kg]
$w_{H_2O}$	kosteuspitoisuus	[-]
$l$	veden höyrystymislämpö referenssitilassa ( $T_{25} \text{ °C} = 2,443$ )	[MJ/kg]

Kostean polttoaineen lämpöarvo on siis pienempi kuin kuivan, joten polttoainetta tarvitaan suurempi määrä, jotta saavutetaan sama poltinteho. Polttoaineen poltosta vapautuva teho voidaan määrittää siis polttoaineen massavirran ja tehollisen lämpöarvon avulla. Polttoaineen kosteus lisää savukaasumäärää ja meesauunin tapauksessa lisääntyvä savukaasun tilavuusvirta aiheuttaa tarpeen suurentaa uunin halkaisijaa, mikäli virtausnopeus sekä lämmönsiirto halutaan pitää vakioina. Olemassa olevan uunin tapauksessa tämä tarkoittaa, että kosteus pienentää meesauunin kapasiteettia, mikä johtaa siihen, että polttoaineen kuivaus on välttämätöntä. Näin ollen polttoaineen lämpöarvo on määritettävä yhtälöllä 4.5 polttoon tulevan polttoaineen kosteudessa.

$$P_{mu} = q_{m,pa} LHV_{ab} \quad (4.6)$$

$P_{mu}$	meesauunin polttoteho	[MW]
$q_{m,pa}$	polttoaineen massavirta	[kg/s]
$LHV_{ab}$	tehollinen lämpöarvo polttotilassa	[MJ/kg]

Kun tunnetaan käytettävän polttoaineen lämpöarvo, voidaan ratkaista tarvittava polttoaineen massavirta yhtälöiden 3.8 ja 4.6 avulla. Meesauunin kapasiteetti on nyt 300 tCaO/d ja polttoaine on taulukossa 4.1 esitettyssä 7 % kosteudessa. Energian ominaiskulutukseksi oletetaan 6,20 GJ/tCaO ja polttoaineen tehollinen lämpöarvo on polttotilassa yhtälöllä 4.5 ratkaistuna 17,75 MJ/kg<sub>pa</sub>, kun kuivan polttoaineen teholliseksi lämpöarvoksi taulukosta 3.2 saadaan 19,27 MJ/kg<sub>pa</sub>.

$$P_{mu} = C_{mu} E_{mu} = 300 \text{ tCaO/d} \cdot 6 \text{ 200 MJ/tCaO} = 21,5 \text{ MW}$$

$$q_{m,pa} = \frac{P_{mu}}{LHV_{ab}} = \frac{21,5 \text{ MW}}{17,75 \text{ MJ/kg}_{pa}} = 1,2 \text{ kg}_{pa}/s = 4,4 \text{ t}_{pa}/h$$

Nimellispolttotehon perusteella voidaan määrittää polttoaineen vuotuinen energiankulutus, kun arvioidaan meesauunin huipunkäyttöaika. Huipunkäyttöaika kuvaa siis vuotuisen energiankulutuksen suhdetta nimellistehoon eli käyttöastetta.

$$t_h = \frac{E_a}{P} = \frac{m_a}{q_m} \quad (4.7)$$

$t_h$	huipunkäyttöaika	[h/a]
$E_a$	vuotuinen energiankulutus	[MWh]
$P$	nimellisteho	[MW]
$m_a$	vuotuinen määrä	[t/a]
$q_m$	massavirta	[kg/s]

Arvioidaan meesauunin huipunkäyttöajaksi 8400 h/a ja ratkaistaan vuotuinen energiankulutus yhtälöllä 4.7.

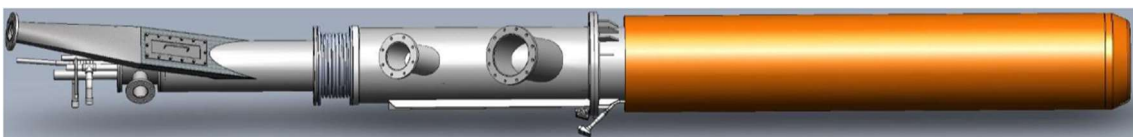
$$E_{a,mu} = 21,5 \text{ MW} \cdot 8\,400 \text{ h/a} = 180,6 \text{ GWh/a} = 650\,200 \text{ GJ/a}$$

Massavirta on purun ja kuoren tapauksessa kuivauksen ja murskauksen jälkeen polttoon tulevan polttoaineen määrä. Polttoaineen vuosittaisen kulutuksen määrää on käsitelty kuivauksen yhteydessä, sillä kostean polttoaineen määrä antaa todelliset määrät polttoaineen hankintaa varten. Massavirta kuvaa siis tässä vaiheessa polttoaineen kulutusta mitoitustuotannolla ja antaa näin ollen suunnitteluparametrit esimerkiksi meesauunin polttimelle. Operoinnin kannalta tärkeää on polttoaineen tasainen massavirta eli syöttö polttimelle. Massavirran mittauksessa voidaan käyttää esimerkiksi kuvan 4.2 tapaista gravimetristä mittausta, jossa roottorin pyöriessä polttoaine täyttää lokerot, joista massavirta mitataan gravitaatioon perustuen (Valmet 2014, 7).



**Kuva 4.2** Gravimetrinen polttoaineen massavirtamittaus. (Valmet 2014, 9)

Kiinteitä polttoaineita käytettäessä kuvan 4.2 tapainen poltin poikkeaa tavanomaisista nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden polttimista. Kiinteiden partikkelien tapauksessa polttoaineen ja ilman sekoittuminen korostuu ja poltin on suunniteltava niin, että saadaan aikaan sopivan muotoinen liekki sekä sopivat palamisolosuhteet. Polttimessa on oltava myös mahdollisuus tukipolttoaineen tai -polttoaineiden käyttöön, joita ovat esimerkiksi öljy, maakaasu, metanoli, tärpätti tai pikiöljy.



**Kuva 4.3** Tyypillinen mallinnus pölypolttimesta, jossa suorakulmainen polttoainekanava, primääri-ilmakanava sekä öljypoltin. (Valmet 2014, 10)

Polttimen liekin pääsäätö tehdään primääri-ilman määrän, paineen sekä aksiaali- ja radiaali-ilman jaolla. Aksiaali-ilma tuo palamisilmaa polttoaineen suuntaisesti ja radiaali-ilma luo pyörrettä, joka sekoittaa ilma-polttoaineseosta. Erilaisilla primääri-ilman säädöillä voidaan liekki säätää sopivaksi eri polttoaineyhdistelmiä käytettäessä. Polttimen sisään voidaan myös tehdä kanavat, joiden avulla siirtoilman ja polttoaineen seos saadaan kääntymään ja seos saadaan pyörreliikkeeseen sekä sekoittumaan entistä paremmin primääri-ilman kanssa. Liekin stabiilisuuteen ja muotoon vaikuttaa säätöjen lisäksi merkittävästi polttoaineen kosteus. Kosteuden lisääntyessä adiabaattinen palamislämpötila laskee ja lämpötilaprofiili siirtyy enemmän meesauunin perälle, jonka johdosta polttoaineen kulutus sekä savukaasumäärä lisääntyvät (Valmet 2014, 7). Liekin stabiliteetti pysyy hyvänä kosteuden ollessa noin 8 %, mutta mikäli kosteus nousee noin 11 – 13 % on apuna käytettävä tukipolttoainetta (Valmet 2014, 11).

## **4.2 Kaasutus ja tuotekaasun poltto**

Kuoren tai purun pölypolton vaihtoehtona on kaasutus, jolloin meesauunin polttoaineena toimii kaasutusprosessissa syntyvä tuotekaasu. Biopolttoaineen kaasutuksen etuna on muun muassa, että polttoaineen sisältämä tuhka eli palamattomat vierasaineet jäävät osittain prossista poistuvan tuhkan joukkoon ja se soveltuu näin ollen mainiosta esim. paljon tuhkaa sisältävälle kuorelle.

### **4.2.1 Kaasutus- ja palamislaskut**

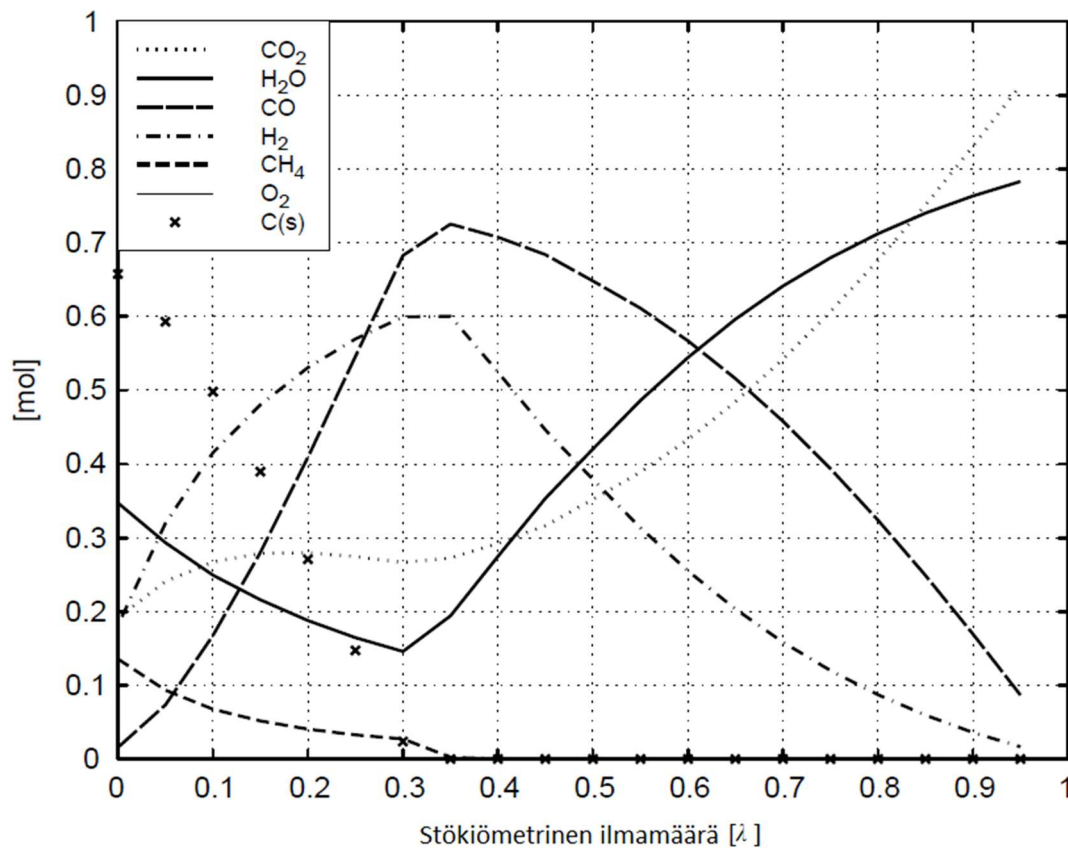
Tyypillisiin kaasutusprosessin vaiheisiin kuuluu palamisen tapaan kuivuminen ja pyrolyysi, mutta erona on, että kaasumaiset, kiinteät ja nestemäiset pyrolyysituotteet alkavatkin reagoida keskenään sekä kaasutukseen käytettävän kaasun kanssa ja palavat osittain sekä muodostavat tuotekaasun sisältämiä komponentteja. Kaasutusprosessissa tapahtuva osittainen palaminen tuottaa tarvittavan lämmön prosessin tarpeisiin eli polttoaineen kuivamiseen, pyrolyysiin sekä kaasutuksen endotermisiin reaktioihin. (Basu 2013, 201) Tuotekaasun koostumuksen määrittäminen on huomattavasti palamista haastavampaa, sillä kaasutuksessa tapahtuu lukemattomia ekso- sekä endotermisiä reaktioita, joista muodostuu meesauunilla poltettava tuotekaasu.

Kaasutuksessa voidaan käyttää väliaineena happea, höyryä tai ilmaa. Hapella saatavan tuotekaasun lämpöarvo on paras, mutta hapen valmistus on energiasäästöistä sekä kallista, joten tyypillisesti kaasutukseen käytetään höyryä ja/tai ilmaa. Höyryllä tuotekaasun lämpöarvo olisi parempi, mutta mikäli tuotekaasun vetytitoisuuden maksimointi ei ole tarpeen, niin ilman käyttö pienentää investointikustannuksia sekä höyryn tuottamiseen käytettävä energia säästyy. (Basu 2013, 200; 264; 275) Meesauunin tapauksessa keskitytään sovelluksiin, joissa kaasutukseen käytetään ilmaa.

Biomassasta kaasutetun tuotekaasun poltto meesauunissa perustuu pääasiassa vedyn ja hiilimonoksidin palamiseen, mutta tuotekaasu sisältää näiden lisäksi myös metaania, vesihöyryä, hiilidioksidia, alifaattisia hiilivetyjä, bentseeniä, toluenia sekä pieniä määriä ammoniakkia, vetykloridia ja rikkivetyä. (Basu 2013, 376) Edellä mainittujen yhdisteistä tyypillisimmille on esitetty muodostumisentalpioiden avulla määritetyt reaktioentalpiat (Raiko et al. 2002, 50).

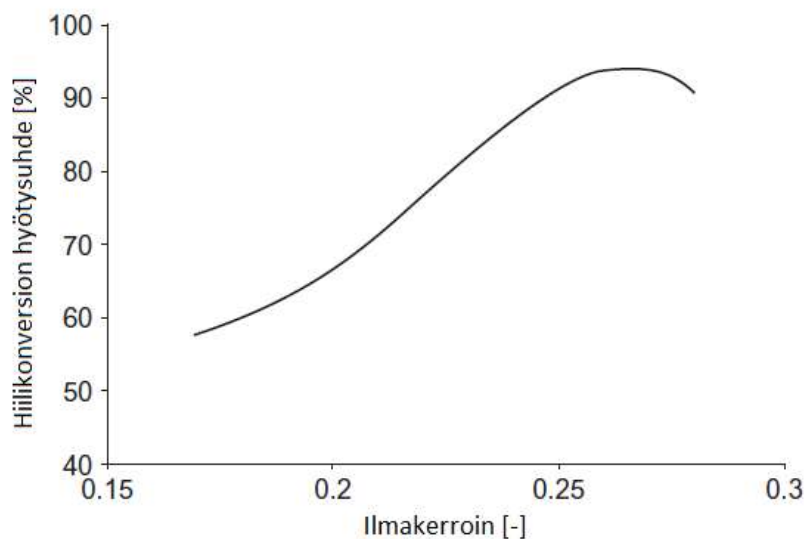


Tuotekaasun koostumukseen vaikuttaa suurimpana tekijänä käytettävän kaasutusilman määrä, jonka funktiona voidaan esittää laskennallinen koostumus. Kuten kuvasta 4.4 huomataan, kaasutuksessa ilmakertoimen on oltava huomattavasti alle yhden, jotta poistuva savukaasu sisältää mahdollisimman paljon tuotekaasulle tärkeää vetyä ja hiilimonoksidia eikä palamistuotteita eli vesihöyryä ja hiilidioksidia.



**Kuva 4.4** Laskennallinen tasapainokoostumus puun adiabaattisessa konversiossa (ilma 1 bar ja polttoaineen kosteus  $w_v = 6\%$ ). (Morf 2001, 17)

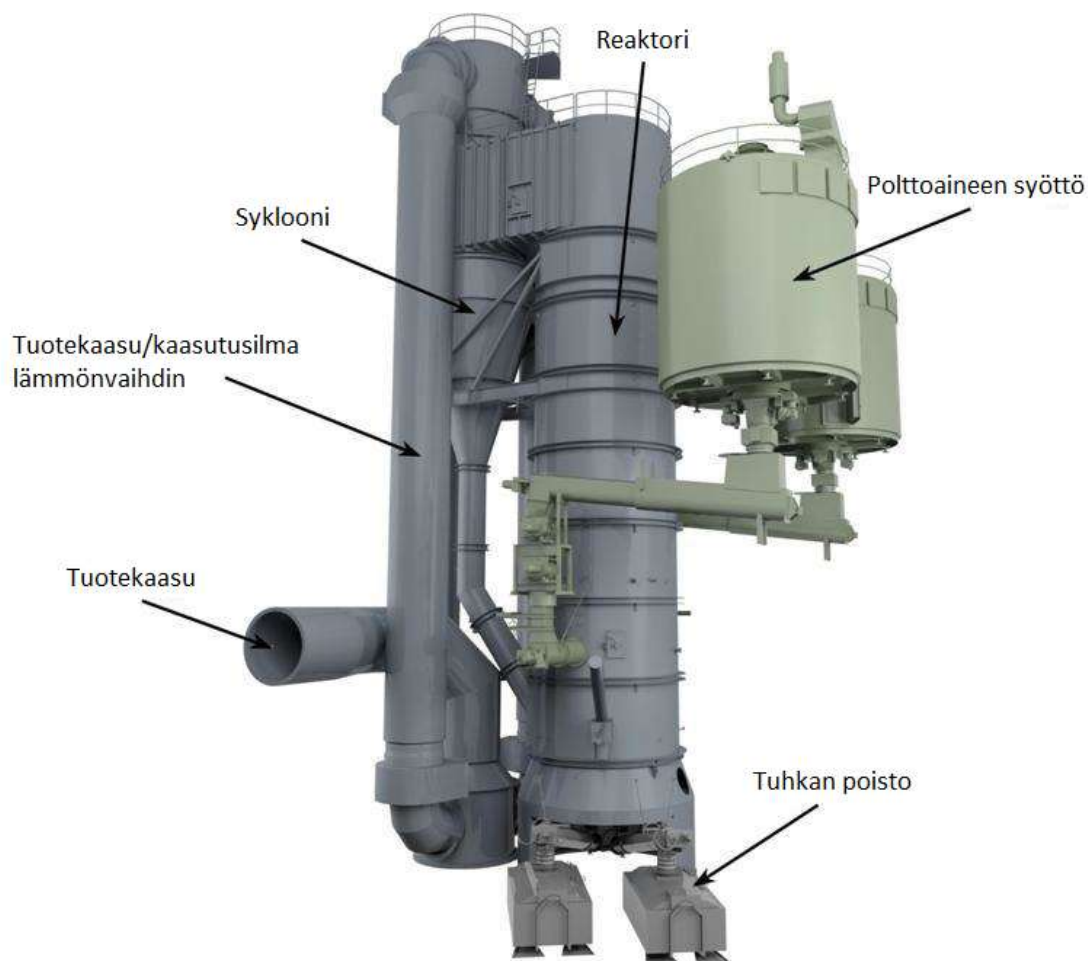
Biomassan kaasutuksessa ilmakerroin on tyypillisesti noin 0,2 – 0,3. Liian alhaisella ilmakertoimella ( $< 0,2$ ) kaasuuntuminen jää osittaiseksi, jolloin tuotekaasun lämpöarvo jää alhaiseksi ja jäännöshiilen määrä kasvaa eli kaasutuksen hiilikonversio on huono. Liian suurella ilmakertoimella ( $> 0,4$ ) palamistuotteiden määrä alkaa kasvaa, jolloin tuotekaasun lämpöarvo myös tällöin pienenee. (Basu 2013, 278) Kuvassa 4.5 on esitetty kiertoleijukaasuttimen hiilikonversion hyötysuhde eli tuotekaasun ja polttoaineen sisältämän hiilen suhde kaasutuksen ilmakerroinalueella. Esimerkiksi kiertoleijukaasuttimella hyötysuhteessa ylletään 95 – 98 % lukemiin reaktiivisilla polttoaineilla, kuten biomassalla (Bolhar-Nordenkamp, Isaksson 2016, 1).



**Kuva 4.5** Ilmakertoimen vaikutus hiilikonversiohyötysuhteeseen. (Basu 2013, 278)

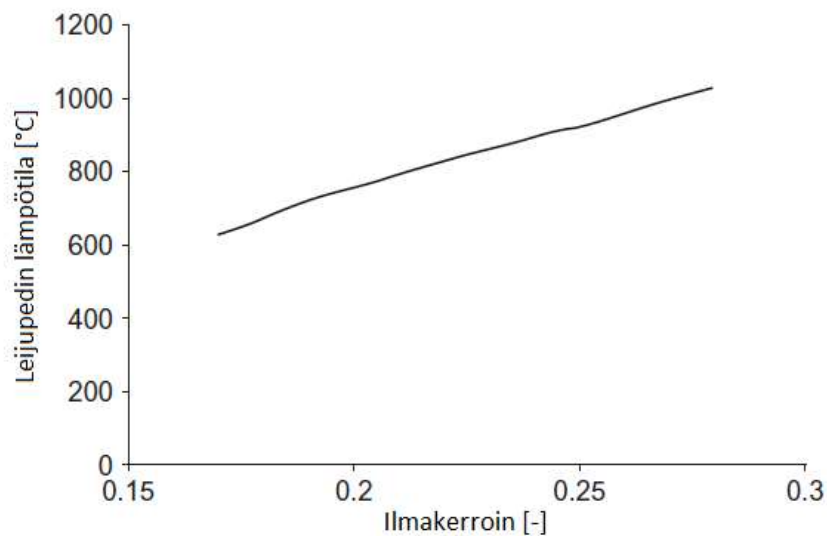
Sopiva ilmakerroin riippuu myös käytettävästä kaasutustekniikasta, joiden jako voidaan tehdä kolmeen päätyyppiin: liikkuvapeti kaasuttimet, leijupetikaasuttimet ja jatkuva virtaus -tyyppiset kaasuttimet. Biomassaa käytettäessä parhaiten soveltuvat leijupetikaasuttimet muun muassa alhaisen reaktiolämpötilan takia (800 – 1000 °C). (Basu 2013, 250; 262) Polttoaineen hyvän sekoittumisen ansioista lämpötila pysyy tasaisena ja inertti petimateriaali parantaa sekoittumista, jolloin biomassan matalan tuhkan sulamispisteen aiheuttama sintraantuminen ja korroosio-ongelmat voidaan välttää. (Basu 2013, 259) Leijupetikaasuttimien kokoluokka (5 – 300 MW<sub>th</sub>) soveltuu myös mainiosti tyypillisiin meesauunisovellutuksiin (Basu 2013, 250; Bolhar-Nordenkamp, Isaksson 2016, 1). Leijupetikaasuttimet jaetaan kuplapeti- ja kiertopetikaasuttimiin ja kuten höyrykattiloiden tapauksessakin, kuplapeti on käytetympi pienemmässä (< 25 MW<sub>th</sub>) kokoluokassa ja kiertoleijukaasutin isommassa (Basu 2013, 259). Meesauunien kokoluokassa käytettävä tekniikka on tyypillisesti kuvan 4.6 tyyppinen kiertoleijukaasutus.





**Kuva 4.6** Kiertoleijukaasutin. (Bolhar-Nordenkamp, Isaksson 2016, 3)

Kiertoleijukaasuttimen polttoaineena voidaan käyttää monenlaista biomassaa vaihtelevassa kosteudessa. Polttoaineen kosteudella on kuitenkin suuri vaikutus kaasuttimen prosessiin ja tuotekaasuun. Kaasuttimen petilämpötila kasvaa kuvan 4.7 tapaan melko lineaarisesti ilmakertoimen kasvaessa eli suuremmalla ilmakertoimella suurempi osa polttoaineesta palaa ja muodostaa kaasuntumistuotteiden sijaan palamistuotteita. Polttoaineen kosteuden kasvaessa kaasuttimen petilämpötila putoaa ja näin ollen tarvitaan suurempi määrä ilmaa, jotta saavutetaan sopiva prosessilämpötila. Tuotekaasun lämpöarvo siis huononee palamistuotteiden sekä lisääntyneen kaasutusilman mukana tulevan typen johdosta. (Bolhar-Nordenkamp, Isaksson 2016) Suurempi polttoaineen ja ilman määrä tarkoittaa samalla kasvavaa savukaasuvirtaa, joka vaikuttaa meesauunin kapasiteettiin.



**Kuva 4.7** Kiertoleijukaasuttimen ilmakertoimen vaikutus petilämpötilaan. (Basu 2013, 279)

Kaasuttimella tarvittava kaasutusilma määritetään palamisen tapaan stökiometrisen ilmamäärän perusteella. Taulukossa 4.5 on esimerkkinä kaasutukseen tulevan kuivatuskuoren koostumus ja taulukossa 4.6 palamistaulukko. Taulukossa on myös esitetty polton tapauksessa käytettävä yli-ilma ( $\lambda = 1,1$ ) ja savukaasumäärät, joita käsitellään myöhemmin savukaasulaskujen yhteydessä.

**Taulukko 4.5** Kaasutukseen tulevan kuoren koostumus.

	m-%	m[g]	M[g/mol]	n[mol]
C	53,38 %	491,10	12,01	40,89
H <sub>2</sub>	5,71 %	52,53	2,02	26,06
N <sub>2</sub>	0,34 %	3,13	28,01	0,11
S	0,00 %	0,00	32,06	0,00
O <sub>2</sub>	38,09 %	350,43	32,00	10,95
H <sub>2</sub> O	8,00 %	80,00	18,02	4,44
Tuhka	2,48 %	22,82		
Yhteensä		1000		

**Taulukko 4.6** Esimerkki palamistaulukko kuorelle.

Kuori	n[mol]	O <sub>2</sub> -tarve n[mol]	Savukaasujen koostumus [mol]					
			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
C	40,89	40,89	40,89					
H <sub>2</sub>	26,06	13,03		26,06				
N <sub>2</sub>	0,11						0,11	
S	0,00	0,00			0,00			
O <sub>2</sub>	10,95	-10,95						
H <sub>2</sub> O	4,44			4,44				
Yhteensä		42,97						
Typeä ilmasta: 3,77 * kok O <sub>2</sub> =							161,98	
Yli-ilman happi: (λ - 1) * kok O <sub>2</sub> =								4,30
Yli-ilman typpi: (λ - 1) * kok N <sub>2</sub> =							16,20	
Yhteensä			40,89	30,50	0,00	178,29		4,30

Stökiometriseksi hapen tarpeeksi saatiin 42,97 mol, jolloin palamisilman mukana tulee samalla typeä 161,98 mol:a. Biomassan kaasutuksen ilmakertoimeksi voidaan valita esimerkiksi 0,26, joten kertomalla se hapen ja typen määrällä, saadaan tarvittava kaasutusilman määrä (Basu 2013, 277). Taulukossa 4.7 on esitetty kaasutusilman määrä polttoainetta kohti ainemääränä, massana sekä normaalitilavuutena.

**Taulukko 4.7** Kaasutusilman tarve.

	mol/kg <sub>pa</sub>	g/mol	Nm <sup>3</sup> /kmol	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>
O <sub>2</sub>	11,2	32,00	0,36	22,39	0,25
N <sub>2</sub>	42,1	28,01	1,18	22,40	0,94
Yhteensä	53,3		1,54		1,19

Palamisen tapauksessa reaktioyhtälöt saavuttavat tasapainon, joten palamislaskenta on yksinkertaista verrattuna kaasutukseen, jossa kaasutusreaktiot eivät välttämättä saavuta tasapainotilaa. Reaktioyhtälöiden tasapainolaskennalla eli stökiometrisellä tai ei-stökiometrisellä mallilla saatavia tuloksia voidaan hyödyntää kaasuttimen suunnittelussa, mutta optimointi tehdään kineettisten mallien mukaan. (Basu 2013, 287 – 288) Koostumuksen määrittämisellä saadaan siis arvio tuotekaasun sisällöstä ja tälle polttoaineelle voidaan palamistaulukon avulla määrittää savukaasujen koostumus.

Taulukossa 4.8 on esitetty tyypillinen kiertoileijukaasuttimella biomassasta valmistetun tuotekaasun sisältö.

**Taulukko 4.8** Tyypillinen biomassasta kiertoileijukaasuttimella valmistetun tuotekaasun koostumus. (Basu 2013, 290)

	[%]
H <sub>2</sub>	7 - 20
CO	9 - 22
CH <sub>4</sub>	< 9
CO <sub>2</sub>	11 - 16
H <sub>2</sub> O	10 - 14
C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	< 4
N <sub>2</sub>	46 - 52

Tuotekaasun tapauksessa kemiallinen energia vapautuu yhtälöiden 4.8 – 4.10 tapaan hiilimonoksidin, vedyn ja metaanin palamisreaktioista. Tuotekaasun palamistuotteet ovat kuitenkin samat kuin poltettaessa polttoaine suoraan ilman kaasutusta, mikäli ei huomioida pohjatuhkan mukana poistuvia palamattomia. Näin ollen savukaasujen koostumus ja palamisilman määrä voidaan määrittää unohtamalla polttoaineen konversio tuotekaasuksi. Taulukon 4.6 palamistaulukon savukaasut on koottu taulukkoon 4.9 ja koostumus on esitetty ainemäärinä, massoina ja tilavuuksina.

**Taulukko 4.9** Savukaasujen koostumus.

	mol/kg <sub>pa</sub>	mol-%	kg/kg <sub>pa</sub>	m-%	Nm <sup>3</sup> /kmol	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>	Nm <sup>3</sup> -%
O <sub>2</sub>	4,3	1,7 %	0,14	1,8 %	22,39	0,10	1,7 %
N <sub>2</sub> polttoaine	0,1	0,0 %	0,00	0,0 %	22,40	0,00	0,0 %
N <sub>2</sub> ilma	178,2	70,2 %	4,99	66,7 %	22,40	3,99	70,2 %
CO <sub>2</sub>	40,9	16,1 %	1,80	24,1 %	22,26	0,91	16,0 %
SO <sub>2</sub>	0,0	0,0 %	0,00	0,0 %	21,89	0,00	0,0 %
H <sub>2</sub> O	30,5	12,0 %	0,55	7,3 %	22,40	0,68	12,0 %
Yhteensä	254,0	100,0 %	7,48	100,0 %		5,68	100,0 %

Taulukosta 4.6 voidaan lukea myös palamisilman mukana tulevan hapen ja typen kokonaismäärät. Osa tästä ilmasta tulee siis kaasutusprosessissa, mutta osa vasta polttovaiheessa. Vähentämällä taulukosta 4.7 saatavat kaasutusilman komponentit

palamisen kokonaismäärästä, saadaan taulukossa 4.10 esitetyt tuotekaasun poltossa tarvittava palamisilman määrä.

**Taulukko 4.10** Tuotekaasun polton palamisilman tarve.

	mol/kg <sub>pa</sub>	g/mol	Nm <sup>3</sup> /kmol	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>	Nm <sup>3</sup> /kg <sub>pa</sub>
O <sub>2</sub>	36,1	32,00	1,15	22,39	0,81
N <sub>2</sub>	136,1	28,01	3,81	22,40	3,05
Yhteensä	172,2		4,97		3,86

Luvut voidaan edelleen kertoa kaasutukseen tulevalla polttoaineen määrällä, jolloin saadaan palamisilman mooli-, tilavuus tai massavirta.

#### 4.2.2 Polttoaineen kulutus ja poltto

Polttoaineesta kaasutettavan tuotekaasun lämpöarvo voidaan määrittää tuotekaasun koostumuksen ja yhtälöiden 4.8 – 4.10 reaktioentalpioiden avulla. Mikäli tuotekaasun koostumus ei kuitenkaan ole selvillä, voidaan arviona käyttää saman kaasutustekniikan ja polttoaineen arvoja kirjallisuudesta tai olemassa olevista referensseistä. Ilmalla toimivan kiertoileijukaasuttimen tuotekaasun lämpöarvo (LHV) on tyypillisesti noin 3,5 – 6 MJ/Nm<sup>3</sup>. (Basu 2013, 276) Kiertoileijukaasuttimelta poistuvan tuotekaasun lämpötila on lähes kaasuttimen lämpötilassa eli noin 800 – 900 °C:een lämpötilassa ja sitä jäähdytetään tyypillisesti vain kuvan 4.6 tyypisesti kaasutusilmalämmönvaihtimella noin 600 – 700 °C lämpötilaan, joten merkittävän suuri tuntuva entalpia on myös otettava huomioon (Isakkson 2007, 13).

$$P_{mu} = q_{V,tk}(LHV_{tk} + H_{tk}) \quad (4.11)$$

$P_{mu}$	meesauunin polttoteho	[MW]
$q_{V,tk}$	tuotekaasun tilavuusvirta	[Nm <sup>3</sup> /s]
$LHV_{tk}$	tuotekaasun tehollinen lämpöarvo	[MJ/Nm <sup>3</sup> <sub>tk</sub> ]
$H_{tk}$	tuotekaasun tuntuva entalpia	[MJ/Nm <sup>3</sup> <sub>tk</sub> ]

Lämpöarvoon vaikuttaa käytettävä polttoaine ja sen laatu, mutta tärkeimpänä tekijänä on polttoaineen kosteus, joka laskee polttoaineen sekä tuotekaasun lämpöarvoa. (Bolhar-Nordenkamp, Isakkson 2016, 2) Noin 10 % kuiva-aineessa kaasutettavan biopolttoaineen (LHV = 16 MJ/kg<sub>pa</sub>) tuotekaasun tehollisen lämpöarvon ja tuntevan entalpian summa on

noin  $6,9 \text{ MJ/Nm}^3$  (Isaksson 2007, 6). Oletetaan esimerkkilaskun 8 % kuiva-aineessa olevan kuoren ( $\text{LHV} = 17,40 \text{ MJ/kg}_{\text{pa}}$ ) tuotekaasun arvoksi  $7,2 \text{ MJ/Nm}^3_{\text{tk}}$ , joten tuotekaasun tilavuusvirta voidaan ratkaista yhtälön 3.8 ja 4.11 avulla. Meesauunin kapasiteetiksi oletetaan  $300 \text{ tCaO/d}$  ja taulukosta 3.4 energian ominaiskulutukseksi saadaan  $6,46 \text{ GJ/tCaO}$ .

$$P_{mu} = C_{mu}E_{mu} = 300 \text{ tCaO/d} \cdot 6\,460 \text{ MJ/tCaO} = 22,4 \text{ MW}$$

$$q_{V,tk} = \frac{P_{mu}}{\text{LHV}_{tk} + H_{tk}} = \frac{22,4 \text{ MW}}{7,2 \text{ MJ/Nm}^3_{tk}} = 3,1 \text{ Nm}^3_{tk}/\text{s}$$

Ratkaistaan yhtälöllä 4.7 meesauunin vuotuinen energian kulutus, kun huipunkäyttöajaksi oletetaan  $8400 \text{ h/a}$ .

$$E_{a,mu} = 22,4 \text{ MW} \cdot 8\,400 \text{ h/a} = 188,1 \text{ GWh/a} = 677\,200 \text{ GJ/a}$$

Meesauunin poltintehon perusteella ei suoraan voi määrittää kaasuttimen polttoainetehoa. Kaasuttimella on hyötysuhde ja meesauunin tapauksessa, kun tuotekaasu poltetaan suoraan uunilla, käytetään niin sanottua kuumakaasuhyötysuhdetta. Hyötysuhteessa tarkastellaan meesauuniin syötettävän tehon suhdetta sisään tulevaan polttoainetehoon.

$$\eta_{ka} = \frac{P_{mu}}{P_{pa} + H_{pa}} \quad (4.12)$$

$\eta_{ka}$	kaasuttimen hyötysuhde	[-]
$P_{mu}$	meesauunin polttoteho	[MW]
$P_{pa}$	polttoaineteho	[MW]
$H_{pa}$	polttoaineen tuntuva entalpia	[MW]

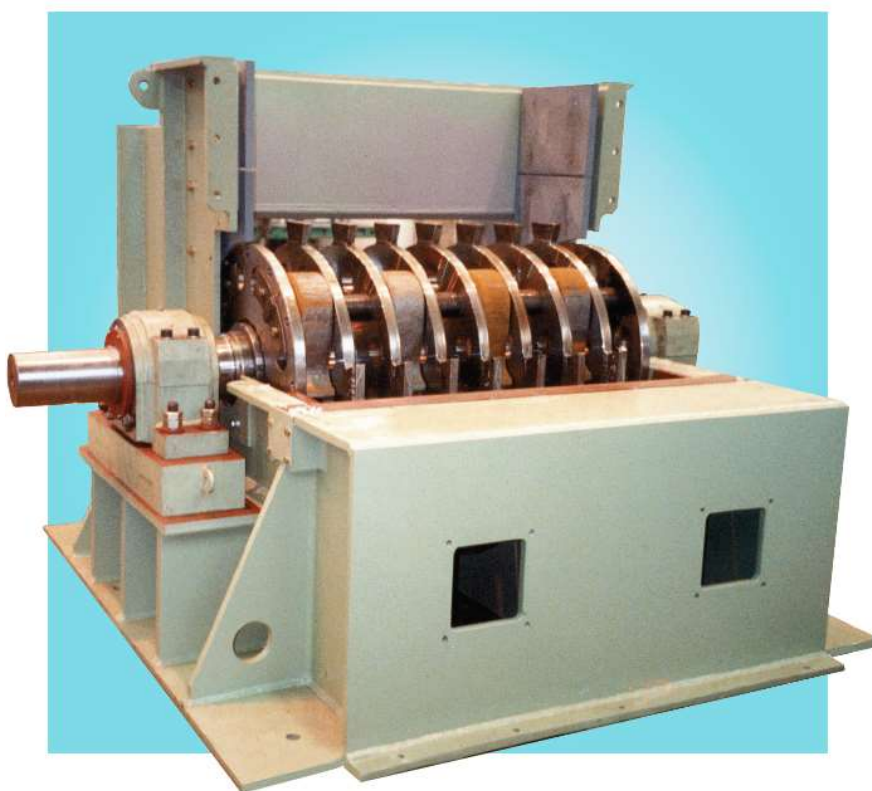
Kaasuttimen häviöt koostuvat reagoimattomasta hiilestä, pohjatuhkan tuntuvasta entalpiasta ja kaasuttimen lämpöhäviöistä. Kuumakaasuhyötysuhde on noin 98 % luokkaa. Yhtälöllä 4.11 voidaan ratkaista kaasuttimen polttoaineteho, jonka jälkeen yhtälöllä 4.6 määritetään polttoaineen kulutus. Jätetään polttoaineen tuntuva entalpia huomioimatta.

$$P_{pa} = \frac{P_{mu}}{\eta_{ka}} = \frac{22,4 \text{ MW}}{0,98} = 22,9 \text{ MW}$$

$$q_{m,pa} = \frac{P_{pa}}{LHV_{pa}} = \frac{22,9 \text{ MW}}{17,4 \text{ MJ/kg}_{pa}} = 1,3 \text{ kg}_{pa}/s = 4,7 \text{ t}_{pa}/h$$

### 4.3 Murskaus

Kiinteät biopolttoaineet sisältävät vaihtelevan kokoisia partikkeleja riippuen laadusta ja esikäsittelystä esim. sahalla tai kuorimolla. Mikäli polttoaine kaasutetaan, on kriteerit palakoolle melko löyhät ja polttoaineelle riittää vastaanotossa sijaitseva ylisuurien partikkelien murskain, jonka sallittu palakoko on esimerkiksi P45 eli pääfraktion palakoko on alle 45 mm. (Andritz 2010, 10). Murskauksessa voidaan käyttää esimerkiksi kuvan 4.7 tapaista kuoren murskainta, jossa pyörivät terät murskaavat polttoaineen sopivaan palakokoon ja se ohjataan muun jakeen sekaan kohti polttoaineen varastosiiloon.



**Kuva 4.8** Kuoren murskain. (Valmet 2014)

Pölypoltossa polttoainepartikkelit puhalletaan meesauunin polttimelle, jonka päässä polttoaine syttyy ja palaa. Mikäli partikkelit ovat liian isoja kasvaa riski palamattomien partikkelien joutumisesta kalkin joukkoon, mikä taas aiheuttaa ongelmia valkolipeän

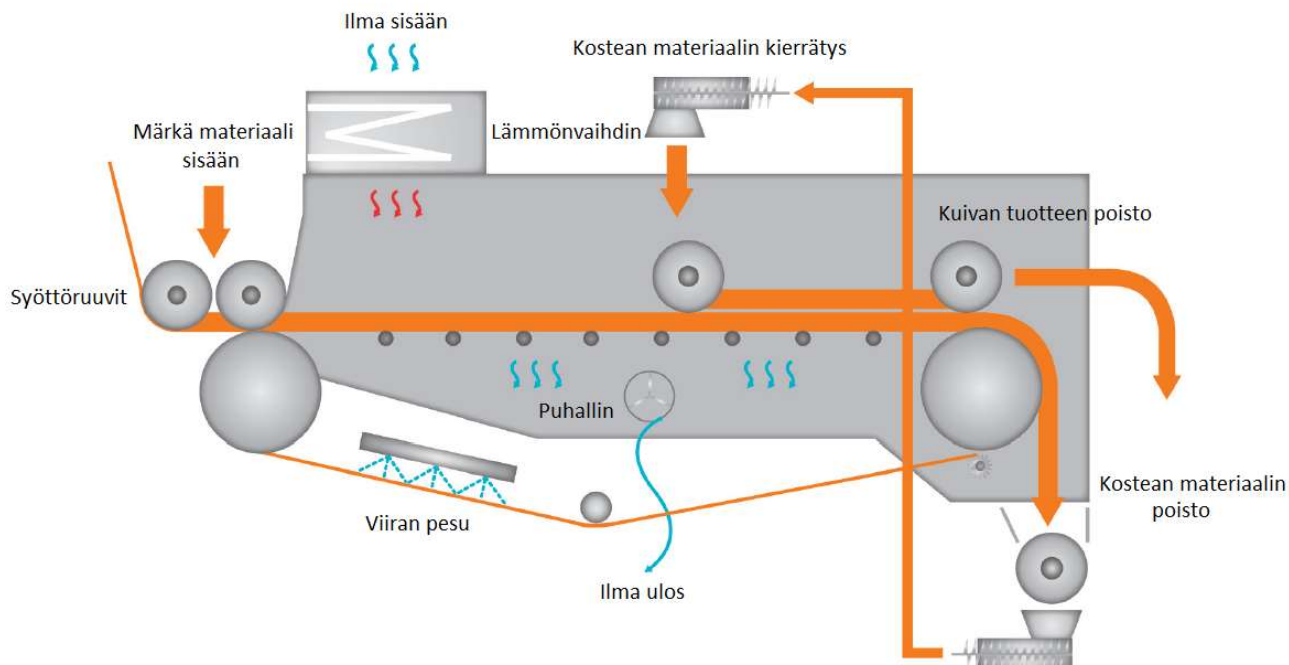
valmistuksessa. Pölypoltossa tyypillisenä rajana pidetään sallittavien yli 1 mm kokoisten partikkelien määrää 1 – 2 % koko jakaumasta, jotta varmistetaan partikkelien täydellinen palaminen (Valmet 2018 [1], 4).

Polttoaineen kosteus vaikuttaa merkittävästi puun mekaanisiin ominaisuuksiin ja on tärkein yksittäinen tekijä murskauksen kannalta. Kosteuspitoisuuden kasvaessa energiankulutus kasvaa lineaarisesti, joten kuivaus on myös pölypolttojärjestelmän murskaimen vuoksi tarpeellista. (Tetterman, Daugbjerg Jensen 2013, 78) Murskauksessa syntyvä lämpö haihduttaa polttoaineen kosteutta noin 1 – 2 %, joten kuiva-aine nousee vielä kuivauksenkin jälkeen ennen polttoa. Olemassa olevat sovellutukset ovat näyttäneet, että hyvän murskauksen takaamiseksi tulevan polttoaineen kosteus tulisi olla alle 10 % (Valmet 2018 [1], 5). Murskauksen jälkeinen polttoaineen kosteus vaikuttaa pölypoltossa tarvittavan polttoaineen sekä savukaasujen määrään. Poltossa tarvittavan eli murskauksen jälkeisen polttoaineen massavirran kautta saadaan määritettyä kuivauksesta murskaukseen tulevan polttoaineen massavirta, kun huomioidaan murskauksessa haihtuva kosteus.

#### **4.4 Kuivaus**

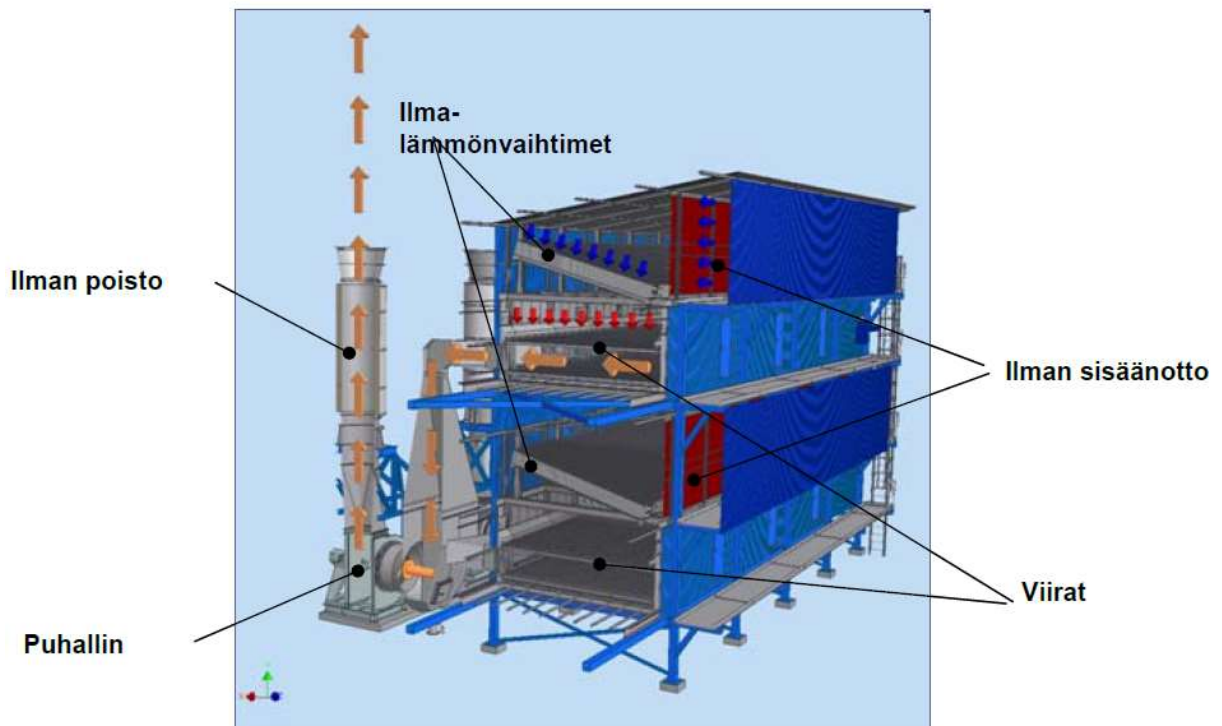
Kosteus on tyypillisesti jopa yli puolet biopolttoaineiden painosta ja kuivaamattomana polttoaine huonontaa meesauunin tehokkuutta ja kapasiteettia sekä pölypoltossa murskauksen energian tarve kasvaa ja laatu huononee (Valmet 2018 [1], 5). Biomassan kuivauksessa voidaan käyttää esimerkiksi rumpu-, viira-, pneumaattisia-, leijupeti tai rengaskuivaimia (Andritz 2019; Valmet 2019). Kaasuttimille syötettävän polttoaineen kosteus on tyypillisesti oltava 10 – 20 % luokkaa, kun taas pölypoltossa kuivauksen jälkeisen polttoaineen kosteuden tulisi olla alle 10 % ja mieluiten jopa alle 8 %, jolloin murskauksen jälkeinen kosteus on noin 6 – 7 % (Basu 2013, 425; Valmet 2018 [1], 7). Tuotekaasussa yli 10 % kosteus huonontaa meesauunin kapasiteettia, joten myös kaasutuksen tapauksessa kuivan polttoaineen kosteus on syytä suunnitella mahdollisimman alas. Sellutehtaiden meesauunien kaasutin- ja pölypoltosovellutuksissa käytetään tyypillisesti kuvan 4.9 tapaista viirakuivainta.





**Kuva 4.9** Periaatekuva yksitasoisesta viirakuivaimesta. (Valmet 2017 [2])

Meesauuni sovellutuksissa on myös ollut käytössä rumpukuivaimia, kuten Södra Cellin Värön tehtaalla jo vuodesta 1987. Stora Enson Sunilan tehtaalla käytetään rengaskuivainta ligniinin kuiva-aineen nostoon 65 % aina 95 %. Rengaskuivain hyödyntää meesauunin savukaasuja, joiden mukana ligniini kiertää kanavassa ja kuivaa sekä samalla ligniinipartikkelit rikkoutuvat pienemmiksi ja lopputuote on erittäin hienoa jauhemaista pulveria. (Valmet 2019) Viirakuivaimen etuna on muun muassa matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen, jota sellutehtailla on tyypillisesti tarjolla. Viirakuivaimia on lähivuosina asennettu kaasuttimille Metsä Fibren Joutsenon ja Äänekosken tehtailla sekä pölypolton yhteyteen Stora Enson Enocellin tehtaalla. Yksitasoinen tai kuvan 4.10 tyyppinen kaksikerroksinen viirakuivain käyttää tyypillisesti pääasiassa sellutehtaan hukkalämpöä esimerkiksi soodakattilan savukaasupesurilta tai -lämmönvaihtimelta. Sekundäärilämmön lisäksi tarvitaan myös primäärihöyryä lämmitysjärjestelmän säätöön sekä korvaamaan sekundäärilämpö, mikäli sitä ei ole ajoittain saatavissa.



**Kuva 4.10** Kaksikerroksinen viirakuivain. (Andritz 2010, 13)

Kuivauksen energian ominaiskulutus ilmoitetaan energian suhteena poistettavaan vesimäärään. Mitoitustehon voidaan siis ratkaista kertomalla ominaiskulutus haihdutetun veden määrällä.

$$P_d = E_d q_{m,H_2O} \quad (4.13)$$

$P_d$	kuivaimen tehon tarve	[MW]
$E_d$	kuivaimen energian kulutus	[MJ/kg <sub>H2O</sub> ]
$q_{m,H_2O}$	haihdutetun veden massavirta	[kg/s]

Viirakuivaimen tyypillinen energiankulutus on noin 0,9 – 1,5 MJ/kg<sub>H2O</sub> (Valmet 2017 [1], 7). Polttoaineen massavirta ja kosteus kuivauksen jälkeen on ratkaistu pölypolttua ja kaasutusta koskevissa kappaleissa, joten tulevan polttoaineen kosteus on tunnettava ja tämän jälkeen voidaan ratkaista tulevan polttoaineen massavirta.

$$q_{m,pa_{mf}} = (1 - w_{H_2O_{ar}}) q_{m,pa_{ar}} = (1 - w_{H_2O_{ad}}) q_{m,pa_{ad}} \quad (4.14)$$

$q_{m,pa_{mf}}$	polttoaineen massavirta kuivana	[kg/s]
$w_{H_2O}$	kosteuspitoisuus saapumistilassa	[-]
$q_{m,pa_{ar}}$	polttoaineen massavirta saapumistilassa	[kg/s]
$w_{H_2O}$	kosteuspitoisuus kuivattuna	[-]
$q_{m,pa_{ar}}$	polttoaineen massavirta kuivattuna	[kg/s]

Kappaleessa 4.2.2 kaasutettavan kuoren massavirraksi saatiin  $1,3 \text{ kg}_{pa}/s$  ja kaasutukseen tulevan polttoaineen kosteus oli taulukon 4.5 mukaisesti 8 %. Kuorimolta kaasuttimen varastosiiloon tulevan polttoaineen kosteuden oletetaan olevan 60 %, joten ratkaistaan kuivaukseen tulevan polttoaineen massavirta yhtälön 4.14 avulla.

$$q_{m,pa_{ar}} = \frac{1-0,08}{1-0,6} \cdot 1,3 \text{ kg}_{pa}/s = 3,0 \text{ kg}_{pa}/s$$

Oletetaan viirakuivaimen ominaisenergiankulutuksen olevan  $1,2 \text{ MJ}/\text{kg}_{H_2O}$ . Haihdutettavan veden määrä saadaan vähentämällä lähtevän polttoaineen massavirta tulevasta, joten ratkaistaan yhtälön 4.13 kuivauksen lämpötehon tarve mitoitustuotannolla.

$$P_d = 1,2 \text{ MJ}/\text{kg}_{H_2O} \cdot (3,0 - 1,3) \text{ kg}_{pa}/s = 2,0 \text{ MW}$$

Lämpötehon tarve kertoo siis viirakuivaimen osalta mitoitustehon. Kuten jo aiemmin todettiin, niin viirakuivaimen etuna on matalan hukkalämmön hyödyntäminen. Nimellistehosta ei kuitenkaan vielä selviä minkä lämpötilatason lämpöä vaaditaan, joten kuivaimen tarkemman suunnittelun kautta selvitetään lopulta mistä kohteista lämpö voidaan hyödyntää.

## 4.5 Hankinta, vastaanotto ja käsittely

Kuivaukseen tarvittavan polttoaineen määrä antaa lähtöarvot polttoaineen hankinnan, vastaanoton ja käsittelyn suunnitteluun. Vuotuisen energian kulutuksen määrittämisessä käytettyä huipunkäyttöaika eli yhtälöä 4.7 voidaan soveltaa myös polttoaineen määrän laskentaan. Määritetään kuivausta käsitelleen kappaleen 4.4 mukaisen esimerkin kuoren kulutus, kun huipunkäyttöajaksi oletetaan 8400 h/a.

$$m_{pa} = 3,0 \text{ kg}_{pa}/s \cdot 8\,400 \text{ h/a} = 90\,700 \text{ t/a}$$

Kostea kuori sisältää siis lähes 55 000 tonnia vettä eli mikäli kaikki polttoaine kuljetettaisiin tehtaalle 50 tonnin kuljetuksissa, se tarkoittaisi 1 100 rekkaa vuodessa pelkästään veden kuljetusta varten. Kostean polttoaineen sisältämän kosteuden höyrystyminen vaatii energiaa yhtälön 4.5 mukaisesti, joten mikäli kuori poltettaisiin saapumistilassa, luovuttaa se vähemmän energiaa kuiva-ainetta kohti. Jos siis hankittavan polttoaineen vuotuisesta määrästä puhutaan energiateollisuudelle tyypillisellä energiayksiköllä (GWh/a), niin se on määritettävä yhtälöiden 4.6 ja 4.7 avulla. Taulukon 3.2 kostean kuoren lämpöarvoksi 60 % kosteudessa saadaan yhtälöllä 4.5 noin 6,2 MJ/kg.

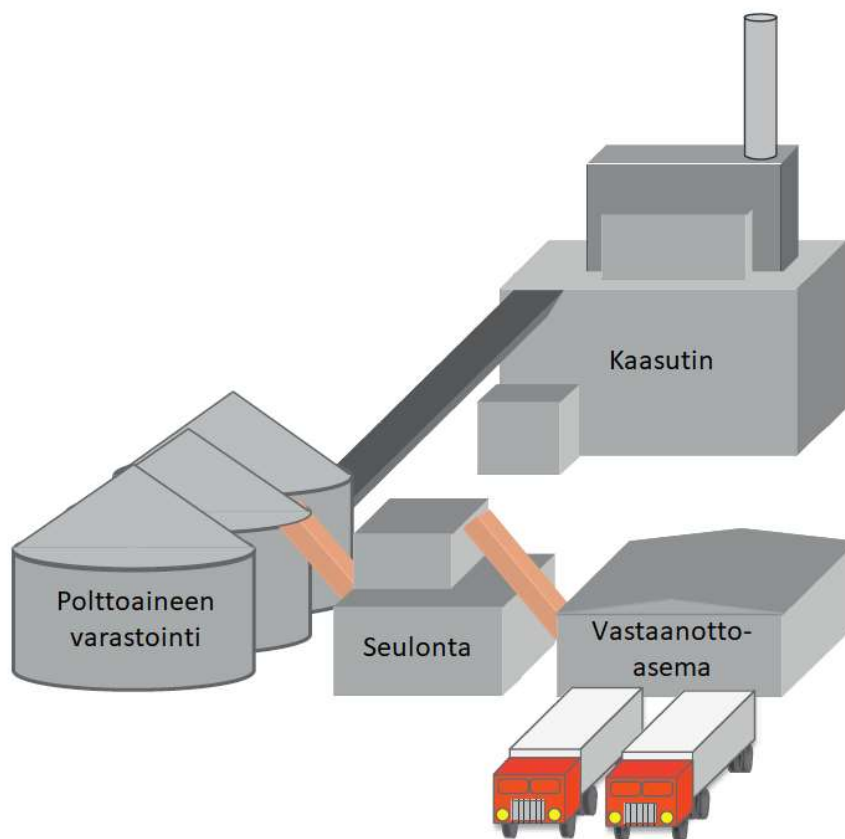
$$E_{a,pa} = 6,2 \text{ MJ/kg} \cdot 90\,700 \text{ t/a} = 156,2 \text{ GWh/a} = 562\,300 \text{ GJ/a}$$

Sahanpurun ja kuoren tapauksessa polttoaineen hankintareitit poikkeavat täysin ligniinin tapauksesta. Kappaleessa käsitellään polttoaineen hankinta, vastaanotto ja käsittely ensin sahanpurun ja kuoren tapaukselle ja erikseen ligniinille.

### 4.5.1 Sahanpuru ja kuori

Kiinteiden polttoaineiden käsittely vaatii polttoaineen toimitustavasta riippuen sovellutukseen sopivan vastaanottoaseman. Kuvassa 4.11 esitetyn kaasutusvoimalaitoksen tapaan polttoaineen vastaanotto tapahtuu tyypillisesti rekoilla tai junalla. Pohjoismaisen sellutehtaan tapauksessa puu kuoritaan tyypillisesti tehtaalla tai tehtaan alueella voi sijaita saha, joten polttoaine voi tulla osittain tai jopa kokonaan kuljettimia pitkin eikä erillistä ostoasemaa kaikissa tapauksissa tarvita. Kuoren tapauksessa polttoaineen hankintaketju on siis hyvin yksinkertainen, sillä pelkästään meesauunin käyttöä varten tehdas on selkeästi yliomavarainen polttoaineen suhteen, joten erillistä ostopolttoaineasemaa ei tarvita ja kuori varastoidaan seulonnan jälkeen

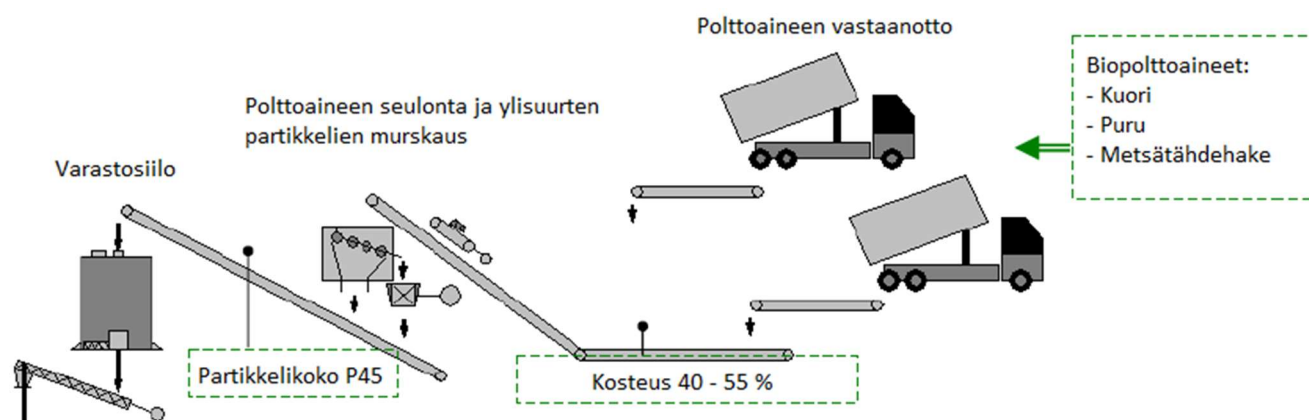
varastosiiloon. Joillain tehtailla, kuten paperi- ja kartonkitehdasintegraateilla kuorta poltetaan pääasiassa biomassakattilassa, jolloin ostopolttoaineasema on kattilan yhteydessä ja erillistä asemaa meesauunilla ei tällöinkään välttämättä tarvita. Mahdollinen ostettava lisäpolttoaine on järkevämpi polttaa biomassakattilassa ja pyrkiä pitämään kaasutukseen menevän polttoaineen laatu mahdollisimman tasaisena eli käyttää tehtaan omaa kuorta.



**Kuva 4.11** Kaasutusvoimalaitos. (Basu 2013, 408)

Sahanpurun pääasiallinen hankinta meesauunin volyyymeissa on tapahduttava mekaanisen metsäteollisuuden sahoilta, joilla purumäärät ovat merkittäviä. Sellutehtaalla voi olla seulomo, jolla erotetaan puru hakkeesta ja tällä määrällä voidaan vähentää hieman ostopurun määrää. Optimaalisinta sahanpurun käyttö on tilanteessa, jossa samalla tehdasalueella sijaitsee oma saha ja pääosa polttoaineesta voidaan siirtää kuljettimilla käyttökohteeseen meesauunille. Sahanpurua käytettäessä polttoaineen riittävyden kanssa on huomattavasti enemmän epävarmuustekijöitä kuoreen verrattuna ja ostopolttoaineen vastaanottoasema on tarpeellinen.

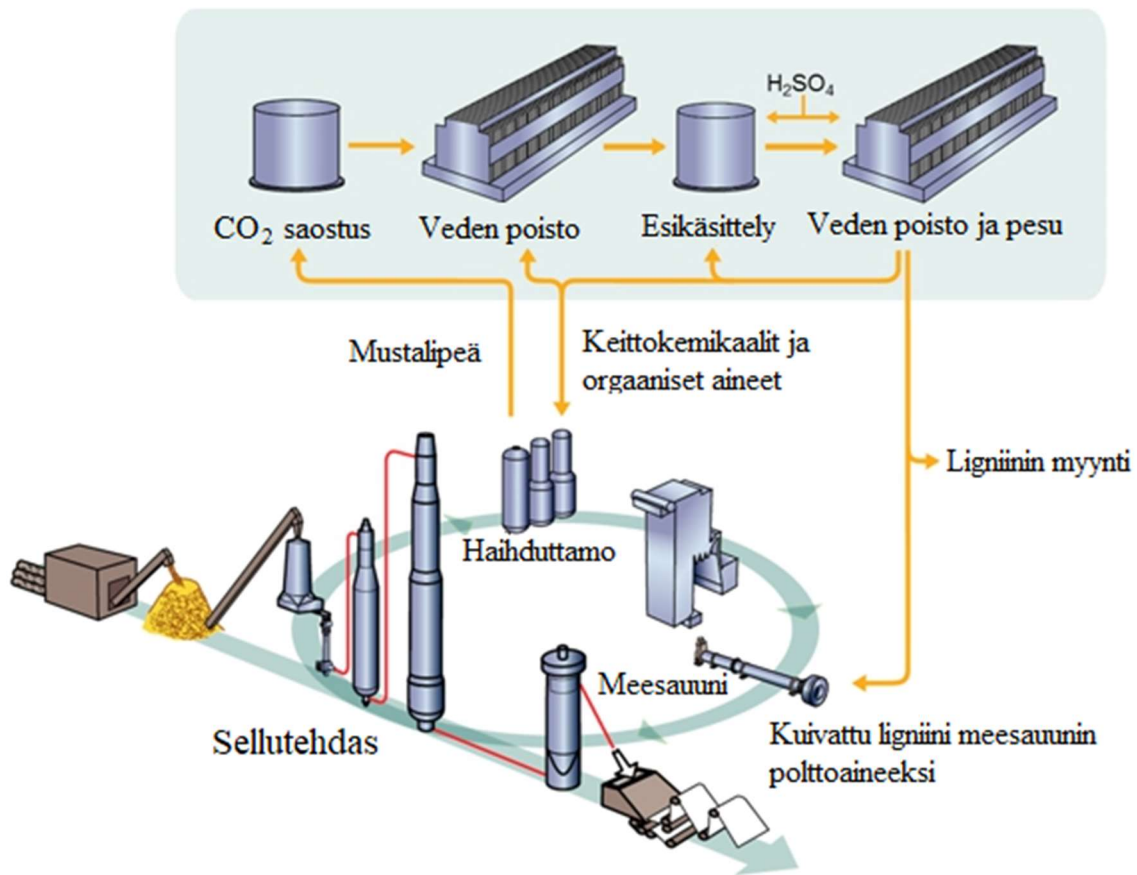
Biopolttoaineet vastaanotetaan märkänä polttoainekentälle, josta se siirtyy kuljettimilla kuvan 4.12 tapaan metallien ja kivien ym. kuulumattomien komponenttien seulontaan. Ylisuurat partikkelit murskataan mahdollisesti jo tässä vaiheessa erityisesti kaasuttimen tapauksessa, jossa palakoon vaateet ovat kevyemmät. Vastaanoton ja käsittelyn jälkeen märkä polttoaine siirretään kuljettimilla varastosiiloon, josta se ohjataan edelleen kuivaukseen.



Kuva 4.12 Kaasuttimen polttoaineen vastaanotto ja seulonta. (Andritz 2010, 10)

#### 4.5.2 Ligniini

Sulfaattisellun keittoprosessista kemikaalien talteenottoon tulevan mustalipeän ligniini muodostaa suurimman osan mustalipeän energiasisällöstä. Ligniini on perinteisesti poltettu soodakattilassa kokonaisuudessaan mustalipeän seassa, mutta osittainen ligniinin erotus onnistuu esimerkiksi kuvan 4.13 LignoBoost -prosessilla. Haihduttamolta johdetaan osa noin 40 % kuiva-aineessa olevasta mustalipeästä ligniinin erotusprosessiin, jossa mustalipeään syötetään hiilidioksidiä. Hiilidioksidi alentaa seoksen pH:ta ja näin ollen ligniini alkaa saostua. Lietteestä suodatetaan vettä, jonka jälkeen joukkoon sekoitetaan rikkihappoa. Lietteiden pH pudotetaan nopeasti 2,5 – 4,0 ja seosta pestään happamalla vedellä sekä vesi suodatetaan erilleen, jolloin saadaan noin 65 % kuiva-aineessa olevaa ligniiniä. (Valmet 2017 [3], Valmet 2019)

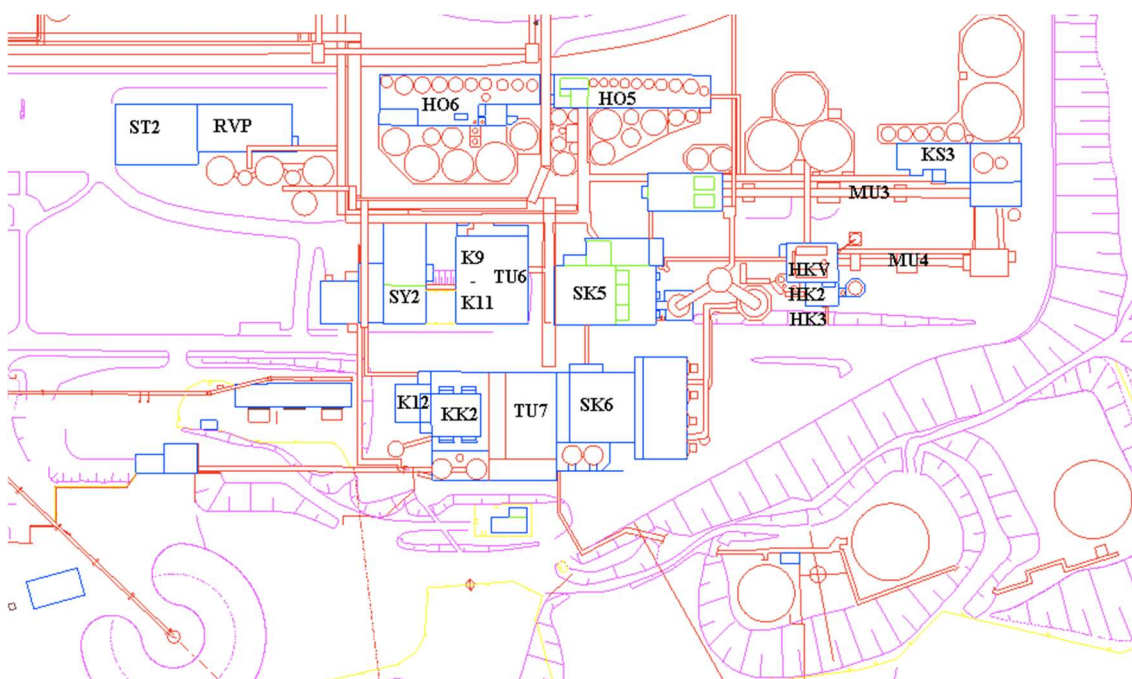


**Kuva 4.13** LignoBoost -prosessin sijoittuminen sellutehtaaseen. (Valmet 2019)

Ligniini voidaan kokonaisuudessaan tai osittain myydä jatkojalostettavaksi erotusprosessista saatavassa kosteudessa. Mikäli ligniiniä poltetaan meesaunissa on kuiva-ainetta nostettava eli se ohjataan kuivaukseen ja kuivattua ligniiniä voidaan myös myydä omana tuotteenaan. Kuivatun ligniinin haasteena on sen räjähtämisherkkyys, joten aine ei saa päästä tekemisiin hapen kanssa. käsittelylaitteistoissa käytetään inerttinä kaasuna typpeä, jolla tapahtuu ligniinin pneumaattinen siirto sekä esimerkiksi liikkuvien osien akselien tiivistys.

## 5 VAIHTOEHTOJEN TEKNISTALOUDELLINEN TARKASTELU

Imatran tehtaiden Kaukopään voimalaitoksen kemikaalien talteenotto käsittelee valkaistua mäntysellua keittävän kuitulinja 2 ja koivusellua keittävän kuitulinja 3 sekä valkaisematonta mäntysellua keittävän Tainionkosken sellutehtaan mustalipeät. Kuvassa 5.1 on esitetty voimalaitoksen ja kaksilinjaisen talteenoton laitteiden sijainti Kaukopäässä. Tarkastelussa otetaan huomioon vaihtoehdot nykyisten meesauunien 3 ja 4 päivittämisestä käyttämään biopohjaisia polttoaineita tai mahdollinen korvaava uusi meesauuni 5. Uuden meesauunin tapauksessa vaihtoehtoina on täysin uusi valkolipeälaitos tai integrointi vanhan kaustistamon yhteyteen.



**Kuva 5.1** Imatran tehtaiden voimalaitos ja kemikaalien talteenotto.

### 5.1 Polttoainevalinnat

Kiinteät biopolttoaineet ovat tällä hetkellä, yksittäiset poikkeustapaukset pois lukien, ainoita vartenotettavia fossiilisten polttoaineiden korvaajia meesauunien pääpolttoaineina. Imatran tehtailla soodakattilat eivät ole pullonkaulana sellutehtaan tuotannolle ja suuri tehdasintegraatin on osittain jo nykyisellään ostopolttoaineen varassa, joten lähtökohdat eivät ole ligniinin erotukselle otolliset. Lisäpolttoainetta olisi siis hankittava kuorikattilalle korvaamaan soodakattilan vähentyvää höyryn tuotantoa. Ligniinin erotuslaitteiston investointikustannuksissa ollaan myös huomattavasti



suuremmissa lukemissa kaasutin- ja pölypolttolaitteistoihin verrattuna (Kuparinen, Vakkilainen 2017, 4041).

Kaasutuksessa polttoaineen tasalaatuisuus on erityisen tärkeää eli sellutehtaan kuorimolla syntyvä kuori kannattaa käyttää kaasutukseen. Imatran tehtaalla kuori käytetään nykyisin pääosin tehtaan kuorikattilalla höyryntuotantoon eli mikäli meesauuneille otetaan osa tästä kuoresta, on polttoainetta hankittava lähes sama määrä lisää kuorikattilan käyttöön. Kuorikattilalle hankittava polttoaine olisi näin ollen esimerkiksi metsätähdehaketta, kantoja tai muuta saha- ja selluteollisuuden raaka-aineiksi kelpaamatonta energiapuuta.

Purun tapauksessa Kaukopään sellutehtaan mäntylinjan eli kuitulinja 2 hakkeesta seulotaan erilleen puru, jota syntyy vuositason noin 15 000 tonnia. Seulomon puru määrä ei itsessään riitä pienemmällekään meesauuni 4:lle käyttöön, jonka vuosikulutus olisi noin 60 000 tonnia. Loput puruista tulisi siis hankkia esimerkiksi läheiseltä Stora Enson Honkalahden sahalta, jolloin ollaan edelleen hieman alle vuosikulutuksen. Purun tapauksessa polttoaineen hankinnan riippuvuus yksittäisestä polttoaineesta ja mahdollisesti yksittäisestä sahasta olisi siis erittäin suuri riski investoinnille. Puupurun käytössä on myös muistettava, että raaka-aineen jalostusastetta voidaan nostaa käyttämällä puru sellunkeittoon tai esimerkiksi pellettien tuotantoon.

Polttoaineen hankinnan rajoitteet estävät siis purun käytön eli pölypolttolaitteistojen hankinnan meesauuneille. Maakaasu tulee olemaan tärkeä tukipolttoaine myös tulevaisuudessa. Maakaasuverkon ja -markkinoiden kehityksen johdosta tulevaisuudessa apupolttoaineena käytetty kaasu voitaisiin sertifikaateilla hankkia biokaasuna, mikäli pyrkimykset ovat täysin fossiilivapaaseen kalkin tuotantoon. Rikkiä sisältävän metanolin poltto tapahtuu nykyisellään hajukaasukattiloilla, joihin johdetaan myös kaikki väkevät sekä suurin osa laimeista hajukaasuista. Hajukaasukattilan savukaasupesurilla valmistetaan myös natriumbisulfiittia Kaukopään CTMP laitokselle, joka on erittäin hyvä asia tehtaan rikki ja natriumtaseen hallinnan kannalta. Metanolin ja hajukaasujen poltto meesauunissa ei ole suositeltavaa. Meesauuni 4:lla oleva tärpätinpolto mahdollisuus kannattaa säästää myös tulevaisuudessa, sillä tärpähti on erinomaista polttoainetta ja mikäli markkinatilanne muuttuu, voidaan tärpätillä korvata pääpolttoaineen kulutusta. Pikiöljyn rooli voisi olla myös tukipolttoaineena, mutta pikiöljyn saatavuudessa saattaa tulla tulevaisuudessa haasteita, joten sen käyttöön ei voi liikaa tukeutua.

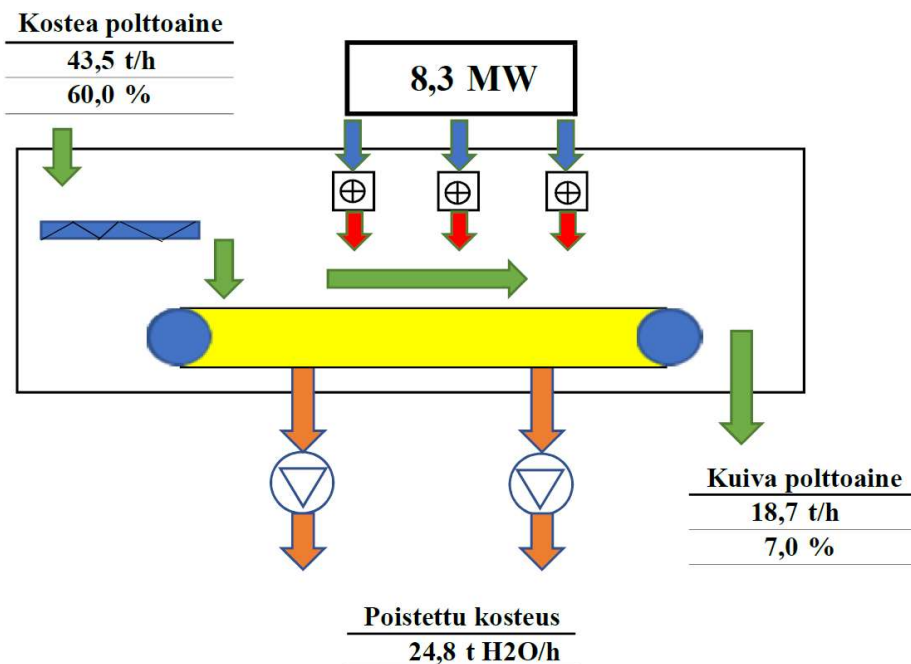
## 5.2 Prosessitekniset vaikutukset

Ligniinin erotusprosessissa käytetään rikkihappoa, josta osa päätyy haihduttamolle ja osa ligniinin joukkoon. Tehtaan rikki- ja natriumtaseen hallinnan kannalta ligniinin valmistus aiheuttaisi siis haasteita. Polttoaineen muutos kuoresta valmistettuun tuotekaasuun tulisi taas lisäämään kalkkikierron vierasainekuormaan ja fosfori hallinnan kannalta meesatuhkan ulosajoa on lisättävä, jolloin myös ostokalkin tarve lisääntyy. Kaasuttimen sykloni ei ole optimoitu polttoaineen tuhkan erotukseen ja tuhkan uuniin menevää osuutta on hankala määrittää. Mikäli kuitenkin kaikki kuoren sisältämä tuhkan kulkeutu savukaasujen mukana uuniin, on silti viherlipeän mukana tuleva fosforikuorma jopa 20-kertainen (Isakkson 2007, 9). Todennäköinen tapaus tuhkan uuniin päätymiselle voisi olla noin 50 % (Isakkson 2007, 9), mutta se ei ota huomioon, että polttoaineen tuhka saattaa olla meesatuhkan tapaan rikastuneena kevyempiin komponentteihin. Parhaiten erotustehokkuuden saa todennäköisesti selville käytännön sovellutuksien kautta.

Sellutehtaan kuoren joukossa tulee nykyisin myös biolietettä ja esimerkiksi kuorinnan katkosten aikana kuorikasalle saattaa tulla ajoittain pelkkää lietettä. Kaasutuksen ja kuivauksen kannalta polttoaineen tasalaatuisuus on erittäin tärkeää ja liete olisi siis erotettava kuoren joukosta. Paras vaihtoehto olisi kehittää lietteelle täysin uusi käyttökohde, jolloin vierasaineita sisältävä jae saadaan ulos tehtaan kierrosta. Toinen vaihtoehto on investoida lietteen linkouskapasiteettiin, jolloin se saataisiin syötettyä kokonaisuudessa lipeäkiertoon ja näin ollen fosforikuorma tulisi myös edelleen kasvamaan.

Prosessiteknisesti tärkein asia liittyy kuitenkin meesauunin kapasiteettiin, johon polttoaineen vaihdolla voi olla vaikutusta. Pölypolton ja ligniinin tapauksessa energian kulutuksessa ja savukaasuvirtausmäärässä päästään maakaasuun verrattaviin lukuihin eli polttoaineen vaihdoksella ei ole vaikutusta meesauunin kapasiteettiin. Tuotekaasun käytössä tilanne on kuitenkin toinen. Energian kulutus ja savukaasuvirtaukset kasvavat, jolloin meesauunin kapasiteetti rajoittuu. Vanhojen uunien tapauksessa on siis hyväksyttävä alentunut meesauunin sekä mahdollinen sellun tuotannon kapasiteetti, mikäli tuotannon pullonkaula löytyy uunista. Imatran tehtaan kannalta paras ratkaisu olisi hankkia täysin uusi meesauuni 5 (1 200 tCaO/d), mikäli soodakattiloiden mahdollistama maksimi selluntuotanto halutaan tulevina vuosikymmeninä ulosmitata.

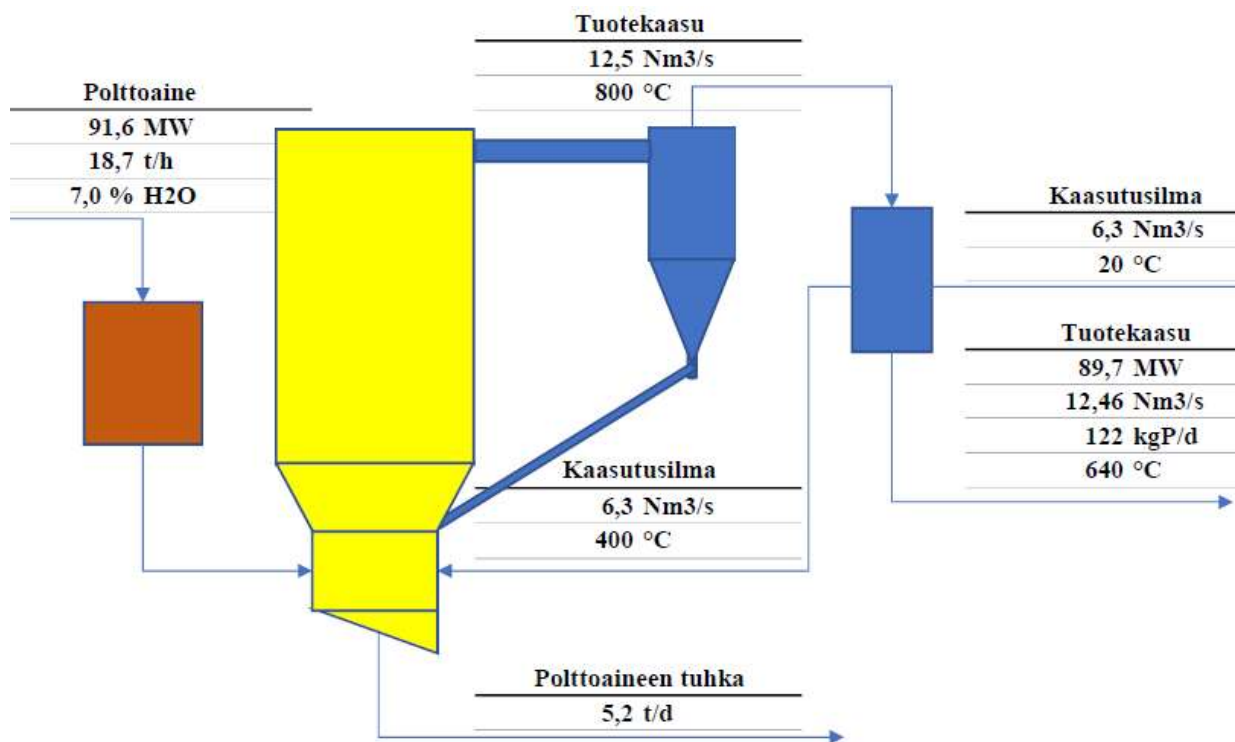
Meesauuni 5 käyttäisi pääpolttoaineenaan kuorta ja mitoitus tehdään nyt taulukosta 3.2 löytyvän polttoaineen koostumuksella, jonka kosteuspitoisuus on 60 %. Polttoaine kuivataan viirakuivaimella kaasutusta varten ja kuvassa 5.2 on esitetty viirakuivaimen tuotantoarvot kaasuttimen vaatimalla nimellistuotannolla. Kaasuttimelle menevä polttoaine eli kuoren kuiva-aineen mitoitusarvoksi on otettu nyt 7 %, jolloin kuivauksen lämpöteho on nimellistuotannolla 1,2 MJ/kg<sub>H2O</sub> ominaiskulutuksella noin 8,3 MW.



**Kuva 5.2** Meesauuni 5 viirakuivain.

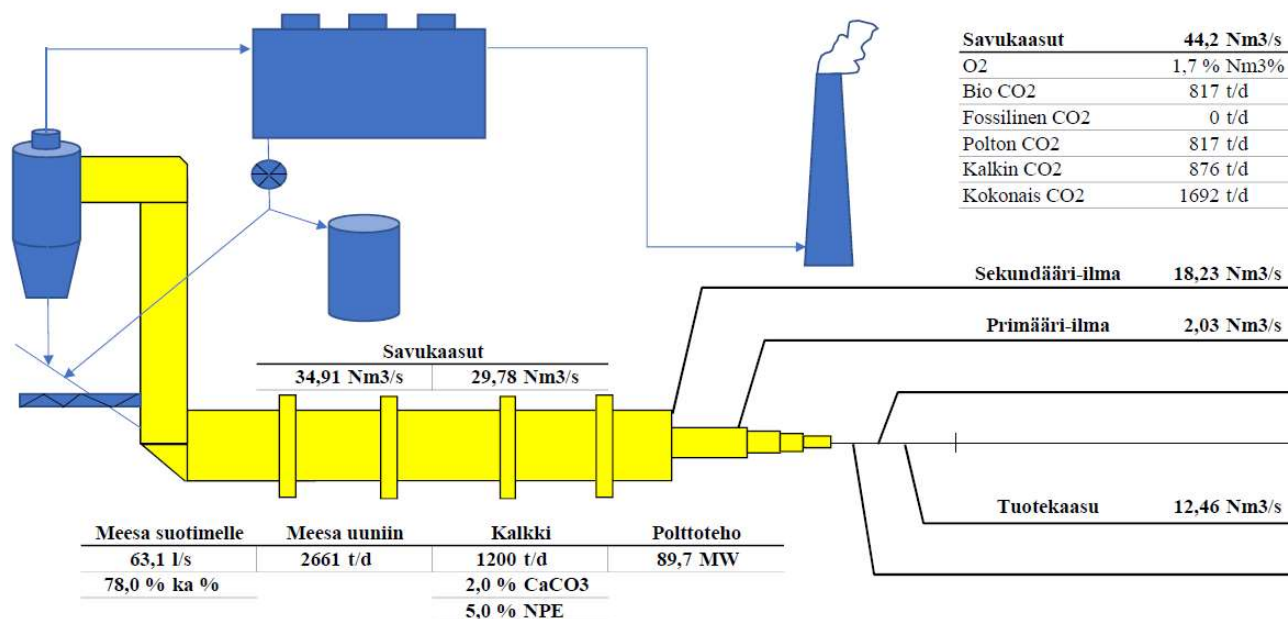
Oletetaan meesauunin huipunkäyttäjäksi 8 400 h/a, joten vuotuinen kostean polttoaineen kulutus on noin 365 300 t<sub>pa</sub>/a. Energiayksiköksi muutettuna polttoaineen tarve on noin 630 GWh<sub>pa</sub>/a. Polttoainetta tulisi siis kulumaan todella suuret määrät ja Imatralla ollaan jo nykyisellään lähellä polttoaineen omavaraisuuden rajaa ja esimerkiksi talvella tukeudutaan höyryntuotannossa osittain maakaasuun. Ostopolttoaineen eli esimerkiksi metsätähdehakkeen ja muiden biopolttoainejakeiden varaan joudutaan joka tapauksessa, mikäli kuoresta lähes 40 % menisi jatkossa meesauunin tarpeisiin. Tehdasintegraatin energiatasetta on syytä tutkia kokonaisuudessaan ja esimerkiksi polttoliipin kuiva-aineen nosto moderniin yli 80 % lukemiin nykyisestä 70 % tulisi olemaan tärkeä osa tehokkuuden ja polttoaineen riittävyyden kannalta.

Kuvan 5.3 meesauuni 5 kaasutin tulisi olemaan teholtaan noin 92 MW ja tuotekaasua syntyy nimellistuotannolla noin  $12,5 \text{ Nm}^3/\text{s}$ . Kaasuttimen hyötysuhteeksi on arvioitu 98 %. Meesauunin poltinteho on noin 90 MW, joka vastaa meesauunin vuotuisena energiankulutuksena  $8\,400 \text{ h/a}$  huipunkäyttöajalla noin  $754 \text{ GWh/a}$ . Tuhkan erotustehokkuudeksi 50 %, jolloin polttoaineen sisältämää tuhkaa poistetaan noin 5,2 tonnia päivässä, mutta kokonaispohjatuuhka määrään on vielä otettava huomioon petimateriaalin uusinnan tarve. Taulukosta 3.3 kuoren sisältämän fosforipitoisuuden perusteella uuniin päätyisi mitoitustuotannolla noin  $120 \text{ kg}$  fosforia päivässä.



**Kuva 5.3** Meesauuni 5 kaasutin.

Meesauunin pääarvot on esitetty kuvassa 5.4. Kaasuttimelta tuotekaasu johdetaan meesauunin polttimelle, jolla primääri-ilman osuus on 10 % kokonaisilmamäärästä. Lambdan arvolla 1,10 savukaasujen happipitoisuudeksi saadaan  $1,7 \text{ Nm}^3\%$ . Palamisen johdosta savukaasumäärä on noin  $30 \text{ Nm}^3/\text{s}$ , mutta yhtälön 3.3 mukaisesti hajoavan kalsiumkarbonaatin syntyvä hiilidioksidi nostaa savukaasumäärän lähes  $35 \text{ Nm}^3/\text{s}$ . Kun mukaan otetaan vielä 78 % kuiva-aineessa oleva meesa, josta kosteus haihtuu savukaasujen mukaan, savukaasuvirtaus sähkösuodattimilla ja piipussa on hieman yli  $44 \text{ Nm}^3/\text{s}$ .



**Kuva 5.4** Meesauuni 5.

Kaasuttimen ollessa normaalituotannossa meesauunin hiilidioksidipäästöt ovat täysin fossiilivapaita. Kuten kuvasta 5.4 huomaa, kokonaishiilidioksidipäästöistä alle puolet syntyvät poltossa, kun taas keittimellä puusta keittokemikaaliin sitoutunut karbonaatti vapautuu uunissa meesasta ja muodostaa suurimman osan hiilidioksidipäästöistä. Kaasuttimen ja kuivaimen 100 %:n käyttävyys ei ole kuitenkaan realismia, joten ainakin lähitulevaisuudessa apupolttoaineena käytettävä maakaasu aiheuttaisi edelleen fossiilisia hiilidioksidipäästöjä. Päästöistä olisi myös otettava huomioon typen oksidit. Kiinteistä biopolttoaineista kuori sisältää eniten typpeä, joten helposti NO<sub>x</sub>:a muodostava polttoaineen tyyppi voi aiheuttaa ongelmia ja se on syytä ottaa huomioon suunnittelussa.

### 5.3 Tarvittavat laitehankinnat ja sijoittaminen

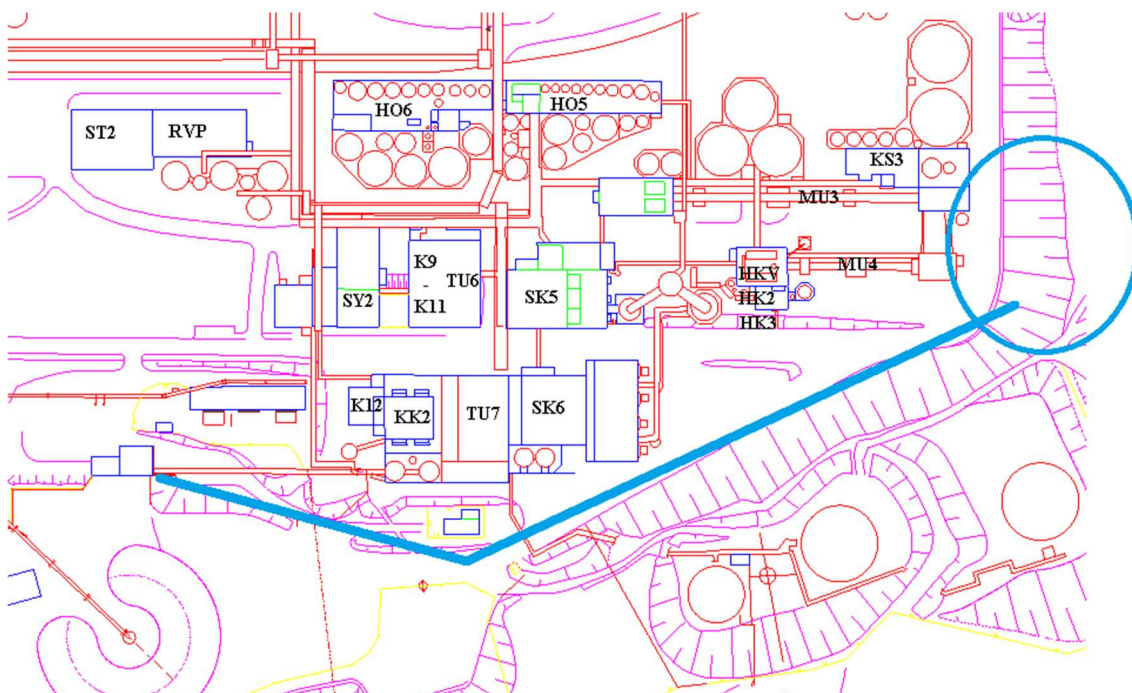
Imatran tehtaiden meesauunien pääpolttoaineena ainoaksi mahdolliseksi jäi siis kuori, joten vanhoihin uuneihin investoidessa se käytännössä tarkoittaa kahden kaasuttimen hankkimista. Synergiaedun hakeminen yhdellä kaasuttimella ei onnistu turvallisuus riskien ja tuotannon säädettävyyden haasteiden vuoksi. Laitekokonaisuuteen kuuluu kuvan 5.5 tapaan polttoaineen kuivain, seula ja murskaimet sekä polttoaineen vastaanottoasema. Kaasuttimia lukuun ottamatta muissa laitteissa tulee miettiä yhdistämistä, jolloin investointikustannusta voidaan pienentää ja samalla mitoituksessa

voidaan ottaa myös huomioon uuden suuremman kapasiteetin meesauunin polttoaineen tarve.



**Kuva 5.5** Meesauuniin integroitu kierto- ja kaasutuslaitteisto. (Andritz 2010, 15)

Viirakuivaimen lämmön hankintaa varten selvitetään Imatran soodakattiloiden savukaasukanaviin sijoitettavien kuumavesilämmönvaihtimien sekä savukaasupesureiden lämmöntalteenoton tehostamisen mahdollisuutta. Lämmin- ja kuumavesijärjestelmän tehokkuutta on syytä tarkastella myös muilta osin, niin tuotannon kuin kulutuksenkin osalta. Nykytilanteessa lämmintä vettä joudutaan ajoittain tuottamaan talviaikaan maakaasulla. Vanhojen uunien yhteyteen rakennettaessa kaasuttimille ja kuivauslaitteistolle on selkeät kuvan 5.6 osoittamat sijoituspaikat meesauunien polttopäiden takana.

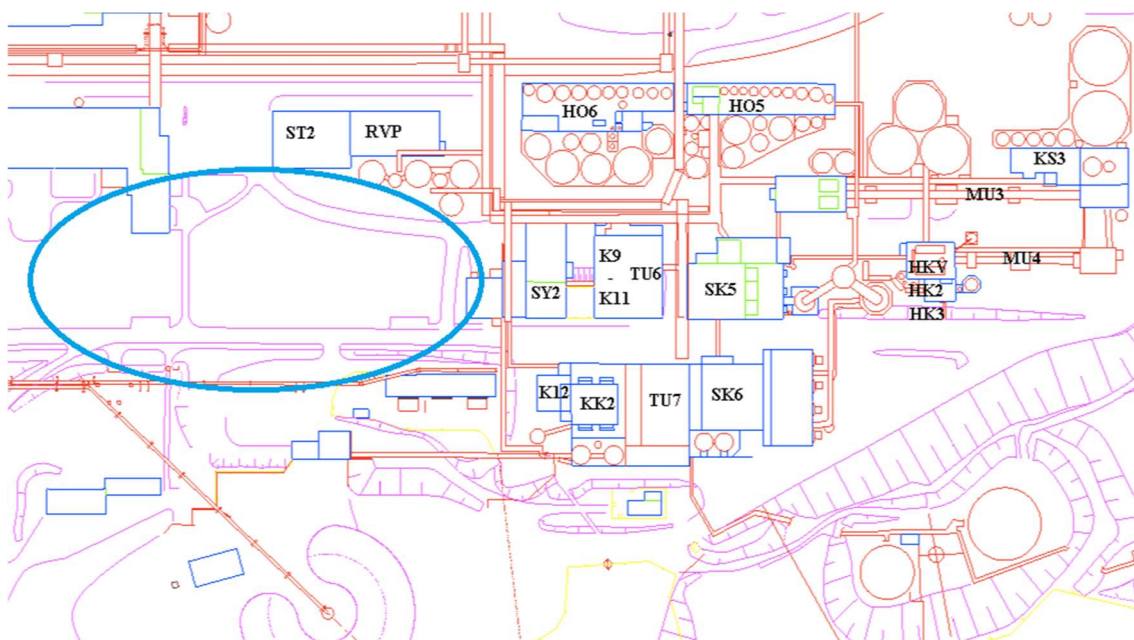


**Kuva 5.6** Poltto- ja kuivauslaitteistojen sijoitus sekä kuorikuljettimet vanhoille meesauuneille.

Polttoaineen siirtoa varten on rakennettava uudet kuljettimet, joiden lähtöpaikkana voidaan käyttää nykyistä kuorikattilan murskahuonetta, johon voidaan tehdä uudelle kuorilinjalle lähtö metalliseulan jälkeen. Murskahuoneen yhteyteen on rakennettava uusi kuorikattilan ostopolttoaineasema kaikissa vaihtoehdoissa ja samalla voidaan tehdä muutokset uusien meesauunien kuorilinjojen osalta. Kuten kappaleessa 4.3 todettiin, kaasutuksessa kuivaukseen tulevan polttoaineen pääjakeen palakoon tulisi olla alle 45 mm, joten metalliseulan jälkeen tulisi rakentaa myös palakokoseula, jolla suuremmat jakeet ohjataan kuorikattilalle. Erillistä murskaa ei välttämättä siis suurelle jakeelle tarvita.

Meesauunien 3 ja 4 väliin jää tilaa uuden meesauuni 5 tarpeisiin, kun kaasuttimien ja kuivaimen suunnittelussa otetaan myös huomioon varaus uudesta uunista. Tällöin siis vanha kaustistamo 3 jäisi käyttöön, mutta mikäli koko valkolipeän valmistus päätetään uusiksi, niin laitteistojen sijoitus tulee vaihtumaan. Kuvan 5.7 alueella on mainiosti soveltuva paikka uudelle valkolipeätehtaalle, jonka vierestä kuorikuljettimetkin jo nykyisellään kulkevat, joten meesauunin polttoaineen vastaanotossa säästytään pitkien uusien kuljettimien rakentamiselta.





**Kuva 5.7** Mahdollisen uuden valkolipeätehtaan sijoitus.

## 5.4 Kannattavuus

Meesauunin polttoainemuutos kiinteisiin biopolttoaineisiin vaatii paitsi merkittävää investointia, mutta kannattavuuden tarkastelussa on otettava huomioon lukuisia tekijöitä, kuten esimerkiksi eri vaihtoehtojen riskit tai vaikutukset koko sellutehtaan kapasiteettiin. Prosessitekniisten muutosten vaikutukset on myös eri vaihtoehdoissa kartoitettava tarkkaan, jotta käyttökustannusmielessäkin merkittävät kohteet ovat tarkastelussa mukana. Vanhojen meesauunien tapauksessa kannattavuuden tarkastelu vaatii siis perehtymistä, jotta otetaan myös huomioon tehdasintegraatin sekä sellutehtaan pitkän aikavälin kehityssuunnitelmat ja löydetään paras vaihtoehto tukemaan tehtaan kehitystä. Imatran tehtailla meesauunien biopolttoainemuutoksen kannattavuudesta tulisi toteuttaa erillinen selvitystyö, jossa hanketta voidaan tarkastella esimerkiksi seuraavien neljän vaihtoehdon kautta:

- VE0: Kapasiteetin nosto meesauunille 3 ja meesauuni 4 jatkaa nykyisellään. Pääpolttoaineena toimii maakaasu.
- VE1: Kapasiteetin nosto meesauunille 3 ja meesauuni 4 jatkaa nykyisellään. Meesauuneihin integroidaan omat kaasuttimet ja yhteinen polttoainekuivain, jolloin pääpolttoaineena toimii kuori.



- VE2: Meesauuni 5 korvaa vanhat meesauunit ja se sijoitetaan nykyisen kaustistamon yhteyteen. Kaasuttimella ja kuivaimella varustettu meesauuni käyttää pääpolttoaineena kuorta.
- VE3: Meesauuni 5 ja kaustistamo 4 korvaavat vanhat osastot. Kaasuttimella ja kuivaimella varustettu meesauuni käyttää pääpolttoaineena kuorta.

Meesauunin biopolttoainehankkeessa tärkeänä osana on muistettava myös ympäristötavoitteet. Pelkkä hankkeen mahdollisimman nopea takaisinmaksu aika ei voi olla investointipäätöksen hyväksymisen tai hylkäämisen perusteena, kun muistetaan globaalit, EU-tason, Suomen sekä Stora Enson ympäristötavoitteet. Suomennettu lainaus Stora Enso (2019): ”Johtava uusiutuvien materiaalien yritys, jolla on pääsy hiilineutraaliin biomassaan, on ainutlaatuisessa asemassa ilmastonmuutoksen torjunnassa.”

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Selluteollisuus on raaka-aineensa ansiosta erinomaisessa asemassa ilmastonmuutoksen torjunnassa sekä fossiilittoman tulevaisuuden luonnissa. Energiaintensiivisen metsäteollisuuden suuryritykset ovat merkittävässä roolissa luomassa omia tavoitteita, jotka tukevat kansallisia sekä globaaleja ympäristötavoitteita. Selluteollisuuden suurimman fossiilisten polttoaineiden käyttäjän meesauunin osalta vaihtoehtoja on useita. Tehtaiden lähetyvillä olevat vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten pikiöljy tai vety, ovat jo nykyisellään pitkälti hyödynnetyt mahdollisissa kohteissa. Koko teollisuutta katsottaessa kiinteät polttoaineet tulevat olemaan lähitulevaisuuden tyypillisin ratkaisu. Polttoaineen riittävyyden kartoittaminen on avainasemassa vaihtoehtojen kartoittamisessa.

Imatran tapauksessa kuori on tällä hetkellä ainoa sopiva vaihtoehto maakaasun korvaajaksi. Kuori tultaisiin siis kuivaamaan ja kaasuttamaan tuotekaasuksi vanhojen meesauunien tai uuden meesauunin käyttöön. Kiinteät biopolttoaineet vaativat tyypillisesti käytettyihin kaasumaisiin ja nestemäisiin polttoaineisiin verrattuna huomattavasti enemmän käsittelyä ja polttoaineiden ominaisuudet ja prosessitekniset vaikutukset tulee ottaa huomioon. Kuori tulisi lisäämään entisestään kalkkikierron fosforikuormaa, joten tulevaisuudessa tulee panostaa muun muassa biolietteen sekä meesauunin sähkösuodintuhkan entistä laajempaan hyötykäyttöön tai mahdollisesti fosforin entistä selektiivisempään hallintaan. Kuoren kuivauksen vaatiman energian hankinta on kartoitettava, jotta varmistetaan valmius edulliseen ja tehokkaaseen ratkaisuun. Kuoren käytön vuoksi polttoaineen hankinnassa on myös kartoitettava lisäpolttoaineen hankintaa höyryntuotannon tarpeisiin ja samalla myös energiatehokkuutta on syytä tarkastella monelta osin, jotta osa lisäpolttoaineesta voidaan korvata esimerkiksi soodakattiloiden polttolipeän kuiva-aineen nostolla.

Investoinnin eri vaihtoehdot tulee kannattavuuden kautta käydä läpi, jotta löydetään pitkällä aikavälillä tehtaan kehitystä parhaiten palveleva ratkaisu. Imatran tehtaiden soodakattiloissa eli sellutehtaan kalleimmissa yksittäisissä osissa olisi selluntuotantoon hyödynnettävissä olevaa kapasiteettia tarjolla ja tämä erittäin houkutteleva mahdollisuus on syytä tarkastella mahdollisimman tarkkaan yhdessä meesauunien tulevaisuuden polttoaineratkaisun kanssa.

## LÄHTEET

Adams Terry 1999. Lime Kiln Principles and Operations [verkkoartikkeli]. [Viitattu 24.7.2019]. Saatavilla: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-2.pdf>

Adams Terry, Aloqaily Arafat 2009. Effects of Alternative Fuel Combustion on Lime Kiln Flames [esitelmä].

Alakangas Eija, Impola Risto 2014. Puupolttoaineiden laatuohje. VTT-M-07608-13 – päivitys 2014 [verkkodokumentti]. [Viitattu 3.7.2019]. Saatavilla: [https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13\\_2014\\_%20update.pdf](https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13_2014_%20update.pdf)

Andritz 2010. Kuoren kaasutus sellutehtaalla. Soodakattilapäivät 27.10.2010, Tampere [esitelmä].

Andritz 2019. Leading technologies for biomass drying [verkkosivusto]. [Viitattu 18.12.2019]. Saatavilla: <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/biomass-handling-systems/biomass-drying>

Baltic Connector 2019. Kaasuputki Siuntio – Inkoo [verkkoesite]. [Viitattu 16.12.2019]. Saatavilla: <http://balticconnector.fi/fi/tyomaa/>

Basu Prabir 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Second Edition. Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-396488-5

Berglin Niklas 2008. Survey of operating experience in five mills [esitelmä]. International Seminar and Workshop on Biofuels in Lime Kilns. Tukholma 09.24.2008.

Blom Roger, Olowson Per 2019. CFD Simulation of Oil and Bark Powder Combustion in a Lime Kiln [verkkodokumentti]. [Viitattu 12.8.2019]. Saatavilla: <http://www.siamuf.se/docs/Blom-Olowson,%20FS%20Dynamic-Sodra.pdf>

Bolhar-Nordenkampf Markus, Isaksson Juhani 2016. Operating Experiences of Large Scale CFB-Gasification Plants for the Substitution of Fossil Fuels [konferenssi]. Saatavilla: <https://www.researchgate.net/publication/304022604>

Doldán J., Pokka O., Salmenoja K., Battegazzore M., Fernandez V., Eluén I. 2011. Evaluation of Sources and Routes of Non-Process Elements in a Modern Eucalyptus Kraft Pulp Mill. O Papel vol. 72, num. 7, pp. 47 - 52 heinäkuu 2011 [verkkoartikkeli]. [Viitattu 9.4.2019]. Saatavilla: [http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/ABTCP/01\\_2011\\_Sources%20of%20NPE%20in%20eucalyptus%20pulp%20mill.pdf](http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/ABTCP/01_2011_Sources%20of%20NPE%20in%20eucalyptus%20pulp%20mill.pdf)

European Commission 2018. In-depth analysis in support of the commission communication com(2018) 773. A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy [verkkodokumentti]. [Viitattu 5.12.2019]. Saatavilla: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com\\_2018\\_733\\_analysis\\_in\\_support\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf)

Francey Sabrina, Tran Honghi 2012. Impacts of burning high-sulphur fuels in lime kilns [verkkoartikkeli]. Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes: VOL.2, NO.3, 2012. [Viitattu 15.5.2019]. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/289175079\\_Impacts\\_of\\_burning\\_high-sulphur\\_fuels\\_in\\_lime\\_kilns](https://www.researchgate.net/publication/289175079_Impacts_of_burning_high-sulphur_fuels_in_lime_kilns)

Gasum 2019. Vaikuta valitsemalla biokaasu [verkkoesite]. [Viitattu 16.12.2019]. Saatavilla: <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/sertifikaattijarjestelma/>

Grace Thomas M., Tran Honghi 2009. The effect of dead load chemicals in the kraft pulping and recovery system [verkkoartikkeli]. Tappi Journal. [Viitattu 15.5.2019]. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/289853467\\_The\\_effect\\_of\\_dead\\_load\\_chemicals\\_in\\_the\\_kraft\\_pulping\\_and\\_recovery\\_system](https://www.researchgate.net/publication/289853467_The_effect_of_dead_load_chemicals_in_the_kraft_pulping_and_recovery_system)

Hyöky Eero 2019. Käyttöinsinööri, Stora Enso Oyj Oulu. Haastattelu 2/2019.

Isaksson Juhani 2007. Meesauunikaasutin [esitelmä]. Soodakattilapäivät 18.10.2007.

Kuparinen Katja, Vakkilainen Esa 2017. Green Pulp Mill: Renewable Alternatives to Fossil Fuels in Lime Kiln Operations [artikkeli]. Lappeenranta University of Technology.

Lehtinen Jere 2019. Prosessi-insinööri, Andritz Oy. Sähköpostiviesti 3.12.2019.

Lindström Mats 2019. Käyttöpäällikkö, Stora Enso Oyj Skutskär. Haastattelu 2/2019

Lundqvist Per 2009. Mass and energy balances over the lime kiln in a kraft pulp mill [diplomityö]. Uppsala Universitet. ISSN: 1650-8300. Saatavilla: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:461011/FULLTEXT01.pdf>

Morf Philipp Oliver 2001. Secondary Reactions of Tar during Thermochemical Biomass Conversion [väitöskirja]. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. [Viitattu 4.7.2019]. Saatavilla: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20371259>

Niemeläinen Mikko 2018. Tall Oil Depitching in Kraft Pulp Mill [diplomityö]. Aalto University, School of Chemical Engineering. Saatavilla: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33676/master\\_Niemel%c3%a4inen\\_Mikko\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33676/master_Niemel%c3%a4inen_Mikko_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Stora Enso 2019. Stora Enso's Policy for Energy and Carbon [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.12.2019]. Saatavilla: [https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Sustainability/Policy-for-Energy-and-Carbon\\_2019.pdf](https://www.storaenso.com/-/media/Documents/Download-center/Documents/Sustainability/Policy-for-Energy-and-Carbon_2019.pdf)

Taylor Kevin 2007. Effects of Non-Process Elements on Kraft Mill Efficiency. PAPTAC Parksville Conference, Huhtikuu 20-21, 2007 [verkkoartikkeli]. [Viitattu 7.5.2019]. Saatavilla: [https://www.industrialresearch.ca/pdf/Effect\\_of\\_Non-Process\\_Elements\\_Kraft\\_Mill\\_Efficiency.pdf](https://www.industrialresearch.ca/pdf/Effect_of_Non-Process_Elements_Kraft_Mill_Efficiency.pdf)

Tran Honghi 2007. Lime Kiln Chemistry and Effects on Kiln Operations [verkkoartikkeli]. [Viitattu 29.7.2019]. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/290320968\\_Lime\\_kiln\\_chemistry\\_and\\_effects\\_on\\_kiln\\_operations](https://www.researchgate.net/publication/290320968_Lime_kiln_chemistry_and_effects_on_kiln_operations)

Tran Honghi 2017. Three Decades of Lime Kiln. Research Highlights of Practical Applications [esitelmä]. International Chemical Recovery Conference.

Tran Honghi 2019. Stora Enson vierailu 12.6.2019. Tukholma.

Tran Honghi, Vakkilainen Esa 2016. The Kraft Chemical Recovery Process [verkkoartikkeli]. [Viitattu 3.12.2019]. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/267565045\\_THE\\_KRAFT\\_CHEMICAL\\_RECOVERY\\_PROCESS](https://www.researchgate.net/publication/267565045_THE_KRAFT_CHEMICAL_RECOVERY_PROCESS)

Tikka Panu, Engdahl Holger, Halinen Esa, Jaakkola Heikki, Jäntti Jouni, Kapanen Jari, Kottila Mika, Lankinen Markku, Laxén Torolf, Lintunen Taina, Nurminen Kalevi, Näsänen Harri, Parviainen Kari, Toropainen Teemu, Vakkilainen Esa 2008. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy (Second Edition). Papermaking Science and Technology. Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-26-4.

Salmenoja K., Poukka O., Battegazorre M. 2009. Management of non-process elements in Eucalyptus kraft pulps mills [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.4.2019]. Saatavilla: [http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ABTCP/14\\_Management%20of%20non-process%20elements%20in%20eucalyptus%20kraft%20mills.pdf](http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/ABTCP/14_Management%20of%20non-process%20elements%20in%20eucalyptus%20kraft%20mills.pdf)

Valmet 2014. Reduce bark into optimally sized particles. Bark crusher [verkkodokumentti]. Julkaistu 01/2014. [Viitattu 9.7.2019]. Saatavilla: <https://www.valmet.com/pulp/wood-handling/bark-handling/bark-crusher/>

Valmet 2017 [1]. Belt dryer for drying biomass like bark, wood chips, sawdust, bagasse etc. [verkkodokumentti]. Julkaistu 5/2017. [Viitattu 3.7.2019]. Saatavilla:

[https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=0695800000bPTKAA2&\\_ga=2.76407125.1942620095.1562176094-839591467.1562176094](https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=0695800000bPTKAA2&_ga=2.76407125.1942620095.1562176094-839591467.1562176094)

Valmet 2017 [2]. Renew the precoat on the lime mud filter during operation [verkkodokumentti]. Julkaistu 11/2017. [Viitattu 3.12.2019]. Saatavilla: [https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=0695800000bP5JAAU&\\_ga=2.111135116.868076789.1575362870-114297923.1559057052](https://valmetsites.secure.force.com/solutionfinderweb/FilePreview?id=0695800000bP5JAAU&_ga=2.111135116.868076789.1575362870-114297923.1559057052)

Valmet 2017 [3]. The next generation LignoBoost – tailor-made lignin production for different lignin bioproduct markets [verkkodokumentti]. Julkaistu 26.5.2017. [Viitattu 20.12.2019]. Saatavilla: [https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/next\\_generation\\_lignoboost\\_whitepaper.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/next_generation_lignoboost_whitepaper.pdf)

Valmet 2018 [1]. Using wood powder as fuel in lime kilns [verkkodokumentti]. Julkaistu 31.8.2018. [Viitattu 3.7.2019]. Saatavilla: [https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/wood\\_powder\\_in\\_lime\\_kilns\\_whitepaper.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/wood_powder_in_lime_kilns_whitepaper.pdf)

Valmet 2018 [2]. Kaustisoinnin ylätasoa säädet [koulutusmateriaali]. Koulutus 10.20.2018.

Valmet 2019. First LignoBoost plants producing large volumes of kraft lignin to the market place [verkkoartikkeli]. [Viitattu 18.12.2019]. Saatavilla: <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/new-technology/PEERS1stLignoBoostPlants/>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2016. 100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiajärjestelmä. Kansalliseen energia- ja ilmastostrategiaan liittyvä tarkastelu [verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 24.11.2016. [Viitattu 14.12.2019]. Saatavilla: <https://tem.fi/documents/1410877/3570111/100+prosenttia+uusiutuvaa+tarkastelu.pdf/8e4ee341-77c5-4447-b6ce-1f2686a3daec/100+prosenttia+uusiutuvaa+tarkastelu.pdf>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030 [verkkodokumentti]. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja Helsinki 4/2017. ISBN: 978-952-327-189-0. [Viitattu 5.12.2019]. Saatavilla: <https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/3506436/Valtioneuvoston+selonteko+kansallisesta+energia-+ja+ilmastostrategiasta+vuoteen+2030.pdf>