

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Polttoaineen kosteuden vaikutus kaasutusprosessin toimintaan

Työn tarkastaja: Juha Kaikko

Työn ohjaajat: Juha Kaikko ja Sanna Hämäläinen

Lappeenranta 8.2.2017

Lauri Kouvo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Lauri Kouvo

Kandidaatintyö 2016

Polttoaineen kosteuden vaikutus kaasutusprosessin toimintaan

36 sivua, 12 kuvaa, 4 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti, TkT Juha Kaikko

Ohjaajat: Dosentti, TkT Juha Kaikko
DI Sanna Hämäläinen

Hakusanat: biomassa, kuori, kaasutus, kosteus, meesauuni

Keywords: biomass, bark, gasification, moisture, lime kiln

Kandidaatintyö käsittelee polttoaineen kosteuden vaikutusta teollisessa kaasutusprosessissa. Työssä keskitytään kuoren leijukerroskaasutukseen meesauunin yhteydessä ja tarkastellaan viirakuivurilla kuivatun kuoren kosteuden vaikutusta prosessiin. Työn tavoite on esitellä teoriaa kaasutuksen taustalla, olemassa olevaa kaasutus- ja kuivaustekniikkaa ja käytännön kosteusmittauksista tehtyjä johtopäätöksiä.

Käytännön mittaukset tehtiin kuorenkaasutuslaitoksella määrittämällä kuoren loppukosteus uunikuivausmenetelmällä. Kuoren loppukosteutta säädettiin viirakuivurin kuivaustehoa muuttamalla ja kosteuden vaikutusta tulkittiin laitoksen prosessinohjausjärjestelmän mittausdatan perusteella. Koeajoissa testatulla korkealla kuiva-ainalueella kosteuden lisääntyminen ei vaikuta ainakaan merkittävässä määrin kaasuttimen tai meesauunin toimintaan. Koeajoissa polttoaineen kulutus jopa hieman väheni. Kuivurilla havaittiin oletetusti primäärilämmön ominaiskulutuksen jyrkkä kasvu kuoren loppukosteutta kasvatettaessa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	6
1.1 Kaasutuksen taustat	6
1.2 Kaasutus nykypäivänä ja tulevaisuudessa	7
1.3 Kuoren kaasutin meesauunin yhteydessä	8
2 Kaasutuksen teoriaa	10
2.1 Kaasutusprosessi	10
2.1.1 Kaasutusreaktorityypit	10
2.1.2 Kaasutuskaasut	12
2.1.3 Petimateriaalin syöttö ja tuhkan poisto	13
2.1.4 Reaktiot ja tuotekaasun koostumus	13
2.1.5 Polttoaineet	16
2.1.6 Tuotekaasun jälkikäsittely	18
2.2 Käyttökohteet	21
3 Polttoaineen käsittely ja kuivaus	22
3.1 Polttoaineen käsittely ennen kuivausta	22
3.2 Polttoaineen kuivaus	22
3.2.1 Eri kuivausmenetelmät	22
3.2.2 Kuiva-aineen mittaus	24
3.2.2.1 Mittausmenetelmät	24
3.3 Kuivurin käyttökokemuksia	25
3.3.1 Havainnot koeajoista	26
4 Polttoaineen kosteuden vaikutus kaasuttimen ja meesauunin toimintaan	28
4.1 Vaikutus kaasuttimeen	28
4.1.1 Havainnot koeajoista	31
4.2 Vaikutus meesauuniin	31

4.2.1	Kalkin laatu	32
4.2.2	Savukaasut	33
4.2.3	Säädettävyys.....	33
4.2.4	Käytännön havainnot	34
5	Yhteenveto	36
	Lähdeluettelo	37

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

T	Lämpötila	[°C, K]
q	Virta, lämpöarvo	[kg/s, m ³ /s][MJ/m ³ , MJ/kg]

Kreikkalaiset aakkoset

η	Hyötysuhde	[-]
---	------------	-----

Alaindeksit

i	Tehollinen
m	Massa
G	Gas
CG	Cold gas

Lyhenteet

ad	Adiabaattinen
AFW	Amec Foster Wheeler
BFB	Kuplapeti, kupliva leijukerros
CFB	Kiertoleijupeti
CFBG	Kiertoleijupetikaasutin
g	Glykoli
HHV	Higher Heating Value
HMP	Matalapainehöyry
i	Ilma, irto
ka	Kuiva-aine
SNG	Synthetic Natural Gas
IGCC	Integrated Gacification Combined Cycle
PA	Polttoaine
PCFBG	Paineistettu kiertopetikaasutin

1 JOHDANTO

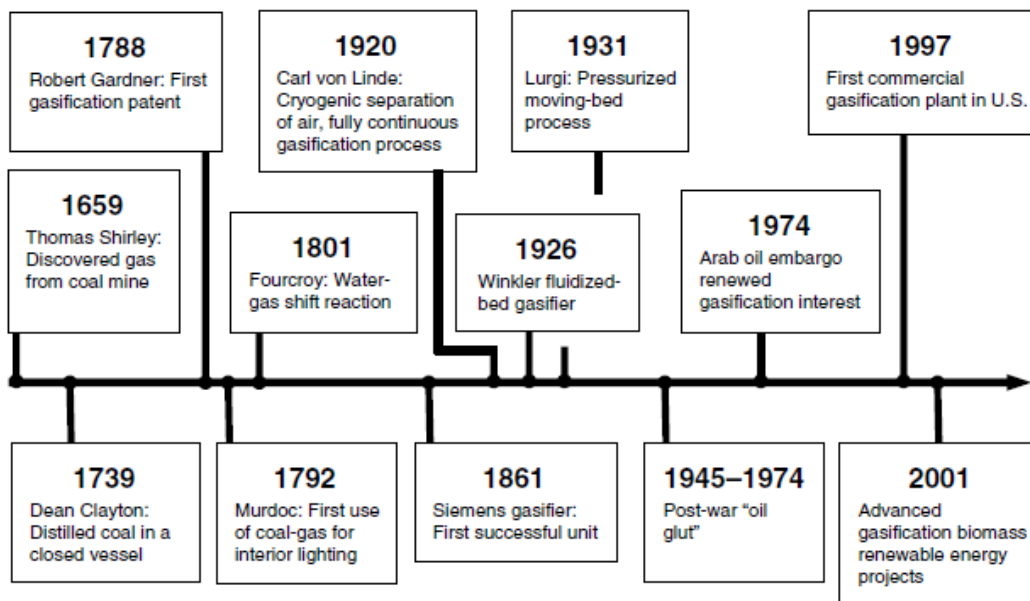
Tässä kandidaatintyössä käsitellään polttoaineen kosteuden vaikutusta teolliseen kaasutusprosessiin. Työn tavoite on esitellä olemassa olevia polttoaineen kuivaus- ja kaasutustekniikoita sekä selvittää kaasutettavan polttoaineen kosteuden merkitystä prosessin toimintaan. Työ keskittyy kiertoleijupetikaasuttimiin (CFBG) ja viirakuivureihin, mutta myös muita tekniikoita esitellään. Työssä analysoidaan myös prosessin toiminta-arvoja erään kuorenkaasutuslaitoksen polttoaineen kosteusmittausten perusteella. Kosteusmittaukset tehtiin standardinmukaisella uunikuivausmenetelmällä ennen ja jälkeen kuivurin. Laitos kaasuttaa viirakuivurilla kuivattua kuorta sellutehtaan meesauunin polttoaineeksi ja työssä selvitetään kosteuden merkitystä erityisesti tämän laitoksen prosessin kannalta. Osa tässä työssä esitetystä tiedosta on kirjoitettu edellä mainitun kaasutuslaitteiston operointikokemusten perusteella.

1.1 Kaasutuksen taustat

Kaasutusprosessi muistuttaa suoraa polttoprosessia, mutta yli-ilman sijasta reaktoriin syötetään alle puolet stökiometriseen palamiseen tarvitusta ilmasta. Tällöin vain osa polttoaineesta palaa ja tuottaa lämpöä loppupolttoaineen kaasutusreaktioille. Tarvittu lämpö voidaan tuoda myös reaktorin ulkopuolelta. Kaasutusreaktioissa syntyy pääasiassa vetyä, hiilimonoksidia, -dioksidia ja hiilivetyjä. (Suomalainen 1992, 27) Nämä yhdisteet johdetaan kaasumaisessa muodossa poltettavaksi tai prosessiteollisuuden tarpeisiin.

Kaasutusprosessin ensi askeleet liittyvät hiiltämällä tuotetun biohiilen tuotantoon 1700-luvulla. Tuolloin sivutuotteena syntynyttä tuotekaasua ei osattu vielä arvostaa, mutta 1800-luvun alussa kivihiiilestä kaasutettua tuotekaasua alettiin käyttää valaistukseen. Sähkövalon ja maakaasuverkon myötä kaasutuksen suosio hiipui hetkellisesti ennen toista maailmansotaa. Tuolloin öljyä jouduttiin esimerkiksi Saksassa korvaamaan synteettisillä menetelmillä ja ainakin Euroopassa liikkui runsaasti kaasutinkäyttöisiä ajoneuvoja. Suomessakin menetelmä on tuttu ja se nimettiin ”häkäpöntöksi”. Sotien jälkeen maakaasua ja öljyä riitti jälleen ja suosio hiipui. Nykyään kaasutuksen suosio on taas kasvamassa erityisesti ympäristöystävällisyytensä vuoksi. Biopolttoaineista ja

erityisesti matalalämpöarvoisista metsäteollisuuden sivuvirroista voidaan tuottaa fossiilisten polttoaineiden tilalle puhtaampaa tuotekaasua. Suomen kaltaiselle primäärienergian tuonnista riippuvalle maalle kaasutus tuo myös mahdollisuuden lisätä energiaomavaraisuutta. Kuvassa 1.1 on esitettyä aikajana kaasutustekniikan kehityksen vaiheista. (Basu 2010, 3-4)



Kuva 1.1 Kaasutuksen merkkipaaluja (Basu 2010)

1.2 Kaasutus nykypäivänä ja tulevaisuudessa

Kaasutuksen käyttöä edistää nykyään sen vähäinen ympäristökuormitus. Nykyään kaasutetaan yhä enemmän biomassaa, jolla korvataan yleensä fossiilisia polttoaineita. Esimerkiksi Lahden kivihilikkattilan yhteydessä biomassasta tuotekaasua tuottava kaasutin on vähentänyt laitoksen CO₂-päästöjä 100 000 tonnilla vuodessa. (Palonen 2015, 20)

Syitä ympäristöystävällisyyteen on monia. Kenties selkein etu on uusiutuvan biomassapolttoaineen hiilineutraalius. Kaasumaisen polttoaineen poltto on ilmasäädön kannalta selkeästi hallitumpaa kuin kiinteän, jolloin päästötkin vähenevät. (Hammo 1992, 95) Lisäksi kaasumaisesta polttoaineesta on helpompi erottaa tuhka ja haitalliset yhdisteet

jo ennen polttoa. Käytettäessä tuotekaasun kuuma- tai kylmäpuhdistusta myös muun muassa hiukkas- ja rikkipäästöt ovat pienemmät kuin suoralla poltolla.

Kaasumaista polttoainetta on myös helpompi hyödyntää esimerkiksi liikennepolttoaineena kuin kiinteää biomassaa. Kaasutuskaasuja voidaan myös jalostaa nestemäiseksi polttoaineeksi. Suomessa uusiutuvien liikennepolttoaineiden tuotannolle on kysyntää ennen kuin sähköautot yleistyvät. Puhdistetun ja metanoidun tuotekaasun koostumus vastaa hyvin läheisesti maakaasun koostumusta. Tämä uusiutuva synteettinen maakaasu eli bio-SNG voidaan esimerkiksi syöttää maakaasuverkkoon, jolloin fossiilisen kaasun osuus vähenee.

Kaasutusprosessit voisivat olla tulevaisuudessa myös osa älykästä energiaverkkoa ja hiilineutraalia power-to-gas-prosessia. Tässä prosessissa esimerkiksi tuulella tai auringolla tuotettua sähköä käytetään vedyn tuottamiseen. Puhtaasti tuotetulla vedyllä voidaan metanoida tuotekaasua synteettiseksi maakaasuksi maakaasuverkkoon. Näin tuotettu bio-SNG toimii energian välivarastona, jollaisia tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti tarvitsemaan.

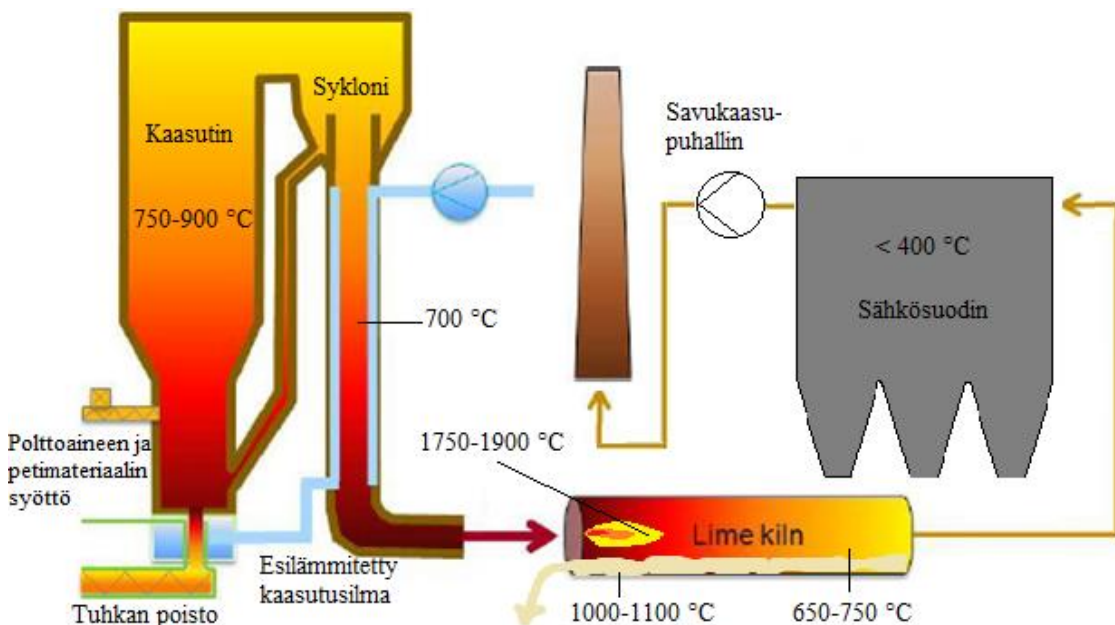
1.3 Kuoren kaasutin meesauunin yhteydessä

Meesauuni (lime kiln) on osa sellutehtaan kemikaalikiertoa ja kuuluu siinä kalkkikiertoon. Pitkässä putkimaisessa meesauunissa kuumennetaan meesaa (CaCO_3) Tuotekaasun käyttö meesauunien polttoaineena on vielä melko kehittymätöntä ja vähäistä.

Tuotekaasun laatu saattaa vaihdella paljonkin, mikä vaikuttaa sen käyttöön erityisesti meesauunissa. Meesauunissa liekin adiabaattisen palamislämpötilan tulee pysyä välillä 1750-1900 °C, jotta säteilylämmönsiirto on riittävää. (Siro 1989) Tuotekaasun laatuun vaikuttavia tekijöitä on monia, mutta meesauunin yhteydessä prosessin tärkeimmät ominaisuudet laadun kannalta ovat kaasutettavan polttoaineen lämpöarvo, kokojakauma ja kosteus. (Kvist 1992, 66). Myös tuhkan ja alkalimetallien pitoisuudet kaasussa tulee pitää alhaisena likaantumisen ja korroosion välttämiseksi.

Polttoaineena toimiva kuori toimitetaan usein tehtaan omalta kuorimolta murskattuna ja puristettuna, joten palakoko voidaan säätää sopivaksi ja tasaiseksi. Kuorimolta tullessaan kuori on kuitenkin useimmiten liian kosteaa kaasutettavaksi (50-60 %-ka), joten se on ensin kuivattava. Kuivaukseen käytetään yleensä tehtaan sekundäärilämpövirtoja kuten savukaasuja ja lämmintä vettä, mutta tarvittaessa myös matalapainehöyryä. Ennen varsinaista kuivuria kuoresta myös yleensä puristetaan vettä pois.

Polttoaineen kosteus vaikuttaa suoraan kaasuliekin adiabaattiseen palamislämpötilaan, kaasun lämpöarvoon ja prosessin hyötysuhteeseen. Huonolaatuinen kaasu näkyy siis suoraan meesauunin kriittisissä lämpötiloissa, jotka heijastuvat kalkin jäännöskarbonaattiin, joka on tärkein kalkin laadun mittari. Huono kalkki puolestaan aiheuttaa ongelmia kaustisoinnissa ja täten muussa sellutehtaan kemikaalikierrrossa. Kosteuden merkitystä meesauunin yhteyteen kytketyssä kaasuttimessa on siis aiheellista pohtia, jotta prosessia voitaisiin ohjata ja suunnitella tehokkaammin. Kokonaisuuden kannalta ei välttämättä ole kannattavaa kuivata kuorta maksimikosteuteen. Kuvassa 1.2 on esitetty yksinkertaistettu meesauunikytkentä esimerkkiarvoin.



Kuva 1.2. Leijupetikaasutin yksinkertaistetulla meesauunikytkennällä (muokattu AFW:n kuvasta)

2 KAASUTUKSEN TEORIAA

Tämä luku sisältää opinnäytetyön teoreettisen osuuden, jossa käsitellään kaasutustekniikan ilmiöitä ja havainnollistetaan olemassa olevaa teknologiaa. Kaasutusta käsitellään tässä luvussa keskittyen yleisesti leijupetikaasuttimiin (BFBG ja CFBG) opinnäytetyön loppuosan keskittyessä kuoren kaasutukseen BFB/CFB-kaasuttimella. Tässä luvussa kaasutusprosessilla käsitetään prosessin vaiheita syötetystä polttoaineesta tuotekaasun loppukäyttöön. Prosessi sisältää useimmiten myös polttoaineen esikäsitelyä ja kuivauksen, jota käsitellään luvussa 3.

2.1 Kaasutusprosessi

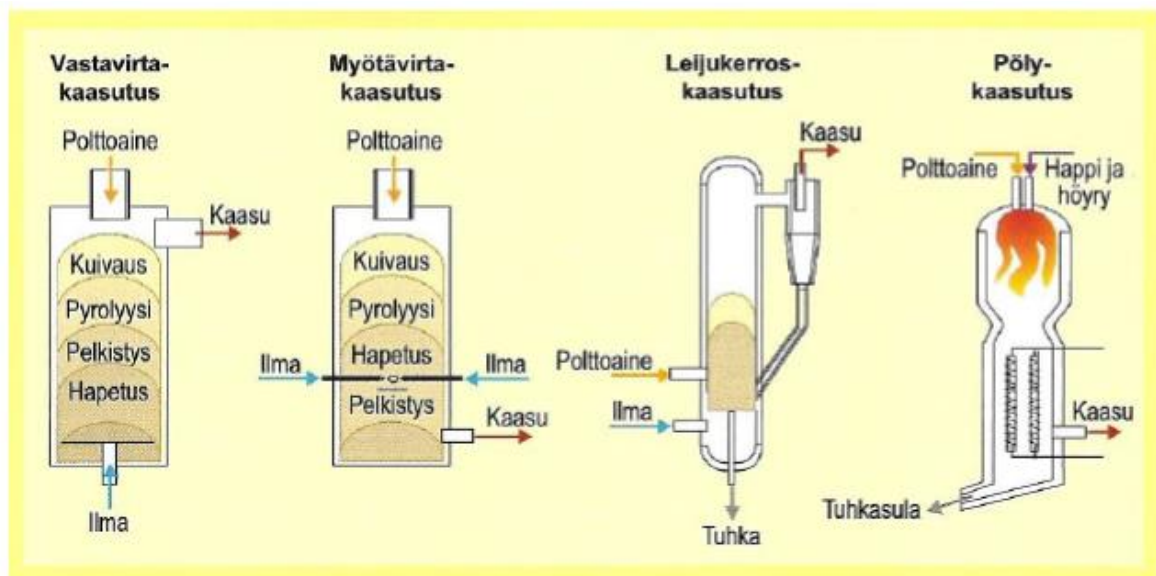
Kaasutusprosessi on useimmiten kiinteässä muodossa olevan orgaanisen materiaalin muuntamista kaasumaiseen muotoon. Myös nestemäisiä polttoaineita kuten öljyä ja mustalipeää voidaan kaasuttaa. Prosessille on ominaista korkea lämpötila (biomassalle noin 750-950 °C), joka saadaan suorassa kaasutuksessa aikaan polttamalla polttoainetta kaasutusreaktorissa ali-ilmalla. Ilmaa yleensä syötetään noin 20-50% stökiometrisen palamisen vaatimasta määrästä. (Sarkomaa & Punnonen 1992) Tällöin syntyy erilaisten kemiallisten reaktioiden kautta tuotekaasua, jonka ominaisuuksia käsitellään muun muassa luvussa 2.1.4. (Suomalainen 1992, 27) Lämpö tai osa siitä voidaan myös tuoda reaktorin ulkopuolelta, jolloin puhutaan epäsuorasta kaasutuksesta.

2.1.1 Kaasutusreaktorityypit

Kaasutusprosesseja voidaan jaotella monilla kriteereillä mutta karkein jako voidaan tehdä kaasun ja kiinteän aineen keskinäisen liiketilän perusteella kiinteäkerros-, leijukerros- ja pölykaasutukseen. Jako voidaan suorittaa myös kaasutusolosuhteiden perusteella. Tällöin otetaan huomioon muun muassa onko prosessi paineellinen vai ilmanpaineinen, tuodaanko prosessiin lisälämpöä ja minkälaista kaasutuskaasua käytetään. (Sarkomaa 1992, XVII-XIX) Varsinkin suuremmat kaasuttimet valmistetaan tapauskohtaisesti saatavilla olevan polttoaineen ja tuotekaasun käyttötärpeen mukaan. Tästä syystä kaasutusreaktoreiden tekninen toteutus on todella vaihtelevaa.

Kaasutusprosessi koostuu neljästä päävaiheesta: kuivuminen, pyrolyysi, kaasutus (pelkistys) ja palaminen (hapetus). (Kara et al. 1999, 216) Polttoainepartikkeli käy läpi nämä vaiheet, joiden järjestys polttoaineen kulkusuunnassa riippuu käytetystä kaasutustekniikasta. Kaasutusvaihe voidaan jakaa vielä jäännöshiilen ja vedyn kaasutusreaktioihin, joista lisää tietoa luvussa 2.1.4.

Myötävirtakaasutuksessa vaiheet tapahtuvat edellä mainitussa järjestyksessä, kun taas vastavirtakaasutuksessa kaasutusreaktio tapahtuu ennen palamista. Vastavirtakaasutus on ollut vallitseva teknologia pitkään muun muassa paremman kemiallisen hyötysuhteensa vuoksi. (Sarkomaa 1992, XXIII) Leijukerroskaasuttimessa edellä mainitut reaktiot tapahtuvat samanaikaisesti reaktorin koko tilavuudessa hiukkasten leijuessa kaasutusilman vaikutuksesta. (Suomalainen 1992, 30) Sama koskee pölykaasutusta, jossa polttoaine syötetään kaasuttimeen pulverimaisessa muodossa. Eri reaktorityyppejä on havainnollistettu kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Kaasutusreaktorityyppejä (Energia Suomessa 2004)

Tämän työn rajauksen kannalta tärkeimmät menetelmät ovat kupliva leijupeti- (BFB) ja kiertoleijukaasutus (CFB) ja niiden eri sovellutukset käytetyn polttoaineen, kaasutuskaasun ja tuotekaasun käyttökohteen kannalta. Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä polttoaineita ja lämpöarvoja eri kaasutuskaasuilla ja reaktorityypeillä.

Taulukko 1 Eräiden kaasutusreaktoreiden tuotekaasun lämpöarvoja (Vakkilainen, Punnonen & Sarkomaa, AFW, Valmet)

Reaktorityyppi	Polttoaine	Kaasutuskaasu	Lämpöarvo [MJ/m ³ n]
Ilmanpaineinen CFBG ja BFBG	Kuori	Ilma	3-7
	REF-jäte	Happi ja höyry	1,6-2,4
	Pelletti ja hake	Ilma ja höyry	4-6
Paineellinen CFBG ja BFBG	Kivahiili	Happi	5-6
	Biomateriaali	Happi ja höyry	5,5-13
Pölykaasutin	Kivahiili	Happi	9,5-11,7
	Öljy	Happi ja höyry	10,9
Vastavirta	Hiili	Ilma	4,6-5,7
Myötävirta	Hiili	Ilma	6

2.1.2 Kaasutuskaasut

Kaasutuskaasulla tarkoitetaan reaktoriin syötettävää happipitoista kaasuseosta, joka toimii myös leijuttavana kaasuna leijupetikaasuttimissa. Kaasutuskaasu on yksinkertaisimmillaan ilmaa, joka yleensä esilämmitetään joko tuotekaasun lämmöllä tai muulla prosessilämmöllä. Pelkkää ilmaa syötettäessä tuotekaasun lämpöarvo jää matalaksi (3-7 MJ/m³n) mukana kulkeutuvan laimentavan typen vuoksi. (Kara et al. 1999, 217) Ilman lisäksi monesti syötetään höyryä, joka tuo prosessiin lämpöä ja osan reaktioiden tarvitsemasta vedestä. (Suomalainen 1992, 29)

Mikäli tahdotaan parempi lämpöarvo tuotekaasulle, voidaan käyttää happikaasutusta. Happikaasutus tarkoittaa puhtaan hapen tai happi-höyry-seoksen käyttämistä kaasutuskaasuna ja tällöin tuotekaasun lämpöarvoksi voidaan saada 7-15 MJ/m³n. (Ibid, 216) Happikaasutus on kalliimpaa happitehtaan korkean investointikustannuksen vuoksi, mutta monesti lämpöarvon paraneminen maksaa investoinnin takaisin.

2.1.3 Petimateriaalin syöttö ja tuhkan poisto

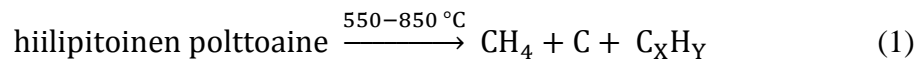
Petimateriaalilla tarkoitetaan inerttiä hienojakeista materiaalia, jonka muodostamassa leijupedissä polttoaine palaa ja kaasuuntuu kun kyseessä on BFB- tai CFB-kaasutin. Materiaali ja sen palakoko valitaan siten, että BFB-kaasuttimessa materiaali muodostaa kuplivan leijupedin tai CFB-kaasuttimessa tempautuu polttoaineen mukana koko kaasuttimen tilavuuteen. Petimateriaalin tulee kestää myös kaasuttimen korkea lämpötila. Petimateriaali on yleensä hiekkaa, joka sisältää (dolomiitti)kalkkia. Näiden lisäaineiden tarkoitus on sitoa reaktorissa syntyvää rikkiä. Kalkkikivi myös toimii reaktorissa katalyyttinä parantaen hiilen konversiota. (Suomalainen 1992, 32) Petimateriaali voidaan syöttää erillisellä ruuvilla tai polttoaineen syöttöruuville tietyin aikaväleihin tai pedin muodostaman paine-eron perusteella. Petimateriaali poistuu reaktorin pohjalta tuhkan mukana.

Myös tuhka poistetaan ajan tai paine-eron perusteella automaattisesti. Paine-erolla toimiva järjestelmä käynnistää tuhkanpoistoruuvien pedin ylä- ja alapuolen välillä vallitsevan paine-eron kasvaessa yli tietyn rajan. Kaasutin tulee suunnitella ja sitä tulee ajaa siten, että pedin lämpötila ei ylitä tuhkan sulamispistettä. Mikäli tuhka pääsee sulamaan ja jähmettymään, se sitoo samalla petimateriaalia muodostaen kiinteän sementtimäisen paakun. Tätä kutsutaan sintraantumiseksi ja se aiheuttaa lähes varmasti ongelmia prosessissa tai jopa kaasuttimen väliaikaisen alasajon. Tuhka voidaan tosin poistaa myös sulana, mutta tuolloin täytyy varmistua sen pysymisestä sulana (Kara et al. 1999, 218).

2.1.4 Reaktiot ja tuotekaasun koostumus

Kaasuttimessa tapahtuu lukemattomia reaktioita, joista määrällisesti merkittävimpiä (reaktioyhtälöt 1-6) on listattu alle. Osa reaktioista on yhdensuuntaisia, mutta osa palautuvia ja riippuvaisia muun muassa lämpötilasta ja paineesta. Tästä syystä eri kaasuttimien tuotekaasujen koostumus vaihtelee.

Pyrolyysi



Jäännöshiilen kaasutus



Vetykaasutus

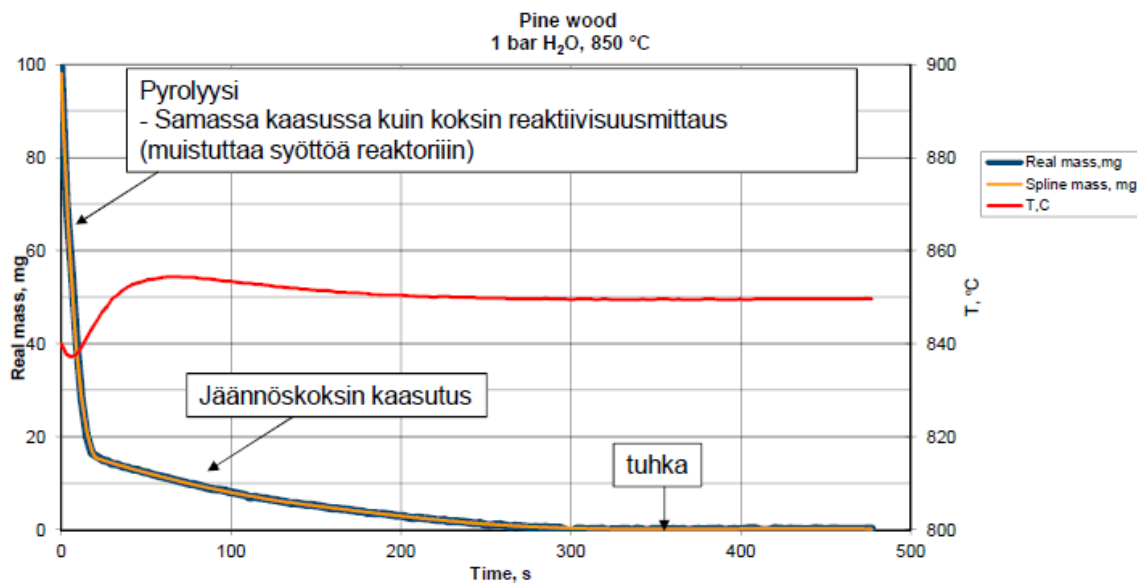


Palaminen



Reaktio 1 eli primääripyrolyysi sisältää metaanin (CH₄) ja korkeampien hiilivetyjen kuten tervojen vapautumisen 550-850 °C lämpötilassa. Osa haihtuvista aineista reagoi vielä lämmön vaikutuksesta edelleen sekundääripyrolyysireaktioissa. Suuri osa epästabiileista hiilivedyistä ja tervoista (C_xH_y) hajoaa (krakkautuu) lyhyemmiksi hiilivetyketjuiksi kuten metaaniksi. (Suomalainen 1992, 29) Pyrolyysi on kaasuttimessa tapahtuvista reaktioista ylivoimaisesti nopein, kuten kuvasta 2.2 nähdään.

Jäännöshiilen reaktiot, eli varsinaiset kaasutusreaktiot, 2-4 tapahtuvat huomattavasti hitaammin ja rajoittavat kaasuttimen kapasiteettia mikäli tahdotaan minimoida hiilihäviöt. Nämä reaktiot vaativat korkean lämpötilan edetäkseen tuotekaasun kannalta edulliseen suuntaan eli häkäkaasun suuntaan. (ibid, 30)



Kuva 2.2 Polttoaineen massa ajan funktiona (VTT)

Reaktio 5 eli vetykaasutus on puolestaan eksoterminen ja tuottaa osan jäännöshiilen reaktioiden tarvitsemasta lämmöstä. Loput lämmöstä tuodaan höyryn mukana ja palamisreaktiolla 6.

Palamisreaktion ja reaktion 4 tuottaman hiilidioksidi hidastaa muita kaasutusreaktioita. Myös itse tuotekaasujen suuri osapaine hidastaa luonnollisesti reaktioita. Esimerkiksi 30 % vetypitoisuus reaktioalueella voi hidastaa kaasutusreaktioita jopa 15 kertaisesti. (Basu 2010, 124)

Tuotekaasu koostuu pääasiassa edellä mainittujen reaktioiden tuotteista ja kaasutusilman mukana tuodusta laimentavasta typestä. Tuotekaasusta voidaan mitata reaaliaikaisesti eri kaasujen osuudet ja täten laskennallisesti määrittää lämpöarvo. Reaaliaikainen lämpöarvo voidaan myös määrittää polttamalla tuotekaasua kalorimetrissä. Eri polttoaineilla toimivien kaasuttimien tuotekaasujen mitattuja koostumuksia on koottuna taulukkoon 2. Osassa kaasuttimista metaani (CH₄) on sisällytetty hiilivetyihin (C_xH_y). Tuotekaasu sisältää myös vaihtelevia määriä epäpuhtauksia kuten tuhkaa ja alkalimetalleja, joista puhutaan seuraavissa luvuissa.

Taulukko 2 Tuotekaasujen koostumuksia (AFW, Vähävihu)

Tyyppi	Polttoaine	CO	C _x H _y	CH ₄	H ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O
CFB (O ₂ /H ₂ O)	Biomassa	17	7		21	22		33,0
CFB (Ilma)	Biomassa	14,3	7,3		9,1	13,4	38,3	17,6
Vastavirta	Turve	16,1-28,8		2,0-3,0	16,7-19,2	9,0-14,3	42,5-50,9	17-52
Myötävirta	Puuhake	17,1-20,4		2,6-4,7	8,2-14,9	12,5	49,5-52,7	

2.1.5 Polttoaineet

Kaasuttimen polttoaineena voidaan käyttää lähes mitä vain hiilipitoista polttoainetta tai jätettä. Rajoittavina tai mitoittavina tekijöinä polttoaineelle ovat pääasiassa sen palakoko (reaktiopinta-ala), haihtuvat aineet (reaktionopeus) ja kosteus. (Basu 2010, 72-73) Tuotekaasun puhdistuksen ja käytön kannalta merkityksellisiä ovat polttoaineen reaktioiden myötä syntyvät tuhka, alkalimetallit (kuumakorrosio), terva (tukkeumat) ja happamat yhdisteet. Polttoaineeksi kelpaa siis sekä kiinteä että nestemäinen polttoaine. Erityisesti leijukerrokskaasutuksen suurimpia etuja on sen monipuolinen polttoainevalikoima ja toiminta alhaisen lämpöarvon polttoaineilla. (Basu 2010, 75)

Nestemäisiä ja pulverimaisia polttoaineita kuten öljyä ja kivihiihtä kaasutetaan pääasiassa pölykaasutusmenetelmällä. Kiinteä polttoaine kuten biomateriaali kaasutetaan puolestaan pääasiassa leijukerrokskaasuttimissa tai vastavirtakaasuttimissa.

Leijukerrokskaasutukselle ideaalisen polttoaineen ominaisuuksia:

- Korkea kuiva-ainepitoisuus (> 90 %-ka)
- Suuri haihtuvien osuus
- Tasainen ja pieni palakoko
 - Puu < 3 mm ja kuori < 12 mm (Kvist 1992, 55)
- Korkea lämpöarvo
- Vähäinen tuhkapitoisuus
- Vähäinen alkalimetallien muodostus (Na ja K < 0,024-0,1 ppm) (Kurkela 1996, 31)
- Vähäinen tervojen muodostus
 - SNG:lle < 0,1 g/m³n ja moottoripolttoaineille < 50-100 g/m³n (Milne et al. 1998)
- Vähäinen rikki-, typpi- ja klooripitoisuus
- Vähän hiekkaa ja muita vierasaineita

Mitä suurempi osuus polttoaineesta on haihtuvia yhdisteitä, sitä nopeampi on kaasutusreaktio. Tällöin polttoainepartikkelin viipymäaika reaktorissa lyhenee ja pienentää näin kaasuttimen dimensioita. Biopolttoaineissa on 70-90 massaprosenttia haihtuvia aineita, joka parantaa niiden kaasutusominaisuuksia. Kappaleessa 2.1.4 on käsitelty enemmän kaasutusreaktioita ja niiden nopeutta.

Alkalimetallit aiheuttavat tuotekaasun käyttökohteessa kuumakorroosiota. Erityisesti kaasuturbiiniprosessit ovat herkkiä alkalimetalleille turbiinisiipien korrodoitumisen vuoksi. Kirjallisuudessa mainitaan usein 0,024 ppm maksimipitoisuudeksi alkalimetalleille. Toisaalta VTT:n tutkimuksen mukaan pitoisuus saisi olla jopa 0,1 ppm. (Kurkela 1996, 32) Alkalimetallien vaikutusta tuotekaasulla toimivassa meesauunissa ja sellutehtaan kemikaalikierrossa tutkitaan myös, mutta tarkkaa rajaa ei ole asetettu.

Tuotekaasussa saattaa olla jopa 30 % tervoja, mutta korkeissa lämpötiloissa tervojen krakkauduttua niitä jää jäljelle vain muutamia prosentteja. Tervoilla tarkoitetaan runsasta määrää erilaisia hiilivetyketjuja, kuten bentseeniä, naftaliinia ja toluenia. Tervat aiheuttavat tahmaisuutensa vuoksi ongelmia erityisesti tuotekaasun puhdistuksen yhteydessä. (Kurkela 1996, 17-21) Tervat voivat myös kondensoitua tai kertyä laitteiston sisäpinnoille. (Alén 2011) Tervojen muodostus voi olla joissain käyttökohteissa suurin ongelma tiettyjen polttoaineiden, kuten eukalyptuksen kanssa. Esimerkiksi Thaimaassa toimivan sellutehtaan voimalaitosinsinöörin mukaan eukalyptuksen kuori soveltuu huonosti CFB-tyyppisen kaasuttimen polttoaineeksi juuri tervojen muodostuksensa vuoksi. Kyseisellä laitoksella eukalyptuksen kuorta kaasutetaan noin 20-30 % kosteudessa ja kuori kuivataan rumpumallisessa kuivurissa fossiilisella kaasulla. Laitoksen edustajan mukaan myös rikkipäästöt ja alkalimetallit ovat tuottaneet ongelmia.

Rikki-, typpi ja kloori voivat muodostaa happamia yhdisteitä, kuten rikkihappoa, typen oksideita ja suolahappoa, veteen liuetessaan. Nämä yhdisteet aiheuttavat laitteistossa kondensoituessaan korroosiota ja ympäristöön päästessään hapanta laskeumaa. (Huhtinen et al. 2000, 92-93) Rikin aiheuttama korroosio vältetään normaalissa ajotilanteessa pitämällä lämpötila riittävästi yli rikkihapon kastepisteen. Tuotekaasuputkisto voidaan myös eristää sisäpuolelta keraamisella materiaalilla, joka eliminoi rikin aiheuttaman korroosion. (Pakkanen 2016)

Meesauunin polttoaineena käytettävän polttoaineen tulisi sisältää mahdollisimman vähän raskasmetalleja ja muita vierasaineita. Vierasaineet päätyvät kalkin mukana tehtaan kemikaalikiertoon ja muun muassa lisäävät energian kulutusta jäädessään niin sanotusti kuolleeksi kuormaksi prosessiin. (Hämäläinen 2016)

Taulukko 3 Polttoaineiden ominaisuuksia (Alakangas 2000, Huhtinen et al 2000, Kurkela 1996, Alén 2011)

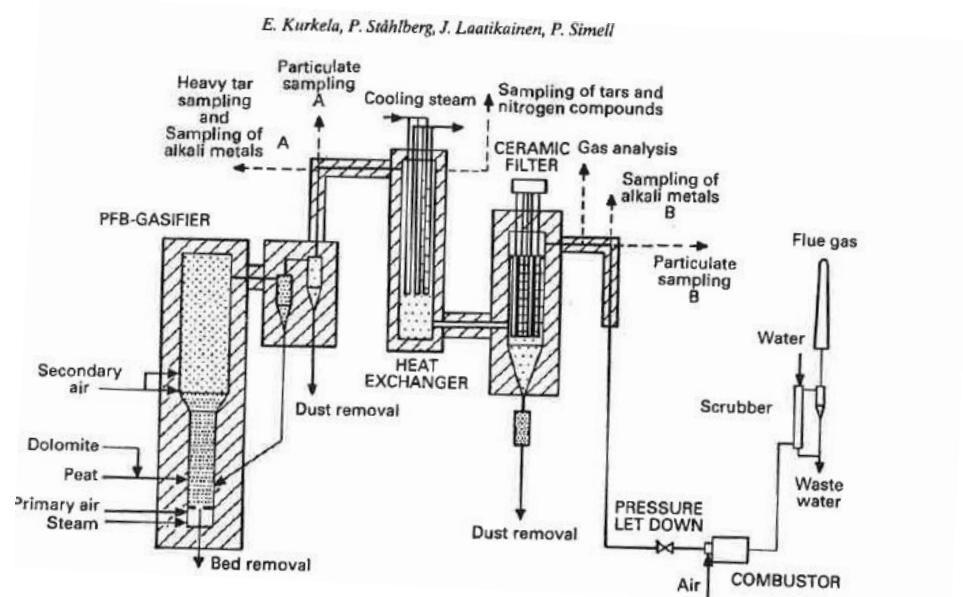
Polttoaine	Märkäkuorittu kuori		Mänty puru	Metsätähdehake	Jyrsinturve	Suomalainen mustalipeä	REF I	Kivihiili
	Havu	Koivu						
Kosteus [%]	60-85	65-70	50-55	50-60	46	70-80	9,1	9-10
Haihtuvat [%-ka]	71,8	70-80	83,1	79,3	65-70	80	70-86	27-33
Tehollinen lämpöarvo	18,6-20 [MJ/kg]	22,7 [MJ/kg]	19 [MJ/kg]	19,3 [MJ/kg]	3,24 [GJ/i-m ³]	11,7 [GJ/t-ka]	20,8 [GJ/t]	25,2 [GJ/t]
Tuhka [%-ka]	1,7-2,8	1,6	0,08	1-6	4-6	44,8-55,8	5,9	8,5-14
Na [%-ka]					0,007	19-21,6	0,002-0,0035	0,012
K [%-ka]	0,29	0,37			0,02	1,4-3,4	0,001-0,0025	0,003
S [%-ka]	0,03	0,0341	0	0,02	0,05-0,3	4,2-4,8	0,16	0,5-3
Cl [%-ka]	0,0085-0,0279		<0,005	0,0076		0,8-3,7	0,19	< 0,1
N [%-ka]	0,3-0,5	0,8	0,08	0,4	0,6-3	0,1-0,2	0,63	0,8-1,2

2.1.6 Tuotekaasun jälkikäsittely

Tuotekaasu voidaan syöttää polttoprosessiin raakana suoraan reaktorista, mutta monessa käyttökohteessa sitä on ensin käsiteltävä. Jälkikäsittely on tarpeen esimerkiksi mikäli tuotekaasun puhtaus tai lämpöarvo ei ole riittävä tai sen lämpötila on liian suuri käyttökohteeseen. Esimerkiksi maakaasuverkkoon syötettävän tuotekaasusta valmistetun synteettisen maakaasun tapauksessa kaikki edellä mainitut ominaisuudet korjataan jälkikäsittelyssä. Meesauunin yhteydessä tuotekaasua puolestaan ei käsitellä syklonin lisäksi mitenkään.

Jälkikäsitelyn ensimmäinen vaihe on erityisesti leijukerroskaasutuksessa syklonipuhdistus. Sykloni on alaspäin kapeneva kartiomainen kammio, jossa suurimmat hiukkaset ja mahdollinen petimateriaali erotellaan tuotekaasusta tangentiaalisen sisääntulovirtauksen aiheuttaman pyörteen avulla. Syklonin etuja ovat lämpökestävyys ja edullisuus ja haittoina ovat muun muassa suurehko painehäviö ja huono pienten partikkelien suodatus. (Kouvo 1992, 147) Syklonin erottelukykyä voidaan parantaa ainakin akustisella agglomeroinnilla, jossa ääniaalloilla pyritään törmäyttämään hiukkasia suuremmiksi partikkeleiksi. (Kouvo 1992, 153-154)

Mikäli tuotekaasua ei ole loppukäytön, kuten kaasuturbiinikäytön, vuoksi tarve jäädyttää alle 500 °C, käytetään kuumapuhdistusmenetelmänä monesti keraamisia kynttiläsuodattimia ja mahdollista kiertopetiperiaatteella toimivaa rikinpoistoa. (Huhtinen et al. 2013, 229) Kynttiläsuodattimen teho perustuu huokoisen keraamisen materiaalin (esimerkiksi piikarbidi tai aluminosilikaatti) materiaalin päälle muodostuvan polykakun erottelukykyy. Menetelmän etuja ovat pientenkin hiukkasten erottelukyky ja keraamisen materiaalin lämmönkestävyys. Haittana on mahdollisten tervojen aiheuttama likaantuminen. (Kouvo 1992, 151-153) Kuvassa 2.4 on esitetty yksinkertaistettu kuumapuhdistuksella varustettu kaasutusprosessi.



Kuva 2.3 VTT:n kuumapuhdistuksella varustettu PCFBG-yksikkö (VTT)

Höyrystyneiden alkalimetallien poisto on suoritettava tuotekaasun käyttökohteen korroosion ja vierasaineiden haittojen minimoimiseksi. Alkalimetallit ovat yleensä natrium- ja kaliumyhdisteitä, joita voidaan neutraloida kuumasta kaasuvirrasta siihen syötettävillä sorbenteilla. (Kouvo 1992, 154)

Tuotekaasu voidaan puhdistaa myös kylmäpuhdistusmenetelmillä. Kylmäpuhdistuksessa tuotekaasu jäädytetään esimerkiksi alle 150 °C lämpötilaan ja puhdistetaan ainakin vesipesurilla ja rikinpoistoyksiköllä. (Kaikko & Vakkilainen 2016, 50) Vaikka tuotekaasun tuntuva lämpö saadaankin talteen, menetetään tuotekaasun kylmäpuhdistuksessa osa syötetystä energiamäärästä. Menetelmä on myös monimutkaisempi ja kalliimpi kuin nykypäivän kuumapuhdistusmenetelmät, joten sen käyttö tulee jatkossa vähenemään. Ongelmaksi voi myös muodostua likaisten pesuvesien käsittely. Etuna menetelmässä on saavutettu hyvä puhtaustaso. (Kouvo 1992, 155)

Viimeisenä vaiheena jälkikäsittelyssä on tarvittaessa suoritettava metanointi. Metanointi tarkoittaa tuotekaasun sisältämän hiilimonoksidin muuntamista vedyn avulla metaaniksi ja vedeksi reaktioyhtälön 7 mukaisesti.



Metanointi korottaa tuotekaasun lämpöarvoa (ilmakaasutuksella 3-7 MJ/m³n), jolloin kaasun koostumus vastaa hyvin läheisesti maakaasun koostumusta ja lämpöarvoa 35,3 MJ/m³n. (Huhtinen et al. 2000, 45) Tarvittava vety voidaan tuottaa esimerkiksi elektrolyysillä. Näin tuotettu synteettinen maakaasu voi kelvata maakaasuverkkoon syötettäväksi. Metanaatio on eksoterminen reaktio ja siitä voidaan ottaa lämpöä talteen.

2.2 Käyttökohteet

Kaasuttamalla tuotettua tuotekaasua voidaan käyttää sekä poltto- että raaka-aineena teollisuudessa. Yksi ensimmäisistä käyttökohteista kaasutuskaasulle oli kaasukäyttöiset katulamput ja puuttuvan maakaasuverkon korvaaminen. Maailmansotien ja öljykriisien aikaan kaasuttamalla on korvattu fossiilisten polttoaineiden huonon saatavuuden ja korkean hinnan vuoksi liikenne- ja teollisuuspolttoaineita. (Basu 2010, 3)

Nykyään fossiilisten polttoaineiden hinta tai saatavuus on harvoin syy kaasutukselle. Kaasutus valikoituu polttoaineeksi lähinnä sen teknisten ominaisuuksien ja ympäristöystävällisyyden vuoksi. Ympäristöystävällinen ja energiatehokas kaasutuskombivoimalaitos (IGCC) on yksi lupaavimmista käyttökohteista. (Basu 2010, 1) Kaasutusreaktoreita rakennetaan myös olemassa olevien voimakattiloiden yhteyteen korvaamaan esimerkiksi osa hiilen poltosta biomassalla. (Isaksson 2014) Ainakin öljyä ja turvetta kaasuttamalla valmistettua tuotekaasua on käytetty ja käytetään edelleen myös raaka-aineena kemian- ja metalliteollisuuden prosesseissa. Esimerkiksi Oulussa on tuotettu ammoniakkia näistä polttoaineista. (Koljonen & Kurkela 1990, 364)

Tulevaisuudessa kaasuttamalla valmistettua synteettistä maakaasua tullaan mahdollisesti käyttämään muun muassa energian välivarastointiin power-to-gas tekniikoilla. Power-to-gas tarkoittaa esimerkiksi vedyn valmistamista aurinkovoimalla tuotetulla sähköllä ja sen käyttämistä tuotekaasun metanointiin. Tulevaisuudessa käyttökohde voisi olla myös Fisher-Tropsch-menetelmällä valmistettu nestemäinen biopolttoaine. Tätä tekniikkaa on demonstroitu esimerkiksi Varkaudessa hyvällä menestyksellä. (Palonen 2015, 32)

Ainakin biomassasta kaasutetun synteettisen maakaasun valmistaminen on tämän työn kirjoitushetkellä vielä kannattamatonta öljyn ja maakaasun hinnan ollessa alhainen. Biokaasun tuotannossa nykyisellään käytettävä mädätys on toistaiseksi kannattavampaa, mutta raaka-ainetta on saattavilla rajoitetusti. Mädättämällä valmistettu biokaasu on pääasiassa metaania ja helpommin puhdistettavissa. Kaasutuksen kannattavuus mädätykseen verrattuna kärsii myös polttoaineen hankinnan kustannuksien vuoksi. Mädatettäväksi toimitettava materiaali on useimmiten jätettä, jonka vastaanottamisesta ja käsittelystä saadaan korvausta toisin kuin yleensä kaasutuksessa. (Arala 2016)

3 POLTTOAINEEN KÄSITTELY JA KUIVAUS

Kaasutusreaktorissa polttoaineen oikea kokojakauma ja kosteus ovat suuressa roolissa. Prosessin ohjattavuuden kannalta on tärkeää, että nämä ominaisuudet pysyvät tasaisina, jolloin pystytään tuottamaan tasalaatuista tuotekaasua. Polttoainetta on siis useimmiten käsiteltävä ennen kaasutinta käsittäen kuorta kaasuttaessa yleensä seulonnan, murskauksen, revinnän, puristuksen, metallien poiston ja kuivauksen. Osa tämänkin luvun tiedoista perustuu erään viirakuivurilaitteiston käyttökokemuksiin.

3.1 Polttoaineen käsittely ennen kuivausta

Sellutehtaan kuorimarummulta tuleva kuori on palakooltaan suurta ja märkää. Kuori on siis ensin murskattava ja revittävä, jotta kuori olisi ideaalista kuivausta ja kaasutusta varten. Osa kosteudesta poistetaan jo ennen varsinaista kuoren kuivuria puristamalla. Tällöin kuoren kuiva-ainepitoisuus nousee kuoren tyypistä riippuen noin 20-35 prosentista yli 35-50 prosenttiin. (Huhtinen et al. 2000, 73)

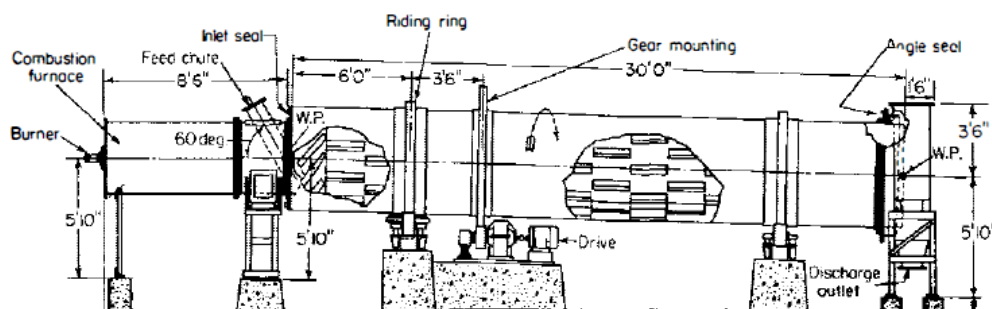
3.2 Polttoaineen kuivaus

Kaasuttimen hyvän toiminnan takaamiseksi on polttoaineen oltava riittävän kuivaa. Eri lähteiden perusteella kuiva-ainepitoisuuden tulee olla vähintään 70-75 % (Siro 1989), jotta kaasuttaminen on järkevää. Leijupetikaasuttimissa biomassan on oltava 90-95 % kuiva-ainetta. (Basu 2006, 74) Mikäli siis polttoaineena on esimerkiksi sellutehtaan itse tuottama kuori (20-50 %-ka), on polttoaine kuivattava ennen käyttöä.

3.2.1 Eri kuivausmenetelmät

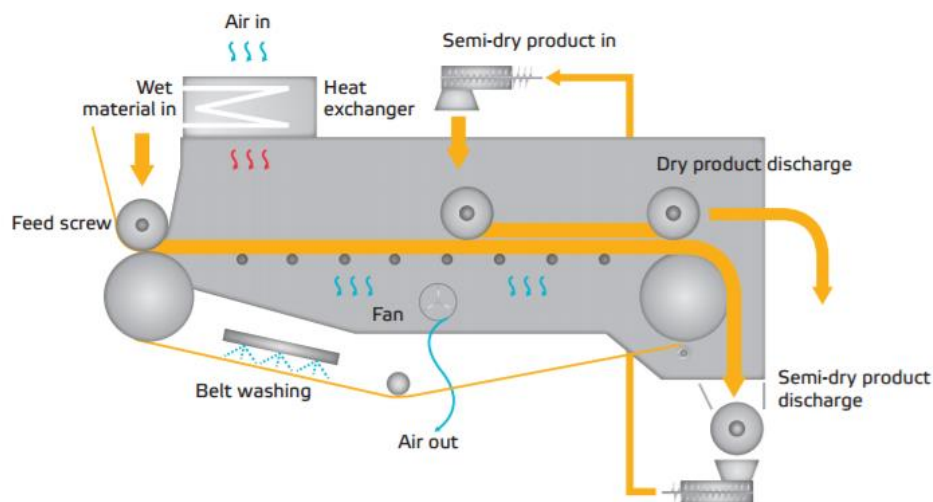
Polttoaine voidaan kuivata monella hyvin erilaisella tavalla. Yhteistä näillä tavoilla on pyrkimys olemassa olevan sekundäärilämmön käyttämiseen. Esimerkiksi A. Ahlströmin ensimmäiset kaasutuslaitokset johtivat polttoaineen puhaltimilla polttolaitoksen savukaasujen sekaan kuivattavaksi. Metson (nykyään Valmet) ensimmäiset laitokset kuivasivat polttoainetta kaasuttimen omalla tuotekaasulla kuvan 3.1 mukaisella rumpumallisella kuivurilla. Nämä menetelmät ovat jääneet taka-alalle todennäköisesti

niiden paloherkkyyden ja vaihtoehtoisten tekniikoiden kehittymisen vuoksi. (Huhtinen et al. 2000, 74)



Kuva 3.1 Rumpumallinen kuivuri

Nykyään alalla yleistyvät viirakuivurit, joissa kosteus poistetaan imemällä kuumaa ilmaa polttoainepatjan läpi viiran (huokoinen matto) avulla. Lämpö tuodaan esimerkiksi sellutehtaan kuumasta vedestä ja matalapainehöyrystä lämmönsiirtimen avulla, jolloin lämpötilajakauma saadaan pidettyä tasaisena ja tulipaloriski pienenee aiempiin tekniikoihin verrattuna. Viirakuivureita toimittavat ainakin Valmet ja Andritz. Yhtiöiden toimittamat kuivurit muistuttavat paljon toisiaan pienin eroin. Kenties merkittävin ero on Valmetin toimittaman kuivurin tapa kierrättää polttoainepatjan päällimmäinen kerros kuvan 3.2 mukaisesti uudelleen kuivattavaksi, jolloin kuoripatja saadaan kuivattua tasaisemmin.



Kuva 3.2 Viirakuivuri polttoaineen kierrätyksellä (Valmet 2014)

3.2.2 Kuiva-aineen mittaus

Kun halutaan reaaliaikaista mittaustietoa esimerkiksi kosteudesta, puhutaan online-mittauksesta. Online-mittaukselle ei välttämättä ole tarvetta, mikäli polttoaine ostetaan erissä ja erästä saadaan luotettava kuiva-ainemittaus lastin purun yhteydessä. Mikäli polttoaine tuotetaan itse kuivaamalla, on kuiva-aineen mittauksella huomattava merkitys kuivurin ja kaasuttimen tasaiseen ja taloudelliseen käyttöön.

Kaasutuslaitteiston käyttökokemukseen perustuen olisi suositeltavaa, että mittauspisteitä olisi kaksi tai jopa kolme. Ensimmäinen mittaus on hyvä olla ennen kuivuria, mikäli sellainen laitoksessa on. Tällöin kuivurille tulevan materiaalin perusteella voidaan automaattisesti säätää kuivurin ajoarvoja sopiviksi. Yleensä esimerkiksi sellutehtaalla kuoren kuiva-aine mitataan sen poistuessa kuorimolta. Vähintään viirakuivurilta poistuvan polttoaineen kuiva-aine olisi hyvä mitata, jotta tiedetään kuivauksen lopputulos. Polttoaine viipyy viiralla kymmeniä minutteja ja välivarastossa tunteja, joten vaihtelu polttoaineen kosteudessa näkyy pitkällä viiveellä, ellei sitä mitata heti kuivurin jälkeen. Kolmas mittauspiste voidaan haluttaessa sijoittaa kuivan polttoaineen välivaraston jälkeen, jotta tiedetään tarkalleen kaasuttimeen syötettävän polttoaineen hetkellinen kosteus. Tällöin itse kaasutinta voidaan säätää vastaamaan polttoaineen tehollista lämpöarvoa, jolloin myös tuotekaasun ominaisuudet pysyvät tasaisempina.

Todellisuudessa harvassa laitoksessa on kaikkia näitä mittauksia. Monesti tuotekaasun laatutoleranssin ollessa riittävä, pienehköt kuiva-ainepitoisuuden muutokset eivät aiheuta tappioita jotka kattaisivat mittalaitteistojen investointikustannukset. Toisaalta mikäli kuivuria ajetaan mittauksen puutteessa varmuuden vuoksi yliteholla, saattaa kustannuksia kertyä primäärilämmön ylimääräisen kulutuksen myötä.

3.2.2.1 Mittausmenetelmät

Mikäli käytetään ostopolttoainetta, riittävät usein eräkohtaiset mittaukset. Tällöin polttoaine punnitaan saapumistilassa, jonka jälkeen sitä kuivataan standardiolosuhteissa ($105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) uunissa vajaa vuorokausi ja punnitaan uudelleen. (Alakangas 2000, 26) Tällöin saadaan varsin tarkka mittaus ja polttoaineesta maksetaan usein tällä

menetelmällä lasketun kosteuden perusteella. Tätä menetelmää voidaan nopeuttaa käyttämällä mikroaaltoja polttoaineen kuivaukseen. (ASTM D4442 - 92(2003))

Omaa polttoainetta käytettäessä erityisesti kuivurin yhteydessä on kuitenkin hyvä olla edellä mainittuja online-mittauspisteitä. Yksinkertaisimmillaan polttoaineen kuiva-ainepitoisuutta voidaan mitata reaaliaikaisesti epäsuorasti kuivurin poistoilmasta. Tällöin mittaus perustuu kuoresta haihtuneen veden määrään ja tuloksessa täytyy ottaa huomioon kuivausilman suhteellinen kosteus tulotilassa. Mittatulos jää tällöin epätarkaksi, mutta kuitenkin suuntaa-antavaksi.

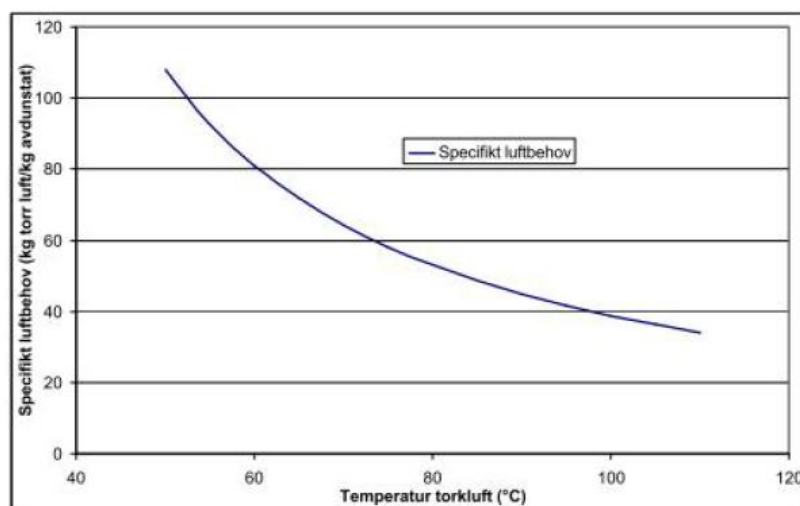
Kuiva-aineen suoraan mittaukseen on monia menetelmiä, jotka soveltuvat eri käyttökohteisiin. Kenties yleispätevin ja kallein menetelmä on röntgen-mittaus, jossa selviää samalla myös polttoaineen tilavuusvirta. Edullisemmat mittarit hyödyntävät erilaisia mikroaaltoihin ja infrapunasäteilyyn perustuvia mittausmenetelmiä. Mikäli mittausdataa ei tarvita sekuntitasolla, voidaan käyttää myös esimerkiksi automatisoitua versiota edellä mainitusta kuivaukseen ja punnitukseen perustuvasta menetelmästä.

3.3 Kuivurin käyttökokemuksia

Nykyaikaisella viirakuivurilla voidaan kuivata monipuolisesti biomateriaaleja. Tärkeintä kuivauksen lopputuloksen kannalta on polttoaineen tasainen palakoko, vähäinen likaisuus ja huokoisuus. Esimerkiksi puhdas, tasainen ja huokoinen hake on yleensä ominaisuuksiltaan hyvää kuivattavaksi, mutta sellutehtaan kuoren kuivaamiseen liittyy monia muuttujia. Sellutehtaan kuorimolla puulaji saattaa vaihdella jatkuvasti. Suomessa puulajit ovat yleensä koivu, mänty ja kuusi, joista kuusi on kenties haastavin. Kuusen kuori on mattomaista ja muodostaa viiran päälle ilmaa huonosti läpäisevän kerroksen, jolloin ilmavirta kanavoituu ja kuivaustulos heikkenee. Kuusen mukana tulee myös muita puulajeja enemmän likaa kuten pihkaa, mikä haittaa viiran toimintaa.

Kuivurin ajotapa vaikuttaa myös huomattavasti lopputulokseen. Tärkeintä viiratyypin kuivurin käytössä on kuoripatjan pitäminen tasaisena ja oikeiden lämpötilojen ylläpito. Suuri merkitys kuoripatjan tasaisuuteen ja koko kuivurin käytettävyyteen on kuoren syötön tasaisuus, jolloin vältytään tukkeumilta syöttöruuveilla ja aukoilta viiralla.

Kuoripatjan läpi kulkevan lämmitetyn ilman lämpötila vaikuttaa huomattavasti kuivauksen lopputulokseen. Mitä kuumempaa ilma on, sitä enemmän vettä se pystyy sitomaan. Kuvassa 3.3 on havainnollistettuna ilman tarpeen ja lämpötilan riippuvuussuhde. Ilmaa kuumennetaan lämmönsiirtimillä, joihin lämpö tuodaan vesiglykoliseoksella sellutehtaan sekundäärilämpövirroista ja tarvittaessa matalapainehöyrynä (HMP). Tarkasteltavassa kuivurissa tarvitaan käytännössä aina matalapainehöyryä riittävän lämpötilan aikaansaamiseksi. Matalapainehöyryn käytön optimoimiseksi onkin tarpeen tarkastella kuinka kuivaksi kuori kannattaa kuivata, sillä varsinkin viimeisten kosteusprosenttien haihduttaminen kasvattaa matalapainehöyryn kulutusta jyrkästi. Kuvasta 3.3 nähdään ilman lämpötilan nousun vaikutuksen väheneminen lämpötilan kasvaessa.



Kuva 3.3 Ilmantarpeen riippuvuus lämpötilasta (Rajala 2013)

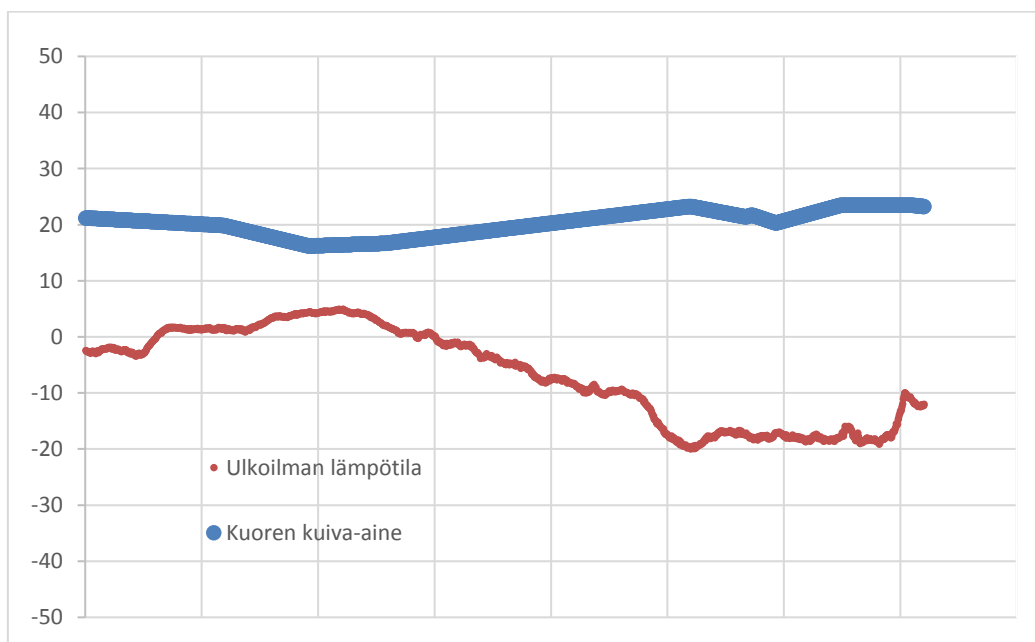
3.3.1 Havainnot koeajoista

Koeajoissa kuivuria ajettiin mahdollisimman tasaisesti lämmön tuontia tasaisesti vähentäen. Kun lämpöä tuodaan vähemmän, jää kuoreen enemmän kosteutta, jonka pitoisuutta mitattiin standardimenetelmin uunissa kuivaamalla ja punnitsemalla. Kuorinäyte otettiin välittömästi ennen ja jälkeen kuivurin, jolloin pystyttiin määrittämään haihdutettu vesimäärä käytettyä lämpömäärää kohden. Koeajon aikana kuivuri oli

tasaisessa ajossa, mutta syötetyn kuoren määrää jouduttiin lisäämään noin 15 % ensimmäisten kahden mittauksen jälkeen päiväsiilon pinnan tasoittamiseksi. Syötettyä lämpö määrää säädettiin laskemalla kuivausilmapuhaltimen kierroksia ja kuivurille menevän glykoliveden lämpötilaa. Glykoliveden lämpötila säädetään matalapainehöyryllä, jonka kulutus laskee lämpötilapyyntöä laskettaessa. Ajoarvot pidettiin tasaisena vähintään tunnin ajan ennen mittausta, sillä siinä ajassa koko kuoripatja ehtii vaihtua kuivurilla.

Mittausten perusteella veden höyrystämiseksi laskettiin höyryn ominaiskulutus, jota verrattiin kuivauksen loppukosteuteen. Höyryn ominaiskulutuksen havaittiin kasvavan huomattavasti kun kuiva-ainepitoisuus kasvoi korkeaksi.

Kuivurin ajon ollessa tasaista, voidaan havaita ulkolämpötilan vaikutus kuivaustulokseen (kuva 3.4). Kylmä ilma sitoo lämmintä ilmaa heikommin kosteutta, joten kovilla pakkasilla lämmitetyssä kuivausilmassa on vähemmän kosteutta kuin lauhalla säällä. Pakkasilla tarvitaan siis vähemmän kuivausilmaa saman kosteusmäärän haihduttamiseen ja kuivaustulos paranee vaikka kuivurin ajotilanne pysyy muuten samana.



Kuva 3.4 Ulkolämpötilan vaikutus kuivaustulokseen

4 POLTTOAINEEN KOSTEUDEN VAIKUTUS KAASUTTIMEN JA MEESAUUNIN TOIMINTAAN

Kuten aiemmin on todettu, kaasuttimeen tulevan polttoaineen tulisi olla yli 70 % kuiva-ainetta. Olemassa olevan kaasuttimen toiminnan optimoimiseksi on siis tarkasteltava väliä 71-100 %. Varsinkin biopolttoaineella kuten kuorella kosteus saapumistilassa on harvoin riittävä sellaisenaan kaasutettavaksi. Polttoaineen kuivaamiseen käytetyn energiamäärän optimoimiseksi täytyy tietää kosteuden vaikutus kaasuttimessa ja loppukäyttökohteessa, joka on tässä työssä meesauuni. Vaikutusta kaasuttimeen ja meesauuniin tutkitaan kirjallisuuden perusteella ja analysoimalla erään laitoksen toiminta-arvoja eri kosteuksilla. Osa havainnoista on kyseisen laitteiston käyttöhenkilökunnalta ja laitteiston omakohtaisesta käytöstä kertynyttä tietoa.

Tässä työssä käsiteltävä kaasutin on koivu- ja havupuun kuorta ja pieniä määriä purua polttoaineenaan käyttävä kiertoleijupetikaasutin (CFBG). Kaasutuskaasuna toimii esilämmitetty ilma ja petimateriaali on hienojakoista kalkkikiveä. (Pakkanen 2016) Polttoaine kuivataan yksivaiheisella viirakuivurilla yli korkeaan kuiva-ainepitoisuuteen. Tuotekaasu poltetaan kapasiteetiltaan 600 t/d kalkkia tuottavassa meesauunissa sellaisenaan.

4.1 Vaikutus kaasuttimeen

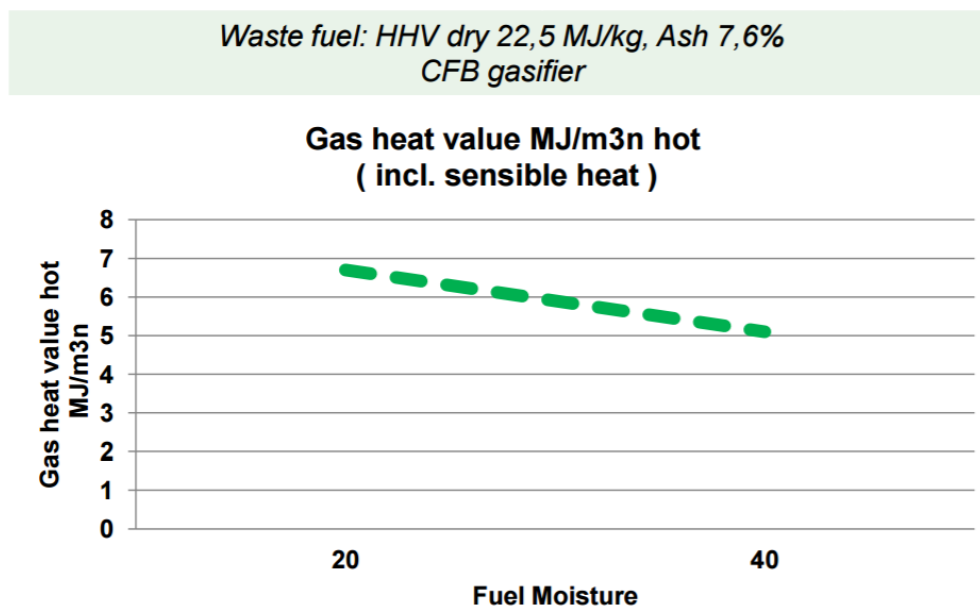
Kaasutustapahtuman hyötysuhteen kannalta tärkein ominaisuus on tuotekaasun lämpöarvo ja kaasun tilavuusvirta. Kosteus vaikuttaa suoraan tuotekaasun lämpöarvoon, sillä suurempi osa polttoaineesta palaa veden höyrystämisen seurauksena. Lisäksi vesi täytyy kuumentaa kaasuttimen lämpötilaan. Jokainen vesikilo kuluttaa noin 3800 kJ energiaa kaasuttimessa. (Basu 2010, 287) Samalla palamisilmantarve kasvaa, joka laimentaa tuotekaasuseosta lisää. Lisääntynyt palamisilman tarve voi rajoittaa myös kaasuttimen kapasiteettia. (Kvist 1992, 49).

Kaasutushyötysuhde jäähdytetylle tuotekaasulle lasketaan yhtälön 8 mukaisesti. Yhtälössä ei huomioida tuotekaasun tuntuvaa lämpöä.

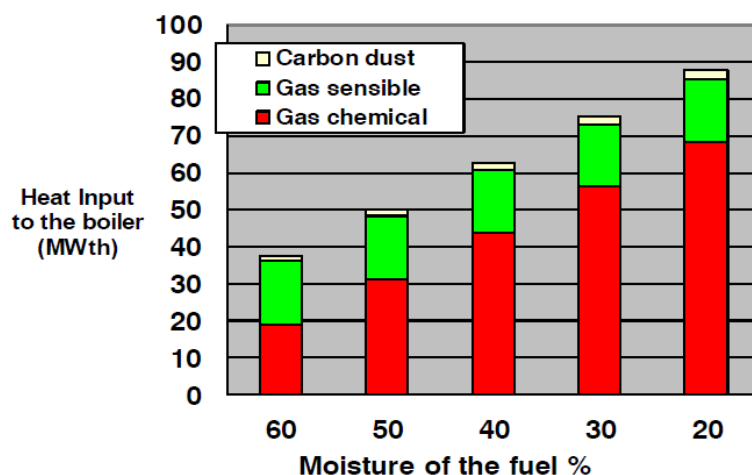
$$\eta_{CG} = \frac{q_{i,G}q_{m,G}}{q_{i,PA}q_{m,PA}} \quad (8)$$

Missä η_{CG} on kaasutushyötysuhde jäähdytetylle tuotekaasulle
 $q_{i,G}$ on tuotekaasun lämpöarvo
 $q_{m,G}$ on tuotekaasun massavirta
 $q_{i,PA}$ on kaasuttimen polttoaineen lämpöarvo käyttötilassa
 $q_{m,PA}$ on kaasuttimen polttoaineen massavirta

Tuotekaasun koostumukselle ja lämpöarvolle löytyy valmistajilta ja kirjallisuudesta monia taulukoita ja kuvaajia, mutta yleensä vain noin 80 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. Kuvissa 4.1 ja 4.2 on esitettyä kosteuden vaikutus kahteen eri valmistajan kaasuttimeen.



Kuva 4.1 Valmet biomassakaasutin (Isaksson 2014)



Kuva 4.2 AFW biomassakaasutin (AFW)

Edellä mainittuja kuvaajia extrapoloimalla voidaan tehdä arvioita polttoaineen kosteuden vaikutuksesta lämpöarvoon välillä 80-100 %-ka. Extrapoloinnin tulokset selviävät taulukosta 4. Taulukon lämpöarvot ovat suuntaa-antavia ja ne on laskettu olettamalla kosteuden vaikutus lineaariseksi ja täysin kuivalla polttoaineella tuotetun tuotekaasun lämpöarvoksi 7 MJ/ m³n. Kuten koeajoista havaittiin, ainakaan käytetyn laitteiston kohdalla vaikutus ei todennäköisesti ole lineaarinen viimeisten prosenttien osalta.

Taulukko 4 Kahden kaasuttimen perusteella extrapoloituja lämpöarvoja

Kuiva polttoaine [MJ/kg]		7
Extrapolointisuoran kulmakerroin		-0,0898
Kosteus [%]	Lämpöarvo [MJ/kg]	
2	6,82	
3	6,73	
4	6,64	
5	6,55	
6	6,46	
7	6,37	
8	6,28	
9	6,19	
10	6,10	
15	5,65	
20	5,20	
40	3,41	
60	1,61	

4.1.1 Havainnot koeajoista

Kuoren kuivurin tehoa tasaisesti alas säädettäessä kuoren kuiva-ainepitoisuus pieneni. Kaasuttimen tehoa säädettiin kaasutusilman määrää muuttamalla, jolloin automatiikka lisää tai vähentää kuoren syöttöä siten että kaasutuslämpötila ei muutu. Kun kuoren syöttöä vähennetään, lämpötila nousee stökiometristä ilmamäärää vastaavan osan polttoaineesta palaessa ja päinvastoin. Kaasuttimelta vaaditun tehon määrittelevät meesauunin ajoarvot, jotka pyrittiin pitämään myös mahdollisimman tasaisina.

Odotusarvoisesti kaasuttimeen syötetyn polttoaineen määrä nousee kuoren kosteuspitoisuuden kasvaessa. Koeajoissa havaittiin kuitenkin polttoaineen syötön jopa hieman vähenevän kosteuspitoisuuden kasvusta huolimatta. Tästä voidaan päätellä, ettei testatulla vaihteluvälillä kosteuden muutoksella ole ainakaan merkittävää negatiivista vaikutusta tuotekaasun lämpöarvoon.

Polttoaineen kulutuksen vähenemiselle ei löytynyt yksiselitteistä syytä, mutta mahdollisia vaikuttimia on monia. Kosteuden mittaukseen käytettiin standardinmukaisia menetelmiä, joskin mahdollisuus inhimilliseen virheeseen on aina olemassa. Meesauunin ja kuivurin tuotantoa jouduttiin koeajon aikana hieman säätämään ylöspäin, mikä heikentää mittausten vertailukelpoisuutta. Meesauunin tuotantoa lisätessä tulisi polttoainetta kulua enemmän, jos uunin lämpötila halutaan pitää samana, joten tämä tuskin on syynä ilmiöön. Myös polttoaineen syötön syöttöruuvin kierrokseen perustuva laskennallinen mittaaminen voi aiheuttaa epätarkkuutta. Eräs mahdollinen ja todennäköinen syy voi olla kuivurilla veden mukana mahdollisesti haihtuvat palavat yhdisteet tai jopa partikkelien pinnalla tapahtuva pyrolyysi. (Kyytsönen 2016 & Basu 2010, 288)

4.2 Vaikutus meesauuniin

Yksinkertaistettuna meesauunin tasetilavuuteen tuodaan lämpöä ja meesaa. Sieltä poistetaan lopputuotteena kalkkia ja uunin toisesta päästä savukaasuja. Sellutehtaan prosessin kannalta merkityksellisintä on kalkin laatu ja määrä. Toisin sanottuna sellunvalmistuksen kannalta on merkityksentöntä mitä polttoainetta uuniin tuodaan tai mitä savukaasuja sieltä poistuu, kunhan kalkki on laadukasta ja sitä on riittävästi. Jos

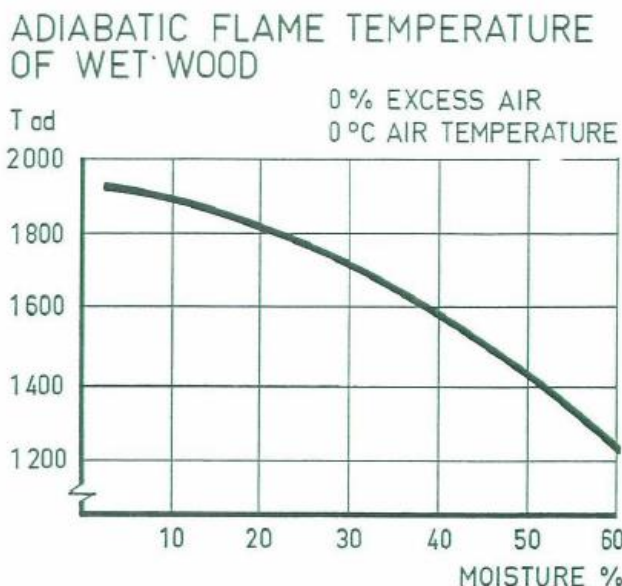
meesauunia tarkastellaan taloudellisuuden tai ympäristön kannalta, on merkitystä miten lämpö uuniin tuodaan ja mitä savukaasut sisältävät.

4.2.1 Kalkin laatu

Meesauunia operoidaan pääasiassa lopputuotteena olevan kalkin laadun ja kalkin kulutuksen perusteella. Kalkki on laadukasta kun sen jäännöskarbonaatti on muutaman prosentin luokkaa, mutta liian pieni jäännöskarbonaatti johtaa kalkin kovettumiseen ja huonompaan reaktiivisuuteen. Jäännöskarbonaatilla tarkoitetaan kalkkiin (CaO) jäänyttä reagoimatonta meesaa (CaCO₃).



Jotta mahdollisimman suuri osa meesasta reagoisi reaktioyhtälön 9 mukaisesti kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi, on kalkkipatjan lämpötilan pysyttävä jatkuvasti välillä 850-1100 °C. (KnowPulp) Tätä varten meesauunissa palavan polttoaineen tulee palaa kuumalla ja emissiivisellä liekillä. Meesauunissa liekin adiabaattisen palamislämpötilan tulee olla välillä 1750-1900 °C. (Siro 1989). Kuvassa 4.3 on havainnollistettu kosteuden vaikutusta adiabaattiseen palamislämpötilaan. Kuvasta nähdään 1750 °C osuvan käyrällä 30 % kosteuteen. Kalkkipatjan lämpötila onkin yksi tärkeimmistä meesauunin toiminta-arvoista. Lämpötiloja mitataan yleensä meesauunin molemmista päistä. Lisäksi mitataan palamisilman sektorilämmittimen jälkeinen kalkin lämpötila ja savukaasujen lämpötila ennen ja jälkeen sähkösuodinta. Lämpötila ei suoraan kerro kalkin laatua, mutta kalsinointireaktion nopeus on suurimmillaan 1100 °C:ssa. Polttopään kalkkipatjan lämpötila pyritään siksi pitämään yli 1000 °C:ssa. (Kvist 1992, 65) Lämpötilaa rajoittaa muun muassa savukaasukanavan kapasiteetti ja lämpötila. Liian suuri lämpötila on haitallista sähkösuotimelle, kun taas liian matalalla savukaasujen lämpötilalla meesa ei kuivu riittävästi ennen uuniin syöttöä.

SCHAUMAN

Kuva 4.3 Polttoaineen kosteuden vaikutus adiabaattiseen palamislämpötilaan (Siro 1989)

4.2.2 Savukaasut

Meesauunin savukaasujen koostumus on myös merkittävä toiminta-arvo. Savukaasuista mitataan yleensä ainakin rikki, happi ja häkä, joista jälkimmäiset kaksi ovat tärkeimmät meesauunin ajon kannalta. Happea tulee olla muutama prosentti savukaasuista, jotta varmistetaan palamisen täydellisyydestä. Häkää puolestaan ei tule olla savukaasuissa, sillä se on myrkyllinen ja räjähtävä kaasu suurissa pitoisuuksissa sekä savukaasuista mitattu häkäkaasu tarkoittaa palamisen olevan epätäydellistä. Häkäkaasun päätyminen savukaasukanavaan vältetään riittävällä ilmaylimäärällä ja tasaisella polttoaineen syötöllä.

4.2.3 Säädettävyys

Lämpötiloja, savukaasun happipitoisuutta ja kalkin laatua säädetään pääasiassa savukaasupuhaltimella ja polttoaineen sekä meesan syöttöä muuttamalla. Meesan syötön muuttaminen on yleensä viimeinen edellä mainituista säätötoimista, sillä se vaikuttaa myös meesauunin tuotantomäärään.

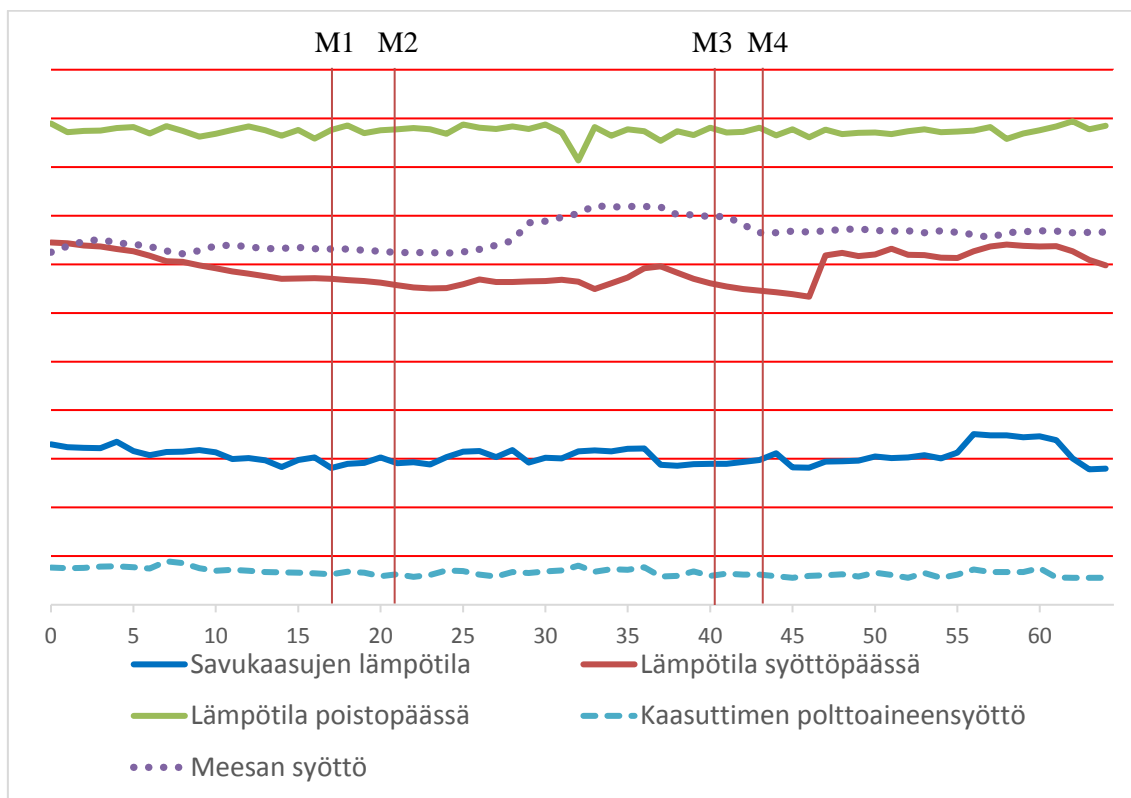
Jotta meesauuni toimisi parhaalla mahdollisella tavalla, on syötettävän polttoaineen oltava laadukasta mutta ennen kaikkea tasaista. Uunin läpi kulkeva materiaali viipyy uunissa noin 4 tuntia, mikä tarkoittaa että muutokset kalkin laadussa näkyvät pitkällä viiveellä. Prosessin ajotapa on siis oltava ennakoivaa ja tätä helpottaa huomattavasti se, että syötettävä polttoaine on tasalaatuista. Tiettyyn rajaan asti ei siis haittaa vaikka polttoaineen lämpöarvo olisi alhainen, kunhan se pysyy tasaisena. Rajoittavina tekijöinä ovat edellä mainittu adiabaattinen palamislämpötila sekä savukaasujen määrä, koostumus ja lämpötila. Suurella teholla kaasuttimen kapasiteetti voi myös tulla vastaan. Lämpöarvon aleneminen näkyy prosessinohjaajalle viiveellä ja korjaavat toimenpiteet vaikuttavat myös viiveellä kalkin laatuun. Polttoaineen laadun palatessa alkuperäiselle tasolleen aiheutuu jälleen viiveestä johtuvaa vaihtelua kalkin laadussa.

4.2.4 Käytännön havainnot

Meesauunin kannalta merkittävimmät vaikutukset ovat lämpöarvon ja häkäkaasun määrän vaihtelevuus sekä veden ja typen määrän lisääntyminen tuote- ja savukaasuissa. Vesi ja typpi sekä laimentavat polttoainetta että lisäävät savukaasujen kokonaismäärää. Lisääntynyt savukaasumäärä kuormittaa savukaasupuhallinta, kuumentaa savukaasukanavaa ja lisää savukaasuhäviötä. Kaasuttimessa palaneen polttoaineen savukaasut lisäävät konvektiolämmönsiirron määrää uunissa verrattuna liekin säteilylämmönsiirtoon. Poikkeustiloissa vesi voi myös kondensoitua savukaasukanavan tai tuotekaasuputkiston pinnoille aiheuttaen painehäviöitä ja korroosiota liuenneiden rikin ja kloorin vuoksi. Välittömimmän vaikutuksen aiheuttavat häkäkaasun määrän nopeat muutokset.

Koeajoissa ei havaittu kosteuspitoisuuden vaikuttavan meesauunin ajoon testatulla alueella, sillä kaasuttimen teho pidettiin tasaisena. Oheisessa kuvaajassa (kuva 4.4) on

havainnollistettu meesauunin lämpötiloja sekä polttoaineen ja meesan syöttöä mittausten aikana tunnin tarkkuudella.



Kuva 4.4 Koeajojen vaikutus meesauunilla

Polttoaineen kosteusmittaukset on merkitty punaisin viivoin ja muutos kuiva-aineessa tulisi ilmetä noin 4-5 tunnin viiveellä. Tuntien 37-46 välillä syöttöpään lämpötilamittaus likaantui puhdistuen äkillisesti, mikä näkyy nopeana nousuna lämpötilassa. Tällä välillä lämpötilan voidaan olettaa nousseen lineaarisesti. Kuvasta voidaan havaita, etteivät lämpötilat laskeneet kuiva-ainepitoisuuden ja polttoainenkulutuksen mukana.

5 YHTEENVETO

Kaasutustekniikka on keskellä kolmatta nousukauttaan biomassan kaasutuksen yleistyessä maailmalla. Enää kaasutus ei ole vain fossiilisten polttoaineiden muuttamista kaasumaiseen muotoon. Tuotekaasun käyttökohteet monipuolistuvat ja jatkojalostus lisääntyy esimerkiksi liikennepolttoaineiden osalta. Myös synteettisen maakaasun valmistamiseen tähtäävä tekniikka alkaa olla kypsää ja odottaa käyttöönottoaan fossiilisten polttoaineiden hinnan laahatessa ennätysalhaalla. Erityisesti kehitystä on tapahtunut leijupetikaasuttimien ja tuotekaasun kuumapuhdistuksen tutkimuksessa.

Polttoaineen kuivaus on myös mullistunut viirakuivureiden kehityksen myötä. Viirakuivurit tuovat kaasutusprosessiin käyttövarmuutta ja –turvallisuutta ja hyödyntävät paremmin matalaenergiaisia sekundäärilämpövirtoja. Kuivurin optimaalista käyttöä tulee tarkastella laitoskohtaisesti, jotta polttoainetta ei kuivata liikaa. Tällöin tuotekaasun lämpöarvon kasvu ei enää vastaa kuivaamiseen käytettyä lämpö määrää.

Suurissa määrissä polttoaineen kosteus vaikuttaa kaasuttimen ja meesauunin toimintaan merkittävimmin alentamalla tuotekaasun lämpöarvoa ja lisäämällä kaasutusilman ja siten savukaasujen määrää. Polttoaineen kosteuden vaikutukset kaasuttimeen eivät olleet yksiselitteisiä testatuilla kosteuspitoisuuksilla. Polttoaineen kulutus jopa väheni kosteuspitoisuuden kasvaessa. Varmaa syytä ei saatu selville, mutta ainakin liian kuuma kuivausilma voi johtaa haihtuvien energiapitoisten aineiden haihtumiseen polttoaineesta. Polttoaineen kosteuden ei siis pitäisi näiden koeajojen perusteella vaikuttaa merkittävästi kaasuttimen tai meesauunin toimintaan edellä mainitulla vaihteluvälillä.

Sekä kaasuttimen että meesauunin toiminnan kannalta on tärkeää pitää polttoaineen kosteus ja siten tuotekaasun laatu mahdollisimman tasaisena. Tällöin palamis- ja kaasutusreaktiot etenevät halutusti ja täydellisemmin, jolloin meesauunin operointi helpottuu.

LÄHDELUETTELO

Alakangas, Eija, 2000, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, Espoo: VTT, ISBN 951-38-5740-9 [verkkodokumentti] (Viitattu 22.11.2016) Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana, Korhonen Jaana, 2016, Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, Espoo: VTT, ISBN 978-951-38-8419-2 [verkkodokumentti] (Viitattu 20.1.2017) Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Alén Raimo, 2011, Papermaking Science and technology: Biorefining of Forest Resources, Helsinki: Paperi ja Puu Oy, ISBN 978-952-5216-39-4

Basu Prabir, 2010, Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design, Burlington: Academic Press, ISBN: 978-0-12-374988-8

Basu Prabir, 2006, Combustion and Gasification in Fluidized Beds, Taylor & Francis Group

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H., 2000, Höyrykattilatekniikka, Helsinki: Opetushallitus

Hämäläinen Sanna, Sähköpostikeskustelu 25.11.2016

Isaksson Juhani, 2014, The 12th European Gasification Conference: Vaskiluoto CFB Gasification Plant, Valmet (Viitattu 1.12.2016) Saatavissa: http://www.icheme.org/events/conferences/past-conferences/2014/gasification-2014/~/_media/06051B7308EA4A54AF32175E0F9388F2.pdf

Kaikko Juha, Vakkilainen Esa, 2016, Voimalaitosoppi –kurssin luentomateriaali: Paineistettu poltto ja kaasutus, Lappeenranta, Lappeenranta University of Technology (LUT) [Luentomateriaali]

Kara Mikko, Mattila Lasse, Viinikainen Seppo, Wolff Jonas, Lind Irma, 1990, Energia Suomessa, Helsinki: VTT Energia, ISBN 951-37-2745-9

Koljonen J. & Kurkela E., 1990, Experiences in the operation of the HTW process at the peat ammonia plant of Kemira oy, VTT symposium 107, Low-grade fuels volume 1, VTT, ISBN 951-38-3567-7

Kurkela Esa, 1996, Formation and removal of biomass-derived contaminants in fluidized bed gasification processes, VTT, ISBN 951-38-49-7

Kyytsönen Jouko, 2016, Uskomukset Päälaelleen – Tuore puu palaa kuivaa paremmin, Maaseudun Tulevaisuus [Verkkolehtiartikkeli] (Viitattu 23.1.2017) Saatavissa: <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/talous/uskomukset-p%C3%A4%C3%A4laelleen-tuore-puu-palaa-kuivaa-paremmiin-1.173368>

Palonen Juha, 2015, Biomassan kaasutuksen nykytila, Espoo: Amec Foster Wheeler [sähköinen seminaarimateriaali]

Pakkanen Kimmo, Sähköpostikeskustelu 25.11.2016

Rajala Antti-Jussi, 2013, Drying of chips in a gasifier plant, Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology (LUT) [Diplomityö]

Toimittaneet: Pertti Sarkomaa ja Pekka Punnonen. Tekijät: Pertti Sarkomaa, Elina Vähävihu, Ritva Suomalainen, Marko Kvist, Tommi Tynjälä, Simo Hammo, Ari Vilenius, Petri Kouvo. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu (LTKK), 1992. Polttotekniikan seminaari 1992 Polttoaineen kaasutus, Opetusmoniste. ISBN 951-763-727-6

Vakkilainen Esa, Energy Systems Engineering –kurssin luentokalvo, Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology (LUT) [Luentomateriaali]

Valmet, 2014, KUVO belt dryer [Tuote-esite] (Viitattu 15.1.2017) Saatavissa:
[http://www.valmet.com/Valmet/Products/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-140129-2256E-02442/\\$File/WHDU_R_2080_040-02.pdf?OpenElement](http://www.valmet.com/Valmet/Products/Vault2MP.nsf/BYWID/WID-140129-2256E-02442/$File/WHDU_R_2080_040-02.pdf?OpenElement)

Keskustelu Gasum Oy toimihenkilö Jani Aralan kanssa, Energia 2016-messut,
26.10.2016

Keskustelu voimalaitosinsinöörin kanssa Phoenix Pulp and Paper:n tehtaalla, Thaimaa,
Khon Kaen, 14.11.2016

ASTM D4442 - 92(2003) Standard Test Methods for Direct Moisture Content
Measurement of Wood and Wood-Base Materials

Prowledge Oy, KnowPulp – oppimisympäristö versio 9.0