Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Sulakaasutustutkimuslaitteiston suunnittelu ja testaus

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen yliopiston energia- ja ympäristötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 5.4.2006.

Työn ohjaaja:	Professori Lasse Koskelainen
Työn tarkastajat:	Professori Lasse Koskelainen
	Tutkijaopettaja Vesa Meuronen

Luumäellä 22.5.2006

Henri Kärmeniemi
Länsikaari 17
54530 Luumäki
puh. 040 757 2977

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Energia- ja ympäristötekniikan osasto
Henri Kärmeniemi

Sulakaasutustutkimuslaitteiston kehittäminen ja testaus

Diplomityö

2006

84 sivua, 38 kuvaa, 40 taulukkoa ja 3 liitettä

Ohjaaja: Professori Lasse Koskelainen
Tarkastajat: Professori Lasse Koskelainen
Tutkijaopettaja Vesa Meuronen
Hakusanat: sulakaasutus, tuhka
Keywords: gasification in molten slag, ash

Työ liittyy Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa voimalaitostekniikan laboratoriossa vuonna 2004 aloitettuun sulapoltto- ja sulakaasutustutkimukseen. Päätavoitteena on suunnitella, rakentaa ja testata pienen kokoluokan sulakaasutuslaitetta.

Kirjallisuusosassa luodaan lyhyt katsaus viime vuosina muualla tehtyyn sulapoltto- ja sulakaasutustutkimukseen. Laskentaosassa mallinnetaan sulapoltto- ja sulakaasutusprosessia eri polttoainekoostumuksilla. Tutkimusosassa suunnitellaan ja rakennetaan sulakaasutuskoelaitteisto kaasutuskokeita varten. Lopussa on kehittyneemmän tutkimuslaitteiston alustavaa suunnittelua.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of Energy and Environmental Technology
Henri Kärmeniemi

Designing and testing the research equipment of gasification in molten slag

Master's thesis

2006

84 pages, 38 figures, 40 tables and 3 appendices

Supervisor: Professor Lasse Koskelainen
Examiners: Professor Lasse Koskelainen
Researcher/Teacher Vesa Meuronen

Keywords: gasification in molten slag, ash

The topic of this study is the research of combustion and gasification in molten slag started in the Laboratory of Power Engineering at Lappeenranta University of Technology in 2004. The main target is to design, build and test small-scale research equipment of gasification in molten slag.

The literature part provides a short review of other research carried out in recent years on combustion and gasification in molten slag. In the calculations, the process of combustion and gasification in molten slag is modeled with different fuel compositions. In the research part, the equipment for testing gasification in molten slag is designed and built. Finally, an initial design of more advanced research equipment is presented.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston energia- ja ympäristötekniikan osaston Voimalaitostekniikan laboratoriolle. Haluan kiittää työn tarkastajina toimineita Lasse Koskelaista ja Vesa Meurosta. Kiitokset myös Markku Autiolle, Kari Ihaksille, Juha-Pekka Lemposelle, Risto Partamiehelle, Harri Partaselle ja Ismo Roihalle eli laboratorion henkilöille, jotka ovat avustaneet koelaitteen rakentamisessa ja kokeiden toteutuksessa.

Kiitän myös opiskelukavereitani yhteistyöstä opinnoissa ja sukulaisia taloudellisesta tuesta.

Luumäellä 22.5.2006

Henri Kärmeniemi

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO....3

1 JOHDANTO....5

2 KATSAUS SULAPOLTTO- JA SULAKAASUTUSTUTKIMUKSEEN ERI MAISSA....6
2.1 JAPANI....6
2.1.1 MEET (Multi-staged Enthalpy Extraction Technology)....6
2.1.2 Redox-poltto....8
2.2 KIINA....9
2.3 VENÄJÄ....11

3 PALAMINEN JA KAASUTUS....13
3.1 KIINTEÄN POLTTOAINEEN PALAMINEN....13
3.2 KIINTEÄN POLTTOAINEEN KAASUTUS....14

4 PALAMISEN JA KAASUTUKSEN LASKENTA....15
4.1 RUOKOHELPI....15
4.1.1 Häviötön ja häviöllinen poltto....15
4.1.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto....20
4.1.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto....21
4.2 HAKE....22
4.2.1 Häviötön ja häviöllinen poltto....23
4.2.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto....24
4.2.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto....25
4.3 TURVE....26
4.3.1 Häviötön ja häviöllinen poltto....27
4.3.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto....28
4.3.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto....29
4.4 RUSKOHIILI....30
4.4.1 Häviötön ja häviöllinen poltto....30
4.4.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto....31
4.4.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto....32
4.5 PUUPELLETTI....33
4.5.1 Häviötön ja häviöllinen poltto....34
4.5.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto....35
4.5.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto....36
4.6 JOHTOPÄÄTÖKSET LASKENNASTA....37
4.6.1 Poltto....37
4.6.2 Kaasutus ja tuotekaasun poltto....38
4.6.3 Häviöt....40
4.6.4 Tutkimuksen jatko....41

5 KUUMENNUS- JA SULATUSKOKEET 42
5.1 NESTEKAASULIEKKI 42
5.2 ASETYLEENILIEKKI 43
5.3 SULATUSKOKEET PUUN KUOREN TUHKALLA 45
5.3.1 Sulatuskoe 1 45
5.3.2 Sulatuskoe 2 47
5.3.3 Sulatuskoe 3 48
5.4 SULATUSKOKEET MUILLA TUHKANÄYTTEILLÄ 50
5.4.1 Sulatuskoe 4: Turpeen tuhka 50
5.4.2 Sulatuskoe 5: Hakkeen tuhka 52
5.4.3 Sulatuskoe 6: Ruokohelpituhka 53
5.4.4 Sulatuskoe 7: Puupelletin tuhka 55
5.5 TUHKIEN SULAMISKÄYTTÄYTYMISEN ARVIOINTI 56
5.5.1 Hiilen tuhkille kehitettyjä tunnuslukuja 57
5.5.2 Biopolttoaineiden tuhkien sulamiskäyttäytymisestä tehty tutkimus 58
5.5.3 Muuta huomioitavaa 58

6 KAASUTUSKOKEIDEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS 59
6.1 ILMAN JA POLTTOAINEEN MÄÄRÄT 59
6.2 KORJAAVA KAASUTUSLASKELMA 62
6.2.1 Kaasutuskoe 1 63
6.2.2 Kaasutuskoe 2 65
6.2.3 Kaasutuskoe 3 67
6.2.4 Kaasutuskoe 4 68
6.2.5 Kaasutuskoe 5 69
6.3 KAASUTUSKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU 70

7 TULEVAN LAITTEISTON ESISUUNNITTELU 71
7.1 SUUNNITTELUN PERUSTA 71
7.2 ESIKUUMENNETTU ILMA 72
7.3 SAVUKAASUJEN TAKAISINKIERRÄTYS 74
7.4 HAPPIKAASUTUS 75
7.4.1 Kaasutusesimerkki hapella 76
7.5 VESIHÖYRYKAASUTUS 77
7.5.1 Kaasutusesimerkki vesihöyryllä 77
7.6 LAITTEISTON KOKOONPANO 78

8 YHTEENVETO 80

LÄHDELUETTELO 82

LIITTEET

SYMBOLILUETTELO

Symbolit

c	pitoisuus	-
D	halkaisija	m
H	entalpia	kJ/mol
h	ominaisentalpia	kJ/kg
m	massa	kg
n	ainemäärä	mol
Q	lämpömäärä	MJ
q_i	lämpöarvo	MJ/kg
q_m	massavirta	kg/h
q_v	tilavuusvirta	m^3/h
q_v''	tilavuusvirta pinta-alaa kohti	m^3/m^2
p	paine	bar
T	lämpötila	K
t	aika	s
y	mooliosuus	-

Kreikkalaiset

ϕ	lämpövirta	kW
φ	suhteellinen kosteus	-
λ	ilmakerroin	-

Alaindeksit

C	hiili
h	vesihöyry

H_2	vety
h,i	ilmaan sitoutunut vesihöyry
häv	häviö
i	1. ilma
	2. tehollinen
ik	kuiva ilma
i, *pa*	ilma polttoainetta kohti
$i(teor)$	teoreettinen ilmamäärä
k	kuumennin
N_2r	raakatyppi
O_2	happi
O_2,i	ilman happipitoisuus
O_2, *pa*	polttoaineen sisältämä happi
$O_2,seos$	ilma-savukaasuseoksen happipitoisuus
O_2,sk	savukaasun happipitoisuus
p	pelletti
pa	polttoaine
S	rikki
seos	ilma-savukaasu-seos
Sk	savukaasu
t	tuhka
tot	kokonaispaine
ymp	ympäristö

1 JOHDANTO

Sulakaasutusprosessissa kaasutusreaktiot tapahtuvat sulassa tuhkakerroksessa. Kaasutusilma puhalletaan sulaan tuhkakerrokseen, jolloin sulakerros sekoittuu ja alkaa kuplia. Polttoaine pudotetaan ylhäältä ja se reagoi hapen kanssa sulakerroksessa. Sulassa aineksessa polttoaine hajoaa täysin, eikä kuonaan jää palamatonta ainesta. Tämä tekee kuonasta käyttökelpoista raaka-ainetta.

Menetelmä tarjoaa mahdollisuuden tuottaa energiaa kiinteistä polttoaineista vähäpäästöisesti jopa pienessä kokoluokassa. Samalla saadaan hyödynnettäviä sivutuotteita. Sulakaasutusprosessi on esimerkiksi Venäjällä varsin hyvin tunnettu etenkin hiilen kaasutuksen osalta. Tässä työssä tutkitaan, miten prosessin voisi saada toimimaan biopolttoaineilla.

Tästä aiheesta on Lappeenrannan teknillisen yliopiston Voimalaitostekniikan laboratoriossa tehty esiselvitys. Tämän työn kirjallisuus- ja laskentaosat ovat tavallaan jatkoa esiselvityksen vastaaville osille. Suunnittelu- ja testausosioissa tavoitteena on suunnitella ja rakentaa tässä työssä käytettävä laitteisto ja tehdä kokeita.

2 KATSAUS SULAPOLTTO- JA SULAKAASUTUSTUTKIMUKSEEN ERI MAISSA

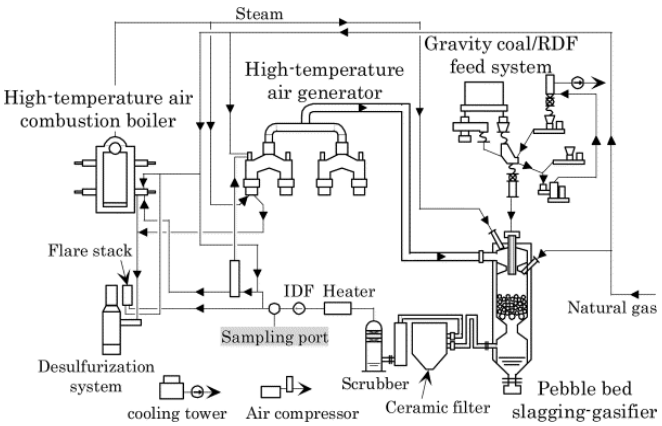
Tässä luvussa käydään läpi muualla tehtyä sulapoltto- ja sulakaasutustutkimusta. Tarkasteluun on otettu vuonna 2004 tai sen jälkeen julkaistua aineistoa. Koska tarkasteluaika on korkeintaan noin kaksi vuotta, on tässä esitelty myös prosesseja, jotka eivät täysin täytä sulapolton tai sulakaasutuksen tunnusmerkkejä. Kuitenkin kaikki laitteistot toimivat sellaisella lämpötila-alueella, että reaktiot tapahtuvat joko sulassa kerroksessa tai, että tuhka on sulassa olomuodossa.

2.1 JAPANI

Japanissa poltetaan suuri osa (78 % vuonna 1999) yhdyskuntajätteestä, jonka poltto aiheuttaa runsaasti muun muassa raskasmetallipäästöjä (Jung et. al., 2005). Siellä onkin runsaasti tutkimushankkeita, jotka käsittelevät metallien käyttäytymistä sulassa tuhkassa ja erilaisia sulapolttotekniikoita.

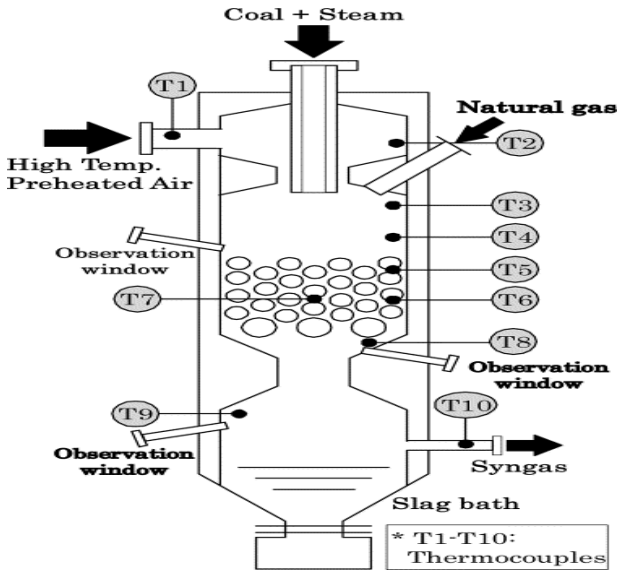
2.1.1 MEET (Multi-staged Enthalpy Extraction Technology)

MEET on hiilen tai jätteen polttoon kehitetty sulatekniikka. Tässä esitelty laitos on kaupallisen kokoluokan esittelylaitos MEET-II. Sillä voidaan polttaa 2 tonnia hiiltä tai 4 tonnia jätettä vuorokaudessa. Laitteisto koostuu kuulapetikaasuttimesta, painovoimaisesta polttoaineensyöttöjärjestelmästä, tuotekaasun puhdistusjärjestelmästä, ilman kuumentamiseen käytetystä regeneraattorista ja polttokattilasta. Kuvassa 1 on esitetty laitoksen toimintakaavio. Regeneraattorissa ilma esilämmitetään noin 1000 ºC:een. Lämpötilan saavat aikaan savukaasut, joita myös kierrätetään takaisin kaasuttimeen yhdessä höyryn kanssa. Näin typenoksidipäästöjä pyritään hillitsemään (Shinobu et.al., 2005).



Kuva 1 MEET II -toimintakaavio (Shinobu et.al., 2005)

Kiinteä polttoaine kaasutetaan kaasuttimessa ali-ilmassa höyryn kanssa. Haihtuvat aineet kaasuuntuvat nopeasti, jonka jälkeen kaasuttimessa olevat alumiinikuulat kaappaavat pintaansa kiintopartikkelit. Haihtumaton materiaali tihkuu hitaasti petin läpi kuona-altaaseen ja tuotekaasu poistuu kaasuttimen alaosasta. Kaasuttimen toiminta on esitetty kuvassa 2. Kuvassa näkyvää maakaasupoltinta tarvitaan käynnistystilanteessa kaasuttimen esilämmittämiseen. Toisaalta sammutustilanteessa voidaan kaasutin puhdistaa lopettamalla kiinteän polttoaineen syöttö ja polttamalla maakaasua jonkin aikaa. Näissä tapauksissa kaasutin toimii polttokammiona (Shinobu et.al., 2005).



Kuva 2 Kuulapetikaasuttimen toiminta (Shinobu et.al., 2005)

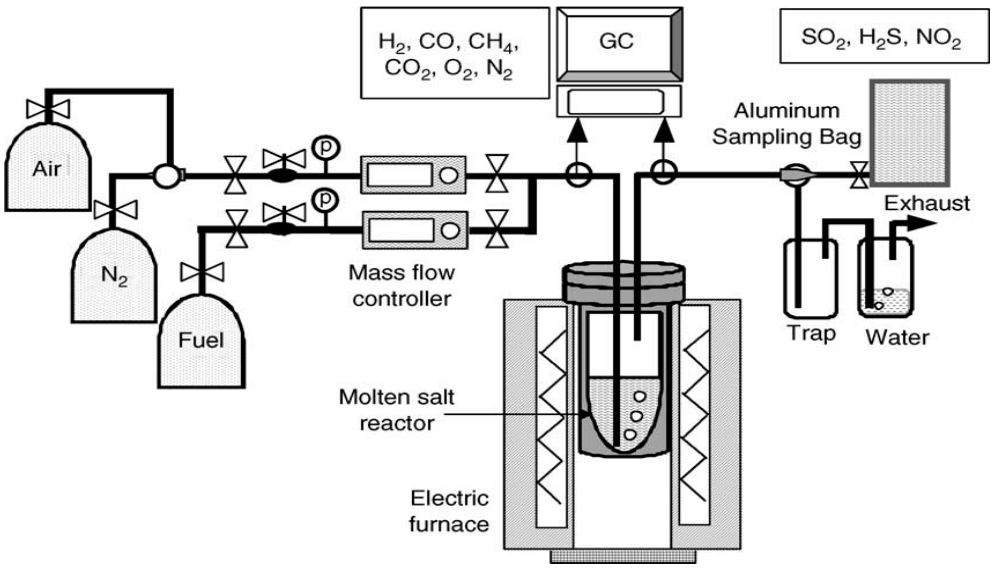
Koska kaasutusilma on lämmitetty noin 1000 ºC:n lämpötilaan, tullaan toimeen pienellä ilmakertoimella. Tämä pienentää tuotekaasun tilavuusvirtaa, jolloin kaasuttimen ja kaasunpuhdistusjärjestelmän koko ja hinta pienenee. Tuhka saadaan sulaan, helposti hallittavaan muotoon. Lisäksi etuna voidaan nähdä vähäpäästöinen polttotapa kiinteillä polttoaineilla jopa pienessä kokoluokassa. Lähitulevaisuudessa MEET-II:ta on tarkoitus testata erilaisilla kiinteillä polttoaineilla kuten hiilellä, biomassalla ja jätteillä (Shinobu et.al., 2005).

2.1.2 Redox-poltto

Tässä laitteistossa sula-aines ei ole tuhkaa vaan suolaa, jossa kaasutetut komponentit poltetaan.

Sulassa suolassa tapahtuvassa redox-poltossa on ideana erottaa savukaasuista hiilidioksidi ilman suurta energiahäviötä. Suola on sekoitus sulan alkalimetallin sulfiitteja ja karbonaatteja. Prosessin juuret ovat 1920-luvun lopulla. Silloin suolareaktioita tutkittiin selluteollisuudessa (Shimano ja Asakura, 2005).

Hiljattain tehdyssä japanilaisessa tutkimuksessa tekniikkaa testattiin kuvan 3 kaltaisella koelaitteella. Alumiinireaktorissa olevaan sulaan suolaan puhallettiin typellä laimennettu ilma ja hiilimonoksidi. Hiilimonoksidi hapettui hiilidioksidiksi sulfaatti-ionien kanssa sulassa suolassa. Reaktorin halkaisija on 28 mm ja korkeus 150 mm. Sulakerroksen korkeus oli 30 mm. Reaktori asetettiin ruostumattomasta teräksestä valmistettuun astiaan. Näytteenotot olivat sisääntulo- ja ulostulolinjan yläosassa. Sähkölämmittimellä suola pidettiin vakiolämpötilassa. Suolana sekoituksessa käytettiin 20 g $\left[\left(Na^{+}\right)_{0,5},\left(K^{+}\right)_{0,5}\right]_2\left[\left(CO_3^{2-}\right)_{0,9},\left(SO_4^{2-}\right)_{o,1}\right]$- liuosta. Tämä empiirinen tutkimus osoitti, että redox-poltolla saadaan puhdasta hiilidioksidia ilman paljon energiaa vaativaa erotustekniikkaa (Shimano ja Asakura, 2005).

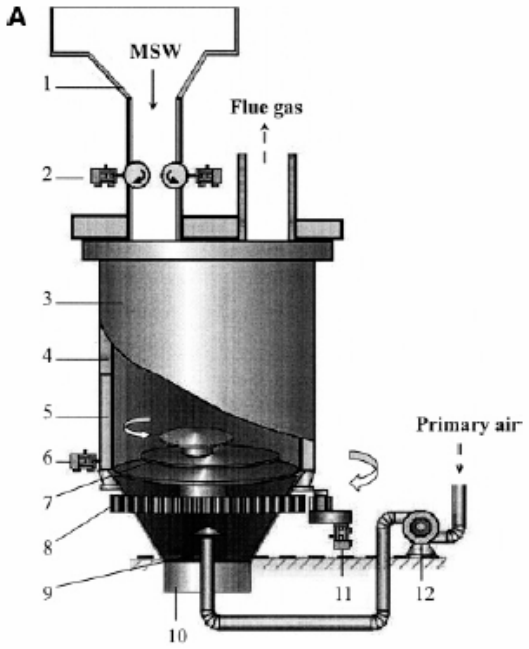


Kuva 3 Koelaite (Shimano ja Asakura, 2005)

2.2 KIINA

Kiinassa vuosittainen yhdyskuntajätemäärä on ollut voimakkaassa kasvussa viime vuosina. Koska samaan aikaan uusien kaatopaikka-alueiden järjestäminen tulee yhä vaikeammaksi, on nähty tarpeelliseksi kehittää ympäristöystävällisiä ja samalla halpoja jätteenpolttomenetelmiä. Yhtenä tällaisena voidaan nähdä vajaa kaksi vuotta toiminut jätteen sulakaasutuslaitteisto, jossa polttoaine ja kaasutusilma tuodaan sulaan tuhkakerrokseen (Liu, 2005).

Jätteenpolttoyksikkö sijaitsee Taiwanissa, Kiinassa. Kyseisen laitoksen kapasiteetti on 100 tonnia yhdyskuntajätettä (MSW, Municipal Solid Waste) vuorokaudessa. Jätepolttoaine tuodaan kaasuttimeen (Kuva 4) yläosasta. Kaasutinsylinteri pyörii 10 kierrosta tunnissa. Pudotessaan polttoaine kuivuu, pyrolysoituu ja kaasuuntuu. Kaasuuntumaton osa sulaa pyörivän arinan päällä. Ilma puhalletaan kaasuttimen alaosasta ja sen määrä on noin 75 % stökiömetrisen palamisen ilmantarpeesta. Arina pyörii kaasutinsylinteriin nähden vastakkaiseen suuntaan, pyörimisnopeus 5 kierrosta tunnissa. Näin saadaan aikaan kaasun turbulenssi jätekerroksessa ja jätteen riittävä sekoittuminen.



Kuva 4 Kaasutuskammio (Liu, 2005)

Kaasuttimesta poistuneet pyrolyysi- ja kaasutuskaasut poltetaan polttokammiossa. Sen jälkeen savukaasut kulkevat ilman esilämmittimeen, jossa kaasutusilma lämmitetään noin 400 ºC:een. Jätelämpökattilassa savukaasut luovuttavat lämmön höyryntuottoon ja poistuvat puhdistuksen kautta savupiippuun (Liu, 2005).

Laitos on alittanut kiinalaisten viranomaisten ilmansaasteille ja raskasmetallipäästöille asettamat rajat. Kustannukset ovat huomattavasti edullisemmat verrattuna esimerkiksi Kiinan ensimmäisiin Kanadasta 1990-luvulla tai Belgiasta 2003 tuotuihin

jätteenpolttolaitoksiin. Näillä kapasiteetti huomioiden investointikustannukset olivat 3 - 4 kertaa ja käyttö- ja kunnossapitokustannukset ainakin 4 kertaa niin suuret kuin hiljattain kehitetyllä jätteen sulakaasutusmenetelmällä (Liu, 2005).

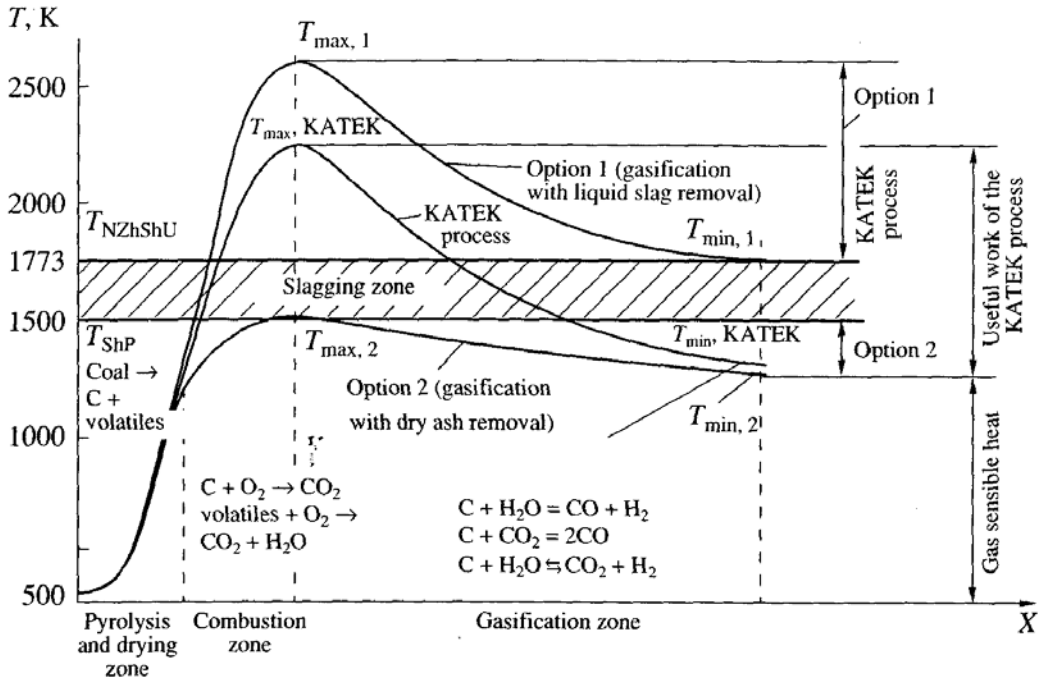
2.3 VENÄJÄ

Venäjällä on runsaasti kokemusta hiilen kaasutuksesta. Vuoteen 1958 mennessä silloisessa Neuvostoliitossa oli noin 2500 kaasutinta toiminnassa. 1960-luvun alussa Lähi-idän ja Länsi-Siperian halpa öljy tyrehdytti mielenkiinnon kaasutustekniikoiden kehittämiseen. 1970-luvulla energiakriisin seurauksena mielenkiinto hiilen kaasutukseen elpyi (Stepanov, 2004).

Viime vuosikymmeninä hiilen kaasutustekniikoista erityisesti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) on ollut mielenkiinnon kohteena. Kyseessä on yhdistetty prosessi, jossa hiili kaasutetaan suuressa paineessa ja tuotekaasu poltetaan kaasuturbiinissa. Savukaasujen loppulämpö otetaan talteen lämmöntalteenottokattilassa, joka on yhdistetty höyryturbiiniprosessiin. IGCC- laitos tuottaa vähemmän rikki- typpi- ja hiukkaspäästöjä kuin tavanomainen hiilivoimalaitos. Myös hyötysuhde on parempi johtuen laajemmasta lämpötila-alueesta (Stepanov, 2004).

Perinteinen hiilen kaasutin toimii joko nestemäisen tai kuivan kuonan lämpötila-alueella. Koska kaasutushyötysuhde on verrannollinen kaasun maksimi- ja minimilämpötilan eroon, kaasutuksen olisi hyvä tapahtua mahdollisimman suurella lämpötilaerolla. Sulan kuonan vaatimat lämpötilat kuitenkin kasvattavat hapen kulutusta ja vaativat ylimääräisen lämmönsiirtovaiheen. Lisäksi materiaalien on oltava erityisen hyvin suuria lämpötiloja ja korroosiota kestäviä. Vuosina 1990 - 92 KAFEC (Krasnoyarskin hiilen tutkimuslaitos) ja NPO Luch (Semipalatinsk) kehittivät uudentyyppisen KATEK- kaasuttimen. Sillä on saavutettu kaasutushyötysuhde 77 - 80 %, joka on lähes yhtä hyvä kuin liikkuvapetisellä kaasuttimella uhraamatta kuitenkaan laitteen ominaistehoa. KATEK- kaasuttimen maksimilämpötila on tuhkan sulamislämpötilaa selvästi suurempi ja minimilämpötila hieman sulamislämpötilaa pienempi ilman, että kuonaantumista esiintyy. Erilaisten

kaasuttimien lämpötilaprofiili näkyy kuvassa 5. Erityispiirre KATEK- kaasuttimessa on se, että seinät ovat suojattu höyrystyvällä vesifilmillä. Reaktori on tehty useista osastoista, joissa jokaisessa on vesijäähdytetty suojus ja tangentiaalinen suutin veden syöttöä varten. Sulassa muodossa olevat kuonapartikkelit tulevat rajakerrokseen reaktorin seinämään jäähtyen alle sulamispisteen ja samalla kiinteytyvät. Höyrystyvä vesifilmi varmistaa, että kuonaantumista ei tapahdu. Tämä ratkaisu pienentää ominaishapenkulutusta 16 - 25 %. Kaasutushyötysuhde on 5 - 8 % korkeampi kuin tavanomaisella sulakaasutusprosessilla (Stepanov, 2004).



Kuva 5 Kaasuttimien lämpötilaprofiileja (Stepanov, 2004)

KAFEC ja NPO Luch ovat testanneet pilot- laitteistoaan, jonka kapasiteetti on 0,5 tonnia hiiltä tunnissa. Testitulokset varmistavat, että laite voi toimia niinkin suuressa lämpötilassa kuin 2473 K (2200 ºC) ja 30 barin paineessa. IGCC- laitoksessa KATEK- kaasutinta käytettäessä sähköntuottohyötysuhde kasvaa noin 50 %:iin, aikaisempi maksimihyötysuhde on noin 46 %. Samalla investointikustannukset pienenevät 8 - 10 %. Tämä selittyy säteilylämmönsiirtimen pois jättämisellä kiertopiiristä ja hapentuotantolaitoksen pienentyneellä kapasiteetilla (Stepanov, 2004).

3 PALAMINEN JA KAASUTUS

Tässä työssä on tavoitteena rakentaa biopolttoainetta käyttävä sulapoltto- tai sulakaasutuslaite. Palamisessa käytettävä ilmamäärä on yli teoreettisen ilmamäärän, joten reaktiot menevät alusta loppuun samassa tulipesässä. Kaasutuksessa kiinteä polttoaine muutetaan kaasumaiseksi selvästi ali-ilmaisessa kaasutuskammiossa. Syntynyt tuotekaasu poltetaan erillisessä polttokammiossa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi lyhyesti palamisen ja kaasutuksen luonne.

3.1 KIINTEÄN POLTTOAINEEN PALAMINEN

Kiinteän polttoaineen palaminen jakautuu neljään eri vaiheeseen; lämpenemiseen, kuivumiseen, pyrolyysiin ja jäännöshiilen palamiseen. Lämpenemisvaiheessa polttoaine lämpenee kuivumislämpötilaan. Kuivumisella tarkoitetaan polttoaineen sisältämän veden höyrystymistä. Pyrolyysissä kiinteä aine muuntuu lämmöntuonnin seurauksena kaasu- ja tervamaiseen muotoon. Pyrolysoituvaa osuutta kutsutaan usein haihtuviksi aineiksi. Suurella partikkelilla vaiheet voivat olla osin päällekkäisiä (Raiko et. al., 1995). Poltettaessa kiinteää polttoainetta tärkeimpiä palamisreaktioita on kolme. Hiilen hapettuminen hiilidioksidiksi

$$C + O_2 = CO_2 \qquad (\Delta H = -393{,}505 \text{ kJ/mol}) \qquad (1)$$

Polttoaineen vedyn palamistulos on vesihöyry

$$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O \qquad (\Delta H = -341{,}826 \text{ kJ/mol}) \qquad (2)$$

Rikin palamistulos on rikkidioksidi

$$S + O_2 = SO_2 \qquad (\Delta H = -296{,}813 \text{ kJ/mol}) \qquad (3)$$

Kaasutuskaasua poltettaessa esiintyy myös reaktio

$$CO + 0.5O_2 = CO_2 \quad (\Delta H = -292{,}964 \text{ kJ/mol}) \qquad (4)$$

ΔH tarkoittaa reaktioentalpiaa. Entalpian arvot ovat määritetty 1 barin paineessa ja 298 K:n lämpötilassa. Negatiivinen etumerkki kertoo sen, että kaikki palamisreaktiot (1) – (4) ovat lämpöä vapauttavia eli eksotermisia (Raiko et al., 1995).

3.2 KIINTEÄN POLTTOAINEEN KAASUTUS

Kiinteän polttoaineen kaasutuksen kolme ensimmäistä vaihetta tapahtuu samalla tavalla kuin palamisessa. Toisin kuin poltossa, kaasutuksessa suuri osa jäännöshiilestä kaasuuntuu hiilimonoksidiksi tai metaaniksi seuraavien reaktioiden reaktioiden mukaan.

$$C + 0{,}5O_2 = CO \quad (\Delta H = -110{,}541 \text{ kJ/mol}) \qquad (5)$$

$$C + CO_2 = 2CO \quad (\Delta H = 172{,}423 \text{ kJ/mol}) \qquad (6)$$

$$C + H_2O = H_2 + CO \quad (\Delta H = 131{,}285 \text{ kJ/mol}) \qquad (7)$$

$$C + 2H_2 = CH_4 \quad (\Delta H = -74{,}600 \text{ kJ/mol}) \qquad (8)$$

Kaasutusreaktiot siis voivat olla joko lämpöä vaativia eli endotermisia tai eksotermisia (Raiko et. al, 1995).

4 PALAMISEN JA KAASUTUKSEN LASKENTA

Tässä työssä palamista ja kaasutusta mallinnetaan HSC Chemistry- tietokoneohjelmalla. Ohjelma laskee todennäköisimmät tasapainokoostumukset, eikä se ole minkään poltto- tai kaasutustavan erikoisohjelma. Tässä laskennassa oletetaan, että reaktiot käyttäytyvät normaalin palamisen/kaasutuksen tapaan.

Sulakammiossa on oltava tuhkan sulassa pitämiselle sopivat olosuhteet. Tämän takia mallinnuksissa käytetään kaikissa tapauksissa hyvin korkeaan lämpötilaan (1800 K) esilämmitettyä ilmaa (Mannelin, 2005).

Seuraavissa luvuissa tarkastellaan eri polttoainekoostumuksilla palamisen ja kaasutuksen reaktiotasapainoja ja lämpötilatasoja. Koska työn tavoitteena on kehittää sulakaasutusmenetelmä kotimaisille biopolttoaineille, on niitä valittu eniten.

4.1 RUOKOHELPI

Ruokohelpi on Suomessa luonnonvaraisena kasvava monivuotinen heinäkasvi, jolla on runsas biomassasato. Luonnossa se esiintyy noin 1 m^2:n kokoisina tai suurempina kasvustoina ja se leviää tehokkaasti. Viljeltyjen, lupaavimpien lajikkeiden sato on ollut yli 10 t kuiva-ainetta/ha. Ruokohelpiä viljellään noin 1000 hehtaarin alalla ja sitä on kokeiltu seospolttoaineena yleensä turpeen kanssa (Alakangas, 2000).

4.1.1 Häviötön ja häviöllinen poltto

Erään ruokohelpikasvin kuiva-ainekoostumuskoostumus on esitetty taulukossa 1, kosteuspitoisuus 14 % (Alakangas, 2000). Palamisilman tulolämpötila ennen esilämmitystä olkoon kaikissa tapauksissa 25 ºC ja paine 1 bar suhteellisen kosteuden ollessa 0,6. Valitaan ilmakertoimeksi kiinteille polttoaineille tyypillinen 1,2.

Taulukko 1 Erään ruokohelpikasvin kuiva-ainekoostumus (Alakangas, 2000)

Kuiva-aine	Massaosuus %
C	44,6
H_2	5,55
N_2	0,81
O_2	40,11
S	0,22
Tuhka	8,71

Käydään tärkeimmät laskentayhtälöt teoksen Raiko et. al. Mukaan. Palamisilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus

$$y_h = \frac{p_h}{p_{tot}} \tag{9}$$

missä y_h on vesihöyryn mooliosuus ilmassa

p_h vesihöyryn osapaine [bar]

p_{tot} kostean ilman paine [bar]

Vesihöyryn osapaine saadaan ilman suhteellisen kosteuden avulla

$$p_h = \varphi \cdot p_h' \tag{10}$$

missä φ on suhteellinen kosteus

p_h' ilman lämpötilaa vastaava kylläisen höyryn paine [bar]

Ilman mukana tulevan kosteuden ja kuivan ilman suhde

$$\frac{n_h}{n_{ik}} = \frac{y_h}{1 - y_h} \tag{11}$$

missä n_h on ilman mukana tuleva vesimäärä [mol]

n_{ik} kuivan ilman tarve [mol]

Hapen tarve polttoaineen massaa kohti saadaan reaktioiden (1) – (3) mukaan

$$n_{O_2} = n_C + 0{,}5n_{H_2} - n_{O_2,\,pa} + n_S \tag{12}$$

missä n_{O_2} on hapen tarve [mol]

n_C hiilen ainemäärä polttoaineessa [mol]

n_{H_2} vedyn ainemäärä polttoaineessa [mol]

$n_{O_2,\,pa}$ hapen ainemäärä polttoaineessa [mol]

n_S rikin ainemäärä polttoaineessa [mol]

Ylimääräisen hapen määrä

$$n_{O_2,\,sk} = (\lambda - 1)n_{O_2} \tag{13}$$

missä $n_{O_2,\,sk}$ savukaasuihin siirtyvän hapen määrä [mol]

λ ilmakerroin [-]

Ilmakehässä on noin 3,77 kertaa hapen määrä inerttikaasuja, joista selvästi suurin osa on typpeä. Inerttikaasuista käytetään myös ilmaisua raakatyppi, joka ominaisuuksiltaan on riittävän lähellä typpeä palamisen tarkastelun kannalta. Palamisilman mukana tuleva raakatyppi

$$n_{N_2r} = \lambda \cdot 3{,}77 \cdot n_{O_2} \tag{14}$$

missä n_{N_2r} on raakatypen määrä palamisilmassa [mol]

Palamisilman mukana tuleva vesihöyry yhtälöistä (11) – (14)

$$n_{h,i} = (n_{O_2} + n_{O_2,sk} + n_{N_2 r}) \frac{y_h}{1 - y_h} \quad (15)$$

missä $n_{h,i}$ on palamisilman mukana tulevan vesihöyryn määrä [mol]

Yksityiskohtainen laskelma esitetään liitteessä 1. Otetaan kussakin tapauksessa tarkasteluun 1 kg polttoainetta. Syöttämällä saadut moolimäärät HSC- ohjelman lämpö- ja materiaalitasapainovalikkoon, voidaan selvittää adiabaattinen palamislämpötila. Eri ilmakertoimia voi kokeilla muuttamalla ilman määrää. Ilmakertoimilla 1 - 1,5 saadaan taulukko 2.

Tässä tapauksessa häviöitä aiheuttavat säteily- ja konvektiohäviöt kuumien esineiden pinnasta. Jatkuvuustilassa oltaessa myös poistettava tuhka aiheuttaa häviön. Kyseisen kaltaiselle laitteistolle on perusteltua pitää lämpöhäviöille 20 % osuutta tuodusta lämmöstä. Tuhkan lämpöhäviölle voidaan käyttää arvoa 2,5 MJ/kg (Mannelin, 2005). Materiaalitase pysyy muuttumattomana. Energiatase on muotoa

$$m_i h_i + m_{pa} q_i = m_{sk} h_{sk} + Q_{häv} \quad (16)$$

missä	m_i	on palamisilman massa	[kg]
	h_i	palamisilman entalpia syöttölämpötilassa	[MJ/kg]
	m_{pa}	polttoaineen massa	[kg]
	q_i	polttoaineen alempi lämpöarvo	[MJ/kg]
	m_{sk}	savukaasujen massa	[kg]
	h_{sk}	savukaasujen entalpia palamislämpötilassa	[MJ/kg]
	$Q_{häv}$	lämpöhäviö	[MJ]

Alkuoletusten perusteella lämpöhäviön suuruus on

$$Q_{häv} = 0{,}2(m_i h_i + m_{pa} h_{pa}) + m_t h_t \qquad (17)$$

missä m_t on tuhkan massa [kg]

h_t tuhkan ominaisentalpia [MJ/kg]

HSC- ohjelman mukaan polttoaineen reaktiolämpö $m_{pa} q_i = 18{,}04$ MJ ja palamisilman entalpia 1800 K:n lämpötilassa $m_i h_i = 9{,}35$ MJ. Näiden lämpömäärien summa siis tuodaan sulapolttokammioon. Lämpöhäviö lasketaan yhtälöllä (17). Vähentämällä saatu tulos HSC-ohjelman laskemasta polttoaineen reaktiolämmöstä saadaan palamislämpötilaksi ilmakertoimella $\lambda =$ 1,2 2787 K. Tällöin savukaasujen sisältämä lämpömäärää on 21,95 MJ. Tarkistus yhtälöillä (16) ja (17)

$$(9{,}65 + 18{,}04)MJ = 21{,}95\,MJ + 0{,}2(9{,}65 + 18{,}04)MJ + 0{,}0871\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$27{,}69\,MJ = 27{,}71\,MJ$$

Vastaavasti eri ilmakertoimilla palamisilman entalpia muuttuu, mutta tuhkahäviö pysyy samana. Vertailun vuoksi palamislämpötilat laitetaan taulukkoon 2. Taulukkotekstissä on mainittu myös palamisilman esilämmitys lämpötila ja polttoaineen kosteus.

Taulukko 2 Ruokohelpi: Polton savukaasut, häviöttömät ja häviölliset palamislämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 14 %)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T häv. [K]	T ad. [K]
1,0	31,96	32,75	0,12	125,54	0	2962	3587
1,1	31,96	35,06	0,12	138,07	3,32	2869	3471
1,2	31,96	35,37	0,12	150,60	6,65	2787	3370
1,3	31,96	35,68	0,12	163,13	9,97	2714	3279
1,4	31,96	35,99	0,12	175,66	13,29	2650	3199
1,5	31,96	36,60	0,12	188,19	16,62	2592	3128

4.1.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto

Kaasutuksessa vain polttoaineen koostumus on sama kuin poltossa. Ilmaa tuodaan selvästi vähemmän. Tällöin tuotekaasu poikkeaa huomattavasti palamisessa syntyvistä savukaasuista. Reaktioyhtälön tuotekaasun ainemäärät ovat alkutilanteessa tuntemattomia. Koostumuksen määrää Gibbsin minimienergia. Se on riippuvainen lämpötilasta ja toisaalta myös tuotekaasun koostumuksesta. Tämä ongelma on siis ratkaistavissa iteratiivisesti HSC:n tasapainokoostumusta hakevalla osiolla. Arvaamalla ensimmäinen kaasutus lämpötilan ohjelma laskee käyttäjän olettamista kaasukomponenteista tasapainokoostumuksen, jolla lasketaan lämpötilatasapaino-osiolla uusi kaasutuslämpötila. Tätä jatketaan, kunnes tuotekaasun koostumus ja lämpötila eivät enää muutu. Ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC hakee tilan

$$\begin{aligned} &31{,}96C + 23{,}87H_2 + 0{,}25N_2 + 10{,}78O_2 + 0{,}12S + 7{,}78H_2O + 6{,}646O_2 \\ &+ 25{,}058N_2 + 0{,}579H_2O = \\ &29{,}749CO + 2{,}211CO_2 + 23{,}429H_2 + 8{,}841H_2O + 25{,}308N_2 + 0{,}12SO_2 \end{aligned} \qquad (18)$$

Kaasutuslämpötila asettui arvoon 2106 K, vastaavalla menetelmällä saadaan koostumukset ja lämpötilat muilla ilmakertoimilla. Taulukkoon 3 on koottu tuotekaasukoostumuksia ja niiden aikaansaamia lämpötiloja. Yhtälön vasen puoli muuttuu ilmakerrointa vaihdettaessa palamisilman hapen, typen ja ilmankosteuden osalta.

Taulukko 3 Ruokohelpi: Häviöttömän kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 14 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0,2	29,749	2,211	23,429	8,841	25,308	0,120	2106
0,3	28,367	3,593	16,466	13,008	37,837	0,120	2462
0,4	26,463	5,497	10,226	14,491	50,366	0,120	2672
0,5	24,042	7,918	6,257	14,732	62,895	0,120	2802
0,6	21,604	10,356	3,996	13,953	75,424	0,120	2861

Tuotekaasun poltto ei ole tämän tutkimuksen pääaihe. Se on kuitenkin kokonaisuuteen miellettävissä, joten käsitellään sekin laskennassa. Poltto menee reaktioiden (2) ja (4)

mukaan. Palamisilma tuodaan nyt lämpötilassa 25 ºC. Tuotekaasu tuodaan polttokammioon taulukon 4 lämpötilassa 2106 K, jossa esitetään ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ saadun tuotekaasun savukaasut ja palamislämpötilat eri ilmamäärillä.

Taulukko 4 Ruokohelpi: Häviötön tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0.2 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1	31,96	34,75	0,12	125,55	0	2845
1,1	31,96	35,00	0,12	135,57	2,66	2719
1,2	31,96	35,25	0,12	145,60	5,32	2605
1,3	31,96	35,50	0,12	155,62	7,98	2501
1,4	31,96	35,75	0,12	165,64	10,64	2407
1,5	31,96	35,99	0,12	175,64	13,29	2321

4.1.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto

Lämpö- ja tuhkahäviöoletukset ovat samat kuin häviöllisen polton tapauksessa. Nyt ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ $m_{pa}q_i = 3{,}96$ MJ ja $m_i h_i = 1{,}61$ MJ eli selvästi polttotapausta pienemmät, koska ilmaa tuodaan vähän ja reaktiot eivät mene loppuun. HSC:n hakema tasapainokoostumus on

$$\begin{aligned} &31{,}96C + 23{,}87H_2 + 0{,}25N_2 + 10{,}78O_2 + 0{,}12S + 7{,}78H_2O + 6{,}646O_2 \\ &+ 25{,}058N_2 + 0{,}579H_2O = \\ &29{,}149CO + 2{,}811CO_2 + 24{,}029H_2 + 8{,}242H_2O + 25{,}308N_2 + 0{,}12SO_2 \end{aligned} \qquad (19)$$

Kaasutuslämpötilaksi asettui 1713 K. Tarkistus yhtälöiden (15) ja (16) tapaan

$$\begin{aligned} &(1{,}61 + 3{,}96)MJ = 4{,}25\,MJ + 0{,}2(1{,}61 + 3{,}96)MJ + 0{,}0871\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg \\ &\Leftrightarrow \\ &5{,}57\,MJ = 5{,}58175\,MJ \end{aligned}$$

Muilla ilmakertoimilla koostumukset ja lämpötilat näkyvät taulukossa 5. Kaasutustapauksessa ilmakertoimen kasvattaminen kasvattaa palamisilman entalpian lisäksi myös tuotekaasun lämpötiloja, koska reaktiot menevät pitemmälle.

Taulukko 5 Ruokohelpi: Häviöllisen kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 14 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0,2	29,312	2,643	23,861	8,409	25,308	0,120	1713
0,3	27,705	4,254	17,135	12,535	37,837	0,120	2020
0,4	25,728	6,232	10,911	14,353	50,366	0,120	2208
0,5	23,105	8,854	6,758	15,171	62,895	0,120	2338
0,6	19,782	12,178	4,028	15,296	75,424	0,120	2439

Tässä tapauksessa kaasuttaminen ei ole mielekästä pienimmällä ilmakertoimella, koska tuotekaasun lämpötila on pienempi kuin syötetyn ilman lämpötila. Valitaan kaasunpolttoon ilmakertoimen 0,3 tuotekaasu ja lasketaan palaminen eri ilmakertoimilla. Olkoot polttokammion häviöt Mannelinin esiselvityksen mukaiset 10 % lämpövirrasta. Taulukossa 6 on esitetty häviöllisen kaasunpolton lämpötilat. Tarkistetaan edellisten kohtien tapaan ($\lambda = 1{,}2$)

$$(6{,}00 + 11{,}98)MJ = 16{,}18\,MJ + 0{,}1(6 + 11{,}98)MJ$$
$$\Leftrightarrow$$
$$17{,}98\,MJ = 17{,}978\,MJ$$

Taulukko 6 Ruokohelpi: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,3 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1	31,96	31,76	0,12	122,36	0	2501
1,1	31,96	31,97	0,12	130,81	2,24	2405
1,2	31,96	32,18	0,12	139,27	4,48	2317
1,3	31,96	32,39	0,12	147,72	6,73	2236
1,4	31,96	32,60	0,12	156,17	8,97	2163
1,5	31,96	32,81	0,12	164,62	11,21	2095

4.2 HAKE

Hake on koneellisesti haketettua puuta, jota tehdään karsimattomasta kokopuusta, karsituista rangoista, raivauspuusta ja hakkuutähteistä, joita ovat latvukset ja oksat. Hakkuualoilta ja tienrakennustyömailta nostetaan nykyisin myös kantoja, jotka pienennetään murskaimella. Metsähake on yleisnimitys suoraan metsästä energiakäyttöön

tuleville hakkeille haketuspaikasta riippumatta. Haketta käytetään kiinteistöjen nykyaikaisissa automaattisissa puulämmityslaitteissa, aluelämpölaitoksissa ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksissa (Motiva OY, 2006).

4.2.1 Häviötön ja häviöllinen poltto

Hakkeen koostumus vaihtelee paikan mukaan. Käytetään hakkeelle taulukon 7 kuiva-ainekoostumusta, joka on otettu koostumuksien vaihteluväliltä. Polttoaineen kosteutena käytetään 50 %.

Taulukko 7 Hakkeen tyypillinen kuiva-ainekoostumus (Jalovaara et. al., 2003)

Aine	m-%
C	52
H_2	6
N_2	0,4
O_2	40
Tuhka	1,6

Laskenta noudattaa jo esitettyjä yhtälöitä. Adiabaattiset ja häviölliset palamislämpötilat ovat taulukossa 8. Oletukset lämpöhäviöistä ja tuhkasta ovat samat kuin edellisellä polttoaineella.

Taulukko 8 Hake: Polton savukaasut, häviöttömät ja häviölliset palamislämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 50 %)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T häv. [K]	T ad. [K]
1,0	21,67	44,92	86,47	0	2445	2917
1,1	21,67	45,13	95,11	2,29	2393	2856
1,2	21,67	45,35	103,75	4,58	2348	2800
1,3	21,67	45,56	112,39	6,88	2307	2750
1,4	21,67	45,77	121,03	9,17	2269	2705
1,5	21,67	45,99	129,67	11,46	2235	2665

Tarkistetaan häviöllisen polton ilmakertoimen 1,2 energiatase

$$(6,66+10,93)MJ = 14,05\,MJ + 0,2(6,66+14.05)MJ + 0,008\,kg \cdot 2,5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$17,59\,MJ = 17,588\,MJ$$

Hakkeen palamislämpötilat siis ovat selvästi ruokohelpeä alhaisemmat johtuen suuresta vesipitoisuudesta.

4.2.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto

Ilmakertoimella $\lambda = 0,2$ tasapaino häviöttömässä kaasutuksessa on HSC:n mukaan kaasutuslämpötilan ollessa 1221 K.

$$\begin{aligned} &21,67C + 15H_2 + 0,07N_2 + 6,25O_2 + 27,78H_2O + 4,548O_2 \\ &+ 17,282N_2 + 0,428H_2O = \\ &13,636CO + 8,035CO_2 + 23,036H_2 + 20,172H_2O + 17,350N_2 \end{aligned} \qquad (20)$$

Muilla ilmakertoimilla kaasutuskaasut ja lämpötilat käyttäytyvät taulukon 9 mukaisesti.

Taulukko 9 Hake: Häviöttömän kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 50 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	13,636	8,034	23,036	20,172	17,350	1221
0,3	14,054	7,614	16,325	22,976	25,920	1489
0,4	13,173	8,469	10,967	22,387	34,560	1622
0,5	11,956	9,714	7,261	21,956	43,200	1744
0,6	10,380	11,290	4,639	20,934	51,840	1860

Tuotekaasu on kuumempaa kuin tuloilma vasta ilmakertoimella $\lambda = 0,6$, joten valitaan sen ilmakertoimen tuotekaasu poltettavaksi. Taulukossa 10 on eri ilmakertoimien savukaasut ja lämpötilat.

Taulukko 10 Hake: Häviötön tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0.6 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1	21.67	26,27	80,15	0	2247
1,1	21.67	26,34	82,98	0,75	2205
1,2	21.67	26,41	85,81	1,50	2165
1,3	21.67	26,48	88,64	2,25	2127
1,4	21.67	26,55	91,48	3,00	2090
1,5	21.67	26,62	94,31	3,75	2055

4.2.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto

Edellisen polttoaineen tapaan HSC antaa tasapainotilaksi ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ lämpötilan ollessa 1059 K.

$$\begin{aligned} &21{,}67C + 15H_2 + 0{,}07N_2 + 6{,}25O_2 + 27{,}78H_2O + 4{,}548O_2 \\ &+ 17{,}282N_2 + 0{,}428H_2O = \\ &11{,}865CO + 9{,}806CO_2 + 24{,}807H_2 + 18{,}401H_2O + 17{,}350N_2 \end{aligned} \qquad (21)$$

Tarkistus

$$(1{,}11 + 1{,}58)MJ = 2{,}13\,MJ + 0{,}2(1{,}11 + 1{,}58)MJ + 0{,}008\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$2{,}69\,MJ = 2{,}688\,MJ$$

Muilla ilmakertoimilla lämpötilat ja koostumukset ovat taulukon 11 mukaiset.

Taulukko 11 Hake: Häviöllisen kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 50 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	11,865	9,806	24,807	18,401	17,350	1059
0,3	12,645	9,013	17,561	21,696	25,990	1283
0,4	11,954	9,708	11,907	21,512	34,633	1401
0,5	10,886	10,780	7,988	21,090	43,270	1505
0,6	9,469	12,200	5,192	20,546	51,915	1600

Tuotekaasu on siis tuloilmaa kylmempää kaikissa tapauksissa. Ilmakerrointa pitäisi kasvattaa entisestään, jotta kaasutuslämpötila ylittäisi lämpötilan 1800 K, jolloin ollaan jo turhan lähellä stökiömetristä palamista. Lasketaan nyt kuitenkin ilmakertoimen 0,6 tuotekaasunpolton lämpötilat ja savukaasut eri ilmakertoimilla. Taulukkoon 12 on koottu tulokset. Tarkistus ($\lambda = 1{,}2$)

$$(4{,}69 + 3{,}94)MJ = 7{,}77\,MJ + 0{,}1(4{,}69 + 3{,}94)MJ$$
$$\Leftrightarrow$$
$$8{,}63\,MJ = 8{,}633\,MJ$$

Taulukko 12 Hake: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,6 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	21.67	26,42	79,55	0	1889
1,1	21.67	26,49	82,31	0,73	1855
1,2	21.67	26,56	85,08	1,47	1823
1,3	21.67	26,63	87,84	2,20	1792
1,4	21.67	26,70	90,61	2,93	1763
1,5	21.67	26,76	93,37	3,76	1733

Kuten huomataan, suurimmilla ilmakertoimilla palamislämpötila on pienempi kuin kaasutusilman tulolämpötila ja pienimmilläkin lämpötila on vain vähän suurempi. Näin kostean polttoaineen sulakaasutuksen järkevyys on täten kyseenalaista.

4.3 TURVE

Turve on muodostunut kuolleista kasvinosista maatumalla hyvin kosteissa oloissa. Hapen puutteen ja runsaan kosteuden takia kasvien jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti hajoava turvekerrostuma (Alakangas, 2000).

Turpeen koostumus vaihtelee tuotantopaikan ja –tavan mukaan. Tässä laskennassa turpeella on taulukon 13 mukainen koostumus, joka on otettu palaturpeen vaihteluväliltä.

Taulukko 13 Palaturpeen kuiva-ainekoostumus (Alakangas 2000)

Kuiva-aine	m-%
C	55,50
H_2	5,50
N_2	1,85
O_2	32,50
S	0,15
Tuhka	4,50

Kosteutena käytetään 38,9 % kokonaispainosta (Alakangas, 2000).

4.3.1 Häviötön ja häviöllinen poltto

Adiabaattiset ja häviölliset palamislämpötilat on koottu taulukkoon 14.

Taulukko 14 Turve: Polton savukaasut, häviöttömät ja häviölliset palamislämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 38,9 %)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T häv. [K]	T ad. [K]
1,0	28,26	41,26	0,06	115,43	0	2633	3159
1,1	28,26	41,55	0,06	126,94	3,05	2564	3075
1,2	28,26	41,83	0,06	138,44	6,10	2504	3001
1,3	28,26	42,12	0,06	149,94	9,15	2450	2935
1,4	28,26	42,40	0,06	161,45	12,20	2401	2876
1,5	28,26	45,99	0,06	129,67	11,46	2362	2823

Ilmakertoimen 1,2 tapauksen tarkistus

$$(8{,}87 + 14{,}25)MJ = 18{,}42\,MJ + 0{,}2(8{,}87 + 14{,}25)MJ + 0{,}0275\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$

$$\Leftrightarrow$$

$$23{,}12\,MJ = 23{,}11275\,MJ$$

Turpeella palamislämpötilat nousevat myös kohtuullisen korkeiksi.

4.3.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto

Ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC hakee edelliseen tapaan tasapainon lämpötilan ollessa 1268 K.

$$\begin{aligned} &28{,}26C + 16{,}8H_2 + 0{,}4N_2 + 6{,}21O_2 + 0{,}06S + 21{,}61H_2O + 6{,}102O_2 \\ &+ 23{,}006N_2 + 0{,}57H_2O = \\ &22{,}215CO + 6{,}038CO_2 + 26{,}231H_2 + 11{,}933H_2O + 23{,}406N_2 + 0{,}060SO_2 \end{aligned} \quad (22)$$

Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu on taulukon 15 mukaista.

Taulukko 15 Turve: Häviöttömän kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 38,9 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0,2	22,215	6,038	26,231	11,933	23,406	0,060	1268
0,3	22,238	6,020	18,129	16,416	34,909	0,060	1664
0,4	20,968	7,291	11,757	17,671	46,412	0,060	1904
0,5	19,043	9,217	7,449	18,061	57,915	0,060	2087
0,6	11,775	16,484	4,525	17,916	69,418	0,060	2241

Ilmakertoimesta 0,4 lähtien tuotekaasu on tuloilmaa kuumempaa, joten käytetään sen ilmaketoimen tuotekaasua kaasunpoltossa. Taulukossa 16 näkyvät savukaasut ja lämpötilat eri ilmakertoimilla.

Taulukko 16 Turve: Häviötön tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0.4 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	28,26	30,96	0,06	108,10	0	2525
1,1	28,26	31,11	0,06	114,27	1,64	2446
1,2	28,26	31,26	0,06	120,44	3,27	2372
1,3	28,26	31,41	0,06	126,60	4,91	2303
1,4	28,26	31,57	0,06	132,77	6,55	2240
1,5	28,26	31,72	0,06	138,94	8,18	2180

4.3.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto

Tasapainoyhtälö ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC- ohjelmalla on lämpötilan ollessa 1086 K.

$$28{,}26C + 16{,}8H_2 + 0{,}4N_2 + 6{,}21O_2 + 0{,}06S + 21{,}61H_2O + 6{,}102O_2 + 23{,}005N_2 + 0{,}57H_2O = 20{,}109CO + 7{,}818CO_2 + 26{,}420H_2 + 10{,}129H_2O + 23{,}406N_2 + 0{,}06SO_2 \quad (23)$$

Tarkistus

$$(1{,}48 + 1{,}45)MJ = 2{,}27\,MJ + 0{,}2(1{,}48 + 1{,}45)MJ + 0{,}0275\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$

$$\Leftrightarrow$$

$$2{,}93\,MJ = 2{,}92475\,MJ$$

Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu ja lämpötilat näkyvät taulukossa 17.

Taulukko 17 Turve: Häviöllisen kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 38,9 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0,2	20,109	7,818	26,420	10,129	23,406	0.060	1086
0,3	20,927	7,322	19,140	15,277	34,909	0.060	1413
0,4	19,090	8,447	12,584	16,886	46,412	0.060	1617
0,5	18,007	10,251	8,141	17,562	57,915	0.060	1771
0,6	15,593	12,667	5,065	17,693	69,418	0.060	1899

Tuotekaasun polttoon on valittava ilmakertoimen 0,6 tuotekaasu. Tulokset ovat taulukossa 18. Tarkistus ilmakertoimen 1,2 laskennasta

$$(7{,}01 + 5{,}64)MJ = 11{,}39\,MJ + 0{,}1(7{,}01 + 5{,}64)MJ$$

$$\Leftrightarrow$$

$$12{,}65\,MJ = 12{,}655\,MJ$$

Taulukko 18 Turve: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,6 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	28,26	23,72	0,06	108,36	0	2142
1,1	28,26	23,82	0,06	112,25	1,03	2098
1,2	28,26	23,92	0,06	116,15	2,07	2056
1,3	28,26	24,01	0,06	120,04	3,10	2016
1,4	28,26	24,11	0,06	123,93	4,13	1977
1,5	28,26	24,20	0,06	127,83	5,16	1941

4.4 RUSKOHIILI

Ruskohiili kuuluu huonolaatuisiin hiililaatuihin. Sen kosteus ja tuhkapitoisuus on suuri, joten lämpöarvo on hiililaatujen pienimpiä. Ruskohiiltä voidaan pitää välilenkkinä kehitysketjussa turpeesta kivihiileen (Hassinen, 1999).

Ruskohiili on tähän tarkasteluun otettu mukaan sen korkean tuhkapitoisuuden takia. Tarkoitus on tarkastella suuren tuhkamäärän aiheuttamaa häviötä. Tämän tutkimuksen muilla polttoaineillahan se muodostuu hyvin pieneksi. Taulukossa 19 on erään runsaasti tuhkaa sisältävän ruskohiililaadun koostumus. Tasapainokosteus on 12 %. Kuiva-aineen rikkipitoisuus on 2,6 ja tuhkapitoisuus 29,2 %.

Taulukko 19 Erään ruskohiilen koostumus (Aleksic et. al., 1998)

Kuiva-aine, tuhkaton ja rikitön	m-%
C	66,040
H_2	7,750
N_2	2,020
O_2	21,517

4.4.1 Häviötön ja häviöllinen poltto

Ilmakertoimella $\lambda = 1{,}2$ adiabaattinen palamislämpötila on 3236 K ja häviöllinen 2645 K. Tarkistus

$$(12{,}73 + 19{,}46)MJ = 25{,}12\,MJ + 0{,}2(12{,}73 + 19{,}46)MJ + 0{,}25696\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$32{,}19\,MJ = 32{,}2004\,MJ$$

Tuhkahäviön osuus näyttäisi olevan 2 % luokkaa tuodusta lämmöstä. Koko häviölämpövirrasta sen osuus on noin 10 %. Muilla ilmakertoimilla lämpötilat ja savukaasut näkyvät taulukossa 20.

Taulukko 20 Ruskohiili: Polton savukaasut, häviöttömät ja häviölliset palamislämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 12 %)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T häv. [K]	T ad. [K]
1,0	34,29	34,90	1,43	165,56	0	2816	3456
1,1	34,29	35,31	1,43	182,07	4,38	2724	3338
1,2	34,29	35,72	1,43	198,58	8,76	2645	3236
1,3	34,29	36,13	1,43	215,09	13,14	2575	3147
1,4	34,29	36,53	1,43	231,60	17,52	2513	3069
1,5	34,29	36,94	1,43	248,11	21,90	2459	2998

4.4.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto

Ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC hakee edelliseen tapaan tasapainon lämpötilan ollessa 1667 K.

$$\begin{aligned} &34{,}29C + 24{,}14H_2 + 0{,}45N_2 + 3{,}99O_2 + 1{,}43S_2 + 6{,}67H_2O + 8{,}758O_2 \\ &+ 33{,}018N_2 + 0{,}818H_2O = \\ &32{,}802CO + 0{,}035CO_2 + 24{,}937H_2 + 0{,}089H_2O + 33{,}472N_2 + 1{,}430SO_2 \end{aligned} \quad (24)$$

Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu on taulukon 21 mukaista.

Taulukko 21 Ruskohiili: Häviöttömän kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 12 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0.2	32,802	0,035	24,937	0,089	33,472	1,430	1667
0.3	32,861	1,425	20,155	4,360	49,983	1,430	2081
0.4	31,333	2,956	14,205	7,907	66,494	1,430	2351
0.5	28,980	5,310	8,745	10,446	83,005	1,430	2560
0.6	25,680	8,610	5,013	11,630	99,516	1,430	2710

Tuotekaasun polttoon valitaan ilmakertoimen 0,3 tuotekaasu. Kootaan tulokset taulukkoon 22.

Taulukko 22 Ruskohiili: Häviötön tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0.3 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	34,29	26,99	1,43	149,92	0	2786
1,1	34,29	27,24	1,43	159,91	2,65	2671
1,2	34,29	27,49	1,43	169,91	5,30	2567
1,3	34,29	27,73	1,43	179,90	7,95	2473
1,4	34,29	27,98	1,43	189,89	10,60	2386
1,5	34,29	28,23	1,43	199,89	13,25	2306

4.4.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto

Tasapainokoostumus ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC- ohjelman mukaan on Lämpötilan ollessa 1286 K.

$$\begin{aligned} &34{,}29C + 24{,}14H_2 + 0{,}45N_2 + 3{,}99O_2 + 1{,}43S + 6{,}67H_2O + 8{,}758O_2 \\ &+ 33{,}018N_2 + 0{,}818H_2O = \\ &30{,}433CO + 0{,}681CO_2 + 22{,}051H_2 + 0{,}86H_2O + 33{,}472N_2 + 1{,}430SO_2 \end{aligned} \qquad (25)$$

Tarkistus

$$(2{,}12 + 2{,}16)MJ = 2{,}78\,MJ + 0{,}2(2{,}12 + 2{,}16)MJ + 0{,}25696\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$

$$\Leftrightarrow$$

$$4{,}28\,MJ = 4{,}2784\,MJ$$

Hiilen ainemääristä näkee, että ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ kaasutus jää vajaaksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että kaasuttimeen jää reagoimatonta hiiltä. Tuhkan aiheuttama häviö on 15 % sisään tuodusta lämmöstä ja lämpöhäviöstä 43 %. Eli kaasutusvaiheessa tuhka on merkittävä häviön aiheuttaja. Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu ja lämpötilat näkyvät taulukossa 23.

Taulukko 23 Ruskohiili: Häviöllisen kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 12 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	SO_2 [mol]	T [K]
0,2	30,433	0,681	22,051	0,860	33,472	1,430	1286
0,3	32,092	2,161	19,734	4,244	49,983	1,430	1630
0,4	30,174	4,111	13,518	7,864	66,494	1,430	1891
0,5	27,850	6,439	9,043	10,244	83,005	1,430	2057
0,6	24,482	9,808	5,452	11,768	99,516	1,430	2195

Kaasunpoltto ilmakertoimen 0,4 tuotekaasusta antaa eri ilmakertoimilla taulukon 24 mukaiset lämpötilat ja savukaasut. Tarkistus ilmakertoimen 1,2 tapauksesta

$$(6{,}73 + 11{,}82)MJ = 16{,}7\,MJ + 0{,}1(6{,}73 + 11{,}82)MJ$$
$$\Leftrightarrow$$
$$18{,}55\,MJ = 18{,}555\,MJ$$

Taulukko 24 Ruskohiili: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,4 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	SO_2 [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	34,29	23,29	1,43	148,85	0	2380
1,1	34,29	23,63	1,43	157,09	2,18	2299
1,2	34,29	23,83	1,43	165,33	4,37	2224
1,3	34,29	24,03	1,43	173,56	6,55	2154
1,4	34,29	24,24	1,43	181,80	8,74	2090
1,5	34,29	24,44	1,43	190,03	10,92	2030

4.5 PUUPELLETTI

Puupelletit ovat yleensä mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteista tehtyjä sylinterin muotoisia puupolttoainepuristeita. Raaka-aine on useimmiten kuivaa purua, hiontapölyä ja

kutterinlastua, mutta pellettejä voidaan puristaa myös tuoreesta biomassasta, kuoresta ja metsähakkeesta, jolloin raaka-aine pitää murskauksen lisäksi kuivata ennen pelletointia (Paju ja Alakangas, 2002).

Käytetään laskennassa taulukon 25 mukaista koostumusta pelletille. Kosteus on 6,6 % polttoaineen painosta.

Taulukko 25 Pelletin kuiva-ainekoostumus (Paju ja Alakangas, 2005)

Kuiva-aine	m-%
C	49,70
H_2	6,11
N_2	0,16
O_2	43,73
Tuhka	0,30

4.5.1 Häviötön ja häviöllinen poltto

Ilmakertoimella $\lambda =$ 1,2 adiabaattinen palamislämpötila on 3461 K ja häviöllinen 2881 K. Tarkistus

$$(11{,}68 + 21{,}93)MJ = 26{,}88\,MJ + 0{,}2(11{,}68 + 21{,}93)MJ + 0{,}0028\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$33{,}61\,MJ = 33{,}609\,MJ$$

Muilla ilmakertoimilla lämpötilat ja savukaasut näkyvät taulukossa 26.

Taulukko 26 Puupelletti: Polton savukaasut, häviöttömät ja häviölliset palamislämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 6,6 %)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T häv. [K]	T ad. [K]
1,0	36,68	35,95	151,56	0	3076	3699
1,1	36,68	36,33	166,71	4,02	2972	3572
1,2	36,68	36,70	181,86	8,04	2881	3461
1,3	36,68	37,08	197,01	12,06	2801	3363
1,4	36,68	37,45	212,16	16,07	2730	3276
1,5	36,68	37,83	227,31	20,09	2681	3128

4.5.2 Häviötön kaasutus ja tuotekaasun poltto

Ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC hakee edelliseen tapaan tasapainon lämpötilan ollessa 2268 K.

$$\begin{aligned} &38{,}68C + 28.53H_2 + 0{,}05N_2 + 8{,}038O_2 + 3{,}67H_2O + 12{,}76O_2 \\ &+ 30{,}353N_2 + 0{,}75H_2O = \\ &37{,}239CO + 1{,}441CO_2 + 27{,}055H_2 + 5{,}895H_2O + 30{,}353N_2 \end{aligned} \qquad (26)$$

Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu on taulukon 27 mukaista.

Taulukko 27 Pelletti: Häviöttömän kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 6,6 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	37,239	1,441	27,055	5,895	30,353	2268
0,3	35,508	3,172	18,836	11,337	45,505	2640
0,4	33,226	5,454	11,433	13,682	60,657	2857
0,5	30,522	8,158	6,999	14,073	75,808	2964
0,6	28,073	10,607	4,635	13,276	90,960	2991

Kaasunpolttoon voidaan valita ilmakertoimen 0,2 tuotekaasu. Taulukossa 28 ovat adiabaattiset palamislämpötilat ja savukaasut.

Taulukko 28 Pelletti: Häviötön tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0.2 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	38,68	35,95	151,55	0	2937
1,1	38,68	36,25	163,67	3,21	2801
1,2	38,68	36,55	175,79	6,43	2679
1,3	38,68	36,85	187,91	9,64	2569
1,4	38,68	37,15	200,02	12,86	2470
1,5	38,68	37,35	212,14	16,07	2379

4.5.3 Häviöllinen kaasutus ja tuotekaasun poltto

Tasapainokoostumus ilmakertoimella $\lambda = 0{,}2$ HSC- ohjelman mukaan on lämpötilan ollessa 1906 K.

$$\begin{aligned} &38{,}68C + 28{,}53H_2 + 0{,}05N_2 + 8{,}038O_2 + 3{,}67H_2O + 12{,}76O_2 \\ &+ 30{,}353N_2 + 0{,}75H_2O = \\ &36{,}936CO + 1{,}744CO_2 + 27{,}358H_2 + 5{,}529H_2O + 30{,}353N_2 \end{aligned} \qquad (27)$$

Tarkistus

$$(1{,}95 + 4{,}89)MJ = 5{,}46\,MJ + 0{,}2(1{,}95 + 4{,}89)MJ + 0{,}0028\,kg \cdot 2{,}5\,MJ/kg$$
$$\Leftrightarrow$$
$$6{,}84\,MJ = 6{,}835\,MJ$$

Muilla ilmakertoimilla tuotekaasu ja lämpötilat näkyvät taulukossa 29.

Taulukko 29 Pelletti: Häviöllisen kaasutuksen koostumukset ja kaasutuslämpötilat (ilma 1800 K, kosteus 6,6 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	36,936	1,744	27,358	5,529	30,353	1906
0,3	35,030	3,650	19,409	11,034	45,505	2215
0,4	32,563	6,117	12,067	13,759	60,657	2406
0,5	29,265	9,415	7,280	15,066	75,808	2529
0,6	25,160	13,520	4,269	15,322	90,960	2618

Tuotekaasu voidaan siis häviöllisessäkin tapauksessa polttaa ilmakertoimen 0,2 tuotekaasusta. Kaasunpoltto ilmakertoimen 0,2 tuotekaasusta antaa eri ilmakertoimilla taulukon 30 mukaiset lämpötilat ja savukaasut. Tarkistus ilmakertoimen 1,2 tapauksesta

$$(5{,}46 + 17{,}07)MJ = 20{,}27\,MJ + 0{,}1(5{,}46 + 17{,}07)MJ$$
$$\Leftrightarrow$$
$$22{,}53\,MJ = 22{,}523\,MJ$$

Taulukko 30 Pelletti: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen $\lambda = 0{,}2$ tuotekaasusta (ilma 298 K)

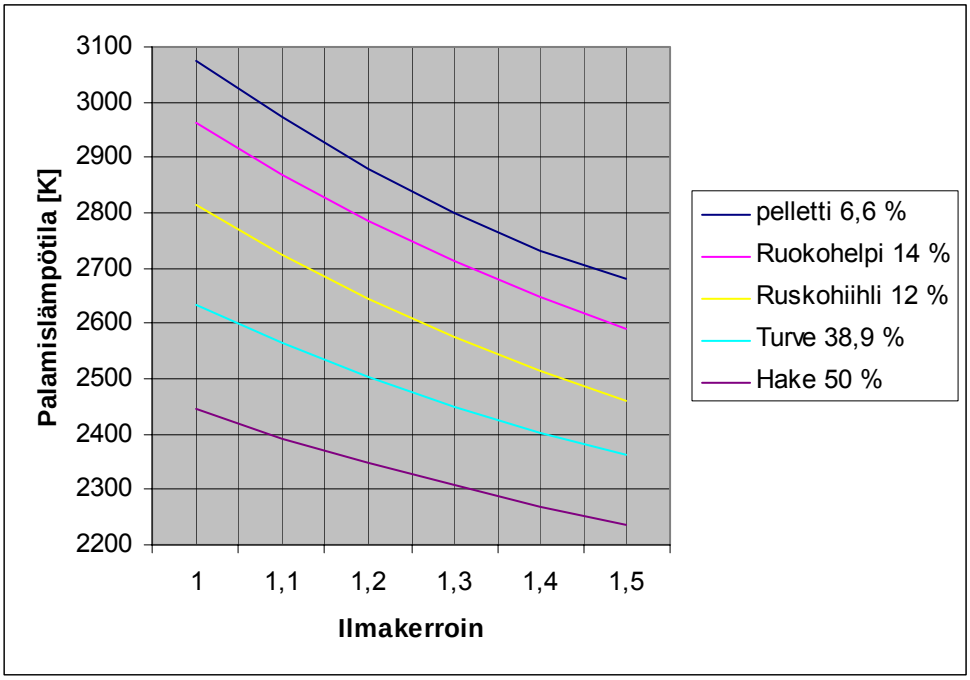
λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,5	38,68	35,89	151,55	0	2572
1,1	38,68	36,19	163,67	3,21	2456
1,2	38,68	36,49	175,79	6,43	2351
1,3	38,68	36,79	187,91	9,64	2256
1,4	38,68	37,09	200,02	12,86	2170
1,5	38,68	37,39	212,14	16,07	2091

4.6 JOHTOPÄÄTÖKSET LASKENNASTA

Laskentavaihe eri polttoainekoostumuksilla on saatu päätökseen. On aika tarkastella tuloksia poltto/kaasutuskokeiden kannalta. Seuraavaksi arvioidaan eri polttoaineiden soveltuvuutta kokeellisen osion toteutukseen. Keskeisin tarkastelukohde on lämpötilatasot eri prosesseissa. Tarkastellaan häviöllisen laskennan lämpötiloja, koska ne ovat lähempänä todellista tilannetta.

4.6.1 Poltto

Kuten aiemmin huomattiin, häviöllisetkin palamislämpötilat nousevat erittäin suuriksi. Tämä selittyy sillä, että palamisilma täytyy esilämmittää erittäin suureen lämpötilaan, jotta tulipesässä oleva tuhka olisi juoksevaa. Suuret lämpötilat aiheuttavat helposti materiaalivaurioita ja lisäävät typenoksidipäästöjä (Mannelin, 2005). Kuvassa 6 on esitetty tarkasteltavien polttoaineiden palamislämpötilat eri ilmakertoimilla.

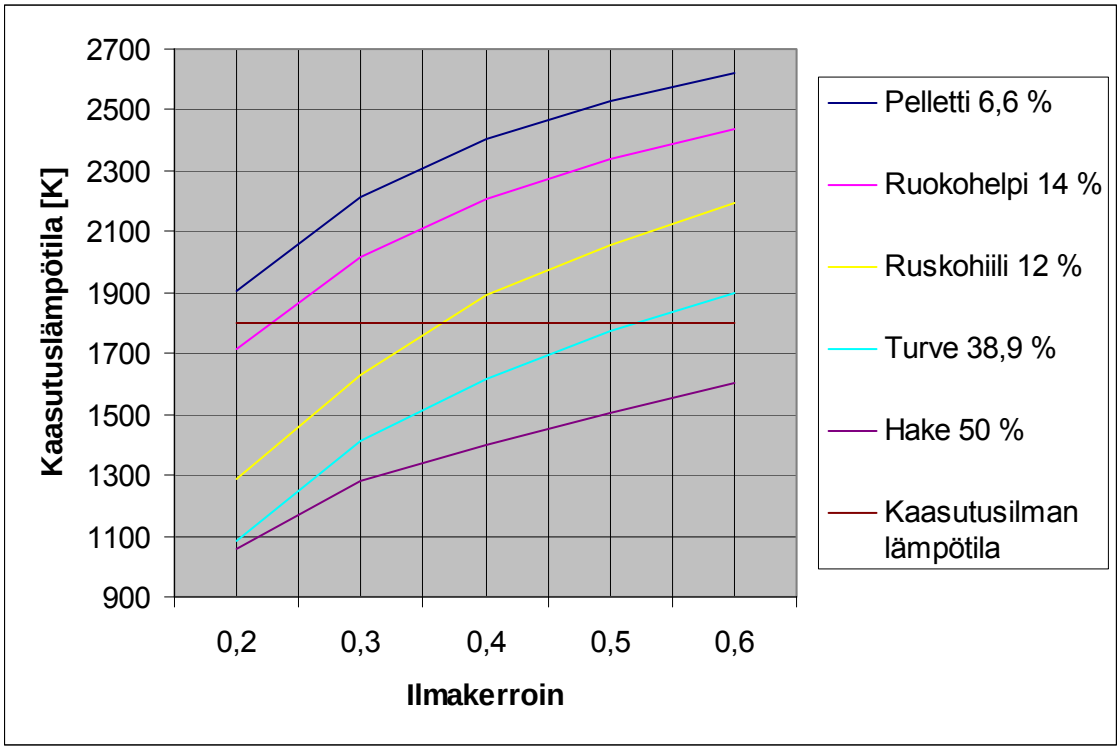


Kuva 6 Polttoaineiden kosteusprosentit ja palamislämpötilat eri ilmakertoimilla

Lämpötilat siis vaihtelevat ilmakertoimesta ja polttoaineesta riippuen reilusta 2200 vajaaseen 3100 K:iin. Suurten lämpötilojen hallinta edellyttäisi hyvää jäähdytystä. Tällöin polttokammion sisällä pitäisi olla paljon jäähdytyspintaa, joka ei tässä vaiheessa ole mahdollista laitteen pienuuden vuoksi. Polttoon parhaiten soveltuisi hake, jonka lämpötilat ovat alhaisimmat. Toisaalta jos hake olisi tarkastelukosteutta (50 %) pienempi, se palaisi selvästi korkeammassa lämpötilassa, jolloin poltto olisi ongelmallista senkin kohdalla.

4.6.2 Kaasutus ja tuotekaasun poltto

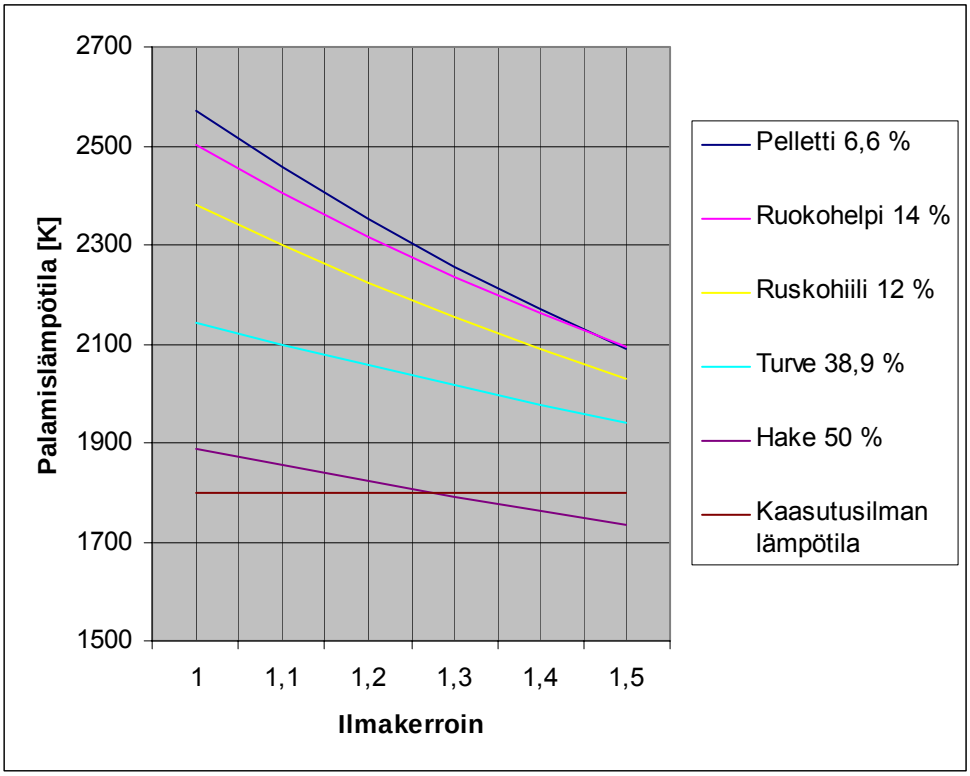
Kaasutuksessa lämpötilat jäävät luonnollisesti polttoa pienemmiksi. Tällöin ali-ilmaisen tilan vuoksi reaktiot eivät mene loppuun. Tuotekaasun lämpötilaa tulee verrata kaasutusilman lämpötilaan. Ilmahan tulee selvästi ympäristöä korkeammassa lämpötilassa. Kuvassa 7 on polttoaineiden kaasutuslämpötilat eri ilmakertoimilla. Vakioviiva 1800 K on ilman tulolämpötila. Kohta, jossa viiva ja lämpötilakäyrä leikkaavat on pienin ilmakerroin, jolla tuotekaasu saavuttaa tuloilman lämpötilan. Tämän vuoksi tätä ilmakerrointa voinee tässä tapauksessa kutsua kriittiseksi ilmakertoimeksi.



Kuva 7 Polttoaineiden kosteusprosentit ja kaasutuslämpötilat eri ilmakertoimilla

Hake ei sovellu kaasutukseen ainakaan tässä kosteudessa. Sen kaasutuslämpötilat jäävät alle 1800 K:n kautta linjan. Kuivauksella tilanne luonnollisesti muuttuisi. Turvekin vaatii yli 0,5 ilmakertoimen, joten sen pitäisi olla kuivempaa. Ruskohiili on sillä rajoilla, mutta koska se ei ole biopolttoaine, ei arvioida sitä enempää. Parhaiten kaasutukseen soveltuu pelletti ja ruokohelpi tai kiinteä polttoaine, jonka koostumus on samantapainen kuin näillä kahdella. Kaasutuslämpötilat pelletillä ja ruokohelpikasvilla ovat ilmakertoimilla 0,2 - 0,3 noin 1700 - 2200 K. Se ei ole keskimäärin paljon korkeammalla tasolla kuin kaasutusilman tulolämpötila. Eli jos laitteiston saa kestämään ilman tulolämpötilan, niin kaasutuslämpötilatkin on hallittavissa.

Kuvassa 8 näkyy polttoaineiden palamislämpötilat kaasunpoltossa.



Kuva 8 Polttoaineiden kosteusprosentit ja tuotekaasunpolton lämpötilat eri ilmakertoimilla

Tämäkin osoittaa, että todella kostean polttoaineen kaasutus/kaasunpoltto ei ole mielekästä, koska silloin myös kaasunpolton lämpötila jää kaasunpoltolle oleellisimman ilmakerroinalueella (1,05 - 1,2) lähelle kaasutusilman tulolämpötilaa. Kaasunpoltossahan ilma tuodaan ympäristön lämpötilassa, joka on tässä tapauksessa valittu referenssilämpötilaan. Parhaiten näistä polttoaineista kaasutukseen soveltuvat pelletin ja ruokohelmikasvin tapaiset polttoaineet. Näillä polttoaineilla kaasunpolton lämpötilat ilmakerroinalueella 1,05 - 1,2 ovat noin 2300 - 2500 K. Tällöin ilmakerroin 1,2 tuntuisi järkevältä. Palamisilmaa ei ole syytä esilämmittää, koska tällöin jo aikaisemmin mainitut materiaalivauriot ja typenoksidipäästöt olisivat todennäköisempiä.

4.6.3 Häviöt

Lämpöhäviöt ja tuhkan lämpökapasiteetti perustuivat siis oletuksiin. Häviölliset lämpötilat poikkeavat adiabaattisista suunnilleen siinä suhteessa, miten suureksi oli oletettu

lämpöhäviön osuus. Tuhkan aiheuttama häviö ei kotimaisilla polttoaineilla kaasutustasettakaan tarkasteltaessa ylittänyt 5 % sisään tuodusta energiasta, joten lämpöhäviöihin verrattuna tuhkahäviö on pieni.

4.6.4 Tutkimuksen jatko

Laskennan tulokset tukevat kaasutusprosessin käyttöä koelaitteen suunnittelussa ja kokeiden teossa. Koska aikaisempaa kokemusta biopolttoaineiden sulakaasutuksesta ei Voimalaitostekniikan laboratoriolla ole, on kokeellinen osio aloitettava mahdollisimman yksinkertaisilla mittauksilla. Aivan ensin on tarkoitus kuumentaa kaasuliekillä tyhjää sulatusupokasta ja mitata lämpötiloja, jotka se kykenee välittämään. Seuraavaksi yritetään kyseisessä astiassa saada tuhka sulamaan ja selvittämään olosuhteita, jotka astiassa tällöin on vallittava. Sen jälkeen vuorossa on pienen koelaitteen rakentaminen ja kaasutuskokeiden suoritus.

5 KUUMENNUS- JA SULATUSKOKEET

5.1 NESTEKAASULIEKKI

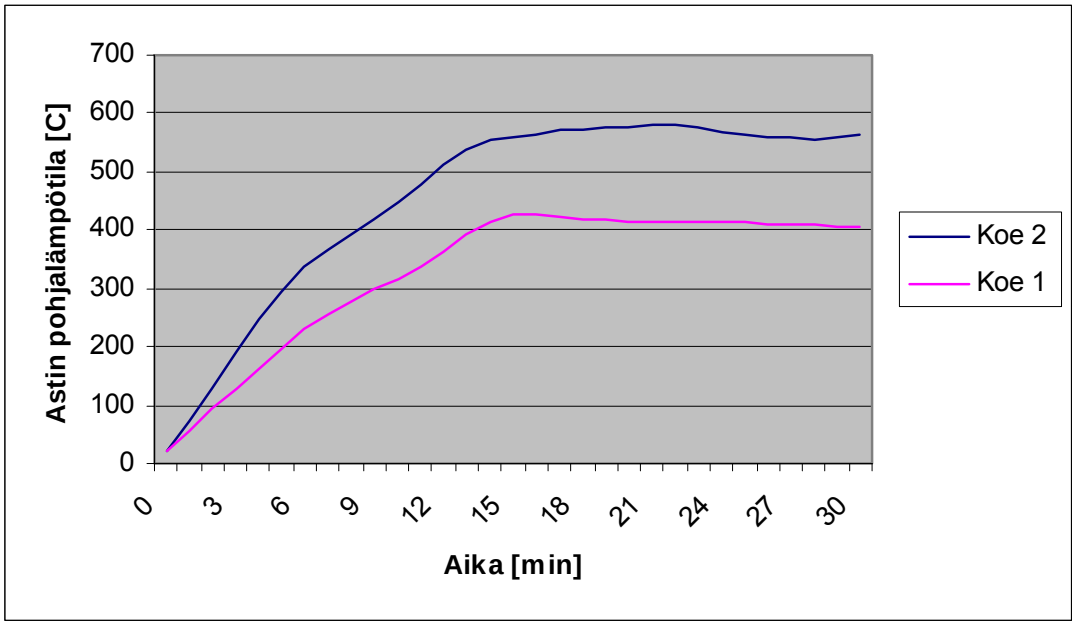
Ennen tuhkan sulatuskokeita oli tarkoitus selvittää, minkälaisia lämpötiloja upokas kykenee välittämään, kun sitä lämmitetään suoralla liekillä. Liekkeinä käytettiin nestekaasuliekkiä ja asetyleeniliekkiä. Astiaa kokeiltiin avoimena ja osittain eristettynä.

Kuvassa 9 näkyy koejärjestely. Välineinä oli pieni nestekaasupoltin, grafiittiupokas, upokasteline ja mittareita. Pohjalämpötilan mittaamiseen käytettiin K-tyypin anturia, jonka mittausalue on 1100 ºC:een asti. Anturin pää asetettiin ylhäältä astian pohjalle. Nestekaasulla lämmitettäessä koejärjestely oli kuvan 9 mukainen. Kokeita nestekaasuliekillä tehtiin kaksi. Ensimmäisessä kokeessa tarkasteltiin astian kuumenemista vakioliekillä.

Kuva 9 Kuumennuskoejärjestely nestekaasuliekillä

Toisessa liekkiä suurennettiin aika ajoin. Puhtaaksi kirjoitetut mittauspöytäkirjat ovat liitteessä 2. Kuvassa 10 näkyy astian pohjalämpötila ajan funktiona kokeissa. Tuloksista voitiin päätellä, että lämpötila ei riitä minkään tuhkan sulamiseen. Tämän pääteltiin johtuvan kahdesta syystä. Nestekaasuliekki ottaa palamisilman ilmakehästä, jolloin sen

teoreettinen palamislämpötila on noin 2000 ºC. Liekki kuitenkin säteilee ympäristöönsä voimakkaasti, joten sen palamislämpötila on pienempi. Toinen tekijä on astian ja jalustan lämpöhäviöt. Niidenkin pintalämpötilat ovat myös selvästi ympäristöä korkeammat, joten ne säteilevät voimakkaasti lämpöä. Tämän takia siirryttiin asetyleeniliekin käyttöön.



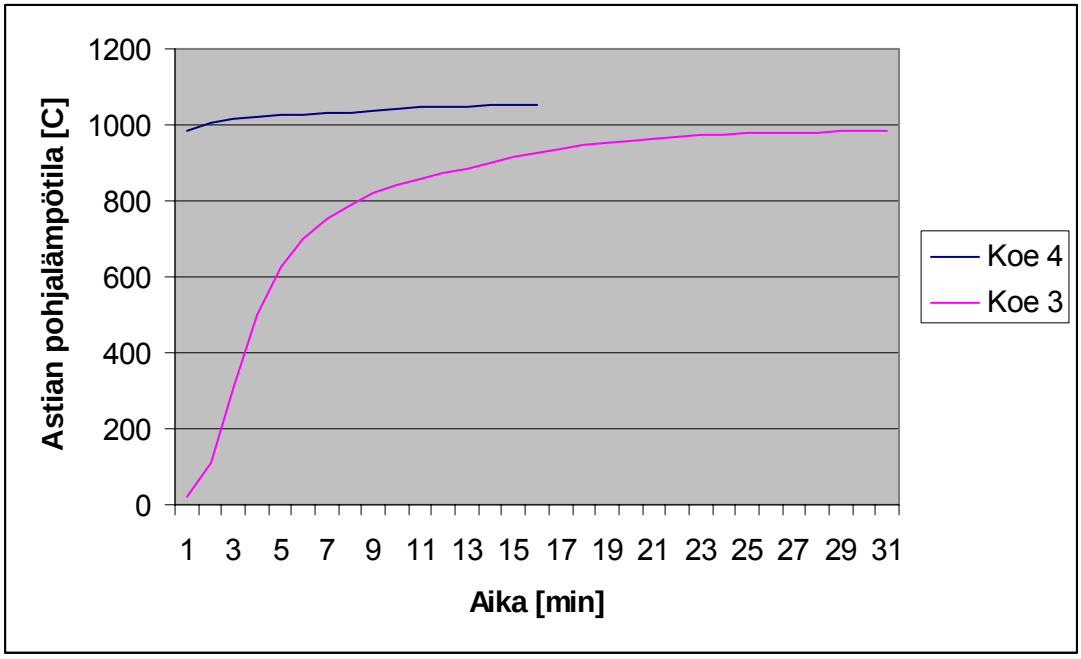
Kuva 10 Astian pohjalämpötilat nestekaasuliekillä

5.2 ASETYLEENILIEKKI

Välineet muuten samat, mutta nyt käytettiin polttoaineena asetyleeniä. Lisäksi astia eristettiin kuumankestävällä villalla. Kuvassa 11 näkyy koejärjestely. Asetyleenin hapettimena käytetään puhdasta happea, joten sen palamislämpötila on suurempi kuin nestekaasuliekin. Kuvassa 12 näkyy kahden asetyleeniliekillä tehdyn kokeen lämpötilat. Koe 4 aloitettiin ”lennossa” parantelemalla eristystä.

Kuva 11 Kuumennuskoe asetyleeniliekillä

Lämpötilat saatiin nousemaan yli 1000 ºC:n. Nyt liikuttiin jo sen verran lähellä tuhkan sulamislämpötiloja, että päätettiin lopettaa kuumennuskokeet. Seuraavaksi yritetään sulattaa tuhkaa upokkaassa.



Kuva 12 Upokkaan pohjalämpötila asetyleeniliekillä

5.3 SULATUSKOKEET PUUN KUOREN TUHKALLA

Sulatuskokeilla oli tarkoitus saada tuhka siihen tilaan, jossa siihen myöhemmin tullaan puhaltamaan ilmaa. Tällöin tuhkan on tarkoitus olla täysin juoksevassa muodossa. Kuumentimena oli asetyleeniliekki ja astian ympärillä villaeriste.

5.3.1 Sulatuskoe 1

Ensimmäisessä sulatuskokeessa upokkaaseen lusikoitiin havupuunkuoren poltosta syntynyttä tuhkaa. Tuhkaa laitettiin vähän puolivälin alapuolelle asti. Mitta-anturi asetettiin samalla tavalla kuin aikaisemmin. Tällöin pyrittiin saamaan suuntaa antavaa tietoa tuhkan lämpötilasta. Kuvassa 14 näkyy saavutettu lämpötilataso. Taulukosta 31 näkyy kolmen eri puulajin tuhkan sulamisen kannalta oleellisimmat lämpötilat kirjallisuuden perusteella.

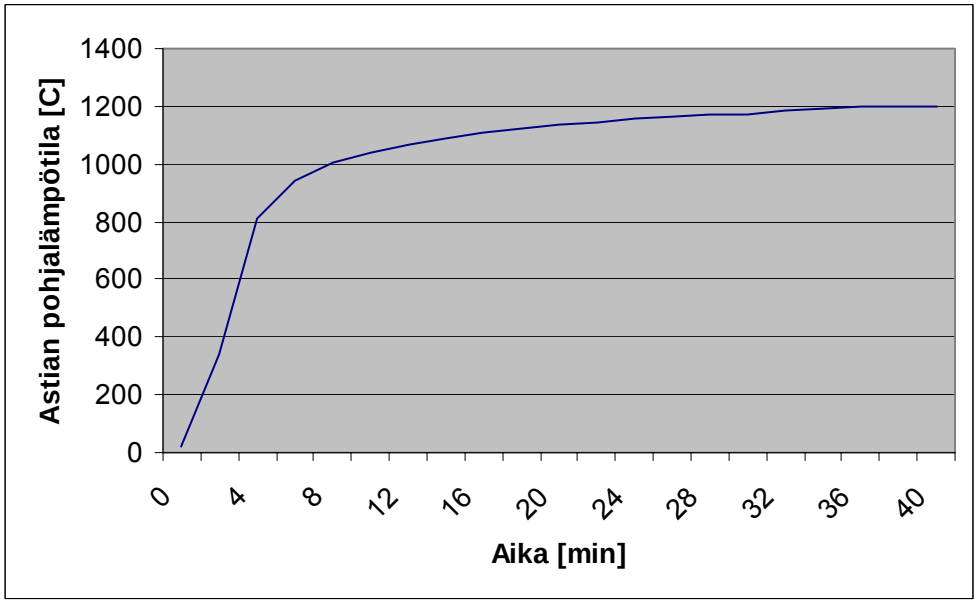
Taulukko 31 Tuhkan sulamiskäyttäytyminen eri puulajeilla (Alakangas, 2000)

Kuori	Yhteensulautuminen alkaa [ºC]	Pehmenemispiste [ºC]	Puolipallopiste [ºC]	Juoksevuuspiste [ºC]
Mänty	1010	1240	1385	1400
Kuusi	1020	1250	1400	1420
Koivu	935	1180	1440	1460

Lämpötilaa pitäisi tämän vertailun mukaan suurentaa noin 200 ºC, mutta mittausepävarmuus huomioiden todellinen tuhkan lämpötila kokeen aikana saattaa olla suurempi kuin mitattu arvo. Tämä on pääteltävissä kuvasta 13, jossa on näyte tuhkasta. Siitä näkee, että tuhka on osittain sulanut ja sen jälkeen jähmettynyt kiteiseksi. Ilmiötä kutsutaan myös sintraantumiseksi.

Kuva 13 Ensimmäisen sulatuskokeen tuhkanäyte

Tuhkakerroksen korkeus romahti kokeen aikana, joten siinä on ainakin kosteutta ja ehkä palamatonta ainesta. Tuhkan määrää voi siis lisätä.

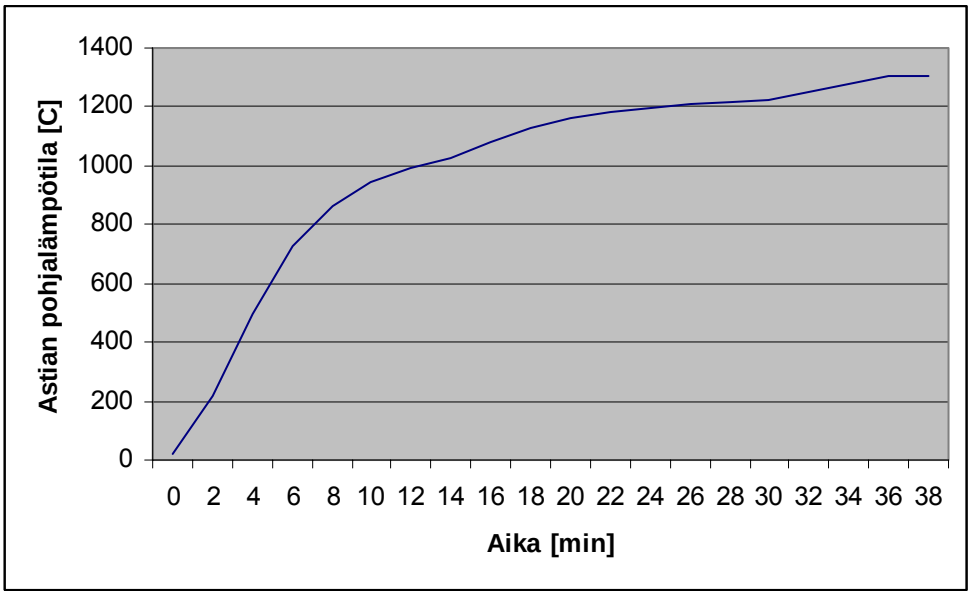


Kuva 14 Lämpötilat ensimmäisessä sulatuskokeessa

Tavoitellusta juoksevuuspisteestä siis jäätiin noin 150 ºC jos oletetaan, että pehmenemispiste saavutettiin, joka on noin 1250 ºC. Tavoitelämpötila ei siis ole toivottoman kaukana, joten pienillä parannuksilla se on tällaisella koejärjestelyllä saavutettavissa.

5.3.2 Sulatuskoe 2

Koska tuhkakerros pieneni radikaalisti, toisessa sulatuskokeessa astia täytettiin lähes täyteen. Eristyksiä oli hieman paranneltu. Kuvassa 15 näkyy saavutetut lämpötilat kokeen aikana. Kokeen aikana liekkiä ajoittain suurennettiin, joka näkyy kuvaajan epäjatkuvuuskohdissa. Tuhka oli punahehkuisempaa kuin ensimmäisessä sulatuskokeessa.



Kuva 15 Lämpötilat toisessa sulatuskokeessa

Nytkin tuhkakerros meni aika matalaksi, joten seuraavassa kokeessa tulee kysymykseen tuhkan lisääminen kokeen aikana. Lämpötila jäi siis tasolle 1300 ºC. Tähän oli kaksi syytä. Ensinnäkin mitta-anturi rikkoutui, eikä se enää näyttänyt arvoja. Kuvassa 16 on upokkaan pohjalta otettu valokuva, jossa anturin taipumista on jo havaittavissa. Seuraava koe siis suoritetaan kestävämmällä anturilla. Toinen ongelma liittyi astian tukirakenteisiin. Metalliosat sulivat osittain. Koska lämpötilatasoa on edelleen nostettava, täytyy pieniä parannuksia vielä tehdä, jotta materiaalit kestäisivät entistä suuremmat lämpötilat.

Kuvassa 16 näkyy tuhkanäyte toisesta sulatuskokeesta. Nyt tuhka saatiin hieman sulaneempaan muotoon, ilmeisesti lähelle puolipallopistettä. Jähmettynyt tuhka on laavakiveä muistuttavaa massaa.

a) b)

Kuva 16 Toisen sulatuskokeen tuhkanäyte a) ja kuva sulatustilanteesta b)

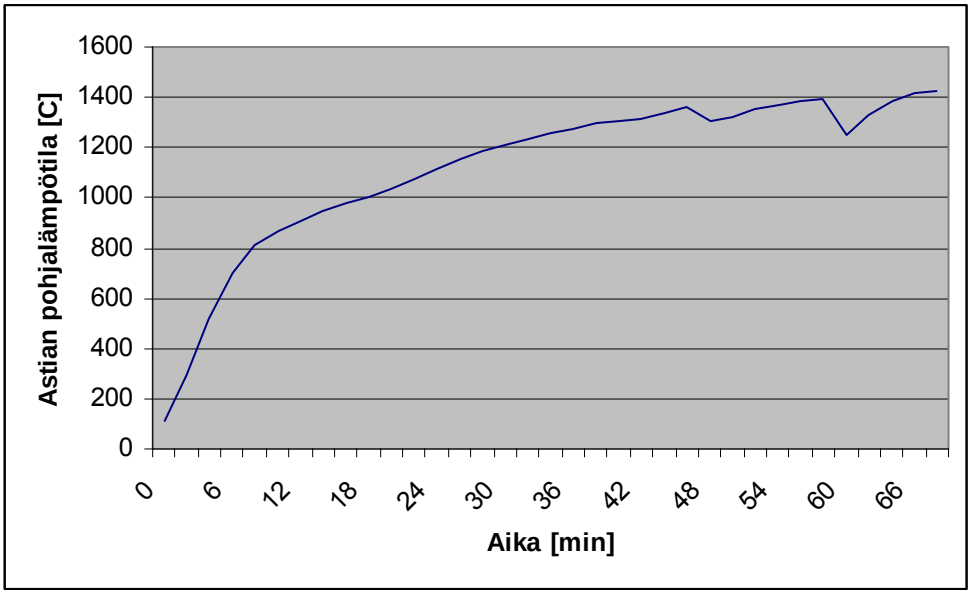
5.3.3 Sulatuskoe 3

Koejärjestelyä muutettiin siten, että astia oli keraamisen putken sisällä. Upokas tuettiin tulenkestävillä tiilillä siten, että liekki pääsi nousemaan kunnolla sen reunoja pitkin. Lisäksi rakennettiin tulenkestävästä tiilestä kansi, jonka pystyi helposti poistamaan kokeen aikana tarkkailua varten. Kuvassa 17 näkyy uuni sisältä ja ulkoa kannen ollessa päällä. Näin saatiin hyvä eristys ja suuria lämpötiloja paremmin kestävä tukirakenne. Lämpötila-anturina oli k-tyyppiä paremmin kuumuutta kestävä platina-anturi, jolla voidaan mitata lämpötiloja noin 1600 ºC:een asti. Tämä on riittävästi useimpien polttoaineiden tuhkien juoksevuuslämpötiloja ajatellen.

a) b)

Kuva 17 Sulatusuuni sisältä a) ja kansi asennettuna b)

Nyt päästiin riittävän korkeisiin lämpötiloihin. Kuvassa 18 näkyy saavutetut lämpötilat. Tarkkaa sulamispistettä ei voi sanoa, koska nähdäkseen upokkaan pohjalle uunin kansi täytyi poistaa, jolloin lämpötila laskee. Kuitenkaan tuhka ei ollut vielä juoksevuuspisteessä 60 minuutin kohdalla lämpötilassa 1389 ºC. Kokeen lopussa lämpötila oli 1422 ºC. Tämän jälkeen kansi poistettiin ja tuhkaa tunnusteltiin metallipuikolla, jolloin se todettiin täysin sulaksi. Kuoren tuhkan juoksevuuspiste on siis niissä lämpötiloissa, jotka ovat luettavissa taulukosta 30.



Kuva 18 Lämpötilat kolmannessa sulatuskokeessa

Kuvassa 19 on valokuva tuhkanäytteestä. Väriltään mustat ja kohtuullisen kovat tuhkapalaset naputettiin astian pohjalta ruuvimeisselin ja vasaran avulla.

Kuva 19 Kolmannen sulatuskokeen tuhkanäyte

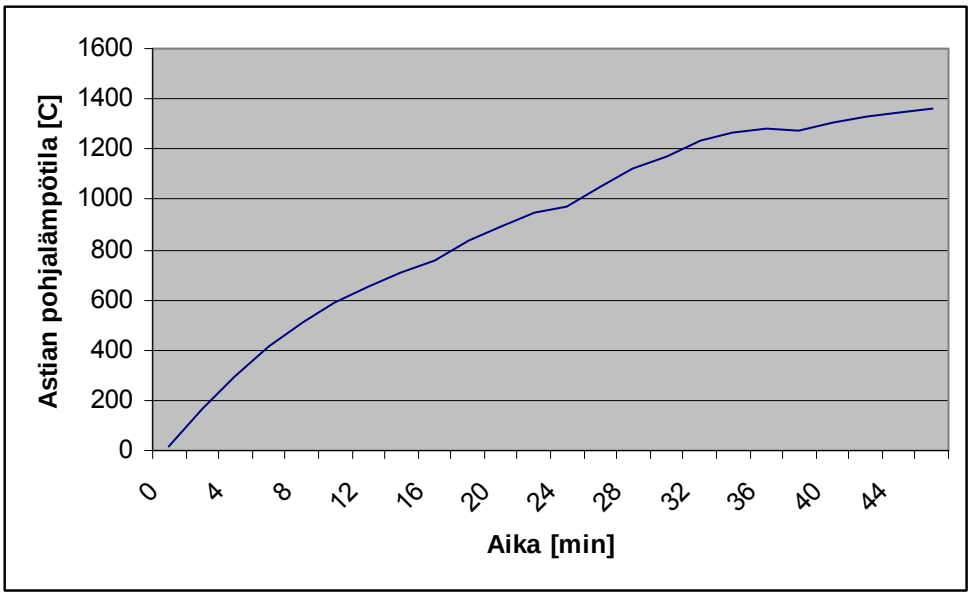
5.4 SULATUSKOKEET MUILLA TUHKANÄYTTEILLÄ

Sulatuskokeita jatkettiin muilla tuhkanäytteillä samalla kuumennusjärjestelyllä. Kokeeseen valittiin niiden polttoaineiden tuhkia, joita käytettiin myös laskentaosuudessa. Nyt laitteisto on sellainen, että sillä saadaan riittävät lämpötilat. Vastaisuudessa sulatuskokeista raportoidaan vain kokeen lopullinen tulos.

5.4.1 Sulatuskoe 4: Turpeen tuhka

Turpeen tuhkan juoksevuuslämpötilat vaihtelevat tuotantotavan- ja paikan mukaan välillä 1175 - 1490 ºC (Alakangas, 2000). Tuhka saatiin juoksevaksi ja tällä kertaa se kaadettiin ämpäriin hiekkakerroksen päälle. Kuvassa 21 näkyy kiiltävän musta näyte jäähtyneestä tuhkasta. Tuhka on selvästi kiiltävämpää ja tiiviimpää kuin puun kuoren tuhkanäyte. Kokeen lämpötilat näkyvät kuvassa 20. 36 minuutin kohdalla lämpötila oli 1279 ºC, jolloin kansi avattiin uunin päältä. Tällöin tuhka ei ollut vielä juoksevaa. Kansi suljettiin ja kuumennusta jatkettiin. Kokeen lopussa 46 minuutin kohdalla lämpötila oli 1358 ºC ja

kansi avattiin uudelleen, jolloin tuhka todettiin juoksevaksi ja se kaadettiin pois. Tuhkan juoksevuuspiste siis osui siihen haarukkaan, joka on muuallakin todettu.

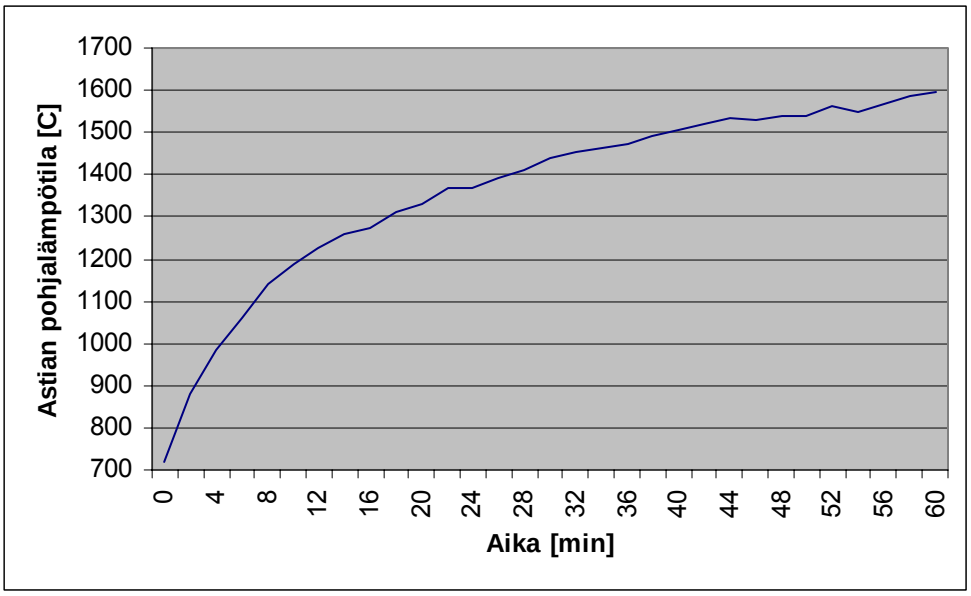


Kuva 20 Neljännen sulatuskokeen lämpötilat

Kuva 21 Neljännen sulatuskokeen tuhkanäyte

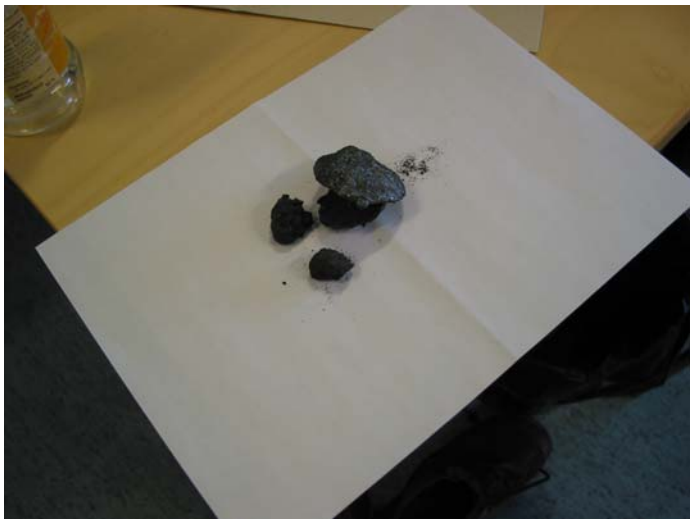
5.4.2 Sulatuskoe 5: Hakkeen tuhka

Ainakaan koko näytettä ei saatu juoksevaan muotoon, vaikka lämpötilaa suurennettiin lähes 1600 ºC:een (Kuva 22). Joillakin puupolttoaineiden osilla, kuten havupuiden tuhkilla, tuhkan juoksevuuspisteet voivat olla noin 1650 ºC (Alakangas, 2000). Ilmeisesti näyte koostui pääasiassa tämäntyyppisestä tuhkasta. Siirtyminen yli 1600 ºC:n lämpötiloihin saattaisi rikkoa myös nyt käytetyn platina-anturin. Toisaalta sulapolton/kaasutuksen kannalta on ei-toivottu asia, mikäli tuhka sulaa erityisen korkeassa lämpötilassa. Puhallusilman lämpötila pitää suhteuttaa tuhkan sulamislämpötilaa. Ilman lämpötilan suurentaminen taas suurentaa lämpötiloja kautta linjan, jolloin ongelmia syntyy todennäköisemmin.



Kuva 22 Lämpötilat viidennessä sulatuskokeessa

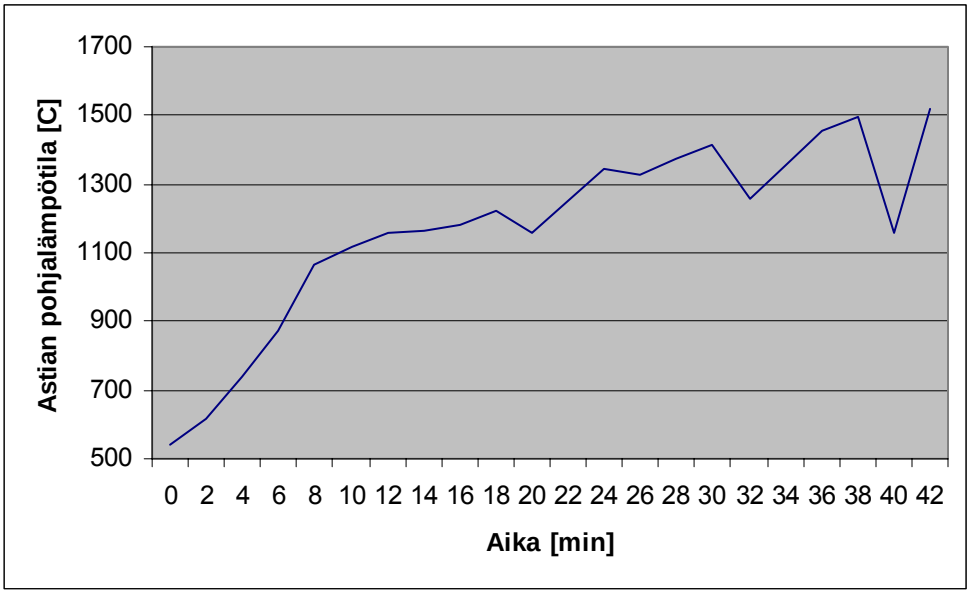
Tuhkanäyte suli pohjasta, mutta päällimmäisin osa ei kokonaan sulanut. Kuvassa 23 on valokuva tuhkanäytteestä. Suurimman kappaleen sula osa on astian pohjan muotoinen.



Kuva 23 Viidennen sulatuskokeen tuhkanäyte

5.4.3 Sulatuskoe 6: Ruokohelpituhka

Ruokohelpeä piti aluksi polttaa ulkona tuhkaksi ennen sulatuskoetta. Jäljelle kuitenkin jäi hiihtojäännös, joten kunnon tuhkakerrosta oli vaikea rakentaa astian pohjalle. Hiihtojäännöstä paloi kokeen aikana ja tuhkaa piti lisätä, mutta silti tuhkan määrä jäi vaatimattomaksi. Kokeen aikana vaikutti siltä, että pohjalla oleva ohut tuhkakerros oli juoksevaa noin 1400 ºC:ssa. Kevätkorjatun ruokohelven juoksevuuspiste on noin 1400 ºC ja syyskorjatun 1590 ºC (Alakangas, 2000). Kokeen lämpötilat näkyvät kuvassa 24.



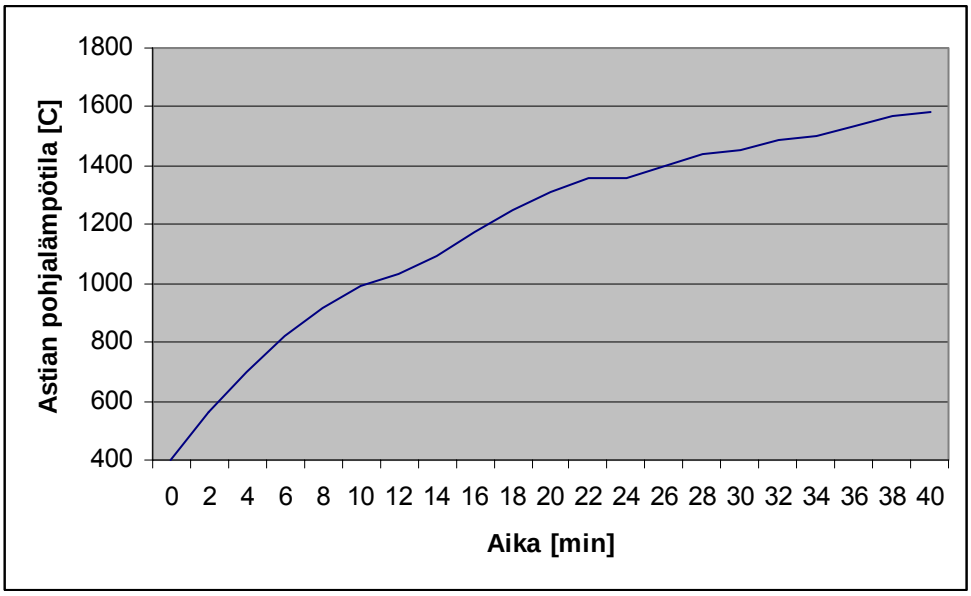
Kuva 24 Lämpötilat kuudennessa sulatuskokeessa

Tuhkanäytettä ei saatu irti astian pohjasta. Kuvan 25 näytteestä tuhkaa on isoimmissa kappaleissa ohut kiiltävä pintakerros, loput ovat astian materiaalia.

Kuva 25 Kuudennen sulatuskokeen tuhkanäyte

5.4.4 Sulatuskoe 7: Puupelletin tuhka

Näytettä ei saatu juoksevaksi. Koe keskeytettiin, kun lämpötila läheni anturin maksimilämpötilaa 1600 ºC. Pelletin tuhkalle ei kirjallisuudesta löytynyt sulamislämpötiloja, mutta puupolttoaineilla se voi olla 1650 ºC (Alakangas, 2000). Kuvassa 26 näkyy kokeen lämpötilan kehitys.



Kuva 26 Seitsemännen sulatuskokeen lämpötilat

Tuhkanäyte suli osittain pohjastaan ja lämpötila-anturin putki jätti reiän näytteen keskelle. Kuvassa 27 näkyy renkaan muotoinen tuhkapala.

Kuva 27 Seitsemännen sulatuskokeen tuhkanäyte

5.5 TUHKIEN SULAMISKÄYTTÄYTYMISEN ARVIOINTI

Eri polttoaineiden tuhkilla on siis huomattavasti toisistaan poikkeavia sulamislämpötiloja. Ratkaisevaa on hyvin pitkälle se, mistä aineista tuhka koostuu. Taulukkoon 32 on koottu tässä työssä sulatettujen tuhkanäytteiden tyypillisiä koostumuksia massaprosentein. Puun sarakkeella pyritään kuvaamaan pelletin ja hakkeen koostumusta suurin piirtein. Alkuaineyhdisteiden sulamispisteet sai HSC- ohjelmasta. Tuhkan sulatus ei kuitenkaan edellytä suurimpia taulukossa esiintyviä lämpötiloja, koska alkuperäiset komponentit reagoivat, jolloin syntyneen yhdisteen sulamispiste on alempi kuin alkuperäisen yhdisteen (Meuronen, 1999). Sulamislämpötilojen ja massaosuuksien avulla on vain tarkoitus selvittää suuntaa antavasti tuhkan juoksevuuslämpötilaa suurentavat ja pienentävät tekijät.

Taulukko 32 Tuhkien alkuaineyhdistepitoisuuksia (Alakangas, 2000)

Alkuaineyhdiste (sulamispiste ºC)	Kuori [m-%]	Turve [m-%]	Puu [m-%]	Ruokohelpi [m-%]
SiO_2 (1723)	15,5 - 21,7	40 - 75	0,43 - 21,2	89,8
Fe_2O_3 (1565)	1,8 - 3,8	4 - 7	0,2 - 8,5	1,2
TiO_2 (1843)	0	0	0 - 0,1	0,1
Al_2O_3 (2054)	0	1 - 16	0 - 5,3	1,4
P_2O_5 (562)	2,7	2 - 4	1 - 14,9	4,1
CaO (2899)	40 - 50,5	1,5 - 12	30,8 - 60,3	3,5
MgO (2832)	4,2 - 5,1	0,5 - 2,5	2,6 - 16	1,5
Na_2O (552)	2,1 - 2,8	0	0,2 - 8,6	0,15
K_2O (878)	3,4 - 3,5	0,1 - 0,5	3,3 - 29,6	3,2
SO_3 (32)	1,6 - 3,7	0	1,6 - 4,8	1,1
Muut	7,8 - 22,9	0	0	0

5.5.1 Hiilen tuhkille kehitettyjä tunnuslukuja

Tuhkan kuonaantumisen ja kerrostumien arvioimiseksi on määritelty erilaisia tunnuslukuja (Meuronen, 1999). Taulukon 33 suhdeluvut on kehitetty hiilen tuhkille, mutta koska niissä on samoja ainesosia, joku selittävä tekijä voi löytyä. Taulukon vaihteluvälit on laskettu taulukon 32 minimi- ja maksimipitoisuuksien avulla.

Taulukko 33 Tuhkien suhdelukuja sulamiskäyttäytymisen arvioimiseksi

Suhdeluku	Fe_2O_3/CaO	SiO_2/ Al_2O_3	Fe_2O_3/(CaO+MgO)	Cao+MgO/(Fe_2O_3+ CaO+MgO+ Na_2O+ K_2O)
Vaikutus	Jos välillä 0,2 - 10, sulamislämpötilaa alentava	Yleensä 0,8 – 4, jos suuri, sulamislämpötilaa alentava	Kuten edellinen	Suuri arvo viittaa Suureen sulamislämpötilaan ja kuonan viskositeettiin
Kuori	0,036 - 0,095	∞	0,032 - 0,086	0,81 - 0,88
Turve	0,15 - 4,67	2,5 - 75	0,28 - 3,5	0,21 - 0,78
Puu	0,0033 - 0,28	0,081 - ∞	0,0026 - 0,25	0,42 - 0,95
Ruokohelpi	0,34	64	0,24	0,52

Kuorella ja ruokohelvellä on lähellä toisiaan olevat juoksevuuspisteet, vaikka suhdelukujen perusteella kuorella sen pitäisi olla suurempi. Pitäisi olla tarkempia tietoja biopolttoaineiden tuhkista, jotta mitään varmaa voisi sanoa. Puupolttoaineilla sulamislämpötilaa alentavat suhdeluvut ovat pieniä, kuten suuren sulamispisteen tuhkalla

voi odottaakin. SiO_2/Al_2O_3- suhde lähenee ääretöntä, koska on mahdollista, ettei puun tuhka sisällä ollenkaan alumiinia. Sama tilanne on kuoren kohdalla. Näissä tilanteissa tämä suhdeluku ei kertone mitään. Sulamislämpötilaa suurentava suhde taas saattaa puun tuhkalla olla hyvin lähellä maksimiarvoa 1. Turpeella ne suhdeluvut, jotka alentavat sulamislämpötilaa, ovat kaikki sopivan suuruisia pientä sulamislämpötilaa ajatellen. Sulamislämpötilaa suurentava suhdeluku taas saattaa olla selvästi pienin. Näyttää siltä, että hiilelle määritetyt suhdeluvut toimivat parhaiten turpeen kohdalla. Mahdollinen selitys on siinä, että iältään turve asettuu hiilen ja puupolttoaineiden väliin.

5.5.2 Biopolttoaineiden tuhkien sulamiskäyttäytymisestä tehty tutkimus

Biopolttoaineiden tuhkien sulamiskäyttäytymistä on tutkittu K_2O:n osalta. Yhteenvetona tutkimuksesta voi mainita, että mitä enemmän kaliumoksidia haihtuu tuhkasta sulamisen aikana, sitä korkeampi on tuhkan sulamispiste (Thy et. al, 2006). Tämä voi olla yksi syy siihen miksi puupolttoaineilla ei ole alhainen sulamispiste, vaikka kaliumoksidia voi olla taulukon 31 mukaan runsaastikin. Ilmiön selvittämiseksi tuhkanäyte pitäisi analysoida ennen ja jälkeen sulatuskokeen. Siihen tässä työssä ei nyt ole tarvetta.

5.5.3 Muuta huomioitavaa

Näistä sulatuskokeista mainittakoon vielä se, että olosuhteet vaikuttavat myös tuhkan sulamislämpötilaan. Nyt vain sulatettiin tuhkaa ilmakehän oloissa, mutta palamistilanne voi muuttaa tilannetta. Esimerkiksi höyrykattiloiden redusoivat olosuhteet voivat pienentää tuhkan sulamislämpötilaa 100 – 200 ºC (Huhtinen et. al., 2000).

6 KAASUTUSKOKEIDEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Tämän työn viimeisissä kokeissa yritetään kaasuttaa puupellettejä sulatusupokkaassa. Laitteistoa on tarkoitus kehittää eteenpäin siten, että sulatettuun tuhkakerrokseen puhalletaan ilmaa laboratorion paineilmaverkosta. Myös sulan lämpötila on mitattava, jotta voidaan olla varmoja lämpötilan sopivuudesta. Kuplivaan tuhkakerrokseen on tarkoitus syöttää puupellettejä. Mahdollisuuksien mukaan syntyneen kaasutuskaasun CO-, CO_2-, H_2- ja H_2O-pitoisuudet pyritään selvittämään. Astiaan on tuotava näytteenottoputki, jolla tuotekaasua imetään tietojenkäsittelylaitteistolle. Vaikka polttoaineena käytetään puupellettejä, sulakerroksena käytetään turpeen tuhkaa, koska sen sulamislämpötila on pienin. Ilmapillinä on tarkoitus käyttää sisähalkaisijaltaan 3 mm teräsputkea, ja ilma puhalletaan yläviistosti. Silloin astiaan ei tarvitse porata reikää.

6.1 ILMAN JA POLTTOAINEEN MÄÄRÄT

Ilma- ja polttoainemäärät on jotenkin järkevästi suhteutettava astian kokoon. Muiden tutkimusten mukaan hiiltä kaasutettaessa sopiva puhallusilmamäärä on noin 500 - 1000 kuutiometriä tunnissa neliömetriä kohti (Balasanov et. al., 2003). Koska edellä mainitussa laitteistokoko on selvästi suurempi ja kammion muoto suorakaide, on tämän tutkimuksen esiselvityksessä sopivaksi ilmamääräksi skaalattu 116,4 - 232,8 kuutiometriä tunnissa neliömetriä kohti (Mannelin, 2005). Liitteessä 2 ovat upokkaan mitat. Käyttämällä keskimääräistä sisähalkaisijan arvoa 66 mm saadaan puhallusilmamäärä yhtälöllä

$$q_{v,i} = q''_{v,i} D^2 \frac{\pi}{4} \tag{28}$$

missä $q_{v,i}$ on puhallusilman tilavuusvirta [m^3/h]

$q''_{v,i}$ puhallusilman tilavuusvirta pinta-alaa kohti [m^3/m^2h]

D astian keskimääräinen halkaisija [m]

eli ilmamäärän ala- ja ylärajoiksi saadaan

$$q_{v,i} = (116{,}4)\frac{m^3}{m^2 h}(0{,}066\,m^2)\frac{\pi}{4} = 0{,}398 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$q_{v,i} = (232{,}8)\frac{m^3}{m^2 h}(0{,}066\,m^2)\frac{\pi}{4} = 0{,}796 \text{ m}^3/\text{h}$$

Optimaalinen ilmakerroin kokemusten perusteella on noin 0,25 (Mannelin, 2005). Ilmakertoimella 0,25 tässä lasketulla puupelletillä ilmaa tarvitaan polttoainekiloa kohti HSC- ohjelman mukaan 1,113 normikuutiometriä. Koska ilmaa ei esilämmitetä, normimäärän olot vastaavat kutakuinkin laboratorion tilaa, joten sen kummemmin skaalaamatta polttoaineen massavirta saadaan yhtälöstä

$$q_{m,\,pa} = \frac{q_{vi}}{V_{i,\,pa}} \tag{29}$$

missä $q_{m,\,pa}$ on polttoaineen massavirta [kg/h]

$V_{i,\,pa}$ ilmamäärä polttoaineen massaa kohti [m^3/kg_{pa}]

polttoainevirran vaihtelu

$$q_{m,\,pa} = \frac{(0{,}398)m^3/h}{1{,}113\,m^3/kg_{\,pa}} = 0{,}357 \text{ kg/h}$$

$$q_{m,\,pa} = \frac{(0{,}796)m^3/h}{1{,}113\,m^3/kg_{\,pa}} = 0{,}714 \text{ kg/h}$$

Polttoaine on sylinterinmuotoinen puupuriste, joten on laskettava sopiva syöttöväli yhden pelletin pudottamiselle upokkaaseen. Polttoainenappien koko vaihtelee, joten otoksesta

otettiin 20 satunnaista kappaletta ja punnittiin ne vaa`alla. Nappien massa oli 14,488 g, joten yksi nappi painaa keskimäärin 0,7244 g. Edellä lasketulla polttoaineen massavirralla yhden pelletin syöttöväli saadaan yhtälöstä

$$t_p = \frac{\overline{m_p}}{q_{m,\,pa}} \tag{30}$$

missä t_p on yhden pellettinapin syöttöväli [s]

$\overline{m_p}$ pellettinapin keskimääräinen massa [kg]

Nyt saadaan syöttöväliksi

$$t_p = \frac{0{,}0007244\,kg}{(0{,}357/3600)kg/s} = 7{,}00 \text{ s}$$

$$t_p = \frac{0{,}0007244\,kg}{(0{,}714/3600)kg/s} = 3{,}65 \text{ s}$$

Ilmamäärän voi määrätä mittaamalla ennen kaasutuskoetta tilavuusvirta rotametrillä puhallusputkessa ja säätämällä venttiili sopivaan asentoon. Sopivin tilavuusvirta väliltä 0,398 – 0,796 m^3/h (6,63 – 13,27 l/min) löytyy myöhemmin kokeellisesta tilanteesta. Sulakerros on saatava kuplimaan sopivasti. Virtausnopeudelle voidaan alustavasti laskea raja-arvot putken alan avulla yhtälöllä

$$v_i = \frac{4q_{v,i}}{\pi D_p^2} \tag{31}$$

missä v_i on ilman virtausnopeus [m/s]

D_p putken halkaisija [m]

sijoittamalla saadaan

$$v_i = \frac{4(0{,}398)/3600\,m^3/s}{\pi(0{,}003m)^2} = 15{,}6 \text{ m/s}$$

$$v_i = \frac{4(0{,}796)/3600\,m^3/s}{\pi(0{,}003m)^2} = 31{,}2 \text{ m/s}$$

Säädetty tilavuusvirta siis määrää samalla luonnollisesti polttoaineen massavirran ja syöttönopeuden. Jos sula saadaan kuplimaan sopivasti edellä lasketuilla nopeuksilla, voidaan käyttää tätä putkea. Jos virtausnopeuden täytyy olla suurempi tai pienempi putkikokoa on vaihdettava vaatimusten mukaan.

6.2 KORJAAVA KAASUTUSLASKELMA

Tässä tapauksessa ei vielä ole mahdollista esilämmittää ilmaa ollenkaan. Tarvittava lämpö tuodaan edelleen samalla polttimella kuin sulatuskokeissa. Koska turpeen tuhka suli hieman alle 1400 ºC:ssa, apulämmön määrä voidaan määrätä siten, että se vastaa noin 1400 ºC:n esilämmitetyn ilman lämmöntuontia. Tämä vastaa laskelmassa siis tuloilman lämpötilaa 1673 K. Luvun 9.3 tapaan laskelma antaa puupelletin kaasutukselle taulukon 34 mukaiset lämpötilat ja tuotekaasun koostumukset.

Taulukko 34 Puupelletti: Häviöllisen kaasutuksen lämpötilat ja tuotekaasut (ilma 1673 K, kosteus 6,6 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	36,892	1,788	27,402	5,548	30,353	1868
0,25	35,965	2,716	24,310	8,827	37,929	2032
0,3	34,958	3,722	19,484	10,997	45,505	2167

Verrattuna taulukkoon 28 lämpötilat ja kaasujen määrät eivät paljon muuttuneet. Näihin laskentatuloksiin verrataan kaasutuskokeiden tuloksia myöhemmin. Vastaavasti tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,25 tuotekaasusta antaa taulukon 35 mukaiset savukaasut ja lämpötilat.

Taulukko 35 Pelletti: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,25 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	38,68	35,95	151,55	0	2573
1,1	38,68	36,23	162,91	3,01	2463
1,2	38,68	36,52	174,27	6,03	2364
1,3	38,68	36,70	185,63	9,04	2272
1,4	38,68	37,08	196,99	12,06	2191
1,5	38,68	37,36	208,36	15,07	2115

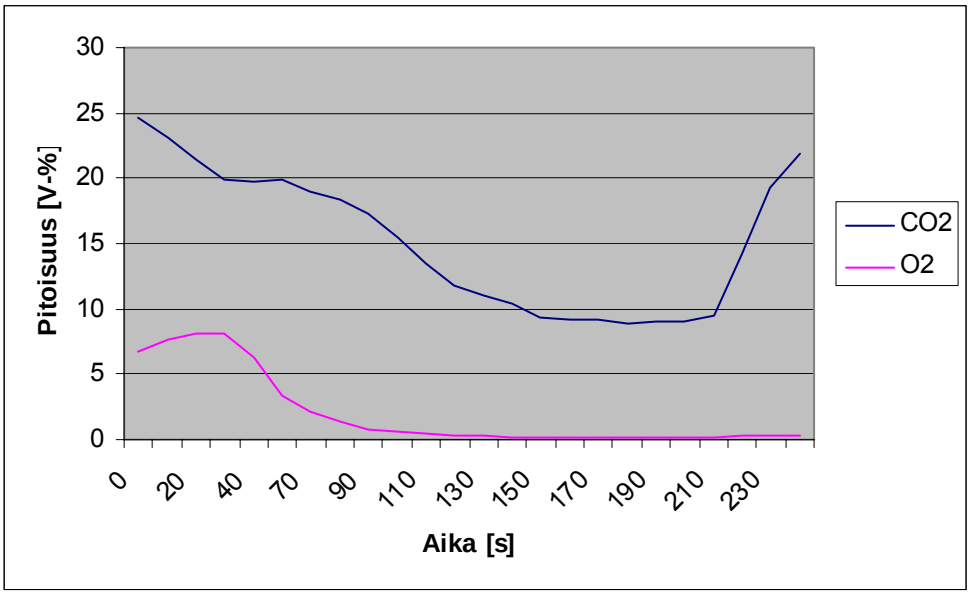
6.2.1 Kaasutuskoe 1

Kokeessa mitattiin CO-, CO_2-pitoisuudet imuriputken avulla. Laite mittaa samalla myös O_2- ja NO_x- pitoisuudet. Mittausohjelmistona käytetään EasyView 5- ohjelmaa. Vetyä ja vesihöyryä ei mitata, koska niiden mittaamiseen ei ollut käytettävissä mittareita. Ilma puhalletaan yläviistosti sulakerrokseen ja sulan lämpötila mitataan edelliseen tapaan. Kuvassa 28 on valokuva uunista kansi avattuna. Kansi tullaan pitämään kokeen aikana kiinni kuvan 17 tapaan, jotta näytteenotto olisi mahdollisimman häiriötön.

Kuva 28 Astia lisättynä näytteenotto- ja ilmanpuhallusputkilla

Kokeessa siis ensin esilämmitettiin sula tuhkakerros asetyleeniliekillä lämpötilaan noin 1400 ºC, minkä jälkeen avattiin paineilmaventtiili ja aloitettiin pellettien syöttö. Polttoainetta syötettiin noin kolmen minuutin ajan. Kuvassa 29 on Hiilidioksidi- ja

happipitoisuuksien muutokset kaasutuskokeen aikana. Happipitoisuus meni nollaan, kuten kaasutusprosessissa kuuluukin olla. Laskennallinen hiilidioksidipitoisuus on taulukon 34 mukaan noin 2,5 %. Mittauksissa hiilidioksidin osuus pyrki vakiintumaan vajaaseen 10 %:iin. Virhettä aiheutuu etenkin asetyleeniliekistä, koska sen savukaasujen hiilidioksiditaso määräytyy kaasun täydellisen palamisen mukaan. Toinen virhelähde on siinä, että ilmaa vuotaa myös ympäristöstä näytteenottoon. Liitteessä 3 (Laboratoriokokeiden mittauspöytäkirjat) näkyy myös mitatut Hiilimonoksidipäästöt, jotka ovat oletetusti paljon suuremmat kuin mitatut. Hiilimonoksidin mittausalue päättyi tasolle 3000 ppm. Seuraavaa mittausta kokeillaan laajemman mittausalueen mittarilla.



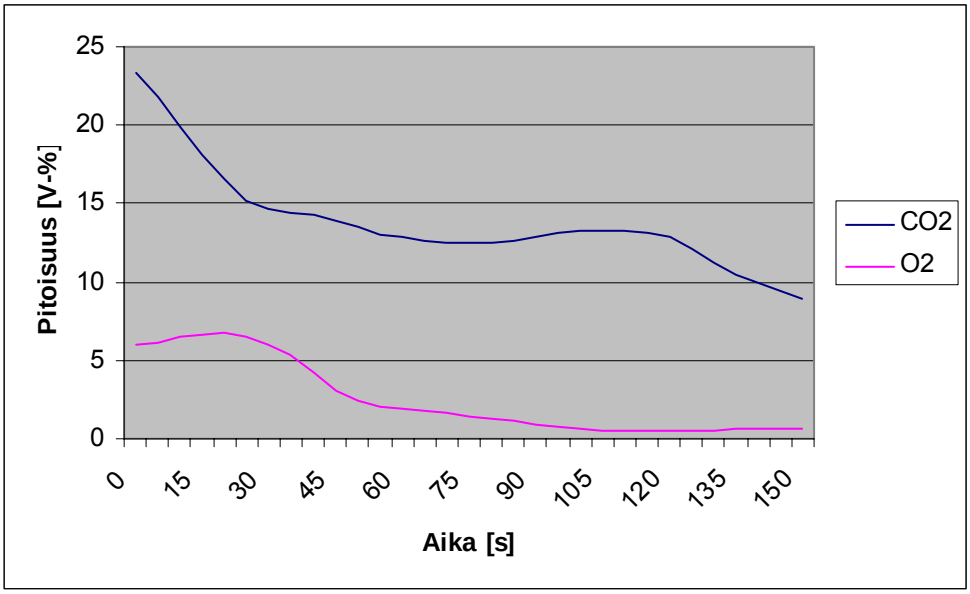
Kuva 29 Ensimmäisen kaasutuskokeen CO_2- ja O_2-pitoisuudet

Ilmaputkena käytetty teräsputki suli päästään. Kun kovettunutta tuhkaa naputettiin pois astian pohjalta, sieltä löytyi sulanutta metallia. Metalli oli siis raskaana kerääntynyt astian pohjalle. Kuvan 30 tuhkanäytteen tuhkapalat ovat samannäköisiä kuin turvetuhkan sulatuskokeessakin. Tuhka on kiiltävän mustaa ja pääosin tiivistä. Läheltä katsottuna siinä on havaittavissa jäänteitä kuplinnasta. Kuitenkaan ei voida olla varmoja, onko ilma varmasti mennyt sulakerrokseen. Polttoainejäänteitä ei ole havaittavissa eli prosessi ei ole jäänyt vajaaksi. Näytepussin oikeassa laidassa on sulanutta metallia ilmaputkesta. Ilmaputkenakin kannattaa käyttää piikarbidia.

Kuva 30 Ensimmäisen kaasutuskokeen tuhkanäyte

6.2.2 Kaasutuskoe 2

Kokeeseen sulatusastian päälle asetettiin suojaksi pienet tiilenpalat, jottei ylimääräisiä kaasuja virtaisi niin paljon näytteenottoon. Muuten koe tehtiin samalla tavalla. Kokeen tärkeimmät mittaukset näkyvät kuvassa 31. Mittauksia kokeiltiin kahteen prosenttiin asti mittaavalla hiilimonoksidimittarilla, mutta senkin asteikko jäi vajaaksi. Seuraavaksi harkinnassa on hiilimonoksidin määritys laimennusmenetelmän avulla. Kokeen loppupuolella imuriputki alkoi imeä tuhkasulaa ja se meni tukkoon. Tulokset olivat ensimmäisen kokeen tapaisia. Edelleen näytteenottoon vuotaa ylimääräisiä kaasuja, joten tiiviyteen on kiinnitettävä vielä lisää huomiota.



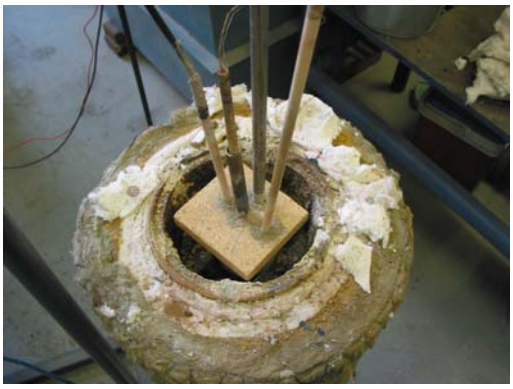
Kuva 31 Toisen kaasutuskokeen CO_2- ja O_2-pitoisuudet

Nyt ilma saatiin puhallettua sulakerrokseen. Kuvan 32 vasemmalla oleva putki on selvästi tahriintunut tuhkasta. Toinen putki on imuriputki, joka jostain syystä joutui sulakerrokseen ja tukkiutui. Tuhkanäyte on paperipalan päällä. Ilmaputkikin tukkiutui, mutta vasta sammutustilanteessa kaasutuksen jälkeen.

Kuva 32 Toisen kaasutuskokeen tuhkanäyte ja putket

6.2.3 Kaasutuskoe 3

Kokeeseen rakennettiin upokkaalle erillinen kansi, jossa on ainoastaan tarvittavat läpiviennit putkille. Reiät on tiivistetty tulenkestävällä massalla. Kuvassa 33 näkyy laitteisto ilman päällyskantta, jota käytetään entiseen tapaan. Ajotilanteessa otetussa kuvassa näkyy, kuinka poistokaasut palavat lyhyessä poistoputkessa. Keskimmäisen teräsputken läpi vietiin lämmitysvaiheessa lämpötila-anturi. Kun tuhka on sulaa lämpötila-anturin ja suojaputken voi poistaa, jolloin putki toimii poistokaasujen purkausputkena. Lämmitysvaihteessa lämpötila-anturiin tuli häiriö ja se poistettiin suojaputkineen, mutta se ei haitannut, koska se oli tarkoitus poistaa joka tapauksessa. Tuhkan olomuoto piti selvittää silmämääräisesti ohuella teräspuikolla. Mittausosiosta saatiin yksi häiritsevä elementti pois. Pitempi putki on polttoaineen syöttökanava. Suurin osa poistokaasuista on ajateltu virtaavan pois lyhyttä putkea pitkin, koska sen aiheuttama painehäviö on pienempi kuin pitkällä putkella. Siksi pellettien pitäisi pudota helpommin pitkää putkea pitkin. Liitteessä 2 on periaatekuva kaasuttimesta. Nyt näytteenotolle on niin häiriöttömät olot kuin ne tämän tutkimuksen puitteissa on mahdollista saada. Myös mittausalue riittää, koska näytteenottolinjaan yhdistettiin laimennusyksikkö, jonka avulla pitoisuus skaalataan tarvittaessa moninkertaisesti mittausalueeseen nähden.

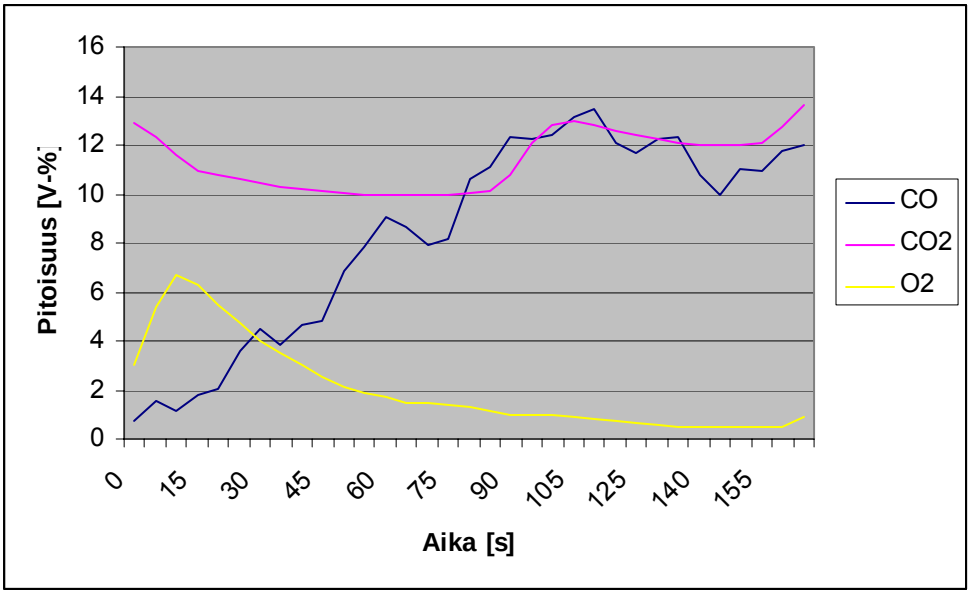


a)

b)

Kuva 33 Upokas suojakansineen a) ja kuva ajotilanteesta b)

Tässä kokeessa saatiin ensimmäistä kertaa selville hiilimonoksidin osuus tuotekaasussa. Kuvassa 34 näkyy CO-, CO_2-, ja O_2-pitoisuudet.

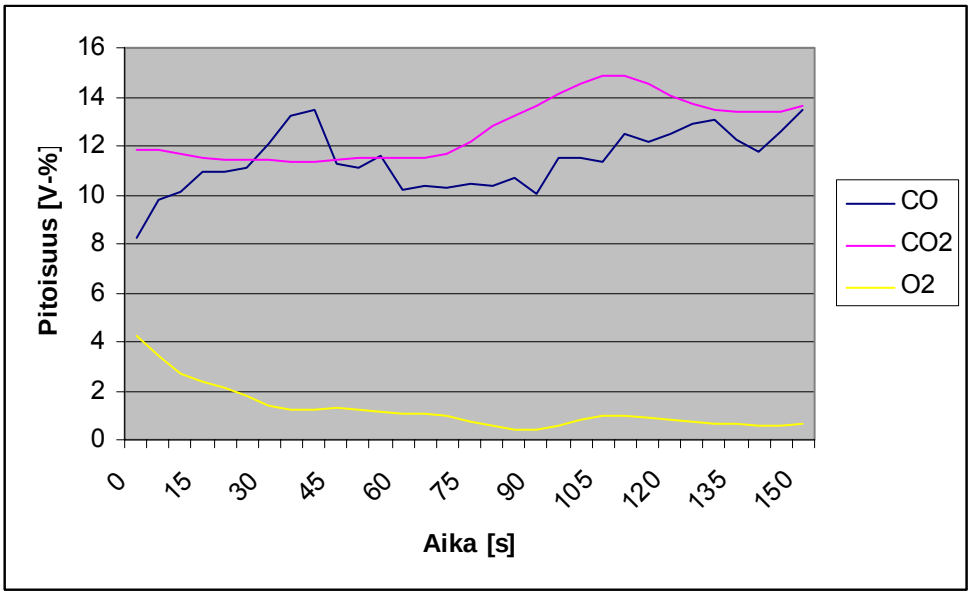


Kuva 34. Kolmannen kaasutuskokeen CO-, CO_2-, ja O_2-pitoisuudet.

CO-pitoisuus on niin suuri, että voidaan puhua kaasutusprosessista. Kuitenkin hiilidioksidipitoisuus on varsin suuri. Lämmityksen aikana se aluksi kasvoi hyvin suureksi (25 - 30 %) ja sitten pieneni vajaaseen 20 %:iin. Kokeen aikana se oli alimmillaan noin 10 %:n tasolla. Ilmeisesti tuhkassa on palamatonta ainesta, joka häiritsee mittausta. Tämän vuoksi ennen seuraavaa kaasutuskoetta tuhkasta hehkutetaan hiihtojäännös pois tuhkauunissa noin 800 ºC:n lämpötilassa. Myös massauksien tiiviys vielä varmistetaan.

6.2.4 Kaasutuskoe 4

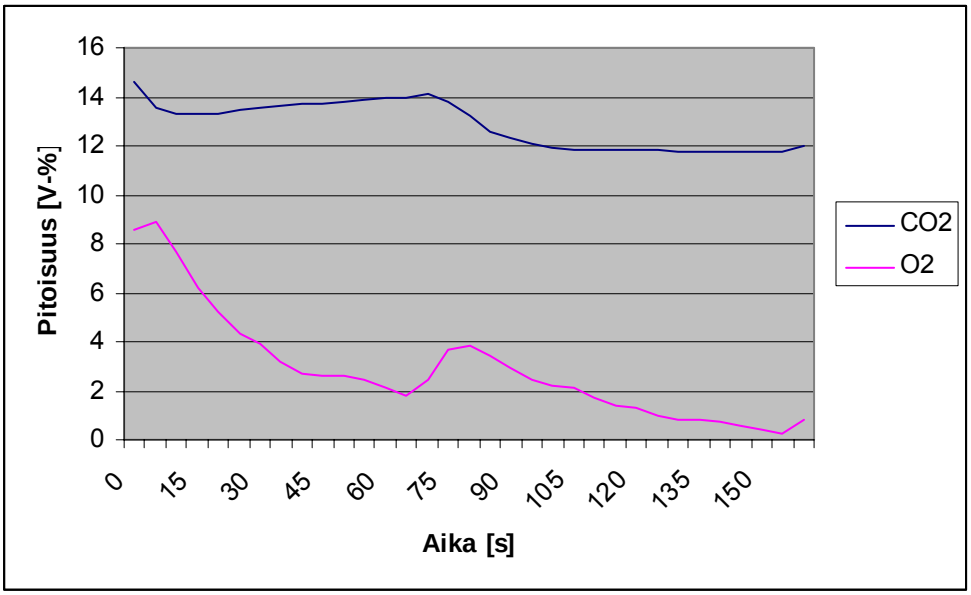
Kaasupitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa edellisen kokeen kanssa. Kuvassa 35 on CO-, CO_2-, ja O_2-pitoisuudet. Voi olla, että koelaitteella on tässä kokeessa saavuttanut sen, mihin sillä voi yltää. Seuraava koe osoittakoon, tuleeko tuloksissa kehitystä.



Kuva 35 Neljännen kaasutuskokeen CO-, CO_2-, ja O_2-pitoisuudet

6.2.5 Kaasutuskoe 5

Koetta kokeiltiin pienemmällä puhallusilmamäärällä. Tällä yritettiin kompensoida ilmavuotoa näytteenottoon. Kokeen CO_2- ja O_2-pitoisuudet näkyvät kuvassa 36. Häkämittaus ei onnistunut, koska mittauslaitteistossa oli jotain vialla. Kuitenkin CO_2-käyrä on aika tasainen kokeen loppupuolella. CO-pitoisuuksia luettiin manuaalisesti mittarilta ja ne olivat vähintään edellisten kokeiden tasolla. Lämmitysliekistä vuotaa edelleen hiilidioksidia näytteenottoon. Ilmeisesti vuoto tapahtuu kaasujen poistoputkesta. Ongelman poistaminen edellyttäisi täysin kaasutiivistä rakennetta, mikä ei nyt ole tässä tutkimuksessa mahdollista.



Kuva 36 Viidennen kaasutuskokeen CO_2- ja O_2-pitoisuudet

6.3 KAASUTUSKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU

Kaasutuskokeet on saatu päätökseen. Kaasutuskokeiden tuloksia vertaillaan taulukossa 36. Laskentasarakkeen pitoisuudet ovat laskettu taulukon 34 arvojen perusteella.

Taulukko 36 Laskennan ja kaasutuskokeiden vertailua

	CO [V-%]	CO_2 [V-%]
Laskettu	30,487 – 36,175	1,753 – 3,246
Mitattu	9,98- 13,49	8,95 – 14,01

Mittaustulokset ovat kaukana lasketuista tuloksista. Kuitenkin voidaan puhua kaasutusprosessista, koska hiilimonoksidipitoisuus on samaa luokkaa hiilidioksidipitoisuuden kanssa. Tuotekaasussa havaittiin happea jonkin verran, joten ilmavuotojakin oli jonkin verran. Mittaustilanteessa vuotokaasut luonnollisesti pienentävät hiilimonoksidin osuutta. Muiden kaasujen (vedyn ja vesihöyryn) vertailu edellyttää mittauksia, joita näissä kokeissa ei tehty.

7 TULEVAN LAITTEISTON ESISUUNNITTELU

7.1 SUUNNITTELUN PERUSTA

Tämän tutkimuksen puitteissa ei laitteistoa rakenneta enää pitemmälle, myöskään kokeellista tutkimusta ei enää tehdä. Nyt on tarkoitus pohjustaa suuremman kokoluokan koelaitteiston suunnittelua eli tämän työn jälkeen tehtävää tutkimusta.

Prosessia tulee kehittää siihen suuntaan, että apuliekkiä tarvitaan vain ylösajossa. Tällä tarkoitetaan sitä, että nyt käytettyä asetyleeniliekkiä tai siihen verrattavissa olevaa starttipoltinta ei käytetä kaasutuksen aikana. Koelaitteistokoon kasvaessa nimittäin voi olla niin, ettei pääasiassa hitsaukseen ja polttoleikkaukseen tarkoitetun polttimen teho riitä. Tällöin kysymykseen voi tulla kiinteän, riittävän tehokkaan polttimen käyttö. Omavoimaisen prosessin vaatima lämmöntuonti voidaan järjestää ilman esikuumennuksella, savukaasujen takaisinkierrätyksellä tai happikaasutuksella. Myös vesihöyryä voidaan käyttää kaasutuksessa. Eri kaasutusvaihtoehtoja pohditaan myöhemmin.

Käytetty tuhka tulee olla siitä polttoaineesta, jota kaasutetaan. Tuhkasulan poisto on tarpeellista, jos sulakerros kasvaa liian korkeaksi. Oletettavasti jatkuva poisto ei ole tarpeen, koska monilla biopolttoaineilla on hyvin pieni tuhkapitoisuus. Jos poistotarvetta tulee, se on jaksotettavissa esimerkiksi kierrettävän tapin tai kartiotapin avulla. Tappeja voisi olla kaksi. Tyhjennystappi aivan sulakammion pohjaan ja ajon aikana tehtävään sulan poistoon kylkeen pohjan yläpuolelle. Kuitenkin alueelle, jossa on vakaa sulavyöhyke, ei kupliva ja turbulenttinen. Tappiratkaisuja on käsitelty tämän tutkimuksen esiselvityksessä (Mannelin, 2005).

Polttoaineen syötöstä tulee tehdä sellainen, että laitteen välitön ympäristö on ajon aikana miehittämätön. Tällöin vaihtoehtoja voisi olla pyörivä syöttölaite, joka välillä päästää ja välillä estää polttoaineen kulkemisen syöttöputkeen. Polttoaine kulkeutuu syöttölaitteeseen

painovoimaisesti. Kaasutiiveys ja hyvä lämpöeristys ovat oleellisia vaatimuksia, etteivät kuumat kaasut sytytä polttoaineastiaa.

Sulakammion rakenteena voi olla kuvan 37 tapainen iso teräsputki, joka on alaosastaan liitetty laipalla puolipallomaisen muotoiseen pohjaosaan. Rakennelma voidaan asettaa laipparenkaastaan sopivan kokoisen teräsjalustan varaan. Putki ja pohjaosa muurataan kuvassa näkyvällä massalla, joka on tulenkestävää.

Kuva 37 Sulakammion toteutustapa

Laboratoriossa käynnissä oleva kaasunpolttotutkimus koostuu osista (sähkökuumennin, polttokammio, kierrätyspuhallin), joiden hyödyntäminen toisi investointisäästöjä. Tämän vuoksi kannattaa pohtia niiden hyödyntämistä. Jos sulakammio yhdistettäisiin kaasunpolttolaitteistoon, kammion sisähalkaisija olisi suuruusluokkaa 20 cm (Mannelin, 2005).

7.2 ESIKUUMENNETTU ILMA

Kaasutusilman on oltava erittäin kuumaa, jotta sulakammio pysyisi riittävän kuumana. Kokoluokasta riippuen kuumentimen teho määritetään seuraavasti.

$$\phi_k = q_{m,i(teor)} \lambda (h_2 - h_1) \quad (32)$$

missä	ϕ_k	on kuumentimen lämpöteho	[kW]
	$q_{m,i(teor)}$	teoreettisen palamisen vaatima ilman massavirta	[kg/s]
	h_1	ilman ominaisentalpia ympäristön tilassa	[kJ/kg]
	h_2	ilman ominaisentalpia kuumentimen jälkeen	[kJ/kg]
	λ	ilmakerroin	

Sopiva ilmakerroin lienee välillä 0,2 - 0,3.

Lämmönsiirrin voi olla rekuperaattori tai regeneraattori. Rekuperaattorissa lämpö siirtyy lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinnan läpi savukaasuista ilmaan. Regeneraattori siirtää lämpöä varaavien massojen välityksellä. Kylmä ja kuuma massavirta koskettavat vuoron perää samaa, lämpöä siirtävää materiaalia (Huhtinen et. al., 2000). Regeneraattorilla siis päästään suurempiin ilman kuumennuslämpötiloihin, koska siinä ei ole lämpövastusta aiheuttavaa välityspintaa. Hyvä regeneraattori voi toimia 50 K:n lämpötilaerolla savukaasun ja ilman välillä (Nabil ja Blasiak, 2006).

Laitteiston seuraavassa versiossa ei vielä välttämättä ole mahdollisuutta regeneratiiviseen ilman esikuumentamiseen. Voimalaitostekniikan laboratoriossa olevan kaasunpolttolaitteiston ilmankuumentimen käyttöä kannattaa harkita. Taajuusmuuttajakäyttöisellä kuumentimella on helppo säätää alkuvaiheessa kaasutusilman lämpötila sopivaksi. Kuumennin on teholtaan 15 kW ja se on mitoitettu kuumentamaan ilmaa noin 30 kuutiometriä tunnissa ympäristön lämpötilasta 1000 ºC:een. Tämä ilmamäärä on kaasunpolttolaitteiston vaatima palamisilmamäärä (Korpela, 2005). Koska kaasutin vaatii selvästi pienemmän ilmamäärän, kuumentimella voidaan varmasti tuottaa suurempiakin lämpötiloja. Ylärajan asettaa materiaalien kesto, joiden kestoraja on korkeintaan noin 1500 ºC (Roiha, 2006).

7.3 SAVUKAASUJEN TAKAISINKIERRÄTYS

Savukaasujen takaisinkierrätyksellä pyritään hillitsemään typenoksidien muodostumista (Mannelin, 2005). Savukaasu voidaan tuoda sulakerrokseen sellaisenaan tai se voidaan sekoittaa kuumennetun kaasutusilman joukkoon.

Savukaasun takaisinkierrätys edellyttää tuotekaasun polttoa erillisessä polttokammiossa. Kaasunpolttolaitteiston polttokammion rakenne on myös kuvan 37 kaltainen. Sisähalkaisija on noin 30 cm, kun on huomioitu, että kammion teräsputki sisältää noin 40 mm tulenkestävän (noin 1600 ºC) massauksen. Korkeus on noin 80 cm (Roiha, 2006). Kierrätettäviä savukaasuja ei tule jäähdyttää, jotta tuhkasula ei jähmettyisi.

Kierrätyslaitteen mitoitusta ajatellen tulee olla tietoa kierrätettävästä savukaasumäärästä ja halutusta paine-erosta. Kierrätettävä savukaasumäärä riippuu kaasutuksessa käytetystä ilmamäärästä, polttokammion jälkeisten savukaasujen jäännöshappipitoisuudesta ja halutusta ilma-savukaasu-seoksen happipitoisuudesta. Yksinkertaisimmassa tarkastelumallissa ilma ja savukaasu sekoittuvat täysin ilmankuumentimen jälkeen, jolloin niillä on sulakammioon mentäessä sama lämpötila (Korpela, 2005). Tällöin happitase noudattaa yhtälöä

$$q_{v,i}c_{O_2,i} + q_{v,sk}c_{O_2,sk} - (q_{v,i} + q_{v,sk})c_{seos} = 0 \qquad (33)$$

missä $q_{v,i}$ on kaasutusilman tilavuusvirta [m^3/s]

$c_{O_2,i}$ kaasutusilman happipitoisuus

$q_{v,sk}$ kierrätettävä savukaasuvirta [m^3/s]

$c_{O_2,sk}$ savukaasujen happipitoisuus

c_{seos} seoskaasun happipitoisuus

Tällöin kierrätettävän savukaasun suhde kaasutusilmaan muodostuu seuraavasti

$$\frac{q_{v,sk}}{q_{v,i}} = \frac{c_{O_2,i} - c_{O_2,seos}}{c_{O_2,seos} - c_{O_2,sk}} \tag{34}$$

Huomioimalla ideaalikaasulain mukainen kaasun laajeneminen lämpötilan mukaan savukaasumääräksi saadaan

$$q_{v,sk} = q_{v,i} \frac{c_{O_2,i} - c_{O_2,seos}}{c_{O_2,seos} - c_{O_2,sk}} \frac{T_{seos}}{T_{ymp}} \tag{35}$$

missä T_{seos} on ilman ja savukaasun saavuttama sekoituslämpötila [K]

T_{ymp} ympäristön lämpötila [K]

Savukaasun määrä siis ratkeaa, kun tiedetään ilmavirta (kokoluokan mukaan), lämpötilat ja happipitoisuudet. Ilman happipitoisuus on noin 21 %. Tarvittavan paine-eron arviointi on vaikeaa, koska kaasujen nopeudet ja kanaviston mitat eivät ole tiedossa. Kierrätyslaite ei voi olla tavallinen puhallin, koska savukaasut ovat mahdollisimman vähän jäähdytettyjä. Tämän vuoksi puhaltimen kuumankestävyyteen joudutaan kiinnittämään huomiota. Laboratorion savukaasun kierrätyspuhallin kestää noin 1000 ºC, joten sen kuumempana savukaasuja ei voi kierrättää (Roiha, 2006). Tällöin jos kaasutusilma esilämmitetään hyvin kuumaksi, seoksen tulolämpötila kaasuttimeen on vähän yli 1000 ºC sekoitussuhteen mukaan.

7.4 HAPPIKAASUTUS

Happi- tai happirikastettu kaasutus on houkuttelevaa, koska hapettimen typpipitoisuus on olematon tai huomattavan pieni. Tällöin reaktiolämpötilat voivat nousta riittäviksi ilman esilämmitystäkin. Muita saavutettavia etuja ilmakaasutukseen nähden ovat pienentyneet typenoksidipäästöt ja tuotekaasun suuri lämpöarvo. Esimerkki toimivasta happirikastetusta (95 %) sulakaasutusprosessista on venäläinen metallien erotukseen tarkoitettu sulakaasutusuuni (Balasanov et. al., 2003).

Happirikastus vaatii kuitenkin oman tuotantolaitoksensa ja menee ainakin 15 vuotta ennen kuin happikaasutus on taloudellisesti kannattavaa. (Mannelin, 2005). Seuraavan vaiheen koelaitetta ajatellen happikaasutus tuskin on niin todennäköinen vaihtoehto kuin palamisilman esilämmitys ja savukaasujen takaisinkierrätys. Happikaasutusta voi halutessaan kokeilla käyttämällä pullotettua happea.

7.4.1 Kaasutusesimerkki hapella

Taulukoissa 37 ja 38 on HSC- ohjelmalla laskettu puhtaalla hapella kaasutettu pelletti ja tavallisella ilmalla poltettu tuotekaasu. Polttoaineen koostumus ja häviöoletukset ovat luvun 4 mukaiset. Huomataan, että puhtaalla hapella kaasutus antaa vähintään samaa suuruusluokkaa olevat lämpötilat kuin kuumennettua ilmaa käytettäessä.

Taulukko 37 Pelletti: Puhtaan happikaasutuksen tuotekaasut ja häviölliset lämpötilat (happi 298 K, kosteus 6,6 %)

λ	CO [mol]	CO_2 [mol]	H_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	T [K]
0,2	37,135	1,545	27,159	5,041	0,05	1940
0,25	36,355	2,325	23,919	8,281	0,05	2203
0,3	35,514	3,166	20,742	11,458	0,05	2448

Verrattaessa HSC- ohjelman antamaa tuotekaasun lämpöarvoa on se ilmalla kaasutettaessa noin 6 MJ/Nm^3 ja puhdasta happea käytettäessä noin11 MJ/Nm^3.

Taulukko 38 Pelletti: Häviöllinen tuotekaasun poltto ilmakertoimen 0,2 tuotekaasusta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	38,68	35,20	121,24	0	2687
1,1	38,68	35,50	133,36	3,21	2549
1,2	38,68	35,80	148,48	6,43	2427
1,3	38,68	36,10	157,60	9,64	2318
1,4	38,68	36,40	169,72	12,86	2220
1,5	38,68	36,70	181,84	16,07	2131

Tuotekaasun poltossa lämpötilat ovat lähellä kuumailmakaasutuksen laskentaa. Moolivirrat ovat luonnollisesti vähän pienemmät, koska kaasutusvaiheessa typpeä tulee vain polttoaineesta, jonka typpipitoisuus on hyvin pieni.

7.5 VESIHÖYRYKAASUTUS

Myös vesihöyryn käytöllä kaasutuksessa pyritään tuotekaasun lämpöarvon suurentamiseen ja typenoksidipäästöjen pienentämiseen. Vesihöyry hajoaa hiilen kanssa reagoidessa vedyksi ja hiilimonoksidiksi reaktion (7) tapaan. Reaktio on endoterminen, joten on huomioitava, että liian suuri vesihöyrymäärä laskee kaasuttimen lämpötilaa liikaa. Vesihöyryn käyttö edellyttäisi höyrykiertoista koelaitteistoa, jota ei ole käytettävissä. Vesihöyryn käyttöä voidaan tarkastella HSC- mallin avulla.

7.5.1 Kaasutusesimerkki vesihöyryllä

Vesihöyrylle on löydettävä järkevä määrä. Yksi tapa on vertailla vesihöyryn ja hiilen määrää keskenään. Muualla tehdyssä tutkimuksessa jonkin verran sulakaasutinta muistuttavalla koelaitteella on kokeiltu H_2O/C suhteita välillä 0,15 - 0,5 (Shinobu et. al., 2005). Käytetään tässä esimerkissä koko ajan vakioilmakerrointa 0,25 ja muutetaan vesihöyryn määrää. Oletetaan, että höyry puhalletaan ilman sekaan ja se lämpenee ilman kanssa yhteiseen 1400 ºC:n lämpötilaan. Häviöoletukset ovat samat kuin aikaisemminkin. Tuotekaasun koostumus muodostuu taulukon 39 mukaisesti.

Taulukko 39 Pelletti: Häviöllinen kaasutus vesihöyryllä ja ilmalla. Ilmakerroin 0,25 (ilma ja vesihöyry 1673 K, kosteus 6,6 %)

H_2O/C	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]	CO_2 [mol]
0,15	34,993	3,865	21,609	10,175	37,929	1943
0,3	33,897	4,780	21,424	12.536	37,929	1860
0,45	32,779	5,896	21,279	14,530	37,929	1773

Tuotekaasu saavuttaa sitä pienemmän lämpötilan, mitä enemmän vesihöyryä käytetään. Kaasunpolton lämpötilat ja savukaasut on kerätty taulukkoon 40. Pienimmällä

höyrymäärällä tuotekaasun lämpöarvo on vähän yli 6 MJ/Nm^3 ja suurimmalla hieman alle 6 MJ/Nm^3.

Tässä tapauksessa lämpöarvo on sitä pienempi, mitä enemmän höyryä käytettiin. Tämä johtuu siitä, että kaasutuksessa käytettiin myös ilmaa normaalin kaasutuksen vaatima määrä. Puhtaalla vesihöyryllä kaasutettaessa voidaan tuottaa hyvissä olosuhteissa suuruusluokkaa 10 MJ/Nm^3 typetöntä tuotekaasua (Mannelin, 2005).

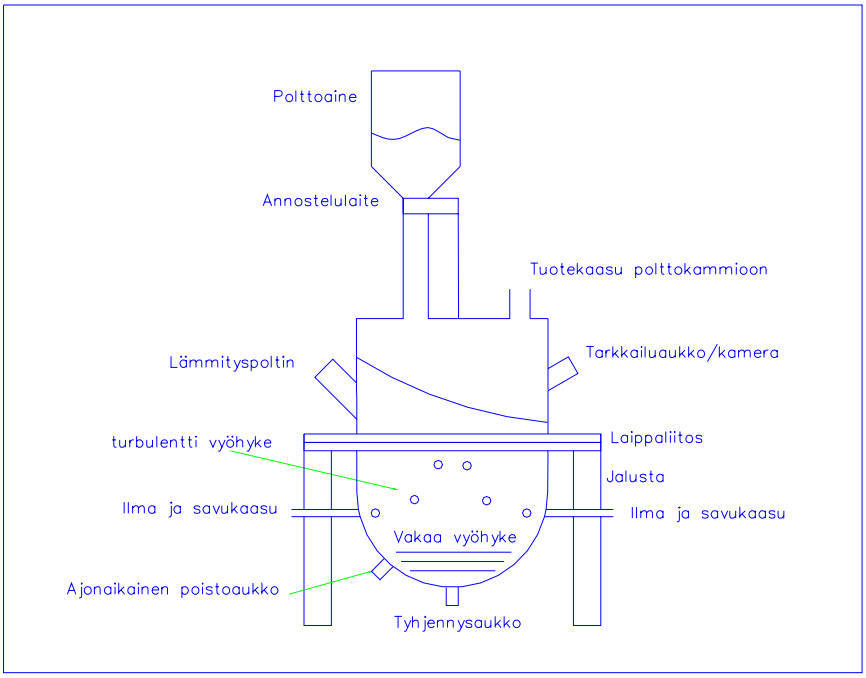
Taulukko 40 Pelletti: Häviöllinen kaasunpoltto 0,15 vesi/hiilisuhteen kaasutuksesta (ilma 298 K)

λ	CO_2 [mol]	H_2O [mol]	N_2 [mol]	O_2 [mol]	T [K]
1,0	38,68	34,43	144,62	0	2457
1,1	38.68	34,69	155,29	2,83	2356
1,2	38,68	34,96	165,96	5,66	2268
1,3	38,68	35,22	176,63	8,49	2180
1,4	38,68	35,48	187,30	11,32	2103
1,5	38,68	35,75	197,97	14,15	2033

7.6 LAITTEISTON KOKOONPANO

Lopuksi tehdään hahmotelma, millainen seuraavan vaiheen laitteiston rakenne voi olla. Keskitytään kaasutuskammioon, koska se on tämän tutkimuksen tärkein kohde.

Jos oletetaan, että kaasuttimeen puhalletaan kuumaa ilmaa ja savukaasua, laitteisto olisi kaasuttimen osalta kuvan 38 kaltainen. Ilma- ja savukaasuputket yhdistetään alempaan osaan, jotta yläosaan ei jäisi jähmettynyttä tuhkaa. Tämä helpottaa huoltotoimenpiteitä. Ilmankuumentimen, puhaltimien ja putkien sijaintia suhteessa sulakammioon ei tässä vaiheessa tiedetä Jos sulakaasutusjärjestelmä onnistutaan yhteen sovittamaan kaasun polttolaitteiston kanssa, valmiina olevia komponentteja ovat sähkökuumennin, savukaasun kierrätyspuhallin ja polttokammio. Tällöin rakennettaviksi jää kaasutin apulaitteineen. Laitteisto tulee sijoittaa lähelle kaasunpolttolaitteistoa, koska suurissa lämpötiloissa lämpöhäviöt yhdysputkissa ovat suuret.



Kuva 38 Kaasuttimen toteutustapa

Mittauksista todettakoon, että vedyn ja vesihöyryn mittaus tuotekaasusta toisi lisää tietoa kaasutuksen onnistumisesta. Muita mittauksia olisivat lähinnä lämpötilan mittaukset tärkeimmistä paikoista, kuten sulasta, kaasutusilmasta, tuote- ja savukaasuista. Kaasuvirtojen tilavuusvirratkin on hyödyllistä mitata. Prosessin tarkkailua voi tehostaa halkaisijaltaan muutaman sentin tarkkailuikkuna tai kamera kammion kyljessä. Pintalämpötilat ovat huomattavat, joten kameralla pitäisi olla jäähdytys. Jäähdytys voidaan toteuttaa vesikierrolla tai paineilmalla.

Seuraavankin sukupolven koelaitteen tulee olla aika yksinkertainen edellä esitetyn tapaan. Prosessissa vaativinta on käynnistys, jossa tarvitaan apupoltinta tuhkan sulatuksessa. Kun tuhka saatu juoksevaksi, prosessi on pidettävissä käynnissä kuumennetulla ilmalla.

8 YHTEENVETO

Ulkomailla on toiminnassa huomattavan kehittyneitä hiilen sulakaasutuslaitteistoja. Myös jätteen hävitykseen on kehitetty sulakaasutusperiaatteella toimivia kaasuttimia. Aika näyttää, kiinnostutaanko Suomessa jätteiden sulakaasutuksesta. Tämän työn painopistealueena ovat kuitenkin biopolttoaineet.

Laskennassa käytettiin oletusarvoja lämpöhäviöiden ja tuhkan lämpöhäviön osalta. Koska biopolttoaineiden tuhkapitoisuus on lähes olematon tai pieni, lämpöhäviöt ovat selvästi tuhkan aiheuttamaa häviötä suuremmat. Polttoaineen kosteudella on tuhkan määrää suurempi vaikutus häviöihin. Veden höyrystyminen sitoo paljon lämpöä, joten kaasutus- ja palamislämpötilat voivat vaihdella useita satoja asteita eri polttoaineilla. Hyvin kostean polttoaineen, tässä laskennassa hakkeen, kaasutus tuottaa kylmempää tuotekaasua kuin kuumennetun kaasutusilman tulolämpötila on. Kyseinen prosessi ei olisi mahdollinen. Hyvin kosteita polttoaineita täytyy kuivata ennen kaasutusta.

Kokeellisessa osassa sulatettiin aluksi eri polttoaineiden tuhkia ja mitattiin sulamislämpötiloja. Kuumennuskammioksi rakennettiin eristetty uuni, jossa tuhkalla täytettyä upokasmaista astiaa kuumennettiin asetyleeniliekillä. Tavoitteena oli saada tuhka juoksevaan muotoon. Viidestä erilaisesta tuhkasta kolme saatiin juoksevaksi. Kaasutuskokeissa sama upokas toimi kaasuttimena. Tuhkaksi valittiin helpoimmin sulava turpeen tuhka ja polttoaineeksi helpoimmin käsiteltävä puupelletti. Kokeissa prosessi saatiin toimimaan kaasutusprosessin tapaan, vaikkakin laskettuja kaasukoostumuksia ei saavutettukaan. Tämä johtui siitä, että astia ei ollut aivan kaasutiivis. Laitteistoa kehitettiin muun muassa rakentamalla upokkaalle oma kansi, joka paransi tuloksia jonkin verran. Kaasutiiviillä kammiolla saataisiin todennäköisesti parempia tuloksia.

Tutkimuksen seuraavana vaiheena on omavoimaisen sulakaasuttimen rakentaminen. Se edellyttää selvästi kehittyneempää polttoaineen syöttöä ja lämmöntuontia. Todennäköisin vaihtoehto on ilman esikuumennus ja savukaasujen takaisinkierrätys. Edelleen mittauksia voisi monipuolistaa tuotekaasun vety- ja vesihöyrymittauksilla, lämpötilamittauksilla ja

tilavuusvirtamittauksilla. Laboratorion kaasunpolttolaitteisto sisältää komponentteja, joiden hyödyntämistä kannattaa harkita.

LÄHDELUETTELO

Alakangas, Eija. 2000 Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo. VTT. 177 sivua. ISBN 951-38-5699-2.

Aleksic, Bogdan R.; Ercegovac, Marko D.; Cvetkovic, Olga G.; Markovic, Branislav Z.; Aleksic, Bojana D.; Vitorovic, Dragomir K. 1998. Direct hydro liquefaction of a low rank soft brown coal. Fuel Processing Technology, Volume 5, Issue 2, November 1998, pages 33 - 43.

Balasanov, A.V.; Usachev, A.B.; Romenets, V.A.; Verein, V.G. 2003. Experience with Burning Coal in Metallurgy. Thermal Engineering. Vol. 50, No. 8, 2003, pp. 646 - 652.

Hassinen, Markus. 1999. Märkärikinpoistolaitoksen suorituskyvyn erityispiirteet ruskohiilivoimalaitoksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Energiatekniikan osasto. Lappeenranta. 67 sivua.

Huhtinen, Markku; Kettunen, Arto; Nurminen, Pasi; Pakkanen, Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Helsinki. Edita. 379 sivua. ISBN 951-37-3360-2.

Jalovaara, Jukka; Aho, Juha; Hietamäki, Eljas; Hyytiä, Ville. 2003. Paras käytettävissä oleva teknologia (BAT) 5 - 50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. ISBN 952-11-1489-4.

Jung C.H.; Matsuto, T.; Tanaka, N. 2005. Behavior of metals in ash melting and gasification-melting of municipal solid waste (MSW). Waste Management, v 25, n 3, p 301 - 310.

Korpela, Matti. 2005. Maakaasun kuumailmapolton teoria ja koelaitteiston suunnittelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan osasto. 62 sivua.

Liu, Yangsheng; Liu, Yushan. 2005. Novel Incineration Technology Integrated with Drying, Pyrolysis, Gasification and Combustion of MSW ashes Vitrification. Environmental Science and Technology, v 39, n 10, p3855 - 3863.

Mannelin, Sami. 2005. Sulapolttotutkimuksen esiselvitys ja koelaitteiston suunnittelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan osasto. 68 sivua.

Meuronen, Vesa. 1999. Höyrykattiloiden suunnittelu, Opetusmoniste EN C-132. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Lappeenranta. ISBN 951-764-382-9.

Motiva OY. 2006. Verkkosivut: Saatavissa: www.motiva.fi/fi/kirjasto. Viitattu 3.1.2006.

Nabil, Radifi; Blasiak, Wlodzimierz. 2005. Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb regenerators used for HiTAC burners. Thermal Engineering. Vol. 25, No. 17 - 18, 2003. pp. 2966 - 2982.

Paju, Paavo; Alakangas, Eija. 2002. Puupellettien tuotanto-, jakelu- ja käyttöketjun tekniikka, talous ja markkinat. Jyväskylä. VTT. 73 sivua.

Raiko, Risto; Kurki-Suonio, Ilmari; Saastamoinen, Jaakko; Hupa, Mikko. 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä. Teknillisten tieteiden akatemia (TTA). 622 sivua. ISBN 951-666-448-2.

Roiha, Ismo. 2006. Diplomi-insinööri. Assistentti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Voimalaitostekniikan laboratorio. Lappeenranta. Henkilökohtainen tiedonanto kaasunpolttolaitteistosta. 10.4.2006.

Shimano, Satoshi; Asakura, Shukuji. 2005. The redox combustion of carbon monoxide by using molten $(Na^+, K^+)_2(CO_3^{2-}, SO_4^{2-})$ mixtures. Chemosphere. In Press, Corrected Proof, Available online 7 December 2005.

Shinobu, Sugiyama; Suzuki, Naoki; Kato, Yoshitaka; Yoshikawa, Kunio; Omino, Akira; Ishii, Toru; Yoshikawa, K.; Kiga, Takashi. 2005. Gasification performance of coals using high temperature air. Energy, v 30, n 2 - 4, p 399 - 413.

Stepanov, S.G. 2004. Development of Technologies and New Approaches to Coal Gasification. Thermal Engineering, vol. 51, No. 9, pp 722 - 725.

Thy, Peter; Jenkins, M. Bryan; Lesher, E. Charles; Grundvik, Sidsel. 2006. Compositional constrains on slag formation and potassium volatilization from rice straw blended wood fuel. Fuel Processing Technology, Volume 87, Issue 5, May 2006, Pages 383 - 408.

Liite 1 Laskuesimerkki

Lasketaan ruokohelpikasvin esimerkkitapaus poltosta ilmakertoimella 1,2. Taulukoiden mukaan kylläisen vesihöyryn paine lämpötilassa 25 ºC on 3,169 kPa. Tällöin yhtälön (10) mukaan ilmassa olevan vesihöyryn paine on

$$p_h = 0{,}6 \cdot 3{,}169\,kPa = 1{,}9014 \text{ kPa}$$

Tällöin yhtälön (9) avulla saadaan vesihöyryn mooliosuudeksi

$$y_{h2O} = \frac{1{,}9014\,kPa}{100\,kPa} = 0{,}019014$$

Taulukosta 1 saadaan ruokohelpikasvin kuiva-ainekoostumus. Kun huomioidaan polttoaineen kosteus, saadaan aineosuuksien ja moolimassojen avulla kuiva-aineiden alkuainemäärät. Tällöin hapentarpeeksi saadaan yhtälöllä (12)

$$n_{O_2} = (31{,}96 + 11{,}93 - 10{,}78 + 0{,}12)mol = 33{,}24 \text{ mol}$$

Savukaasuihin siirtyy siis happea

$$n_{O_2,sk} = (1{,}2 - 1)33{,}24\,mol = 6{,}65 \text{ mol}$$

ja raakatyppeä

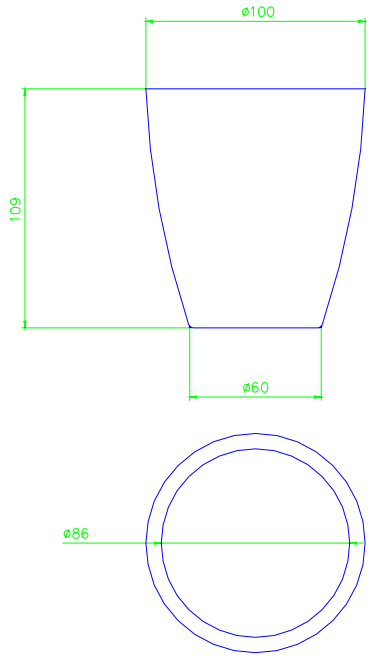
$$n_{N_2 r} = 1{,}2 \cdot 3{,}77 \cdot 33{,}24\,mol = 150{,}38 \text{ mol}$$

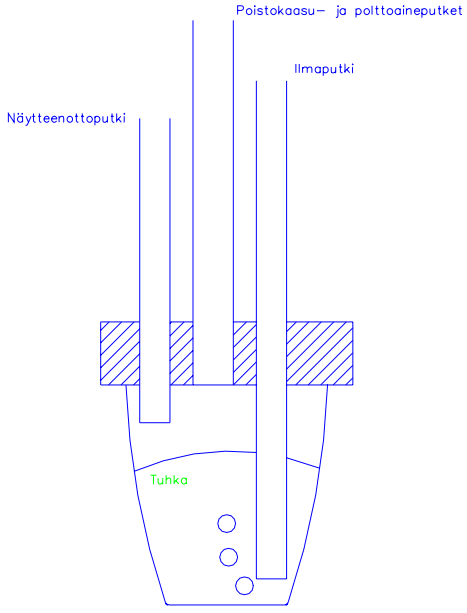
Nyt saadaan laskettua palamisilman mukana tuoma vesihöyrymäärä yhtälöllä

$$n_{H_2O,ilma} = (33{,}24 + 6{,}65 + 150{,}38)mol \frac{0{,}019014}{1 - 0{,}019014} = 3{,}69 \text{ mol}$$

Savukaasuihin tulee myös polttoaineesta höyrystyvä kosteus, rikkidioksidi rikin palamisesta, vesihöyry vedyn palamisesta, hiilidioksidi hiilen palamisesta ja polttoaineen sisältämä typpi. Näiden määrät tulevat suoraan jakamalla niiden massa kunkin aineen moolimassalla. Kaasutuskaasun poltossa ainoastaan palamisreaktio (1) korvautuu (4):lla. Muuten se sujuu edellä esitetyllä tavalla.

LIITE 2. Upokkaan mitat (mm) ja kaasutuskokeen periaate





LIITE 3. Laboratoriokokeiden mittauspöytäkirjat

Kuumennuskoe 1 16.1.2006
Nestekaasuliekki

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	22,7
1	53,8
2	91,9
3	128,8
4	162,8
5	195,1
6	228,8
7	254,9
8	279,4
9	299,4
10	317,3
11	337,0
12	361,0
13	391,2
14	416,1
15	426,5
16	426,7
17	423,4
18	420,3
19	417,2
20	416,0
21	415,9
22	414,2
23	413,3
24	413,0
25	412,1
26	410,4
27	410,0
28	409,0
29	407,3
30	406,0

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kuumennuskoe 2 16.1.2006
Nestekaasuliekki

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	23,3
1	72,2
2	129,6
3	194,1
4	248,3
5	295,2
6	335,4
7	368,1
8	394,5
9	419,3
10	449,3
11	476,8
12	511,5
13	538,3
14	553,3
15	559,9
16	564,0
17	570,1
18	572,5
19	574,1
20	576,7
21	579,1
22	580,7
23	577,0
24	569,3
25	564,5
26	560,8
27	558,0
28	555,6
29	558,9
30	564,1

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kuumennuskoe 3 17.1.2006
Asetyleeniliekki

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	19,0
1	111,7
2	305,5
3	502,2
4	625,0
5	698,6
6	751,1
7	790,5
8	822,3
9	844,0
10	859,1
11	871,3
12	886,1
13	901,7
14	915,6
15	928,4
16	937,1
17	945,2
18	952,4
19	958,1
20	963,7
21	968,0
22	971,4
23	974,2
24	976,8
25	979,0
26	980,0
27	981,0
28	981,9
29	982,9
30	983,5

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kuumennuskoe 4 17.1.2006
Asetyleeniliekki

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	984,5
1	1004,4
2	1014,9
3	1021,9
4	1026,5
5	1026,5
6	1030,3
7	1032,9
8	1035,0
9	1043,0
10	1046,2
11	1048,0
12	1049,3
13	1050,1
14	1051,0
15	1052,0

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 1 18.1.2006
Kuori

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	22,7
2	343,0
4	807,5
6	943,9
8	1005,4
10	1038,5
12	1066,3
14	1088,6
16	1109,5
18	1124,8
20	1136,2
22	1145,4
24	1154,7
26	1163,2
28	1170,9
30	1172,0
32	1186,6
34	1192,9
36	1196,6
38	1198,7
40	1200,7

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 2 20.1.2006
Kuori

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	17,5
2	216,2
4	492,8
6	727,6
8	866,3
10	945,1
12	990,7
14	1026,0
16	1078,6
18	1131,1
20	1159,4
22	1179,3
24	1199,2
26	1207,6
28	1216,7
30	1222,1
32	1248,6
34	1275,0
36	1301,5
38	1303,0
40	Anturi rikkoutui

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 3 30.1.2006
Kuori

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	109,6
2	291,5
4	516,0
6	703,7
8	811,7
10	869,0
12	910,5
14	946,9
16	982,0
18	1001,7
20	1036,9
22	1071,7
24	1114,9
26	1153,3
28	1185,8
30	1213,6
32	1235,0
34	1254,5
36	1275,8
38	1298,1
40	1309,3
42	1312,0
44	1336,0
46	1358,6
48	1307,9
50	1325,0
52	1354,0
54	1371,2
56	1381,7
58	1389,3
60	1250,4
62	1333,0
64	1383,7
66	1413,4
68	1421,8

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 4 31.1.2006
Turve

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	16,2
2	169,9
4	296,9
6	411,9
8	507,0
10	585,2
12	656,1
14	705,8
16	755,6
18	836,6
20	890,6
22	944,8
24	974,8
26	1048,0
28	1124,4
30	1171,9
32	1237,2
34	1262,9
36	1279,0
38	1276,6
40	1301,9
42	1325,5
44	1344,0
46	1357,9

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 5 1.2.2006
Hake

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	719,0
2	881,1
4	984,0
6	1062,4
8	1139,9
10	1187,7
12	1227,7
14	1259,9
16	1274,6
18	1310,1
20	1331,8
22	1367,4
24	1368,6
26	1391,3
28	1413,0
30	1438,0
32	1451,2
34	1463,3
36	1474,5
38	1489,8
40	1507,6
42	1518,6
44	1534,9
46	1529,6
48	1540,9
50	1540,3
52	1561,4
54	1548,3
56	1565,0
58	1586,1
60	1598,0

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 6 10.2.2006
Ruokohelpi

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	540,1
2	615,4
4	739,8
6	872,0
8	1064,4
10	1118,2
12	1155,6
14	1166,9
16	1182,5
18	1224,0
20	1155,7
22	1249,9
24	1343,6
26	1328,7
28	1375,5
30	1415,3
32	1254,4
34	1354,4
36	1456,7
38	1498,0
40	1155,6
42	1519,2

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Sulatuskoe 7 13.2.2006
Pelletti

Aika [min]	Astian pohjalämpötila t1 [ºC]
0	400,4
2	564,2
4	701,2
6	821,3
8	918,0
10	990,9
12	1029,0
14	1092,7
16	1172,5
18	1251,5
20	1313,7
22	1360,2
24	1361,1
26	1402,4
28	1438,2
30	1452,8
32	1484,1
34	1499,9
36	1534,7
38	1569,4
40	1585,2

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kaasutuskoe 1 2.3.2006

Time [Red 1/1]	Labra °C	CO ppm	O2 %	CO2 %	NO ppm
0:39:30	21,4	10,97	6,69	24,7	1 019,72
0:39:40	21,4	11,32	7,61	23,15	1 019,72
0:39:50	21,4	22,95	8,15	21,39	1 019,72
0:40:00	21,4	1 740,54	8,08	19,9	1 019,72
0:40:10	21,4	3 059,16	6,32	19,72	1 019,72
0:40:20	21,2	3 059,16	3,43	19,85	1 019,72
0:40:30	21,3	3 059,16	2,14	19,05	1 019,72
0:40:40	21,3	3 059,16	1,33	18,34	1 019,72
0:40:50	21,3	3 059,16	0,8	17,34	1 019,72
0:41:00	21,4	3 059,16	0,54	15,5	1 019,72
0:41:10	21,4	3 059,16	0,39	13,51	914,79
0:41:20	21,3	3 059,16	0,31	11,85	651,29
0:41:30	21,3	3 059,16	0,25	11,04	485,4
0:41:40	21,4	3 059,16	0,21	10,34	396,04
0:41:50	21,4	3 059,16	0,19	9,36	304,98
0:42:00	21,4	3 059,16	0,18	9,11	255,92
0:42:10	21,4	3 059,16	0,17	9,15	240,81
0:42:20	21,4	3 059,16	0,16	8,95	203,76
0:42:30	21,4	3 059,16	0,16	9,01	175,36
0:42:40	21,3	3 059,16	0,16	9,02	164,97
0:42:50	21,3	3 059,16	0,16	9,52	179,23
0:43:00	21,4	3 059,16	0,28	14,2	550,19
0:43:10	21,4	3 059,16	0,38	19,26	1 012,67
0:43:20	21,5	3 059,16	0,33	21,87	1 019,72
0:43:30	21,5	3 059,16	0,89	22,54	1 019,72

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kaasutuskoe 2 9.3.2006

Time	Labra	CO	O2	CO2	NO
[Red 1/1]	°C	ppm	%	%	ppm
0:50:20	19,6	593,85	5,97	23,37	1 019,72
0:50:25	19,6	660,69	6,17	21,76	1 019,72
0:50:30	19,6	609,31	6,5	19,9	1 019,72
0:50:35	19,6	540,84	6,66	18,17	1 019,72
0:50:40	19,6	736,14	6,75	16,6	1 019,72
0:50:45	19,6	2 163,22	6,55	15,16	1 019,72
0:50:50	19,6	3 059,16	5,97	14,63	1 019,72
0:50:55	19,6	3 059,16	5,4	14,39	1 019,72
0:51:00	19,6	3 059,16	4,26	14,25	1 019,72
0:51:05	19,6	3 059,16	3,09	13,94	1 019,72
0:51:10	19,6	3 059,16	2,48	13,51	1 019,72
0:51:15	19,6	3 059,16	2,08	13,05	944,82
0:51:20	19,7	3 059,16	1,92	12,83	814,73
0:51:25	19,6	3 059,16	1,78	12,69	715,26
0:51:30	19,7	3 059,16	1,61	12,55	653,22
0:51:35	19,7	3 059,16	1,43	12,45	590,33
0:51:40	19,7	3 059,16	1,28	12,5	540,62
0:51:45	19,7	3 059,16	1,11	12,67	489,74
0:51:50	19,7	3 059,16	0,94	12,87	449,98
0:51:55	19,7	3 059,16	0,74	13,13	396,35
0:52:00	19,7	3 059,16	0,61	13,23	349,31
0:52:05	19,7	3 059,16	0,55	13,25	303,89
0:52:10	19,7	3 059,16	0,54	13,25	280,14
0:52:15	19,6	3 059,16	0,52	13,19	264,45
0:52:20	19,7	3 059,16	0,5	12,85	257,31
0:52:25	19,6	3 059,16	0,51	12,06	252,47
0:52:30	19,6	3 059,16	0,56	11,23	247,16
0:52:35	19,6	3 059,16	0,58	10,52	241,78
0:52:40	19,6	3 059,16	0,58	9,95	238,68
0:52:45	19,6	3 059,16	0,59	9,38	239,57
0:52:50	19,6	3 059,16	0,61	8,97	243,37

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kaasutuskoe 3 30.3.2006

Time	CO *	O2	CO2	NO
[Red 1/1]	%	%	%	ppm
0:44:50	0,71	3	12,88	94,53
0:44:55	1,55	5,35	12,35	94,76
0:45:00	1,14	6,7	11,57	95,53
0:45:05	1,78	6,32	10,93	101,31
0:45:10	2,04	5,44	10,75	94,91
0:45:15	3,57	4,7	10,62	84,61
0:45:20	4,53	4,02	10,47	70,38
0:45:25	3,87	3,5	10,31	63,6
0:45:30	4,64	3,01	10,22	57,99
0:45:35	4,8	2,57	10,11	52,64
0:45:40	6,85	2,11	10,04	47,13
0:45:45	7,84	1,85	9,98	43,8
0:45:50	9,08	1,68	9,98	41,4
0:45:55	8,62	1,51	9,98	40
0:46:00	7,89	1,45	9,99	39,42
0:46:05	8,18	1,4	10	39,38
0:46:10	10,59	1,29	10,03	39,93
0:46:15	11,07	1,11	10,09	41,17
0:46:20	12,36	0,94	10,75	42,06
0:46:25	12,24	0,96	12,09	46,82
0:46:30	12,44	0,95	12,8	58,06
0:46:35	13,14	0,87	12,99	66,86
0:46:40	13,49	0,79	12,82	72,09
0:46:45	12,09	0,71	12,55	73,72
0:46:50	11,71	0,68	12,41	72,9
0:46:55	12,26	0,6	12,28	71,28
0:47:00	12,32	0,53	12,11	69,88
0:47:05	10,78	0,5	11,99	68,87
0:47:10	9,98	0,49	11,96	68,49
0:47:15	10,98	0,47	11,97	68,1
0:47:20	10,91	0,45	12,06	68,18
0:47:25	11,76	0,49	12,73	76
0:47:30	11,99	0,93	13,63	91,35

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kaasutuskoe 4 6.4.2006

Time	NOx	CO*	O2	CO2	NO
[Red 1/1]	ppm	%	%	%	ppm
0:32:30	293,68	8,23	4,22	11,81	145,37
0:32:35	284,51	9,77	3,4	11,8	140,1
0:32:40	276,13	10,09	2,7	11,65	137,19
0:32:45	268,13	10,97	2,33	11,48	133,63
0:32:50	261,11	10,9	2,13	11,4	130,41
0:32:55	255,26	11,09	1,8	11,45	129,44
0:33:00	250,77	12,09	1,35	11,44	129,13
0:33:05	247,46	13,22	1,2	11,38	128,74
0:33:10	244,92	13,49	1,24	11,37	125,99
0:33:15	243,17	11,3	1,32	11,41	124,71
0:33:20	241,41	11,1	1,25	11,49	123,32
0:33:25	240,05	11,62	1,15	11,52	121,54
0:33:30	238,29	10,23	1,1	11,53	117,54
0:33:35	236,93	10,38	1,07	11,54	115,22
0:33:40	235,37	10,25	0,98	11,67	114,29
0:33:45	233,81	10,41	0,77	12,16	115,99
0:33:50	232,05	10,4	0,54	12,83	138,24
0:33:55	230,49	10,67	0,42	13,22	170,55
0:34:00	228,93	10,02	0,38	13,63	187,14
0:34:05	227,37	11,53	0,58	14,1	201,28
0:34:10	225,62	11,55	0,83	14,55	211,16
0:34:15	224,06	11,37	1,01	14,85	222,32
0:34:20	222,3	12,47	0,99	14,84	239,06
0:34:25	220,55	12,16	0,93	14,5	252,36
0:34:30	218,79	12,51	0,83	14,08	249,14
0:34:35	217,62	12,91	0,72	13,68	234,88
0:34:40	217,23	13,09	0,68	13,47	222,13
0:34:45	217,62	12,24	0,64	13,38	214,15
0:34:50	219,18	11,78	0,61	13,36	211,55
0:34:55	221,52	12,57	0,56	13,35	209,34
0:35:00	224,84	13,43	0,69	13,61	208,26

(jatkuu)

(Liite 3 jatkoa)

Kaasutuskoe 5 19.4.2006

Time	NOx	O2	CO2	NO
[Red 1/1]	ppm	%	%	ppm
0:25:20	1 875,29	8,57	14,61	1 019,72
0:25:25	1 875,29	8,88	13,54	1 019,72
0:25:30	1 875,29	7,71	13,27	1 019,72
0:25:35	1 875,29	6,22	13,3	1 019,72
0:25:40	1 875,29	5,21	13,34	1 019,72
0:25:45	1 875,29	4,35	13,45	970,66
0:25:50	1 875,29	3,94	13,52	873,32
0:25:55	1 875,29	3,21	13,62	787,61
0:26:00	1 875,29	2,7	13,7	704,68
0:26:05	1 875,29	2,65	13,75	633,69
0:26:10	1 875,20	2,62	13,81	590,18
0:26:15	1 875,20	2,45	13,9	565,96
0:26:20	1 875,20	2,11	13,96	538,8
0:26:25	1 875,20	1,83	14	493,5
0:26:30	1 875,29	2,44	14,1	430,99
0:26:35	1 875,29	3,66	13,76	363,84
0:26:40	1 875,20	3,87	13,23	308,35
0:26:45	1 875,20	3,44	12,55	267,04
0:26:50	1 875,29	2,93	12,29	237,86
0:26:55	1 875,20	2,45	12,07	209,96
0:27:00	1 875,29	2,21	11,91	190,05
0:27:05	1 875,29	2,1	11,84	175,13
0:27:10	1 875,29	1,74	11,85	165,32
0:27:15	1 875,29	1,4	11,84	153,7
0:27:20	1 875,29	1,27	11,85	144,13
0:27:25	1 875,29	0,99	11,82	134,67
0:27:30	1 875,29	0,84	11,78	126,96
0:27:35	1 875,29	0,79	11,77	118,98
0:27:40	1 875,29	0,71	11,77	114,06
0:27:45	1 875,29	0,54	11,77	109,68
0:27:50	1 875,29	0,37	11,76	104,95
0:27:55	1 875,29	0,27	11,78	100,3
0:28:00	1 875,29	0,85	11,96	96,89