

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## **MEESAUNIMALLI**

Lappeenrannassa 8.12.2015  
Ville Tapalinen      0386471

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Ville Tapalinen

### **Kandidaatintyö**

2015

26 sivua, 6 kuvaa ja yksi liite

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

Hakusanat: meesauuni, meesa, lämmönsiirto, sulfaattisellu, kalkkikierto

Keywords: limekiln, heat transfer, pulp mill, lime cycle

Tässä kandidaatintyössä kerrotaan meesauunin rakenteesta ja toiminnasta osana sulfaattisellutehtaan kalkkikiertoa. Lisäksi kirjallisuusosan ohella tehdään meesauunimalli, jonka avulla hahmotetaan lämmönsiirron ja lämpötilojen käyttäytymistä meesauunissa.

Meesauunin tehtävänä sellutehtaan kalkkikierrossa on muuntaa meesan sisältämä kalsiumkarbonaatti poltetuksi kalkiksi eli kalsiumoksidiksi. Kalsiumoksidia tarvitaan kaustisointireaktion aikaansaamiseksi. Kaustisointireaktiossa regeneroidaan sellunkeiton keittokemikaaleja ja samalla syntyy kalsiumkarbonaattia.

Kalsiumkarbonaatin hajottaminen kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi vaatii suuret lämpötilat ja paljon lämpöenergiaa. Tämä toteutetaan uunissa polttimella, joka on asennettuna rumpu-uunin polttopäähän. Meesa kulkee uunissa syöttöpäästä kohti poltinta uunin pyöriessä akselinsa ympäri. Reagoanut poltetu kalkki poistetaan uunista, jäähdytetään, murskataan ja kuljetetaan siiloon varastoon.

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	5
2 MEESAUUNI KALKKIKIERROSSA.....	6
3 MEESAUUNI PROSESSINA .....	8
3.1 Uunin rakenne .....	8
3.2 Syöttöpää .....	9
3.3 Pneumaattinen kuivaus.....	9
3.4 Kuivaus ketjuvyöhykkeellä .....	11
3.5 Meesan eteneminen uunissa .....	11
3.6 Kalkin käsittely.....	13
3.7 Poltin .....	13
4 POLTETUN KALKIN OMINAISUUDET .....	14
4.1 Rakeiden muodostuminen .....	14
4.2 Jäännöskarbonaatti .....	14
5 LÄMMÖNSIIRTO UUNISSA .....	15
5.1 Tyypilliset ajolämpötilat.....	15
5.2 Säteilylämmönsiirto.....	15
5.3 Konvektiolämmönsiirto.....	17
5.4 Johtumislämmönsiirto .....	17
6 UUNIN ENERGIATASEET .....	18
6.1 Energiataseet .....	18
7 MEESAUUNIMALLI .....	19
7.1 Mallin yksinkertaistukset .....	19
7.2 Laskenta.....	20
7.3 Lämpötilaprofiili .....	21
8 YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	25

## LIITTEET

LIITE I Excel-laskenta meesauunin lämpötilaprofiilista

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$\overleftrightarrow{A}_{ij}$	lämmönsiirtopinta-ala komponenttien $i$ ja $j$ välillä	$m^2$
$A$	pinta-ala	$m^2$
$\alpha_g$	painokerroin	
$C_s$	meesan peittämä osuus pinta-alasta	
$c_p$	keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti	J/kg/K
$h$	lämmönsiirtymiskerroin	W/m <sup>2</sup>
$\dot{m}$	massavirta	kg/s
$R$	lämpövastus	K/W
$T$	lämpötila	K, °C
$\gamma_c$	kalsinoituneen meesan suhteellinen osuus	

### Kreikkalaiset

$\varepsilon$	emissiviteetti	
$\sigma$	Stefan – Boltzmannin vakio	W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>
$\phi$	lämmönsiirtoteho	W

### Alaindeksit

bulk	meesapatja
c	kalsinointi
g	kaasu
j	johtuminen
k	konvektio
o	häviö ympäristöön
s	meesa
sät	säteily
w	seinä
ymp	ympäristö

**Lyhenteet**

s kiinteä

l neste

aq liuos

# 1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö koostuu kirjallisuusosasta ja laskentaosasta. Kirjallisuusosassa annetaan yleisellä tasolla kuva meesauunin toiminnasta osana sulfaattisellun valmistusta. Meesaksi kutsutaan kalkkipitoista ainesta, joka syntyy viherlipeän kaustisoinnissa valkolipeäksi. Sen kuiva-aine koostuu lähinnä kalsiumkarbonaatista. Meesauunin tehtävänä on regeneroida meesan sisältämä kalkki takaisin käytettävään muotoon eli poltetuksi kalkiksi.

Meesauunista käsitellään yleisiä periaatteita, rakenneratkaisuja, toimilaitteita, meesan ominaisuuksia ja kiertävälle kalkille tapahtuvia reaktioita. Työn tarkoituksena on antaa hyvä yleiskuva meesauunin toiminnasta ja edellä mainitut asiat käsitellään tähän soveltuvalla tarkkuudella.

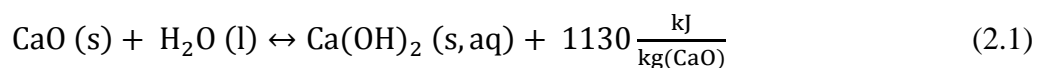
Työhön kuuluu laskentaosa, jossa luodaan yksinkertainen malli meesauunin lämpötilaprofiilille. Lämpötilaprofiili luodaan Excel-laskentaohjelmalla. Profiili lasketaan olettamalla lämmönsiirto uunissa kaksiulotteiseksi, uuni stationääriseksi, palaminen täydelliseksi ja emissiviteetit osittain vakioiksi. Laskennan kehittämällä voidaan päästä entistä energiatehokkaampiin ratkaisuihin. Meesauunien energiatehokkuuteen on kasvavien polttoainekustannusten takia kiinnitetty huomiota ja esimerkiksi vaihtoehtoisia polttoaineita on tutkittu paljon. (Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009. s.11.23)

Meesan kuivaukseen käytetty pneumaattinen menetelmä on yleistynyt ja nykyään vain vanhimmissa uuneissa sitä ei ole. Sen avulla uunien tehokkuutta on parannettu ja uunien pituuksia on voitu lyhentää. (Hart P. et al. 2012. 9) Laskentamallin uunissa on pneumaattinen kuivaus, jolloin meesa syötetään uuniin käytännössä täysin kuivana. Palamisreaktiot pidetään mahdollisimman yksinkertaisina, jotta työn laajuus ei kasva liikaa. Samasta syystä laskentamallissa polttoaineena on pelkkä maakaasu. Todellisuudessa palamisreaktiot ovat hyvin monimutkaisia eikä niitä pystytä täydellisesti mallintamaan. Työn tarkoituksena on kuitenkin vain havainnollistaa meesauunin eri osien lämpötilojen käyttäytymistä, jolloin yksinkertaisin palamismalli riittää.

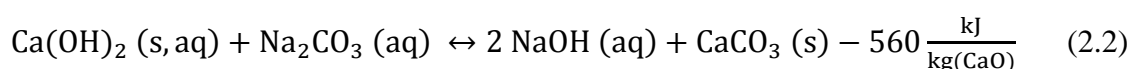
## 2 MEESAUUNI KALKKIKIERROSSA

Meesauunilla tarkoitetaan selluteollisuuden uunia, jolla meesasta valmistetaan poltettua kalkkia. Se kuuluu sellutehtaan kalkkikiertoon, jonka avulla tehdään sellunkeittoon tarvittavaa valkolipeää. Meesa koostuu suurimmaksi osaksi kalsiumkarbonaatista. Suurissa lämpötiloissa se hajoaa poltetuksi kalkiksi eli kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Kalsiumoksidia tarvitaan kaustisointireaktiossa, jossa soodakattilalta tuleva viherlipeä reagoi valkolipeäksi. Käytännössä kaustisointireaktiolla pyritään muuttamaan viherlipeän natriumkarbonaatti  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  keitossa käytettäväksi natriumhydroksidiksi  $\text{NaOH}$ . Kaustisointireaktiossa syntyy valkolipeän lisäksi kalsiumkarbonaattia. Valkolipeä pumpataan keittämöön ja kalsiumkarbonaatti eli meesa jatkaa suodatusten jälkeen takaisin meesauunille. (Arpalahti, O., et al. 2000, 144)

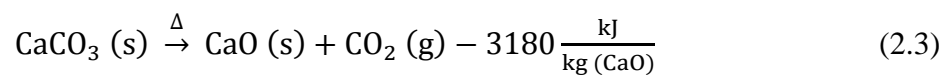
Poltettu kalkki lisätään viherlipeän joukkoon sammuttajilla, jolloin kalsiumoksidi reagoi sammutetuksi kalkiksi. Yhtälö 2.1 kuvaa poltetun kalkin reagointia sammutetuksi kalkiksi. Reaktio on eksoterminen, jolloin lipeän lämpötila nousee reaktion seurauksena. (KnowPulp, 2009)



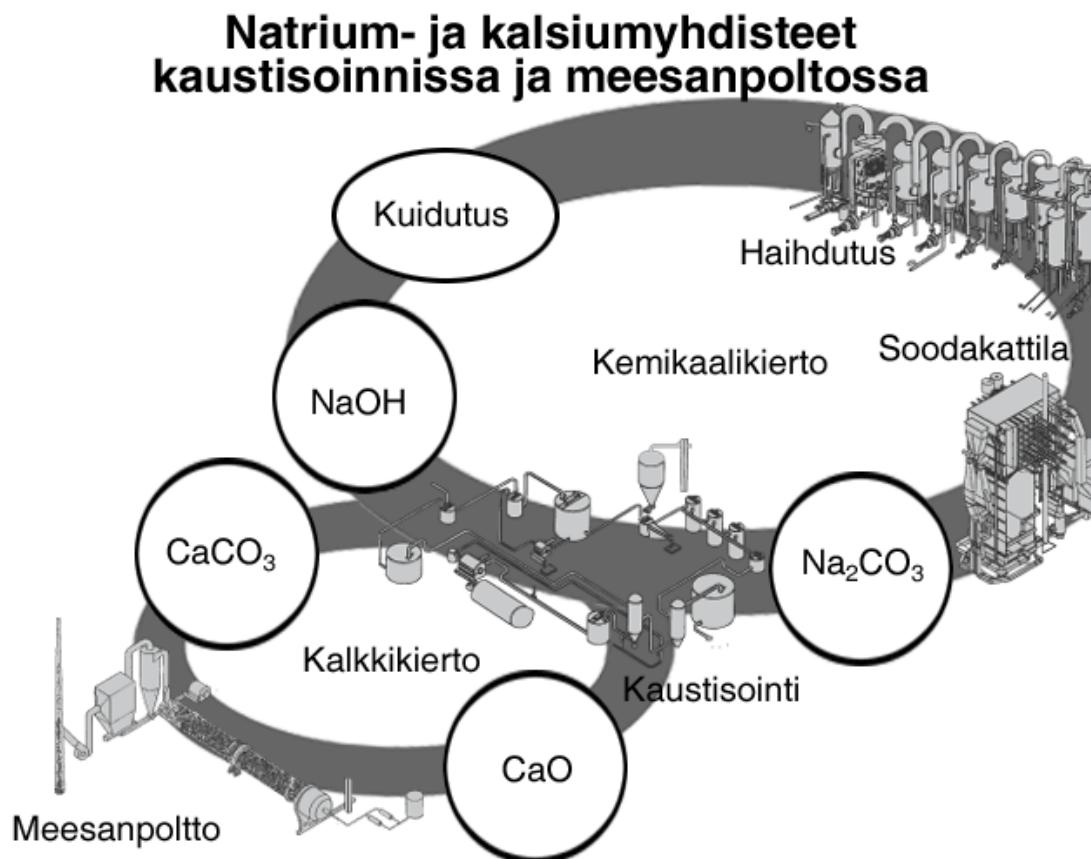
Viherlipeän ja sammutetun kalkin sisältävä liuos jatkaa kaustisointisäiliöille, jossa ne sekoittuvat. Seos viipyy säiliöissä kunnes kaustisointireaktio on tapahtunut riittävällä tehokkuudella. Reaktio on jo suurelta osin tapahtunut sammuttajissa, mutta silti viipymä kaustisointisäiliöissä voi olla 2-3 tuntia. Viipymällä pystytään varmistamaan kaustisoinnin tehokkuus, ja suojaamaan suodattimia sammutetulta kalkilta. Reagoimatta jäänyt sammutettu kalkki voi kiteytyä suodattimien pintaan. Kaustisointireaktio on endoterminen, mutta kalkin sammutusreaktiossa vapautuu enemmän lämpöä kuin kaustisointireaktiossa sitoutuu. Kaustisointireaktio voidaan yksinkertaistaa yhtälön 2.2 mukaiseksi. (Arpalahti, O., et al. 2000, 129), (KnowPulp, 2009)



Kaustisointisäiliöiltä syntynyt kalkkimaito pumpataan valkolipeäsuotimelle. Suotimen avulla kalkkimaidosta erotetaan valkolipeä, joka pumpataan keittämölle. Suodatuksessa kalkkimaidosta eroaa kalsiumkarbonaattisakka eli meesa. Suodatettu meesa liuotetaan veteen ja pumpataan meesasuoitimelle. Suodatetun meesan kuiva-ainepitoisuus nousee suodatuksen yhteydessä, jolloin vähemmän energiaa tarvitaan veden haihduttamiseen meesauunissa. Erotettu lipeä pumpataan laihavalkolipeäsäiliöön. Suodattimelta meesa siirretään meesauunille, jossa se reagoi jälleen poltetuksi kalkiksi. Kalsinointireaktio on esitetty yhtälössä 2.3. (Arpalahti, O., et al. 2000, 129), (KnowPulp, 2009)



Kuvassa 2.1 on esitetty tiivistetysti sulfaattisellun valmistusprosessin kemikaalien kierto tehtaan sisällä.



**Kuva 2.1:** Sulfaattisellun valmistuksen kemikaalikierrat (KnowPulp, 2009)

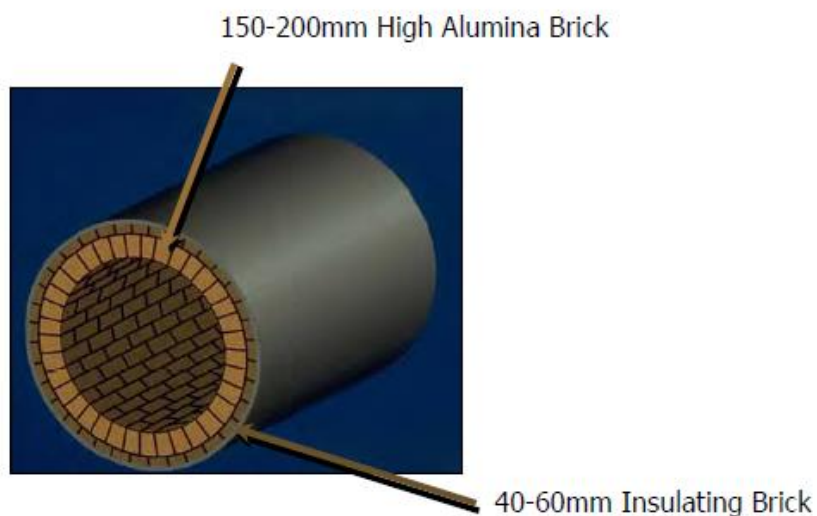


### 3 MEESAUUNI PROSESSINA

Meesauunin tehtävänä on nostaa meesan lämpötila tarpeeksi korkeaksi, jotta kalsinointireaktio alkaa ja syntyy poltettua kalkkia. Reaktio tarvitsee paljon lämpöä, joka saadaan polttimesta uunin polttopäässä.

#### 3.1 Uunin rakenne

Meesauuni on rakenteeltaan pitkä ja hieman kaltevassa asennossa oleva teräksinen rumpu, jonka sisusta on vuorattu tiilillä. Meesauunin päätä, josta meesa syötetään uuniin sisään, sanotaan syöttöpääksi. Meesa kulkee rummussa kohti sen toista päätä, jossa on uunin poltin. Meesa siis kulkee savukaasuja vastavirtaan polttopäätä kohti. Rumpua pyöritetään noin 0,5-1,5 rpm kierrosluvulla, jolloin meesa saadaan hitaasti liikkumaan laskun suuntaan kohti polttopäätä. (Arpalahti, O., et al. 2000, 163) Kuvassa 3.1 on esitetty rummun poikkileikkausta.



**Kuva 3.1:** Rumpu-uunin poikkileikkaus (Gorog J. 2002, 5)

Uuni on tuettu useasta kohtaa kannatuselimillä, joiden määrä riippuu uunin pituudesta. Tuentakohdassa rummussa on teräsrenkaat, tukemassa rumpuosaa. Tavallisesti rummut on tuettu 2 – 4 kohdasta. Rummun pituus vaihtelee nimellisen tuotannon ja rakennevaihtoehtojen mukaan noin 50 m jopa 150 m ja halkaisija kahdesta neljään metriin. (Järvensivu M. 2003, 23) Eri valmistajat käyttävät eri halkaisija-pituus-suhteita. (Arpalahti, O., et al. 2000, 2000), (Adams T. 2008, 2.2-1)

## 3.2 Syöttöpää

Meesauuniin syötetty meesan määrä ja kuiva-ainepitoisuus pyritään pitämään mahdollisimman tasaisena, jotta poltetun kalkin laatuun ei tulisi vaihtelua. Meesa varastoidaan säiliöihin, jotta sitä saadaan syötettyä tasaisesti uuniin. Ilman varastoa hetkellinen ongelma esimerkiksi valkolipeäsuotimilla voisi vähentää rajusti meesan saantia syöttöpäähän.

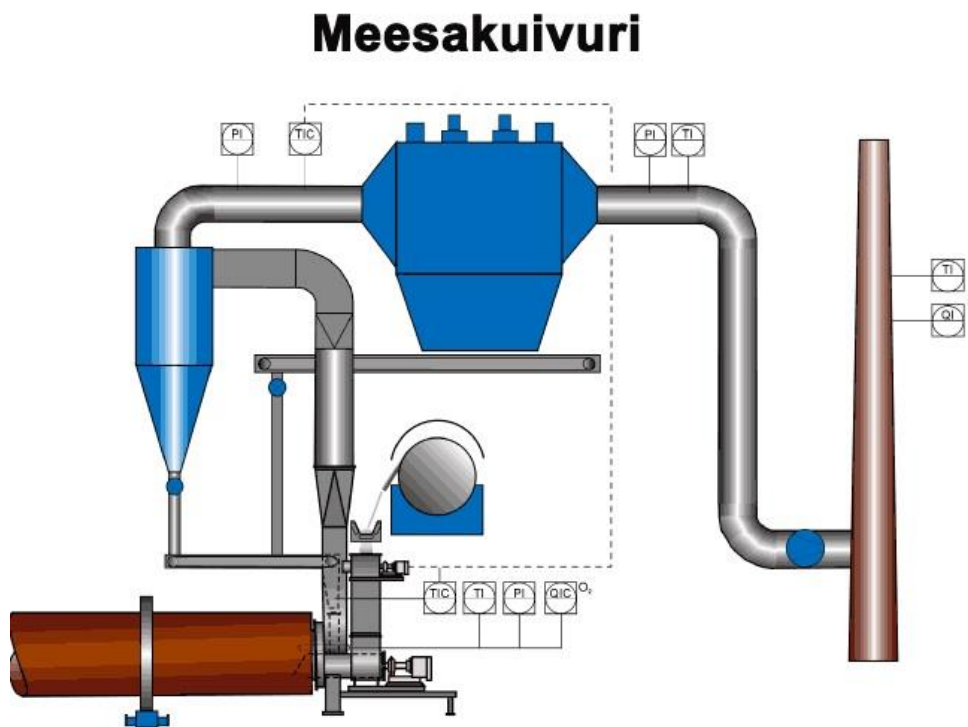
Meesan varastosäiliössä meesa pidetään kokoajan liikkeessä, jotta se ei sakkaudu säiliöön ja jähmety. Varastosäiliöltä meesa pumpataan meesasuotimelle. Nykyaikaista tekniikka edustavat kiekkosuodimet. Toinen yleinen meesan suodatus tapa on CPR-suodin eli rumpusuodin. Suodin erottaa meesasta epäpuhtauksia ja nostaa sen kuiva-ainepitoisuutta. Kuten edellä myös todettiin, on tärkeää tuotannon kannalta, että meesan massavirta ja kuiva-ainepitoisuus uuniin mennessä ovat mahdollisimman tasaisia. (KnowPulp, 2009)

Suotimelta meesa kuljetetaan uunin syöttöpäähän yleensä hihnakuljettimella tai ruuvilla. Hihnakuljetin on nykyään yleisempi, koska sitä pystytään käyttämään kuiva-ainepitoisuuden vaihdellessa. Meesan syötössä uuniin käytetään yleensä siirtoruuvia. Kuljetin hihnalta meesa pudotetaan pudotussuppiloon, jossa syöttöruuvi on. (KnowPulp, 2009)

## 3.3 Pneumaattinen kuivaus

Pneumaattisella kuivauksella tarkoitetaan savukaasujen hyödyntämistä erillisessä meesakuivurissa. Tällöin meesa syötetään ruuvilla kuivausputkeen, jossa kulkevat uunilta tulevat savukaasut. Savukaasujen lämpötila on noin 500 °C riippuen uunista ja ajomallista. Kuivausputkessa savukaasut nostavat meesarakeita mukaansa ja kuivuvat tehokkaasti. Kuivausputki liittyy syklonille, jonka tarkoituksena on erottaa meesarakeet savukaasuista ja pudottaa ne syklonirakenteen pohjalle. Sen jälkeen meesa syötetään sulkusyöttimen ja kuljettimen avulla syöttöputkeen, josta se päättyy uuniin. Savukaasuilla kuivattu meesa voidaan saada lähes 100 % kuiva-ainepitoisuuteen, jolloin kuivumista ei tapahdu itse uunissa. Savukaasuja hyödyntävät erilliset kuivaimet ovat yleistyneet meesauuneissa. Niiden avulla uuneja on voitu lyhentää, koska kuivumisen ei tarvitse tapahtua uunissa. (KnowPulp, 2009)

Osa meesasta ei nouse kuivuriputkessa savukaasujen mukana suuren raekoon takia. Tämä osa meesasta annetaan tippua kuivuriputkea pitkin suoraan uuniin, tarvittaessa uuniin syöttöä voidaan avustaa ruuvilla. Kuiva-ainepitoisuus laskee tämän meesan osalta myös jonkin verran savukaasujen vaikutuksesta. Uunissa voi olla yhdet tai kahdet syöttösiivet, joiden avustamana meesa lähtee etenemään kohti polttopäätä. Kuvassa 3.2 on esitetty kokonaisuudessaan uunin syöttöpää, savukaasukuivaimen kanssa. (KnowPulp, 2009)



**Kuva 3.2:** Uunin syöttöpää pneumaattisella kuivauksella (KnowPulp, 2009)

Savukaasujen kanavassa on lämpötilan säätöpelti, jonka avulla sähkösuotimelle menevien savukaasujen lämpötilaa voidaan säätää. Pellillä vaikutetaan siihen, kuinka suuri osa savukaasuista ohjataan meesavirtaan. Osa savukaasuvirtauksesta voidaan siis ohjata suoraan sähkösuotimelle. Lämpötilan ollessa korkea, lisätään säätöpellin avulla savukaasujen virtausta meesavirtaukseen, jolloin lämpötila laskee. Lämpötilan ollessa matala tehdään päinvastoin. Lisäksi savukaasukanavistossa on yleensä hätäsuihkut, joiden avulla savukaasut saadaan viilennettyä. Hätäsuihkuja tarvitaan sähkösuotimen suojaamiseksi korkeilta lämpötiloilta. Esim. meesan syötön katkeaminen voi nostaa savukaasujen lämpötilaa niin korkeaksi, ettei sähkösuodin sitä kestä. (KnowPulp, 2009)

### 3.4 Kuivaus ketjuvyöhykkeellä

Vanhemmissa uuneissa meesan kuivatus tapahtuu itse uunissa, jolloin uunirumpuun on yleensä lisätty lämmönsiirtoa tehostavia rakenteita. Itse uunin täytyy yleensä olla pitempi kuin käytettäessä pneumaattista kuivausta, koska meesassa on uuniin tullessaan enemmän haihdutettavaa vettä. Lämmönsiirtoa voidaan tehostaa lisäämällä uunin lämmönsiirtopinta-alaa. Yleensä tämä on tehty niin sanotulla ketjuvyöhykkeellä, jossa rummun sisäpinnalle on asetettu ketjuja roikkumaan ja tehostamaan lämmönsiirtoa. Ketjut absorboivat savukaasujen lämpöä tehokkaammin ja siirtävät sitä meesaan. (Adams T. 2008, 2.2-1 & 2.2-2) Ketjuvyöhykkeen tarkoituksena on ennen kaikkea kuivattaa meesa, joten sen pituus suunnitellaan yleensä siten, että meesan kuiva-ainepitoisuus on vyöhykkeen jälkeen 100 %. ”Yleensä vyöhykkeen pituus on noin 20 % uunin kokonaispituudesta.” (Arpalahti, O., et al. 2000, 164) Vyöhykkeen pituuteen vaikuttavat kuitenkin monet tekijät: meesan kuiva-ainepitoisuus ennen vyöhykettä, meesan raekoko ja savukaasujen lämmönsiirto-ominaisuudet.

### 3.5 Meesan eteneminen uunissa

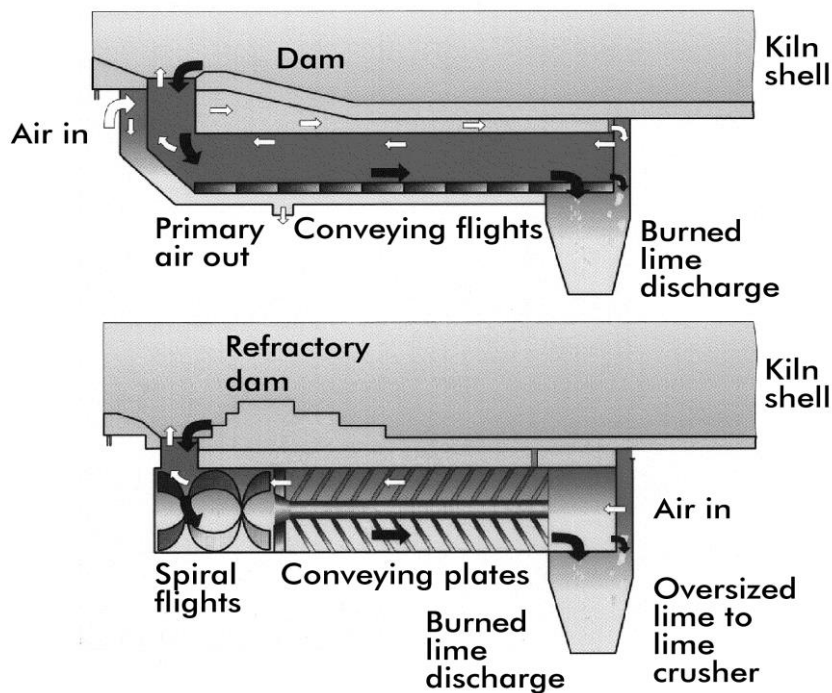
Meesauuni voidaan jakaa eri vyöhykkeisiin meesan eri tilojen perusteella. Yleisesti vyöhykkeitä on neljä: kuivaus-, lämmitys-, reaktio- ja jäähdytysvyöhykkeet. Kuivausvyöhykkeessä meesasta haihtuu sen sisältämä vesi, kuten edellä on selitetty. Kuivausvyöhykettä ei käytännössä ole, jos käytetään erillistä savukaasukuivuria. (KnowPulp, 2009)

Lämmitysvaiheessa meesan lämpötila nousee kohti reaktiolämpötilaa. Lämpötilan nousua voidaan tehostaa esimerkiksi nostimilla ja sekoittajilla, joiden avulla meesaa saadaan sekoitettua tehokkaammin rummussa. Lämmitysvyöhyke alkaa meesan ollessa täysin kuivaa ja loppuu kalsinointireaktion alkaessa. Uunin olosuhteissa kalsinointireaktio alkaa noin 800 °C. (Arpalahti, O., et al. 2000, 131)

Kalsinointivyöhykkeessä kalsiumkarbonaatti alkaa hajota poltetuksi kalkiksi ja hiilidioksidiksi. Hiilidioksidi poistuu uunista savukaasujen mukana ja poltettu kalkki jatkaa kohti uunin polttopäätä, jossa se jäähdytetään ja poistetaan uunista. Lämpötila polttovyöhykkeessä ennen kalkin jäähdytystä on noin 1100 °C. Kalsinointireaktio vaatii

paljon lämpöenergiaa, noin 3180 kJ jokaista tuotettua kalsiumoksidi kiloa kohden. Uunissa voi olla lämmönsiirron tehostamiseksi ja sopivan viipymisajan saamiseksi supistusosa, jossa rummun halkaisijaa pienennetään. Tätä kutsutaan yleensä kynnykseksi ja se sijoitetaan uunin loppuosaan juuri ennen jäähdyttimen purkuaukkoja. (Arpalahti, O., et al. 2000, 131)

Jäähdytysvaiheessa reagoanut poltetu kalkki jäähdytetään sekundääri-ilmalla. Jäähdytin on kiinnitetty uunin runkoon ja pyörii uunin mukana. Uunin kehällä on pudotusaukkoja, joihin kalkki tippuu ja joista sekundääri-ilmata tulee uuniin. Lämmönsiirto tapahtuu siis vastavirtaperiaatteella. Sekundääri-ilmata kiertää jäähdytysvaipan sisällä ennen liittymistä kanavaan johon kalkki on tippunut. Jäähdytin on lämmönsiirrin, jonka tarkoituksena on jäähdyttää kalkki ja ottaa lämpöä talteen palamisilmaan. Yleisimmät jäähdytintyyppit ovat satelliitti- ja sektorijäähdytin. Kuvassa 3.3 on esitetty jäähdyttimien rakennetta. (Arpalahti, O., et al. 2000, 166)



**Kuva 3.3:** Rakennekuva sektori- ja satelliittijäähdyttimistä (Arpalahti, O., et al. 2000, 166)

### 3.6 Kalkin käsittely

Jäähdyttimestä tippuva kalkki ei ole raekoon puolesta tasalaatuista, joten ne erotellaan jakopeltien avulla. Hienompi aines tippuu jakopelliltä suoraan kalkin kuljettimelle, joka vie sen lopulta kalkkisiiloon. Karkeampi aines pitää ensin murskata erillisellä kalkin murskaimella. Murskauksen jälkeen tämäkin osuus kalkista siirretään kalkkikuljettimelle ja siiloon varastointiin.

### 3.7 Poltin

Polttimen huuva sulkee meesauunin polttopään ja siihen on kiinnitetty poltin tai polttimet. Perinteisesti polttoon on käytetty öljyä tai maakaasua, mutta myös lukuisia vaihtoehtoisia polttoaineita löytyy. Meesauunissa voidaan polttaa mm. prosessien hajukaasuja, mäntyöljyä, kaasutettua biomassaa, ligniiniä, metanolia tai petrokoksia. Yleensä käytetyt vaihtoehtoiset polttoaineet ovat selluteollisuuden sivutuotteita. (Svedin K., Ivarsson C. & Lundborg R., 2009, 11.24) Polton tarkoituksena on siirtää mahdollisimman hyvin lämpöä uunissa liikkuvaan kalkkiin, joten polttimen liekin tulisi olla pitkä. Liian lyhyt liekki heikentää säteilylämmönsiirtoa meesapatjaan. (Toropainen 2003, 21)

Varsinaisen polttimen lisäksi tarvitaan sytytyspoltin, jolla varsinainen poltin saadaan syttymään. Suurin osa palamisilmasta syötetään sekundääri-ilmana jäähdyttimen kautta. Primääri-ilman tarkoituksena on, syttymisen ja palamisen ylläpidon lisäksi, pitää liekki vakaana ja jäähdyttää poltinta. Primääri-ilman osuus palamisilmasta on noin 10 % - 20 %. (Arpalahti, O., et al. 2000, 168) Poltettaessa muuta kuin kaasua tarvitaan yleensä jokin hajottava virtaus polttoaineen sekaan, jotta polttoaine pirstoutuu pienemmiksi pisaroiksi tai hiukkasiksi. Esimerkiksi höyryä ja paineilmaa käytetään väliainehajoitteisissa polttimissa. (Vakkilainen E. 2015, 25)

## **4 POLTETUN KALKIN OMINAISUUDET**

Poltetun kalkin tulee ominaisuuksiltaan olla hyvin nopeasti sammuvaa. Tähän vaikuttavat uunin monet tekijät. Kuiva-aineeseen jääneen kalsiumkarbonaatin osuus tulisi olla noin 2 – 3 %, jotta kalkki olisi mahdollisimman hyvin reagoivaa.

### **4.1 Rakeiden muodostuminen**

Meesa on kuivattuaan uunissa pölymäistä tai puuterimaista. Edetessään uunissa raekoko kuitenkin kasvaa. Meesa sisältää aina jonkin verran natrium-yhdisteitä, jotka ovat peräisin valkolipeästä. Natrium-yhdisteet reagoivat uunissa ja siitä muodostuneet yhdisteet sulavat noin 800 °C. Nämä yhdisteet sulavat todella pienten hiukkasten pinnalle ja törmätessään toiseen hiukkaseen tarttuvat yhteen. Näin uunin pyöriessä pienistä hiukkasista kasvaa rakeita, joiden keskihalkaisija tulisi olla noin 5 – 50 mm. (Gorog J. 2002, 7), (Honghi T. 2007, 2.3-3)

### **4.2 Jäännöskarbonaatti**

Jäännöskarbonaatin mittaamista käytetään uunin säädön apuna. Sopiva jäännöskarbonaatin arvo kertoo uunin toimivan tehokkaasti ja lämpötaloudellisesti. Suurempi jäännöskarbonaatti kertoo tehottamasta kalsinoinnista. Alhaisempi jäännöskarbonaatti taas tarkoittaa todennäköisesti, että polttoainetta käytetään ylimäärin, kalkki on kovaa ja sammuu hitaammin. Raekoolla on suuri vaikutus jäännöskarbonaatin osuuteen. Liian suuret kalkkirakeet aiheuttavat turhaa vastusta lämmönjohtumiselle kohti rakeen ydintä. Tällöin rae saattaa kalsinoitua vain pinnan tuntumasta ja keskusta jäädä reagoimatta. Liian pienet kalkkirakeet taas tempautuvat herkästi savukaasujen mukaan ja pölyävät. (Honghi T. 2007, 2.3-4)

## **5 LÄMMÖNSIIRTO UUNISSA**

Lämmönsiirto uunissa ei ole kovin tehokasta, minkä takia tarvitaan suuret lämpötilaerot, jotta lämpöä saadaan siirrettyä tarvittavalla teholla. Korkeista lämpötiloista johtuen hallitseva lämmönsiirtomuoto on säteily. Lämpöä siirtyy meesaan myös konvektiolla savukaasuista ja johtumalla uunin seinistä.

### **5.1 Tyypilliset ajolämpötilat**

Lämmöntuotanto tapahtuu polttopään polttimella. Ilmakerroin pidetään mahdollisimman pienenä, jotta ylimääräistä ilmaa ei tarvitsisi lämmittää. Savukaasujen lämpötila on korkeimmillaan jopa 1700 °C. Kulkeutuessaan kohti syöttöpäätä savukaasut luovuttavat lämpöään meesalle ja uunin seinille. Yleensä savukaasujen poistumislämpötila on noin 400–600 °C, kun uunissa on erillinen pneumaattinen kuivaus. Ilman erillistä kuivausta lämpötilan annetaan laskea noin 200 °C:een. (Arpalahti, O., et al. 2000, 163)

Meesan lämpötila syöttöpäässä pneumaattisen kuivauksen kanssa on n. 200 °C ja perinteisessä uunissa n. 60 °C lämpötilassa. Meesapatjan lämpötila nousee n. 800 °C ja pysyy suunnilleen vakiona koko kalsinoinnin ajan. Ennen jäähdytystä kalkin lämpötila kohoaa noin 1100 °C. (Arpalahti, O., et al. 2000, 163)

### **5.2 Säteilylämmönsiirto**

Säteilylämmönsiirtoa tapahtuu uunissa savukaasu-meesa, savukaasu-sisäseinä, sisäseinä-meesa ja ulkoseinä-ympäristö pintojen välillä. Lämmönsiirto näiden pintojen välillä lasketaan nettotehona, koska molemmat pinnat samaan aikaan vastaanottavat ja lähettävät lämpösäteilyä. Laskennan helpottamiseksi pinnat yleensä oletetaan harmaiksi pinnoiksi, jolloin niiden emissiviteetti ei riipu lähetetyn säteilyn aallonpituudesta tai pinnan lämpötilasta. (Incropera F. et al. 2003, 812-814)

Kaasujen säteily riippuu lämpötilasta ja kaasun koostumuksesta. Kokonaisemissiviteettiä voidaan arvioida korrelaatioiden avulla. Korrelaatioissa oletetaan yleensä ainoiksi säteileviksi kaasuiksi hiilidioksidi ja vesihöyry, koska muiden ilman tai savukaasujen komponentit ovat merkitykseltään vähäisempiä. (Hottel H. 1967, 226 & 228–232)



Kokonaislämmönsiirtopinta-aloille on esitetty yhtälöt 5.1 – 5.3. Niissä on otettu huomioon pintojen emissiviteetit ja pinta-alat. Yhtälöt on muokattu Hottelin *Radiative Transfer* teoksesta T. Toropaisen diplomityössä. (Toropainen T. 2003, 56), (Hottel H. 1967, 319 )

$$\overleftarrow{A}_{gs} = \frac{C_s \cdot A_T \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_{g,e}}{\frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g} + [C_s \cdot \varepsilon_s + (1 - C_s) \cdot \varepsilon_w] \cdot (1 - \frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g})} \quad (5.1)$$

$\overleftarrow{A}_{ij}$  kokonaislämmönsiirtopinta-ala komponenttien i ja j välillä

$C_s$  meesan peittämä osuus pinta-alasta

$A_T$  kokonaislämmönsiirtopinta-ala

$\varepsilon$  emissiviteetti

$a_g$  painokerroin

$$\overleftarrow{A}_{gw} = \frac{(1 - C_s) \cdot A_T \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{g,e}}{\frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g} + [C_s \cdot \varepsilon_s + (1 - C_s) \cdot \varepsilon_w] \cdot (1 - \frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g})} \quad (5.2)$$

$$\overleftarrow{A}_{ws} = \frac{a_g \cdot C_s \cdot (1 - C_s) \cdot A_T \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_s \cdot (1 - \frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g})}{\frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g} + [C_s \cdot \varepsilon_s + (1 - C_s) \cdot \varepsilon_w] \cdot (1 - \frac{\varepsilon_{g,e}}{a_g})} + \frac{A_T \cdot (1 - a_g) \cdot C_s \cdot (1 - C_s) \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_s}{C_s \cdot \varepsilon_s + (1 - C_s) \cdot \varepsilon_w} \quad (5.3)$$

Nettosäteilylämmönsiirrot lasketaan yhtälön 5.4 avulla.

$$\phi_{ij,sät} = \overleftarrow{A}_{ij} \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4) \quad (5.4)$$

$\phi_{ij,sät}$  säteilylämmönsiirto komponenttien i ja j välillä

$\sigma$  Stefan – Boltzmannin vakio

$T$  lämpötila

Uunin ulkoseinän ja ympäristön välinen säteilylämmönsiirto on matemaattisesti yksinkertaisempi laskea. Tämä häviöteho on esitetty yhtälössä 5.5. (Toropainen T. 2003, 57)

$$\phi_{o,sät} = \varepsilon_{wo} \cdot A_{wo} \cdot \sigma \cdot (T_{wo}^4 - T_{ymp}^4) \quad (5.5)$$

### 5.3 Konvektiolämmönsiirto

Toinen merkittävä lämmönsiirtomuoto uunissa on konvektio. Konvektiolla lämpö siirtyy välillä kaasu-meesa, kaasu-sisäseinä ja ulkoilma-ulkoseinä. Konvektiolämmönsiirron perusmuoto on esitetty yhtälössä 5.6. Lämmönsiirtokertoimen määrittystapa riippuu siitä minkä komponenttien välillä lämpö siirtyy. Lämmönsiirtymiskertoimien määrittämisessä käytetään apuna kokeellisesti havaittuja korrelaatioita. (Toropainen T. 2003, 58)

$$\phi_{ij,k} = h_{ij} \cdot A_{ij} \cdot (T_i - T_j) \quad (5.6)$$

$h$  lämmönsiirtymiskerroin

### 5.4 Johtumislämmönsiirto

Uunissa lämpöä johtuu sisäseinästä meesaan ja sisäseinästä ulkoseinään. Johtuminen meesaan on ideaalista johtumistapausta hankalampi määrittää, koska uuni pyörii sekoittaen sisällään olevaa meesaa. Siksi sille on määritetty kokeellinen lämmönsiirtokorrelaatio konvektiolämmönsiirron tapaan. Seinän johtuminen meesaan siis noudattaa yhtälöä 5.6. (Toropainen T. 2003, 64)

Sisäseinästä johtuminen ulkoseinään on klassinen lämmönsiirron johtumistapa, joten se voidaan esittää lämpövastuksen avulla yhtälön 5.7 lailla. (Toropainen T. 2003, 65)

$$\phi_{w,j} = \frac{(T_i - T_j)}{R_{\text{tot}}} \quad (5.7)$$

$R$  lämpövastus

## 6 UUNIN ENERGIATASEET

Aineen ja energian häviämättömyyden lain mukaan luodaan uunille energiataseet. Jokaiselle komponentille määritetään energiatase jokaisessa uunin palassa, jolloin voidaan ratkaista kunkin komponentin lämpötilat. Uunia mallinnettaessa jaetaan uuni halutun pituisiksi paloiksi pituussuunnassa.

### 6.1 Energiataseet

Savukaasut virtaavat tasetilavuuden läpi luovuttaen lämpöenergiaansa meesaan ja sisäseinille. Määritettäessä energiatasetta johonkin muuhun kuin liekin alueelle, tasetilavuudessa ei ole lämpöenergiaa synnyttäviä kemiallisia reaktioita. Muodostetaan energiataseen yhtälö 6.1 savukaasuille, muualla kuin liekin alueella. Energiataseessa on huomioitu kalsinointivyöhykkeessä kalsinointireaktiossa irtoava hiilidioksidi.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{sk} \cdot \bar{c}_{p,sk} \cdot (T_{sk,2} - T_{sk,1}) + \dot{m}_{CO_2} \cdot \bar{c}_{p,CO_2} \cdot (T_{CO_2,2} - T_{CO_2,1}) = \\ \phi_{gs,sät} + \phi_{gw,sät} + \phi_{gs,k} + \phi_{gw,k} \end{aligned} \quad (6.1)$$

$\dot{m}$  massavirta

$\bar{c}_p$  keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti

Sisäseinän pinnalle energiatase muodostetaan yhtälön 6.2 mukaisesti.

$$0 = \phi_{gw,sät} + \phi_{gw,k} - \phi_{ws,sät} - \phi_{ws,j} - \phi_{w,j} \quad (6.2)$$

Meesalle energiataseessa huomioidaan kalsinointireaktiossa irtoavan hiilidioksidin lisäksi kalsinointireaktion viemä lämpöenergia.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CaCO_3} \cdot \bar{c}_{p,CaCO_3} \cdot (T_{CaCO_3,2} - T_{CaCO_3,1}) + \\ \dot{m}_{CaO} \cdot \bar{c}_{p,CaO} \cdot (T_{CaO,2} - T_{CaO,1}) = \\ \phi_{gs,sät} + \phi_{ws,sät} + \phi_{gs,k} + \phi_{ws,j} - \phi_c \end{aligned} \quad (6.3)$$

$\phi_c$  kalsinointireaktion viemä lämpöteho

## 7 MEESAUUNIMALLI

Kandidaatintyön osana luotiin yksinkertainen meesauunimalli, jolla kuvataan meesauunin lämpötiloja. Käytännössä malli luotiin jakamalla uuni pituussuunnassa yhtä pitkiin laskentaosiin ja laskemalla jokaiselle osalle energiataseista lämpötilat. Laskenta suoritettiin Excel-ohjelmistolla ja on työn liitteenä I.

### 7.1 Mallin yksinkertaistukset

Työn tarkoituksena on lähinnä havainnollistaa lämpötilojen käyttäytymistä uunissa meesan ja savukaasujen osalta. Tästä syystä mallia on yksinkertaistettu hyvin paljon laskennan helpottamiseksi. Luettelen tässä kappaleessa tärkeimmät yksinkertaistukset ja oletukset.

Mallin meesauunissa polttoaineena toimii vain maakaasu, jonka mukaan palamistaulukot on laskettu. Lämmönsiirron kannalta liekin mallintaminen on kuitenkin haastavaa, joten maakaasun tuoman lämpötehon oletetaan syntyvän tasaisesti siinä kohdassa, jossa meesa tippuu jäähdyttäjään. Todellisuudessa liekki on pitkä, alkaa polttimeen päästä ja ylettyy meesapatjan ylle.

Meesapatjassa on suuret lämpötilaerot, koska meesa ja poltettu kalkki ovat huonoja lämmönjohtajia. Tämän takia patjan pinnalla oleva lämpötila on huomattavan paljon suurempi kuin patjan keskilämpötila. Uunin pyörimisen aiheuttava sekoitus tehostaa lämmönsiirtoa, mutta sekoituksen mallintaminen on hyvin haastavaa. Tässä mallissa on oletettu savukaasujen ja meesapatjan pinnan lämpötilaeroksi vakioarvo 90 astetta. Todellisuudessa lämpötilaero ei ole vakio, mutta on lähellä sitä luokkaa. (Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009. s.11.18) Vakiolämpötilaerolla laskettu lämmönsiirto oletetaan kokonaisuudessaan siirtyvän meesaan.

Uunin seinälle ei lasketa erikseen energiatasetta, jotta välttyttäisiin kolmelta komponentilta. Seinän pintalämpötilan oletetaan olevan keskiarvo savukaasujen lämpötilasta ja meesapatjan pintalämpötilasta. Meesapatjan lämpötilaero savukaasujen kanssa oli asetettu vakioksi, joten seinän pinnan ja savukaasujen lämpötilaero on myös vakio. Lämmönsiirto savukaasujen ja uunin seinän välillä lasketaan, mutta uunin seinän ajatellaan luovuttavan lämpöenergiansa suoraan meesalle. Samoin ympäristöön menevien lämpöhäviöiden ajatellaan lähtevän

suoraan savukaasuista pois, vaikka ne on laskettu käyttämällä tyypillisiä uunin ulkopinnan ja ympäristön lämpötiloja.

Savukaasujen ominaisuudet lasketaan huomioiden mukaan kalsinoinnista irronnut hiilidioksidi. Hiilidioksidi huomioidaan laskennassa vain savukaasujen mukaan tulevana massana. Sille ei siis lasketa erikseen lämpötilaa ja sen ajatellaan sekoittuvan täydellisesti savukaasuihin. Savukaasujen mukana irtoavaa meesa- tai kalkkipölyä ei laskuissa huomioida.

Yhtälöissä 7.1 ja 7.2 on esitetty mallin laskennassa käytetyt yksinkertaistetut energiataseet, joista on ratkaistu sisään- ja ulostulon lämpötilaero.

$$\Delta T_{sk} = \frac{\phi_{gs,sät} + \phi_{gw,sät} + \phi_{gs,k} + \phi_{qw,k} + \phi_{o,sät} + \phi_{o,k}}{(\dot{m}_{sk} - \dot{m}_{CO_2} \cdot y_c) \cdot \bar{c}_{p,sk}} \quad (7.1)$$

$\Delta T$  lämpötilaero tasetilavuuden rajoilla

$\dot{m}_{CO_2}$  kalsinointireaktiossa kokonaisuudessaan irtoava  $CO_2$

$y_c$  kalsinoituneen meesan suhteellinen osuus

$$\Delta T_{s,bulk} = \frac{\phi_{gs,sät} + \phi_{gw,sät} + \phi_{gs,k} + \phi_{qw,k}}{(\dot{m}_{CaCO_3} - \dot{m}_{CO_2} \cdot y_c) \cdot \bar{c}_{p,s,bulk}} \quad (7.2)$$

Mallin uunissa on erillinen savukaasujen pneumaattinen kuivaus, joten kuivumisvaihetta ei uunissa ole. Käytännössä siis oletetaan, ettei uuniin syötetyssä meesassa ole vettä. Meesan ajatellaan koostuvan kokonaan kalsiumkarbonaatista.

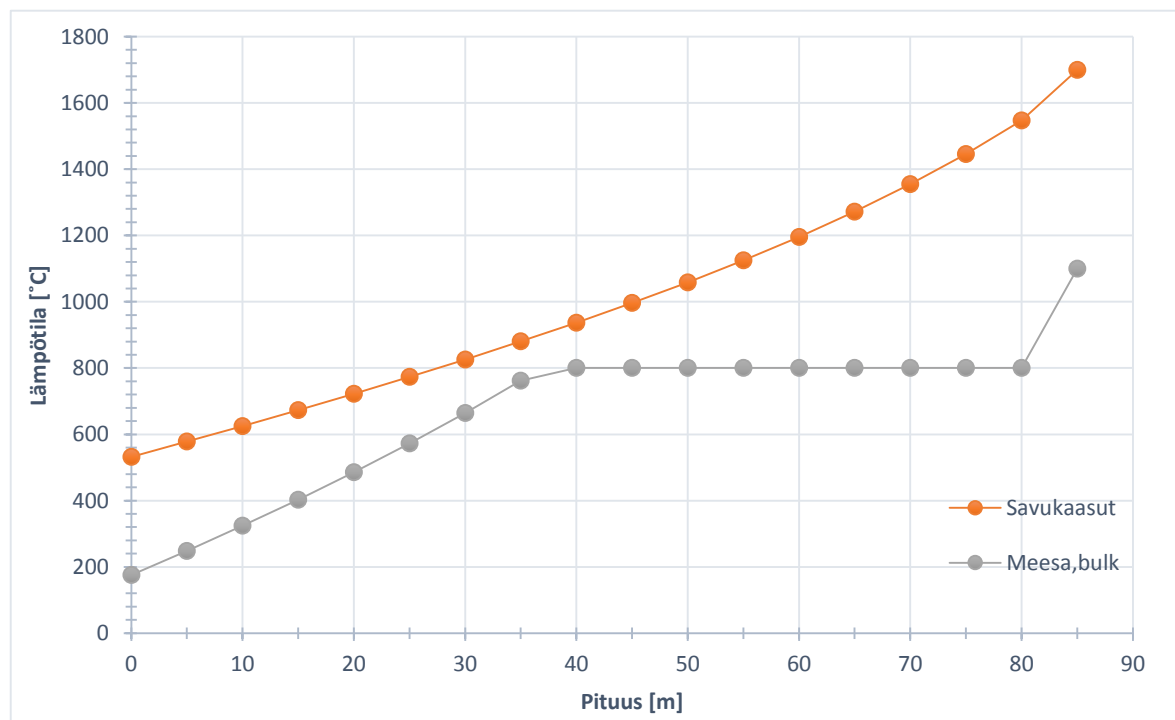
## 7.2 Laskenta

Laskennassa on lähdetty liikkeelle energiataseiden muodostamiseen tarvituista lasketuista arvoista. Tällaisia ovat mm. palamisen reaktioyhtälöt, emissiviteetit, lämmönsiirtokertoimet ja laskentaosien dimensioiden määrittäminen. Lämmönsiirtoyhtälöihin tarvittavat lämmönsiirtokertoimet määritettiin käyttämällä lähteenä T. Toropaisen diplomityötä *Meesauunin polttovyöhykkeen lämmönsiirron ja palamisen mallinnus*, 2003.

Laskenta toteutettiin Excelillä siten, että määritettiin ensin lämpötilat uunin polttopäässä, jonka jälkeen laskettiin määrätyn laskentaosan lämpötilan muutos yhtälöiden 7.1 ja 7.2 avulla. Tätä jatkettiin niin kauan, kunnes meesan lämpötila saavuttaa halutun sisään syöttölämpötilan. Tämä määrää myös uunin pituuden. Liitteeseen I on koottu kuvia Excelillä tehdystä laskennasta.

### 7.3 Lämpötilaprofiili

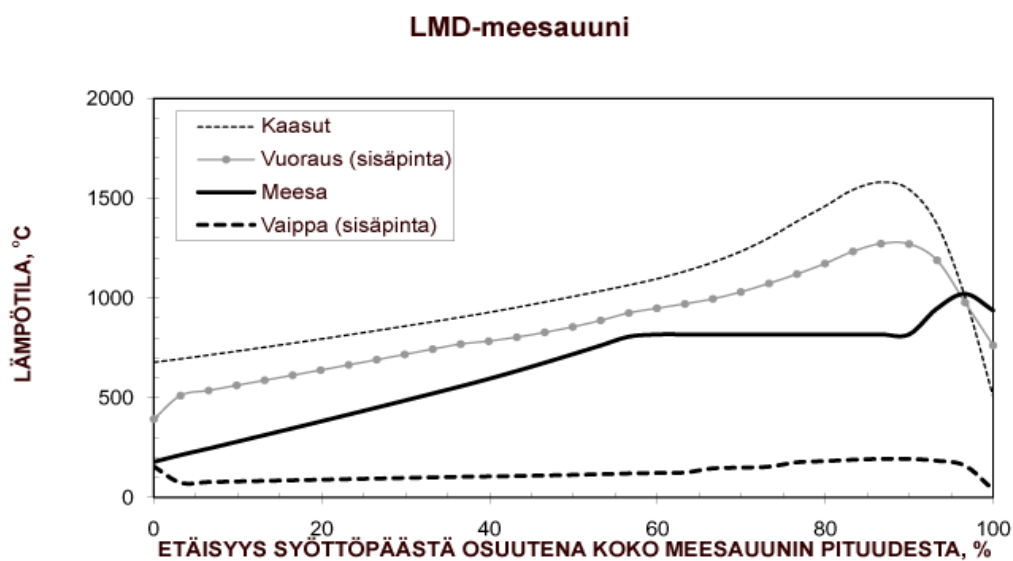
Esitetään eräs mallilla laskettu lämpötilaprofiili. Arvot ovat esimerkkiarvoja eivätkä tiettävästi vastaa minkään todellisen uunin arvoja. Ne ovat kuitenkin oikeata koko luokkaa. Meesan massavirta uuniin asetettiin 5,3 kg/s tai 458 t/d. Maakaasupolttimen polttoaineen massavirraksi asetettiin 0,45 kg/s, joka vastaa 22,5 MW lämpötehoa. Palamisen ilmakerroin on 1,05; uunin sisähalkaisija 4,0 m, uunin pyörimisnopeus 1,0 rpm ja uunin täyttöaste 0,04. Laskentapätkän pituudeksi asetettiin 5 metriä. Laskenta aloitettiin polttopäästä, jossa meesapatjan poistolämpötilaksi asetettiin 1100 °C tai 1373 K. Savukaasujen lämpötilaksi asetettiin 1700 °C eli 1973 K. Kuvassa 7.1 on esitetty laskettu lämpötilaprofiili. Laskenta välituloksineen löytyy liitteestä I.



**Kuva 7.1:** Mallilla laskettu lämpötilaprofiili

Kuvaajasta näkee selvästi kalsinointivyöhykkeen 40 – 80 m kohdalla. Siirtyvä lämpö kuluu kalsinointireaktioon eikä meesapatjan keskimääräinen lämpötila nouse. Uunissa hallitseva lämmönsiirtomuoto on säteilylämmönsiirto, joka on verrannollinen lämpötilojen neljännen potenssin erotukseen yhtälön 5.5 mukaan. Tästä syystä meesan lämpötilassa tapahtuu raju nousu viimeisellä viidellä metrillä. Meesa syötetään laskujen mukaan uuniin sisään n. 175 °C lämpötilasta ja savukaasut poistuvat noin 530 °C lämpötilassa. Arvot vastaavat kappaleessa 5.1 kerrottuihin tyypillisiin ajolämpötiloihin. Verrattuna tarkempiin malleihin uunilla on suhteessa pitkä kalsinointivyöhyke. Kuvassa 7.2 uunin kalsinointivyöhykkeen pituus on noin 35 % uunin koko mitasta. Mallin uunilla kuvasta 7.1 nähdään, että siinä kalsinointivyöhyke on noin 47 %.

Johtuen meesan pintalämpötilan ja savukaasujen vakiolämpötilaerosta, savukaasujen lämpötilakäyrä piirtyy todellisuutta tasaisemmin. Virhettä syntyy myös siitä, että todellisuudessa savukaasujen korkein lämpötila ei kohtaa meesapatjan korkeimman lämpötilan kanssa. Kuvassa 7.2 nähdään kuinka savukaasujen lämpötila saavuttaa huippunsa eri kohtaa kuin meesa. Ero johtuu polttimen pitkästä liekistä ja sekoittumisesta. Mallissa liekkiä ei huomioitu, joten savukaasujen lämpötila oli uunin lopussa huipussaan.. (KnowPulp, 2009), (Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009. s.11.18)



**Kuva 7.2:** Meesauunin lämpötilaprofiili (Arpalahti, O. et al. 2000, 163)

Mallin yksinkertaistukset tekevät siitä suhteellisen epätarkan. Mallia ei voi käyttää tarkkoihin lämpötilojen määrityksiin. Se antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan siitä mitä lämpötiloille tapahtuu uunin eri osissa. Jatkokehittämisellä mallista saisi tarvittaessa tarkemman. Jatkokehittäminen lähtee yksinkertaistusten asteittaisesta poistosta, jolloin mallia pikku hiljaa muokataan monimutkaisemmaksi. Tällöin mallista saadaan tarkempi.



## 8 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin meesauunien toimintaa ja rakennetta osana sulfaattisellutehdasta. Lisäksi kirjallisen työn ohella tehtiin Excel-ohjelmalla yksinkertainen malli meesauunin lämpötiloista.

Meesauuni on sulfaattisellutehtaan kalkkikierron yksi osa. Uunilla muunnetaan kaustisoinnissa syntynyt kalsiumkarbonaatti eli meesa takaisin kalsiumoksidiksi eli poltetuksi kalkiksi, jota tarvitaan kaustisointireaktioon. Kalsiumkarbonaatin reagointi kalsiumoksidiksi eli kalsinointireaktio tapahtuu korkeissa lämpötiloissa, jolloin meesa tulee kuivata ja lämmittää. Samalla kalsinointireaktio tarvitsee paljon lämpöenergiaa. Lämmitys tapahtuu pyörivässä rumpu-uunissa, jossa meesa liikkuu lämpöä tuottavan polttimeen suuntaan. Uunissa savukaasut ja meesa liikkuvat siis toisiinsa nähden vastavirtaan, samalla savukaasut siirtävät meesaan lämpöä. Polttoaine määrättyy hinnan mukaan ja monilla tehtailta käytetäänkin sellutehtaan sivutuotteita uunin polttoaineena. Uunista saatava poltettu kalkki jäädytetään, murskataan ja kuljetetaan kalkkisiiloon.

Uunin lämmönsiirtokerroin on suhteellisen huono, joten tarvitaan korkeita lämpötiloja tehokkaan kalkin tuotannon saamiseksi. Säteily on lämmönsiirtomuodoista hallitseva johtuen komponenttien suurista lämpötiloista. Lämmönsiirron mallintamista haittaa uunin sekoittavan vaikutuksen huomiointi ja meesan raekoon muutos matkalla kohti polttopäätä.

Mallin tarkoituksena oli antaa kuva lämpötilojen käyttäytymisestä meesauunissa. Tähän tehdyllä mallilla se onnistuu hyvin. Se sisältää kuitenkin paljon yksinkertaistuksia, eikä sovellu tarkkaan lämpötilojen laskemiseen. Se on pikemminkin suuntaa antava. Paremman tuloksen saamiseksi pitäisi lämmönsiirron mallintaminen parantaa ottamalla meesapatjan sekoittuminen huomioon ja mallintamalla liekki ja sen palaminen. Lisäksi uunin sisäseinä tulisi ottaa huomioon omana komponenttinaan. Näillä parannuksilla saataisiin tehtyä jo huomattavasti lähempänä todellisuutta oleva malli.

## LÄHTEET

- Adams T. 2008. *Lime kiln principles and operations*. [verkkojulkaisu]. [Viitattu: 16.11.2015] Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-2.pdf>.
- Arpalahti, O., et al. 2000 "*White liquor preparation*." *Papermaking Science and Technology* 6 (2000). Julkaisija: Paperi ja Puu Oy. Gummerus Oy, Jyväskylä. ISBN 978-952-5216-26-4.
- Gorog J. Peter 2002. *Lime Sludge Kiln Operation*. [Esityskalvo]. [Viitattu 16.11.2015] Weyerhaeuser.
- Hart P. et al. 2012. Article in: *TAPPI Journal* vol. 11 NO. 8. [verkkojulkaisu]. [Viitattu: 16.11.2015] Saatavissa: <http://www.researchgate.net/publication/271923887>.
- Honghi T. 2007. *Lime kiln chemistry and effects on kiln operations*. Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto. Toronto, Canada. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.11.2015]. Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/2-3.pdf>
- Hottel, H.C & Sarofim, A.F. 1967. *Radiative Transfer*. New York: McGraw-Hill. s. 520.
- Incropera F. et al. 2003. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. ISBN 978-81-265-4273-4. s.1048.
- Järvensivu M. 2003. *Intelligent control of the lime kiln process with respect to environmental requirements*. Helsinki University of Technology Laboratory of Process Control and Automation. Espoo 2003 NO. 8. ISBN 951-22-6306-8
- KnowPulp, 2009. Metsäteollisuuden oppimisympäristö. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 16.11.15] Saatavissa: <http://www.knowpulp.com/suomi/> Vaatii käyttölisenssin.

Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009. *Lime kiln modelling CFD & One-dimesional simulations*. Rahoittaja: Värmeforsk Service AB. Stockholm. ISSN 1653-1248

Toropainen T. 2003. *Meesauunin polttovyöhykkeen lämmönsiirron ja palamisen mallinnus*.  
Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan osasto.

Vakkilainen E. 2015. *Poltto- ja kattilatekniikan perusteet, poltin poltto*. [Luentomateriaali].

[Viitattu:

16.11.2015]

Saatavissa:

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bh50a0500/luennot>. Vaatii käyttöoikeudet.

## LIITTEET

## LIITE I Excel-laskenta meesauunin lämpötilaprofilista

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2																			
3		<b>Polttoaine</b>																	
4		Maakaasu																	
5		Massavirta		0,45	kg/s					Asetettava arvo									
6		Lämpöarvo		50	MJ/kg					Vakio									
7		Lämpöteho		22,5	MW					Laskijan apuna olevat arvot. (Eivät liity itse lämpötilaprofiilin laskentaan vaan auttavat hämmöttämään.)									
8																			
9		<b>Palaminen</b>																	
10		Moolimassat								Reaktioyhtälö									
11		CO2		44,0	kg/kmol					CH4 + 2 O2 -> CO2 + 2H2O									
12		H2O		18,0	kg/kmol														
13		CH4		16,0	kg/kmol														
14		N2		28,0	kg/kmol														
15		O2		32,0	kg/kmol														
16		Moolivirat stökiometrisessä palamisessa																	
17		CH4		0,03	kmol/s														
18		O2		0,06	kmol/s														
19		N2		0,21	kmol/s														
20		CO2		0,03	kmol/s														
21		H2O		0,06	kmol/s														
22		Ilmaktiivien huomiointi																	
23		Ilmaktiivien		1,05															
24		CH4		0,03	kmol/s														
25		O2		0,06	kmol/s														
26		N2		0,22	kmol/s	% N2		71,862											
27		CO2		0,03	kmol/s	% CO2		9,0769											
28		H2O		0,06	kmol/s	% H2O		18,154											
29		reagoimaton O2		0,00	kmol/s	% O2		0,9077											
30				0,31															
31																			
32		Massavirat palamisessa																	
33		CH4		0,5	kg/s														
34		O2		1,9	kg/s														
35		N2		6,2	kg/s	m% N2		0,57											
36		CO2		1,2	kg/s	m% CO2		0,33											
37		H2O		1,0	kg/s	m% H2O		0,09											
38		reagoimaton O2		0,1	kg/s	m% O2		0,01											
39																			
40		Pinta- ja sekundääri-ilma		8,1	kg/s														
41		Savukaasujen massavirta		8,6	kg/s														
42																			

Palaminen

Apumuuttujia

Satelli

Konvektio

FGproperties

Johtuminen

Lämpötilaprofiili versio3

+

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
3																	
4		Meesan syöttöpää															
5																	
6		Meesa															
7																	
8		massavirt	5,3 kg/s	eli		457,92 t/d											
9																	
10																	
11		Meesa hajooa myöhemmin uunissa CaO ja CO2															
12							CaCO3 -> CaO + CO2										
13		M_Ca	40 kg/kmol														
14		M_CaO	56 kg/kmol														
15		M_CaCO3	100 kg/kmol														
16		M_CO2	44 kg/kmol														
17																	
18		moollivirt	0,053 kmol/s														
19		CO2 virta	2,3 kg/s														
20																	
21		Savukaasujen lisäksi syöttöpäässä liikkuu siis "ylimääräistä" hiilidioksidia kalsinointireaktiosta															
22																	
23		Savukaasut															
24							a =	9,85E-01									
25							b =	2,27E-04									
26		lämpötila	1400 K				c =	1,08E-07									
27		massavirt	10,89 kg/s				d =	-6,01E-11									
28		c_p	1,35E+00 kJ/kgK														
29																	
30		Meesan aksiaalinen eteneminen uunissa															
31																	
32		$v = 5,67 \cdot n \cdot D \cdot u / (\varphi + 0,419)$ (toropainen)															
33																	
34		Uuni															
35		pyörimisnopeus	1 rpm			0,01667 1/s											
36		sisähalkaisija	4 m														
37		kallistuskulma	2 astetta			0,035 rad											
38		sortumakulma	38 astetta			0,663 rad											
39																	
40		nopeus	0,012 m/s														
41																	

Hälvä H. 1996. Termodynaamikan taulukot. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
3																						
4			Säteen pituus		$L_m=0,95 \cdot d$		Toropainen T. 2003, s.53 yht. 8.4				Laskenta pätjän pituus											
5												\$	5 m									
6				$L_m$	3,8 m																	
7																						
8			Täyttösuhte																			
9			$C_s=A_g/A_t$		0,18		Toropainen T. 2003, s.54 yht. 8.9															
10																						
11																						
12																						
13																						
14																						
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34																						
35																						
36																						
37																						
38																						
39																						
40																						
41																						
42																						
43																						
44																						
45																						
46																						
47																						
48																						
49																						
50																						
51																						
52																						
53																						
54																						
55																						
56																						
57																						
58																						
59																						
60																						
61																						

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
67															
68			$\epsilon_{gp}(L_m)$		0,303625			$\epsilon_{gp}(2*L_m)$		0,36525					
69															
70			<b>Painokerroin a_g</b>	0,38				Hottel, H.C & Sarofim, A.F., 1967. s.250, yht. 6-72							
71															
72			<b>Emissiviteetit</b>					Gorog, J.P., T.N. Adams, an J.K. Brimacombe,							
73			Meesa	0,8				Heat Transfer from Flames in a Rotary Kiln, Metallurgical Transactions, B, v14B, Spetember 1983, 411-423							
74			Seinä	0,7				Incropera F. et al. 2003, 1009							
75			$\epsilon_{ge}$	0,304											
76															
77			Kokonaislämmönsiirto pinta-alat												
78															
79															
80			Kaasusta meesaan	A_gs	3,0 m <sup>2</sup>			Toropainen T. 2003, s.56 yht. 8.15							
81															
82			Kaasusta seinään	A_gw	11,5 m <sup>2</sup>			Toropainen T. 2003, s.56 yht. 8.16							
83															
84			Seinästä meesaan	A_ws	5,0 m <sup>2</sup>			Toropainen T. 2003, s.56 yht. 8.17							
85															
86															
87			Nettosäteilylämpövirrat Toropainen 8.18-8.20												
88															
89			Stefan boltzman		5,670E-08 W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>										
90															
91															
92			Kaasusta meesaan	$\Phi_{gs}$	314775 W			Toropainen T. 2003, s.57 yht. 8.18							
93															
94			Kaasusta seinään	$\Phi_{gw}$	724845 W			Toropainen T. 2003, s.57 yht. 8.19							
95															
96			Seinästä meesaan	$\Phi_{ws}$	212410 W			Toropainen T. 2003, s.57 yht. 8.20							
97															
98															
99			Säteily uunista ympäristöön												
100															
101			Ulkohalkaisija	d_o	4,5 m										
102				A_wo	70,7 m <sup>2</sup>										
103				$\epsilon_{wo}$	0,6			Incropera F. et al. 2003, 1008							
104				T_out	280 K										
105				T_wo	470 K										
106															
107															
108				$\Phi_{out}$	102569 W										
109															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
2																		
3		Kaasusta meesaan																Constantines cu R. 2012, 2. MRAC-strategy for the temperature profile control of a ilmekita. AndritzAutomation. <a href="http://www.andritz.com/de/aa-automation-mrac-temperature-control-ilmekita.pdf">http://www.andritz.com/de/aa-automation-mrac-temperature-control-ilmekita.pdf</a>
4		Keskus kulma	$\theta$		70	1,22 rad												
5		Lämmönsiirtoala	$A_{gs}$		11,47 m <sup>2</sup>													Toropainen T. 2003, s. 60 yht. 8.31
6																		
7																		
8		Ekivalentti halkaisija	$d_e$		3,87 m													Toropainen T. 2003, s. 59 yht. 8.28
9																		
10		Täyttöaste	$\eta$		0,04													Toropainen T. 2003, s. 59 yht. 8.27
11																		Patjan pakkaus
12		Pyörimisaajuus	$\omega$		0,10 1/s													
13		Kinem. Vis.k. SK	$v_g$		0,000215 m <sup>2</sup> /s													
14		Pyörimisen Re	$Re_\omega$		7282													Toropainen T. 2003, s. 59 yht. 8.26
15			Pr		7,08E-01													
16																		
17		SK tiheys	$\rho$		0,240965076 kg/m <sup>3</sup>													
18																		
19		SK nopeus	$v_g$		3,6 m/s													
20		Virtauksen Re	Re		64679													Toropainen T. 2003, s. 59 yht. 8.25
21																		
22		SK lämmönjohtavuus	$k_g$		0,097 W/mK													
23																		
24		Lämmönsiirtokerroin	$h_{gs}$		31,57 W/m <sup>2</sup> K													Toropainen T. 2003, s. 60 yht. 8.29
25		Lämmönsiirto	$\phi_{gs,k}$		108664 W													
26																		
27																		
28		Kaasusta seinään																
29																		
30		Lämmönsiirtokerroin	$h_{gw}$		141,41 W/m <sup>2</sup> K													Toropainen T. 2003, s. 60 yht. 8.34
31		Lämmönsiirtoala	$A_{gw}$		50,6 m <sup>2</sup>													Toropainen T. 2003, s. 60 yht. 8.35
32		Lämmönsiirto	$\phi_{gw}$		1073637 W													
33																		
34																		
35		Seinästä ympäristöön																
36																		
37		Ympäristön lämp.	$T_{ymp}$		280 K													
38		Ruumun lämp.	$T_{wo}$		470 K													
39		Filmin lämp.	$T_f$		375 K													
40		Lämmönjohtavuus	$k_{air}$		0,027 W/mK													Wischnews ki B. 2015. Verkkosivusto: <a href="http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html">http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html</a>
41		Tuulen nopeus	$v_{air}$		2 m/s													
42		Prandlin luku	Pr		0,71													Wischnews ki B. 2015. Verkkosivusto: <a href="http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html">http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html</a>
43		Kinem. Vis.k.	$v_{air}$		1,74E-05 m <sup>2</sup> /s													Wischnews ki B. 2015. Verkkosivusto: <a href="http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html">http://www.peacesoftware.de/einigerwerte/luft_e.html</a>
44		Ulkoalokaisija	$d_o$		4,5 m													
45		Reynolds	Re		5,17E+05													Re*Pr
46																		3,68E+05
47		Lämmönsiirtokerroin	$h_{wo}$		4,36 W/mK													Toropainen T. 2003, s. 62 yht. 8.42 & 8.44
48		Lämmönsiirtoala	$A_{wo}$		70,7 m <sup>2</sup>													
49		Lämmönsiirto	$\phi_{out}$		58523 W													Toropainen T. 2003, s. 61 yht. 8.36



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2		<b>BH50A1400</b>						LUT, 2015. Lappeenrannan teknillinen yliopisto [laskentatyökalu].						
3		<b>Steam Boilers</b>						Saatavissa: <a href="http://moodle.lut.fi/course/view.php?id=2492">http://moodle.lut.fi/course/view.php?id=2492</a>						
4		<b>Calculation of flue gas properties</b>												
5														
6														
7			<b>CO2</b>	<b>H2O</b>	<b>SO2</b>	<b>N2</b>	<b>O2</b>	<b>CO</b>	<b>H2</b>	<b>Mixture</b>				
8	E1	-8,8254	-8,5753	-9,8676	-7,5196	-7,4078	-7,4605	-7,9609	-7,8288	Enthalpy coefficient				
9	E2	26,89	29,98	31,38	26,68	25,32	26,25	29,27	27,29	Enthalpy coefficient				
10	E3	21,166	5,063	18,648	3,136	6,989	4,009	-0,672	5,157	Enthalpy coefficient				
11	E4	-4,899	0,356	-4,664	-0,126	-1,475	-0,395	0,764	-0,484	Enthalpy coefficient				
12	E5	-8,3957	7,4312	-8,0402	5,2744	3,1092	2,1630	-24,4049	4,1384	Conductivity coefficient				
13	E6	0,08415	0,00968	0,06845	0,07161	0,07479	0,09700	1,03473	0,06318	Conductivity coefficient				
14	E7	3,33E-06	0,00011	-3,2E-05	-1,3E-05	1,64E-05	-6E-05	-0,00153	8,53E-06	Conductivity coefficient				
15	E8	-8,5E-09	-3E-08	1,84E-08	2,08E-09	-1,5E-08	2,26E-08	1,4E-06	-4,3E-09	Conductivity coefficient				
16	E9	-1,47366	-1,60121	-0,11323	2,44488	2,07235	2,89722	1,29196	1,39348	Viscosity coefficient				
17	E10	0,061897	0,033346	0,043809	0,058369	0,071237	0,057924	0,032336	0,055214	Viscosity coefficient				
18	E11	-2,5E-05	1,21E-05	8,73E-07	-2,6E-05	-3,4E-05	-3E-05	-2,8E-05	-2E-05	Viscosity coefficient				
19	E12	5,38E-09	-6,3E-09	-5,2E-09	6,55E-09	1E-08	9,73E-09	1,82E-08	4,56E-09	Viscosity coefficient				
20	E13	0,5059	1,2438	0,3417	0,7997	0,6998	0,7999	11,1273	0,8087	Conversion kg-> m3n				
21	E14	22,263	22,408	21,887	22,403	22,394	22,404	22,432	22,391	Volume				
22	E15	188,9	461,5	129,8	296,8	259,8	296,8	4124,3	300,3	Rm				
23	E16	44,010	18,016	64,060	28,016	31,999	28,010	2,016	27,689	Mole weight				
24														
25		<b>Composition, mol - %</b>												
26														
27		<b>CO2</b>	<b>H2O</b>	<b>SO2</b>	<b>N2</b>	<b>O2</b>	<b>CO</b>	<b>H2</b>	<b>Sum</b>					
28		9,077	18,154	0,000	71,862	0,908	0,000	0,000	100,000	Input				
29														
30		<b>Composition, vol - %</b>												
31														
32		<b>CO2</b>	<b>H2O</b>	<b>SO2</b>	<b>N2</b>	<b>O2</b>	<b>CO</b>	<b>H2</b>	<b>Sum</b>					
33		9,025	18,167	0,000	71,900	0,908	0,000	0,000	100,000					
34														

Palaminen

Apurainuuttuja

Säteily

Konvektio

**Rgproperties**

Johntuminen

Lämpötilaprofiili versio3

+

## Isobaric Properties for flue gas

## Isobaric Data for P = 0.10130 MPa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Density (mol/l)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (l/mol)	Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Enthalpy (kJ/mol)	Enthalpy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/m <sup>3</sup> n)	Viscosity (uPa·s)	Therm. Cond. (W/m·K)	Phase			
34															
35															
36															
37															
38	200	0,1013	0,06092	1,687	16,4153	0,5929	-2,169	-78,3	-96,9	11,6686	0,017081	vapour			
39	250	0,1013	0,04874	1,349	20,5191	0,7411	-0,692	-25,0	-30,9	14,0117	0,020399	vapour			
40	273,15	0,1013	0,04460	1,235	22,4191	0,8097	0,000	0,0	0,0	15,0681	0,021944	vapour			
41	300	0,1013	0,04061	1,125	24,6229	0,8893	0,809	29,2	36,1	16,2714	0,023743	vapour			
42	350	0,1013	0,03481	0,964	28,7267	1,0375	2,333	84,3	104,2	18,4511	0,027111	vapour			
43	400	0,1013	0,03046	0,843	32,8305	1,1857	3,881	140,2	173,3	20,5542	0,030499	vapour			
44	450	0,1013	0,02708	0,750	36,9343	1,3339	5,451	196,9	243,5	22,5842	0,033903	vapour			
45	500	0,1013	0,02437	0,675	41,0382	1,4821	7,044	254,4	314,6	24,5445	0,037321	vapour			
46	550	0,1013	0,02215	0,613	45,1420	1,6303	8,659	312,7	386,7	26,4384	0,040749	vapour			
47	600	0,1013	0,02031	0,562	49,2458	1,7786	10,296	371,9	459,8	28,2694	0,044184	vapour			
48	650	0,1013	0,01874	0,519	53,3496	1,9268	11,955	431,8	533,9	30,0410	0,047623	vapour			
49	700	0,1013	0,01741	0,482	57,4534	2,0750	13,634	492,4	608,9	31,7564	0,051063	vapour			
50	750	0,1013	0,01625	0,450	61,5572	2,2232	15,334	553,8	684,8	33,4193	0,054500	vapour			
51	800	0,1013	0,01523	0,422	65,6610	2,3714	17,055	615,9	761,7	35,0329	0,057931	vapour			
52	850	0,1013	0,01433	0,397	69,7649	2,5196	18,795	678,8	839,4	36,6007	0,061352	vapour			
53	900	0,1013	0,01354	0,375	73,8687	2,6678	20,555	742,4	918,0	38,1262	0,064762	vapour			
54	950	0,1013	0,01283	0,355	77,9725	2,8161	22,335	806,6	997,5	39,6127	0,068155	vapour			
55	975,35	0,1013	0,01249	0,346	80,0531	2,8912	23,244	839,5	1038,1	40,3525	0,069869	vapour			
56	1113,15	0,1013	0,01095	0,303	91,3632	3,2997	28,270	1021,0	1262,5	44,2338	0,079081	vapour			
57	1100	0,1013	0,01108	0,307	90,2839	3,2607	27,784	1003,5	1240,9	43,8726	0,078210	vapour			
58	1200	0,1013	0,01015	0,281	98,4916	3,5571	31,507	1137,9	1407,1	46,5804	0,084776	vapour			
59	1300	0,1013	0,00937	0,260	106,6992	3,8536	35,298	1274,8	1576,4	49,2144	0,091202	vapour			
60	1400	0,1013	0,00870	0,241	114,9068	4,1500	39,155	1414,1	1748,7	51,8021	0,097461	vapour			
61	1500	0,1013	0,00812	0,225	123,1145	4,4464	43,074	1555,6	1923,7	54,3706	0,103528	vapour			
62	1600	0,1013	0,00761	0,211	131,3221	4,7428	47,052	1699,3	2101,4	56,9475	0,109377	vapour			
63	1700	0,1013	0,00717	0,198	139,5297	5,0393	51,087	1845,1	2281,6	59,5600	0,114982	vapour			
64	1800	0,1013	0,00677	0,187	147,7374	5,3357	55,176	1992,7	2464,2	62,2356	0,120318	vapour			
65	1900	0,1013	0,00641	0,178	155,9450	5,6321	59,316	2142,3	2649,1	65,0015	0,125357	vapour			
66															

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2	Seinästä meesaan												
3													
4	Sisähalk.	$d_j$		4 m									
5	Yhteinen kaari	$l_w$		2,44 m									
6	Lämmönsiirtoala	$A_{ws}$		12,22 m <sup>2</sup>									
7	Meesan lämmönjoht	$k_s$		2,25 W/mK									
8	Meesan tiheys	$\rho_s$		1300 kg/m <sup>3</sup>									
9	Meesan cp	$c_{ps}$		856 J/kgK									
10	Meesan terminen dif	$\alpha_s$		2,02E-06 m <sup>2</sup> /s									
11	Lämmönsiirtymisker	$h_{ws}$		2,57E+02 W/m <sup>2</sup> K									
12													
13	Lämpötilat												
14	Kaasu			1300 K									
15	Meesa			1000 K									
16	Seinä			1150 K									
17													
18	Kesk. seinän T	$T_w$		1150 K									
19													
20													
21	Lämmönsiirto	$\phi_{ws}$		471235 W									
22													
23	Meesan sisäinen johtuminen												
24													
25													
26	P	$kAdT/x$											
27	x			0,18 m									
28	A			11,47 m <sup>2</sup>									
29													
30													
31													
32													

korjataan tunkeutumissyvyyttä

0,00018

Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009  
 Svedin K., Ivarsson C., Lundborg R., 2009  
 Limekilnmodellning rapport  
 Cao

T\_CaCO3 800 K T\_Cao 1100 K  
 CaCO3 1177 J/kgK  
 Cao 969 J/kgK  
 Barin, Ihsan 1989

Thermochemical Data of Pure Substances: Part I and II  
 VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim  
<https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:461011/FULLTEXT01.pdf>

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
349																				
350																				
351																				
352																				
353																				
354																				
355																				
356																				
357																				
358																				
359																				
360																				
361																				
362																				
363																				
364																				
365																				
366																				
367																				
368																				
369																				
370																				
371																				
372																				
373																				
374																				
375																				
376																				
377																				
378																				
379																				
380																				
381																				
382																				
383																				
384																				
385																				
386																				
387																				
388																				
389																				
390																				
391																				
392																				
393																				
394																				

Lämpötilan muutokset 17

reaktiolämpö 3180 kJ/kg(CaO)  
 1780,8 kJ/kg(CaCO3)  
 kals. Meesa 0,25 kg/s  
 x\_CaCO3 140,60 %

