Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Leijukerroskattilan kuormitustason vaikutus hyötysuhteeseen

The effect of variable workloads of fluidized bed combustion on efficiency

Työn tarkastaja: Jouni Ritvanen

Työn ohjaaja: Jouni Ritvanen

Lappeenranta 27.3.2019

Henri Tuisku

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Henri Tuisku

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Jouni Ritvanen

Kandidaatintyö 2019

Sivuja 39, kuvia 11, taulukoita 11 ja liitteitä 3.

Hakusanat: kandidaatintyö, hyötysuhde, leijupoltto, kuormitustaso

Työn lähtökohtana on tutkia leijukerroskattilan kuormitustason vaikutusta sen hyötysuhteeseen. Kuormitustasoselvityksen päällimmäinen tarkoitus on ratkaista yrityksen leijukerrosprosessin ajomalliin liittyviä ongelmia. Lisäksi työ sisältää kattilahyötysuhteeseen vaikuttavien tekijöiden pohdintaa, joka toimii työssä tukimateriaalina kuormitustasoselvitykselle. Työssä kehitetään Excel-pohjainen hyötysuhteen laskentatyökalu, jonka avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä kuormitustason ja kattilahyötysuhteen riippuvuudesta. Työn tuloksien perusteella on selvää, että yrityksen leijupetikattilan kuormitustaso on sopivin alueella 5,5-7,5 MW, jolloin hyötysuhde on välillä 87,5 – 87,9 prosenttia.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä **2**

Sisällysluettelo **3**

Symboli- ja lyhenneluettelo **4**

1 Johdanto **6**

2 Leijupoltto **7**
2.1 Leijupoltto yleisesti ... 7
2.2 Leijupetikattilat ... 8
2.3 Kiertopetikattilat ... 10

3 Kattilahyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät **14**
3.1 Palamisen puhtaus ... 14
3.2 Savukaasun lämpötila ja jäännöshappipitoisuus ... 14
3.3 Kattilan hyötysuhde ... 16
3.4 Polttoaineen kosteus ... 19
3.5 Tuhka ... 20

4 Laitoksen leijupetikattilan hyötysuhde **21**
4.1 Leijukerrosprosessi ... 21
4.2 Laskentaosuus ... 23
4.3 Laskenta ... 24

5 Tulokset **36**

6 Johtopäätökset **39**

Lähdeluettelo **40**

Liite 1 Testausseloste **41**

Liite 2 Hyötysuhdelaskentaohjelma **42**

Liite 3 Laskutoimitukset **44**

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Suureet ja yksiköt

ρ	tiheys	[kg/m^3]
Φ	teho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
t	lämpötila	[K/1000]
n	ainemäärä	[mol]
M	moolimassa	[g/mol]
E	energiavirta	[W]
p	paine	[Pa]
$m - \%$	massaprosentti	[%]
m	massa	[kg]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
T	lämpötila	[K]
q_v	tilavuusvirta	[m^3/s]
H	entalpia	[J/kg]
R	ilman kaasuvakio	[J/(molK)]

Dimensiottomat luvut

K	kerroin leijukerroskattilan olosuhteille
x	osuus
η	hyötysuhde
λ	ilmakerroin

Alaindeksit

jäännös(%)	aineen prosentuaalinen jäännösmäärä

jäännös	jäännösmäärä ainetta
tod	todellinen
tarve	tarvittava
pi	polttoilma
sk	savukaasu
prim	primääri - ilma
norm	normaalitila
sek	sekundääri-ilma
u	yleinen (union)
i	ilma
tot	kokonaismäärä
in	sisääntulo
ref	referenssi
out	ulostulo
kierr	kattilaan takaisin kierrätettävä
pa	polttoaine
komp	komponetti
k	kuiva
pal. kaas. häv	palamattomien kaasujen häviö
pal. kiint. häv	palamattomien kiintoaineiden häviö
sät. häv	kattilan säteilyhäviöt
hyöty	kattilan hyötyteho
häviöt	kaikki häviöt
tuotu	kattilaan tuotu energia
hehk. häv	hehkutushäviö

1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena on selvittää leijukerroskattilan kuormitustason vaikutusta hyötysuhteeseen ja tutkia hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Työn kohteena on eräs kaukolämpöyhtiö, joka etsii ratkaisuja leijukerrosprosessin ajomallin ongelmiin liittyen. Tarkemmin ongelmat ovat haaste sopivan tuotannonaikaisen kuormitustason löytämisessä ja epätietoisuus kattilan hyötysuhteesta eri kuormitustasoilla. Ongelmien ratkaisemiseksi työssä tehdään prosessille kuormitustasoselvitys, jonka avulla on tarkoitus selvittää, millä kuormitustasolla yrityksen prosessin leijupetikattilan hyötysuhde olisi sopivalla alueella. Ongelmien ratkaisun ensimmäinen vaihe on tutustua leijukerrospolttoon ja yrityksen prosessiin sekä tutkia hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä, jotta kokonaiskuva rakentuisi kuormitustasoselvityksen ympärille. Kuormitustasoselvitys muodostetaan käyttämällä apuna työn aikana kehitettyä Excel-pohjaista hyötysuhdelaskentaohjelmaa. Laskentaohjelma osoittautui vaivattomaksi tavaksi laskea hyötysuhteita työn aikana. Laskentaohjelmaan pystytään sijoittamaan suoraan kattilan ajon aikaiset prosessin tila-arvot, jotta hyötysuhde saadaan selville tutkittavilla kuormitustasoilla. Eri ajonaikaisilla kuormitustasoilla ja laskentatyökalun avulla saadaan lopulliset tulokset, joista on apua ajomalliin liittyvissä ongelmissa.

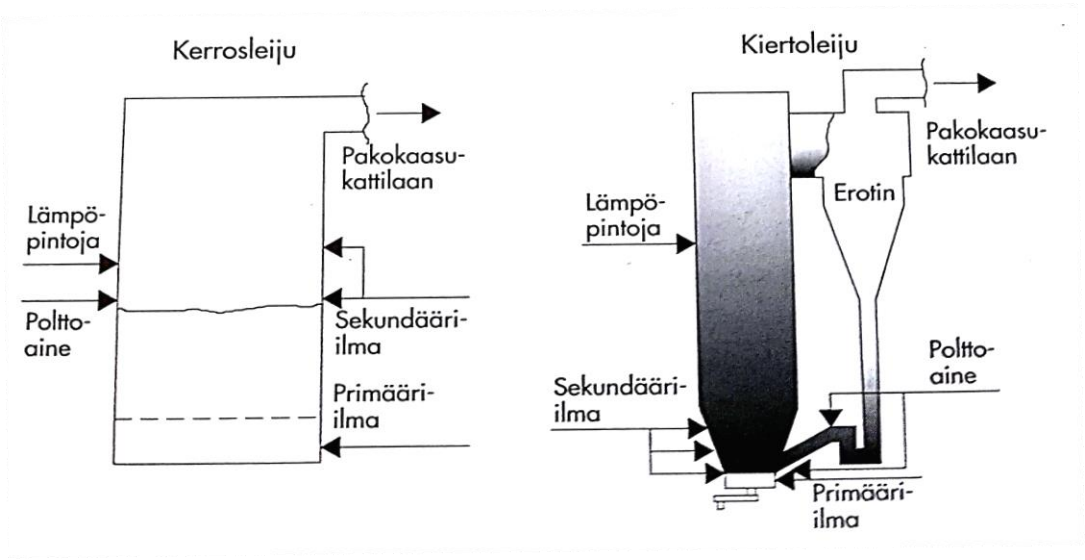
Luvussa 2 tutustutaan yleisesti leijupolttoon sekä leijukerroskattiloiden rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen. Luvussa 3 tutkitaan kattilahyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Luku sisältää esimerkiksi käsittelyä palamisen puhtaudesta, kattilan hyötysuhteesta ja polttoaineen kosteudesta. Luvussa 4 tutustutaan yrityksen leijukerrosprosessiin ja esitetään hyötysuhdelaskentaohjelman oletukset ja laskentayhtälöt. Luvussa 5 muodostetaan kuormitustasoanalyysi eli analysoidaan kuormitustason vaikutusta laskennallisesti määritettyyn leijupetikattilan hyötysuhteeseen. Luvussa 6 työstä muodostetaan johtopäätökset.

2 LEIJUPOLTTO

2.1 Leijupoltto yleisesti

Leijukerrospolttoa hyödynnetään nykyään laajasti. Syynä tähän ovat mahdollisuudet polttaa monenlaisia polttoaineita hyvällä palamishyötysuhteella. Myös huonolaatuiset ja kosteat polttoaineet soveltuvat mainiosti leijukerrospolttoon. Leijukerrospolton vahvuuksia ovat myös vähäiset typenoksidien eli NO_X:n päästöt alhaisen palamislämpötilan ansiosta ja edullinen savukaasujen rikinpuhdistus, koska vaadittava kalkki voidaan syöttää suoraan tulipesään. Leijukerrospoltto perustuu yksinkertaistettuna polttoaineen polttoon kokonaan tai osittain leijuvassa pedissä. Leijumiseen vaadittava kaasu syötetään polttokattilan alaosasta. (Huhtinen 2000, 153.)

Leijupoltto luokitellaan kahteen eri päätyyppiin: kerrosleijuun ja kiertoleijuun. Kuvassa 1 esitetään kerrosleiju- ja kiertoleijukattilan yksinkertaistettu rakenne. Jako näihin kahteen päätyyppiin tehdään leijukerroksen käyttäytymisen perusteella. Kerrosleijukattilan eli leijupetikattilan piirteisiin kuuluu leijutusmateriaalin pysyminen leijukerroksessa, kun taas kiertoleijukattilan eli kiertopetikatilan piirteisiin kuuluu kiintoainehiukkasten kulkeutuminen leijutuskaasun mukana. (Raiko et al. 2002, 490.)

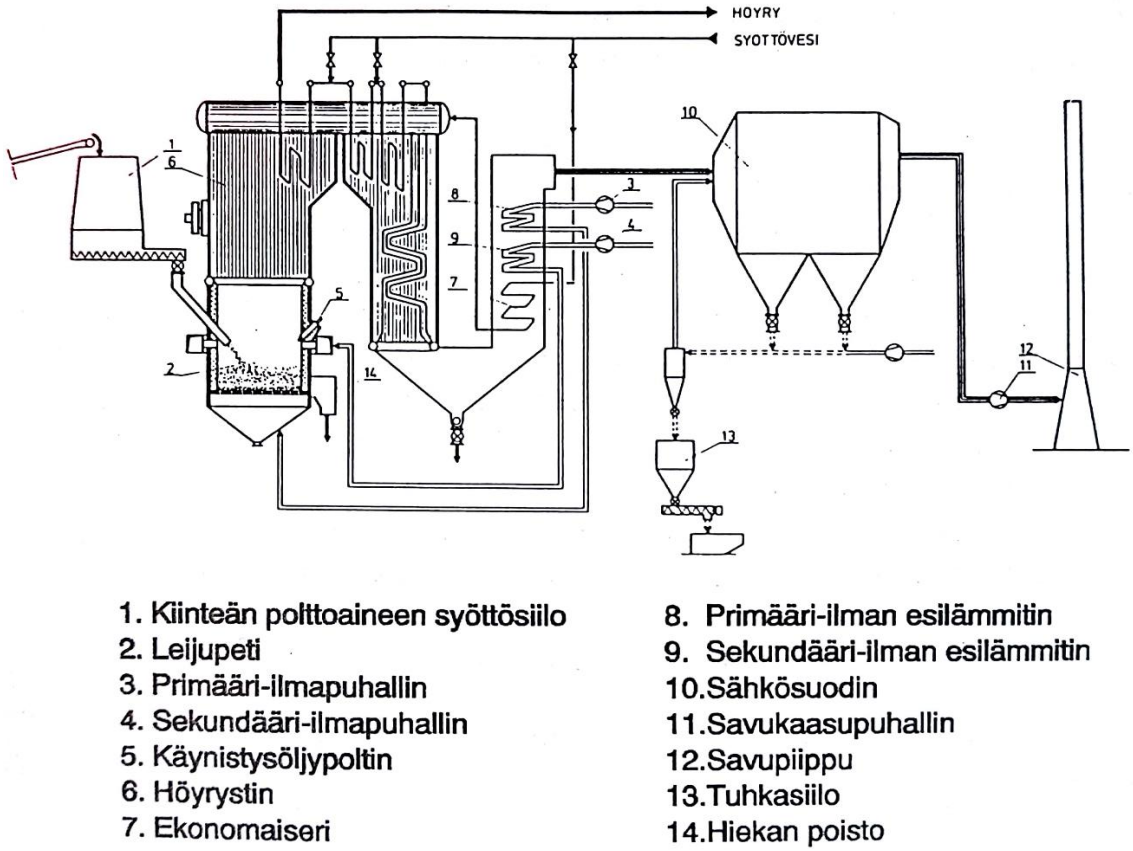


Kuva 1. Kerrosleiju- ja kiertoleijukattilan yksinkertaistettu rakenne. (Raiko et al 2002, 491.)

Kerrosleijukattilan yksinkertaistettuun rakenteeseen kuuluu polttoaineen syöttö, primääri- ja sekundääri-ilman syöttö, tulipesä, peti, höyrystin ja savukaasujen poisto. Kiertoleijukattilan yksinkertaistettu rakenne koostuu edellä mainittujen lisäksi myös erottimesta eli syklonista, jonka kautta palava aines palautetaan takaisin tulipesään, ja syklonin alla olevasta polvesta, jolla estetään savukaasujen virtaus tulipesästä sykloniin. (Raiko et al 2002, 491.)

2.2 Leijupetikattilat

Leijupetikattilan toimintaa havainnollistetaan kuvassa 2. Polttoaine syötetään polttoainesiilosta (1) pedin päälle joko mekaanisesti tai pneumaattisesti eli paineilman avulla. Useat syöttöputket pitävät huolen, että polttoaine jakautuu tasaisesti. Ennen kuin kattilaan voidaan syöttää varsinaista polttoainetta, täytyy peti lämmittää tasolle, jossa varsinainen polttoaine syttyy turvallisesti. Tavallisesti lämpötilataso on luokkaa 500–600 °C. Alkulämmitys voidaan toteuttaa erillisellä sytytyspolttimella (5), joka sijaitsee joko pedissä tai pedin päällä. Kattila saa palamiseen vaadittavan hapen osittain leijutusilmasta eli primääri-ilmasta ja pedin päälle tuotavasta sekundääri-ilmasta. Puhaltimet pitävät huolta primääri- ja sekundääri-ilman tuotosta (3 ja 4). Tuhka poistuu kattilasta savukaasujen mukana leijutuhkana, joka voidaan erottaa esimerkiksi sähkösuodattimella (10). Tuhkaa voidaan poistaa myös hiekan mukana kattilan pohjasta arinan aukosta (14). (Huhtinen 2000, 157-158.)



Kuva 2. Kerrosleijukattilan toiminta ja rakenne. (Huhtinen 2000, 158.)

Kerrosleijukattilassa on mahdollista polttaa useita polttoaineita. Kerrosleijupoltossa saavutettava poltoaineteho on suurimillaan noin 3 MW reaktorin poikkipinta-alaa kohti. Hyvin kosteat polttoaineet voidaan polttaa tehokkaasti ilman kuivausta, sillä pedin suuren lämpökapasiteetin vuoksi polttoaine kuivaa ja lämpenee nopeasti. Lisäksi polttoaine-erien laatuvaihtelut tasoittuvat suuren lämpökapasiteetin ansiosta. Leijukerroksen lämpötila täytyy pitää kuitenkin polttoaineen tuhkan pehmenemislämpötilan alapuolella, jotta leijutusmateriaali ei sintraantuisi eli kerrostuisi kattilan lämpöpinnoille sulaneen tuhkan takia. (Raiko et al 2002, 490.)

Leijupetikattilalle ominaisia polttoaineita ovat teollisuusjätteet, lietteet ja monet kotimaiset biopolttoaineet, joiden kosteuspitoisuus on suuri. Biopolttoaineiden yhteisiä ominaisuuksia ovat tavallisesti suuret haihtuvien määrät, alhaiset syttymislämpötilat ja

jäännöskoksin lyhyt palamisaika. Polttoaineet, joiden haihtuvien määrä on vähäinen ja jäännöskoksilla on pitkä palamisaika, soveltuvat paremmin kiertoleijupolttoon kuin kerrosleijupolttoon. Esimerkiksi hiilen polttaminen kerrosleijukattilassa vaatisi pidemmän palamisajan jäljelle jäävän koksin vuoksi. Lisäksi hiilen poltossa haihtuvien määrä on 20–30 prosenttia, jolloin palamattomien aineiden määrä jää usein vähintään 5 prosenttiin. Hiilen poltto vaatii tavallisesti pidemmän palamisajan, joka on saavutettavissa kiertoleijukattilalla. (Huhtinen 2000, 159,162.)

Leijupetikattilassa käytetyn leijutusmateriaalin raekoko on keskimäärin 1 mm, jolloin leijutusnopeus on mahdollista pitää 1–3 m/s suuruisena. Leijutusnopeus on leijupetikattilassa pienempi ja leijutusmateriaalin raekoko on suurempi kuin kiertopetikattilassa, sillä tavoitteena on pitää leijutusmateriaali ja polttoaine selkeänä kerroksena kattilan alaosassa. (Raiko et al 2002, 490.) Muita leijupetikattilan toiminta-arvoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Leijupetikattilan ominaisuuksia. (Huhtinen 2000, 159.)

Tilavuusrasitus	0,1–0,5 MW/m^3
Poikkipintarasitus	0,7–3 MW/m^2
Pedin painehäviö	6,0–12 kPa
Leijutusnopeus	0,7–2 m/s
Pedin korkeus	0,4–0,8 m
Primääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Pedin lämpötila	700–1000 °C
Kaasutilan lämpötila	700–1200 °C
Sekundääri-ilman osuus	30–70 %
Ilmakerroin	1,1–1,4
Pedin tiheys	1000–1500 kg/m^3

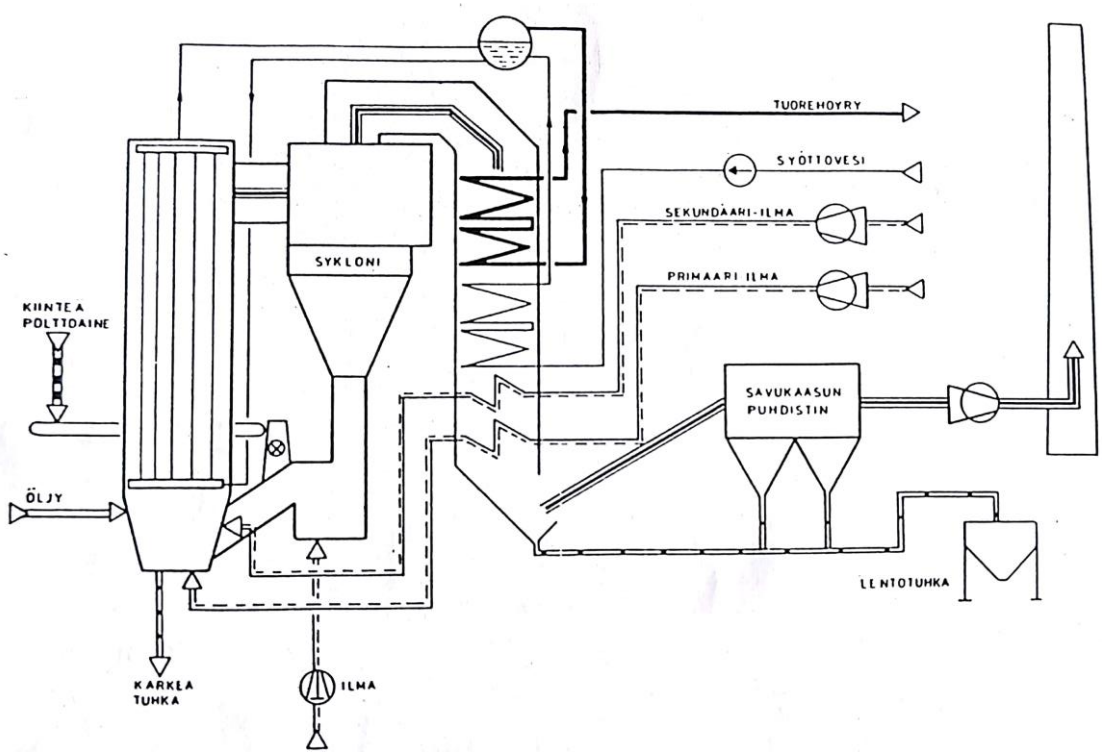
2.3 Kiertopetikattilat

Kiertopetikattilan rakennetta ja toimintaa esitetään kuvassa 3. Polttoaine syötetään tavallisesti sekoittamalla se syklonista palaavan hiekan joukkoon laskuputken kohdalla polven jälkeen. Polttoaine on myös mahdollista syöttää kattilaan etuseinän kautta.

Palamisilma koostuu primääri- ja sekundääri-ilmasta. Primääri-ilma tuodaan kattilaan pohjasuuttimien avulla. Primääri-ilman osuus on kokonaisilmasta noin 40–60 %. Primääri-ilman syötön avulla voidaan säätää kattilan palamisilman määrää, mutta on pidettävä huolta, ettei minimileijutusnopeus leijutusmateriaalille alitu. Minimileijutusnopeus tarkoittaa sitä virtausnopeutta, jolla virtauksen petiin aiheuttama vastusvoima on yhtä suuri kuin pedin painovoima. Sekundääri-ilman syötöllä voidaan säätää vapaammin palamiseen vaadittavaa ilmamäärää. Se tuodaan kattilaan muutaman metrin päähän arinan yläpuolelle. Kiertopetikattilan leijutusnopeus on suurempi ja leijutusmateriaali on raekooltaan pienempää kuin leijupetikattilassa. Kiertopetikattila toimii leijutusalueella, jossa hiukkaset sekoittuvat tehokkaasti ja virtauksella on suuri pyörteisyys. Pedin tiheys on sitä harvempi, mitä korkeammalle liikutaan pedissä virtauksen suunnassa. Näin ollen kiertopedistä ei erotu leijupedin kaltaisesti selvää pintaa, koska osa hiukkasista kulkeutuu savukaasujen mukana ulos. Savukaasujen mukana kulkeutuneet hiukkaset erotetaan erottimessa eli syklonissa, jossa kiertävä petimateriaali ja palamattomat hiukkaset palautetaan tulipesän pohjalle. Savukaasun on virrattava sykloniin nopeasti eli noin 20 m/s, jotta erotuskyky on hyvä. Syklonin alla sijaitsevalla polvella pidetään huolta, etteivät savukaasut pääse virtaamaan sykloniin tulipesästä. Palautussyklonissa liian hienojakoinen tuhka poistuu savukaasujen mukana ja se erotetaan savukaasuista tavalliseen tapaan esimerkiksi sähkösuodattimella. Savukaasukanavassa sijaitsee syklonin jälkeen suurin osa veden- ja ilmanesilämmittimistä sekä tulistimista. (Huhtinen 2000, 159-162.)

Kiertopetikattilalla on laajempi polttoainevalikoima, hiilen poltossa parempi hyötysuhde ja matalammat typpi- ja rikkioksidipäästöt kuin leijupetikattilalla. Toisaalta kiertoleijukattila on monimutkaisemman rakenteen takia leijupetikattilaa kalliimpi. (Raiko et al 2002, 490-491.) Kiertopetikattilan suuren lämpökapasiteetin vuoksi kattilalla voidaan polttaa kosteita ja huonolaatuisia polttoaineita sekä samalla polttoaine-erien laatuvaihtelut tasoittuvat niin kuin leijupetikattilan tapauksessa. (Huhtinen 2000, 161-162.) Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta arvoja on esitetty taulukossa 2. Taulukosta huomataan, että leijutusnopeus on huomattavasti suurempi kuin leijupetikattilalla. Lisäksi

poikkipintarasituksen (=polttoaineteho poikkipinta-alaa kohti) ja painehäviön arvot ovat suurempia. Kiertopetikattilan pedin tiheys on huomattavasti harvempi kuin leijupetikattilalla. (Huhtinen 2000, 159.)



Kuva 3. Kiertoleijukattilan toiminta ja rakenne. (Huhtinen 2000, 160.)

Taulukko 2. Kiertopetikattilan ominaisuudet. (Huhtinen 2000, 161.)

Tilavuusrasitus	0,1–0,3 MW/m^3
Poikkipintarasitus	0,7–5 MW/m^2
Kokonaispainehäviö	10–15 kPa
Leijutusnopeus	3–10 m/s
Primääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20–400 °C
Pedin lämpötila	800–950 °C
Loppulämpötila	850–950 °C
Sekundääri-ilman osuus	25–65 %
Ilmakerroin	1,1–1,3
Pedin tiheys	10–100 kg/m^3

Kiertopetikattilalla saavutetaan pidempi palamisaika, koska palamattomat polttoainepartikkelit palautuvat syklonin kautta takaisin tulipesään. Tämän takia palamishyötysuhde on parempi ja esimerkiksi hiilenpoltto onnistuu paremmin kuin leijupetikattilalla. Palamislämpötilan alhaisuuden vuoksi typenoksidien muodostuminen on vähäistä. Jos kuitenkin typenoksidien päästöjä halutaan vähentää, voidaan käyttää NCNR – tekniikkaa (Non Catalytic NO_x Removal), jonka avulla päästöt saadaan ilman katalyyttejä tasolle 50 ppm. Kuten leijupetikattilan tapauksessa, myös kiertopetikattilan rikinpoisto onnistuu yksinkertaisesti kalkin syötöllä tulipesään. (Huhtinen 2000, 162.)

3 KATTILAHYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

3.1 Palamisen puhtaus

Savukaasujen häkäpitoisuuden avulla voidaan arvioida palamisen puhtautta. Häkää eli hiilimonoksidia muodostuu, kun hiiltä sisältävät aineet palavat liian kuumassa lämpötilassa tai liian pienellä ilmakertoimella. (Energiateollisuus 2012, 33.) Hiilimonoksidia muodostuu alla olevan reaktioyhtälön mukaisesti (Raiko et al 2002, 36):

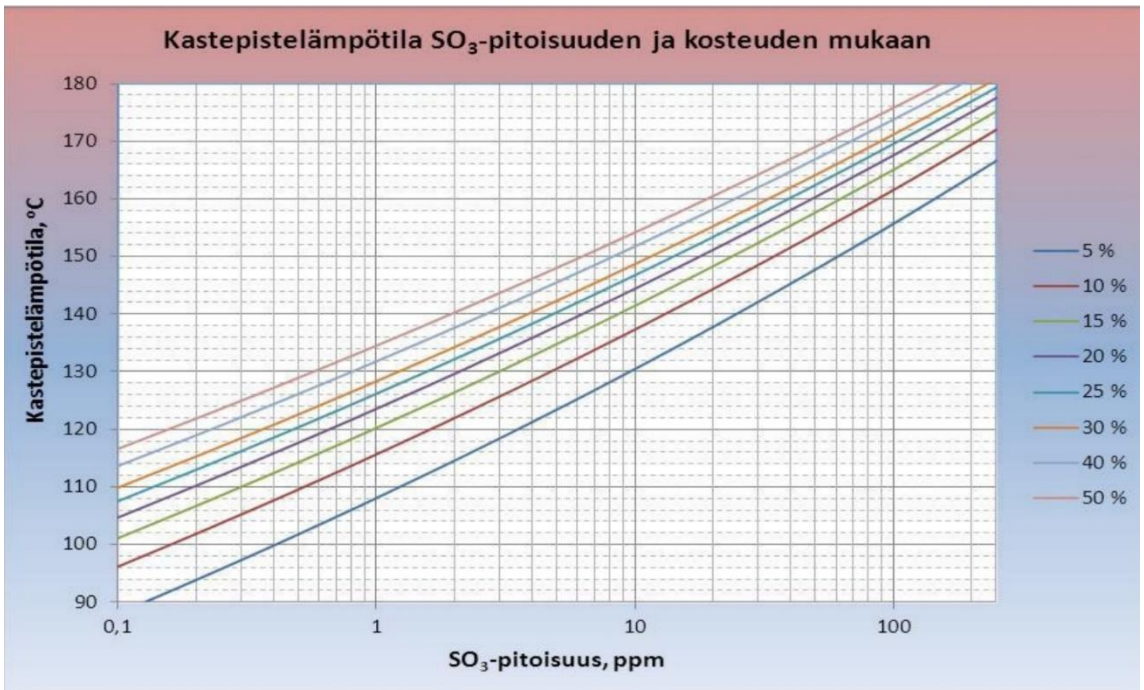
$$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$$

Häkäpitoisuuden vähentämisellä voidaan pienentää muiden haitallisten päästöjen määrää lukuun ottamatta typenoksidien päästöjä. Hiilimonoksidin vähentämisestä saatu häviövähennys on kuitenkin pieni etu etenkin pienen kokoluokan kattiloissa, koska hiilimonoksidin vähentämiseen vaaditaan suurempaa ilmakerrointa, joka omalta osaltaan huonontaa kattilan hyötysuhdetta sitä enemmän, mitä suurempi hiilimonoksidin vähentämisestä saatu etu on. Täten hyötysuhteen optimitoiminta-arvot ovat kaukana päästöjen optimitoiminta-arvoista. (Energiateollisuus 2012, 33.)

3.2 Savukaasun lämpötila ja jäännöshappipitoisuus

Savukaasun lämpötilan alentaminen parantaa kattilan hyötysuhdetta, mutta samalla täytyy ottaa huomioon, ettei rikkihapon kastepiste alitu (Energiateollisuus 2012, 33-34). Rikkihappoa muodostuu, mikäli savukaasuissa on rikkitrioksidia (SO_3) ja savukaasujen lämpötila on liian alhainen. Rikkihapon kastepistelämpötilan riippuvuus rikkitrioksidipitoisuuteen ja vesihöyryn kosteuteen esitetään kuvassa 4. Huomataan, että mitä enemmän rikkitrioksidia savukaasuissa on ja mitä suurempi on vesihöyryn tilavuusosuus, sitä korkeammassa lämpötilassa rikkihappoa alkaa tiivistyä. Huolehtimalla riittävän korkeasta savukaasujen lämpötilasta voidaan estää rikkihapon tiivistyminen. Jos

rikkihappo pääsee tiivistymään kattilan kylmimpien osien lämpöpinnoille, se aiheuttaa pinnoilla syöpymistä. (Huhtinen 2000, 99–100.)



Kuva 4. Kastepistelämpötilan kuvaajat rikkitrioksidipitoisuuden ja kosteuden mukaan. Vesihöyryn tilavuusosuutta savukaasussa on kuvattu eri värisillä viivoilla, joiden selitysteksti on kuvassa oikealla. (Energiateollisuus 2012, 19.)

Savukaasujen jäännöshappipitoisuuden suurentuminen pienentää saatavaa kattilahyötysuhdetta. Jos ilmakerroin eli todellisen ilmamäärän suhde teoreettiseen ilmamäärään on yksi, savukaasuissa ei ole happea. Jäännöshappipitoisuus savukaasuissa ja myös savukaasuhäviö alkavat kasvaa, kun lisätään palamisilmamäärää yli teoreettisen minimiarvon eli suurennetaan ilmakerrointa. Ilmakertoimen kasvattaminen lisää palamiseen osallistumattoman ilman määrää kattilassa, jolloin savukaasuvirtaus ja siten myös savukaasuhäviö kasvavat. Ilmakertoimen pienentämisessä on tärkeää, että pidetään samalla huolta palamisen laadusta, etteivät epätäydellisen palamisen seurauksena syntyneet palamattomien kaasujen häviöt pääse kasvamaan enemmän kuin savukaasuhäviöitä saadaan vähennettyä. (Huhtinen 2000, 86–87, 108.) Taulukossa 3 esitetään tavallisimpien polttoaineiden polton ilmakertoimia. Yleensä huonosti palavat

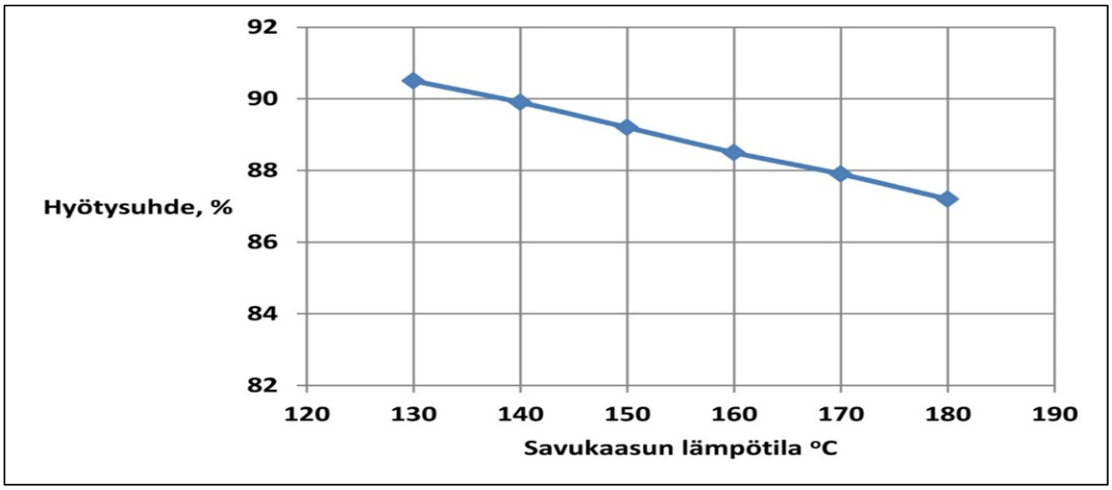
kiinteät polttoaineet vaativat suuremman ilmakertoimen kuin kaasumaiset ja nestemäiset polttoaineet (Huhtinen 2000, 86).

Taulukko 3. Polton ilmakertoimet eri polttoaineilla. (Huhtinen 2000, 86.)

Kattilan polttoaine	Polton ilmakerroin
Hiili	1,15–1,35
Kaasu	1,02–1,10
Raskasöljy	1,03–1,10
Turve (kosteus 50 %)	1,15–1,35
Puujäte (kosteus 60 %)	1,15–1,50
Jätelipeä	1,10–1,25

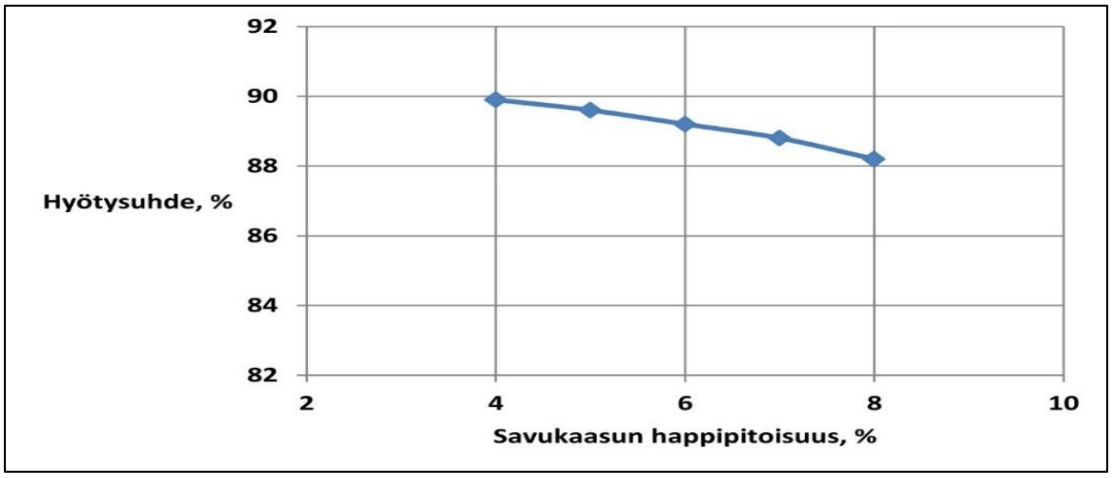
3.3 Kattilan hyötysuhde

Savukaasun happipitoisuus ja loppulämpötila ovat suurimmat tekijät, jotka vaikuttavat kattilan hyötysuhteeseen. (Energiateollisuus 2012, 34). Kuvasta 5 huomataan, että savukaasun lämpötilan kasvaessa hyötysuhde pienenee huomattavasti. 30 °C:n kasvu savukaasujen loppulämpötilassa merkitsee noin kahden prosenttiyksikön muutosta hyötysuhteessa. Savukaasujen loppulämpötila voi nousta esimerkiksi sen vuoksi, että kattilan lämpöpinnoille muodostunut likaantumiskerros haittaa lämmönsiirtoa. (Huhtinen 2000, 108).



Kuva 5. Hyötysuhde savukaasun lämpötilan funktiona. (Energiateollisuus 2012, 34.)

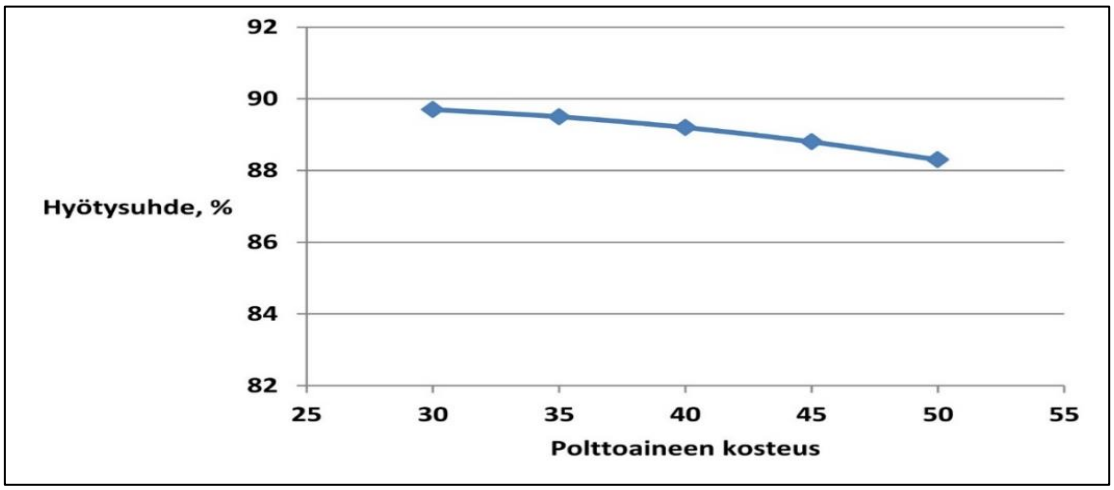
Savukaasujen happipitoisuuden vaikutusta hyötysuhteeseen esitetään kuvassa 6. Kuvasta 6 huomataan, että hyötysuhde pienenee noin kaksi prosenttiyksikköä, kun savukaasujen happipitoisuus kasvaa neljä prosenttiyksikköä. Savukaasujen suuri jäännöshappipitoisuus johtuu liian suuresta ilmakertoimesta, jolloin suuri osa palamisilman hapesta ei kulu palamiseen vaan virtaa savukaasujen mukana kattilasta ulos (Huhtinen 2000, 87).



Kuva 6. Hyötysuhde savukaasun happipitoisuuden funktiona. (Energiateollisuus 2012, 35.)

Kattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat savukaasun lämpötilan ja happipitoisuuden ohella myös polttoaineen kosteus ja palamatta jäävän kaasun määrä. Lisäksi palamatta jääneen polttoaineen määrä savukaasujen mukana kulkeutuvassa lentopölyssä ja kattilan pohjalle jäävässä pohjatuhkassa vaikuttavat hyötysuhteeseen. (Energiateollisuus 2012, 35.)

Kuvassa 7 esitetään polttoaineen kosteuden vaikutus hyötysuhteeseen. Kuvassa otetaan huomioon pelkkä kosteuden suora vaikutus eikä esimerkiksi kosteuden vaikutusta palamisen laatuun. (Energiateollisuus 2012, 35.) Polttoaineen kosteuden vaikutusta käsitellään tarkemmin luvussa 3.4. Kuvasta 7 huomataan, että hyötysuhde laskee vajaat kaksi prosenttiyksikköä, kun polttoaineen kosteus lisääntyy 20 prosenttiyksikköä.



Kuva 7. Hyötysuhde polttoaineen kosteuden funktiona. (Energiateollisuus 2012, 35.)

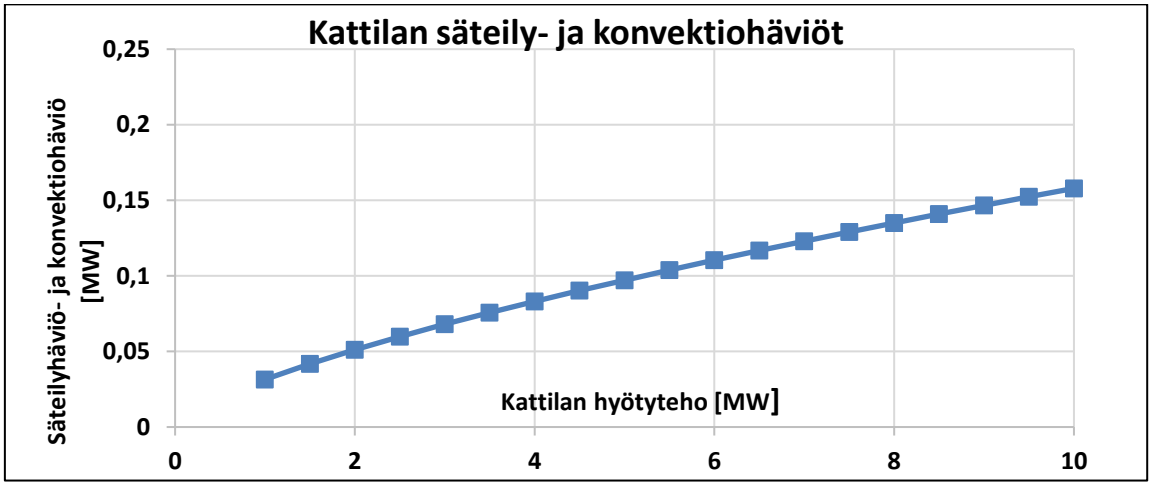
Palamattomat kaasut koostuvat tavallisesti epätäydellisesti palaneesta hiilestä eli hiilimonoksidista tai erilaisista hiilivedyistä. Palamattomien kaasujen vaikutus hyötysuhteeseen on varsin pieni. Noin 0,5 prosentin hiilimonoksidipitoisuus savukaasuissa vaikuttaa hyötysuhteeseen heikentävästi vain muutaman prosentin verran. (Huhtinen 2000, 105.)

Savukaasujen mukana kulkeutuvan lentotuhkan ja kattilan tulipesän pohjatuhkan hehkutushäviö eli palamatta jääneen polttoaineen osuus tuhkassa saadaan määritettyä laboratoriossa polttamalla tuhkanäytteitä. Hehkutushäviöön vaikuttavat laitteiston säädöt, huoltoväli sekä polttoaine ja polttotekniikka. Kun käytetään nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita, hehkutushäviö on tyypillisesti pienempi kuin käytettäessä kiinteitä polttoaineita. Huonolaatuiset kiinteät polttoaineet, joilla on alhainen lämpöarvo voivat nostaa palamattomien kiintoaineiden häviöitä useaan prosenttiin. (Huhtinen 2000, 106–107.)

Kattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat lisäksi säteily- ja johtumishäviöt. Ne syntyvät, kun kattilan ja sitä ympäröivän ympäristön välillä on suuri lämpötilaero. Tavallisesti isoilla kattiloilla on suhteessa pienemmät säteily- ja johtumishäviöt kuin pienillä kattiloilla. Säteily- ja johtumishäviöihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi eristysmateriaalien käytöllä.

Vaikka kattilat ovat yleensä hyvin eristettyjä, häviöitä syntyy aina jonkin verran. Kattilan lämmönsiirtoalan kautta siirtyvä lämpöhäviö saadaan osittain talteen, jos kattilan palamisilma otetaan kattilahuoneesta. (Huhtinen 2000, 110.)

Kuvasta 8 voidaan arvioida säteily- ja konvektiohäviöiden suuruutta. Kuvassa esitetään säteily- ja konvektiohäviön kuvaaja kattilan hyötytehon funktiona. Kuvaaja on muodostettu vastaamaan leijukerrospolton olosuhteita, koska kuvaajan yhtälöä on käytetty kuormitustasoselvityksessä Excel-pohjaisessa hyötysuhdelaskimessa säteily- ja konvektiohäviöiden suuruuden selvittämiseen (SFS-EN 12952-15, 38-40.)



Kuva 8. Kattilan säteily- ja konvektiohäviöt kattilan hyötytehon funktiona.

Kuvasta 8 huomataan, että kattilan hyötytehon kasvaessa myös häviöt kasvavat. Häviön suuruus on noin 0,05 MW, kun hyötyteho on 2 MW. Hyötyteholla 10 MW häviön suuruus on noin 0,16 MW.

3.4 Polttoaineen kosteus

Polttoaineen kosteus on suuri tekijä kattilan tehokkuuden kannalta, sillä se vaikuttaa suoraan polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Tehollinen eli alempi lämpöarvo tarkoittaa lämpöarvoa, jossa polttoaineen sisältämä vesi oletetaan höyrystyneeksi palamisen jälkeen. Tehollinen lämpöarvo on siis sitä pienempi, mitä enemmän kosteutta

polttoaineessa on, koska polttoaineen vesimäärän höyrystymiseen kuluu vapautuvaa lämpöenergiaa. (Raiko et al 2002, 121, 123.) Taulukkoon 4 on koottu tavallisimpien polttoaineiden kosteuksia. Taulukosta huomataan, että kiinteät polttoaineet ovat selkeästi kosteampia kuin nestemäiset tai kaasumaiset polttoaineet.

Taulukko 4. Tavallisimpien polttoaineiden kosteuksia. (Huhtinen 2000, 38.)

Polttoaine	Kosteus [%]
Kivihiili	9
Raskas polttoöljy	0,3
Kevyt polttoöljy	0,01
Puu	55
Kuori (mänty ja kuusi)	60
Mustalipeä (mänty ja koivu)	20
Jyrsinturve	50
Maakaasu	-

3.5 Tuhka

Luvussa 3.3 mainitun tuhkan hehkutushäviön lisäksi tuhkan mukana poistunut terminen lämpö ja tuhkan aiheuttamat ongelmat vaikuttavat tehokkuuteen. Kun pohjatuhkaa tai lentotuhkaa poistetaan kattilasta, poistetaan samalla lämpömäärä, joka on sitoutunut tuhkaan palamisen yhteydessä. Tätä kattilasta poistunutta lämpöä kutsutaan tuhkan mukana poistuneeksi termiseksi lämmöksi. (Huhtinen 2000, 108.)

Lisäksi tuhkan aiheuttamat ongelmat voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa kattilan alasajon, jolloin sen tehokkuus heikkenee huomattavasti. Yleisin ongelma esimerkiksi leijukerroskattilassa on tuhkan tai tuhkan ja leijutusmateriaalin sulaminen sekä agglomeroituminen. Agglomeroitumismekanismi voi tapahtua leijutusmateriaalin ja polttoaineen välille, jolloin ne sulautuvat yhteen ja muodostavat samalla yhdisteitä, jotka sulavat alhaisissa lämpötiloissa. Nämä yhdisteet muodostavat kerrostumia eli sintraantuvat kattilan lämpöpinnoille ja heikentävät lämmönsiirtoa. Polttoaineen vähäinen tuhkapitoisuus ja leijutusmateriaalin vaihto tarpeeksi usein estävät agglomeroitumista. (Huhtinen 2000, 287.)

4 LAITOKSEN LEIJUPETIKATTILAN HYÖTYSUHDE

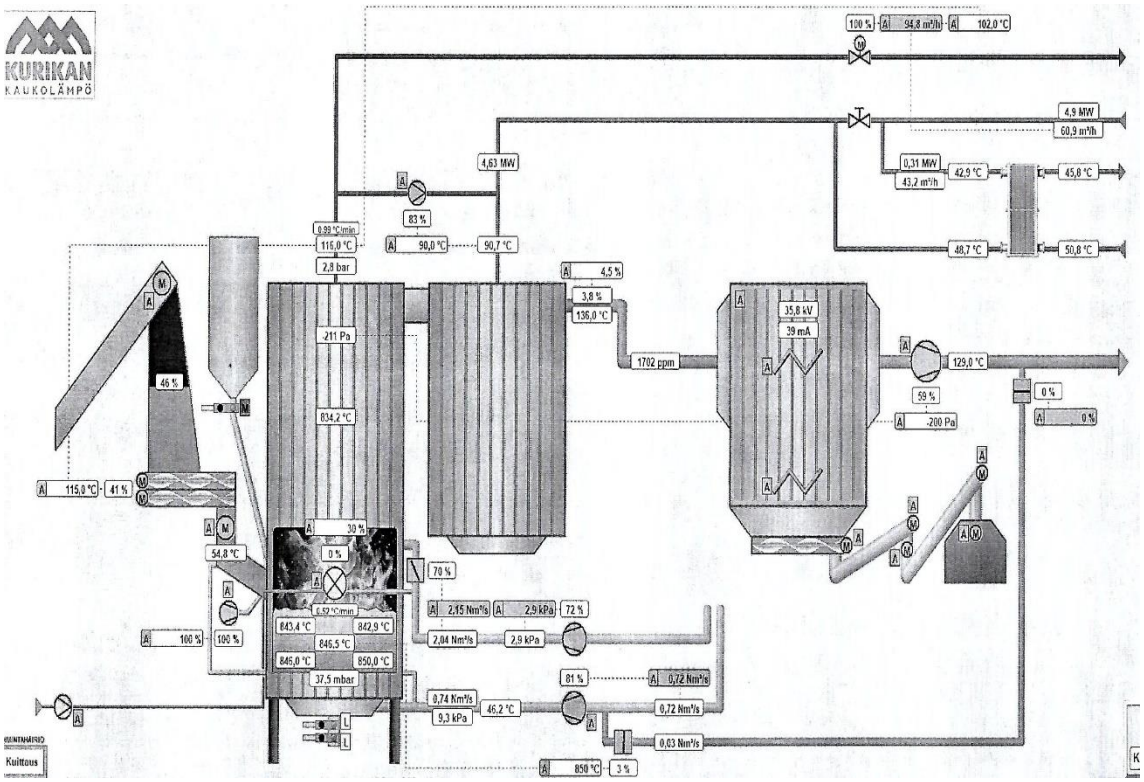
4.1 Leijukerrosprosessi

Työn empiirinen osuus aloitetaan tutustumalla yrityksen leijukerrosprosessin toimintaan. Työn kohteena oleva prosessi esitetään kuvassa 9. Prosessi on yksinkertainen leijukerrosprosessi, jossa käytetään polttoaineteholtaan 6 MW leijupetikattilaa. Polttoaine syötetään kattilaan erillisestä syöttösiilosta ruuvikuljettimien avulla. Prosessissa käytettävä polttoaine on jyrsinturvetta. Polttoaineen syöttösiilon vieressä on leijutusmateriaalina käytettävän hiekan siilo, josta tarpeen tullen voidaan lisätä kattilaan leijutushiekkaa. Käytetty leijutushiekka pohjatuhkineen voidaan poistaa kattilan pohjasta. Kattilassa on lisäksi öljypoltin, jota tarvitaan kattilan käynnistykseen. Öljypolttimen avulla palamisprosessi saadaan alkamaan ja peti pääsee lämpiämään. Kuvasta huomataan, kuinka sekundääri-ilma tuodaan kattilan pohjan yläpuolelle ja leijutuskaasu tuodaan kattilan pohjasta. Primääri-ilmaan sekoitetaan lisäksi savukaasuja, sillä prosessissa on savukaasujen takaisinkierto. Takaisin kierrätettävän savukaasun ja primääri-ilman sekoituksesta käytetään nimeä leijutuskaasu. Takaisinkierron avulla voidaan hillitä kattilassa tapahtuvaa palamista, koska palamiseen reagoimatonta savukaasua johdatetaan kattilaan takaisin samalla, kun leijutuskaasun tilavuusvirta pysyy vakiona. Primääri-ilman tilavuusvirran on sen vuoksi hieman vähennyttävä. Näin savukaasujen tilavuusosuus leijutuskaasussa kasvaa, jolloin palamiseen vaadittava ilma vähenee.

Kattilan jälkeen on lämmönsiirto-osa eli lämmönvaihdin, jossa kuumien savukaasujen lämpöenergia siirtyy lämmönvaihtimen kautta kiertävään kaukolämpöveteen. Palaava kaukolämpövesi palaa verkostosta lämmönvaihtimeen ja poistuu takaisin verkostoon lämpimämpänä. Samassa tilanteessa savukaasujen lämpötila alenee, kun lämpö siirtyy savukaasuista veteen. Verkostosta palaavaa kaukolämpövettä esilämmitetään lisäksi lämmönvaihtimella, joka toimii siten, että savukaasujen puhdistuksessa lämmennyt vesi johdetaan vaihtimeen, jossa lämpö siirtyy palaavaan kaukolämpöveteen. Lämmönvaihdinta kutsutaan työssä lämmöntalteenottovaihtimeksi eli LTO-vaihtimeksi. Vaihtimen avulla voidaan parantaa prosessin hyötysuhdetta, koska savukaasujen

puhdistuksessa lämmenneestä vedestä saadaan talteen lämpöenergiaa, jota voidaan käyttää palaavan kaukolämpöveden lämmittämiseen. (Huhtinen 2000, 184 – 202.)

Lämmönvaihtimen jälkeen on sähkösuodatin, jonne savukaasun hiukkaset etenevät. Sähkösuodattimessa hiukkaset varataan negatiivisesti. Sähkösuodatin perustuu kahteen elektrodiin: emissioelektrodiin ja erotuselektrodiin. Emissioelektrodin voimakkaan sähkökentän avulla hiukkaset saavat varauksen, jonka jälkeen ne liikkuvat emissio- ja erotuselektrodin välisessä sähkökentässä kohti erotuselektrodia, johon ne tarttuvat. Kiinnittyneet hiukkaset poistetaan tämän jälkeen ravistimilla, jonka jälkeen ne kulkeutuvat tuhkasäiliöön. (Huhtinen 2000, 252-253.) Savukaasujen virtausta ylläpidetään sähkösuodattimen jälkeisellä savukaasupuhaltimella.



Kuva 9. Laitoksen leijukerrosprosessin rakenne.

Kuvasta 9 voidaan huomata primääri- ja sekundääri-ilman puhaltimet. Prosessissa on lisäksi monia mittalaitteita. Esimerkiksi kattilan lämmönvaihtimen jälkeen on

hiilimonoksidi- ja jäännöshappimittaus. Savukaasun lämpötilaa mitataan kattilan lämmönvaihtimen ja savukaasupuhaltimen jälkeen.

4.2 Laskentaosuus

Leijupetikattilan hyötysuhde tuli selvittää, jotta voitiin analysoida kuormitustason vaikutusta hyötysuhteeseen. Kuormitustaso määritellään työssä saadun kaukolämpötehon ja lämmöntalteenottovaihtimen saaman tehon summana. Työssä tehtiin Excel-pohjainen hyötysuhdelaskuri, jonka avulla voitiin laskea eri kuormitustasojen hyötysuhteita. Laskentaohjelma esitetään liitteessä 2. Ensimmäiseksi selvitettiin laboratoriomittausten avulla polttoaineen kosteus ja alkuaineanalyysi. Myöhemmin selvitettiin myös tuhkanäytteiden avulla tuhkan hehkutushäviö pohjatuhkassa ja lentotuhkassa. Työssä käytettiin epäsuoraa menetelmää hyötysuhteen määritykseen, koska leijukerrosprosessi on melko yksinkertainen ja prosessin tila-arvot ovat helposti saatavilla. Epäsuora menetelmä soveltuu hyvin tilanteeseen, kun halutaan lisäksi tietää häviöiden suuruus. Toinen vaihtoehtoinen menetelmä hyötysuhteen laskemiseen on suora menetelmä.

Epäsuora menetelmä tarkoittaa hyötysuhteen määritystä kattilan häviöiden kautta. Sen vuoksi on mahdollista saada parempi käsitys hyötysuhteeseen vaikuttavista häviöistä ja niiden suuruuksista kuin suoralla menetelmällä, joka perustuu kattilaan tuodun energiavirran ja kattilasta saadun lämpövirran suhteeseen. Suoralla menetelmällä tehdyssä hyötysuhdemäärityksessä täytyy tehdä tarkka taseraja, jonka ylimeneviä energiavirtoja tarkastellaan. Suoran menetelmän edut epäsuoraan menetelmään verrattuna ovat esimerkiksi suoraviivaisempi ja yksinkertaisempi laskentatyö. (Huhtinen 2000, 101, 104.)

Hyötysuhteen määrityksessä otettiin huomioon seuraavat häviöt:

- savukaasuhäviö eli savukaasujen terminen lämpö
- palamattoman kaasun häviö
- palamattoman kiintoaineen häviö
- säteily- ja konvektiohäviö

Hyötysuhteen määrityksessä käytetään seuraavia oletuksia:

- palamisilma on kuivaa
- savukaasun normaalitila takaisinkytkennässä on 100 kPa ja 130 °C
- sekundääri- ja primääri-ilman normaalitila on 100 kPa ja 30 °C
- typen määrä ilmassa 3,76
- savukaasujen paine loppulämpötilassa on 100 kPa
- tuhkan mukana poistuva terminen lämpö on merkityksetön.
- palamisilman tuntuva entalpia on merkityksetön
- pohjatuhkan hehkutushäviö on merkityksetön (Liite 1, Testausseloste)

4.3 Laskenta

Tarkempi kuvaus Excel-pohjaisen hyötysuhdelaskurin laskentayhtälöistä esimerkkeineen on liitteessä 3. Hyötysuhdelaskuri on liitteessä 2. Hyötysuhdelaskurin saamat prosessiarvot ovat laskurin vihreissä soluissa ja punaisessa solussa on laskettu epäsuora hyötysuhde. Keltaiset solut eli polttoaineen kosteus ja hehkutushäviö ovat käyttäjän antamia arvoja, koska ne voivat muuttua paljonkin polttoaine-erien mukaan. Laskurin muut osat ovat varsinaista laskuosuutta, joka käydään seuraavaksi läpi.

Liitteessä 1 olevan jyrsinturpeen testausselosteen avulla voitiin muodostaa palamistaulukko, jossa esiintyy jokaisen polttoaineen alkuaineiden massaosuus ja ainemäärä kuivassa polttoaineessa. Palamistaulukko on esitetty liitteessä 3 taulukossa 5. Palamistaulukon viimeisessä sarakkeessa on laskettu hapen tarve palamisreaktioyhtälöiden perusteella. (Raiko et al 2002, 36.)

Laskennassa käytetyt palamisreaktioyhtälö ovat:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

Reaktioyhtälöiden kertoimien avulla voidaan laskea hapentarve, kun reaktio tapahtuu. Esimerkiksi yksi mooli hiiltä reagoi yhden moolin hapen kanssa, jolloin muodostuu yksi mooli hiilidioksidia. Lähtöaineiden kertoimien suhde on sama, jolloin hapen tarve on sama kuin hiilen ja hiilidioksidin ainemäärä.

$$n_{\mathrm{C}} = n_{\mathrm{O_2}} = n_{\mathrm{CO_2}} \tag{1}$$

Vastaavasti vedylle ja rikille saadaan muodostettua seuraavat yhtälöt:

$$n_{\mathrm{O_2}} = \frac{1}{2} n_{\mathrm{H_2}} \tag{2}$$

$$n_{\mathrm{S}} = n_{\mathrm{O_2}} = n_{\mathrm{SO_2}} \tag{3}$$

Savukaasujen koostumus voidaan selvittää, kun tunnetaan reaktioyhtälöt ja lähtöaineiden ainemäärät. Reaktioyhtälöistä saadaan selville savukaasuyhdisteiden ainemäärät. Savukaasutaulukko on esitetty liitteissä 3 taulukossa 7.

Palamisen ilmakerroin voidaan määrittää seuraavasti (Huhtinen 2000, 87):

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2,\text{jäännös (\%)}}} \tag{4}$$

missä

λ	ilmakerroin
$O_{2,\text{jäännös (\%)}}$	hapen tilavuusosuus savukaasuissa [%]

Todellinen hapen ainemäärä lasketaan seuraavasti:

$$n_{\mathrm{O_2,tod}} = n_{\mathrm{O_2,tarve}} \lambda \tag{5}$$

missä

$n_{\mathrm{O_2,tod}}$	todellinen hapen ainemäärä [mol]

$n_{O_2,\text{tarve}}$ palamistaulukon mukainen teoreettinen hapen tarve [mol]

Lasketaan ylijäämähapen ainemäärä seuraavasti:

$$n_{O_2,\text{jäännös}} = (\lambda - 1) n_{O_2,\text{tarve}} \quad (6)$$

missä

$n_{O_2,\text{jäännös}}$ jäännöshapen ainemäärä [mol]

Typen ainemäärä lasketaan seuraavasti (Huhtinen 2000, 358):

$$n_{N_2} = 3{,}76 n_{O_2,\text{tod}} \quad (7)$$

Polttoilmamäärä saadaan ratkaistua seuraavasti:

$$n_{\text{pi}} = n_{\text{tod},O_2} + n_{N_2} \quad (8)$$

missä

n_{pi} todelliseen palamiseen vaadittava polttoilman ainemäärä [mol]

n_{N_2} typen ainemäärä [mol]

Palamisilmataulukko on esitetty liitteessä 3 taulukossa 6.

Lasketaan savukaasukomponenttien massat tunnettujen ainemäärien ja moolimassojen avulla ja muodostetaan yhteenlasku jokaisen komponentin massasta seuraavasti:

$$m_{sk} = n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{SO_2} M_{SO_2} + n_{N_2} M_{N_2} + n_{H_2O} M_{H_2O} + n_{O_2} M_{O_2} \quad (9)$$

missä

m_{sk} savukaasun massa [g]

n_{komp} yhdisteen ainemäärä savukaasuissa [mol]

M_{komp} yhdisteen moolimassa [g/mol]

Kattilaan tulevien ilmavirtojen laskennassa tulee ottaa huomioon, että prosessista saatavat tilavuusvirran arvot ovat normaalitilan olosuhteissa, joten primääri-, sekundääri ja kierrätyssavukaasun tilavuusvirrat tulee ensin muuttaa vastaamaan todellisia olosuhteita. Primääri-ilmalle voidaan muodostaa yhtälö seuraavasti:

$$q_{v,\mathrm{prim}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{prim,norm}}}{T_{\mathrm{norm}}} T_{\mathrm{prim}}}{\frac{q_{v,\mathrm{prim,norm}}}{q_{v,\mathrm{prim,norm}} + q_{v,\mathrm{sk,norm}}} p_{\mathrm{prim}}} \tag{10}$$

missä

$q_{v,\mathrm{prim}}$ primääri-ilman tilavuusvirta [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{prim} primääri-ilman paine [Pa]

$q_{v,\mathrm{prim,norm}}$ primääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sk,norm}}$ kierrätettävän savukaasun tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{prim} primääri-ilman lämpötila [K]

Sekundääri-ilman todellinen tilavuusvirta voidaan ratkaista seuraavasti:

$$q_{v,\mathrm{sek}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{sek,norm}}}{T_{\mathrm{norm}}} T_{\mathrm{sek}}}{p_{\mathrm{sek}}} \tag{11}$$

missä

$q_{v,\mathrm{sek}}$ sekundääri-ilman tilavuusvirta [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sek,norm}}$ sekundääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{sek} sekundääri-ilman paine [Pa]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{sek} sekundääri-ilman lämpötila [K]

Kierrätettävien savukaasujen todellisia olosuhteita vastaava tilavuusvirta ratkaistaan seuraavasti:

$$q_{v,\mathrm{sk}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{sk,norm}}}{T_{norm}} T_{\mathrm{sk}}}{\frac{q_{v,\mathrm{sk,norm}}}{q_{v,\mathrm{prim,norm}} + q_{v,\mathrm{sk,norm}}} p_{\mathrm{sk}}} \tag{12}$$

missä

$q_{v,\mathrm{sk}}$ savukaasun tilavuusvirta [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{sk} savukaasun paine [Pa]

$q_{v,\mathrm{prim,norm}}$ primääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sk,norm}}$ kierrätettävän savukaasun tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{sk} savukaasun lämpötila [K]

Lasketaan primääri- ja sekundääri-ilman tiheys seuraavasti:

$$\rho_{\mathrm{prim}} = \frac{p_{\mathrm{prim}}}{RT_{\mathrm{prim}}} \tag{13}$$

ja

$$\rho_{\mathrm{sek}} = \frac{p_{sek}}{RT_{\mathrm{sek}}} \tag{14}$$

missä

ρ_{prim} primääri-ilman tiheys [kg/m^3]

ρ_{sek} sekundääri-ilman tiheys [kg/m^3]

R ilman kaasuvakio [287,0619 J/kgK] (Koponen 2016, 12.)

Ratkaistaan kierrätettävien savukaasujen tiheys seuraavasti:

$$\rho_{\mathrm{sk}} = \frac{p_{\mathrm{sk}}}{\frac{R_{\mathrm{u}}}{M_{\mathrm{sk}}} T_{\mathrm{sk}}} \tag{15}$$

missä

ρ_{sk} savukaasun tiheys [kg/m^3]

R_{u} yleinen kaasuvakio [8,314 kJ/kmolK] (Koponen 2016, 7.)

M_{sk} savukaasun moolimassa [g/mol]

p_{sk} savukaasun paine [Pa]

T_{sk} savukaasujen lämpötila [K]

Massavirrat saadaan lopulta ratkaistua kertomalla tiheys tilavuusvirralla:

$$q_m = q_v \rho \tag{16}$$

missä

q_m massavirta [kg/s]

q_v tilavuusvirta [m^3/s]

ρ tiheys [kg/m^3]

Kattilan sisään tulevat ilmavirrat on esitetty liitteessä 3 taulukossa 8.

Lopulta voidaan laskea massavirrat yhteen, jolloin tuloksena saadaan kattilaan kulkeutuva palamisilman massavirta. Savukaasua ei oleteta palamisilmaksi.

$$q_{m,\mathrm{i,tot}} = q_{m,\mathrm{prim}} + q_{\mathrm{m,sek}} \tag{17}$$

missä

$q_{m,\mathrm{i,tot}}$ polttoilman kokonaismassavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{prim}}$ primääri-ilman massavirta [kg/s]

$q_{\mathrm{m,sek}}$ sekundääri-ilman massavirta [kg/s]

Palamisilman energiavirta voidaan laskea, kun tiedetään ilman tuntuva entalpia tietyssä lämpötilassa ja palamisilman massavirta.

$$E_{\mathrm{pi}} = q_{m,\mathrm{i,tot}} H_{\mathrm{i}} \tag{18}$$

missä

E_{pi} Palamisilman energiavirta [kW]

H_{i} Ilman tuntuva entalpia [1,86 kJ/kg, 300 K] (Koponen 2016, 12.)

Huomataan, että palamisilman tuntuvan entalpia on pieni, joten palamisilman energiavirta on varsin vähäinen. Ei oteta energiavirtaa huomioon laskuissa.

Polttoaineen massavirta voidaan nyt laskea todellisen sisään menevän palamisilman ja määrältään 1 kg polttoaineen vaatiman palamisilman avulla seuraavasti:

$$q_{m,\mathrm{pa}} = \frac{q_{m,\mathrm{i,tot}}}{m_{\mathrm{pi}}} m_{\mathrm{pa}} \tag{19}$$

missä

$q_{m,\mathrm{pa}}$ polttoaineen massavirta [kg/s]

m_{pi} todellisen polttoilman massa, jolla 1 kg polttoainetta palaisi [kg]

m_{pa} polttoaineen massa [kg]

Savukaasujen massavirta ulos voidaan ratkaista kattilan massataseen avulla, kun tiedetään kattilan sisään menevät massavirrat. Massataseyhtälö voidaan johtaa yhtälömuotoon, jonka avulla voidaan ratkaista ulos menevän savukaasun massavirta seuraavasti:

$$q_{m,\mathrm{in}} = q_{m,\mathrm{out}} \tag{20}$$

missä

$q_{m,\mathrm{in}}$ sisään menevä massavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{out}}$ ulos menevä massavirta [kg/s]

Ratkaistaan savukaasun massavirta seuraavasti:

$$q_{m,\mathrm{sk,out}} = q_{m,\mathrm{pa}} + q_{m,\mathrm{i,tot}} + q_{m,\mathrm{sk,kierr}} \tag{21}$$

missä

$q_{m,\mathrm{sk,out}}$ varsinainen kattilasta ulos menevän savukaasun massavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{sk,kierr}}$ takaisin kattilaan palautetun savukaasun massavirta [kg/s]

Kuivan savukaasun massavirta saadaan, kun vähennetään veden massavirta savukaasuista seuraavasti:

$$q_{m,\mathrm{sk,k}} = q_{m,\mathrm{sk,ulos}} - m_{\mathrm{H_2O}} \frac{q_{m,\mathrm{pa}}}{m_{\mathrm{pa}}} \tag{22}$$

missä

$q_{m,\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun massavirta [kg/s]

$m_{\mathrm{H_2O}}$ veden massa savukaasuissa [kg]

Kuivien savukaasujen tilavuusvirta saadaan kuivien savukaasujen massavirran ja tiheyden osamääränä. Savukaasujen tiheys voidaan ratkaista seuraavasti:

$$\rho_{\mathrm{sk,k}} = \frac{p_{\mathrm{sk,out}}}{\frac{R_{\mathrm{u}}}{M_{\mathrm{sk,k}}} T_{\mathrm{sk,out}}} \tag{23}$$

missä

$\rho_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun tiheys [kg/m^3]

$M_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun moolimassa [kg/kmol]

$T_{\mathrm{sk,out}}$ ulos menevän savukaasun lämpötila [K]

$p_{\mathrm{sk,out}}$ ulos menevän savukaasun paine [Pa]

Lasketaan kuivien savukaasujen tilavuusvirta seuraavasti:

$$q_{v,\mathrm{sk,k}} = \frac{q_{m,\mathrm{sk,k}}}{\rho_{\mathrm{sk,k}}} \tag{24}$$

missä

$q_{v,\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun tilavuusvirta [m^3/s]

Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti voidaan ratkaista käyttäen Shomaten yhtälöä seuraavasti (Webbook Nist):

$$c_p(x) = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + \frac{E}{t^2} \tag{25}$$

$$t = \frac{T_{\mathrm{sk,out}}}{1000} \tag{26}$$

$c_p(x)$ savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [J/molK]

$A - E$ aineelle ominaiset kertoimet

t savukaasun lämpötila [K/1000]

Kaikkien yhdisteiden ominaiset kertoimet ($A - E$) esitetään liitteessä 3 taulukossa 9.

Savukaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetit ovat taulukoituna liitteessä 3 taulukossa 10.

Lasketaan ja muodostetaan taulukko savukaasukomponenttien massaosuuksista savukaasussa, kun tunnetaan savukaasun massa sekä savukaasuyhdisteiden ainemäärät ja moolimassat.

$$m - \% = \frac{m_{\mathrm{komp}}}{m_{\mathrm{sk}}} 100 \tag{27}$$

missä

$m - \%$ aineen massaosuus [%]

m_{komp} savukaasukomponentin massa [kg]

Savukaasukomponenttien massaosuudet ovat taulukoituna liitteessä 3 taulukossa 11.

Lopulta jokaisen komponentin ominaislämpökapasiteetti kerrotaan komponentin massaosuudella ja nämä tulokset lasketaan yhteen, jolloin saadaan tulokseksi savukaasuseoksen ominaislämpökapasiteetti.

Lasketaan savukaasun ominaislämpökapasiteetti seuraavasti:

$$\sum c_{p,\text{komp}} x_{\text{komp}} = c_{p,\text{sk}} \tag{28}$$

missä

$c_{p,\text{komp}}$ savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg K]

x_{komp} savukaasukomponentin massaosuus

$c_{p,\text{sk}}$ koko savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg K]

Aloitetaan häviöiden määritys suurimmalla häviöllä, eli savukaasuhäviöllä. Savukaasuhäviö voidaan laskea seuraavalla tavalla. Referenssilämpötilaksi on oletettu 25 °C.

$$\Phi_{\text{sk}} = q_{m,\text{sk,out}} c_{p,\text{sk}} \left(T_{\text{sk,out}} - T_{\text{ref}}\right) \tag{29}$$

missä

Φ_{sk} savukaasuhäviö [kW]

T_{ref} referenssilämpötila [K]

Palamattomien kaasujen häviö ratkaistaan seuraavasti (Huhtinen 2000, 105):

$$\Phi_{\text{pal.kaas.häv}} = x_{\text{CO}} H_{\text{CO}} q_{v,\text{sk,k}} \tag{30}$$

missä

$\Phi_{\text{pal.kaas.häv}}$ palamattomien kaasujen häviö [MW]

x_{CO} hiilimonoksidin pitoisuus savukaasuissa

H_{CO} hiilimonoksidin palamisreaktion lämpöarvo (10,7 MJ/kg) [MJ/kg]

Hiilimonoksidin palamisreaktio voidaan kirjoittaa seuraavasti (Raiko et al 2002, 32):

$$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$$

Palamattomien kiintoaineiden häviö saadaan, kun tiedetään tuhkan massavirta, hehkutushäviö ja hiilen lämpöarvo. Hehkutushäviön suuruudeksi saatiin laboratoriomittausten perusteella 8 prosenttia. Lasketaan tuhkan massavirta seuraavasti:

$$q_{m,\text{tuhka}} = q_{m,\text{pa}} x_{tuhka,pa}(1 - x_{\text{kosteus}}) \tag{31}$$

missä

$q_{m,\text{tuhka}}$ tuhkan massavirta [kg/s]

$x_{tuhka,pa}$ tuhkan osuus polttoaineessa

x_{kosteus} polttoaineen kosteus

Lasketaan tuhkan ja tuhkan mukana poistuneen palamiskelpoisen hiilen massavirta seuraavasti:

$$q_{m,\text{tuhka+hiili}} = q_{m,\text{tuhka}}(1 + x_{\text{hehk.häv}}) \tag{32}$$

missä

$q_{m,\text{tuhka+hiili}}$ tuhkan ja tuhkan mukana kulkeutuvan hiilen massavirta [kg/s]

$x_{\text{hehk.häv}}$ hehkutushäviö (8%) [%]

Lasketaan hiilen massavirta seuraavasti:

$$q_{m,\text{C}} = q_{m,\text{tuhka+hiili}} x_{\text{hehk.häv}} \tag{33}$$

missä

$q_{m,\text{C}}$ hiilen massavirta [kg/s]

Nyt voidaan laskea häviö, kun tiedetään palamiskelpoisen hiilen massavirta sekä tunnetaan hiilen palamisreaktion lämpöarvo (32,7 MJ/kg). (Huhtinen 2000, 107)

$$\Phi_{\text{pal,kiint.häv}} = q_{m,\text{C}} H_{\text{C}} \tag{34}$$

missä

$\Phi_{\text{pal,kiint.häv}}$ palamattomien kiintoaineiden häviö [MW]

H_{C} hiilen lämpöarvo [MJ/kg]

Säteily- ja konvektiiviset häviöt voidaan laskea yhtälöllä (35), joka on muodostettu vastaamaan leijukerrospolton olosuhteita. Kerroin K yhtälössä on ominainen kerroin, kun olosuhteet vastaavat leijukerrospolttoa. (SFS-EN 12952-15, yhtälö (8.3-42), 39.)

$$\Phi_{\text{sät.häv}} = K {\Phi_{\text{hyöty}}}^{0,7} \tag{35}$$

missä

$\Phi_{\text{sät.häv}}$ Säteily- ja konvektiiviset häviöt [MW]

K kerroin leijukerrospoltolle

$\Phi_{\text{hyöty}}$ Kattilasta saatava hyötyteho [MW]

Lopulta voidaan laskea epäsuora hyötysuhde leijupetikattilalle, kun tunnetaan kattilan hyötyteho ja häviöt. Ratkaistaan hyötysuhde häviöiden ja hyötytehon avulla seuraavasti:

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_{\text{häviöt}}}{\Phi_{\text{tuotu}}} 100 \tag{36}$$

$$\Phi_{\text{tuotu}} = \Phi_{\text{hyöty}} + \Phi_{\text{häviöt}} \tag{37}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_{\text{sk}} + \Phi_{\text{pal.kaas.häv}} + \Phi_{pal.kiint.häv} + \Phi_{\text{sät.häv}}}{\Phi_{\text{hyöty}} + \Phi_{\text{sk}} + \Phi_{\text{pal.kaas.häv}} + \Phi_{\text{pal.kiint.häv}} + \Phi_{\text{sät.häv}}} 100$$

missä

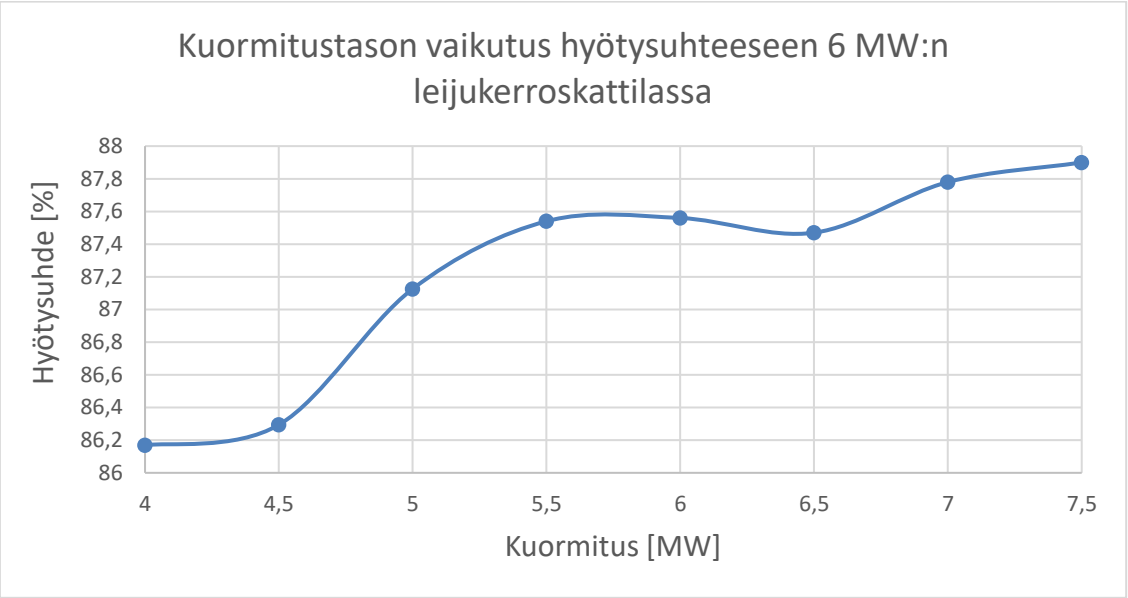
η epäsuora hyötysuhde [%]

Φ_{tuotu} kattilaan tuodut energiavirrat [MW]

$\Phi_{\text{häviöt}}$ kattilan häviöt [MW]

5 TULOKSET

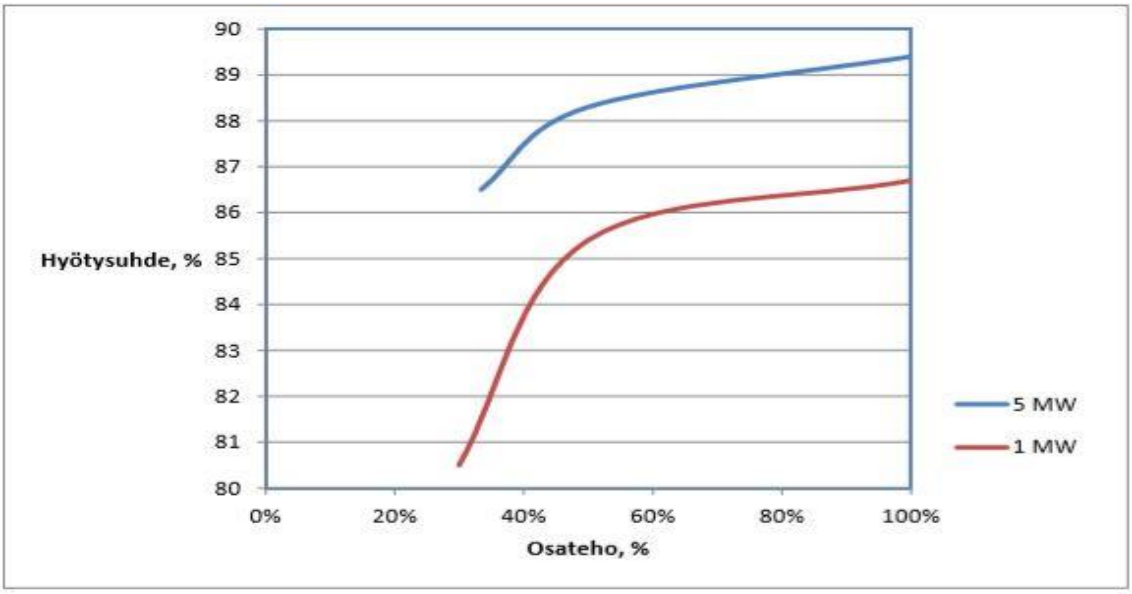
Kattilan hyötysuhde paranee laskentaohjelman mukaan, kun kuormitustasoa nostetaan. Kuvassa 10 esitetään hyötysuhdekäyrä, joka on muodostettu eri kuormitustasojen hyötysuhteiden avulla. Kuvaajan pisteet ovat keskimääräisiä hyötysuhteiden arvoja kyseisellä kuormitustasolla. Kuvaajasta huomataan, että hyötysuhde on alhainen kuormitustasolla 4–4,5 MW, mutta se nousee jyrkästi välillä 4,5–5,5 MW. Hyötysuhde pysyy melko vakiona arvossa 87,6 prosenttia 5,5–6 MW:n välillä, mutta notkahtaa hieman kuormitustason ollessa 6,5 MW. Hyötysuhteen huomattiin olevan toistuvasti hieman alhaisempi arvossa 6,5 MW, eikä selkeitä syitä hyötysuhteen huononemiselle pystytty selittämään. Yksi syy hyötysuhteen huononemiselle saattaa aiheutua prosessin automaatiosta. Voi olla mahdollista, että tietyllä kuormitustasolla prosessin automaatio säätää prosessia siten, että samalla kattilan hyötysuhde huononee. Kuormitustasoa nostamalla arvoon 7,5 MW hyötysuhde lähenee 88 prosenttia, mutta kasvu ei ole enää niin suurta. Tuloksien perusteella kuormitustasolla 5,5–7,5 MW löytyy sopivin kuormitustason arvo. Tällä kuormitustason alueella hyötysuhde pysyy melko vakiona, joten tuotannonaikaisessa ajossa pysyttäisiin hyvällä hyötysuhteen alueella, vaikka kuormitustaso vaihtelisikin hieman. Hyötysuhteen arvojen muutokset eivät ole keskenään kuitenkaan suuria eri kuormitustasoilla, sillä kuvaajasta voidaan huomata ainoastaan 1,7 prosenttiyksikön hyötysuhteen muutos, kun kuormitustaso nousee arvosta 4 MW arvoon 7,5 MW. Alemmat hyötysuhteen arvot alemmilla kuormitustasoilla aiheutuvat siitä, että alemmilla kuormitustasoilla kattilan häviöt ovat suhteessa suurempia kuin suurilla kuormitustason arvoilla.



Kuva 10. Hyötysuhteen kuvaaja kuormitustason funktiona.

Kuvaajan käyttäytyminen oli odotetun kaltainen lukuun ottamatta pientä hyötysuhteen notkahdusta kohdassa 6,5 MW. Kuvassa 11 esitetyissä kuvaajissa huomataan samanlaista käyttäytymistä kuin kuvaajassa kuvassa 10. Täytyy huomioida kuitenkin, että kuvassa 10 esitetyssä kuvaajassa kattilaa on ajettu jo yli 100 prosentin osateholla, joten kuvan 11 kuvaajat eivät saavuta tätä aluetta. Kuvassa 11 esitetään hyötysuhteen kuvaajat kattilan osatehon funktiona. Punaisella värillä on teholtaan 1 MW:n kattila ja sinisellä 5 MW:n kattila. Huomataan, että tehokkaammalla kattilalla suurempien hyötysuhteiden saavuttaminen on todennäköisempää. Lisäksi molemmat kuvaajat saavuttavat suuremman hyötysuhteen suuremmalla osateholla. Molemmat kuvaajat nousevat jyrkästi, kun osateho on alueella 30–50 %. Kuvassa 10 esitetyn polttoaineteholtaan 6 MW:n leijupetikattilan hyötysuhteen kuvaaja nousee jyrkästi, kun osateho on alueella 75 – 90 %. On hyvä muistaa, että kuvan 10 pystyakselilla sijaitseva hyötysuhde vaihtuu vain noin 1,2 prosenttiyksikköä osateholla 75 – 90 %, joka vastaa 4,5 – 5,4 MW:n tehovaihtelua. Kuvan 11 punaisessa kuvaajassa hyötysuhde vaihtuu taas noin 5 prosenttiyksikköä osateholla 30 – 50 % ja sinisessä kuvaajassa 1,5 prosenttiyksikköä samalla osatehovälillä.

Kuvat eivät ole siis suoraan vertailukelpoisia keskenään, vaan analysoitaessa kuvaajien eroja täytyy huomioida akselien arvojen eroavaisuudet.



Kuva 11. Hyötysuhteen kuvaajat osatehon funktiona. (Energiateollisuus 2012, 36.)

Tuloksien epätarkkuutta ei voi poissulkea. Laitoksen leijukerrosprosessin mittalaitteiden mahdollinen epätarkkuus vaikuttaa epäsuoran menetelmän häviöiden suuruuteen, joten sen vuoksi myös kyseisen menetelmän avulla laskettu hyötysuhde voi sisältää epätarkkuutta. Esimerkiksi hiilimonoksidimittauksen arvot vaihtelivat suurella alueella (0–4000 ppm), joten se voidaan olettaa yhdeksi virhelähteeksi. Muita virhelähteitä ovat laskennan oletuksista muodostuneet epätarkkuudet. Esimerkiksi laskennassa oletettiin, että palamisilma on kuivaa ja tuhkan mukana poistunut terminen lämpö ja palamisilman tuntuva entalpia ovat merkityksettömiä. Palamisilman tuntuvan entalpian merkitys on kuitenkin pieni, kuten liitteessä 3 on todettu.

Tuloksista ilmenee kuvassa 10 esitetyn kuvaajan hyötysuhteen kasvaminen, kun kuormitustasoa nostetaan. Kyseinen käyttäytyminen on tavanomaista, kuten myös kuvasta 11 huomataan. Tämän vuoksi voidaan sanoa, että työn menetelmillä ja oletuksilla voitiin toistaa kuvassa 11 tapahtunut käyttäytyminen, joten työn tulokset ovat riittävän tarkkoja.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteena oli selvittää leijukerroskattilan kuormitustason vaikutusta hyötysuhteeseen ja tutkia hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Työn tuloksien perusteella saatiin selville, että suuremmalla kuormitustasolla leijupetikattilan hyötysuhde oli suurempi kuin alemmalla kuormitustasolla. Tällainen tulos on tavanomainen, sillä kuvassa 11 esitetyissä kuvaajissa tulos toistuu.

Työssä tutkittiin useita hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä. Niiden esittelyn avulla pystyttiin tunnistamaan tekijöitä, jotka vaikuttivat työn aikana selvitetyn leijupetikattilan hyötysuhteeseen.

Työ onnistui hyvin, koska tavoitteisiin päästiin ja työn tulokset ratkaisivat ongelmia yrityksen ajomalliin liittyen. Yrityksen tietämys lisääntyi kuormitustason vaikutuksesta kattilan hyötysuhteeseen, mikä helpottaa sopivan tuotannonaikaisen kuormitustason valintaa yrityksen prosessissa. Työssä kehitetyn hyötysuhdelaskentaohjelman avulla oli helppoa havaita, miten eri kuormitustason arvot vaikuttivat hyötysuhteeseen. Hyötysuhdelaskentaohjelma soveltui työhön hyvin, sillä se helpotti hyötysuhteen laskentaa kuormitustasoanalyysiä varten.

Työn tuloksien tarkkuutta olisi voitu parantaa tekemällä erilaisia oletuksia laskentaan liittyen ja käyttämällä uudempia tai tarkempia mittalaitteita prosessin tila-arvojen mittauksessa. Leijukerrosprosessin automaation esittely työssä olisi parantanut laitoksen prosessin hahmottamista ja samalla selittänyt paremmin, miten prosessi toimii ja miten automaatiota hyödynnetään laitoksen prosessien valvontaan.

Jatkotutkimuksena työlle voisi olla automaation toiminnan liittäminen nykyiseen työhön, jolloin työstä muodostuisi parempi kokonaisuus. Prosessin savukaasujen puhdistus ja kattilan käytöstä aiheutuvat päästöt olisivat myös sopivia jatkotutkimuksen aiheita. Lisäksi eri polttoaineiden vaikutus leijupetikattilan hyötysuhteeseen ja sopivaan ajonaikaiseen kuormitustasoon olisi hyvä jatkotutkimuksen aihe, sillä tässä työssä leijupetikattilan polttoaineena käytettiin ainoastaan jyrsinturvetta.

LÄHDELUETTELO

Energiateollisuus 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5…30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. [verkkodokumentti] Saatavissa: https://energia.fi/files/393/Pienten_polttolaitosten_palamisen_hallinta_loppuraportti.pdf

European Standard. 2003. SFS-EN 12952-15 Water-tube boilers and auxiliary installations - Part 15: Acceptance tests. Bryssel: CEN

Huhtinen Markku, 2000. Höyrykattilatekniikka. Oy Edita Ab, Helsinki. ISBN 951-37-3360-2.

Koponen Timo, 2016. Termodynamiikan taulukot. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.

National Institute of standards and technology Chemistry webbook [internetsivusto] saatavissa: https://webbook.nist.gov/chemistry/ (viitattu 12.12.2018)

Raiko Risto, 2002. Poltto ja palaminen. Teknillistieteelliset akatemiat, Helsinki. ISBN 951-666-604-3.

LIITE 1 TESTAUSSELOSTE

Näyte otettu:	15.10.2018
Asiakkaan näytetunnus:	Syrjämäki Oy, 15.10.2018
Näytteen kuvaus:	

Näyte:	Y18006350	Vastaanottopvm:	16.10.2018
Näytetyyppi:	Jyrsinturve	Testauspvm:	22.10.2018-24.10.2018
		Tuote:	Turve polttoaine

Suorite		Tulos		Standardiviite
Tuhkapitoisuus (815 °C)	A	3,6 %, d	*	ISO 1171
Rikkipitoisuus	S	0,19 %, d	*	ASTM D 4239 (mod), SFS-EN ISO 16994
CHN	C	55,4 %, d	*	SFS-EN ISO 16948, SFS-EN 15407, ISO 29541
	H	5,5 %, d	*	SFS-EN ISO 16948, SFS-EN 15407, ISO 29541
	N	1,47 %, d	*	SFS-EN ISO 16948, SFS-EN 15407, ISO 29541
Happipitoisuus (laskennallinen)	O	33,9 %, d		SFS-EN ISO 16993
Lämpöarvomääritys	Kalorimetrinen lämpöarvo	22,10 MJ/kg, d	*	SFS-EN ISO 18125, SFS-EN 15400, ISO 1928
Tehollinen lämpöarvo	Tehollinen lämpöarvo MJ/kg	20,90 MJ/kg, d	*	SFS-EN ISO 18125, SFS-EN 15400, ISO 1928
	Tehollinen lämpöarvo MWh/t	5,806 MWh/t, d	*	SFS-EN ISO 18125, SFS-EN 15400, ISO 1928

* Akkreditoitu

24.10.2018 Minna Salonen
Asiantuntija, kemisti

Tehollinen lämpöarvo lasketaan määritetyillä arvoilla tai alla olevilla vakioilla (jos määrityksiä ei ole tehty):
H% = 5,6 / (O%+N%) = 35 - Turve
H% = 6,2 / (O%+N%) = 41 - Kokopuu
H% = 6,0 / (O%+N%) = 41 - Hakkuutähteet
H% = 5,9 / (O%+N%) = 41 - Kuori
H% = 6,0 / (O%+N%) = 41 - Kesvit

Analyysitulos koskee vain tutkittua näytettä. Asiakirjan osittainen kopioiminen on kielletty.
Mittausepävarmuudet ovat saatavissa pyydettäessä.

Labtium Oy
Koivurannatie 1
40400 Jyväskylä

LIITE 2 HYÖTYSUHDELASKENTAOHJELMA

HYÖTYSUHDELASKURI

											Savukaasun lämpötila:		143	°C				
Polttoaineen määrä:		1	*kg*		**Jäännöshappi:**	4,5	**%**				*Savukaasun lämpötila:*		*416,15*	*K*	*Savukaasujen paine:*		*100000*	*Pa*
Polttoaineen kosteus:		35	**%**		*Ilmakerroin:*	*1,27*												
Kuiva polttoaine:	*650*	*g*																
PALAMISTAULUKKO (Analyysi kuiva-aineesta)														*Savukaasujen koostumus [mol]*				
Aine	*Massa - %*		*Massa [g]*		*M [g/mol]*	*n [mol]*	*O2 -tarve [mol]*							*CO2*	*SO2*	*N2*	*H2O*	*O2*
C	*55,40*		*360,10*		*12,01*	*29,98*	*29,98*							*29,98*				
H2	*5,50*		*35,75*		*2,02*	*17,73*	*8,87*										*17,73*	
O2	*33,90*		*220,35*		*32,00*	*6,89*	*-6,89*											
N2	*1,47*		*9,56*		*28,01*	*0,34*										*0,34*		
S	*0,19*		*1,24*		*32,07*	*0,04*	*0,04*								*0,04*			
tuhka	*3,60*		*23,40*															
yht.	*100,06*		*650,39*				*32,00*											
Veden osuus polttoaineessa:		*350*	*g*														*19,43*	
Happimäärä:	*40,73*	*mol*																
Ylijäämähappi:	*8,73*	*mol*																*8,73*
Typpeä ilmasta:	*153,15*	*mol*														*153,146*		
Polttoilmamäärä:	*193,88*	*mol*	=>	*5,61584*	*kg*	*Per kilo polttoainetta*												
														Savukaasujen massaosuudet [%]				
Polttoaineen massavirta:		*0,71868*	*kg/s*											*CO2*	*SO2*	*N2*	*H2O*	*O2*
														20,08	*0,04*	*65,44*	*10,19*	*4,25*
Sekundääri-ilma sisään:		2,6	**Nm3/s**	=>	*2,40*	*m3/s*	=>	*2,99*	*kg/s*	*polttoilma sisään*								
Primääri-ilma sisään:		0,74	**Nm3/s**	=>	*0,95*	*m3/s*	=>	*1,05*	*kg/s*	=>	*4,04*	*kg/s*						
Savukaasu sisään:		0,07	**Nm3/s**	=>	*0,58*	*m3/s*	=>	*0,06*	*kg/s*									
Sekundääri-ilma paine:		4892	**Pa**										*Oletukset:*					
Primääri-ilma paine:		9009	**Pa**									*1.*	*Palamisilma kuivaa*					
												2.	*Savukaasun normaalitila: 100kPa, 130 °C*					
Sekundääri-ilma lämpötila:		20	**°C**									*3.*	*Sekundääri ja primääri-ilman normaalitila: 100kPa, 30 °C*					
Primääri-ilma lämpötila:		44	**°C**									*4.*	*Kerroin typen ainemäärän laskentaan 3,76*					
												5.	*Savukaasujen paine 100000 Pa (Ilmanpaine)*					
												6.	*Tuhkan mukana poistuva terminen lämpö merkityksetön*					
												7.	*Palamisilman tuntuva entalpia merkityksetön*					
												8.	*Säteilyhäviön ja konvektiivisen häviön arvot laskettu*					
													standardin SFS-EN 12952-15 perusteella.					
Palamattomien kiintoaineiden häviöt												*9.*	*Pohjatuhkan terminen lämpöhäviö merkityksetön*					
Tuhkan massavirt	*0,02*	*kg/s*	*Puhdas tuhka*															
Hehkutushäviö	8,00	**%**																
	0,02	*kg/s*	*Puhdas tuhka + hiili*															
Hiilen määrä	*0,00145*	*kg/s*																
Hiilen lämpöarvo	*32,7*	*MJ/kg*																
Häviö	0,05	**MW**																
Säteilyhäviöt ja konvektiiviset häviöt																		
Kerroin C:		*0,03*																
Häviö		0,12	**MW**															

Kattilan hyötyteho:		**6,63**	**MW**						
	LTO:	**0,36**	**MW**						
Savukaasun massa:			*6569,98*	*g*	*teoreettinen*		*Kuiva:*	*5900,52*	*g*
Savukaasun ominaislämpökapasiteetti:				*1,3534116*	*kJ/kgK*				
Savukaasun moolimassa:			*28,64*	*g/mol*			*Kuiva:*	*30,69*	*g/mol*
Savukaasun ainemäärä:			*229,40*	*mol*	*teoreettinen*				
Savukaasun massavirta:			*4,81*	*kg/s*	*=>*		*Kuiva:*	*4,33*	*kg/s*
								4,88	*m3/s*
Savukaasuhäviö:		**0,77**	**MW**						
CO-mittaus:		**439**	**ppm**						
Palamattomien kaasujen häviö:				**0,02**	**MW**	**Hyötysuhde,e:**		**87,91**	**%**
	Webbook.nist SHOMATE								
Savukaasun ominaislämpökapasiteetit [J/molK]									
CO2	*SO2*	*N2*	*H2O*	*O2*					
41,91	*44,05*	*29,29*	*77,35*	*30,25*					

LIITE 3 LASKUTOIMITUKSET

Palamistaulukko:

Otetaan polttoainetta 1 kg.

Vähennetään polttoaineesta veden osuus (40 %), jotta saadaan kuivan jyrsinturpeen osuus.

$$m_{\mathrm{pa,k}} = m_{\mathrm{pa}} - m_{vesi} = 1 - (1 * 0{,}4)kg = 0{,}6\ kg$$

missä

$m_{\mathrm{pa,k}}$ kuivan polttoaineen massa [g]

m_{pa} polttoaineen massa [g]

m_{vesi} veden massa [g]

Muodostetaan palamistaulukko, jossa on esitetty kuivan jyrsinturpeen alkuaineiden massaosuudet, massat, moolimassat, ainemäärät ja palamiseen vaadittu hapen tarve. Alkuaineen massa saadaan laskettua kertomalla aineen massaosuus kuiva-aineen massalla. Esimerkkinä hiili:

$$m_{\mathrm{C}} = m_{\mathrm{pa,k}} x_{\mathrm{C}} = (0{,}6 * 0{,}5540)kg = 0{,}332\ kg$$

missä

m_{C} hiilen massa [g]

x_{C} hiilen massaosuus

Taulukoidaan loput tulokset.

Ainemäärät saadaan ratkaistua aineen massan ja moolimassan suhteen avulla. Esimerkkinä hiili:

$$n_{\mathrm{C}} = \frac{m_{\mathrm{C}}}{M_{\mathrm{C}}} = \frac{332{,}40\ g}{12{,}01 g/mol} = 27{,}68\ mol$$

missä

n_{C} hiilen ainemäärä [mol]

M_{C} hiilen moolimassa [g/mol]

Taulukoidaan loput tulokset.

Palamisessa tarvittava hapen tarve jokaiselle aineelle saadaan ratkaistua reaktioyhtälöiden avulla. Käytetään esimerkkinä hiiltä.

Hiilen palamisen reaktioyhtälö:

$$\mathrm{C} + \mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{CO_2}$$

Yksi mooli hiiltä reagoi yhden moolin hapen kanssa, jolloin muodostuu yksi mooli hiilidioksidia. Lähtöaineiden kertoimien suhde on sama, jolloin hapen tarve on sama kuin hiilen ja hiilidioksidin ainemäärä.

$$n_{\mathrm{C}} = n_{\mathrm{O_2}} = n_{\mathrm{CO_2}} = 27{,}68\, mol$$

missä

$n_{\mathrm{O_2}}$ hapen ainemäärä [mol]

$n_{\mathrm{CO_2}}$ hiilidioksidin ainemäärä [mol]

Vastaavasti vedyn reaktioyhtälö:

$$\mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O}$$

Moolia vetyä kohti tarvitaan puoli moolia happea, jolloin happea tarvitaan puolet vedyn ainemäärään nähden.

$$n_{\mathrm{O_2}} = \frac{1}{2} n_{\mathrm{H_2}}$$

missä

$n_{\mathrm{H_2}}$ vedyn ainemäärä [mol]

Taulukoidaan loput tulokset ja muodostetaan tuloksista taulukko.

Taulukko 5. Palamistaulukko jyrsinturpeelle.

PALAMISTAULUKKO (Analyysi kuiva-aineesta)					
Aine	Massa - %	Massa [g]	M [g/mol]	n [mol]	O2 -tarve [mol]
C	55,40	332,40	12,01	27,68	27,68
H2	5,50	33,00	2,02	16,37	8,18
O2	33,90	203,40	32,00	6,36	-6,36
N2	1,47	8,82	28,01	0,31	
S	0,19	1,14	32,07	0,04	0,04
tuhka	3,60	21,60			
yht.	100,06	600,36			29,54

<u>Savukaasutaulukko:</u>

Lasketaan seuraavaksi savukaasujen koostumus. Reaktioyhtälöiden perusteella saadaan selville savukaasujen ainemäärä. Esimerkiksi hiilen ja vedyn palamisen reaktioyhtälöistä huomataan, että muodostuneen hiilidioksidin kerroin on sama kuin lähtöainepuolen hiilen. Samalla tavalla huomataan, että lähtöainepuolen vedyn kerroin on sama kuin muodostuneen veden.

$$n_{\mathrm{C}} = n_{\mathrm{CO_2}}$$

$$n_{\mathrm{H_2}} = n_{\mathrm{H_2O}}$$

missä

$n_{\mathrm{H_2O}}$ veden ainemäärä [mol]

Lasketaan loput tulokset muille yhdisteille ja lisätään tulokset taulukkoon.

Savukaasuihin kuuluu reaktiotuotteiden lisäksi myös polttoaineen vesi, yli-ilmakertoimesta johtuva ylijäämähappi sekä ilman typpi.

Polttoaineen veden määrä savukaasuissa on sama kuin se on polttoaineessa. Veden ainemäärä savukaasuissa saadaan massan ja moolimassan suhteen avulla.

$$n_{\mathrm{H_2O}} = \frac{m_{\mathrm{H_2O}}}{M_{\mathrm{H_2O}}} = \frac{400\ g}{18{,}016\ g/mol} = 22{,}2\ mol$$

missä

$M_{\mathrm{H_2O}}$ veden moolimassa [g/mol]

$m_{\mathrm{H_2O}}$ veden massa [g]

Palamisen todellinen happimäärä lasketaan hapen tarpeen ja ilmakertoimen avulla. Ilmakerroin voidaan laskea, kun tunnetaan savukaasujen jäännöshappipitoisuus. Esimerkiksi jos jäännöshappipitoisuus savukaasuissa on 4 prosenttia, saadaan:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2,\text{jäännös (\%)}}} = 1{,}24$$

missä

λ ilmakerroin

$O_{2,\text{jäännös (\%)}}$ hapen tilavuusosuus savukaasuissa [%]

Lasketaan todellinen happimäärä seuraavasti:

$$n_{\mathrm{O_2,tod}} = \quad n_{\mathrm{O_2,tarve}}\lambda = 29{,}54\ mol * 1{,}235 = 36{,}49\ mol$$

missä

$n_{\mathrm{O_2,tod}}$ todellinen hapen ainemäärä [mol]

$n_{\mathrm{O_2,tarve}}$ palamistaulukon mukainen teoreettinen hapen tarve [mol]

Ylijäämähapen ainemäärä saadaan seuraavasti:

$$n_{\mathrm{O_2,jäännös}} = (\lambda - 1) n_{\mathrm{O_2,tarve}} = (1{,}235 - 1) * 29{,}54\ mol = 6{,}95\ mol$$

missä

$n_{\mathrm{O_2,jäännös}}$ jäännöshapen ainemäärä [mol]

Typen ainemäärä savukaasuissa saadaan todellisen happimäärän avulla, kun tiedetään typen osuus ilmakehässä. Käytetään typen kertoimen arvona 3,76. Saadaan:

$$n_{\mathrm{N_2}} = 3{,}76 n_{\mathrm{O_2,tod}} = 3{,}76 * 36{,}49\ mol = 137{,}21\ mol$$

Lopulta polttoilmamäärä saadaan ratkaistua todellisen hapen ainemäärän ja typen ainemäärän avulla:

$$n_{\mathrm{pi}} = n_{\mathrm{tod,O_2}} + n_{\mathrm{N_2}} = 36{,}492\ mol + 137{,}208\ mol = 173{,}70\ mol$$

missä

n_{pi} todelliseen palamiseen vaadittava polttoilman ainemäärä [mol]

$n_{\mathrm{N_2}}$ typen ainemäärä [mol]

Lasketaan polttoilman massa polttoilman ainemäärän ja ilman moolimassan avulla:

$$m_{\mathrm{pi}} = n_{\mathrm{pi}} M_{\mathrm{i}} = 173{,}700\ mol * 28{,}966 \frac{g}{mol} = 5031{,}39\ g$$

missä

M_{i} ilman moolimassa [g/mol]

Muodostetaan palamisilmataulukko tuloksista.

Taulukko 6. Palamisilmataulukko

Veden osuus polttoaineessa	400 g
Todellinen hapentarve	36,49 mol
Ylijäämähappi	6,95 mol
Typpeä ilmasta	137,2 mol
Polttoilmamäärä	173,7 mol

Muodostetaan savukaasutaulukko tuloksista.

Taulukko 7. Savukaasutaulukko.

Savukaasujen koostumus [mol]				
CO2	SO2	N2	H2O	O2
27,68	0,04	137, 52	38,57	6,95

<u>Savukaasun massa ja moolimassa:</u>

Seuraavaksi voidaan laskea savukaasun massa jokaisen savukaasukomponentin avulla. Lasketaan savukaasukomponenttien massat tunnettujen ainemäärien ja moolimassojen avulla ja muodostetaan yhteenlasku jokaisen komponentin massasta.

$$m_{sk} = n_{\mathrm{CO_2}} M_{\mathrm{CO_2}} + n_{\mathrm{SO_2}} M_{\mathrm{SO_2}} + n_{\mathrm{N_2}} M_{\mathrm{N_2}} + n_{\mathrm{H_2O}} M_{\mathrm{H_2O}} + n_{\mathrm{O_2}} M_{\mathrm{O_2}} \ = 5989{,}7\ g$$

missä

m_{sk} savukaasun massa [g]

n_{komp} yhdisteen ainemäärä savukaasuissa [mol]

M_{komp} yhdisteen moolimassa [g/mol]

Kuivan savukaasun massa saadaan, kun vähennetään edellä lasketusta tuloksesta veden massa savukaasuissa.

$$m_{\mathrm{sk,k}} = m_{\mathrm{sk}} - \frac{n_{\mathrm{H_2O}}}{M_{\mathrm{H_2O}}} = 5294{,}8\ g$$

Savukaasun moolimassa voidaan laskea savukaasun massan ja savukaasukomponenttien ainemäärän summan osamääränä.

$$M_{\mathrm{sk}} = \frac{m_{\mathrm{sk}}}{n_{\mathrm{sk}}} = 28{,}42\,\frac{g}{mol}$$

Kuivalle savukaasulle moolimassan saadaan vastaavasti.

$$M_{\mathrm{sk,k}} = \frac{m_{\mathrm{sk,k}}}{n_{\mathrm{sk,k}}} = 30{,}75\,\frac{g}{mol}$$

missä

M_{sk} savukaasun moolimassa [g/mol]

n_{sk} savukaasun ainemäärä [mol]

$M_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun moolimassa [g/mol]

$m_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun massa [g]

$n_{\mathrm{sk,k}}$ savukaasun ainemäärä [mol]

Primääri- ja sekundääri-ilma:

Lasketaan seuraavaksi kattilan sisään menevä palamisilma. Tunnetaan primääri- ja sekundääri-ilmojen normaalitilan tilavuusvirrat kattilan sisään. Molemmille ilmoille normaalitilan arvot ovat 100 kPa ja 30 °C. Lisäksi savukaasua kierrätetään takaisin primääri-ilma mukaan, joten sen vaikutus täytyy ottaa myös huomioon. Savukaasun normaalitilan arvot ovat 100 kPa ja 130 °C. Muutetaan normaalitilan tilavuusvirran arvot vastaamaan todellisia olosuhteita.

$$q_{v,\mathrm{prim}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{prim,norm}}}{T_{\mathrm{norm}}}\, T_{\mathrm{prim}}}{\frac{q_{v,\mathrm{prim,norm}}}{q_{v,\mathrm{prim,norm}} + q_{v,\mathrm{sk,norm}}}\, p_{\mathrm{prim}}}$$

missä

$q_{v,\mathrm{prim}}$ primääri-ilman tilavuusvirta [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{prim} primääri-ilman paine [Pa]

$q_{v,\mathrm{prim,norm}}$ primääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sk,norm}}$ kierrätettävän savukaasun tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{prim} primääri-ilman lämpötila [K]

Sekundääri-ilman todellinen tilavuusvirta voidaan ratkaista seuraavalla tavalla.

$$q_{v,\mathrm{sek}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{sek,norm}}}{T_{\mathrm{norm}}}\, T_{\mathrm{sek}}}{p_{\mathrm{sek}}}$$

missä

$q_{v,\mathrm{sek}}$ sekundääri-ilman tilavuusvirta [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sek,norm}}$ sekundääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{sek} sekundääri-ilman paine [Pa]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{sek} sekundääri-ilman lämpötila [K]

Kierrätettävien savukaasujen todellisia olosuhteita vastaava tilavuusvirta ratkaistaan seuraavasti:

$$q_{v,\mathrm{sk}} = \frac{\frac{p_{\mathrm{norm}}\, q_{v,\mathrm{sk,norm}}}{T_{norm}} T_{\mathrm{sk}}}{\frac{q_{v,\mathrm{sk,norm}}}{q_{v,\mathrm{prim,norm}} + q_{v,\mathrm{sk,norm}}} p_{\mathrm{sk}}}$$

missä

$q_{v,\mathrm{sk}}$ savukaasun tilavuusvirta [m^3/s]

p_{norm} normaalitilan paine [Pa]

p_{sk} savukaasun paine [Pa]

$q_{v,\mathrm{prim,norm}}$ primääri-ilman tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

$q_{v,\mathrm{sk,norm}}$ kierrätettävän savukaasun tilavuusvirta normaalitilassa [m^3/s]

T_{norm} lämpötila normaalitilassa [K]

T_{sk} savukaasun lämpötila [K]

Lasketaan primääri- ja sekundääri-ilman tiheys:

$$\rho_{\mathrm{prim}} = \frac{p_{\mathrm{prim}}}{RT_{\mathrm{prim}}}$$

ja

$$\rho_{\mathrm{sek}} = \frac{p_{\mathrm{sek}}}{RT_{\mathrm{sek}}}$$

missä

ρ_{prim} primääri-ilman tiheys [kg/m^3]

ρ_{sek} sekundääri-ilman tiheys [kg/m^3]

R ilman kaasuvakio [287,0619 J/kgK]

Ratkaistaan kierrätettävien savukaasujen tiheys.

$$\rho_{\mathrm{sk}} = \frac{p_{\mathrm{sk}}}{\frac{R_{\mathrm{u}}}{M_{\mathrm{sk}}} T_{\mathrm{sk}}}$$

missä

ρ_{sk} savukaasun tiheys [kg/m^3]

R_{u} yleinen kaasuvakio [8,314 kJ/kmolK]

M_{sk} savukaasun moolimassa [g/mol]

p_{sk} savukaasun paine [Pa]

T_{sk} savukaasujen lämpötila [K]

Primääri- ja sekundääri-ilman sekä savukaasun massavirrat saadaan kertomalla tiheys tilavuusvirralla.

$$q_m = q_v \rho$$

missä

q_m massavirta [kg/s]

q_v tilavuusvirta [m^3/s]

ρ tiheys [kg/m^3]

Taulukoidaan lasketut tulokset.

Taulukko 8. Kattilan sisään menevät ilmavirrat.

	Normaalitila [Nm^3/s]	Todellinen [m^3/s]	Massavirta [kg/s]
Primääri-ilma	1,76	1,71	2,02
Sekundääri-ilma	0,68	0,84	0,97
Savukaasu	0,03	0,51	0,03

Lopulta voidaan laskea massavirrat yhteen, jolloin tuloksena saadaan kattilaan kulkeutuva palamisilman massavirta. Savukaasua ei oleteta palamisilmaksi.

$$q_{m,\mathrm{i,tot}} = q_{m,\mathrm{prim}} + q_{\mathrm{m,sek}} = 2{,}99\ kg/s$$

missä

$q_{m,\mathrm{i,tot}}$ polttoilman kokonaismassavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{prim}}$ primääri-ilman massavirta [kg/s]

$q_{\mathrm{m,sek}}$ sekundääri-ilman massavirta [kg/s]

Palamisilman energiavirta voidaan laskea, kun tiedetään ilman tuntuva entalpia tietyssä lämpötilassa ja palamisilman massavirta. Oletetaan palamisilman lämpötilaksi 300 K, jolloin ilman tuntuvaksi entalpiaksi saadaan 1,86 kJ/kg. (Koponen 2016, 12)

$$E_{\mathrm{pi}} = q_{m,\mathrm{i,tot}} H_{\mathrm{i}} = 2{,}99 \frac{kg}{s} * 1{,}86 \frac{kJ}{kg} = 5{,}56\ kW$$

missä

E_{pi} Palamisilman energiavirta [kW]

H_{i} Ilman tuntuva entalpia [kJ/kg]

Huomataan, että palamisilman tuntuvan entalpia on pieni, joten palamisilman energiavirta on varsin vähäinen. Ei oteta energiavirtaa huomioon laskuissa.

<u>Polttoaineen massavirta:</u>

Polttoaineen massavirta voidaan nyt laskea todellisen sisään menevän palamisilman ja määrältään 1 kg polttoaineen vaatiman palamisilman avulla.

$$q_{m,\mathrm{pa}} = \frac{q_{m,\mathrm{i,tot}}}{m_{\mathrm{pi}}} m_{\mathrm{pa}} = \frac{2{,}99 \frac{kg}{s}}{5{,}03 kg} * 1 kg = 0{,}59\ kg/s$$

missä

$q_{m,\mathrm{pa}}$ polttoaineen massavirta [kg/s]

m_{pi} todellisen polttoilman massa, jolla 1 kg polttoainetta palaisi [kg]

m_{pa} polttoaineen massa [kg]

Savukaasujen massavirta:

Savukaasujen massavirta saadaan kattilan massataseen avulla, kun tiedetään kattilan sisään menevät massavirrat.

$$q_{m,\mathrm{in}} = q_{m,\mathrm{out}}$$

missä

$q_{m,\mathrm{in}}$ sisään menevä massavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{out}}$ ulos menevä massavirta [kg/s]

$$q_{m,\mathrm{sk,out}} = q_{m,\mathrm{pa}} + q_{m,\mathrm{i,tot}} + q_{m,\mathrm{sk,kierr}} = 3{,}61\ kg/s$$

missä

$q_{m,\mathrm{sk,out}}$ varsinainen kattilasta ulos menevän savukaasun massavirta [kg/s]

$q_{m,\mathrm{sk,kierr}}$ takaisin kattilaan palautetun savukaasun massavirta [kg/s]

Kuivan savukaasun massavirta saadaan, kun vähennetään veden massavirta savukaasuissa.

$$q_{m,\mathrm{sk,k}} = q_{m,\mathrm{sk,ulos}} - m_{\mathrm{H_2O}} \frac{q_{m,\mathrm{pa}}}{m_{\mathrm{pa}}} = 3{,}20\ kg/s$$

missä

$q_{m,\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun massavirta [kg/s]

$m_{\mathrm{H_2O}}$ veden massa savukaasuissa [kg]

Kuivien savukaasujen tilavuusvirta saadaan kuivien savukaasujen massavirran ja tiheyden osamääränä. Savukaasujen tiheys voidaan laskea seuraavasti.

$$\rho_{\mathrm{sk,k}} = \frac{p_{\mathrm{sk,out}}}{\frac{R_{\mathrm{u}}}{M_{\mathrm{sk,k}}} T_{\mathrm{sk,out}}} = 0{,}90\ kg/m^3$$

missä

$\rho_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun tiheys [kg/m^3]

$M_{\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun moolimassa [kg/kmol]

$T_{\mathrm{sk,out}}$ ulos menevän savukaasun lämpötila [K]

$p_{\mathrm{sk,out}}$ ulos menevän savukaasun paine [Pa]

Lasketaan kuivien savukaasujen tilavuusvirta.

$$q_{v,\mathrm{sk,k}} = \frac{Q_{m,\mathrm{sk,k}}}{\rho_{\mathrm{sk,k}}} = 3{,}56\ m^3/s$$

missä

$q_{v,\mathrm{sk,k}}$ kuivan savukaasun tilavuusvirta [m^3/s]

<u>Savukaasun ominaislämpökapasiteetti:</u>

Jokaiselle savukaasun komponentille voidaan laskea lämpökapasiteetti Shomaten yhtälöllä. Yhtälöllä laskettu savukaasun lämpökapasiteetti kerrotaan komponentin massaosuudella savukaasuseoksessa ja tämän jälkeen kaikki selvitetyt lämpökapasiteetit lasketan yhteen.

Shomaten yhtälö ja alkuarvot. Esimerkkinä vesi.

$$c_{p,\mathrm{H_2O}} = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + \frac{E}{t^2}$$

$$t = \frac{T_{\mathrm{sk,out}}}{1000}$$

missä

$c_{p,\mathrm{H_2O}}$ veden ominaislämpökapasiteetti [J/mol K]

A -203,6060

B 1523,290

C 3196,413

D 2474,455

E 3,855326

Kaikki käytetyt Shomaten yhtälön kertoimet esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Shomaten yhtälössä käytetyt aineille ominaiset kertoimet (*A* - *E*) (Webbook Nist)

Aineelle ominaiset kertoimet (*A*-*E*)					
	CO2	SO2	N2	H2O	O2
A	24,9974	21,4305	28,9864	-203,6060	31,3223
B	55,1870	74,3509	1,8540	1523,2900	-20,2353
C	-33,6914	-57,7522	-9,6475	-3196,4130	57,8664
D	7,9484	16,3553	16,6354	2474,4550	-36,5062
E	-0,1366	0,0867	0,0001	3,8553	-0,0074

Ominaislämpökapasiteetin arvo on nyt yksikössä J/mol K. Muutetaan ominaislämpökapasiteetin arvo yksikköön kJ/kg K jakamalla tulos aineen moolimassalla.

$$\frac{c_{p,\mathrm{H_2O}}}{M_{,\mathrm{H_2O}}} = \frac{J/_{molK}}{g/_{mol}} = \frac{J}{gK} = \frac{kJ}{kgK}$$

Lasketaan muiden savukaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetit vastaavasti omilla kertoimen arvoilla ja Shomaten yhtälöllä. Taulukoidaan tulokset.

Taulukko 10. Savukaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetit.

Savukaasun ominaislämpökapasiteetit [J/molK]				
CO2	SO2	N2	H2O	O2
41,74	43,89	29,27	77,15	30,20

Lasketaan savukaasujen komponenttien massaosuudet savukaasuseoksessa, jotta seokselle voidaan määrittää ominaislämpökapasiteetti. Massaosuus voidaan selvittää seuraavalla tavalla:

$$m - \% = \frac{m_{\mathrm{komp}}}{m_{\mathrm{sk}}} * 100$$

missä

$m - \%$ aineen massaosuus [%]

m_{komp} savukaasukomponentin massa [kg]

Lasketaan tulos esimerkiksi hiilidioksidille:

$$m - \% = \frac{m_{\mathrm{komp}}}{m_{\mathrm{sk}}} * 100 \ = \frac{27{,}68\, mol * 44{,}01 \frac{g}{mol}}{5989{,}7\, g} = 20{,}83\ \%$$

Lasketaan loput tulokset ja taulukoidaan ne.

Taulukko 11. Savukaasukomponenttien massaosuudet.

Savukaasujen massaosuudet [%]				
CO2	SO2	N2	H2O	O2
20,83	0,04	65,88	9,44	3,80

Lopulta jokaisen komponentin ominaislämpökapasiteetti kerrotaan komponentin massaosuudella ja nämä tulokset lasketaan yhteen, jolloin saadaan tulokseksi savukaasuseoksen ominaislämpökapasiteetti.

Lasketaan lopuksi savukaasun ominaislämpökapasiteetti vastaavasti:

$$\sum c_{p,\mathrm{komp}} x_{\mathrm{komp}} = c_{p,\mathrm{sk}} = 1{,}397 \frac{kJ}{kgK}$$

missä

$c_{p,\mathrm{komp}}$ savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg K]

x_{komp} savukaasukomponentin massaosuus

$c_{p,\mathrm{sk}}$ koko savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg K]

<u>Savukaasuhäviö:</u>

Savukaasuhäviö voidaan laskea, kun tunnetaan savukaasujen massavirta, ominaislämpökapasiteetti ja lämpötila. Referenssilämpötilaksi on oletettu 25°C. Savukaasuhäviö lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$\Phi_{\mathrm{sk}} = q_{m,\mathrm{sk,out}} c_{p,\mathrm{sk}} \left(T_{\mathrm{sk,out}} - T_{\mathrm{ref}}\right) \tag{30}$$

missä

Φ_{sk} savukaasuhäviö [kW]

T_{ref} referenssilämpötila [K]

Palamattomien kaasujen häviö:

Palamattomien kaasujen häviö saadaan, kun tiedetään häkäkaasun tilavuusosuus savukaasuissa, häkäkaasun lämpöarvo ja kuivan savukaasun tilavuusvirta. Lasketaan tulos seuraavalla yhtälöllä:

häviön ratkaisu. (Huhtinen 2000, 105.)

$$\Phi_{\mathrm{pal.kaas.häv}} = x_{\mathrm{CO}} H_{\mathrm{CO}} q_{v,\mathrm{sk,k}} = \frac{200}{10^6} * 10{,}7 \frac{MJ}{kg} * 3{,}56 \frac{m^3}{s} = 7{,}6\ kW$$

missä

$\Phi_{\mathrm{pal.kaas.häv}}$ palamattomien kaasujen häviö [kW]

x_{CO} hiilimonoksidin pitoisuus savukaasuissa

H_{CO} hiilimonoksidin palamisreaktion lämpöarvo (10,7 MJ/kg) [MJ/kg]

Hiilimonoksidin palamisreaktio (Raiko et al 2002, 32):

$$\mathrm{CO} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{CO_2}$$

Palamattomien kiintoaineiden häviöt:

Palamattomien kiintoaineiden häviö saadaan, kun tiedetään tuhkan massavirta, hehkutushäviö ja hiilen lämpöarvo. Hehkutushäviön suuruudeksi saatiin laboratoriomittausten perusteella 8 prosenttia. Lasketaan ensin tuhkan massavirta:

$$q_{m,\text{tuhka}} = q_{m,\text{pa}} x_{tuhka,pa}(1 - x_{\text{kosteus}}) = 12{,}9\frac{g}{s}$$

missä

$q_{m,\text{tuhka}}$	tuhkan massavirta [g/s]
$x_{tuhka,pa}$	tuhkan osuus polttoaineessa
x_{kosteus}	polttoaineen kosteus

Lasketaan seuraavaksi tuhkan ja tuhkan mukana poistuneen palamiskelpoisen hiilen massavirta:

$$q_{m,\text{tuhka+hiili}} = q_{m,\text{tuhka}}(1 + x_{\text{hehk.häv}}) = 0{,}0129\frac{kg}{s} * (1 + 0{,}08) = 0{,}014\frac{kg}{s}$$

missä

$q_{m,\text{tuhka+hiili}}$	tuhkan ja tuhkan mukana kulkeutuvan hiilen massavirta [kg/s]
$x_{\text{hehk.häv}}$	hehkutushäviö (8%) [%]

Lasketaan vielä hiilen massavirta:

$$q_{m,\text{C}} = q_{m,\text{tuhka+hiili}} x_{\text{hehk.häv}} = 0{,}139\frac{kg}{s} * 0{,}08 = 1{,}4\frac{g}{s}$$

missä

$q_{m,\text{C}}$	hiilen massavirta [kg/s]

Nyt voidaan laskea häviö, kun tiedetään palamiskelpoisen hiilen massavirta sekä tunnetaan hiilen lämpöarvo (32,7 MJ/kg).

$$\Phi_{\text{pal,kiint.häv}} = q_{m,\text{C}} H_{\text{C}} = q_{m,\text{C}} * 32{,}7\frac{MJ}{kg} = 0{,}04\ MW$$

missä

$\Phi_{\text{pal,kiint.häv}}$	palamattomien kiintoaineiden häviö [MW]

H_C hiilen lämpöarvo [MJ/kg]

Säteily- ja konvektiohäviöt:

Häviöt voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä, joka on muodostettu vastaamaan leijukerrospolton olosuhteita. Kerroin K yhtälössä on ominainen kerroin, kun olosuhteet vastaavat leijukerrospolttoa. $\Phi_{\text{hyöty}}$ tarkoittaa kattilasta hyödyksi saatavaa energiamäärää.

$$\Phi_{\text{sät.häv}} = K{\Phi_{\text{hyöty}}}^{0,7} = 0{,}0315 * (4{,}2\ MW)^{0,7} = 0{,}09\ MW$$

missä

$\Phi_{\text{sät.häv}}$ Säteily- ja konvektiiviset häviöt [MW]

K kerroin leijukerrospoltolle

$\Phi_{\text{hyöty}}$ Kattilasta saatava hyötyteho [MW]

Epäsuora hyötysuhde:

Lopulta voidaan laskea epäsuora hyötysuhde leijupetikattilalle, kun tunnetaan kattilan hyötyteho ja häviöt. Lasketaan hyötysuhde seuraavalla yhtälöllä:

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_{\text{häviöt}}}{\Phi_{\text{tuotu}}} * 100$$

$$\Phi_{\text{tuotu}} = \Phi_{\text{hyöty}} + \Phi_{\text{häviöt}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\Phi_{\text{sk}} + \Phi_{\text{pal.kaas.häv}} + \Phi_{pal.kiint.häv} + \Phi_{\text{sät.häv}}}{\Phi_{\text{hyöty}} + \Phi_{\text{sk}} + \Phi_{\text{pal.kaas.häv}} + \Phi_{\text{pal.kiint.häv}} + \Phi_{\text{sät.häv}}} 100 = 85{,}7\ \%$$

missä

η epäsuora hyötysuhde [%]

Φ_{tuotu} kattilaan tuodut energiavirrat [MW]

$\Phi_{häviöt}$ kattilan häviöt [MW]