

Matti Marjomaa

LATVAENERGIAN HÖYRYKATTILALAITOKSEN HYÖTYSUHDE

LATVAENERGIAN HÖYRYKATTILALAITOKSEN HYÖTYSUHDE

Matti Marjomaa
Opinnäytetyö
Syksy 2015
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka, energiatekniikka

Tekijä: Matti Marjomaa
Opinnäytetyön nimi: Latvaenergian höyrykattilalaitoksen hyötysuhde
Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2015
Sivumäärä: 40 + 1 liite

Tämä opinnäytetyö tehtiin Latvaenergia Oy:lle ja toteutettiin höyrykattilalaitoksella, joka tuottaa prosessihöyryä hakkeesta kolmelle elintarvikevalmistajalle Pyhännällä. Työn aihe ja tavoite oli tutkia laitoksen hyötysuhdetta ja verrata sitä laitostoimittajan lupaamaan 86 %:n hyötysuhteeseen. Lisätavoitteena oli löytää laitoksen ongelmakohtia ja optimaaliset ajoarvot sekä tehdä laitokselle sopiva laskentaohjelma, jolla voi laskea hyötysuhteen myös olosuhteiden muuttuessa.

Hyötysuhteen määrittämiseen käytettiin suoraa ja epäsuoraa laskentamenetelmää. Molempia menetelmiä käyttämällä pystytään havaitsemaan ongelmakohtia ja arvioimaan tuloksen luotettavuutta vertailemalla eri menetelmien tuloksia. Lisäksi epäsuoralla menetelmällä nähdään, missä häviöt syntyvät ja kuinka suuria ne ovat. Tämä auttaa minimoimaan ylimääräisiä häviöitä, jotka alentavat hyötysuhdetta.

Laitoksen osatehon hyötysuhde määritettiin koeajolla laitoksen käydessä tavalliseen tapaan. Koeajon aikana mitattiin asiakkaiden kulutus, laitoksen käyttämä energia, asiakkaiden palauttama energia, savukaasu- ja kattilahäviöt sekä laitoksen käyttösähkö. Maksimitohon hyötysuhde mallinnettiin eri tehoalueiden savukaasuanalyysejä vertailemalla. Laitoksen keskimääräinen hyötysuhde määritettiin suoralla menetelmällä käyttäen kolmen kuukauden ajalta kerättyjä tietoja.

Laitoksen 54 %:n osatehon hyötysuhteeksi saatiin epäsuoralla menetelmällä 84,63 % \pm 0,79 % ja suoralla menetelmällä 84,96 % \pm 1,71 %. Epäsuoran menetelmän antama tulos on luotettavampi, sillä sen virheen suuruus on pienempi. Keskimääräiseksi hyötysuhteeksi saatiin 79,30 % \pm 0,42 %, jossa on huomioitu myös laitoksen ilta-, yö- ja viikonloppukäytön vaikutus hyötysuhteeseen. Laitos käy tuolloin huomattavasti pienemmällä teholla kuin arkipäivisin, mikä laskee hyötysuhdetta. Laitoksen maksimitohon hyötysuhteeksi saatiin koeajon 3 antaman tiedon mukaan 86,22 % ja kaikkien koeajojen antamien tietojen mukaan 87,25 %, mitkä molemmat ylittävät laitostoimittajan lupaaman 86 %.

Asiasanat: hyötysuhde, uusiutuva energia, prosessihöyry, kestävä kehitys

ALKULAUSE

Tahdon kiittää Latvaenergian toimitusjohtaja Pekka Kemppaista ja hallituksen puheenjohtaja Samuli Yrjänää mielenkiintoisen opinnäytetyön mahdollistamisesta, pääkäyttäjää Jaakko Alpuaa laitoksen käytön ja toiminnan ohjeistuksesta ja yliopettaja Veli-Matti Mäkelää työn ohjaamisesta sekä hyvistä neuvoista.

Oulussa 19.11.2015

Matti Marjomaa

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 LATVAENERGIA	8
3 ARINAPOLTTO	9
3.1 Polttoaineen kuivuminen	10
3.2 Pyrolyysi	10
3.3 Jäännöshiilen palaminen	11
3.4 Arinan rakenne	11
3.4.1 Polttoaineen ja ilman syöttäminen	13
3.4.2 Tulipesä	14
3.4.3 Höyrystin	15
4 HÖYRYKATTILALAITOS	17
5 HYÖTYSUHTEEN MÄÄRITTÄMINEN	19
5.1 Suora menetelmä	20
5.1.1 Tuotettu energia	20
5.1.2 Käytetyn polttoaineen energia	20
5.1.3 Palautetun lauhteen energia	21
5.1.4 Laitoksen käyttösähkö	22
5.1.5 Laitoksen kokonaishyötysuhde	22
5.2 Epäsuora menetelmä	22
5.2.1 Savukaasuhäviöt	23
5.2.2 Kattilan lämpöhäviöt	24
5.2.3 Tuhkahäviöt	28
5.2.4 Ulospuhalluksen aiheuttama häviö	28
6 MITTAUKSET	30
7 TULOKSET JA VIRHEEN ARVIOINTI	32
7.1 Koeajon tulokset	32
7.2 Keskimääräinen hyötysuhde	34
7.3 Laitoksen maksimitehon hyötysuhde	34

8 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	39
LIITTEET	
Liite 1 Latvaenergian höyrykattilalaitoksen PI-kaavio	

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan Latvaenergian höyrykattilalaitoksen toimivuutta ja erityisesti sen hyötysuhdetta. Hyötysuhteen määrittäminen suoritetaan sekä epäsuoralla että suoralla menetelmällä, jotta tarkastelu olisi mahdollisimman luotettava. Työn tavoitteena on selvittää laitoksen ajonaikainen hyötysuhde ja arvioida mahdollista hyötysuhdetta laitoksen maksimiteholla. Lisätavoitteena on määrittää laitoksen mahdollisia ongelmakohtia, löytää laitokselle sopivat ajoarvot ja tehdä laitokselle sopiva laskentaohjelma, jolla hyötysuhde voidaan laskea myös olosuhteiden muuttuessa.

Latvaenergia Oy on vuonna 2003 perustettu energia-alan yritys, joka on erikoistunut kaukolämmön tuotantoon ja energiapuulla toimivien lämpökeskusten suunnitteluun ja rakentamiseen. Yritys toimii myös Itävaltalaisien ETA-lämmitysjärjestelmien vähittäismyyjänä Suomessa. Latvaenergian uusien aluevaltausten teollisuushöyryn myynti, jonka tarkasteluun tässä työssä keskitytään. (9.)

Latvaenergian höyrykattilalaitos tuottaa prosessihöyryä puuhakkeesta, joka tekee tuotteesta ympäristöystävällisen ja hiilidioksidineutraalin. Laitoksessa on sveitsiläinen Schmid energy solutionsin ilmajäähdytteinen liikkuva arina UTS-R-4200. Laitokselle on luvattu noin 86 %:n hyötysuhde. Höyryä myydään ja käytetään lähialueen elintarvikevalmistajien tuotannoissa ja prosesseissa sekä näiden tuotantolaitosten lämmityksissä.

2 LATVAENERGIA

Latvaenergia on Pohjois-Pohjanmaalla toimiva energia-alan yritys, joka panostaa bioenergiaan ja varsinkin energiapuun käyttöön. Latvaenergialla on yhteensä kolme lämpölaitosta ja yksi höyrykattilalaitos. Yrityksen tämänhetkinen toiminta keskittyy lähinnä Pyhännälle, jossa on kaksi lämpölaitosta ja höyrykattilalaitos. Latvaenergian toinen toimipaikkakunta on Muhos, missä kolmas lämpölaitos sijaitsee.

Höyrykattilalaitos on Pyhännän Leiviskän teollisuusalueella Ouluntien varressa, missä sijaitsee useita eri toimijoita. Laitoksen tehtävä on tuottaa prosessihöyryä kolmelle elintarvikevalmistajalle, joiden omat öljykattilat on poistettu käytöstä. Laitos hoitaa myös asiakkaiden kiinteistöjen lämmityksen, mikä nostaa asiakkaiden energiantarvetta talvisin. Polttoaineena käytetään kokopuuhaketta sekä teollisuuden puhdasta puutähdehaketta, jotka hankitaan lähialueelta. Kuvasta 1 nähdään laitoksen rakenne ja koko ulkoapäin.

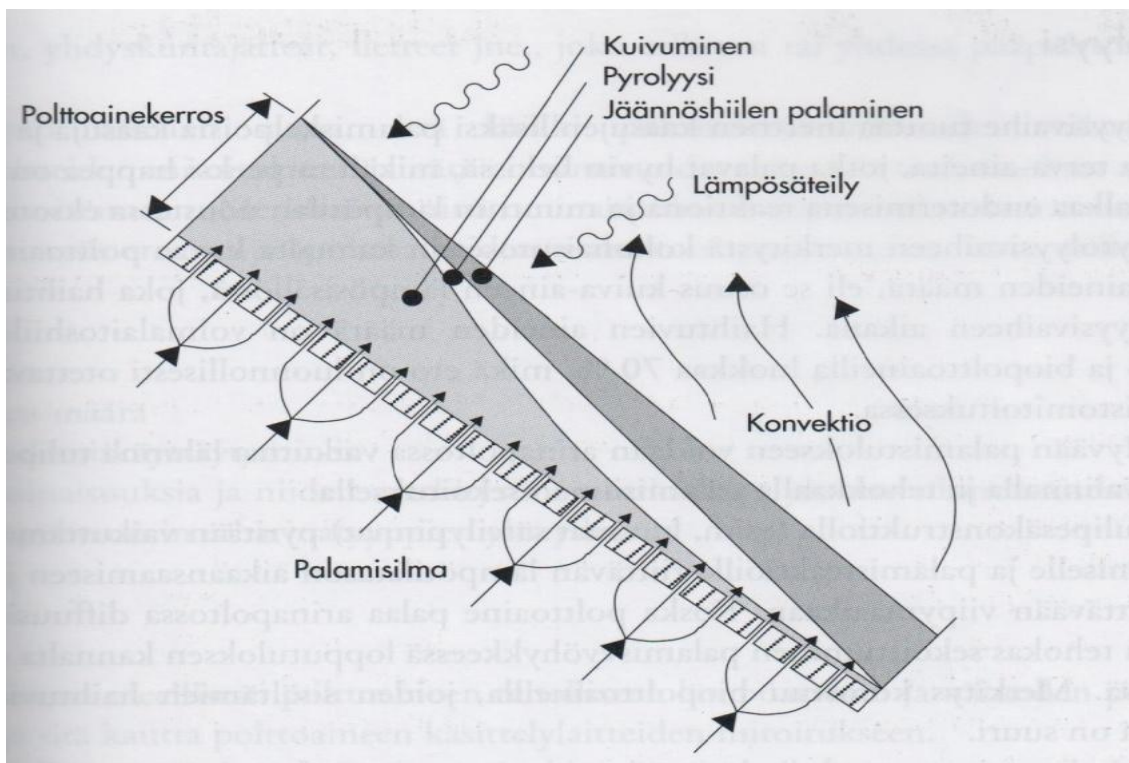


KUVA 1. Höyrykattilalaitos

3 ARINAPOLTTO

Arinakattilat saavat nimensä polttolaitteesta, joka sijaitsee kattilan pohjalla ja jonka päällä kiinteä polttoaine poltetaan joko hitaasti liikkuvana kerroksena tai paikallaan pysyvänä. Arinapoltto on höyrykattiloiden vanhin polttotapa kiinteille polttoaineille. Aikojen saatossa on kehitetty hyvin monenlaisia arinaratkaisuita, jotka soveltuvat erityyppisten polttoaineiden polttoon ja eri tehoalueille. Useimmille kiinteille polttoaineille kuten turpeelle, hiillelle, puulle ja puujätteelle on kehitetty hyvin toimivia arinaratkaisuja. (1, s. 146.)

Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva arinapolton palamisen vaiheista, joihin kuuluvat polttoaineen kuivuminen, pyrolyysi ja jäännöshiilen palaminen. Yksittäisessä polttoainekappaleessa kaikki palamisen vaiheet tapahtuvat pääasiassa peräkkäin, mutta arinalla on luonnollisesti samaan aikaan eri palamisvaiheissa olevia kappaleita. Suurissa kappaleissa voi tapahtua samanaikaisesti useita eri palamisen vaiheita kuten kosteuden poistumista kappaleen ytimestä pintakerroksen hiilen jo palaessa. (2, s. 466–467.)



KUVA 2. Kiinteän polttoaineen poltto arinalla (2, s. 467)

Arinapoltossa polttoainekerros sytty yleensä päältä ja syttymisrintama etenee kaasuvirtaa vasten. Ensiöilma tuodaan polttoainekerroksen alta ja toisioilma polttoainekerroksen yläpuolelle. Näin mahdollistetaan polttoaineen ja siitä muodostuvien kaasujen loppuun palaminen. (3, s. 217.)

3.1 Polttoaineen kuivuminen

Kiinteiden polttoaineiden kosteuspitoisuus vaihtelee suuresti, kun samankin polttoainemikkeen alla kosteuden osuus kokonaispainosta voi olla 10–60 %. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo muuttuu kosteuspitoisuuden mukaan sitä alhaisemmaksi mitä kosteampaa polttoaine on. Kosteampi polttoaine vaatii myös suuremman osan arinapinnasta kosteuden kuivattamiseen. (2, s. 467; 4, s. 26–27.)

Kosteus on merkittävä tekijä arinan mitoituksessa erityisesti turpeella ja biopolttoaineilla, joiden kosteus on 30–60 %:n luokkaa. Kostean polttoaineen kuivuminen laskee tulipesän keskimääräistä lämpötilaa, joten palamistuloksen kannalta on edullista, jos kuivamiseen käytetty aika on mahdollisimman lyhyt. Tätä aikaa voidaan lyhentää pienentämällä palakokoa eli kasvattamalla haihtumispinta-alaa sekä käyttämällä kuivattamiseen esilämmitettyä palamisilmaa. Lisäksi kosteuden haihtumista voidaan tehostaa tulipesägeometrian oikealla valinnalla. (2, s. 467.)

3.2 Pyrolyysi

Pyrolyysivaiheessa syntyy inerttien kaasujen lisäksi palamiskelpoisia kaasuja ja nestefaasissa olevia terva-aineita, jotka palavat hyvin tulipesässä, jos happea on tarpeeksi. Pyrolyysi alkaa endotermisenä eli energiaa sitovana reaktiona, mutta lämpötilan noustessa muuttuu eksotermiseksi ja lämpöä tuottavaksi reaktioksi. Pyrolyysivaiheen merkitys kokonaisprosessille vaihtelee polttoaineen haihtuvien aineiden määrän mukaan. Voimalaitoshiilestä noin 30 %:n ja biopolttoaineista jopa 70 %:n osuus kuiva-aineen lämpösisällöstä haihtuu pyrolyysin aikana. Tämä on otettava huomioon laitoksen suunnittelussa. (2, s. 468.)

Sekoittamalla palamisilmaa tehokkaasti ja käyttämällä polttoaineelle sopivaa tulipesän rakennetta parannetaan palamistulosta. Esimerkiksi käyttämällä tuli-

pesän kuumia säteilypintoja, jotka aikaansaavat ja auttavat ylläpitämään kattilan riittävän lämpötilatason kaasujen syttymiselle ja palamisreaktioille. Arinapoltoissa polttoaine palaa diffuusioliellä, siksi ilman tehokas sekoittuminen palamisvyöhykkeellä on lopputuloksen kannalta ensiarvoisen tärkeää. Merkitys korostuu, kun haihtuvien osuus kuiva-aineesta on suuri kuten biopoltoaineilla. (2, s. 468.)

3.3 Jäännöshiilen palaminen

Viimeisimpänä polttoaineesta palaa kiinteässä olomuodossa oleva hiili, joka palaa pinnaltaan ilman liekkiä, kun happea on tarpeeksi saatavilla ja lämpötila on riittävä. Jäännöshiilen palaminen on tyypillisesti hidasta ja vaatii suhteessa selvästi enemmän pinta-alaa arinalta kuin pyrolyysivaihe. Tähän voidaan kuitenkin vaikuttaa polttoaineen palakokoa pienentämällä, mikä lyhentää palamisaikaa. Sen sijaan reaktioiden kiihdyttäminen lämpötilaa nostamalla, kuten palamisilman esilämmittämällä, voi johtaa tuhkan sulamiseen, mikä aiheuttaa käytettävyysoongelmia. Tämä rajoitus on tullut esiin lähinnä palaturpeen poltossa. (2, s. 468.)

Arinapoltoille on ominaista, että polttoaineen sisältämästä tuhkasta suurin osa poistuu tulipesätuhkana, eikä savukaasun mukana kuten leiju- ja pölypoltossa. Sen vuoksi oikein mitoitettu jäännöshiilen palamisvaihe on palamishyötysuhteen kannalta merkittävä. (2, s. 468.)

3.4 Arinan rakenne

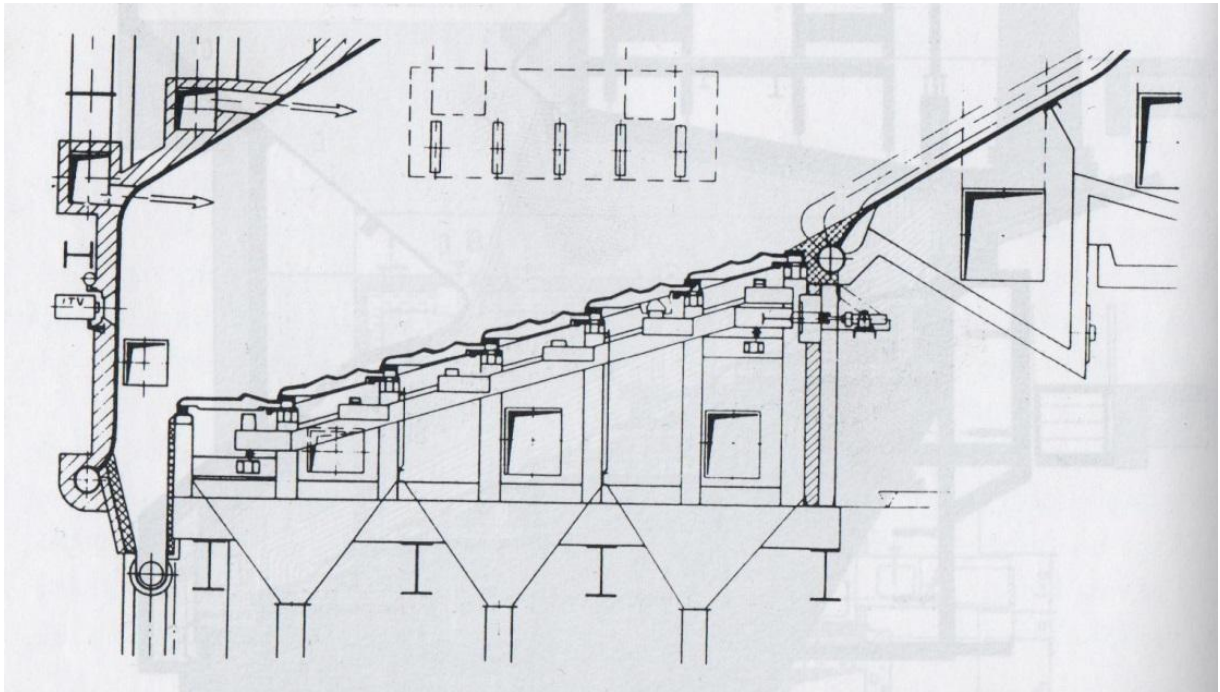
Arinoiden rakenteet riippuvat niin polttoaineesta kuin kattilan koostakin. Kattiloiden monipuolisuutta lisää myös valmistajien suuri määrä, mikä on seurausta yleensä pienestä yksikkökoosta ja erilaisista paikallisista tarpeista. Pääjaottelu arinatyypeille voisi olla esimerkiksi seuraava: kiinteä tasoarina, kiinteä viistoarina, mekaaninen viistoarina sekä ketjuarinat ja erikoisarinat kuten jätteenpoltoarina. (2, s. 472; 4, s. 30.)

Arinat ovat monesti edellä mainittujen päätyyppien yhdistelmiä kuten kiinteän ja mekaanisen arinan yhdistelmät. Arinoiden rakenne vaihtelee myös jäähdytystavan mukaan. Pienet arinat ovat yleensä ilmajäähdytteisiä eli jäähdytys toimii

primääri-ilmalla. Suuret arinat ovat pääsääntöisesti vesijäähdytteisiä, jolloin jäähdytys on yhdistetty kattilan vesikiertoon. (2, s. 472; 4, s. 30.)

Mekaanisissa arinoissa osa arinaraudoista on liikuteltavissa hydraulisesti edestakaisin työnnön ollessa noin 100 mm. Tällä aikaan saadaan polttoaineen sekoittumista ja hallittua siirtymistä palamisvaiheesta toiseen. Arinakulma mekaanisissa arinoissa voi olla selvästi loivempi kuin kiinteillä viistoarinoilla, joilla polttoaineen liikkuminen tapahtuu painovoiman avulla. Kiinteän viistoarinan kaltevuus riippuu polttoaineesta, mutta useimmiten se on noin 35–38°. Varsinaiset arinaraudat valmistetaan tyypillisesti valuraudasta, jonka lämmönkestävyyttä on voitu parantaa kromiseostuksella. (2, s. 472–473; 4, s. 30–31.)

Kuvassa 3 esitellään mekaanisen arinan perusrakennetta. Kuvassa polttoaine syötetään arinaraudoille oikealta ja palamisilma arinarautojen läpi alhaalta. Polttoaineen palamisvaiheet etenevät polttoaineen siirtyessä kohti alimpia arinarautoja. Lopulta palanut polttoaine tippuu tuhkana tuhkanpoistojärjestelmään.



KUVA 3. Mekaaninen arina (2, s. 467)

Arinan mitoituksessa täytyy ottaa huomioon, että arinarautojen ilmanvastuksen tulee olla suurempi kuin polttoainekerroksen vastus, jotta ilma saadaan jakautumaan mahdollisimman tasaisesti huolimatta polttoainekerroksen epätasaisuuksista. Sen seurauksena ilmavirtausteiden osuus on vain muutamia prosentteja kokonaispinnasta. Luonnonvetokattiloilla on tyydyttävä väljempään mitoitukseen. (2, s. 473; 4, s. 31.)

3.4.1 Polttoaineen ja ilman syöttäminen

Polttoaineen syöttöjärjestelmän ensisijainen tehtävä on syöttää oikea määrä polttoainetta tasaisesti koko arinan leveydeltä. Polttoainekerroksen tasaisuus on ensiarvoisen tärkeää, koska polttoaineen sekoittuvuus on arinalla erityisesti leveyssuunnassa vähäistä, vaikka arinaraudat olisivatkin liikkuvia kuten mekaanisissa arinoissa. (2, s. 471.)

Polttoainekerroksen epätasaisuus aiheuttaa primääri-ilman hallitsematonta levittäytymistä, jolloin syöttöilma menee sieltä, missä vastus on pienin ja polttoainetta vähiten. Suuremmissa arinoissa primääri-ilman syöttö tapahtuu painovoiman avulla koko arinan leveydeltä. Tässä tapauksessa polttoaineen levittäytyminen arinalle tapahtuu käytännössä automaattisesti. (2, s. 471.)

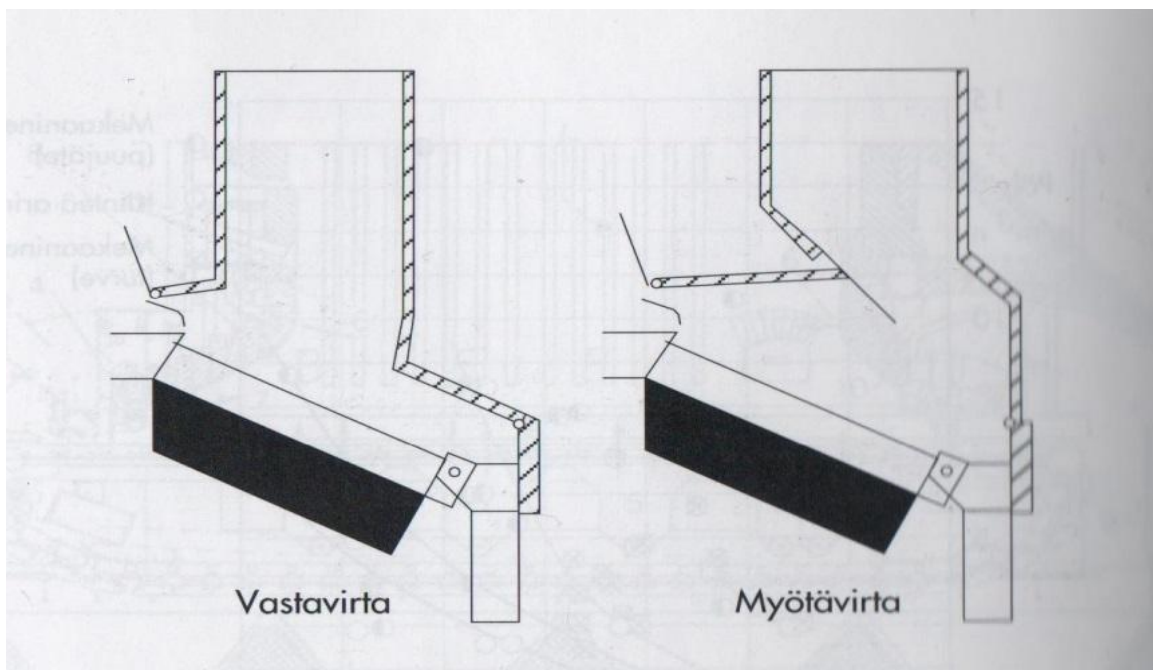
Ilman syöttäminen jakaantuu tyypillisesti kahteen vaiheeseen, mutta joissakin tapauksissa myös kolmeen. Primääri- eli ensiöilma syötetään aina arinan alta ja sekundääri- eli toisiöilma sekä mahdollinen tertiääri-ilma polttoainekerroksen yläpuolelle, missä polttokelpoiset polttoaineesta haihtuneet kaasut palavat. Palamistuloksen kannalta on hyötyä, jos primääri-ilmaa voidaan säätää erikseen kuivaus-, pyrolyysi- ja jäännöshiilen palamisvaiheisiin. Esilämmittämällä primääri-ilmaa pienennetään kattilan savukaasuhäviöitä ja nopeutetaan palamisreaktioita. (2, s. 474.)

Sekundääri-ilmajärjestelmän toimivuuden kannalta ilman tehokas ja oikea-aikainen sekoittuminen palamiskaasuihin on tärkeää, mitä voidaan säätää ilman nopeudella sekä suuttimien oikealla valinnalla. Syöttöjärjestelmät on konstruoitava niin, ettei syöttöaukon kautta pääse hallitsematonta palamisilmaa tuli-

pesään, eikä epästabiileissa tilanteissa niin kutsuttu takapalo pääse tulipesästä polttoaineen käsittelyjärjestelmään. (2, s. 471–474.)

3.4.2 Tulipesä

Tulipesän geometriaa valittaessa polttoaineen ominaisuuksilla on suuri vaikutus, valitaanko vastavirta- vai myötävirtarakenne (2, s. 474). Kuvassa 4 on esitetty vaihtoehtojen periaatteet. Yleisperiaatteena tulipesägeometrian valinnassa ovat mahdollisimman tasainen lämpötilataso ja paikallisten kylmien kohtien välttäminen (2, s. 474).



KUVA 4. Tulipesägeometrian päävaihtoehdot (2, s. 467)

Kosteat polttoaineet vaativat jäähdyttämättömät tulipesän seinärakenteet ainakin niiltä osin, jotka palvelevat lämpötilatason ylläpitoa kuivaus- ja pyrolyysivaiheissa. Tällaisia rakenteita ovat erimerkiksi muuratut tai massatut arinan seinämät. Primääri-ilman ohjautuvuuden kannalta olisi kuitenkin tärkeää, että tulipesän seinämät olisi jäähdytetty polttoainekerroksen kohdalta. Muutoin polttoaine palaa liian nopeasti arinan reunoilta, mikä aiheuttaa ongelmia primääri-ilman syötössä. (2, s. 474–475.)

Vastavirtaperiaate soveltuu polttoaineille, jotka ovat vaikeasti syttyviä kuten kosteat tai vähän haihtuvia aineita sisältävät polttoaineet ja näiden yhdistelmät. Kuumat savukaasut johdetaan arinan alkuosaan nopeuttamaan polttoaineen kuivumista sekä syttymistä. Vastavirtaperiaatetta sovelletaan yleisesti kosteille biopolttoaineille. (2, s. 474.)

Myötävirtaperiaate soveltuu polttoaineille, jotka pyrolysoituvat ja syttyvät nopeasti. Polttoaineesta haihtuneet kaasut johdetaan varsinaisen liekkialueen läpi, jolloin ne viipyvät kauemmin palamiselle edullisissa olosuhteissa. Tällöin voidaan olettaa, että loppuun palaminen tehostuu. (2, s. 474.)

3.4.3 Höyrystin

Esilämmittimen kautta syöttövesi pumpataan höyrystimen keittoputkistoon, jossa se höyrystyy. Höyrystinosan paineen määrää tulistetun höyryn paine, joka on painehäviöiden vuoksi hiukan pienempi kuin höyrystinosan paine. Höyrystin käsittää yleensä tulipesän seinäputket ja joissain kattiloissa savukanavaan sijoitetun jälkikeittopinnan. (1, s. 187.)

Sijoittamalla höyrystin tulipesän kuumimpaan paikkaan saadaan hyvä jäähdytys, eikä vaarana ole seinäputkien ylikuumentuminen. Putkimateriaaliksi höyrystimelle riittää yleensä tavallinen hiiliteräs, koska pintalämpötila nousee käytännössä vähän höyrystyslämpötilaa korkeammaksi, mutta jää kuitenkin alle 450 °C:n. Palamisen syövyttäessä pahasti tulipesän seinäputkia tai aiheuttaen niissä eroosiota voidaan putket päällystää tulenkestävällä massalla. (1, s. 187.)

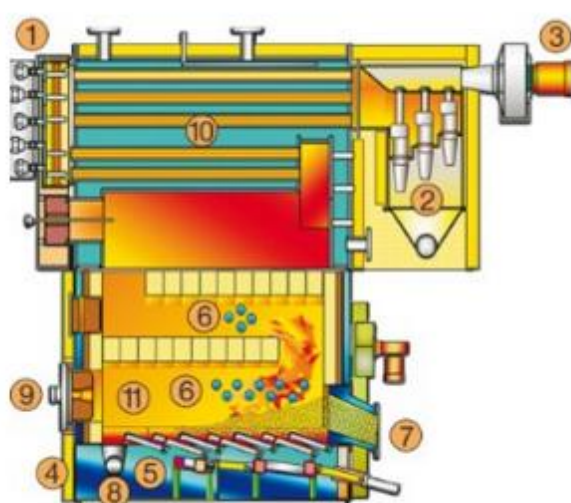
Nykyaikaisissa kattiloissa keittoputkisto muodostaa tulipesän ympärille kaasutiiviin putkiseinämän. Kattilan seinämärakenteet ovat kehittyneet muuratuista rakenteista nykyaikaisiin membraaniseiniin. Yleisimmin käytetty membraaniseinästä rakennetaan hitsaamalla höyrystinputkien väliin teräslevyjä. Toinen vaihtoehto höyrystinputkiksi on käyttää niin kutsuttuja eväputkia, jolloin hitsaustyötä on vähemmän, mutta putkimateriaalikustannukset kasvavat. (1, s. 187.)

Savukaasujen lämpötilat tulipesässä ovat 800–1300 °C ja lämpö siirtyy lämpöpintaan säteilemällä. Nykyisiä kattiloita nimitetään säteilykattiloiksi, joissa pääosa lämmöstä siirtyy tulipesässä säteilemällä. Sen sijaan aiemmin on käytetty

muurattuja tulipesiä, joissa pääosa lämmöstä siirtyy tulipesän jälkeisissä konvektiolämmönsiirtimissä. Säteilylämmönsiirtyminen on paljon tehokkaampaa kuin konvektiolämmönsiirtyminen. (1, s. 188.)

4 HÖYRYKATTILALAITOS

Latvaenergian höyrykattilalaitoksella hake kipataan polttoainesiiloon, josta tankopurkaimet kuljettavat hakkeen ketjukolakuljettimelle. Ketjukolakuljetin kuljettaa hakkeen tehoruuville, joka siirtää tarvittavan tehon mukaan polttoaineita tuplastokerille. Tuplastokeri syöttää polttoaineen kattilan tulipesään mahdollisimman sopivana polttoainekerroksena. Kuvasta 5 nähdään UTS-R-kattilan rakenne poikkileikkauksena.



Ilmajäähdytteinen liikkuva-arina UTS-R 10-6000 kW

- Automaattinuohous
- Automaattinen lentotuhkan poisto
- Savukaasuimuri
- Kattilan eristeet
- Ensiöilma
- Toisioilma
- Polttoaineen syöttö
- Automaattinen tuhkanpoisto 240/800 l. astiaan
- Tulipesänluukku
- Lämmönvaihdin
- Palotila

KUVA 5. Ilmajäähdytteinen liikkuva-arina UTS-R (5)

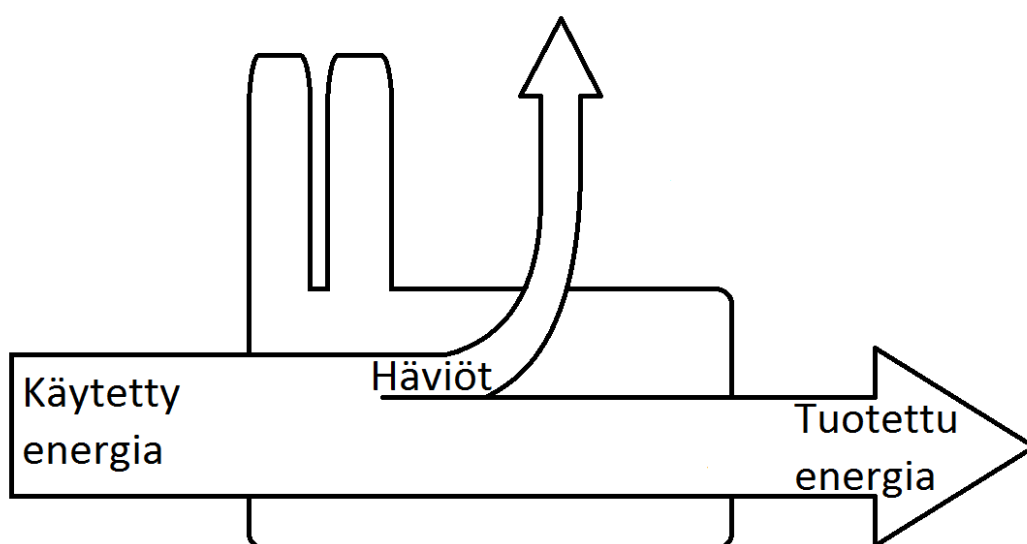
Tulipesässä polttoaine ensin kuivuu, minkä jälkeen seuraa pyrolyysi ja jäänöshiilen palaminen. Kuuma savukaasu johdetaan tulipesästä käänökammion kautta höyrystimeen. Höyrystimessä sinne pumpattu syöttövesi höyrystyy ja tulistuu tavoiteltuun paineeseen. Höyrystimestä höyry menee paineenalennusventtiilien kautta asiakkaille. Venttiilit alentavat paineen asiakkaiden tarpeisiin sopivaksi. Kahdelta asiakkaalta osa energiasta palautuu takaisin lauhteena, joka syötetään syöttövesisäiliöön. Tällöin sen energia palautuu prosessiin lämmittäen syöttövedettä.

Laitokseen kuuluu myös syöttöveden esilämmitin (eko), palamisilman esilämmitin (luvo), raakaveden käsittelyjärjestelmä, nuohoimet, savukaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä ja tuhkanpoistojärjestelmä. Tuhkanpoistojärjestelmä kuljet-

taa tuhkan arinan pohjalta ketjukulakuljettimen sekä tuhkaruuvien avulla tuhka-
konttiin. Liitteenä 1 on laitoksen PI-kaavio, josta voi tarkemmin tutkailla laitok-
sen rakennetta.

5 HYÖTYSUHTEN MÄÄRITTÄMINEN

Hyötysuhde voidaan määrittää kahdella eri menetelmällä, suoralla ja epäsuoralla menetelmällä. Näistä menetelmistä epäsuora on tarkastelijalleen informatiivisempi, koska se osoittaa, missä häviöt syntyvät. Esimerkiksi laitoksen hyötysuhdetta paranneltaessa epäsuoralla menetelmällä voidaan havaita, mistä häviöitä pystytään vähentämään. Kuvassa 6 on esitelty hyötysuhteen määrittämisen pääkäsitteet kaaviona.



KUVA 6. Energiakaavio

Ennen hyötysuhteen laskemista pitää selvittää käytetyn energian määrä, häviöt ja tuotetun energian määrä. Kiinteiden polttoaineiden kohdalla käytetyn energian määrää on usein vaikea selvittää, koska polttoainevirta on epätasaista ja polttoaineen energiasisältö voi vaihdella. Häviöt muodostuvat useista erillisistä häviöistä, jotka yleensä ovat savukaasu-, johtumis-, ulospuhallus-, nuohous- ja tuhkahäviöitä. Tuotetun energian määrä voidaan laskea mittaustulosten perusteella.

5.1 Suora menetelmä

Suorassa menetelmässä tuotettua energiaa verrataan suoraan kulutettuun energiaan. Suoran menetelmän hyötysuhde lasketaan kaavalla 1.

$$\eta_{suora} = \frac{Q_{tuotettu} - Q_{lauhde}}{Q_{polttoaine}} \times 100 \quad \text{KAAVA 1}$$

η_{suora} = hyötysuhde (%)

$Q_{tuotettu}$ = tuotettu energia (kWh)

Q_{lauhde} = lauhdeena palautettu energia (kWh)

$Q_{polttoaine}$ = käytetyn polttoaineen sisältämä energia (kWh)

5.1.1 Tuotettu energia

Tuotettu energia voidaan laskea tuotetun tehon avulla, joka on massavirran ja ominaisentalpian muutoksen tulo. Teho lasketaan kaavalla 2.

$$\Phi = \dot{m}_{th}(h_{th} - h_{sv}) \quad \text{KAAVA 2}$$

Φ = tuotettu teho (kW)

\dot{m}_{th} = tuorehöyryn massavirta (kg/s)

h_{th} = tuorehöyryn ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{sv} = syöttöveden ominaisentalpia (kJ/kg)

Jos laitoksen tuottama teho on vakio, se voidaan suoraan kertoa mittauksen kokonaisajalla. Tällöin tulona saadaan tuotettu energia. Laitoksen tehon vaihdelta voidaan energiamäärä laskea esimerkiksi kymmenen minuutin keskitetun tehon avulla kaavalla 3.

$$Q_{tuotettu} = \sum(\Phi_k \times t) \quad \text{KAAVA 3}$$

$Q_{tuotettu}$ = tuotettu energia (kWh)

Φ_k = kymmenen minuutin keskitteho (kW)

t = mittausväli (h)

5.1.2 Käytetyn polttoaineen energia

Polttoaineen kosteus vaikuttaa suuresti polttoaineen sisältämään energiaan. Jokaisella polttoaineella on omat lämpöarvonsa. Ylempi lämpöarvo riippuu polt-

toaineen kemiallisesta koostumuksesta. Alemman lämpöarvoon vaikuttaa myös polttoaineen kosteuspitoisuus. Esimerkiksi Latvaenergian käyttämän sekapuupolttoaineen alempi lämpöarvo lasketaan kaavalla 4, kun ylempi lämpöarvo on $19,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ (7).

$$H_a = 19,2 - \frac{V}{100} \times 21,71 \quad \text{KAAVA 4}$$

$$H_a = \text{alempi lämpöarvo} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$$

V = puun painokosteus (%)

Alemman lämpöarvon avulla käytetyn polttoaineen sisältämä energia lasketaan kaavalla 5.

$$Q_{\text{polttoaine}} = H_a \times m \quad \text{KAAVA 5}$$

$Q_{\text{polttoaine}}$ = polttoaineen sisältämä energia (MJ)

$$H_a = \text{polttoaineen alempi lämpöarvo} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$$

m = polttoaineen massa (kg)

5.1.3 Palautetun lauhteen energia

Lauhteen mukana palautuu energiaa, jolla yleensä lämmitetään syöttövedettä. Tämä energia täytyy ottaa huomioon laskiessa kattilan hyötysuhdetta. Lauhde voidaan laskea tehon avulla kaavoilla 6 ja 7.

$$\Phi_{la} = \dot{m}_{la}(h_{la} - h_{sv}) \quad \text{KAAVA 6}$$

Φ_{la} = lauhteen teho (kW)

\dot{m}_{la} = lauhteen massavirta (kg/s)

h_{la} = lauhteen ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{sv} = syöttöveden ominaisentalpia (kJ/kg)

Esimerkiksi kymmenen minuutin keskitehoilla laskettuna lauhteen energia saadaan kaavalla 7.

$$Q_{\text{lauhde}} = \sum(\Phi_{lak} \times t) \quad \text{KAAVA 7}$$

Q_{lauhde} = lauhteen energia (kWh)

Φ_{lak} = lauhteen kymmenen minuutin keskiteho (kW)

t = mittausväli (h)

5.1.4 Laitoksen käyttö sähkö

Laitokset kuluttavat aina sähköä, mikä täytyy huomioida laitoksen suunnittelussa ja kannattavuuden laskennassa. Sähköä tarvitaan muun muassa syöttövesipumppujen, hydraulikan, puhaltimien, valaistuksen ja monien muiden sähkölaitteiden toiminnan ylläpitämiseen. Sähköä tuottavissa laitoksissa tämä näkyy usein suoraan hyötysuhteessa, koska laitteet toimivat pääasiassa laitoksen tuottamalla sähköllä. Lämpö- ja höyrylaitoksissa, joissa ei tuoteta sähköä, tämä näkyy laitoksen ylläpitokustannuksissa.

5.1.5 Laitoksen kokonaishyötysuhde

Tarkasteltaessa laitoksen kokonaishyötysuhdetta, otetaan huomioon myös laitoksen käyttö sähkö. Kokonaishyötysuhde lasketaan kaavalla 8.

$$\eta_{kok} = \frac{Q_{tuotettu} - Q_{lauhde}}{Q_{polttoaine} + P_{käyttö}} \times 100 \quad \text{KAAVA 8}$$

$P_{käyttö}$ = laitoksen kuluttama sähkö (kWh)

5.2 Epäsuora menetelmä

Epäsuorassa menetelmässä verrataan hukkaan mennyttä energiaa käytettyyn energiaan. Epäsuorassa menetelmässä nähdään, mistä häviöt syntyvät ja siksi se on käyttäjälleen paljon informatiivisempi. Epäsuora hyötysuhde lasketaan kaavalla 9.

$$\eta_{epäsuora} = 100 - q_{sk} - q_{ka} - q_t - q_{up} \quad \text{KAAVA 9}$$

$\eta_{epäsuora}$ = hyötysuhde (%)

q_{sk} = savukaasuhäviöt (%)

q_{ka} = kattilan lämpöhäviöt (%)

q_t = tuhkahäviöt (%)

q_{up} = ulospuhallushäviö (%)

Kun tiedetään käytetyn polttoaineen sisältämä energia, voidaan laskea häviöiden osuudet kokonaisenergiasta. Vähentämällä häviöt sadasta prosentista jäl-

jelle jää hyötyn mennyt osuus, mikä on yhtä kuin hyötysuhde. Kiinteiden polttoaineiden polttoainevirran määrittäminen on usein ongelmallista. Mikäli polttoainevirtaa ei voida tarvittavalla tarkkuudella määrittää ja tuotettu energian määrä sekä häviöt ovat helpommin ja tarkemmin mitattavissa, voidaan epäsuora hyötysuhde laskea kaavalla 10.

$$\eta_{\text{epäsuora}} = \frac{Q_{\text{tuotettu}}}{Q_{\text{tuotettu}} + Q_{sk} + Q_{ka} + Q_t + Q_{up}} \quad \text{KAAVA 10}$$

Q_{tuotettu} = tuotettu energia (kWh)

Q_{sk} = savukaasuhäviöt (kWh)

Q_{ka} = kattilan lämpöhäviöt (kWh)

Q_t = tuhkahäviöt (kWh)

Q_{up} = ulospuhallushäviö (kWh)

5.2.1 Savukaasuhäviöt

Savukaasuhäviöt muodostuvat kahdesta osasta, vapaista ja sidotuista savukaasuhäviöistä. Vapaat savukaasuhäviöt muodostavat suurimman osan höyrykattilan kokonaishäviöistä. Vapaat savukaasuhäviöt perustuvat savukaasujen mukana hukkaan menevään lämpöenergiaan, joka on sitoutunut savukaasuihin ja voidaan laskea kaavalla 11 (6).

$$q_n = K_1 \times \left(\frac{T_s - T_i}{H_a \times (CO_2 + CO + CH_4)} \right) \quad \text{KAAVA 11}$$

q_n = vapaat savukaasuhäviöt (%)

K_1 = puun kosteudesta riippuva kerroin $\left(\frac{MJ \times \%}{kg \times ^\circ C} \right)$

T_s = savukaasun lämpötila ($^\circ C$)

T_i = palamisilman lämpötila ($^\circ C$)

H_a = puun alempi lämpöarvo $\left(\frac{MJ}{kg} \right)$

CO_2 = savukaasun hiilidioksidipitoisuus (%)

CO = savukaasun hiilimonoksidipitoisuus (%)

CH_4 = savukaasun metaanipitoisuus (%)

Kerroin K_1 lasketaan kaavalla 12

$$K_1 \left(\frac{\text{MJ} \times \%}{\text{kg} \times ^\circ\text{C}} \right) = 4,186 \times \frac{\left[\left(1 - \frac{V}{100} \right) \times (2954 + 36,5 \times \text{CO}_2) + 0,455 \times V \times \text{CO}_2 \right]}{1000}$$

KAAVA 12

V = puun painokosteus (%)

Sidotut savukaasuhäviöt perustuvat palamattomiin kaasuihin, jotka olisivat voineet palamisellaan tuottaa vielä lämpöenergiaa. Sidotut savukaasuhäviöt lasketaan kaavalla 13 (6).

$$q_p = K_2 \times \frac{30,2 \times \text{CO} + 85,5 \times \text{CH}_4 + 25,7 \times \text{H}_2}{\text{CO}_2 + 0,994 \times \text{CO} + 0,995 \times \text{CH}_4}$$

KAAVA 13

q_p = sidotut savukaasuhäviöt (%)

CO = savukaasun hiilimonoksidipitoisuus (%)

CH_4 = savukaasun metaanipitoisuus (%)

H_2 = savukaasun vetypitoisuus (%)

CO_2 = savukaasun hiilidioksidipitoisuus (%)

$$K_2 = \frac{0,007891 \times C \times (100 - V)}{H_a}$$

C = Polttoaineen hiilipitoisuus (%), joka on puulle noin 50,7 %

V = puun painokosteus (%)

H_a = puun alempi lämpöarvo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$

5.2.2 Kattilan lämpöhäviöt

Kattilan seinämiltä siirtyy lämpöä ympärillä olevaan viileämpään ilmaan säteilyinä ja ilman luonnollisena konvektiona eli ilmavirtauksen mukana. Häviöön menevän energian määrä riippuu kattilan pintojen pinta-alasta ja lämpötilasta sekä ympärillä olevan ilman lämpötilasta. Näiden tietojen pohjalta voidaan laskea säteily- ja konvektiolämmönsiirtokerroin, jotka yhteen laskettuna muodostavat kokonaislämmönsiirtokerroimen. Nämä täytyy laskea kullekin pinnalle erikseen, jotta voidaan laskea yksittäisen seinän lämpöhäviö. Summa kaikkien pintojen lämpöhäviöistä on yhtä kuin kattilan lämpöhäviöt.

Säteilylämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 14.

$$\alpha_s = \varepsilon \times \delta \times \frac{T_p^4 - T_y^4}{T_p - T_y}$$

KAAVA 14

α_s = säteilylämmönsiirtokerroin $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}} \right)$

ε = pinnan emissiivisyyskerroin

δ = Stefan–Boltzmanin vakio $5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \times K^4}$

T_p = pinnan keskilämpötila (K)

T_y = näkyvien pintojen keskilämpötila (K)

Konvektiolämmönsiirtokertoimeen vaikuttaa Nusseltin luku, jonka suuruus ja laskentakaavat vaihtelee Prandlin (P_r) ja Grashofin (G_r) lukujen tulon suuruuden mukaan sekä riippuen onko kyseessä vaaka- vai pystypinta. Kun $P_r \times G_r$ on pienempi kuin 10^9 , niin luonnollisen konvektion aiheuttaman virtauksen rajakerros on laminaari ja silloin Nusseltin luku pystypinnoille voidaan laskea kaavalla 15.

$$N_u = 0,59 \times (P_r \times G_r)^{\frac{1}{4}} \quad \text{KAAVA 15}$$

P_r = Prandlin luku

G_r = Grashofin luku

Kun $P_r \times G_r$ on suurempi kuin 10^9 , virtauksen rajakerros on turbulenti ja Nusseltin luku pystypinnoille voidaan laskea kaavalla 16.

$$N_u = 0,1 \times (P_r \times G_r)^{\frac{1}{3}} \quad \text{KAAVA 16}$$

Kattilan kannelle Nusseltin luku voidaan laskea kaavalla 17 tai 18.

$$N_{uL} = 0,54 \times (P_r \times G_{rL})^{\frac{1}{4}}, \text{ jos } 10^5 < P_r \times G_{rL} < 10^7 \quad \text{KAAVA 17}$$

$$N_{uL} = 0,74 \times (P_r \times G_{rL})^{\frac{1}{4}}, \text{ jos } 2 \times 10^7 < P_r \times G_{rL} < 3 \times 10^{10} \quad \text{KAAVA 18}$$

Kattilan pohjalle Nusseltin luku voidaan laskea kaavalla 19.

$$N_{uL} = 0,27 \times (P_r \times G_{rL})^{\frac{1}{4}}, \text{ jos } 3 \times 10^5 < P_r \times G_{rL} < 3 \times 10^{10} \quad \text{KAAVA 19}$$

Prandlin luku lasketaan kaavalla 20 ja arvot otetaan pinnan ja ympäristön keskilämpötilassa \bar{T} .

$$P_r = \frac{\sigma \times v \times c_p}{\lambda} \quad \text{KAAVA 20}$$

σ = tiheys $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

ν = kinemaattinen viskositeetti $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

c_p = ominaislämpökapasiteetti $\left(\frac{kJ}{kg \times ^\circ C}\right)$

λ = lämmönjohtumiskerroin $\left(\frac{W}{m \times ^\circ C}\right)$

$\bar{T} = \frac{(T_p + T_\infty)}{2}$ = pinnan ja etäällä olevan ilman keskilämpötila (K)

Grashofin luku lasketaan kattilan seinille kaavalla 21.

$$Gr = \frac{g \times \beta \times (T_p - T_\infty) \times h^3}{\nu^2}$$

KAAVA 21

g = maan vetovoiman kiihtyvyys $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

β = puristuskerroin = $\frac{1}{\bar{T}}$, ideaalikaasulle

T_p = pinnan keskilämpötila (K)

T_∞ = etäällä olevan ilman keskilämpötila (K)

h = pystypinnan korkeus (m)

ν = kinemaattinen viskositeetti $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Kattilan katolle ja pohjalle Grashofin lukua laskettaessa pystypinnan korkeus korvataan luonnollisella pituudella L, joka lasketaan kaavalla 22.

$$L = \frac{A}{P}$$

KAAVA 22

A = tason pinta-ala

P = tason piiri

Tällöin saadaan kaava 23.

$$Gr_L = \frac{g \times \beta \times (T_p - T_\infty) \times L^3}{\nu^2}$$

KAAVA 23

g = maan vetovoiman kiihtyvyys $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

β = puristuskerroin = $\frac{1}{\bar{T}}$, ideaalikaasulle

T_p = pinnan keskilämpötila (K)

T_∞ = etäällä olevan ilman keskilämpötila (K)

L = luonnollinen pituus (m)

ν = kinemaattinen viskositeetti $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

Kun Nusseltin luku on laskettu Prandlin ja Grashofin lukujen avulla, voidaan laskea luonnollisen konvektion aiheuttama lämmönsiirtokerroin kattilan seinille kaavalla 24.

$$\alpha_k = \frac{N_u \times \lambda}{h}$$

KAAVA 24

α_k = konvektiolämmönsiirtokerroin $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$

N_u = Nusseltin luku

λ = lämmönjohtumiskerroin $\left(\frac{W}{m \times ^\circ C}\right)$

h = pystypinnan korkeus (m)

Kattilan katolle ja pohjalle käytetään kaavaa.

$$\alpha_k = \frac{N_{uL} \times \lambda}{L}$$

L = luonnollinen pituus (m)

Kokonaislämmönsiirtokerroin kullekin pinnalle lasketaan kaavalla 25.

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k$$

KAAVA 25

α = kokonaislämmönsiirtokerroin $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$

α_s = säteilylämmönsiirtokerroin $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$

α_k = konvektiolämmönsiirtokerroin $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$

Lämpöhäviö kullekin pinnalle lasketaan kaavalla 26.

$$\phi = \alpha \times A \times (T_p - T_\infty)$$

KAAVA 26

ϕ = pinnan keskimääräinen lämpöhäviö (W)

α = kokonaislämmönsiirtokerroin $\left(\frac{W}{m^2 \times K}\right)$

A = pinnan pinta-ala (m^2)

T_p = pinnan keskilämpötila (K)

T_∞ = etäällä olevan ilman keskilämpötila (K)

Lopuksi kattilahäviöt voidaan laskea kaavalla 27.

$$q_{ka} = \frac{\sum \phi \times t}{H_a \times m_{pa}} \times 100$$

KAAVA 27

q_{ka} = kattilan lämpöhäviöt (%)

$\sum \phi$ = kattilan pinnoista lähtevä lämpöteho (kW)

t = syötetyn puumassan polttoaika (s)

H_a = puun alempi lämpöarvo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$

m_{pa} = syötetyn polttoaineen massa (kg)

5.2.3 Tuhkahäviöt

Tuhkahäviöksi luokitellaan palamatonta polttoainetta, joka menee lento- tai pohjatuhkan mukana hukkaan. Palamatonta polttoainetta voi jäädä esimerkiksi seuraavista syistä: arinaraudoissa on liian isoja reikiä, polttoaine ei viivy riittävän kauan palamiselle suotuisissa olosuhteissa tai palamisilmaa ei ole riittävästi palamiselle.

Tuhkahäviötä voidaan tutkia tuhkasta laboratorionkokeilla tuhkan lämpöarvoa mittaamalla. Vertaamalla tuhkan lämpöarvoa polttoaineen alempaan lämpöarvoon sekä käytetyn polttoaineen ja tuotetun tuhkan massojen suhdetta saadaan kaava 28.

$$q_t = \frac{H_t \times m_t}{H_a \times m_{pa}}$$

KAAVA 28

q_t = tuhkahäviöt (%)

H_t = tuhkan lämpöarvo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$

m_t = tuotetun tuhkan massa (kg)

H_a = puun alempi lämpöarvo $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$

m_{pa} = syötetyn polttoaineen massa (kg)

5.2.4 Ulospuhalluksen aiheuttama häviö

Poistamalla osa kattilavedestä pidennetään kattilan ikää pitämällä kattila puhtaana ja alentamalla kattilaveden suolapitoisuutta. Laitoksesta riippuen ulospu-

hallus tapahtuu joko pohja- tai pintapuhalluksena ja se voi olla jatkuvaa tai jaksottaista.

Korkea suolapitoisuus aiheuttaa korroosiota, joka on vahingollista kattilan pinnoille monin tavoin. Mittaamalla kattilaveden sähkönjohtavuutta voidaan seurata kattilaveden suolapitoisuutta. Tällöin ulospuhallusta voidaan säätää tarpeen mukaan. Kattilavedestä otetaan myös näytteitä säännöllisesti, jotta voidaan seurata ulospuhalluksen riittävyyttä.

Laitoksen ulospuhallushäviöön vaikuttaa ulospuhalluksen aikana hallitseva paine ja ulospuhalluksen määrä. Laitoksen ulospuhallushäviön laskemiseen kehitettiin kaava 29.

$$q_{up} = \frac{up \times (h_{kv} - h_{vj})}{(1-up)(h_{th} - h_{sv})} \times \eta$$

KAAVA 29

$$up = \frac{G_{kv}}{G_{sv}}$$

G_{kv} = kattilaveden sähkönjohtavuus (mS/m)

G_{sv} = syöttöveden sähköjohtavuus (mS/m)

h_{kv} = kattilaveden ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{vj} = vesijohtoveden ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{th} = tuorehöyryn ominaisentalpia (kJ/kg)

h_{sv} = syöttöveden ominaisentalpia (kJ/kg)

η = osatehon höytysuhde ilman ulospuhallusta (%)

6 MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin 25.5.2015–27.5.2015, jolloin laitoksen kuorma oli mahdollisimman tasainen ja saatavilla olevan polttoaineen laatu mahdollisimman tasalaatuista. Mittauksia tehtiin yhteensä neljä, joista hyötysuhteen määrittämiseen valittiin viimeisin 27.5.2015 klo 11:54–14:31 tehty mittaus, jossa hyödynnettiin testimittauksissa saatuja kokemuksia mahdollisimman tarkan mittauksen suorittamiseksi. Asiakkaiden energiantarve oli tasaista ja tavalliseen arkipäivään verrattavaa ja laitos vastasi asiakkaiden tarpeisiin odotetusti.

Mittaus aloitettiin laitoksen käydessä normaalisti ja paineen ollessa 12,4 bar, tulipesän lämpötilan ollessa 731 °C ja tulipesän seinien lämpötilan ollessa 814 °C. Mittaus lopetettiin mahdollisimman samanlaisiin olosuhteisiin, jotta kattilaan varastoituneen energian määrä olisi yhtä suuri kuin aloitushetkellä. Mittaukset lopetettiin paineen ollessa 12,4 bar, tulipesän lämpötilan ollessa 733 °C ja tulipesän seinien lämpötilan ollessa 842 °C.

Mittauksissa otettiin ylös polttoaineen syöttöruuvien teho ja kattilan nimellisteho viiden minuutin välein sekä savukaasuanalyysi kymmenen minuutin välein, missä mitattiin savukaasujen lämpötilaa, hiilidioksidipitoisuutta, häkäpitoisuutta ja jäännöshappea. Savukaasumittauksiin käytettiin Kane 900 - savukaasuanalysaattoria.

Kolmen asiakkaan kulutuslukemat ja kahden asiakkaan palauttaman lauhteen energialukemat otettiin ylös mittausten alussa ja lopussa. Myös sähkömittarin lukemat otettiin ylös, jotta voitiin laskea laitoksen käyttösähkö mittausten aikana. Asiakkaiden energiakulutuksen laskee Spirax Sarcon M850-P-x - energialaskuri. Paine-erot energialaskuri saa Yokogawan EJX110A -painero-lähettiläiltä ja lämpötilat Spirax Sarcon EL2271 (Pt100) -lämpötila-antureilta.

Lisäksi kattilan pintojen lämpötilat mitattiin Amprobe IR608A - infrapunalämpömittarilla kahdesti niin, että ensimmäinen mittaus sijoittui puoli-väliin koeajoa ja toinen mittaus välittömästi koeajon jälkeen laitoksen käytön jatkuessa normaalisti. Jokainen pinta mitattiin kuusi kertaa ja laskennassa käytettiin keskiarvoa kullekin pinnalle. Laitoksen alakerran ja yläkerran lämpötilat

sekä ulkolämpötila mitattiin koeajon alussa, puolivälissä ja lopussa. Laitoksen alakerran lämpötilaa on käytetty siellä sijaitsevien pintojen lämpöhäviöiden laskennassa ja yläkerran lämpötilaa vastaavasti samalla tavalla.

Polttoaineen kosteus määritettiin punnitsemalla näyte ensin ja sen jälkeen kuivattamalla sitä yhden vuorokauden ajan noin 105 °C:n lämpötilassa. Tällöin näytteen massa ei enää pienentynyt. Kosteuspitoisuus saatiin, kun poistunut massa jaettiin näytteen alkuperäisellä massalla.

Syötetyn polttoaineen massan määrittämiseen tarvittiin polttoaineen syöttöruuvien teho, pyörimisnopeus, ruuvien nousu, akselin halkaisija, siipien halkaisija ja ruuvien täyttökerroin. Näiden arvojen lisäksi tarvittiin hakkeen tiheys, joka määritettiin kokeellisesti punnitsemalla 10 litraa haketta, koska hake on itsestään sekoitusta teollisuuden puhtaasta puutähdehakeesta ja rankahakeesta eikä tällöin vastaa rankahakkeen normaalia tiheyttä.

Tuhkahäviön määrittämisessä käytettiin pommikalorimetriä mittaamaan tuhkan lämpöarvoa ja uunia, jolla suoritettiin heikutushäviökoe. Lisäksi tuotetun tuhkan ja käytetyn hakkeen massat mitattiin. Tällöin tuhkahäviöstä saatiin tarkempi ja luotettavampi tulos.

7 TULOKSET JA VIRHEEN ARVIOINTI

Tutkimuksen yksi tavoite oli tehdä Latvaenergialle laskentamalli, jolla voidaan seurata ja tutkia laitoksen hyötysuhdetta erilaisissa tilanteissa sekä laitoksen ikääntyessä. Laskentamalli toteutettiin Excel-taulukossa, joka soveltuu juuri tämän laitoksen hyötysuhteen laskemiseen. Alkuarvot syöttämällä Excel laskee tarvittavat ja halutut väliarvot sekä antaa tuloksena hyötysuhteen ja tutkittavia suureita. Laskemiseen on käytetty kyseistä tälle laitokselle räätälöityä Excel-taulukkoa.

Mittauksissa syntyy aina virheitä ja on tärkeää ottaa huomioon mahdolliset virheet ja mittaustarkkuus, jotta päästään mahdollisimman luotettavaan lopputulokseen.

7.1 Koeajon tulokset

Koeajon 3 keskimääräinen teho oli 54 %, joten mittauksia on verrattu 54 %:n osatehoon.

Höyrykattilalaitoksen jatkuviksi häviöiksi mitattiin seuraavia lukuja:

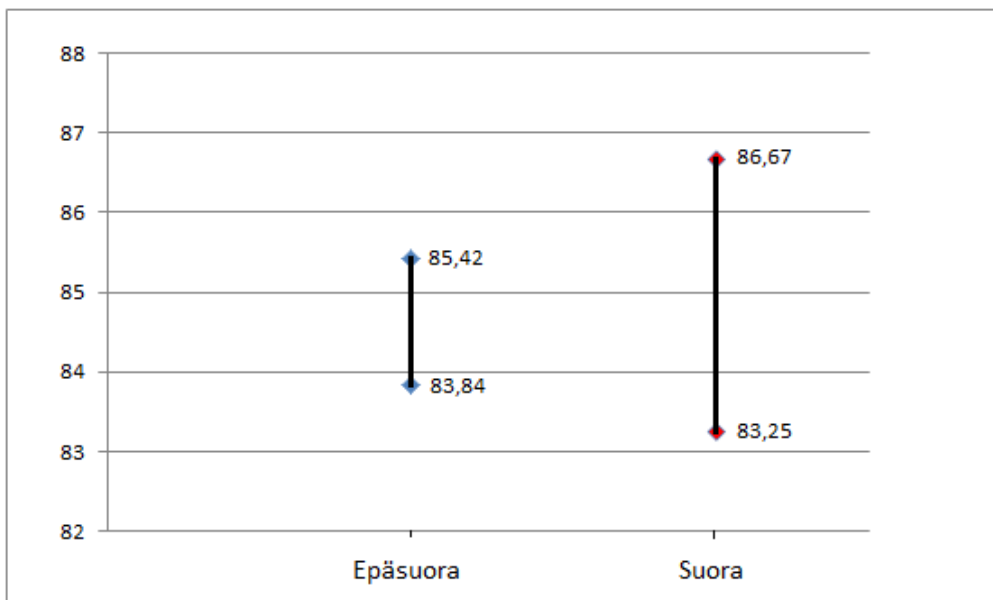
- savukaasuhäviö 12,65 % \pm 0,32 %
- kattilahäviö 2,06 % \pm 0,29 %
- tuhkahäviö < 0,1 %.

Ulospuhalluksen häviöksi mittauksen aikana saatiin 1,71 % \pm 0,08 %. Ulospuhallus tehdään 8 tunnin välein ja se kestää 5 sekuntia, jolloin kaikki häviö tapahtuu. Jos häviö jaetaan 8 tunnille, jatkuva ulospuhallushäviö on 0,56 %.

Epäsuoran menetelmän hyötysuhteeksi mittauksen aikana saatiin 83,48 % \pm 0,79 %, josta polttoaineen määrittämisen kautta syntyvää virhettä on 0,10 %. Tulokseen vaikutti useampi mittausarvo eikä kaikkia häviöitä pystytty mittauksissa määrittämään, kuten esimerkiksi talviaikaan toimivan polttoainesiilon rampin lämmitys ja siihen menevä energia. Mittauksen aikana tapahtunut ulospuhallus alentaa hyötysuhdetta todellisesta arvosta, joka on 84,63 % \pm 0,79 %.

Suoran menetelmän hyötysuhteeksi saatiin 84,96 % \pm 1,71 %, jonka virheeseen vaikuttaa energiamittareiden tarkkuus ja polttoaineen määrittämiseen liittyvät virheet. Suorassa menetelmässä on otettu huomioon kattilan seinämiin varastoitunut energia, koska laitos käy ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppuisin huomattavasti pienemmällä teholla kuin arkipäivisin. Tämän takia kattilan seinämien lämpötila vaihtelee suuresti.

Epäsuoran ja suoran menetelmän tulokset ovat yhteneviä, koska tulokset leikkaavat toisiaan, kuten kuvasta 7 voidaan nähdä. Suoran menetelmän tuloksen alue on paljon laajempi, koska mahdollisen virheen suuruus on suurempi. Epäsuoran tuloksen alue sijoittuu kokonaan suoran menetelmän alueen sisäpuolelle, koska mahdollisen virheenkin suuruus on pienempi. Tästä voidaan havaita, että epäsuora menetelmä antaa luotettavamman tuloksen laitoksen hyötysuhteesta. Molempien menetelmien käyttö auttaa kuitenkin havaitsemaan muuttujia ja mahdollisia virheitä mittauksista.



KUVA 7. Menetelmien yhteneväisyys ja tuloksien alueet

Voidaan olettaa, että osateholla 54 % laitoksen hyötysuhde normaaliolosuhteissa on välillä 83,84–85,42%. Laitoksen käyttösähkön vaikutus kokonaishyötysuhteeseen on keskimäärin 0,8 %, mikä alentaa laitoksen hyötysuhdetta. Tällöin laitoksen kokonaishyötysuhde olisi 54 %:n osateholla 83,04–84,62 %.

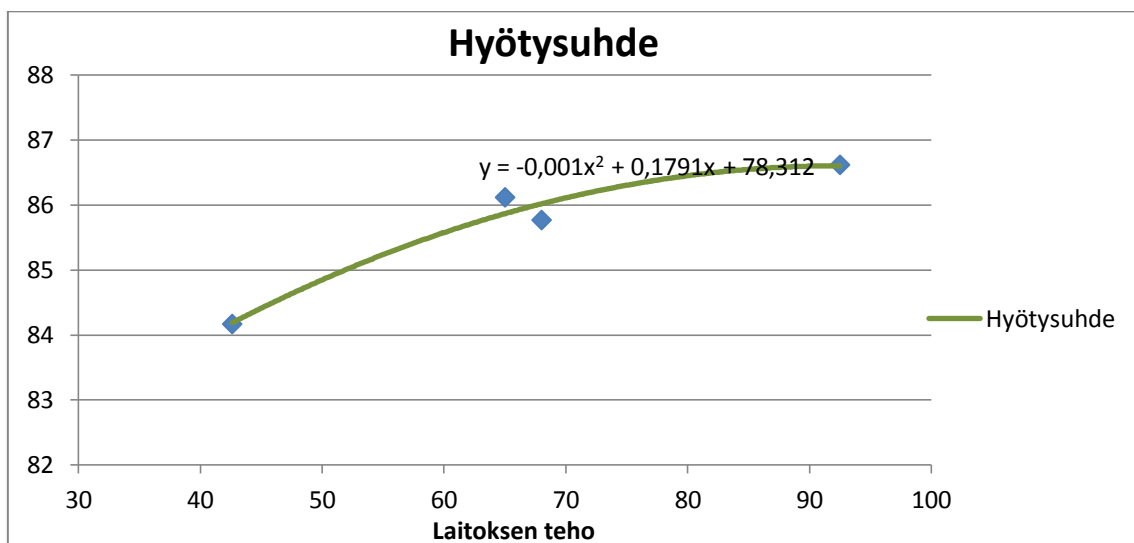
7.2 Keskimääräinen hyötysuhde

Laitoksen hyötysuhdetta tarkkailtiin suoralla menetelmällä noin 3 kuukauden mittaiselta ajanjaksolta. Hyötysuhteeksi saatiin 79,30 % \pm 0,42 %, kun verrattiin tuotettua energiaa käytettyyn energiaan. Tuloksista voidaan havaita, kuinka laitoksen käyttö vaikuttaa hyötysuhteeseen, kun se oli tutkittavana aikana verrattavissa tavalliseen käyttöön.

Esimerkiksi koeajon 3 aikaiseen hyötysuhteeseen verrattuna 3 kuukauden keskimääräinen hyötysuhde on noin 5,33 prosenttiyksikköä pienempi, mikä johtuu asiakkaiden energiatarpeiden vaihtelusta. Laitos käy ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppuisin huomattavasti pienemmällä teholla, mikä alentaa laitoksen hyötysuhdetta pidemmällä aikavälillä.

7.3 Laitoksen maksimitehon hyötysuhde

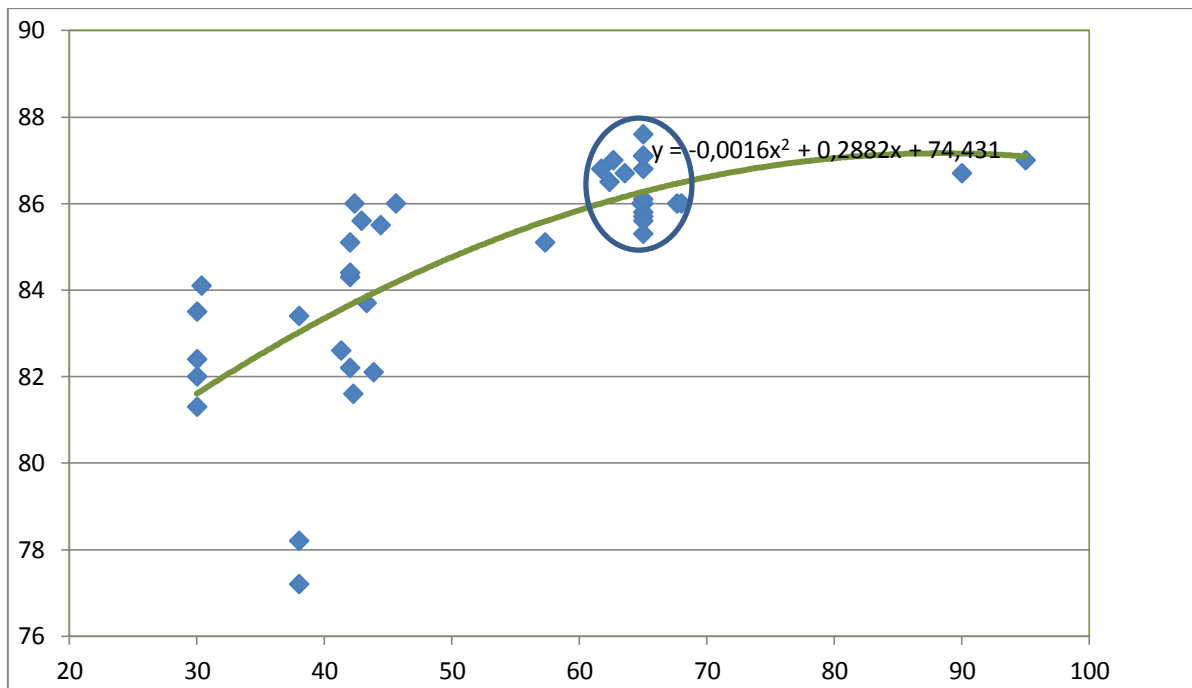
Savukaasuhäviöt muodostavat laitoksen kaikista häviöistä jopa 86 % ja muuttuvat eniten laitoksen tehon muuttuessa. Maksimitehoa mallinnettiin savukaasu-analyysien avulla. Huomattiin, että savukaasu-analyysit vastasivat laitoksen käyttötehoa puolen tunnin viiveellä. Tällöin koeajon 3 eri mittaustulokset antavat kuvan 8 mukaisen käyrän. Yksi mittauspiste on lainattu koeajosta 2 mallintamaan isomman tehon hyötysuhdetta.



KUVA 8. Laitoksen maksimitehon hyötysuhde koeajon 3 mukaan

Käyrän yhtälö antaa maksimitehon hyötysuhteeksi 86,22 %, joka on hyvin lähellä laitostoimittajan lupaamaa hyötysuhdetta n. 86 %. 30 %:n osateholle käyrä antaa hyötysuhteeksi 82,79 % ja 54 %:n teholle vastaava luku on 85,06 %, joka on lähellä koeajon 3 hyötysuhdetta.

Kun kaikkien mittausten savukaasuanalyysjä käytettiin, saatiin hieman jyrkempi käyrä, koska koeajossa 2 laitoksen teho vaihtelee suuresti asiakkaiden tarpeiden äkillisesti muuttuessa.

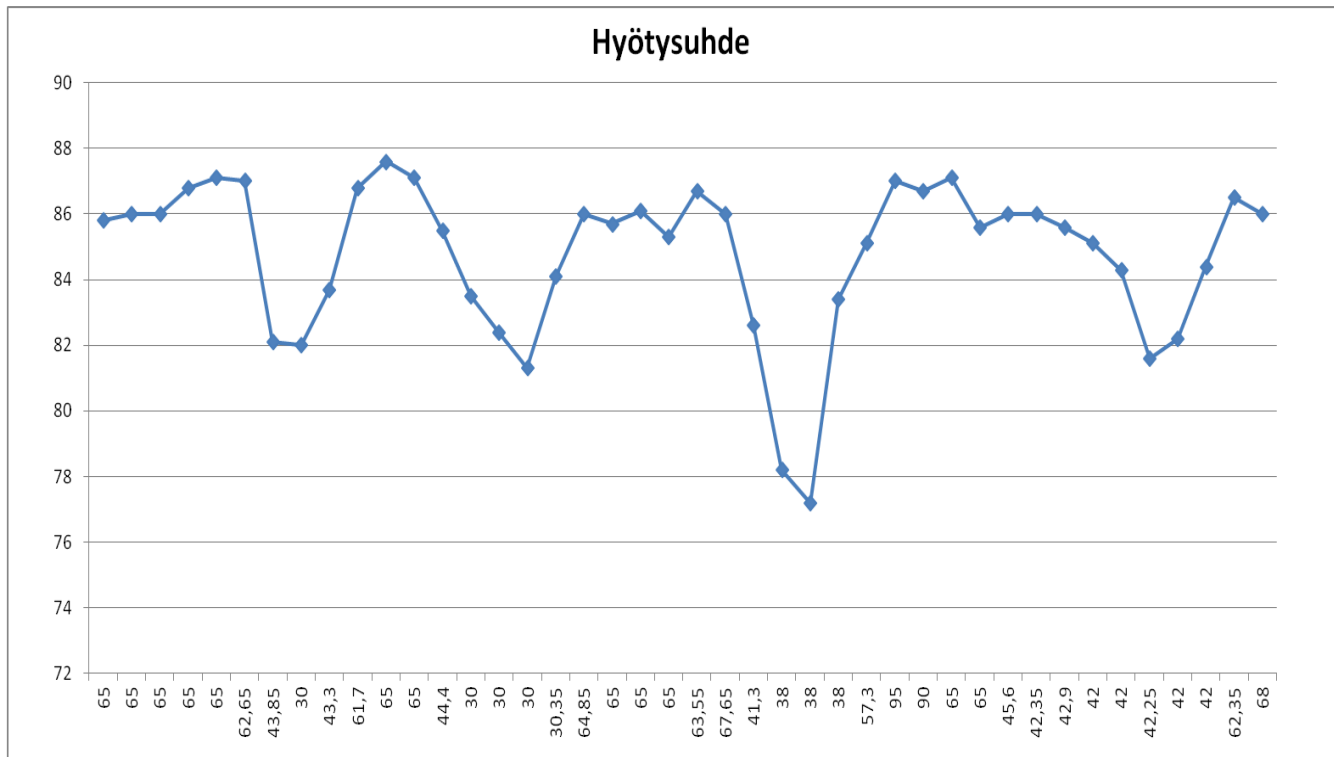


KUVA 9. Laitoksen maksimitehon hyötysuhde kaikkien mittausten mukaan

Kuvasta voidaan nähdä, että laitoksen höytysuhde vaihtelee suuresti pienemmillä tehoalueilla, kun taas 65 %:n teholla hyötysuhde vaihtelee hyvin pienellä alueella ja keskimäärin on yli 86 %. Maksimitehon hyötysuhteeksi käyrän yhtälö antaa 87,25 %, joka on jonkin verran yli luvatus hyötysuhteen. 30 %:n osateholle käyrä antaa hyötysuhteeksi 81,64 % ja 54 %:n teholle vastaavasti 85,33 %. Koeajon 2 aikaan laitoksen teho vaihteli suuresti, mikä jyrkentää käyrää molemmista päistä, koska savukaasuanalyysin tulokseen vaikuttaa vallitsevan tehon lisäksi tuleva teho ja aikaisemmin ollut teho.

Käyrän mukaan 65 %:n teholla laitoksen toiminta on suhteellisen vakaata. Tämä on todettu myös koeajojen jälkeen, kun on pyritty ajamaan 65 %:n teholla

mahdollisimman paljon. Laitos pystyy tällöin vastaamaan hyvin asiakkaiden vaihtuviin tarpeisiin ja toimii toivotulla tavalla. Kuvasta 10 voidaan havaita, kuinka laitoksen käyttöteho vaikuttaa hyötysuhteeseen. Pienemmillä tehoilla hyötysuhde on alhaisempi kuin suuremmilla tehoilla. 30–95 %: n osatehojen hyötysuhteet liikkuvat välillä n. 77–88%.



KUVA 10. Laitoksen hyötysuhde ajon aikana tehon vaihdella

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää höyrykattilalaitoksen hyötysuhde mahdollisimman tarkasti. Lisätavoitteina oli löytää ongelmakohtia ja optimaaliset ajoarvot laitokselle. Laitoksen koko vaikeutti hyötysuhteen määrittämistä huomattavasti, koska laitos on kokoluokaltaan keskikokoinen. Siltä ei vaadita esimerkiksi savukaasujen jatkuvaa mittausta kuten suuremmilta laitoksilta. Laitos ei myöskään ole tarpeeksi pieni, jotta sen hyötysuhdetta voitaisiin tarkkailla helposti. Lisäksi laitoksesta ei ollut tarpeeksi suomen- tai englanninkielisiä tietoja, jotka olisivat auttaneet hyötysuhteen määrittämisessä.

Tulokseksi saatiin, että laitoksen käydessä maksimiteholla laitostoimittajan lupaama noin 86 % hyötysuhde on saavutettavissa. Sopivalla kuormalla ja oikealla hakesekoituksella laitos pystyy jopa ylittämään luvatus hyötysuhteen. Kolmen kuukauden mittausajanjaksolla huomattiin, että laitoksen keskimääräinen hyötysuhde oli 79,30 % \pm 0,42 %. Hyötysuhdetta laskee laitoksen hiljaisempi käyttö ilta- ja yöaikaan sekä viikonloppuisin. Arkipäivisin tehon ollessa 54 % hyötysuhde on peräti 84,63 % \pm 0,79 %, millä on merkittävä ero keskimääräiseen hyötysuhteeseen.

Hyötysuhteiden erosta voidaan havaita, että laitoksen käyttö vaikuttaa hyötysuhteeseen huomattavasti. Etenkin viikonloppuisin laitoksen häviöt ovat suhteessa suuremmat tuotetun energian määrään kuin arkipäivisin. Kattilan seinämät ehtivät jäähtyä jopa yli 350 °C viikonlopun aikana luovuttaen lämpöä prosessiin ja kattilahäviöinä ympäristöön. Maanantaisin kattilan seinämät kuumelevat huomattavasti sitoen lämpöä. Tämä täytyy huomioida hyötysuhdetta mitattaessa sillä varastoituneen energian määrä voi olla jopa 2 MWh, joka on keskimäärin laitoksen yhden tunnin tuotanto.

Työssä huomattiin, että mittauksien suurimmat ongelmakohdat olivat polttoaineen, kattilaan sitoutuneen energian ja ulospuhalluksen mukana menevän energian määrien sekä tuhkahäviön määrittäminen. Nämä pystyttiin kuitenkin arvioimaan sekä määrittämään virherajojen puitteissa. Esimerkiksi kattilaan sitoutuneen energian määrä minimoitiin koeajon mittausjärjestelyssä, jossa koe-

ajon lopetus tähdättiin samaan kattilan paineeseen kuin aloitus. Tällöin jäljelle jäi enää kattilan tulipesän seinämiin sitoutuneen energian määritys.

Tuhkahäviö osoittautui minimaaliseksi, mikä yllätti mittauksissa positiivisesti. Tiedettiin, että jäljelle jäävän tuhkan määrä on pieni, mikä viittasi myös pieniin tuhkahäviöihin. Tuhkan olemus oli hyvin pölymäinen ja hienojakoinen eikä keköleitä ilmennyt ollenkaan. Tuhkasta oli vaikea saada hyvää ja edustavaa näytettä, koska esimerkiksi hiekkaa ja pieniä kiviä ei pystynyt erottamaan tuhkan seasta. Polttoaineen epäpuhtaudet vaikuttavat jo huomattavasti muodostuvan tuhkan määrään, kun polttoaine palaa lähestulkoon täysin.

Kattilahäviöt olivat myös hyvin vähäisiä, mikä kertoo hyvin suunnitellusta seinärakenteesta ja niiden jäähdytyksestä. Savukaasujen loppulämpötila myös yllätti, koska laitoksella ei ole savukaasupesuria tai muita järjestelmiä, jotka ottaisivat talteen lämpöä savukaasuista veden ja ilman esilämmittimien jälkeen. Ulospuhalluksen häviö oli siedettävällä tasolla.

Mittaukset onnistuivat olosuhteisiin nähden todella hyvin ja tulokset ovat mittaustarkkuuksien rajoissa luetettavia. Laitostoimittajan lupaama noin 86 %:n hyötysuhde toteutui, kun arvioitiin maksimitehon hyötysuhdetta. Laitoksen osatehojen hyötysuhteetkin olivat erinomaisia, mikä todistaa, että laitos toimii hyvin ja poltettava polttoaine on laitokselle sopiva.

LÄHTEET

1. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uusittu painos. Opetushallitus. Helsinki: Edita.
2. Maskuniitty, Hannu 2002. Arinapoltto. Teoksessa Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko – Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari (toim.) Poltto ja palaminen. 2. painos. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. S. 466–489.
3. Saastamoinen, Jaakko 2002. Arinapoltto. Teoksessa Raiko, Risto – Saastamoinen, Jaakko – Hupa, Mikko – Kurki-Suonio, Ilmari (toim.) Poltto ja palaminen. 2. painos. International Flame Research Foundation – Suomen kansallinen osasto. Helsinki: Teknillistieteelliset akatemit. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. S. 186–232.
4. Jalovaara, Jukka – Aho, Juha – Hietämäki, Eljas 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW polttolaitoksissa Suomessa., Suomen ympäristö 649. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8707/Paras_kaytettavissa_oleva_tekniikka_\(BAT\)_5-50_MWn_polttolaitoksissa_Suomessa.pdf](http://www.motiva.fi/files/8707/Paras_kaytettavissa_oleva_tekniikka_(BAT)_5-50_MWn_polttolaitoksissa_Suomessa.pdf). Hakupäivä 12.5.2015.
5. Teollisuuskattilat - rakenne. Vantaa: SGN Tekniikka Oy Agrienergia. Saatavissa: <http://www.schmid-energy.fi/kattilat/rakenne>. Hakupäivä 4.11.2015.
6. Rautiainen, Martti – Niskala, Mikko 2015. T620403 LVI-laitosten mittaukset 2 3 op. Pellettikattilan ja polttimen hyötysuhde suoralla ja epäsuoralla mittauksella. Laboratorio-ohje. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
7. LAKA-vuosikirja 1991. Tampere: Laatukattila Oy.
8. Höyrykattilalaitoksen PI-kaavio. Schmid AG. Pyhäntä: Latvaenergia.

9. Latvaenergia Oy – lämpimästi energiapuusta. Latvaenergia Oy. Saatavissa: <http://www.schmid-energy.fi/kattilat/rakenne>. Hakupäivä 4.11.2015. Hakupäivä 6.11.2015.

