

Savukaasupesurin käytön optimointi

Jyväskylän Energiantuotanto Oy

Juuso Järvinen

Opinnäytetyö

Huhtikuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Järvinen, Juuso	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä 24.4.2017
	Sivumäärä 41	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Savukaasupesurin käytön optimointi		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikka		
Työn ohjaaja(t) Hytönen Kari, Siistonen Matti		
Toimeksiantaja(t) Jyväskylän Energiantuotanto Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Jyväskylän Energia Oy:lle Rauhalahden CHP-voimalaitokseen. Rauhalahdi toimittaa sähköä ja kaukolämpöä Jyväskylän kaupungin tarpeeseen. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia savukaasupesurin lämmöntalteenoton tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä keksiä ratkaisu pH:n säätökemikaalin kulutuksen vähentämiseksi.</p> <p>Työstä laadittiin kirjallinen selvitys opinnäytetyön muodossa, jossa pohjustettiin savukaasupesurin käyttöön vaikuttavia ilmiöitä ja muita sen toiminnan kannalta olennaisia asiakokonaisuuksia. Ratkaisun löytämiseksi tietoa savukaasupesurin toiminnasta haettiin ulkomaalaisesta ja kotimaisesta kirjallisuudesta, voimalaitoksen käyttöhenkilökunnan käyttäjäkokemuksista, sekä laitetoimittajan asiantuntijalausunnoin.</p> <p>Savukaasupesurin toiminnan riippuvuussuhteiden ymmärtämiseksi teoriaosuudessa käsiteltiin voimalaitosympäristö, polttoaineet, palaminen, termodynamiikan perusteet, päästöjen syntyminen sekä kaukolämpöjärjestelmä.</p> <p>Tärkeimpänä lopputuloksena työn loppuun koottiin käytön optimoinnin tärkeimmät asiat. Optimointitavoista kaksi on ajomalliratkaisuja, joiden tueksi on esitetty konkreettisia parannusehdotuksia. Kolmas on pH-tason mittaus- ja säätötekniillinen ratkaisu.</p> <p>Parannusehdotusten pohjalta yhtiö voi päättää koeajojaksosta, mikä kertoo mallien toimivuudesta. Myös kannattavuuslaskelmat ja tarkemmat toimenpiteet tulee tarkastella syvälisemmin ennen ajomallien käyttöönottoa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Savukaasupesuri, optimointi, energiatehokkuus, kaukolämpö, LTO-teho		
Muut tiedot		

Author(s) Järvinen, Juuso	Type of publication Bachelor's thesis	Date April 2017
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 41	Permission for web publication: X
Title of publication Optimization of flue gas scrubber		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen Kari, Siistonen Matti		
Assigned by Jyväskylän Energiantuotanto Oy		
Abstract <p>The thesis was made as an assignment for Jyväskylän Energia Oy, more specifically to their CHP power plant in Rauhalampi which produces electricity and heat for the city of Jyväskylä. The purpose of the assignment was to examine the factors that have an influence on the flue gas scrubber, its heat recovery effectiveness and its pH-level control.</p> <p>A written report was made from the assignment that contained information and phenomena that have an influence on the flue gas scrubber. To help solve the assignment, information was gathered from multiple sources (both Finnish and English) of literature, the working staff of the power plant and the manufacturer of the washer.</p> <p>To better understand the correlations of the flue gas scrubber, the theory section contained such subjects as power plant environment, fuels, burning process, basics of thermodynamics, emissions and the district heating system.</p> <p>The most relevant optimization methods were compiled to the end of the report. Two of which were considered better methods of usage along with concrete improvement propositions. The third method of optimization was an improvement to the measurement and control of the pH-level.</p> <p>With these methods, the company can decide on a trial run which will determine their effectiveness. The profitability calculations and other measures will also have to be examined before commissioning.</p>		
Keywords/tags (subjects) Flue gas scrubber, Optimization, energy efficiency, district heating, heat recovery		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto.....	4
2	Työn toteutus	4
3	Jyväskylän Energia Oy.....	5
4	Rauhalahden CHP-voimalaitos	6
	4.1 Laitosalue.....	6
	4.2 IED-projekti.....	7
5	Polttoaineet ja niiden ominaisuudet.....	7
	5.1 Turve.....	8
	5.2 Bio.....	8
	5.3 Hiili.....	9
	5.4 Raskas polttoöljy	9
6	Leijupetikattila.....	10
7	Palaminen.....	11
	7.1 Palamisen perusteet.....	12
	7.2 Lämpöarvo.....	13
8	Lämmön siirtyminen.....	14
	8.1 Lämmön siirtymisen mekanismit	14
	8.2 Lämmönsiirtimet	17
9	Palamisilma ja savukaasut.....	19
10	Päästöt.....	20
	10.1 Pienhiukkaset	20
	10.2 Raskasmetallit.....	21
	10.3 Typen oksidit	21
	10.4 Hiilidioksidi ja -monoksidi.....	21
	10.5 Rikin oksidit	21
11	Savukaasujen puhdistus	22
	11.1 Pienhiukkaset	22

11.2	Rikinpoiston märkämenetelmä	24
11.3	Typhen oksidit	24
12	Kaukolämpöverkko.....	25
12.1	Lämpötilan mitoitus	26
12.2	Paineen mitoitus.....	26
12.3	Paine-eron mitoitus.....	26
13	Rauhalahden savukaasupesuri	27
13.1	Savukaasupesurin toimintakuvaus.....	28
13.2	Lipeän annostelu	29
13.3	Lauhteenkäsittely	29
14	Savukaasupesurin käytön optimointi.....	30
14.1	Lipeän annostelun vaiheistus	30
14.2	Optimaalinen polttoaine ja sen kosteus	31
14.3	Optimaalinen kaukolämmön paluulämpötila	34
15	Pohdinta	35
15.1	Tulokset	36
15.2	Luotettavuuden arviointi.....	37
	Lähteet.....	38
	Liitteet	39

Kuviot

Kuvio 1: Omistussuhteet (JE-yhtiöt).....	6
Kuvio 2: Leijupetikattilan periaate (Huhtinen, ym. 2000. 158).....	11
Kuvio 3: Kattilan lämmönsiirtopinnat (Huhtinen, ym. 2000. 184)	17
Kuvio 4: Vastavirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)	18
Kuvio 5: Myötävirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)	18
Kuvio 6: Ristivirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)	19
Kuvio 7: Sähkösuodattimen toimintaperiaate (Principles of Electrostatic precipitator. 2014).....	23
Kuvio 8: Savukaasupesuri (Järvenreuna J. & Nummila M.).....	28
Kuvio 9: Polttoaineen kosteuden vaikutus pesurin LTO-tehoon (Savukaasun puhdistus ja lämmön talteenotto. 2016)	32
Kuvio 10: LTO -laskelma (Laskuri savukaasupesurin lämmöntalteenottotehon arvioimiseksi. 2016).....	33
Kuvio 11: Siilokuivaus (Jaakko Nummelin Ville Hankalin Markku Raiko. 2014).....	35

Taulukot

Taulukko 1: Rauhalahden kattilat (JE-energiantuotantolaitokset)	7
Taulukko 2: Puhdistimien erotusasteet (Huhtinen, ym. 2000. 256)	22

1 Johdanto

Tiukentuva ympäristölainsäädäntö ja fossiilisten polttoaineiden verotus aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia kaukolämpöä tuottaville laitoksille etenkin talvisin, kun kaukolämmön kulutus on suurinta. Uudenlaisella investoinnilla kaukolämmöntuotantoa saadaan tehostettua useita megawatteja ja päästöt saadaan alemmaksi.

Savukaasupesureita on käytetty teollisuudessa jo pidemmän aikaa, mutta energiayhtiöille investointi on suhteellisen uusi. Tämä uudentyypinen pesuri ei ainoastaan puhdistaa savukaasuja tehokkaasti, vaan tarjoaa paremman lämmön talteenoton savukaasuista, mikä parantaa laitoksen energiatehokkuutta.

Savukaasupesuri on investointina muutenkin kannattava, sillä sen takaisinmaksuaika on parhaimmillaan muutama vuosi. Tämän jälkeen pesuri on pelkkää säästöä energiayhtiölle niin päästöissä kuin kaukolämmön tuotannossakin. Juuri sen takia pesuria kannattaa käyttää aina kun se vain on mahdollista. Pesurin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita ja niiden huomioimisella on suuri vaikutus siitä saatavaan hyötyyn.

Työn toimeksiantajana oli Jyväskylän Energia Oy. Työ suoritettiin Rauhalahden CHP -voimalaitokseen. Laitoksen päästöjen vähentämiseksi ja käyttöiän pidentämiseksi oli vuonna 2015 kesällä investoitu savukaasupesuriin. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää savukaasupesurin optimaaliseen käyttöön vaikuttavia tekijöitä sekä keksiä niiden tueksi konkreettisia parannusehdotuksia.

2 Työn toteutus

Tämä opinnäytetyö on kirjallinen selvitys savukaasupesurin käyttöön vaikuttavista tekijöistä ja ilmiöistä. Sen tarkoitus on auttaa toimeksiantajaa savukaasupesurin optimaalisessa käytössä ja maksimaalisten hyötyjen saavuttamisessa. Myös säästötekijöihin on otettu kantaa kemikaalinsyötön kannalta.

Teoriaosuuden kirjoittaminen tapahtui kotimaisen ja ulkomaalaisen kirjallisuuden pohjalta, jotka käsittelivät höyrykattilatekniikkaa, termodynamiikkaa ja päästöjä.

Työn suorittaminen tapahtui perehtymällä aluksi savukaasupesurin toimintaan Rauhalahden voimalaitoksella. Tämä sisälsi kenttäkierroksia henkilöstön avustamana, ajokaavioiden opiskelua ja toimintakuvauksien opiskelua. Tulososuuteen haettiin tietoa laitevalmistajalta vierailun muodossa.

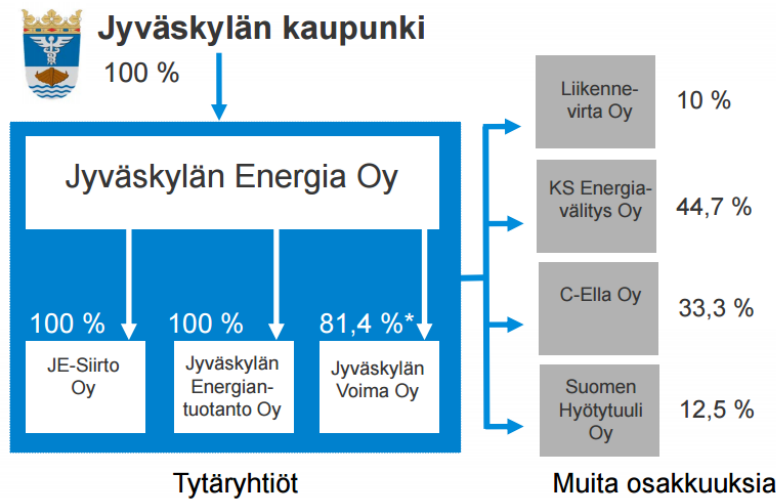
3 Jyväskylän Energia Oy

Jyväskylän Energia Oy on Jyväskylän kaupungin oma energiayhtiö, joka perustettiin vuonna 1902. Emoyhtiön lisäksi yrityksellä on neljä tytäryhtiötä: Jyväskylän Energiantuotanto Oy, Jyväskylän Voima Oy, JE-Urakointi Oy, JE-siirto Oy. Jyväskylän Energia Oy työllistää 250 henkilöä (ks. Kuvio 1). (JE-yhtiöt)

Jyväskylän Energia vastaa energian ja veden tuotannosta, jakelusta ja myynnistä Jyväskylän alueella. Se tuottaa vuosittain n. 1250 GWh sähköä ja n. 1100 GWh lämpöä. Vuonna 2011 sen liikevaihdon arvioitiin olevan n. 190 miljoonaa euroa. (JE-yhtiöt)

Päälaitoksia yhtiöllä on kaksi: Rauhalahti ja Keljonlahti. Tämän lisäksi Jyväskylän Energialla on lämpölaitoksia ympäri kaupunkia yhteensä 10 kappaletta, joilla voidaan tarvittaessa korvata koko kaupungin lämmöntarve. (JE-yhtiöt)

Yrityksen huolehdittavana on myös Jyväskylän kaupungin vesihuolto, jota käsitelläänkin melkein 8 miljoonaa kuutiota vuodessa. Lisäksi yhtiö on osakkaana tuulivoimaa tuottavassa Hyötytuuli Oy:ssä. (JE-yhtiöt)



Kuvio 1: Omistussuhteet (JE-yhtiöt)

4 Rauhalahden CHP-voimalaitos

Rauhalahden CHP-voimalaitos on rakennettu vuonna 1986 ja sen alkuperäinen omistaja oli IVO eli Imatran Voima Oy. Kattila oli alun perin tyypiltään arina, mutta se muutettiin Tampella Powerin leijukerroskattilaksi. Käytettäviä polttoaineita laitoksella on turve, biomassa, hiili ja raskas polttoöljy, joista kahta viimeistä käytetään lähinnä tukipolttoaineina. Laitos tuottaa kaukolämpöä ja sähköä Jyväskylän kaupungin alueelle. Laitoksella on myös mahdollista tuottaa prosessihöyryä, jota käytettiin aikaisemmin Kankaan paperitehtaalla. (JE-energiantuotantolaitokset)

4.1 Laitosalue

Pääkattilan lisäksi laitoksen alueella on kaksi apukattilaa: Vuonna 1992 rakennettu raskasta polttoöljyä käyttävä RAI2, jota käytetään pääkattilan käynnistykseen tarvittavan starttihöyryn tuotannossa sekä RAI4 kaukolämpökattila, joka toimii myös raskaalla polttoöljyllä. RAI4 kattilaa käytetään kulutushuippujen yhteydessä keventämään pääkattilan kuormaa (ks. taulukko 1). (JE-energiantuotantolaitokset)

Taulukko 1: Rauhalahden kattilat (JE-energiantuotantolaitokset)

Kattila	Valmis- tusvuosi	Kaukolämpö	Sähkö	Höyry	Yhteensä
Pääkattila RAI1	1986	140 MW	87 MW	40 MW	267 MW
Apukattila RAI2	1992	-	-	65 MW	65 MW
Kaukolämpökattila RAI4	2004	40 MW	-	-	40 MW
Yhteensä		180 MW	87 MW	105 MW	372 MW

Yhteenlaskettu kokonaisteho laitosalueella on n 370MW. (JE-energiantuotantolaitokset)

4.2 IED-projekti

Rauhalahden voimalaitokselle tehtiin vuonna 2015 merkittävä investointi, mikä pidentäsi laitoksen käyttöikää vuoteen 2030 asti ja vähensi päästöjä huomattavasti.

Tämä Andritz Oy:n toimittama savukaasupesuri ja laitoksen savukaasupuolelle tehdyt muutokset maksoivat yhteensä noin 20-30 miljoonaa euroa. Projektin seurauksena luovuttiin mm. pyörivästä savukaasuluvosta ja se korvattiin HTS-levylämmönsiirtimellä. Myös savupiippu, savukaasupuhaltimet, sähkösuodatin, ja tuhkan purku uusittiin kokonaan. (JE-energiantuotantolaitokset)

IED-projektin yhteydessä Rauhalaitoksen turbiinille suoritettiin täysi turbiinireviisio ja muulle laitokselle seisakkihuolto.

5 Polttoaineet ja niiden ominaisuudet

Rauhalahdessa käytettäviä polttoaineita ovat pääosin puu ja turve, joita syötetään tulipesään 50/50 suhteella. Laitoksen käynnistyksen yhteydessä käytetään raskasta

polttoöljyä. Laitoksella on myös mahdollisuus hiilen peti- ja pölypoltolle, mutta viime vuosina hiilen käyttö on ollut vähäistä.

5.1 Turve

Turve on hyvin kosteissa oloissa maatonutta kasvien osia, jotka eivät pääse kunnolla hajoamaan vähäisen hapen vuoksi. Turvesoilta pintakerros kerätään talteen ja se voidaan polttaa sellaisenaan tai palaturpeeksi puristettuna. Turve on bioperäistä hitaasti uusiutuvaa polttoainetta, mutta se luokitellaan fossiiliseksi polttoaineeksi. (Eija Alakangas, Markus Hurskainen, Jaana Laatikainen-Luntama & Jaana Korhonen. 119)

Turve on koostumukseltaan yli 50% hiiltä, 20% happea ja loppuosa on vetyä, typpeä ja rikkiä. Sen poltosta syntyy rikkidioksidia, jolla on voimakkaasti korrosoiva vaikutus kattilan lämmönsiirtopinnoilla, jos happokastepiste alittuu. Puun ja turpeen yhteispoltossa tätä riskiä voidaan vähentää. (Alakangas, ym. 122)

Turve varastoidaan usein laitosalueen polttoainekentällä oleviin turvesiiloihin ja se on tällöin tasalaatuista vakiona pysyvän kosteusprosenttinsa takia. Keskiverto lämpöarvo turpeelle on noin. 20 MJ/kg.

5.2 Bio

Biomassa on puusta tai sen osista hakettua polttoainetta. Sitä syntyy suuret määrät hakkuutähteistä ja muusta esimerkiksi sellunvalmistukseen kelpaamattomasta puuaineksesta. Biomassa on luokiteltu uusiutuvaksi polttoaineeksi, sillä poltettaessa sen sisältämän hiilidioksidin katsotaan sitoutuvan takaisin metsiin. Vuosittain Suomen puustoa kasvaa n. 90 miljoonaa kuutiometriä. (Alakangas, ym. 54)

Keskiverto metsähake sisältää noin puolet hiiltä, 40% happea ja 6% vetyä. Rikin ja typen osuudet ovat pieniä. Biomassa ja etenkin vihreä kasvillisuus, kuten puun lehdet ja neulaset sisältävät klooria, mikä alentaa tuhkan sulamislämpötilaa ja aiheuttaa pahimmillaan vaurioita kattilan lämmönsiirtopinnoilla. Kuitenkin esimerkiksi turpeen sisältämä rikki sitoo klooria hyvin. (Alakangas, ym. 54)

Biomassa varastoidaan usein polttoainekentälle kasoihin, joista sitä siirretään kauha-kuormaajalla syöttötaskuun ja siitä edelleen kuljettimia pitkin päiväsiiloon. Voimalaitokselle tulevaa karkeampaa biomassaa, kuten oksia ja kantoja, voidaan myös polttaa, mutta se tulee hienontaa ensin murskalla. Biomassan vertailukelpoinen lämpöarvo 50% kosteudessa on noin. 19MJ/kg. (Alakangas, ym. 61)

5.3 Hiili

Suomessa käytetty kivihiili on usein Venäjältä tai Puolasta ostettu polttoaine. Se on muodostunut pitkän ajan (kymmeniä miljoonia vuosia) kuluessa päällekkäin kertyneistä turvekerroksista. Ruskohiili sisältää vähemmän hiiltä kuin kivihiili ja on myös iältään paljon nuorempaa. (Alakangas, ym. 169-170)

Kivihiilen hiilipitoisuus vaihtelee välillä 60-70%. Loppuosa on vetyä, typpeä ja rikkiä. Sen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa (n. 50%) on 11-14 MJ/kg. Rusko- ja kivihiili ovat fossiilista polttoainetta ja niiden polttamisesta syntyy suuri osa maailman kasvihuonepäästöistä. (Alakangas, ym. 172-173)

Hiili varastoidaan laitoksen polttoainekentälle yhteen kasaan ja sitä syötetään polttoainekuljettimelle sellaisenaan petipolttotarkoituksessa. Hiili voidaan myös jauhaa kuulamylyllä ja polttaa kattilassa pölypolttona.

5.4 Raskas polttoöljy

Raskas polttoöljy on maaöljystä krakkaamalla valmistettua runsaasti hiilivetyjä sisältävää nestettä. Sitä käytetään laajalti suurissa voimalaitoksissa apupolttoaineena ja vara-energian lähteenä. Myös pienemmät vara- ja starttikattilat ovat usein raskasöljykäyttöisiä. Raskas polttoöljy vaatii korkean lämpötilan syttyäkseen, minkä takia sillä täytyy olla jatkuva lämmitys. (Alakangas, ym. 180-181)

Raskas öljy sisältää pääosin hiiltä ja vetyä, mutta myös jonkin verran rikkiä, minkä takia sen polttaminen aiheuttaa merkittäviä rikkidioksidipäästöjä. Sen lämpöarvo on n. 41MJ/kg tai 12kWh/l. Raskas polttoöljy on fossiilinen polttoaine. (Alakangas, ym. 180-181)

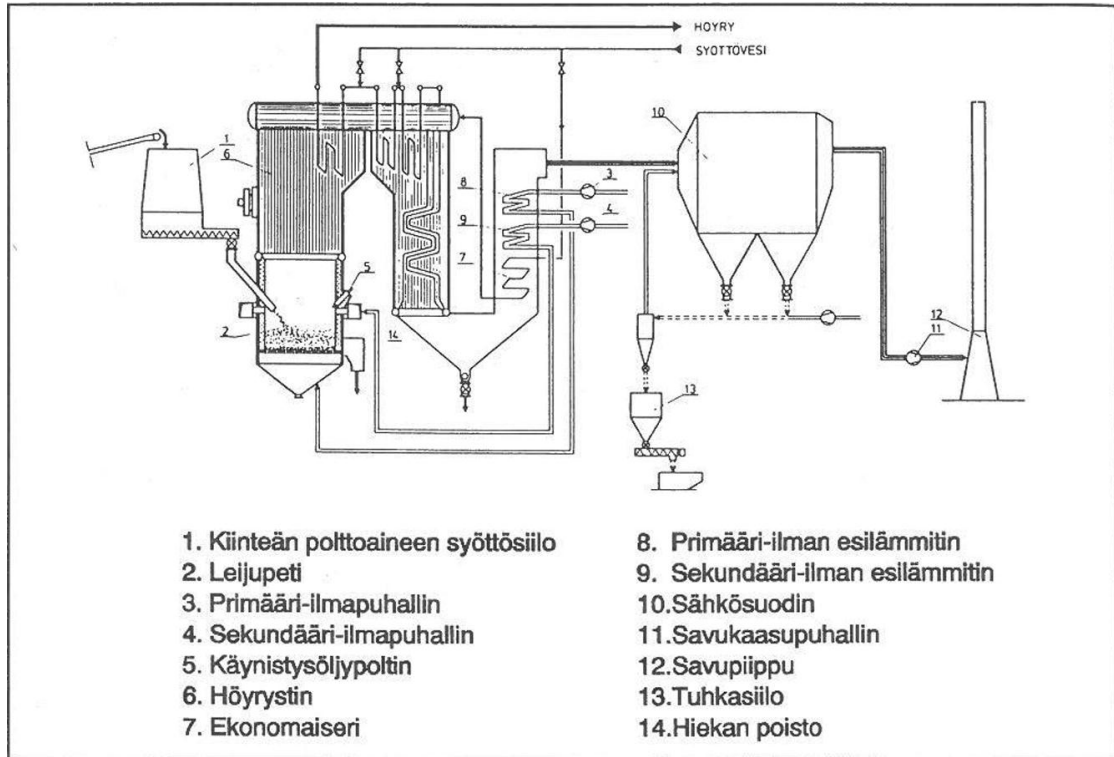
Öljyä varastoidaan voimalaitosalueella sijaitsevaan säiliöön, missä on jatkuva lämmitys. Säiliöstä öljy siirtyy putkilinjoja pitkin pumpun avulla polttimille.

6 Leijupetikattila

Leijupetikattila tai kerrosleijukattila on laajalti käytössä oleva teollisuuden ja energia-yhtiöiden kattilatyyppejä. Kattilatyypin ominaispiirre on pohjalla oleva 0,4-0,8 metrin hiekkakerros. Tätä kerrosta ”leijutetaan” puhaltamalla ilmaa sen alapuolelta primääri-ilmapuhaltimella. Kattilaa ajettaessa kuumen hiekkapetin (750-850C) päälle syötetään polttoaineseosta useasta sulkusyöttimestä kattilan kummaltakin puolelta. Polttoaine kuivuu ja syttyy nopeasti kuumassa petissä, minkä takia kattila soveltuu hyvin myös kosteiden ja epätasalaatuisten polttoaineiden polttamiseen. (Huhtinen, ym. 2000. 157)

Poltosta syntyvä tuhka ja muut polttoaineen epäpuhtaudet poistetaan kattilan alaosasta ruuvikuljettimilla, jotka siirtävät aineksen pohjan alapuolella kulkevalle pohjakuonakuljettimelle. Petihiekka seulotaan tuhkasta ja käytetään uudelleen. Kuitenkin petihiekkaa on jatkuvasti lisättävä kattilaan häviöiden vuoksi, mikä on suurinta vähä-tuhkaista polttoainetta polttaessa. Hienompijakoinen tuhka puolestaan kulkeutuu savukaasujen mukana sähkösuodattimille, joista sitä poistetaan tuhkapallojen avulla (ks. kuvio 2). (Huhtinen, ym. 2000. 158)

Polttotekniikan riskinä on polttoaineen tuhkan sulaminen petihiekkaan liian korkeilla lämpötiloilla ja tämän sattuessa kattila täytyy ajaa alas ja korvata vanha petihiekka kokonaan uudella. Ilmiön välttämiseksi petilämpötilaa hallitaan yleensä kiertokaasupuhaltimella, joka ottaa osan savukaasuista ennen piippua ja kierrättää sen takaisin tulipesään palamisen rajoittamiseksi. Lämpötila pyritään pitämään vähintään 100C kylmempänä kuin polttoaineen tuhkan sulamispiste. (Huhtinen, ym. 2000. 158-159)



Kuvio 2: Leijupetikattilan periaate (Huhtinen, ym. 2000. 158)

Kattilaan tulevaa syöttövettä esilämmitetään ekonomaisereilla, joita on yleensä kaksi kappaletta. Syöttövesi kulkee aluksi kylmemmän ja sen jälkeen kuumemman ekonomaiserin kautta kohti kattilan keittopintoja. Ekonomaiserit ovat tyypiltään risti-
 virtralämmönsiirtimiä. Myös palamisilmoja esilämmitetään esimerkiksi matalapaine-
 höyryä tai savukaasua hyödyntävillä ilman esilämmittimillä (ks. kuvio 2). (Huhtinen,
 ym. 2000. 194-201)

7 Palaminen

Palaminen tarkoittaa eksotermistä eli lämpöä vapauttavaa reaktiota hapen ja reagoi-
 van aineen, kuten hiilen (C), rikin (S) ja Vedyn (H₂) välillä. Jokainen reaktio on oman-
 laisensa ja vapauttaa erimäärän lämpöenergiaa. Tämän takia jotkut polttoaineet ovat
 tehokkaampia lämmöntuotannossa kuin toiset. (Huhtinen, ym. 2000. 79)

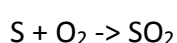
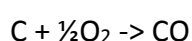
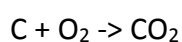
7.1 Palamisen perusteet

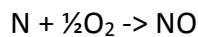
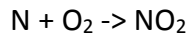
Kuten edellä mainittiin, jokainen aine tarvitsee tietyn lämpötilan ja happipitoisuuden syttyäkseen. Tämän takia jokaisella aineella on oma syttymispiste, leimahduspiste, palopiste ja savupiste. Kun kattilassa poltetaan erilaisia polttoaineita, varmistetaan niiden tehokas palaminen tarpeeksi korkealla tulipesän lämpötilalla ja riittävällä hapella. Yli-ilmamäärä on erisuuruinen polttoaineesta riippuen. (Huhtinen, ym. 2000. 80)

Kiinteää polttoainetta poltettaessa voidaan palaminen jakaa kolmeen vaiheeseen: Kaasuuntuminen, haihtuvien aineiden palaminen sekä kaksin lämpeneminen ja kaksin palaminen. Kaasuuntumisvaiheessa polttoaineesta poistuu kosteus ja haihtuvat aineet. Seuraavassa vaiheessa n. 400 – 600 C lämpötilassa polttoaineen haihtuvat aineet syttyvät palamaan ja polttoaineesta poistuu loppu kosteus. Viimeisessä vaiheessa polttoaineesta jäljelle jäänyt koksipartikkeli syttyy ja palaa ympäristöä korkeammassa lämpötilassa (800-1000C) luovuttaen lämpöenergiaa. Näissä lämpötiloissa palamisaika on maksimissaan muutaman sekunnin, josta puolet kuluu kaksin palamiseen. (Huhtinen, ym. 2000. 83)

Kun eri yhdisteet palavat eli reagoivat hapen kanssa, syntyy niistä oksideja. Esimerkiksi hiilestä (C) muodostuu hiilidioksidia (CO₂) täydellisen palamisen yhteydessä ja jos happea ei ole tarpeeksi, muodostuu hiilestä häkää (CO). Rikin palamistuotteena syntyy rikkidioksidia (SO₂). Typen palaessa muodostuu typpimonoksidia (NO) tai typpidioksidia (NO₂), joita kutsutaan yleisesti typen oksideiksi tai NO_x-päästöiksi. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu ja ilmakehässä se sitoo itseensä auringon lämpöenergiaa lämmittäen ilmastoa. Rikkidioksidi puolestaan muodostaa helposti rikkihapoketta ja rikkihappoa ilman kosteuden kanssa ja aiheuttaa ympäristön happanemista. (Huhtinen, ym. 2000. 84)

Palamisreaktiot voidaan esittää seuraavasti:





7.2 Lämpöarvo

Lämpöarvo ilmaisee polttoaineen täydellisestä palamisesta syntyvän energiamäärän kilogrammaa kohden ja se saadaan määritettyä pommikalorimetrin avulla laboratoriossa. Lämpöarvo voi olla tehollinen eli alempi lämpöarvo tai ylempi eli kalorimetrinen lämpöarvo. (Alakangas, ym. 28)

Ylempi lämpöarvo saadaan määritettyä polttamalla pieni otos polttoaineesta kalorimetrin sisällä. Kalorimetrissä tapahtuvasta lämpötilan noususta saadaan lämpöarvo. Palamisessa syntyvä ja polttoaineen sisältämä vesi on reaktion jälkeen nesteenä. (Alakangas, ym. 29)

Alemmassa lämpöarvossa vesihöyryn sisältämää energiaa ei oteta huomioon sillä todellisuudessa sitä ei voida hyödyntää, vaan se kulkeutuu savukaasujen mukana tai vaalle. Alempi lämpöarvo saadaan vähentämällä ylemmästä lämpöarvosta tiivistyneen veden lauhtumislämpö (2443 kJ/kg, kun $t=25\text{ C}$). (Alakangas, ym. 28)

Kattilalaitoksissa käytetään usein tehollista lämpöarvoa saapumistilassa, mikä on saatu ylemmästä lämpöarvosta ja polttoaineen kosteudesta. Tehollinen lämpöarvo määritetään kokeellisesti. Kiinteillä polttoaineilla lämpöarvo ilmaistaan usein [MJ/kg] ja kaasumaisilla [MJ/m³].

Tehollinen lämpöarvo määritellään kalorimetrisen lämpöarvon mukaan seuraavasti

$$H_{u(\text{kuiva})} = H_{o(\text{kuiva})} - 8,939 * l_{25} * m_{\text{vety}}$$

missä $H_{o(\text{kuiva})} = \text{kuiva} - \text{aineen kalorimetrinen lämpöarvo}$,

$H_{u(\text{kuiva})} = \text{kuiva} - \text{aineen tehollinen lämpöarvo}$

$l_{25} = \text{veden höyrytymislämpö} (2443 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \text{ kun } t = 25^\circ\text{C})$

$$m_{vety} = \text{vedyn määrä kuivassa polttoaineessa (kg H}_2\text{/kg pa)}$$

Kuiva-aineen tehollisesta lämpöarvosta saadaan polttoaineen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa seuraavasti

$$H_{u(kostea)} = H_{u(kuiva)} * (1 - m_{vesi}) - l_{25} * m_{vesi}$$

Missä $H_{u(kostea)}$ = kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo

$$m_{vesi} = \text{veden määrä kosteassa polttoaineessa (kg H}_2\text{O/kg pa)}$$

8 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtyminen on voimalaitoksen toiminnan kannalta tärkein ominaisuus.

Lämpö siirtyä aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan, ei koskaan toisinpäin.

Tätä ilmiötä kuvaa termodynamiikan toinen pääsääntö.

8.1 Lämmön siirtymisen mekanismit

Lämpö voi siirtyä väliaineesta toiseen kolmella tavalla: Johtuminen, säteily ja konvektio. Kattilalaitoksissa kaikki lämpö pyritään hyödyntämään kokonaishyötysuhteen parantamiseksi, joten kaikkia lämmönsiirto mekanismeja hyödynnetään.

Johtuminen tarkoittaa lämmön siirtymistä väliaineen sisällä tai kahden väliaineen välillä, jos ne ovat kosketuksissa toisiinsa. Johtumista voidaan havainnollistaa esimerkiksi laittamalla metallinen kappale kynttilän päälle, milloin lämpö johtuu kynttilän puoleisesta päästä myös toiseen päähän. Lämmön johtumista voidaan mitata lämpöresistanssilla tai lämmönjohtavuudella ($W/(K \cdot m)$) (John H. Lienhard IV, 10)

$$\lambda = \frac{P}{A * \frac{dT}{dx}}$$

Missä λ = Lämmönjohtavuus [W/K*m]

$\frac{dT}{dx}$ = Lämpötilagradientti [K/m]

P = Siirtyvä lämpöteho [W]

A = Kappaleen poikkipinta – ala [m²]

$$R_{th} = \frac{dT}{P}$$

Missä dT = Lämpötilaero [K]

P = Teho [W]

R_{th} = Lämpöresistanssi [(K*m²)/W]

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda * A}$$

Missä l = Kappaleen pituus [m]

λ = Kappaleen lämmönjohtavuus [W/K*m]

A = Kappaleen poikkipinta – ala [m²]

R_{th} = Lämpöresistanssi [(K*m²)/W]

Säteily on lämmön siirtymistä säteilylähteestä kohteeseen tai ympäristöön. Säteilyn kohteeseen osuessa lämpösäteily absorboituu lämmittäen itse kohdetta. Kappaleen pinnalta havaittava lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä (Esimerkiksi valo tai infrapunasäteily). Kaikki aineet joiden lämpötila on yli 0K lähettävät lämpösäteilyä hiukkasten liikkeestä johtuen. Ilmiötä voidaan havainnollistaa nuotion lämmittäväällä

vaikutuksella ympäristöön. Säteilytehoa voidaan kuvata Stefan-Boltzmannin lailla, joka kertoo mustan kappaleen lähettämästä säteilytehosta: (John H. Lienhard IV, 26-28)

$$M = \sigma * T^4$$

Missä $\sigma =$ Stefan – Boltzmannin vakio $= 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$T =$ Lämpötila

Viimeinen lämmönsiirtomekanismi on konvektio. Tämä tarkoittaa lämmönsiirtymistä jonkin fluidin eli virtaavan aineen mukana. Tämä voi tapahtua ns. vapaasti eli lämpötilaeroista aiheutuu virtausta pystysuunnassa, milloin lämpö siirtyy. Tehokkaampi konvektion muoto on pakotettu konvektio, jossa fluidi saatetaan liikkeeseen esimerkiksi pumpun tai puhaltimen avulla, mikä parantaa konvektiokerrointa. Esimerkiksi ilman liikkeestä aiheutuva konvektio voidaan laskea seuraavasti: (John H. Lienhard IV, 19-20)

$$\Phi_{cv} = c \cdot \rho \cdot (T_1 - T_2) \cdot V$$

Missä $c =$ Ilman ominaislämpökapasiteetti [J/Kg*K]

$\rho =$ Ilman tiheys [kg/m³]

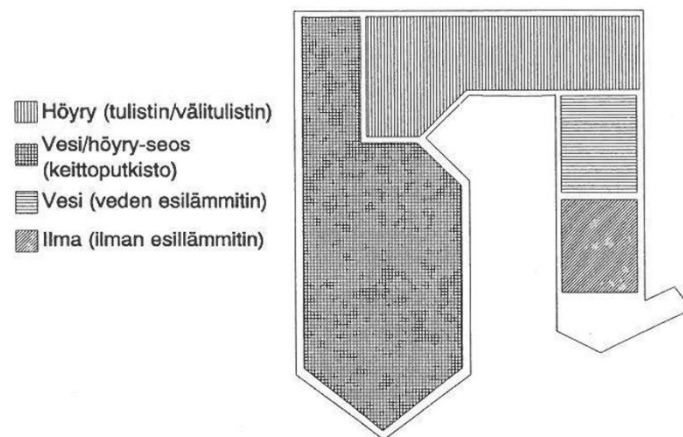
$T_1 - T_2 =$ Lämpötilaero [K]

$V =$ Tilavuusvirta [m³/s]

Lämmönsiirto on tehokkaimmillaan, kun aineen faasimuutos tapahtuu kiinteän aineen pinnalla (esimerkiksi lämmönvaihdin)

8.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimet ovat tärkeitä voimalaitoksen komponentteja, joilla lämpöä voidaan siirtää eri lämpötilassa olevien fluidien, kuten savukaasujen ja kattilan vesi-höyrykierron välillä. Erilaisia kattilalaitoksen lämmönsiirtimiä ovat keittoputkisto, tulistimet, välitulistimet, veden esilämmittimet (EKO) ja ilman esilämmittimet (LUVO) (ks. kuvio 3). (Huhtinen, ym. 2000. 184)



Kuvio 3: Kattilan lämmönsiirtopinnat (Huhtinen, ym. 2000. 184)

Lämmönsiirtimet voidaan jakaa myös fluidin virtaussuunnaan mukaan vastavirta-, myötävirta tai ristivirtalämmönsiirtimiin. Useimmiten kattilalaitoksissa eniten käytetään vastavirtalämmönsiirtimiä, sillä tällöin lämmönsiirtopinta-ala saadaan minimoitua (ks. kuvio 4). Myötävirtalämmönsiirtimessä puolestaan fluidia ei saada lämmitettyä korkeammalle kuin lämmittävä aine on vaihtimesta poistuessaan (ks. kuvio 5). Ristivirtalämmönsiirtimissä nurkkiin muodostuvat lämpötilaerot voivat aiheuttaa ongelmia materiaalin kestävyydelle (ks. kuvio 6). (Huhtinen, ym. 2000. 201-202)

Lämmönsiirtimen mitoitusta varten on tiedettävä lämmitettävän tai jäähdytettävän fluidin lämpöteho ja lämpötilat ennen sekä jälkeen lämmönsiirtimen. Siirtyvä teho on siis verrannollinen lämpötilaeroon, lämmönsiirtimen pinta-alaan ja lämmönläpäisykertoimeen. (John H. Lienhard IV, 99-109)

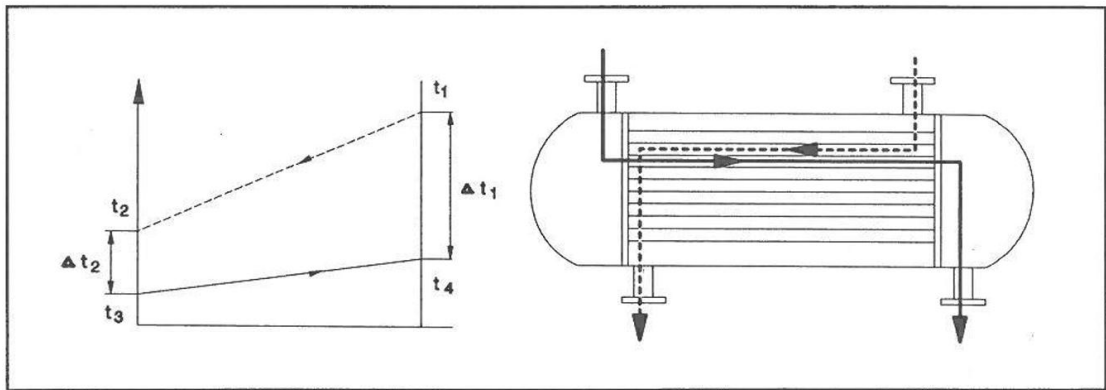
$$Q = k * A * dT$$

Missä Q = Siirtyvä lämpöteho [W]

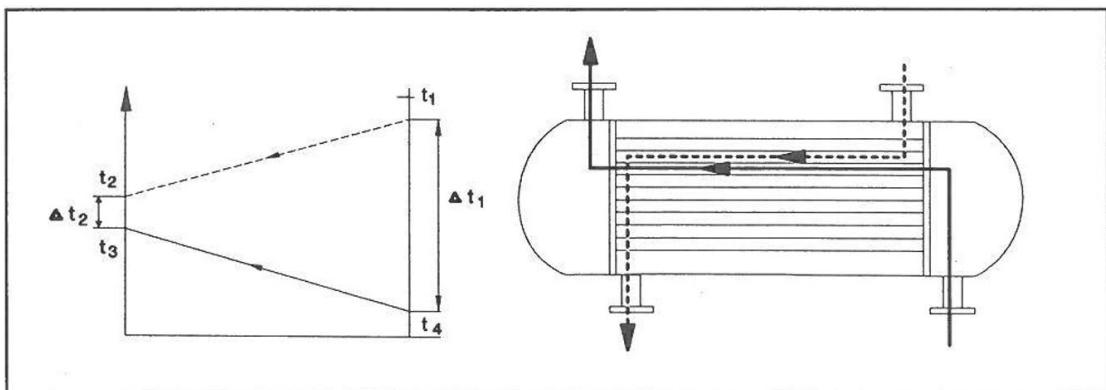
k = Lämmönläpäisykerroin [W/m^2K]

A = pinta-ala [m^2]

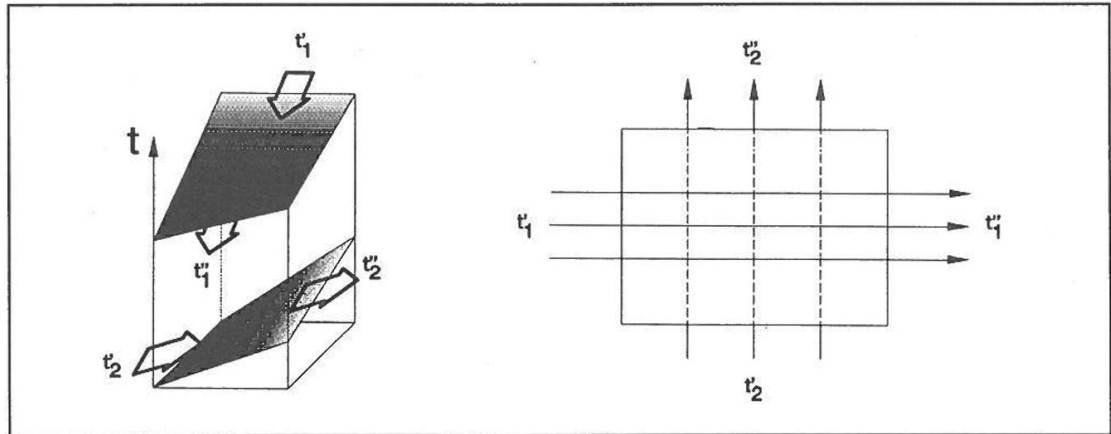
dT = Fluidien lämpötilaero [K]



Kuvio 4: Vastavirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)



Kuvio 5: Myötävirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)



Kuvio 6: Ristivirtalämmönvaihdin (Huhtinen, ym. 2000. 203)

9 Palamisilma ja savukaasut

Savukaasut ovat polttoaineiden palamistuotteena syntyneitä oksideja ja vesihöyryä. Kun polttoaineiden ominaisuudet ja koostumus tiedetään, voidaan palamisilman ja syntyvien savukaasujen määrä laskea. Savukaasuja analysoimalla saadaan jatkuvaa tietoa polttoaine-ilmaseoksen oikeellisuudesta ja palamisen täydellisyydestä. (Huhtinen, ym. 2000. 83)

Palamisilman määrä ilmoitetaan kilogrammoina ilmaa polttoaine kilogrammaa kohden [kgi/kgpa]. Sen vaadittu vähimmäissuuruus vaihtelee eri palavien komponenttien välillä ja on laskettavissa palamisreaktioiden moolisuhteista. Esimerkiksi yksi mooli hiiltä tarvitsee yhden moolin happea palaakseen täydellisesti hiilidioksidiksi. ($C + O_2 \rightarrow CO_2$). Koska polttoaine todellisuudessa sisältää useita palavia komponentteja, on niiden palamiseen tarvittavat hapet laskettava erikseen. Kun tästä tarveluvusta vähennetään vielä polttoaineen itsensä sisältämä happi, saadaan teoreettinen palamiseen tarvittava happimäärä. Tämä teoreettinen minimi ei kuitenkaan todellisuudessa riitä esimerkiksi polttoaineen laatuvaihtelujen ja syötettävän ilman kosteuden takia. Tulipesään tulee siis syöttää ylimääräistä palamisilmaa ilmakertoimen mukaan. Kuitenkaan liian suurta yli-ilmamäärää kattilaan ei kannata ajaa, sillä se nostattaa typen oksidien määrää. (Huhtinen, ym. 2000. 84-85)

Myös savukaasujen määrä saadaan laskettua palamisreaktioiden yhtälöistä: Yhdestä moolista palavaa ainetta syntyy yksi mooli palamistuotetta. Lisäksi savukaasuihin tulee palamisilmasta peräisin oleva typpi, mitä on 3,76 -kertainen määrä verrattuna teoreettiseen happiminimiin. Myös muut palamattomat komponentit kuten vesi ovat savukaasuissa. (Huhtinen, ym. 2000. 85-86)

$$\frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_c + n_{h_2} + n_s + 3,76 \times \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_n + n_{H_2O}$$

10 Päästöt

Savukaasut koostuvat vesihöyrystä (H₂O), typen oksideista, rikkidioksidista, hiilidioksidista- ja monoksidista, pienhiukkasista ja mahdollisista raskasmetalleista. Näille aineille on omat päästörajansa, jotka määräytyvät ilmansuojelulain mukaan. Tämä ilmansuojelulaki astui voimaan vuonna 1982.

Viimevuosina päästörajat ja -määräykset ovat tiukentuneet uuden teollisuuden päästödirektiivin (IED) takia. Uudet päästörajat astuivat voimaan 1.1.2016. IED edellyttää, että voimalaitosten päästörajat määrätään parhaan käytössä olevan teknologian perusteella (BAT). IED määrää myös savukaasupäästöjen ja savukaasupesurin jätevesipäästöjen monitoroinnista. (Hiltunen, M. 2017. Tekniikan lisensiaatti. RD Partners. Haastattelu 15.3.2017.)

10.1 Pienhiukkaset

Pienhiukkaset ovat polttoaineen palamattomia jätteitä kuten nokea. Nämä hiukkaset ovat terveydelle haitallisia, sillä ne tunkeutuvat pienen kokonsa ansiosta hengityselimiin. Ilmakehässä pienhiukkasilla on kuitenkin ilmastoa viilentävä vaikutus. Suurimmat pienhiukaspäästöjen aiheuttajat ovat energiantuotannon puunpoltto ja liikenteen päästöt. (Huhtinen, ym. 2000. 92)

10.2 Raskasmetallit

Raskasmetallit ovat fossiilisten polttoaineiden sisältämiä ympäristölle ja terveydelle haitallisia aineita, jotka ovat tiheydeltään yli 5g/cm^3 . Näitä aineita ovat esimerkiksi elohopea (Hg), Arseeni (As), Kadmium (Cd), Lyijy (Pb), Kupari (Cu) ja nikkeli (Ni). Turve, hiili, raskas polttoöljy ja jätteenpoltto aiheuttavat teollisuuden raskasmetallipäästöjä. (Huhtinen, ym. 2000. 83)

10.3 Typen oksidit

Typen oksidit ovat typen palamistuotteita ja niiden määrä savukaasuissa suurenee liian korkean palamislämpötilan seurauksena. NO_x päästöt aiheuttavat ympäristön happamoitumista ja haitallista alailmakehän otsonin muodostumista. Niiden suurin aiheuttaja on liikenne sekä voimalaitokset. Päästöjä voidaan vähentää palamisilman vaiheistuksella, sekä palamislämpöjen alentamisella. (Huhtinen, ym. 2000. 92-93)

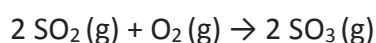
10.4 Hiilidioksidi ja -monoksidi

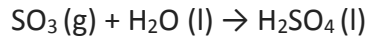
Hiilidioksidi (CO_2) on kasvihuonekaasu ja ilmakehässä se sitoo itseensä auringon lämpöenergiaa lämmittäen ilmastoa. Hiilimonoksidi (CO) puolestaan heikentää ilmakehän kykyä hajottaa metaania, joka on myös kasvihuonekaasu. Häkä vahvistaa näin ilmaston lämpenemistä epäsuorasti. (Huhtinen, ym. 2000. 92,94)

10.5 Rikin oksidit

Rikkidioksidi (SO_2). Rikkidioksidi puolestaan muodostaa helposti rikkihapoketta ja rikkihappoa ilman kosteuden kanssa ja aiheuttaa ympäristön happanemista. Kattilan lämpöpinnoilla happokastepisteen alittuessa rikin oksidit muodostavat rikkihappoa ja aiheuttavat voimakasta kattilakorroosiota. (Huhtinen, ym. 2000. 92,99)

Tätä ilmiötä kuvaa reaktioyhtälö:





11 Savukaasujen puhdistus

Savukaasujen puhdistaminen on välttämätöntä tuotantolaitosten toiminnan sallimisen kannalta. Päästörajoitukset ovat tiukentuneet huomattavasti viime vuosina esimerkiksi EU:n 20/20/20 tavoitteen seurauksena. Tämä on johtanut uusiin puhdistusmenetelmien ja –ratkaisujen investointeihin. Yleisimpiä puhdistuslaitteita ovat sähkösuodattimet, letkusuodattimet, dynaamiset erottimet ja pesurit. (ks. taulukko 2) (Huhtinen, ym. 2000. 251)

Taulukko 2: Puhdistimien erotusasteet (Huhtinen, ym. 2000. 256)

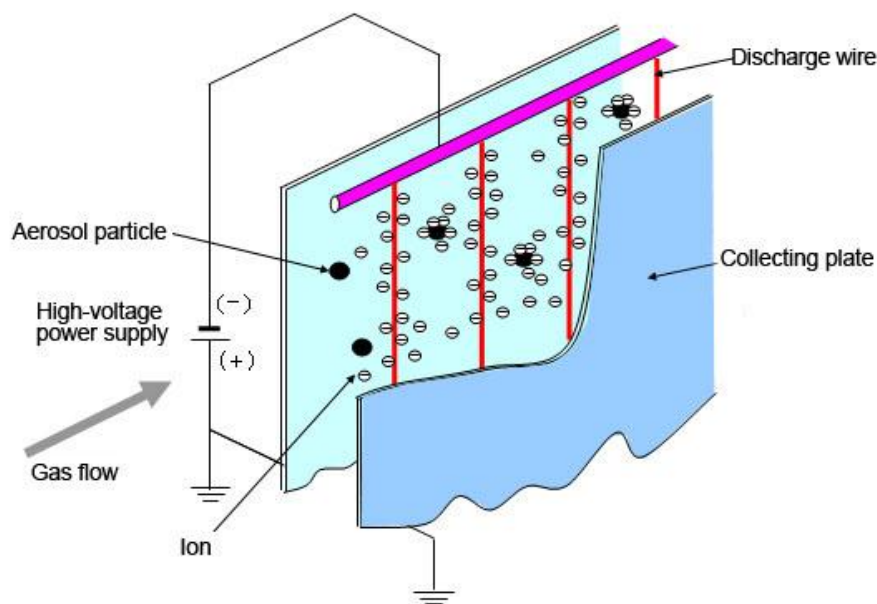
Puhdistin	Hiukkaskoko 0,5 µm	Hiukkaskoko yli 0,5 µm
Sykloni	alle 40	50-97
Multisykloni	alle 60	75-100
Sähkösuodatin	70	97-100
Pesuri	90	98-100
Letkusuodatin	99,5	100

11.1 Pienhiukkaset

Savukaasuista voidaan erottaa pölypäästöjä ja pienhiukkasia useilla eri menetelmillä. Näitä erotintyyppäjä ovat esimerkiksi letkusuodattimet, dynaamiset erottimet, sähkösuodattimet ja savukaasupesurit, joista tärkeimpiä tässä yhteydessä ovat kaksi viimeisintä.

Sähkösuodatin on mekaaninen erotin, jossa savukaasuvirta kulkeutuu sähkösuodattimen läpi. Suodin koostuu kahdesta elektrodista: erotus- ja emissioelektrodista, joiden välillä vallitsee suuri jännite. Hiukkaset varautuvat negatiivisesti tai positiivisesti, kun ne kulkevat suodattimen emissioelektrodin läpi. Tätä ilmiötä kutsutaan ko-

ronapurkukseksi. Seuraavaksi savukaasuvirta kulkeutuu erotuselektrodiin, jossa positiivisesti varautuneet ionit muuttuvat neutraaleiksi kaasumolekyyleiksi (ks. kuvio 7). Negatiiviset hiukkaset saadaan erotettua sähkösuodattimen seinämille, joissa on vastakkainen varaus hiukkasiin verrattuna. Näiltä seinämiltä hiukkaskerros saadaan poistettua ravistamalla, vesihuuhtelulla tai poistamalla seinämän varaus. (Huhtinen, ym. 2000. 251-252) (Principles of Electrostatic precipitator. 2014).



Kuvio 7: Sähkösuodattimen toimintaperiaate (Principles of Electrostatic precipitator. 2014)

Sähkösuodattimen hyviä puolia ovat pitkä käyttöikä, mahdollisuus käsitellä suuria savukaasumääriä, sopivuus useille prosesseille, taloudellinen käytettävyys ja mahdollisuus mitoittaa myös korkeille erotusasteille. Sähkösuodattimilla voidaan erottaa 10 – 0,003 mikrometrin halkaisijan pienhiukkasia. (Huhtinen, ym. 2000. 252)

Sähkösuodattimen erottelukyky voidaan ilmaista seuraavasti:

$$\eta = \frac{c(0) - c(L)}{c(0)}$$

Missä $c(0)$ on hiukkaspitoisuus kaasun saapuessa filteriin

c(L) on kaasun hiukkaspitoisuus poistuessa filtteristä.

11.2 Rikinhoiston märkämenetelmä

Rikinhoiston merkitys on korostunut viimeaikoina päästönormien tiukentumisen takia ja tämä on johtanut uusien menetelmien kehittämiseen. Rikkipäästöjä voidaan alentaa esimerkiksi leijukerroskattolalla ja käyttämällä polttoaineita, jotka sisältävät luonnostaan vähän rikkiä, kuten vety ja maakaasu. (Huhtinen, ym. 2000. 257)

Savukaasuista rikkiä voidaan erottaa kolmella eri menetelmällä: Kuiva- puolikuiva- ja märkämenetelmä, joista olennaisin on viimeinen. On myös olemassa ns. regeneratiivinen menetelmä, josta esimerkkinä Outokumpu Oy:n kehittämä Sulfred-menetelmä. (Huhtinen, ym. 2000. 257)

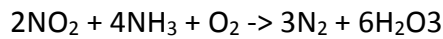
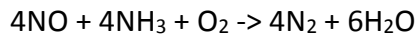
Savukaasupesurin toiminta perustuu edellä mainittuun märkämenetelmään. Ensimmäisessä vaiheessa savukaasuvirta johdetaan esierottimeen (esim. sähkösuodatin), jossa lentotuhka poistuu. Tämä vähentää märkämenetelmässä syntyvää kipsijätettä. Seuraavaksi savukaasujen sekaan ruiskutetaan alkalinen pesuneste. Rikkidioksidi (SO_2) poistetaan ja pesuliuos, sekä lopputuote käsitellään. (Huhtinen, ym. 2000. 257)

11.3 Typen oksidit

Typen oksidien määrää voidaan helpoiten vähentää palamisilmaa vaiheistamalla. Tämä tarkoittaa ilman syöttämistä tulipesään useasta eri tasosta, mikä parantaa polttoaineen reagoimista hapen kanssa. Myös palamislämpötilojen alentaminen vähentää typen oksidien muodostumista. (Huhtinen, ym. 2000. 260)

Puhdistusmenetelmiä on kahdentyyppistä: Katalyyttinen menetelmä ja katalyytiton leijukerrosmenetelmä. Katalyyttisen menetelmän periaatteena on, että savukaasuihin lisätään ureaa tai jotain muuta typpiyhdistettä. Tämän seurauksena savukaasun sisältämät NO ja NO_2 molekyylit pelkistyvät vedeksi ja N_2 molekyyleiksi. Katalyyttisen

menetelmän seurauksena savukaasujen typen oksideja voidaan vähentää 80-90%.
(Huhtinen, ym. 2000. 261)



Katalyytiton leijukerrosmenetelmä tarkoittaa ammoniakkin (NH_3) syöttämistä tulipesään. Ammoniakki pelkistää typen oksideja muuttaen ne typpimolekyyleiksi ja vedeksi. Tällä menetelmällä typen oksideja voidaan vähentää jopa 50%, kun NH_3/NO_x moolisuhde on 2. Mahdollisena haittapuolena on reagoimatta jääneen ammoniakkin aiheuttamat päästöt. (Huhtinen, ym. 2000. 261)

12 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto ja se on yleisimmin käytetty tiheään asutetuilla taajama-alueilla. Kaukolämpö toimitetaan kuluttajan kaukolämmönvaihtimeen maanalaisia eristettyjä putkia myöten, mistä viilentynyt vesi palautuu tuotantolaitokselle paluuputkea myöten. Tämä kaksiputkijärjestelmä on Suomessa laajalti käytössä.

Suurin kaukolämmönkulutus sijoittuu vuoden kylmimmille ajoille, milloin lämpöhäviötkin kaukolämpöverkossa ovat suurimmillaan. Vähiten kaukolämpöä kuluu kesäaikaan, milloin sitä käytetään lähinnä lämpimän käyttöveden valmistukseen. Tuotantolaitosten teho mitoitetaan usein 50% kaukolämmön huipputehosta. Tämän ansiosta isoille laitoksille saadaan pitkä käyttöikä ja pääosa energiasta saadaan tuotettua edullisilla polttoaineilla. Kaupungin energiayhtiöillä on usein myös kaukolämmön tarvetta vastaava kapasiteetti pienempien kaukolämpölaitosten muodossa, joilla tarvittaessa saadaan katettua koko kaupungin lämmöntarve.

12.1 Lämpötilan mitoitus

Kaukolämmön lähtevä lämpötila tulee olla riittävän korkea riittävän lämmitysenergian aikaansaamiseksi. Talvisin lähtevää kaukolämpövettä voidaan pitää maksimissaan n. 115°C ja kesäisin n. 70°C. Tarkemmat lämpötilat otetaan säätökäyrästä, minkä arvo riippuu ulkoilman lämpötilasta. Lämpötiloja voi joutua nostamaan, jos kuluttajien lämmönvaihtimet ovat hyötysuhteeltaan huonoja tai kaukolämpöverkossa on suuria lämpötilaeroja. Jos lämpötila on mitoitettu oikeaksi ja kuluttajilta palaava kaukolämpövesi saadaan takaisin tuotantolaitokselle tarpeeksi alhaisessa lämpötilassa, pärjätään pienemmällä pumppausteholla. (Markku Huhtinen, Risto Korhonen, Tuomo Pimiä, Samu Urpalainen. 14)

12.2 Paineen mitoitus

Kaukolämpöveden ylittäessä 100°C, tulee verkoston paine pitää yli ilmanpaineen, ettei kaukolämpövesi höyrysty siirtoputkistossa. Paineita ylläpidetään verkostossa paineenpitopumpuilla. Tällä pumppaamisella varmistetaan, ettei lämmöntuotannon häiriötiloissa verkoston lämpötila tai paine pääse laskemaan liian alas. Pumppauksella korvataan myös vuotoista aiheutuvaa häviötä. (Huhtinen M, Korhonen R. 14)

Kaukolämpöjärjestelmä tarvitsee myös paisunta-astian verkossa tapahtuvien nestetilavuuden muutoksien takia. Tämä astia voi olla avoin tai suljettu. Yleisimmin käytetään jälkimmäistä vaihtoehtoa, sillä suljettu astia ei ole kosketuksissa ilman epäpuhtauksien ja korroosiotekijöiden kanssa. (Huhtinen M, Korhonen R. 14)

12.3 Paine-eron mitoitus

Kaukolämpöverkossa virtaavaa vettä mitataan usein paine-erolla eikä virtausmittauksilla. Paine-ero ilmaisee eron meno- ja paluuputken paineen välillä. Kun paine-ero

muuttuu, pyritään se pitämään ohjearvossaan esimerkiksi pumppujen kierroslukua säätämällä. Kuluttajien lämmönvaihtimet vaativat n. 0,5bar paine-eron toimiakseen. (Huhtinen M, Korhonen R. 14)

Verkon reuna-alueilla ja suurien maaston korkeuserojen alueella on usein ylimääräisiä pumppauskaivoja, jotka pyrkivät pitämään paineen asetusarvossa. Verkon häviöt oletetaan usein olevan 1bar/km, minkä avulla paineenkorotuspumppujen tarve määritellään. (Huhtinen M, Korhonen R. 14-15)

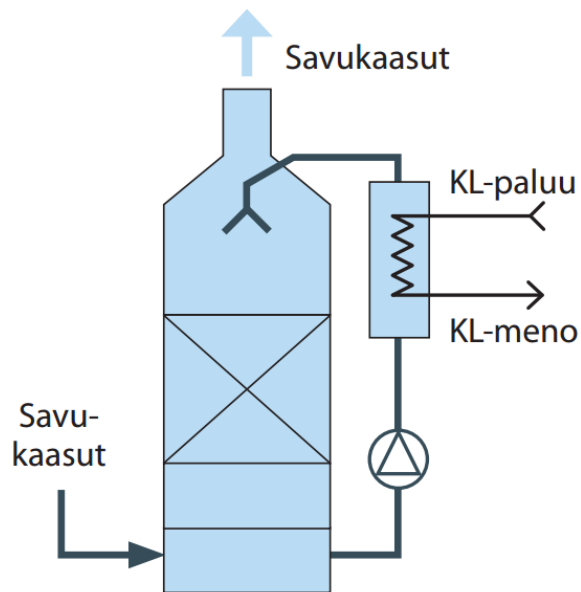
13 Rauhalahden savukaasupesuri

Rauhalahden savukaasupesurin tehtävänä on poistaa rikkidioksidia ja kiintoainetta savukaasuista, sekä siirtää savukaasujen sisältämä lämpöenergia pesurilauhdeveeteen. Lauhdevedestä lämpö otetaan talteen kaukolämpöveeteen, palamisilman esilämmitykseen ja rakennusten lämmitykseen. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

Pesurilla on tietty minimilauhdekierto aina kun laitos on käynnissä.

Pesurin perusarvoja ovat seuraavat:

- Savukaasun rikkipitoisuus pesurin jälkeen $\leq 120 \text{ mg/Nm}^3$
- Savukaasun pölypitoisuus pesurin jälkeen $\leq 10 \text{ mg/Nm}^3$
- Kaukolämpövesivirta 800 kg/s



Kuvio 8: Savukaasupesuri (Järvenreuna J. & Nummila M.)

13.1 Savukaasupesurin toimintakuvaus

Savukaasupesuri on asennettu savukaasupuhaltimien ja piipun väliin. Tässä lauhdutavassa savukaasupesurissa kattilalta tulevasta kaasuvirrasta lauhdutetaan vesihöyryä, jota on savukaasuissa polttoaineen kosteudesta johtuen runsaasti. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

Aluksi savukaasut johdetaan puhaltimilta savukaasupesurin alaosan jäähdytysvyöhykkeeseen, jossa savukaasun lämpötila putoaa kastepisteeseen pesuriveden ja raakaveden suihkutuksen ansiosta. Tämä tulistuksen poisto höyrystää vettä n. 4-5kg/s. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

Seuraavaksi lauhtuneet savukaasut kulkeutuvat pesurin tätekappalepatjaan, missä ne kohtaavat vastavirtaan kulkevan pesuriveden, jonka lämpötila määräytyy palaa- van kaukolämpöveden vaikutuksesta. Tätekappalepatjan pinnoilla savukaasu ja pesurivesi ovat tehokkaassa kontaktissa ja lämpö siirtyy aineiden välillä tehokkaasti. Savukaasut jatkavat matkaansa puhdistuneena pisananerottimen kautta savukaasukana- vanaan ja piippuun. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

Savukaasupesurin pohjalta lämmennyt lauhdevesi kierrätetään kahden rinnakkaisen levylämmönvaihtimen kautta takaisin pesurin ylä- ja alakierron suuttimille. Lämmönsiirtimet ovat vastavirta –tyyppisiä. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

Kaukolämpövesi puolestaan pumpataan lämmönvaihtimille kaukolämmön paluulinjasta, missä sen lämpötila on noin 55°C. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

13.2 Lipeän annostelu

Rikin tehokkaan erotuksen varmistamiseksi, pesurin pH:n on oltava arvoltaan >6. Käytettävät polttoaineet ja polttoprosessin toiminta vaikuttavat olennaisesti kiertävän pesuriveden pH arvoon. Esimerkiksi turpeen ja hiilen poltosta syntyvät happamat yhdisteet laskevat pesurikierron pH:ta. Tästä syystä pesurikiertoon tulee syöttää lipeää (NaOH), minkä avulla pH –arvoa saadaan nostettua. Kuitenkin kun polttoaineina käytetään sekoitusta puupolttoaineesta ja hiilestä/turpeesta, liottaa liian alhainen pH kalsiumia prosessiveteen. Tämä kalsium saostuu sulfiittisuoloina, mikäli pH:ta nostetaan. Saostuma syntyy pesuriveden rikin saostuessa pesurin sisäpinnoille. Saostumia joudutaan poistamaan happopesuilla tai mekaanisilla toimenpiteillä. Koska saostumia muodostuu vain ensin pH:n laskiessa ja sen jälkeen noustessa, tulee pH –arvoa pesurissa pitää jatkuvasti välillä 6-10. Laskennallinen NaOH kulutus on 7-79g/s. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

13.3 Lauhtenkäsittely

Pesurissa muodostunutta lauhdetta voidaan käyttää hyödyksi tuhkasiilon kostutukseen märkäpurkua varten. Ylimääräinen lauhde johdetaan lauhtenkäsittelyyn, jossa sitä puhdistetaan. Lauhdetta poistetaan jatkuvasti voimalaitoksen viivästysaltaalle. Aluksi lauhde saapuu pesurilta lamelliselkeyttimelle, jossa kiintoaine painuu selkeyttimen pohjaan polymeeri-aineen ansiosta. Muu lauhde virtaa hiekkasuodattimelle ja kiertää sieltä puhdistusprosessin alkuun. Pohjalle valunut kiintoainepitoinen lauhde

pumpataan lietepumpuilla suotanauhapuristimelle, missä kiintoaine erotetaan lauhdesta. Kiintoaineeton pesuvesi kiertää puhdistusprosessin alkuun. (Andritz, järjestelmäkuvaus)

14 Savukaasupesurin käytön optimointi

Rauhalahden savukaasupesurin käytön optimoimiseksi tarkasteltiin pH:n säätöaineen vaiheistusta, polttoaineen koostumusta ja sen vaikutusta pesurin käyttöön, sekä kaukolämpöveden lämpötilan vaikutusta pesurin LTO-tehoon. Kun nämä seikat otetaan huomioon ajomalleissa oikealla tavalla, voidaan saavuttaa säästöjä lipeän ja polttoaineen kulutuksessa, sekä parantaa pesurin tehoa. Pitkällä aikavälillä optimointi näkyy lyhempana investoinnin takaisinmaksuaikana. Pesurin pH-säätöaineen optimoinnilla voi olla myös laitteen käyttöikää pidentävä vaikutus: Vaiheistuksen seurauksena aineen sekoittuminen lauhteeseen on tehokkaampaa, eikä materiaaleja vahingoittavia saostumia pääse syntymään.

14.1 Lipeän annostelun vaiheistus

Pesurin lipeän (NaOH) syöttö tapahtuu tällä hetkellä ainoastaan pesurin pohjaan yhdestä pisteestä. Myös annostelua säätävä mittaus on pesurin pohjassa n. 2 metriä pesurin nestepinnan alapuolella. Lipeän kulutus polttoaineen tyypistä ja laadusta riippuen on tällä hetkellä 10-100g/s. Suuret kulutuspiikit johtuvat syötön ja mittauksen viiveestä. Kun pH laskee, alkaa automaatti annostella lipeää pesurin pohjalle. Tämä lauhdevesi kiertää pesurin ylä- ja alakierroksen kautta, kulkee täytekappalepatjan kautta savukaasuja vastaan ja sataa jälleen pesurin pohjalle, missä pH mittauskin sijaitsee. Tämä järjestelmä on viiveeltään suuri ja aiheuttaa lipeän kulutushuippuja.

Lipeän kulutuksen vähentämiseksi, tulisi lipeää syöttää useammasta pisteestä pesurin lauhdekiertoon, sillä mahdollisuus siihen on jo. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi ottamalla käyttöön pesurin yläkierron NaOH -syöttöpiste ja sen vieressä oleva pH-mittaus (LIITE1, ympyröity). Tällöin saataisiin tietoa pesurin pohjasta tulevan lauhteen pH-arvosta ja lipeää voitaisiin tarvittaessa annostella lisää ennen yläkierron

suuttimia. Tällä ratkaisulla varmistuttaisiin, että savukaasun kohtaava lauhde omaisi riittävän korkean pH-arvon, jotta savukaasujen rikki erottuisi mahdollisimman tehokkaasti.

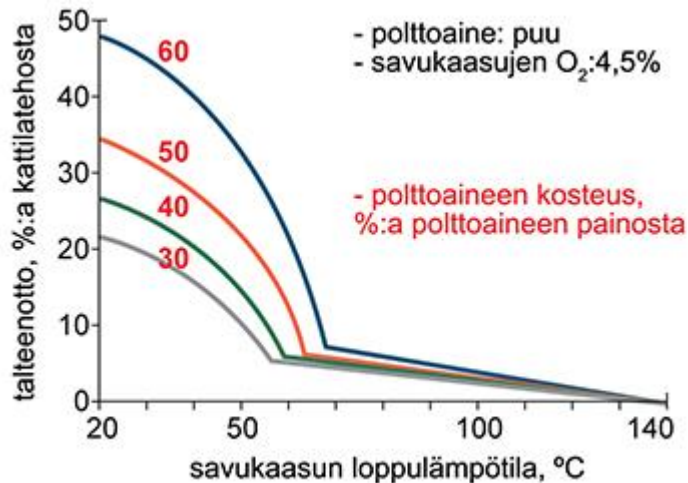
Myös lipeän kulutus olisi mahdollista saada pidettyä laskennallisessa arvossaan (7-79g/s). Tämä tarkoittaisi noin 20g/s pienempää lipeänsyöttöä kulutushuippujen aikana. Näiden huippuaikojen voidaan katsoa olevan n. 4 tuntia vuorokaudessa. Kun NaOH on arvoltaan 204€/t eli 0,000204€/g, voidaan laskea potentiaalinen vuorokausi- ja vuosisäästö:

$$0,000204 \frac{\text{€}}{\text{g}} * 20 \frac{\text{g}}{\text{s}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} * 4\text{h} = 58,75\text{€}$$

$$58,75\text{€} * 365\text{d} = 21444\text{€}$$

14.2 Optimaalinen polttoaine ja sen kosteus

Polttoaineella on suuri merkitys savukaasupesurin LTO-tehoon muodostuvien savukaasujen kautta. Lähtökohtaisesti mitä kosteampaa polttoaine on, sitä enemmän savukaasuja muodostuu (ks. kuvio 8). Etenkin biopolttoaine on usein kostea, joten syntyvä savukaasuvirta sisältää runsaasti vesihöyryä, joka lauhtuessaan pesurissa lisää LTO-tehoa. Etuna puhtaan biopolttoaineen palamisreaktiossa on syntyvä tuhka, mikä pitää pH -arvoa lähellä neutraalia ja näin vähentää pesurissa käytettävän NaOH kulutusta.



Kuvio 9: Polttoaineen kosteuden vaikutus pesurin LTO-tehoon (Savukaasun puhdistus ja lämmön talteenotto. 2016)

Rauhalahdessa puun ja turpeenpolton suhde on 50/50. Savukaasujen lämpötila on 160°C ja palaavan kaukolämpöveden lämpötila on 55°C. Kattilateho on Rauhalahden keskimääräisen ajomallin mukaan n. 200 MW. Kun turpeen kosteus pysyy vakiona 60% ja puun kosteutta muutetaan 30%→50%, voidaan laskennassa havaita LTO-tehon nousevan useita megawatteja (ks. kuvio 9).

Savukaasupesurin LTO-tehon parantuessa ei kaukolämpövettä tarvitse lämmittää niin paljon turbiinin väliottohöyryllä.

POLTTOAINE:		VASTAUS:	
Puun osuus*	<input type="text" value="50"/> ▼ %	Kosteus	<input type="text" value="30"/> ▼ %
Turpeen osuus*	<input type="text" value="50"/> ▼ %	Kosteus	<input type="text" value="60"/> ▼ %
Savukaasun lämpötila		<input type="text" value="160"/> ▼	°C
Paluuveden lämpötila		<input type="text" value="55"/> ▼	°C
Kattilateho		<input type="text" value="200"/>	MW
*osuus määrän polttoaineen painosta			
POLTTOAINE:		VASTAUS:	
Puun osuus*	<input type="text" value="50"/> ▼ %	Kosteus	<input type="text" value="50"/> ▼ %
Turpeen osuus*	<input type="text" value="50"/> ▼ %	Kosteus	<input type="text" value="60"/> ▼ %
Savukaasun lämpötila		<input type="text" value="160"/> ▼	°C
Paluuveden lämpötila		<input type="text" value="55"/> ▼	°C
Kattilateho		<input type="text" value="200"/>	MW
*osuus määrän polttoaineen painosta			

Kuvio 10: LTO -laskelma (Laskuri savukaasupesurin lämmöntalteenottotehon arvioimiseksi. 2016)

Optimaalisen polttoaineen valitseminen lähtee polttoainekentältä, sillä esimerkiksi biopolttoaine annostellaan kentällä olevista kasoista kauhakuormaajalla syöttötaskuun, mistä polttoaine siirtyy kuljettimia pitkin kattilaan. Tämän takia kentällä työskentelevien henkilöiden tulisi tietää tarkasti minkä laatuista polttoainetta missäkin kasassa on. Myös oikeanlaisen seoksen tekeminen on tärkeää laadukkaan palamisen saavuttamiseksi.

Etenkin pienempien kaukolämpökuormien aikaan kannattaisi siis panostaa kosteamman polttoaineen polttamiseen, jolloin pesurista saataisiin enemmän hyötyä. Tällöin myös kuiva polttoaine säästyisi kylmimmille keleille, kun sille on eniten käyttöä.

Tämä ajomalli saavutettaisiin, kun polttoaine olisi hyvin säilöttyä, eli tiedettäisiin sen ominaisuudet tarkasti. Tämän lisäksi polttoainekentän henkilöstä olisi tietoinen voimallituksen vallitsevasta ajomallista ja kommunikoisi käyttöhenkilöstön kanssa aktiivisesti.

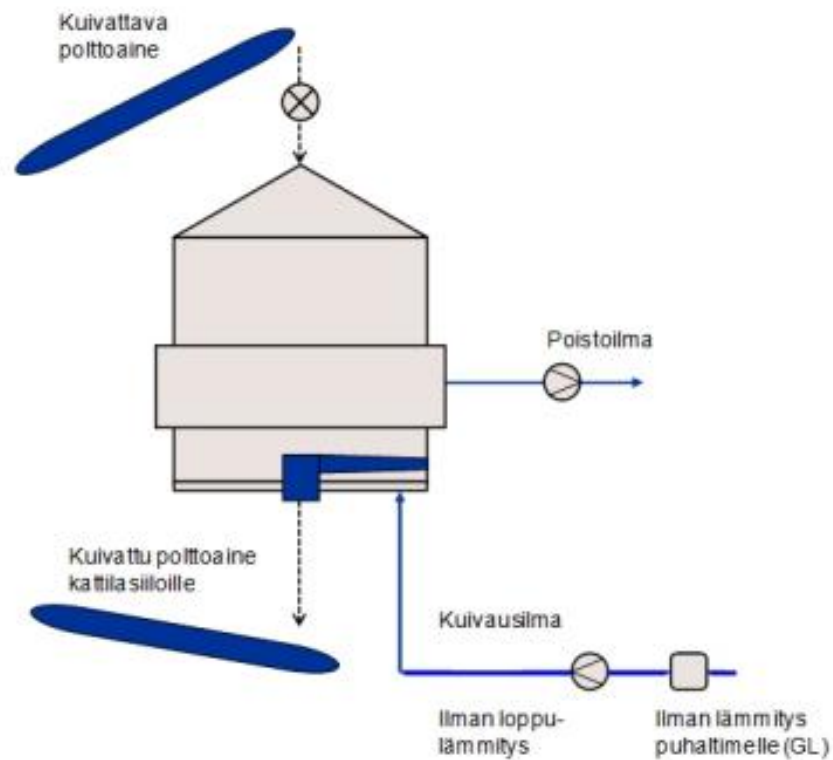
14.3 Optimaalinen kaukolämmön paluulämpötila

Palaavan kaukolämpöveden lämpötila on tärkeässä roolissa pesurin LTO-tehon kannalta. Lähtökohtaisesti mitä kylmempänä kaukolämpövesi palaa laitokselle, sitä enemmän siihen voidaan sitoa lämpöenergiaa savukaasuista.

Kaukolämpövesi tulisi kuumentaa juuri riittävään lähtevään lämpötilaan niin, että se kuitenkin kattaisi koko kaupungin lämmöntarpeen ja jäähtyisi tarpeeksi palatessaan laitokselle. Verkon käyttäytyminen tulisi tällöin tuntea hyvin ja sen ongelmakohdat tiedostaa esimerkiksi säätilan vaihtuessa. Kun kaukolämpöveden lähtevä lämpötila saadaan riittävän alhaiseksi, säästetään jo tässä vaiheessa.

Toinen vaihtoehto on alentaa palaavan kaukolämpöveden lämpötilaa juuri ennen laitosta. Tällöin ei ole riskiä, että verkossa olevalle asiakkaalle tulisi liian kylmää kaukolämpövettä. Jyväskylän Energia käyttää kaukolämmön paluuvettä Jyväskylän keskusta-alueen katujen lämmitykseen. Kiinteistöjen omistajat maksavat katujen lämmityksestä, koska se vähentää heille muutoin syntyviä hiekoitus- ja aurauskustannuksia. Tästä ratkaisusta on energiayhtiölle hyötyä rahallisesti ja samalla palaava kaukolämpövesi saadaan kylmempänä takaisin voimalaitokselle, mikä vaikuttaa savukaasupesurin LTO-tehoon.

Paluulämpötilaa voitaisiin myös alentaa kuluttamalla sitä johonkin muuhun hyödylliseen, kuten polttoaineen kuivatukseen. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi siilokuivauksella, joka soveltuu hyvin matalalämpöiselle ylijäämälämmölle. Menetelmä on ollut käytössä maataloudessa viljankuivatuksessa ja on sovellettavissa teollisuuden tarkoituksiin. Polttoaine kuivataan kaukolämmön paluuedellä lämmitetyllä ilmalla, joka syötetään siilon pohjasta ja poistetaan yläosan ilma-aukoista. Investointi on muita kuivatusmenetelmiä edullisempi, sillä se voidaan rakentaa jo olemassa olevaan polttoainesiiloon. Tarvittavat laitteet ovat uudet puhaltimet, putkistot ja lämmönsiirrin kaukolämpöveden ja kuivatusilman välillä (ks. kuvio 10).



Kuvio 11: Siilokuivaus (Jaakko Nummelin Ville Hankalin Markku Raiko. 2014)

15 Pohdinta

Työn lopputulos vastasi tavoitetta. Erilaisia optimointitapoja oli tarkasteltu ja niiden tueksi oli esitetty konkreettisia parannusehdotuksia. Kuitenkin optimoinnilla tarkoitetaan mahdollisimman hyvän ajomallin löytämistä eli negatiivisilta vaikutuksilta ei aina voi välttyä.

Opinnäytetyön perusteella toimeksiantajalla on mahdollisuus jatkaa jonkin optimointitavan tutkimista ja kehittämistä. Tutkittavia aiheita voisi olla esimerkiksi siilokuivausten investointi ja kannattavuus, polttoainekentän informaation parantaminen tai lipeänsyötön vaiheistuksen koeajajakso.

15.1 Tulokset

Kaukolämpöverkon hallinta ei todellisuudessa ole aina niin yksinkertaista ja helppoa kuin teoriassa. Varsinkin isolle alueelle ulottuvan Jyväskylän Energian kaukolämpöverkon hallinta on välillä hyvinkin vaikeaa. Ongelmia aiheuttavat suuret korkeusvaihtelut, verkon reuna-alueet, sekä kuluttajien lämmönvaihtimien ikä ja kunto. Tästä syystä kaukolämpöverkkoa tulee jatkuvasti tankata kuumalla kaukolämpövedellä, jotta varmistutaan lämmönjakelun toimivuudesta ja vähennetään jakeluhäiriöiden riskiä.

Leijukerrospoltoissa liian kosteat ja toisaalta liian kuivat polttoaineet aiheuttavat petilämpöjen vaihteluita, mikä aiheuttaa haittaa palamisprosessin hallinnassa. Ongelmia syntyy, kun polttoaineen laatu vaihtuu äkisti. Tämän takia polttoaineen tulisi olla hyvin tasalaatuista ja sen ominaisuudet tulisi tietää hyvin.

Kylmät kelit myös ajavat voimalaitokset polttamaan kuivempaa polttoainetta kokonaishyötysuhteen parantamiseksi. Myös huippukuorma halutaan ensisijaisesti tuottaa ilman raskasta polttoöljyä käyttäviä lämpölaitoksia. Kuivan polttoaineen seurauksena syntyvien savukaasujen määrä laskee ja tätä kautta vähentää savukaasupesurin LTO-tehoa.

Lauhempien kelien aikana voitaisiin siis tyytyä huonomman ja kosteamman polttoaineen käyttämiseen. Kaukolämmön palaavalla vedellä voitaisiin kuivattaa polttoainetta esimerkiksi erilliseen siiloon kylmempiä kelejä varten. Tällöin ajomallit eivät kumoaisi toistensa vaikutuksia.

Kuivattua polttoainetta voisi varastoida myös erilliseen siiloon, josta sitä voisi syöttää kattilaan oikealla suhteella kosteamman polttoaineen kanssa. Kostean ja kuivan polttoaineen suhteen säätämällä palamisprosessin hallinta helpottuu.

Savukaasupesurin pH-säätökemikaalin syöttäminen useammasta pisteestä olisi järkevää kulutushuippujen pienentämiseksi. Tämä tarkoittaisi kuitenkin mittausten ja säätöjen asetusarvojen muuttamista, mitä varten vaiheistuksen käyttöönotto vaatisi oman koeajajaksonsa.

15.2 Luotettavuuden arviointi

Lipeänsyötön vähentämiseksi ratkaisuehdotusta haettiin laitevalmistajalta. Andritz on toimittanut pesurin yhteydessä voimalaitoksen käyttöhenkilöstölle täyden järjestelmäkuvauksen pesurista, mikä sisältää mm. ohjeet käynnistyksestä, ajosta ja pysäytyksestä. Tässä ilmenee, että lipeänsyöttö tapahtuu kolmesta pisteestä: Pesurin pohjasta, sekä lauhteen ylä- ja alakierrosta. Tälle järjestelylle on laskennallinen lipeänkulutus (7-79g/s). Järjestelmäkuvauksen perusteella lipeänsyötön vaiheistus vähentäisi lipeänkulutusta.

Polttoaineen kuivauksella on Motivan tutkimuksen (Jaakko Nummelin, Ville Hankalin, Markku Raiko, Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. 2014) mukaan saavutettavissa useita hyötyjä. Esimerkiksi polttoaineen kulutus on vähäisempää mikä johtaa pienempiin päästöihin. Myös suuremmat kuormat on mahdollista saavuttaa ilman apupolttoaineiden käyttöä. Voimalaitoksilla tulisi siis aina pyrkiä polttamaan mahdollisimman kuivaa polttoainetta. Kuitenkaan kostean ja huonolaatuisen polttoaineen käytöltä ei voida aina välttyä.

Kaukolämmön alhaisempi lämpötila vaikuttaa savukaasujen parempaan lauhtumiseen ja tehokkaampaan lämmönsiirtoon.

Lähteet

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen J. 2016 - Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Viitattu 12.3.2017.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

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

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen S. 2013. Voimalaitostekniikka. Tampere. Opetushallitus.

Järvenreuna J. & Nummila M. Nykyaikainen savukaasupesuri – merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja. Caligo Industrián nettisivusto. Viitattu

25.3.2017. http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

Lienhard IV, J. & Lienhard V, J. 2017. A Heat Transfer Textbook, 4th edition. Viitattu

19.3.2017. <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahttv205.pdf>

Nummelin, J., Hankalin, V. & Markku Raiko. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Polttoaineen kuivaustekniikat. Helsinki. Motiva. Viitattu 30.3.2017.

https://www.motiva.fi/files/8809/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineiden_kuivatus_www.pdf

Ohlström, M., Tsupari, E., Lehtilä, A. & Taisto Raunemaa. 2005 - Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Espoo. Viitattu 14.4.2017.

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf>

Principles of Electrostatic precipitator. Hitachi. 2014. Viitattu 13.3.2017.

<http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/dustcollection/principle/dustcollection.html>

Savukaasun puhdistus ja lämmön talteenotto. Condens heat recovery Oy. Viitattu

10.4.2017. <http://www.condens.fi/fin/LTO.htm>

Liitteet

Liite 1 Savukaasupesurin operointikuva (MetsoDNA)

