

Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto

Soile Javarus

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Javarus Soile	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2016
	Sivumäärä 51	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Hytönen Kari, Nieminen Tomi		
Toimeksiantaja(t) Savon Sellu Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Powerfluten tytäryhtiö Savon Sellu Oy. Opinnäytetyön aiheena oli Savon Sellun voimalaitoksen savukaasupesuri. Tehtävänä oli saada selville olisiko savukaasupesurissa lämmöntalteenoton mahdollisuutta.</p> <p>Tavoitteina oli tutkia savukaasupesurin lämpövirtoja ja tehdä savukaasupesurista energiatase. Savukaasupesurista oli saatava selville kuinka paljon lämpöä menee hukkaan ja olisiko pesuriin mahdollista tehdä lisää lämmöntalteenottoja. Lisäksi selvitettiin myös savukaasupesurin toimintaperiaate ja tarkoitus, koska tutkittava savukaasupesuri on poikkeuksellinen muihin pesureihin nähden. Savukaasupesurin toimintaan perehtyminen oli myös oleellista, jotta pystyttiin selvittämään sen energiatase ja lämmöntalteenottomahdollisuudet. Lisäksi tehtiin havainnollistava sankey-diagrammi savukaasupesurin energiavirroista.</p> <p>Savukaasupesurin lämmöntalteenoton mahdollisuutta ratkaistiin selvittämällä savukaasupesuriin tulevien ja lähtevien virtausten määrät ja niiden lämpötilat. Tulevien ja lähtevien virtausten, lämpötilojen ja paineen avulla saatiin laskettua savukaasupesurin energiatase. Myös savukaasuihin perehdyttiin, sillä savukaasut kuuluvat yhtenä isona osana energiataseen ratkaisemiseksi. Laskennat tehtiin olemassa olevia mittauksien ja päästömittausraportin perusteella.</p> <p>Lopputuloksena saatiin selville, että likavesien mukana menee hyödynnettävissä olevaa lämpöä hukkaan. Mahdollista lämmöntalteenottoa ajatellen on kuitenkin otettava veden likaisuus huomioon lämmönvaihdinta suunniteltaessa. Lisäksi saatiin selville lämmönvaihtimelta suoraan kanaaliin menevän energian määrä. Jatkossa olisi myös hyvä perehtyä olemassa olevien lämmönvaihdinten toimintaan ja muihin pesukiertoihin voisiko myös niistä ottaa lämpöä talteen.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Savukaasupesuri, lämmöntalteenotto, energiatase, lämpöoppi, termodynamiikka		
Muut tiedot		

Author(s) Javarus Soile	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2016
	Number of pages 51	Language of publication: Suomi
		Permission for web publication: X
Title of publication Heat flows and waste heat recovery of a flue gas scrubber		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Hytönen Kari, Nieminen Tomi		
Assigned by Savon Sellu Oy		
<p>Description</p> <p>The thesis was assigned by Savon Sellu Oy, a subsidiary of Powerflute. The topic was flue gas scrubber at Savon Sellu powerplant. The assignment was to determine the possibilities of heat recovery in the flue gas scrubber.</p> <p>The goal was to investigate the heat flows of the flue gas scrubber and to make an energy balance sheet for the scrubber to understand how much heat is wasted in the flue gas scrubber. It was also determined whether or not it would be possible to recover more energy from the scrubber. In addition, the working principle and the purpose of the flue gas scrubber was investigated because the scrubber is exceptional compared with other scrubbers. Studying the principles of the flue gas scrubber was also essential to understanding energy balance and the heat recovery opportunities. Furthermore, an illustrating Sankey diagram was made on the energy resources of the flue gas scrubber.</p> <p>The heat recovery possibilities of the flue gas scrubber were solved by defining incoming and outgoing quantities and temperatures of the flows in the scrubber. The energy balance of the flue gas scrubber was calculated from the incoming and outgoing flows, temperatures and pressures. Also, the flue gases were studied, because flue gases are a big part of solving the energy balance. The calculations were made based on the existing measurement and emission measurement report.</p> <p>As a result, it was found that wastewater contains heat that could be recoverable. The dirtiness of the water must be considered when designing the heat exchanger. In addition, the amount of energy going into the canal directly from the exchanger was determined. In the future, the functional principles of the existing heat exchangers and other wash cycles should be studied for recoverable heat.</p>		
Keywords (subjects) Flue gas scrubber, heat recovery, energy balance, heat physics, thermodynamics		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto	4
2	Toimeksiantaja	5
3	Vastapainevoimalaitos	6
4	Savukaasupesuri	6
4.1	Tarkoitus	6
4.2	Toimintaperiaate	7
5	Savon Sellun savukaasupesuri	12
5.1	Savukaasupesurin tarkoitus.....	12
5.2	Savukaasupesurin toimintaperiaate.....	13
6	Mittaustyypit	14
6.1	Virtausmittaukset	15
6.1.1	Magneettinen virtausmittari.....	15
6.1.2	Ultraäänivirtausmittaus	16
6.2	Lämpömittaukset.....	18
6.2.1	PT100-anturi.....	18
6.2.2	Termoparianturi	19
6.3	Painemittaukset.....	20
6.3.1	Pietsyresistiivinen painemittaus	20
6.3.2	Kapasitiivinen painemittaus	21
7	Lämmönsiirrin	22
8	Pesukiertojen energiavirrat	24
9	Savukaasut	25
9.1	Savukaasujen muodostuminen	25

	2
9.2	Savukaasun lämpöteho26
9.3	Savukaasun lämpöteho ennen ja jälkeen savukaasupesurin28
10	Energiatase32
10.1	Savukaasupesuriin tulevat energiavirrat34
10.2	Savukaasupesurista poistuvat energiavirrat39
10.3	Savukaasupesurin häviöt42
11	Sankey-diagrammi43
12	Pohdinta45
Lähteet47
Liitteet49
Liite 1	Savukaasupesurin PI-Kaavio49
Liite 2	Päästömittausraportti.....50
Liite 3	Kaasujen ominaislämpökapasiteetteja (Huhtinen ym. 2004. 98).....51
Taulukot	
Taulukko 1.	Pölynerotusmenetelmien erotusasteet.....7
Taulukko 2.	Savukaasun koostumus kuivassa savukaasussa28
Taulukko 3.	Savukaasun koostumus kosteassa savukaasussa29
Taulukko 4.	Ammoniumsulfiitin moolimassa37
Taulukko 5.	Energioiden määrä savukaasupesuriin kuukaudessa39
Taulukko 6.	Savukaasupesurista lähtevien energioiden määrä kuukaudessa42
Taulukko 7.	Savukaasupesuriin tulevat ja lähtevät energiavirrat42
Kuviot	
Kuvio 1.	Savukaasupesurin toimintaperiaate.....8
Kuvio 2.	Savukaasupesuri lämpöpumppuratkaisulla9
Kuvio 3.	Palamisilman kostuttimen kytkentä pesuriin.....10

Kuvio 4. Magneettisen virtausanturin periaate	16
Kuvio 5. Ultraäänivirtausmittaus kulkuaiikamenetelmällä	17
Kuvio 6. Ultraäänivirtausmittaus korrelaatiomenetelmä	18
Kuvio 7. Termoparianturin rakenne	20
Kuvio 8. Pietsoresistiivinen paineanturi.....	21
Kuvio 9. Kapasitiivinen paineanturi.....	22
Kuvio 10. Levylämmönsiirtimen rakenne.....	23
Kuvio 11. Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate.....	23
Kuvio 12 Sankey-diagrammi savukaasupesurista	44

1 Johdanto

Lämmöntalteenotto kuuluu merkittävänä osana energiatehokkuuteen. Tulevaisuudessa tullaankin kartoittamaan hukkalämmön hyödyntämistä voimalaitoksilla ja teollisuudessa. Teollisuudessa hukkalämpöä muodostuu valtavia määriä vuodessa, noin 37 % energiankäytöstä, joka vastaa 54 TWh. Tätä hukkalämpöä olisi mahdollista ottaa talteen ja käyttää yrityksen omissa prosesseissa tai myydä kaukolämpöverkkoon (Kontu & Haimi 2014, 2).

Tutkittavana kohteena oli Savon Sellun voimalaitoksen savukaasupesuri. Savukaasupesurista todennäköisesti poistuu hukkalämpöä likavesien mukana. Pesurissa ennestään on jo kolme lämmönvaihdinta joista kaksi on jatkuvasti käytössä ja kolmas toimii varalla. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin savukaasupesurin lämmöntalteenoton mahdollisuutta. Tavoitteina oli tutkia savukaasupesurin lämpövirtoja ja tehdä savukaasupesurista energiatase. Savukaasupesurista oli saatava selville kuinka paljon lämpöä menee hukkaan ja olisiko pesuriin mahdollista tehdä lisää lämmöntalteenottoja. Lisäksi työssä selvitettiin myös savukaasupesurin toimintaperiaate ja tarkoitus, koska työssä tutkittava pesuri on poikkeuksellinen muihin pesureihin nähden. Savukaasupesurin toimintaan perehtyminen oli myös oleellista, jotta pystyttiin selvittämään sen energiatase ja lämmöntalteenottomahdollisuudet. Lopuksi tehtiin vielä havainnollistava sankey-diagrammi savukaasupesurin energiavirroista.

Savukaasupesurin lämmöntalteenoton mahdollisuutta ratkaistiin selvittämällä savukaasupesuriin tulevien ja lähtevien virtausten määrät niiden lämpötilat. Tulevien ja lähtevien virtausten, lämpötilojen ja paineen avulla saatiin laskettua savukaasupesurin energiatase. Myös savukaasuihin perehdyttiin, sillä savukaasut kuuluvat yhtenä isona osana energiataseen ratkaisemiseksi. Laskennoissa hyödynnettiin olemassa olevia mittauksia ja päästömittausraporttia.

2 Toimeksiantaja

Savon Sellu Oy on Kuopiossa sijaitseva kartonkitehdas jonka omistaa Powerflute Oyj 100 prosenttisesti. Savon Sellu on ollut Powerfluten omistuksessa vuodesta 2005 lähtien, tätä ennen yrityksen omisti M-Real. Tehdas käynnistyi vuonna 1968 ja tällä hetkellä yritys työllistää 185 henkilöä, joista 49 on toimihenkilöitä ja 136 työntekijöitä.

Savon Sellulla valmistetaan aallotuskartonkia. Aallotuskartonki valmistetaan puolikemiallisesta sellusta ja pääraaka-aineena on koivu. Aallotuskartonkia käytetään esimerkiksi hedelmien, vihannesten, elintarvikkeiden ja elektroniikan pakkaukseen. Vuonna 2014 tuotantoa oli 256 887 tonnia kartonkia. Lähes kaikki kartonki viedään ulkomaille ympäri maailmaa. Liikevaihtoa samana vuonna oli 150,1 miljoonaa euroa ja liikevoittoa 10,1 miljoonaa euroa.

Savon Sellun tuotantoprosessiin kuuluvat puunkäsittely, voimalaitos, keittämö ja kartonkikone. Jätevedenkäsittely on ulkoistettu ja sen hoitaa Ekokem. Voimalaitos tuottaa kaiken kartongin valmistamiseen tarvittavan höyryn eri puolille tehdasaluetta. Myös sähkön tuotantoa on jonkun verran, mutta suurin osa sähköstä joudutaan ostamaan. Höyryn kulutusta vuonna 2014 oli 1,95 MWh tuotettua tonnia kohden ja sähköä kului 0,63 MWh tuotettua tonnia kohden. Aallotuskartongin raaka-aineena on koivu josta keittämö valmistaa puolisellua NSSC (neutral sulphite semi chemical) puolikemiallisella neutraalisulfaattiprosessilla. NSSC-prosessissa käytetään kemiallisia ja mekaanisia menetelmiä. Puolisellu valmistetaan kemiallisessa vaiheessa imeyttämällä koivuhakkeeseen ammoniumsulfiitti -keittonestettä ((NH₄)₂SO₃) ja tämän jälkeen mekaanisessa vaiheessa massa kuidutetaan ja jauhatetaan.

3 Vastapainevoimalaitos

Vastapainevoimalaitos tuottaa lämpö- ja sähköenergiaa. Savukaasupesuri sopii vastapainevoimaloille tai lämpövoimaloille (tuottaa vain lämpöenergiaa), jolloin tuotetun lämmön lisäksi voidaan ottaa lisää tarvittavaa lämpöä talteen savukaasupesurista. Savon Sellun voimalaitos, johon on kytketty savukaasupesuri, on vastapainevoimala.

Vastapainevoimalaitoksella lämpöenergiaa voidaan käyttää turbiinin välitoista tai suoraan kattilasta. Lämpöä käytetään prosessihöyrynä tai lämmönvaihtimen välityksellä lämmitystarkoitukseen. Sähkön ja lämmön tuotannon suhdetta voidaan säädellä tarpeen mukaan. Jos lämmöntarve on suurta ja sähköä ei juurikaan tarvita voidaan väliottohöyryn määrää lisätä tai jopa osa höyrystä ajaa ohi turbiinin. Kun sähkön tarve on suurta ja lämmöntarve pientä voidaan apuna käyttää höyryakkuja, jotka ovat nykyään hyvin yleisiä laitteita sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Höyryakut ovat suuria vedellä täytettyjä säiliöitä johon voidaan varastoida lämpöenergiaa, kun sen tarve on pientä ja sähkönkulutus suurta. Jos taas höyrynkulutus on suurta, höyryakuista voidaan purkaa lisälämpöä tarvittaessa. (Perttula 2000, 183 – 184.)

4 Savukaasupesuri

4.1 Tarkoitus

Savukaasupesurien alkuperäisenä tarkoituksena on hiukkaspäästöjen vähentäminen. Savukaasupesurilla saadaan poistettua varsin hyvin hiukkaspäästöt verrattuna muihin pölynerotusmenetelmiin, ainoastaan letkusuodattimella saadaan parempi erotusaste kuin savukaasupesurilla (ks. Taulukko 1).

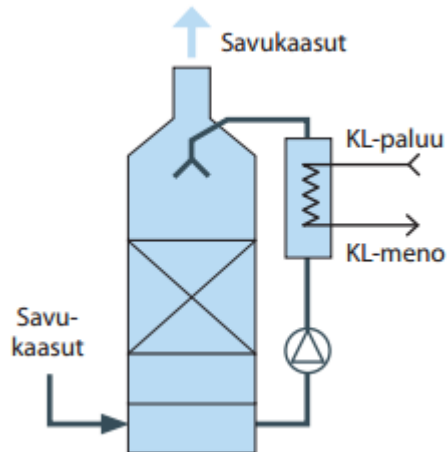
Taulukko 1. Pölynerotusmenetelmien erotusasteet (Huhtinen ym. 2004, 256)

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 %

Nykyään savukaasupesurit ovat yleistymässä hukkalämmöntalteenoton tehostamisen vuoksi. Hankkimalla savukaasupesurin voidaan parantaa voimalaitoksen energiatehokkuutta ja nostaa voimalaitoksen tuotantokapasiteettia, samalla saadaan vähennettyä hiukas- ja rikkipäästöjä.

4.2 Toimintaperiaate

Perinteisessä savukaasupesurissa on kaksi pesuvaihetta (Ks. Kuvio 1). Ensimmäisessä pesuvaiheessa, puhdistetaan suurin osa pienhiukkasista. Tähän pesuvaiheeseen savukaasut tulevat noin 180 asteisena ja savukaasujen lämpötila laskee 60 - 70 asteeseen. Toisessa pesuvaiheessa savukaasut johdetaan täytekappalekerroksiin joissa savukaasuissa oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi ja kulkeutuu kiertonesteen mukana lämmönvaihtimelle. Täytekappalekerrokset toimivat lämmönsiirtopintoina ja näitä kerroksia on pesurista riippuen yksi tai kaksi. Lämmönvaihtimessa voidaan lämpö ottaa talteen esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. (Järvenreuna & Nummila N.d, 2.)



Kuvio 1. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Järvenreuna & Nummila N.d, 2)

Pesurin toisessa vaiheessa on olennaista kastepistelämpötilan alittuminen.

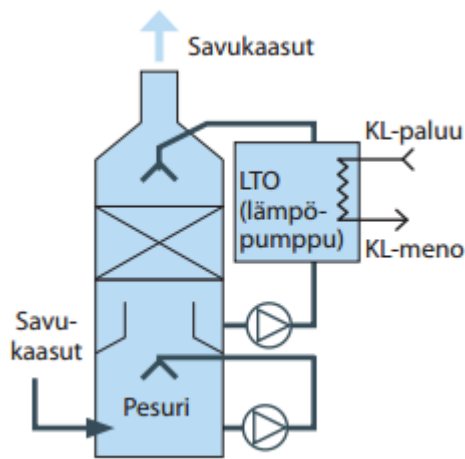
Kastepiste on se lämpötila jossa savukaasun sisältämän vesihöyryn suhteellinen kosteus on 100 %. Kastepistelämpötilan alituttua vesihöyry alkaa lauhtua vedeksi.

Höyryn lauhtuttua vedeksi vapautuu paljon energiaa (2350 kJ/kg). Jos kastepistelämpötila jää saavuttamatta, savukaasuissa oleva vesihöyry ei lauhtu vaan pesurin kiertoneste alkaa höyrystymään. Näin ollen pesuri alkaa lauhtuttimen sijaan toimimaan haihduttimena. (Mts. 2-3.)

Jos lämmönvaihtimelle tuleva paluovesi tulee liian lämpimänä, voi tulla ongelmia kastepisteen alittumisessa savukaasupesurissa. Näin voi käydä jos talteen otettavaa lämpöä syötetään esimerkiksi kaukolämpöverkkoon kovilla pakkasilla. Kovilla pakkasilla kaukolämpöverkon lämpötilaa nostetaan ja käyttökohteissa olevat lämmönvaihtimet ovat yleisesti varsin vanhoja ja niiden hyötysuhde on huono. Tämä merkitsee sitä, että käyttökohteissa kaukolämpöverkon lämpötila ei laske tarpeeksi ja paluupuolen lämpötila jää liian korkeaksi. Voimalaitokselle ja savukaasupesurin lämmönvaihtimelle tuleva paluovesi on liian kuumaa savukaasun lämpötilaan nähden ja kastepiste jää alittamatta. (Mts. 3.)

Lämmöntalteenottoa saadaan tehostettua asentamalla järjestelmään lämpöpumppu. (Ks. Kuvio 2). Lämpöpumpulla saadaan alennettua pesurille tulevaa paluueden

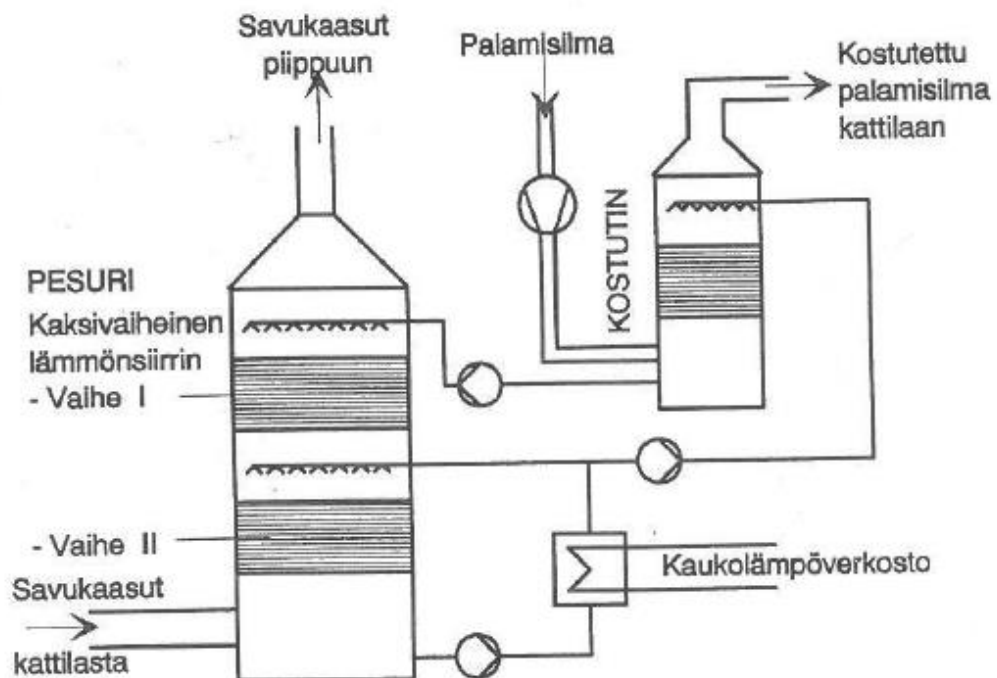
lämpötilaa. Tällä tavoin varmistetaan kastepisteen alittaminen savukaasupesurissa. Esimerkiksi kaukolämpöverkon kuormituksesta huolimatta (kuten sen vaikutuksista edellisessä kappaleessa mainittiin), kastepiste saadaan alitettua. Paluuvedestä otettu lämpö ei mene hukkaan vaan se ajetaan lämpöpumpun termoaineen välityksellä lauhduttimelle ja takaisin kaukolämmön menopuolelle. Toisin sanoen lämpöpumpulla ohitetaan pesurikytkentä. Tällä järjestelmällä saadaan lämpötilaa alennettua jopa 20 asteella. (Mts. 3.)



Kuvio 2. Savukaasupesuri lämpöpumppuratkaisulla (Mts. 3)

Savukaasujen kosteus vaikuttaa myös pesurista saatavaan lämpötehoon. Mitä kosteampaa savukaasu on, sitä korkeammassa lämpötilassa savukaasujen vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi. Tämä johtuu siitä, että savukaasujen vesihöyryn osapaine on korkeampi ja näin tiivistyminen on mahdollista korkeammassa lämpötilassa. Savukaasupesuriin voidaankin kytkeä palamisilman kostutin jolla saadaan savukaasuihin enemmän vesihöyryä ja pesurista enemmän tehoa (ks. Kuvio 3). Tällaisessa pesurikytkennässä ensin lämmitetään epäsuorasti kaukolämmön paluuvettä ja tämän jälkeen savukaasuja jäähdytetään palamisilman kostuttimella. Pesurissa savukaasuja jäähdyttävä vesi saadaan jäähdytettyä kostuttimessa

kylmemmäksi kuin kaukolämpövedellä on mahdollista ja näin saadaan kastepistelämpötila saavutettua paremmin. Samalla palamisilma kostuu ja kattilassa syntyvien savukaasujen kosteus lisääntyy. Ja kuten edellä mainittiinkin tämän seurauksena savukaasujen osapaine kasvaa ja vesihöyry tiivistyy pesurissa korkeammassa lämpötilassa. Tällä kytkennällä kaukolämpövesi tai johonkin muuhun hyödynnettävä hukkalämpö saadaan korkeampaan lämpötilaan. (Huhtinen ym. 2004, 256.)



Kuvio 3. Palamisilman kostuttimen kytkentä pesuriin (Huhtinen ym. 2004, 255)

Palamisilman kostutuksella ja sen vaikutuksesta pesurin toimintaan voidaan päätellä, että myös polttoaineen kosteudella on merkitystä savukaasupesurista otettavaan lämpötehoon. Jos voimalaitos on varusteltu savukaasupesurilla, polttoaineen kosteuspiitoisuudella ei ole niin suurta merkitystä kuin muilla voimalaitoksilla. Savukaasupesurista saadaan enemmän tehoa irti, kun polttoaineessa oleva kosteus

höyrystyy savukaasuihin. Polttoaineen kosteudella vaikutus on sama kuin palamisilman kostutuksella; savukaasuihin muodostuu enemmän vesihöyryä ja sen osapaine kasvaa ja vesi alkaa tiivistymään savukaasupesurissa korkeammassa lämpötilassa. Täytyy kuitenkin muistaa että polttoaineen kosteus vaikuttaa palamiseen heikentävästi kuten Huhtisen (2004. 84.) teoksessa on mainittu, että polttoaineen kosteus höyrystyy ennen palamista pienentäen polttoaineen lämpöarvoa. Polttoaineen lämpöarvolla tarkoitetaan polttoainemäärää kohti saatavan energian määrää polttoainetta poltettaessa. (Mts. 43.)

Kiintoaineiden puhdistamisen ja lämmöntalteenottamisen lisäksi pesureilla voidaan vähentää myös rikkipäästöjä. Tässä opinnäytetyössä tutkittavan Savon Sellun savukaasupesurin päätehtävä on rikin talteenotto keittonesteeseen, josta kerrotaan lisää luvussa 5. Näin ollen rikkipäästöjä vähentämällä voidaan saada rikki myös hyötykäyttöön.

Hyvin yleinen tapa poistaa rikkipäästöjä on sumuttaa savukaasuihin kalsiumpohjaista lietettä, kalkkikiveä tai kalsiumoksidia. Niin kutsuttu märkämenetelmä koostuu kahdesta eri pesuvaiheesta ja lopputuotteen käsittelystä. Rikkidioksidi (SO₂) erotetaan absorptiotornissa ruiskuttamalla vastavirtaan savukaasuihin kalsiumpohjaista pesunestettä. Rikkidioksidi reagoi kalsiumin (Ca) ja hapen (O₂) kanssa muodostaen kalsiumsulfiiattia (CaSO₃) yhtälön 1 mukaisesti.



Kalsiumsulfiiatti valuu pesurin pohjalle, jossa siitä hapetetaan kipsilietettä eli kalsiumsulfaattia (kaava 2) (CaSO₄).



Kipsiliete loppukäsittelyssä väkevöidään ja kuivataan kiinteäksi kipsiksi. Kipsiä voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusteollisuudessa. (Huhtinen ym. 2004, 257.)

5 Savon Sellun savukaasupesuri

Tutkimuksen kohteena oleva savukaasupesuri on poikkeuksellinen muihin savukaasupesureihin nähden ja tämän kaltaisia pesureita ei tiettävästi ole muita Suomessa. Poikkeuksellista ovat pesurin useat pesuvaiheet ja sen käyttötarkoitus. Savukaasupesurit ovat useimmiten tarkoitettu savukaasujen puhdistukseen tai lämmöntalteenottoon kuten 4 luvussa todettiin, kun taas Savon Sellun pesurin päätarkoitus on rikintalteenotto keittonesteeseen. Erilaisuudesta johtuen oli aiheellista käydä myös tämän yksittäisen pesurin toimintaperiaate läpi tässä opinnäytetyössä, jotta energiataseen tekeminen ja mahdollisten lämmöntalteenottojen pohdita olisi mahdollista. Tässä osiossa käytin hyödyksi omaa työkokemustani savukaasupesurista ja lisäksi sain lisätietoa muilta voimalaitoksen kokeneemmilta prosessityöntekijöiltä. Myös Savon Sellun arkistoista löytyvistä dokumenteista oli hyötyä tätä selvitystä tehdessä. Savukaasupesurin PI-kaavio löytyy Liitteestä 1.

5.1 Savukaasupesurin tarkoitus

Savon Sellun päätuotteena on aallotuskartonki jota tehdään puolikemiallisesta massasta. Massan tekemiseen tarvitaan keittonestettä jossa on tarvittava rikkipitoisuus. Keittoneste valmistetaan voimalaitoksen savukaasupesurissa jossa rikki otetaan talteen savukaasuista. Savukaasuissa oleva rikki on peräisin massatehtaalta tulevasta lietteestä, joka valmistetaan vahvaliemeksi voimalaitoksen haihduttamalla. Vahvaliemi poltetaan ja savukaasuihin syntyy rikinoksideja (SO₂). Pelkkä vahvaliemen polttaminen kattilassa ei riitä, vaan joudutaan myös polttamaan sularikkiä, jotta tarvittava määrä keittonestettä saataisiin valmistettua.

5.2 Savukaasupesurin toimintaperiaate

Savukaasupesuri koostuu neljästä eri pesuvaiheesta ja siinä on kolme täytekappalekerrosta. Ensimmäinen pesuvaihe eli alapesuvaihe on nimensä mukaisesti savukaasupesurin alin osa. Savukaasut tulevat pesuvaiheeseen noin 140 asteisena ja ne jäähtyvät kastepisteeseen noin 66 asteeseen. Tässä suutinpesuvaiheessa savukaasut joutuvat kosketukseen pesuliuoksen kanssa, joka on haihduttamolta tulevaa hapanlauhdetta. Pesuliuos valuu pesurin vinoon muotoilulle pohjalle, josta sitä pumpataan takaisin suuttimille. Kiertävästä pesuliuoksesta poistetaan likaista vettä pintasäädöllä edelleen käsiteltäväksi. Pesuliuokseen tarttuvat savukaasujen pöly ja rikkiatrioksidit (SO_3). Savukaasu poistuu pisaranerotimien kautta toiseen pesuvaiheeseen.

Toisessa pesuvaiheessa eli jäähdytysvaiheessa savukaasut jäähdytetään noin 50 asteeseen. Savukaasuissa oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi. Jäähdytys tapahtuu täytekappalekerroksessa vastavirtaperiaatteella, kierrätettävä liuos jäähdytetään kahdessa rinnan kytketyssä lämmönvaihtimissa. Kiertoliuoksena käytetään haihduttamon suihkulauhduttajan lauhdetta. Ylimääräinen vesi johdetaan ylijuuksuna alapesuvaiheeseen. Tässä pesuvaiheessa jäähdytyksen lisäksi minimoidaan ammoniakkisumu (NH_4) ja parannetaan rikkidioksidin-absorptiota SO_2 jäähdyttämällä savukaasuja sopivaan lämpötilaan.

Jäähdytysvaiheen jälkeen alkaa absorptiotorni ja kolmas pesuvaihe. Kolmanteen pesuvaiheeseen kuuluu ensimmäinen ja toinen absorptiovaihe. Tässä osassa pesuria otetaan savukaasuista rikkidioksidi (SO_2) talteen keittonesteeseen eli ammoniumsulfiittiliuokseen (NH_4SO_2). Pesuvaihe tapahtuu kahdessa erillisessä täytekappalekerroksessa. Pesuliuoksena käytetään haihduttamon sekundäärilauhdetta ja ammoniakkivettä (NH_3), joka suihkutetaan vastavirtaperiaatteella savukaasuihin. Savukaasujen rikkidioksidi reagoi ammoniakin kanssa muodostaen ammoniumsulfiittia reaktioyhtälön 3 mukaisesti.



Ammoniakkivedellä säädetään kiertoliuoksen pH 5,7 ensimmäisessä absorptio-osassa ja 6,0 toisessa absorptio-osassa, jotta rikkidioksidi saataisiin tarttumaan kiertävään pesuliuokseen eli keittonesteeseen. Sekundäärilauhteella säädetään keittonesteen ammoniumsulfittipitoisuus sopivaksi 52 g/l. Varsinkin rikkiä poltettaessa pelkkä sekundäärilauhde ei riitä säätämään keittonesteen ammoniumsulfittipitoisuutta sopivaksi joten prosessissa käytetään myös hapanlauhdetta laimentamaan liuosta. Hapanlauhdetta johdetaan neljänteen pesuvaiheeseen josta se valuu ylijooksuna alempiin pesuvaiheisiin laimentaen keittonestettä. Valmis keittoneste valuu absorptio-osista kokooja ränneihin joista se pumpataan pintasäädöllä keittonestesäiliöön. Kaikki keittoneste ei mene suoraan säiliölle vaan osa keittonesteestä kierrätetään takaisin pesurille. Kiertoliuoksen pH:n lisäksi rikin tarttuvuuteen keittonesteeseen vaikuttaa savukaasun happipitoisuus.

Absorptiovaiheen jälkeen savut johdetaan vielä pisanerotuksen kautta neljänteen eli yläpesuvaiheeseen. Pesuvaiheen tarkoituksena on poistaa mahdollinen ammoniakkisumu täytekappalekerroksessa. Pesuvaiheen kiertoliuoksena käytetään hapanlauhdetta. Ylimääräinen pesuvesi poistuu ylijooksuna absorptio-osaan ja jäähdytysvaiheeseen. Lopuksi savukaasut johdetaan pisanerottimen kautta piippuun.

6 Mittaustyypit

Erilaiset mittaukset ovat oleellisessa osassa selvittäessä hukkaan meneviä energioita, ja jos laskentoihin tarvittavia mittauksia ei ole olemassa on tiedettävä millaisilla mittalaitteilla mittaukset on suoritettava. Tästä syystä muutamia mittaustekniikoita käytiin läpi tässä tutkielmassa. Kaikkia mittaustekniikoita ei ole oleellista käydä läpi vaan mittaukset on rajattu siihen mitä mittauksia tutkittavassa savukaasupesurissa on käytetty ja mitä mittauksia on jouduttu lisäämään tämän opinnäytetyön selvitystä varten.

6.1 Virtausmittaukset

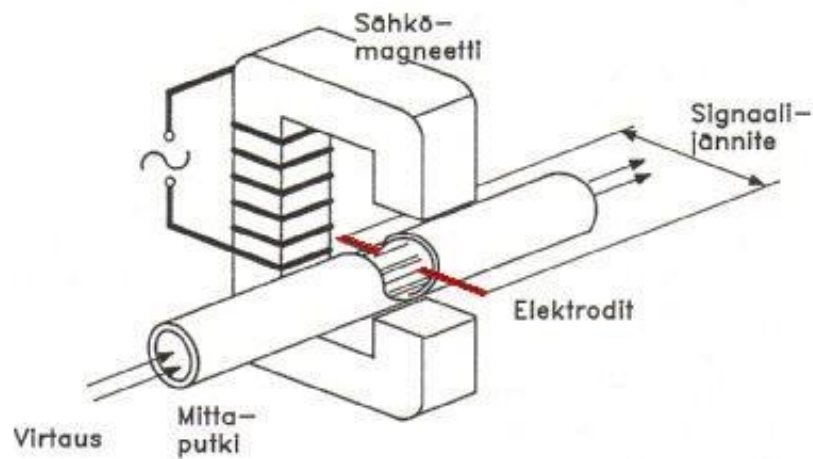
Virtausmittaukset jaetaan neljän pääperiaatteen mukaan:

- mittalaitteen paine-eron mittaus
- tilavuuden mittaus
- sähköiset menetelmät
- akustiset ja optiset menetelmät (Huhtinen ym. 2004, 279).

Tutkittavassa savukaasupesurissa on käytössä magneettisia virtausmittauksia jotka perustuvat sähköisiin menetelmiin ja ultraääni virtausmittauksia jotka perustuvat optisiin menetelmiin.

6.1.1 Magneettinen virtausmittari

Magneettista virtausmittaria voidaan käyttää sähköä johtavien nesteiden mittaamiseen. Vesi on esimerkiksi sähköä johtava neste ja lähes kaikki vesien virtausmittaukset tutkittavassa savukaasupesurissa on tehty magneettisilla virtausmittareilla. Magneettikenttä saadaan aikaan mittarin kesto- tai sähkömagneeteilla, jotka ovat asetettu virtauskanavaan toisiaan vasten (ks. Kuvio 4). Magneettikenttä on virtausta vastaan kohtisuorassa. Virtaava neste indusoi magneettikentässä virtausnopeuteen verrannollisen jännitteen elektrodeihin. Elektrodit ovat aseteltu putken sivuille toisiaan vasten ja ovat magneettikenttää vastaan kohtisuorassa. (Huhtinen ym. 2004, 282.)



Kuvio 4. Magneettisen virtausanturin periaate (Pihkala 2004, 76)

Faradayn lain mukaan jännitteestä saadaan laskettua haluttu virtausnopeus kaavan 4 mukaan.

$$E = B * l * w \quad (4)$$

Kaavan suureet:

- E = syntynyt jännite
- B = magneettikentän voimakkuus
- l = Elektrodien välimatka
- w = virtausnopeus

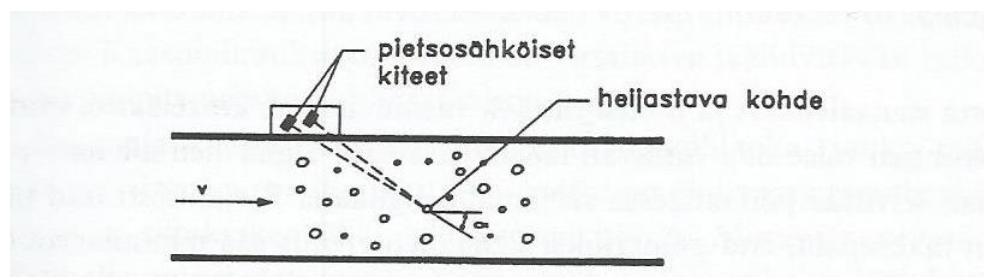
(Huhtinen ym. 2004, 282.)

6.1.2 Ultraäänivirtausmittaus

Ultraäänivirtausmittaus perustuu Dopplerin ilmiöön, eli kun kohteeseen suunnattu ääni heijastuu takaisin, sen taajuus muuttuu. Taajuus kasvaa kohteen lähestyessä ja vastaavasti kohteen loitontuessa taajuus pienenee. Tämän perusteella voidaankin todeta, että virtaava neste ei voi olla tasajakoista. Nesteen on oltava

epähomogeenistä eli nesteessä on oltava ääntä heijastavia kohteita kuten kaasukuplia, kiintoainehiukkasia tai sakkaa. Äänen kulku-aikaa virtaavassa nesteessä voidaan mitata kolmella eri tavalla; kulku-aikamenetelmällä, vaihe- ja taajuuseromenetelmällä ja korrelaatiomenetelmällä. (Pihkala 2004, 81.)

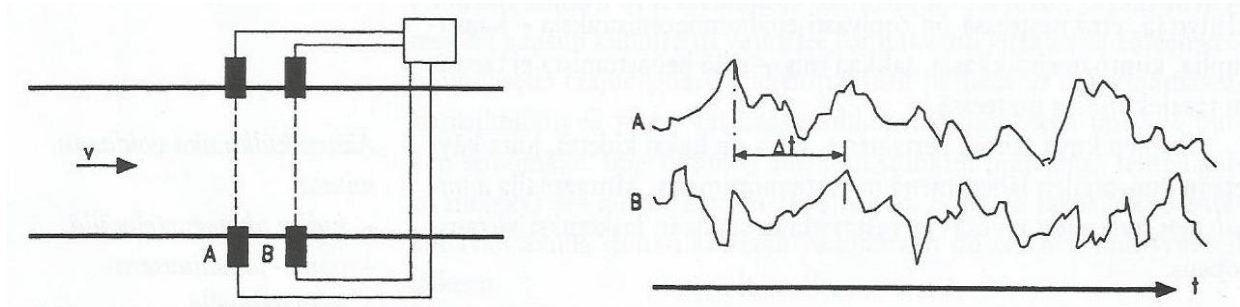
Kulku-aikamenetelmässä on kaksi kidettä jotka toimivat vuorotellen lähettimenä ja vastaanottimena (ks. Kuvio 5). Äänipulssien kulku-aika mitataan myötä- ja vastavirtaan, josta saadaan laskettua virtausnopeus. Vaihe- ja taajuuseromenetelmä vaatii kaksi lähetin-vastaanotinparia. Tällöin voidaan syöttää jatkuvaa siniaalto myötä- ja vastavirtaan. Vastaanotetuista signaaleista mitataan vaihe- tai taajuusero, jonka avulla saadaan laskettua virtausnopeus. Kulku-aika-, vaihe ja taajuuseroultraäänimenetelmää voidaan käyttää asentamalla lähettimet putken ulkopinnalle. Näin ollen ultraäänivirtausmittauksia voidaan asentaa prosessin ollessa yhä käynnissä. (Mts. 81.)



Kuvio 5. Ultraäänivirtausmittaus kulku-aikamenetelmällä (Mts. 81)

Kolmas tapa mitata ultraäänellä virtausnopeutta on ultraäänikorrelaatiomenetelmä. Ultraäänikorrelaatiomenetelmässä on kaksi lähetin-vastaanotin paria (ks. Kuvio 6). Vastaanotettavien signaalien voimakkuudet vaihtelevat osuessaan virtauksen epähomogeenisuuksiin. Epähomogeenisuudet kulkevat virtauksen mukana ja esiintyvät molemmassa lähetin-vastaanotinparissa. Lähetin-vastaanotinparien on oltava tarpeeksi lähellä toisiaan, jotta niiden lähettämien signaalien vastaavuus eli

korrelaatio olisi riittävä. Virtausnopeus saadaan laskettua lähetin-vastaanotinparien A ja B etäisyys jaettuna signaalien aikaerolla Δt . (Mts. 81 – 82.)



Kuvio 6. Ultraäänivirtausmittaus korrelaatiomenetelmä (Mts. 82)

6.2 Lämpömittaukset

Lämpötiloja mitataan fysikaalisilla, sähköisillä ja optisilla menetelmillä (Huhtinen ym. 2004, 285). Savukaasupesurissa on käytössä sähköisen menetelmän PT100 vastuslämpömittareita. Lämpömittauksia tehtiin myös käsin, koska kaikissa pesurille menevissä virtauksissa ei ollut lämpötilamittauksia. Mittaukset tehtiin termoparilämpömittarilla putken pinnalta. Termoparilämpömittarin toiminta perustuu sähköiseen menetelmään.

6.2.1 PT100-anturi

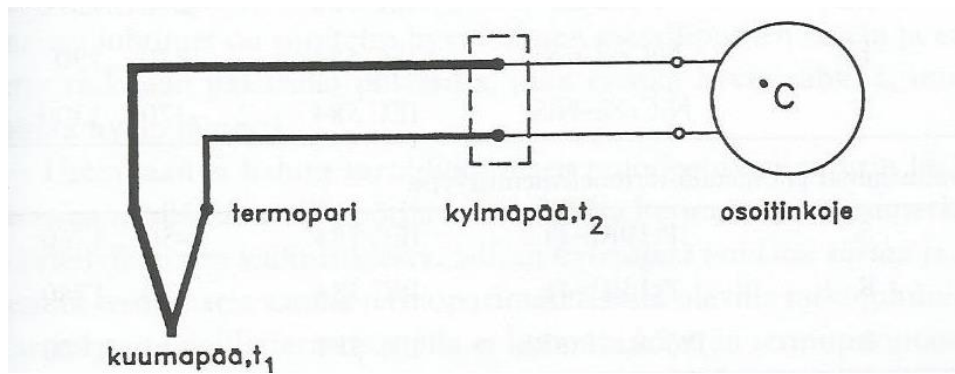
Kaikki pesurin olemassa olevat lämpömittaukset on tehty Pt100-anturilla. Pt100-anturilla nesteiden lämpötilojen mittauksien lisäksi mitataan myös savukaasunlämpötiloja. Pt100-anturit ovat metallisia vastuslämpömittareita.

Vastuslämpömittareiden toiminta perustuu metallin sähköiseen resistanssiin, joka on riippuvainen lämpötilasta. Metallivastuksen resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Antureina käytetään metalli- ja puolimetallivastuksia. Yleisin metallivastusanturi on Pt100, jota käytetäänkin tutkittavan savukaasupesurin mittauksissa. Pt100-anturissa käytettävä metalli on platina, jonka resistanssi on 100 ohmia nollan asteen lämpötilassa. Resistanssin ja lämpötilan riippuvuus ei kuitenkaan ole lineaarista. Lämpötilakerroin kuvaa vastuksen lämpötilariippuvuutta, joka kuvaa vastuksen keskimääräisen suhteellisen muutoksen välillä 0 – 100 °C yhden asteen lämpötilamuutosta kohden. Lämpötila saadaan mitattua, kun anturiin syötetään vakiovirta ja resistanssin muutos mitataan jännitehäviön muutoksena. Anturiin kytketty lähetin muuntaa lämpötilasta riippuvaisen vastuksen sähköiseksi standardiviestiksi, joka johdetaan edelleen näyttölaitteelle. Anturit kestävät lämpötilaa -200 asteesta +850 asteeseen asti. (Pihkala 2004, 44 - 46.)

6.2.2 Termoparianturi

Kaikista laskennoissa tarvittavista virtausten lämpötiloista ei ollut mittauksia, joten lämpötilat saatiin käyttämällä termoparilämpömittaria, jolla voitiin mitata lämpötilat putken pinnalta.

Termoparianturin toiminta perustuu Seebeckin lämpösähköilmiöön, jossa mitataan kahden eri metallilangan välille syntyvää jännite-eroa. Anturi koostuu kahdesta eri metalli- tai metalliseoslangasta (ks. Kuvio 7). Metallilangat ovat yhdistetty toisesta päästä eli ”kuumasta päästä” jolla mitataan lämpötilaa. Lankojen toiseen päähän eli ”kylmään päähän” syntyy jännite-ero, joka on verrannollinen kuumen ja kylmän pään lämpötilaeroon. Jotta kylmän pään lämpötila ei häiritsisi mittausta, sen lämpötila pidetään vakiona tai sen vaikutus kompensoidaan. Yleisimmin käytetty termoelementtityyppi on NiCr/Ni (nikkeli-kromi-nikkeli), jonka käyttöalue on -40 asteesta 1 200 asteeseen. Nikkeli-kromi-nikkeli termoelementti lämpötilamittari oli myös tässä tutkielmassa käytetyn käsin tehtyjen mittausten lämpömittarin tyyppi. (Pihkala 2004, 47 - 48.)



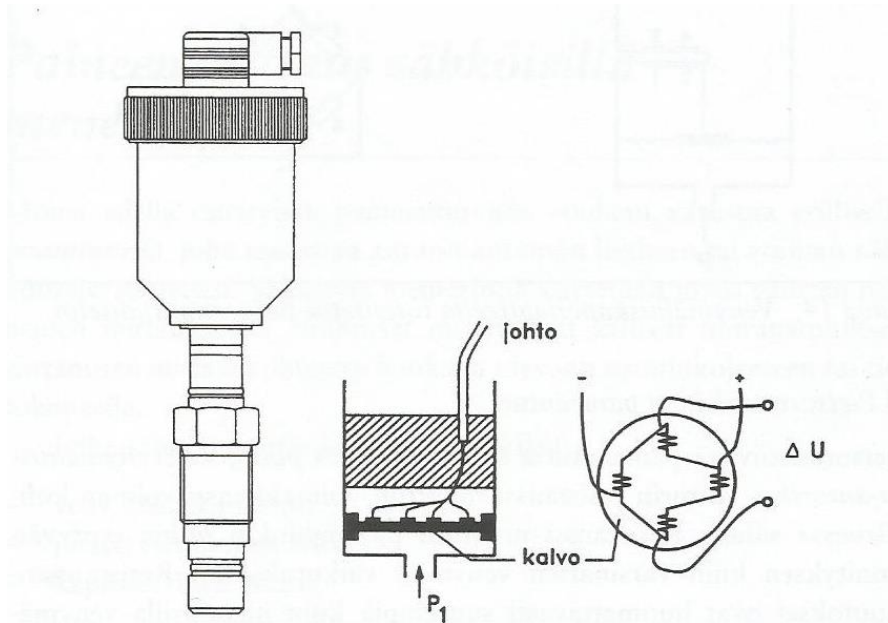
Kuvio 7. Termoparianturin rakenne (Mts. 47)

6.3 Painemittaukset

Painemittauksia tehdään mekaanisilla, fysikaalisilla ja sähköisillä menetelmillä (Huhtinen ym. 2004, 277). Savukaasupesurin painemittaukset ovat sähköisiin menetelmiin perustuvia pietsoresistiivisiä ja kapasitiivisiä painemittauksia.

6.3.1 Pietsoresistiivinen painemittaus

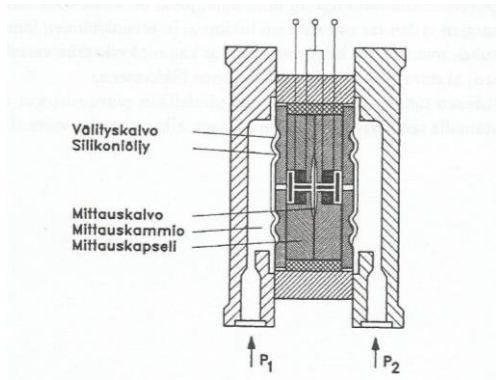
Pietsoresistiivinen paineen mittaus perustuu sähköiseen menetelmään jossa mitataan anturin resistanssia. Anturin resistanssi muuttuu paineen kasvaessa eli voiman kohdistuessa anturiin. Anturi koostuu piikalvosta johon on asetettu venymäliuskoja (ks. Kuvio 8). Paine vaikuttaa säteittäisesti ja tangentiaalisesti aseteltuihin venymäliuskoihin eri tavoin, joten niiden erojännite muuttuu paineen vaihdellessa. Paineen saamiseksi tarvitaan mittalaitteelle vertailupaine. Vertailupaine voidaan tehdä esimerkiksi tyhjällä piipalan sisään. (Pihkala 2004, 29 - 30.)



Kuvio 8. Pietsoresistiivinen paineanturi (Mts. 30)

6.3.2 Kapasitiivinen painemittaus

Sähköisessä kapasitiivisessä paineanturissa paine mitataan paine-erokammiossa. Paine-erokammion seinämissä on kiinteät differentiaalikondensaattorilevyt ja kammion välissä joustava mittauskalvo (ks. Kuvio 9). Mitattava paine saadaan paineen välittimellä. Paineen välittimenä toimii silikoniöljy joka samalla toimii anturin eristeenä. Mittauskalvon paineen aiheuttamasta taipumisesta differentiaalikondensaattorilevyjen välinen kapasitanssi muuttuu, josta saadaan laskettua mitattava paine. (Pihkala 2004, 30.)

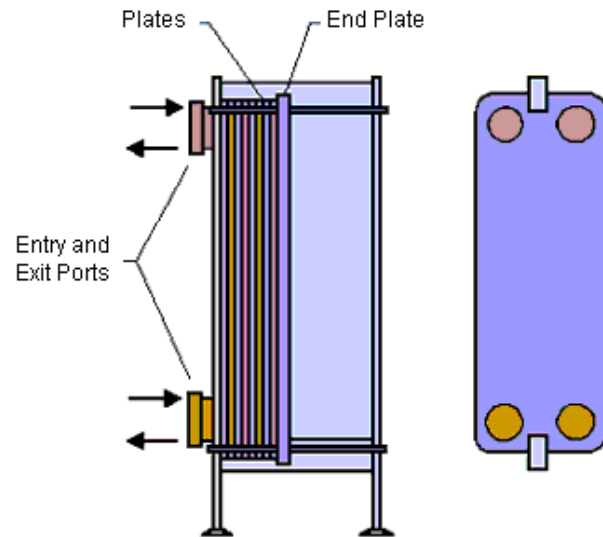


Kuvio 9. Kapasitiivinen paineanturi (Mts. 31)

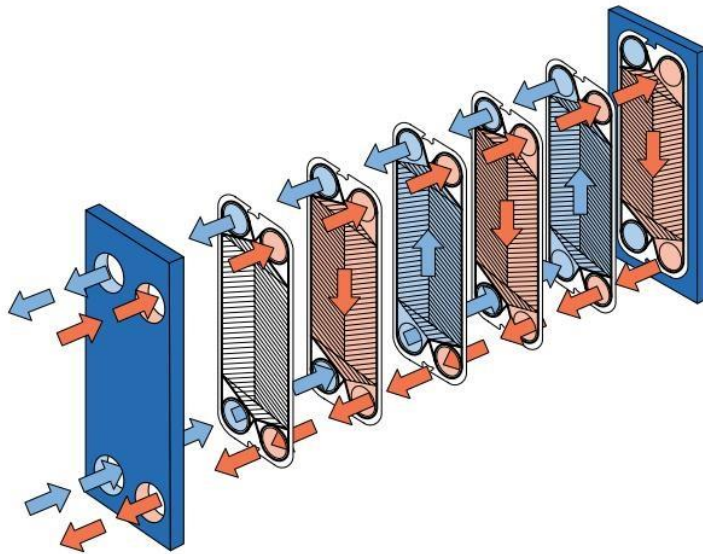
7 Lämmönsiirrin

Lämmönsiirrin on laite, jota käytetään kahden eri lämpötilassa olevien väliaineiden lämmön siirtämiseen. Lämmönsiirto tapahtuu kulkeutumalla ja johtumalla. Kulkeutumalla lämpöä siirtyy lämmön aiheuttamien virtausten johdosta. Suurin osa lämmöstä kuitenkin siirtyy kulkeutumalla. (Kothandaraman 2006, 521.)

Lämmönsiirrin tyyppiä on lukuisia, tarkasteluun kuitenkin valittiin vain levylämmönvaihdin, koska tutkittavassa pesurissa ei ole muunlaisia lämmönvaihtimia. Levylämmönsiirrin koostuu useista suorakaiteen muotoisista levyistä, jotka ovat kiinnitettyinä tiiviisti toisiaan vasten (ks. Kuvio 10). Levypakan joka toisessa levyssä kulkee lämmin väliaine ja joka toisessa kylmäväliaine (ks. Kuvio 11). Virtauskanavat kuumalle ja kylmälle väliaineelle ovat levyjen kulmissa. Kylmäväliaine ottaa vastaan lämpimän väliaineen lämmön levyjen välityksellä. Väliaineet kulkevat vastavirtaan toisiinsa nähden koho- tai aaltokuvioituilla levyillä. Levyjen kuviointi kasvattaa lämmönsiirron pinta-alaa jolloin lämmönsiirto on tehokkaampaa. (Wang ym. 2007, 5 - 6.)



Kuvio 10. Levylämmönsiirtimen rakenne (Brogan 2011)



Kuvio 11. Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Levylämmönsiirrin 2012)

Tutkittavaan savukaasupesuriin on kytketty kolme levylämmönsiirrintä joista kaksi on jatkuvasti käytössä ja yksi on varalla. Lämmönsiirtimien läpi virtaa savukaasupesurin

jäähdytysosan pesukierto. Pesukierron tarkoituksena nimensä mukaisesti on jäähdyttää savukaasuja. Levylämmönsiirtimet ovat siitä hyviä, että niitä voidaan isontaa lisäämällä levyjä lämmönsiirtimen jatkoksi. Levyjen lisäämiseen olisi myös käytännössä hyvin tilaa. Lisäämällä levyjä lämmönsiirtimeen olisi mahdollista saada lämpöä vielä tehokkaammin talteen, jos uusille levyille olisi tarvetta.

8 Pesukiertojen energiavirrat

Pelkän energiataseen lisäksi, joka käsitellään luvussa 12, olisi järkevää tarkastella myös prosessin sisäisiä energiavirtoja. Savukaasupesurin pesukierroissa kulkee suuria määriä lämpimiä vesiä, joista periaatteessa voisi ottaa lämpöä talteen. Jos energiavirrat ovat isoja, kannattaisi tutkia asiaa perusteellisemmin voitaisiinko lämpö ottaa talteen käytännössä.

Lämmöntalteenottoa suunniteltaessa on tietenkin otettava huomioon onko se prosessin kannalta mahdollista. Esteenä lämmöntalteenotolle voisi olla prosessin kannalta tärkeät lämpötilat. Jos lämpötilat eivät ole sopivia prosessin eri vaiheissa, saattavat savukaasujen pesu ja rikin talteenotto kärsiä.

Jäähdytyskierto menee kahden lämmönvaihtimen läpi kuten luvussa 5.2 käy ilmi, muista pesukierroista lämpövirtoja ei hyödynnetä. Ensimmäisestä absorptio-osan kierrosta olisi edelleen korkeiden lämpötilojen vuoksi mahdollista ottaa lämpöä talteen. Varsinkin kesä aikaan tässä pesuvaiheessa lämpötilat meinaavat karata liian korkeiksi jolloin lämmöntalteenotto helpottaisi lämpötilojen pitämistä kurissa. Tosin kesäaikaan talteen otettavalle lämmölle ei olisi käyttöä. Toisessa absorptiokierrossa ja yläpesukierrossa on todennäköisesti jo niin matalat lämpötilat, ettei niistä olisi mahdollista ottaa lämpöä talteen. Tämän perusteellisemmin pesukiertojen lämmöntalteenottomahdollisuuksiin ei tässä työssä ole tarkoitus perehdyä.

9 Savukaasut

9.1 Savukaasujen muodostuminen

Savukaasut muodostuvat polttoaineen palamisreaktiosta syntyneistä kaasuista, polttoilman mukana tulleesta tpeestä ja palamattomista komponenteista kuten vedestä ja tuhkasta. Kun tiedetään polttoaineiden koostumus, voidaan palamisreaktioiden kautta saada selville savukaasujen koostumus ja tätä kautta laskettua savukaasujen sisältämä energia. (Huhtinen ym. 2004, 86.)

Palamisreaktiossa polttoaineen sisältämä hiili (C), vety (H₂) ja rikki reagoivat palamisilman hapen kanssa. Reaktiossa muodostuu hiilidioksidia (CO₂), vettä (H₂O) ja rikkidioksidia (SO₂) reaktioyhtälöiden 5, 6 ja 7 mukaisesti.



Savukaasut muodostuvat palamisreaktioista syntyneistä kaasuista. (Mts. 83 – 84)

Lisäksi savukaasuissa on polttoaineista ja palamisilmasta eri komponentteja jotka eivät pala, mutta vaikuttavat osaltaan palamistapahtumaan. Polttoaineissa näitä komponentteja ovat happi (O₂), typpi (N₂), kosteus (H₂O) ja tuhka. Palamisilmasta savukaasuihin tulevat komponentit ovat typpi, happi ja argon (Ar). Laskentoja varten voidaan olettaa, että polttoaineiden palamattomat komponentit siirtyvät sellaisenaan savukaasuihin. (Mts. 84, 91.)

Epätäydellisessä palamisessa, eli silloin kun hapetta ei palamista varten ole tarpeeksi, hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilimonoksidia (CO) eli häkää, joka siirtyy savukaasuihin. Energiaa ei myöskään vapaudu epätäydellisessä palamisessa kuin neljäsosa verrattuna hapen reagointiin hiilen kanssa muodostaen hiilidioksidia. Hiili reagoi hapen kanssa epätäydellisessä palamisessa yhtälön 8 mukaisesti.



Hiilimonoksidipitoisuuksia esiintyy savukaasuissa, vaikka kattilaan syötettäisiin ilmaylimäärää. Tämä johtuu siitä, että polttoaine ja palamisilma eivät sekoitu täydellisesti. Ilmaylimäärällä tarkoitetaan palamisilman syöttöä kattilaan enemmän kuin teoreettisessa palamisessa sitä tarvittaisiin. Palamisilmaa syötetään enemmän, koska täydellistä palamista ei saavuteta teoreettisella minimi-ilmamäärällä. (Mts. 86, 91.)

Typpen oksideja syntyy typen ja hapen reagoidessa keskenään reaktioyhtälöiden 10 ja 11 mukaisesti.



Typpimonoksidit (NO) muodostuvat tulipesässä jotka edelleen pyrkivät hapettumaan lämpötilan laskiessa typpidioksidiksi (NO₂). Kattiloiden typpioksidi päästöjä ei erotella keskenään vaan niistä yhdessä puhutaan NO_x-päästöistä. NO_x-päästöt ovat varsin pieniä, joten niitä ei yleensä huomioida. Myös tämän tutkielman laskennoista NO_x-päästöt jätetään laskennoista pois, joka todetaan luvussa 11.3. (Mts. 92 – 93.)

9.2 Savukaasun lämpöteho

Savukaasut tuovat pesuriin suuren määrän energiaa. Savukaasut luovuttavat lämpöään eri pesuvaiheissa jäähtymällä ja vesihöyryn lauhtuessa vedeksi. Termodynamiikassa käsiteltävän exergian avulla voidaan selvittää savukaasuista teoreettisesti saatavissa oleva lämpöteho. Exergialla tarkoitetaan suurinta mahdollista tehoa, joka voidaan saada systeemistä, kun se siirtyy alkutilasta tasapainotilaan ympäristön kanssa. (Lampinen 2010, 133.)

Kun savukaasun ja ympäristön välinen lämpötilaero on tiedossa, saadaan savukaasuvirtauksen lämpöteho kaavan 12 mukaisesti.

$$Q = c_{psk} * \dot{m} * \Delta T \quad (12)$$

- Q = teho eli lämpöenergiavirta kW
- c_{psk} = savukaasun ominaislämpökapasiteetti kJ/(kgK)
- \dot{m} = massavirta kg/s
- ΔT = lämpötilaero savukaasun ja ympäristön välillä

Savukaasujen ominaislämpöjen laskeminen on työlästä, joten laskentojen helpottamiseksi on laadittu diagrammeja, joista selviää savukaasun entalpia lämpötilan funktiona. Energiavirran saisi laskettua diagrammien entalpian avulla, kun tiedetään savukaasun massavirta. Entalpia-arvo saadaan selvitettyä, kun on tiedossa savukaasun lämpötila ja polttoaineen kuiva-ainepitoisuus. (Huhtinen ym. 2004, 97.)

Tässä työssä entalpioilla laskeminen ei kuitenkaan ollut mahdollista, koska kyseessä on kattila, jossa poltetaan useampaa eri polttoainetta ja kaikkien polttoaineiden koostumuksia ei tiedetä. Vaikka polttoaineiden koostumukset tiedettäisiinkin ja saataisiin selvitettyä savukaasujen ominaislämpökapasiteetti tai entalpia, saataisiin laskettua vain energiavirta ennen savukaasupesuria. Energiataseen kannalta on tiedettävä myös pesurista savukaasun mukana poistuva lämpö. Savukaasujen koostumus muuttuu pesurissa eri pesuvaiheista johtuen ja koostumukset voidaan selvittää vain mittaustulosten perusteella. Näin ollen päädyttiin selvittämään savukaasujen lämpöteho Nablabsin tekemän päästömittausten avulla (Liite 2).

Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti voidaan määrittellä laskemalla savukaasun kaikkien osakaasujen massaosuuksien mukaan painotettuna keskiarvona (kaava 13):

$$c_{psk} = \sum x_j * c_{pj} \quad (13)$$

- x_j = tietyn kaasukomponentin massaosuus
- c_{pj} = tietyn kaasukomponentin ominaislämpö

Kaasukomponenttien keskimääräinen ominaislämpö määritetään lämmittämällä kaasua ja mittaamalla lämmitykseen kulunut energia. Tämän jälkeen energiamäärä jaetaan alku- ja loppulämpötilan erotuksella. Taulukoidut arvot löytyvät Liitteestä 3. (Huhtinen ym. 2004, 97.)

9.3 Savukaasun lämpöteho ennen ja jälkeen savukaasupesurin

Savukaasujen lämpöenergiavirrat laskettiin, kuten edellisessä luvussa 9.2 mainittiin, päästömittaustulosten perusteella. Mittaustulosten perusteella saatiin selville kuivien savukaasujen koostumus ja kaasukomponenttien massaosuudet jotka näkyvät Taulukossa 2.

Taulukko 2. Savukaasun koostumus kuivassa savukaasussa

Savukaasun pitoisuudet kuivassa savukaasussa	Ennen pesuria, %	Pesurin jälkeen, %
Happi, O ₂	5,8	6,6
Hiilidioksidi, CO ₂	12,9	12,2
Häkä, CO	0,01	0,01
Rikki, SO ₂	0,523	0,0032
Typpi, N ₂	80,767	81,187
yhteensä	100	100

Taulukossa 2 olevan Rikkidioksidin osuus oli päästömittauksissa ppm (parts per million) muodossa eli prosenttiosuus saatiin jakamalla arvo 10 000. Typen osuus määriteltiin siten, että kun tiedetään hapen, hiilidioksidin, hään ja rikkidioksidin määrät niin loput savukaasuista on typpeä. Savukaasuista mitattiin myös ammoniakki (NH₃) ja typenoksidit (NO_x), mutta niiden määrä todettiin niin pieniksi, ettei niitä kannata laskelmissa huomioida. Savukaasujen kosteus ennen pesuria on 22 % ja pesurin jälkeen 14 %, näiden arvojen perusteella saatiin laskettua kosteiden savukaasujen kaasukomponenttien massaosuudet (ks. Taulukko 3).

Taulukko 3. Savukaasun koostumus kosteassa savukaasussa

Savukaasun koostumus kosteassa savukaasussa	Ennen pesuria, %	Pesurin jälkeen, %
Vesi H ₂ O	22	14
Happi, O ₂	4,524	5,676
Hiilidioksidi, CO ₂	10,062	10,492
Häkä, CO	0,0078	0,0086
Rikki, SO ₂	0,408	0,0028
Typpi, N ₂	62,998	69,821
Yhteensä	100	100

Kun savukaasun koostumus tiedettiin, voitiin laskea savukaasun ominaislämpökapasiteetti ennen pesuria (kaava 14). Ominaislämpökapasiteetti laskettiin keskimääräisessä lämpötilassa savukaasun ollessa 152 asteista ja ympäristön lämpötilan ollessa 5 asteista.

$$c_{psk78,5^{\circ}} = x_{H_2O} * c_{pH_2O} + x_{O_2} * c_{pO_2} + x_{CO_2} * c_{pCO_2} + x_{CO} * c_{pCO} + x_{SO_2} * c_{pSO_2} + x_{N_2} * c_{pN_2} \quad (14)$$

- $c_{psk78,5^{\circ}}$ = savukaasuun ominaislämpökapasiteetti ennen savukaasupesuria
- x = kaasujen massaosuudet savukaasussa ennen savukaasupesuria:
 - x_{H_2O} = veden massaosuus = 0,22
 - x_{O_2} = hapen massaosuus = 0,045
 - x_{CO_2} = hiilidioksidin massaosuus = 0,1006
 - x_{CO} = hään massaosuus = 0,000078
 - x_{SO_2} = rikkidioksidin massaosuus = 0,00408
 - x_{N_2} = typen massaosuus = 0,63
- c_p = kaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetti saatiin interpoloimalla Liitteen 3 arvoista keskimääräisessä lämpötilassa 78,5 °C.
 - c_{pH_2O} = veden ominaislämpökapasiteetti = $1,864 \frac{kJ}{kgK}$
 - c_{pO_2} = hapen ominaislämpökapasiteetti = $0,923 \frac{kJ}{kgK}$

- $c_{pCO_2} = \text{hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti} = 0,860 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- $c_{pCO} = \text{hään ominaislämpökapasiteetti} = 1,043 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- $c_{pSO_2} = \text{rikkidioksidin ominaislämpökapasiteetti} = 0,631 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- $c_{pN_2} = \text{typen ominaislämpökapasiteetti} = 1,045 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

→ Savukaasun ominaislämpökapasiteetiksi edellä olevilla arvoilla saatiin

$$c_{psk78,5^\circ} = 1,198 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Selvitettyä savukaasun ominaislämpökapasiteetin, voitiin laskea savukaasun mukana siirtyvä lämpöteho pesuriin kaavan (15) mukaisesti:

$$Q_{sk,in} = c_{psk78,5^\circ} * \dot{m} * \Delta T \quad (15)$$

- $Q_{in} = \text{lämpöteho pesuriin kW}$
- $c_{psk78,5^\circ} = \text{savukaasun ominaislämpökapasiteetti ennen pesuria} = 1,206 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- $\dot{m} = \text{savukaasun massavirta, päästömittaustulos} = 63 \text{ kg/s}$
- $\Delta T = \text{savukaasun (152 }^\circ\text{C päästömittaustulos) lämpötilaero ympäristön lämpötilaan (5 }^\circ\text{C)} = 147 \text{ }^\circ\text{C}$

→ Savukaasuvirtauksen lämpötehoksi ennen pesuria saatiin

$$Q_{sk,in} = 11\,091,1 \text{ kW}$$

Seuraavaksi laskettiin savukaasun mukana pesurista lähtevä lämpöteho.

Aluksi selvitettiin savukaasun ominaislämpökapasiteetti pesurin jälkeen kaava (16).

Ominaislämpökapasiteetti laskettiin keskimääräisessä lämpötilassa savukaasun ollessa 53 asteista ja ympäristön lämpötilan ollessa 5 asteista.

$$c_{psk29^\circ} = x_{H_2O} * c_{pH_2O} + x_{O_2} * c_{pO_2} + x_{CO_2} * c_{pCO_2} + x_{CO} * c_{pCO} + x_{SO_2} * c_{pSO_2} + x_{N_2} * c_{pN_2} \quad (16)$$

- $c_{psk29^\circ} = \text{savukaasuun ominaislämpökapasiteetti savukaasupesurin jälkeen}$
- $x = \text{kaasujen massaosuudet savukaasussa savukaasupesurin jälkeen:}$
 - $x_{H_2O} = \text{veden massaosuus} = 0,14$
 - $x_{O_2} = \text{hapen massaosuus} = 0,057$
 - $x_{CO_2} = \text{hiilidioksidin massaosuus} = 0,1049$

- $x_{CO} = \text{hään massaosuus} = 0,000086$
- $x_{SO_2} = \text{rikkidioksidin massaosuus} = 0,000028$
- $x_{N_2} = \text{typen massaosuus} = 0,6982$
- $c_p = \text{kaasukomponenttien ominaislämpökapasiteetti}$ saatiin interpoloimalla Liitteen 3 arvoista keskimääräisessä lämpötilassa $29\text{ }^\circ\text{C}$.
 - $c_{pH_2O} = \text{veden ominaislämpökapasiteetti} = 1,858 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
 - $c_{pO_2} = \text{hapen ominaislämpökapasiteetti} = 0,917 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
 - $c_{pCO_2} = \text{hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti} = 0,834 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
 - $c_{pCO} = \text{hään ominaislämpökapasiteetti} = 1,042 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
 - $c_{pSO_2} = \text{rikkidioksidin ominaislämpökapasiteetti} = 0,616 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
 - $c_{pN_2} = \text{typen ominaislämpökapasiteetti} = 1,040 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

→ Savukaasun ominaislämpökapasiteetiksi edellä olevilla arvoilla saatiin

$$c_{psk29^\circ} = 1,126 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Savukaasun mukana pesurista siirtyvä lämpöteho saatiin kaavan 17 mukaisesti.

$$Q_{sk,out} = c_{psk29^\circ} * \dot{m} * \Delta T \quad (17)$$

- $Q_{out} = \text{lämpöteho pesurista kW}$
- $c_{psk29^\circ} = \text{savukaasun ominaislämpökapasiteetti pesurin jälkeen} = 1,129 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
- $\dot{m} = \text{savukaasun massavirta, päästömittaustulos} = 59 \text{ kg/s}$
- $\Delta T = \text{savukaasun (53 }^\circ\text{C, päästömittaustulos) lämpötilaero ympäristön lämpötilaeroon (5 }^\circ\text{C)} = 48\text{ }^\circ\text{C}$

→ Savukaasuvirtauksen lämpötehoksi pesurin jälkeen saatiin

$$Q_{sk,out} = 3\,189,1 \text{ kW}$$

10 Energiatase

Virtaussysteemissä käytetään usein sanontaa kontrollitilavuus. Kontrollitilavuus on mikä tahansa virtauskentässä määritelty alue ja sitä rajoittavaa pintaa kutsutaan kontrollipinnaksi, kontrollirajaksi tai taserajaksi. Taserajan sisällä oleva systeemi voi olla hyvinkin monimutkainen ja taserajojen sisällä siirtyvällä lämmöllä ja työllä ei energiataaseen kannalta ole merkitystä. Avoin virtaussysteemi vaihtaa energiaa ja ainetta ympäristönsä kanssa. Avoimen virtaussysteemin energiataase käsittää systeemiin sisään menevien ja ulostulevien massan mukana siirtyvän energian, lämmön ja työn. Yhdistämällä edellä mainitut komponentit energiataaseelle voidaan määrittellä kaavan 18 mukaan:

$$\dot{m} \left(h_{in} + \frac{1}{2} w_{in}^2 + gH_{in} \right) + Q_{in} + P_{in} = \dot{m} \left(h_{out} + \frac{1}{2} w_{out}^2 + gH_{out} \right) + Q_{out} + P_{out}$$

(18)

- $\dot{m} \left(h_{in} + \frac{1}{2} w_{in}^2 + gH_{in} \right) =$ virtausteho, kW
 - \dot{m} = massavirta, kg/s
 - h_{in} = ominaisentalpia kJ/kg
 - $\frac{1}{2} w_{in}^2$ = liike-energia, jossa w on nopeus
 - gH_{in} = potentiaalienergia, jossa g on putoamiskiiktyvyys ja H on korkeus
- Q_{in} = systeemiin tuleva lämpöteho, kW
- P_{in} = työteho ympäristöstä systeemiin, kW
- Alaindeksi out kertoo ulostulevista tehoista

(Lampinen 2010, 51, 55.)

Entalpia on aineen sisäenergian ja siirtotyön summa (kaava 19).

$$H = U + pV \tag{19}$$

Sisäenergia (U) tarkoittaa atomi ja molekyyllitasolla esiintyvien energiamuotojen summaa. Energiamuotoja ovat esimerkiksi molekyylien ja atomien etenemis- ja pyörimisliikettä ja värähtelyä. Siirtotyö on aineen paineen ja tilavuuden tulo.

Jakamalla yhtälön jokainen termi aineen massalla, saadaan ominaisentalpia jonka yksikkö on kJ/kg (kaava 20).

$$h = u + pv \quad (20)$$

Entalpien arvoa ei tarvitse laskea vaan voidaan käyttää taulukoituja arvoja, kun tiedetään aineen lämpötila ja paine. (Perttula 2000, 36.)

Jos systeemillä on liike- tai potentiaalienergiaa, ne eivät lisää systeemin kokonaisenergiaa. Liike- ja potentiaalienergia voivat ainoastaan muuttaa muotoaan lämpöenergiaksi tai työksi. Esimerkiksi potentiaalienergia voi vapautua lämmöksi, kun systeemi palautuu korkeusasemastaan nollatasolle. Kun systeemillä on liike-energiaa, se voi pienentämällä nopeuttaa tehdä työtä. Lisäksi systeemille voidaan antaa liike-energiaa aiheuttamalla siihen nettovoima, joka tekee työtä systeemin nopeuden kasvattamiseksi. Työhön kulunut energia varastoituu systeemin liike-energiaksi. (Jaakkola 2014, 33 - 35.)

Ympäristöstä voidaan tuoda virtaussysteemiin työtehoa (P_{in}) esimerkiksi pumpuilla, puhaltimilla ja kompressoreilla. Samoin ympäristöön voidaan vapauttaa työtehoa P_{out} virtaussysteemistä esimerkiksi turbiinilla. (Lampinen 2010, 52.)

Systeemin rajojen yli voi siirtyä lämpöenergiaa johtumalla, kulkeutumalla ja säteilemällä. Lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta alempaan joten sen mukaan lämpöä siirtyy joko systeemiin sisään Q_{in} tai siitä pois Q_{out} . (Jaakkola 2014, 46.)

Lämpöä voi myös vapautua tai sitoutua systeemissä kemiallisista reaktioista johtuen, jota kutsutaan reaktiolämmöksi. Reaktiolämpö eli entalpiamuutos saadaan laskemalla reaktiotuotteiden ja lähtöaineiden muodostumisentalpioiden erotuksella kaavan 21 mukaisesti.

$$\Delta H = H(\text{reaktiotuotteet}) - H(\text{lähtöaineet}) \quad (21)$$

Jos entalpiamuutos $\Delta H < 0$, kyseessä on eksoterminen reaktio eli lämpöä vapauttava reaktio. Lämpöä sitova reaktio eli endoterminen reaktio on kyseessä silloin kun entalpiamuutos $\Delta H > 0$. (Kalsi 2015)

Savukaasupesuria voitiin tarkastella edellisen teorian mukaisesti avoimena virtaussysteeminä, koska pesuri vaihtaa ympäristön kanssa ainetta ja energiaa. Taseraja valittiin siten, että prosessissa siirtyvä lämpö ja työ rajattiin taserajan sisäpuolelle (esimerkiksi pumpput) ja näin helpottaisi energiataseen laskemista, ja ylipäättään mahdollistaisi sen. Lisäksi putkivirtaukset jotka yhdistyvät tai jakautuvat vaikuttivat taserajan valintaan. Taserajauksen jälkeen energiataseeksi saatiin yhtälön 22 mukainen.

$$\sum_{in} \dot{m} * h + Q_{reaktiolämpö} + Q_{sk,in} = \sum_{out} \dot{m} * h + Q_{sk,out} + Q_{häviöt} \quad (22)$$

Savukaasupesuriin tulevia ja siitä lähteviä massavirtoja on useita ja yhtälö pätee edelleen kun virtaukset summataan yhteen. Massavirta ja entalpia kertovat sisään menevien ja ulostulevien aineiden energiavirtojen määrän. Savukaasut tuovat pesuriin lämpötehoa ($Q_{sk, in}$) ja poistuvat piipusta vieden hyödyntämättömän lämmön mukanaan ($Q_{sk, out}$). Myös keittonesteen valmistuksessa tapahtuvassa kemiallisessa reaktiossa, kun rikki ja ammoniakkivesi reagoivat keskenään, vapautuu lämpöä pesuriin $Q_{reaktiolämpö}$. Lisäksi prosessissa tapahtuu häviöitä.

10.1 Savukaasupesuriin tulevat energiavirrat

Savukaasupesuriin tulevat virtaukset ovat hapanlauhde (\dot{m}_1), sekundäärilauhde (\dot{m}_2), suihkukaivon vesi (\dot{m}_3), vesi 1 lämmönvaihtimelle (\dot{m}_4), raakavesi 3 lämmönvaihtimelle (\dot{m}_5), ammoniakkivesi (\dot{m}_6) ja savukaasut (Q_{in}). Lisäksi ammoniakkin ja savukaasujen rikkidioksidin reagoidessa vapautuu lämpöä. Tässä osiossa laskettiin pesuriin tulevien virtausten lämpötehot ja ammoniakkin ja rikkidioksidin reaktiossa vapautunut lämpöteho. Laskelmat tehtiin mittaustulosten perusteella.

Pesuriin tulevan hapanlauhteen virtauksen teho laskettiin kaavan 23 mukaisesti.

$$Q_{hapanlauhde} = \dot{m}_1 * h_1 \quad (23)$$

Mittaustulosten perusteella käytettiin seuraavia arvoja:

- \dot{m}_1 = massavirta, virtausmittaus: FIQA-2403: $25 \text{ m}^3/\text{h} = 6,94 \text{ kg/s}$
- h_1 = veden entalpia = $134,7 \text{ kJ/kg}$, arvoilla:
 - lämpötila $T_1 = 56 \text{ }^\circ\text{C}$, mitattu termoparilämpömittarilla
 - paine $P_1 = 3,7 \text{ bar}$, laskettu pumpun nostokorkeudesta 38 m kaavalla $\rho * g * h$, jossa:
 - ρ = veden tiheys 1000 kg/m^3
 - g = putoamiskiihtyvyyys $9,81 \text{ m/s}^2$
 - h = nostokorkeus

→ Hapanlauhteen virtauksen tehoksi saatiin $Q_{\text{hapanlauhde}} = 1\,629,9 \text{ kW}$

Pesuriin tulevan sekundäärilauhteen virtauksen teho laskettiin kaavan 24 mukaisesti.

$$Q_{\text{sekundäärilauhde}} = \dot{m}_2 * h_2 \quad (24)$$

Mittaustulosten perusteella käytettiin seuraavia arvoja:

- \dot{m}_2 = massavirta, virtausmittaus: FIQA-2426 $22,1 \text{ m}^3/\text{h} = 6,14 \text{ kg/s}$
- h_2 = veden entalpia = $280,6 \text{ kJ/kg}$, arvoilla:
 - lämpötila $T_2 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$, mitattu termoparilämpömittarilla
 - paineessa $P_2 = 2 \text{ bar}$, painemittaus PC-2441

→ Sekundäärilauhteen virtauksen tehoksi saatiin $Q_{\text{sekundäärilauhde}} = 1\,722,6 \text{ kW}$

Pesuriin tulevan suihkukaivon veden virtauksen teho laskettiin kaavan (25) mukaisesti.

$$Q_{\text{suihkukaivon vesi}} = \dot{m}_3 * h_3 \quad (25)$$

- \dot{m}_3 = massavirta, virtausmittaus: FK-2449 $16 \text{ m}^3/\text{h} = 4,44 \text{ kg/s}$
- h_3 = veden entalpia = $96,6 \text{ kJ/kg}$, arvoilla:
 - lämpötila $T_3 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, mitattu termoparilämpömittarilla
 - paine $P_3 = 1,3 \text{ bar}$, paikallismittaus.

→ Suihkukaivon veden virtauksen tehoksi saatiin $Q_{\text{suihkukaivon vesi}} = 429,3 \text{ kW}$

Savukaasupesurin 1 lämmönvaihtimelle menevän veden virtauksen teho laskettiin kaavan 26 mukaisesti:

$$Q_{\text{vesi 1 lämmönvaihtimelle}} = \dot{m}_4 * h_4 \quad (26)$$

- \dot{m}_4 = massavirta, virtausmittaus: FI-0508 = 63,7 kg/s
 - h_4 = veden entalpia = 96,8 kJ/kg, arvoilla
 - lämpötila $T_4 = 23$ °C, lämpötilamittaus TR-680
 - paine $P_4 = 3,8$ bar, painemittaus PI-2438
- 1 lämmönvaihtimelle menevän veden virtauksen tehoksi saatiin
- $Q_{\text{vesi 1 lämmönvaihtimelle}} = 6166,2$ kW

Pesurin 3 lämmönvaihtimelle menevän raakaveden virtauksen teho laskettiin kaavan 27 mukaisesti.

$$Q_{\text{raakavesi 3 lämmönvaihtimelle}} = \dot{m}_5 * h_5 \quad (27)$$

- \dot{m}_5 = massavirta, virtausmittaus: FIQ-2450 86 m³/h = 23,9 kg/s
 - h_5 = veden entalpia = 25,5 kJ/kg, arvoilla
 - lämpötila $T_5 = 6$ °C, mitattu termoparilämpömittarilla
 - paine $P_5 = 2,6$ bar, painemittaus PI-005
- 3 lämmönvaihtimelle menevän raakaveden virtauksen tehoksi saatiin
- $Q_{\text{raakavesi lämmönvaihtimelle}} = 609,2$ kW

Pesuriin menevän ammoniakkiveden virtauksen teho laskettiin seuraavan kaavan 28 mukaisesti.

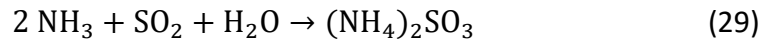
$$Q_{\text{ammoniakkivesi}} = \dot{m}_6 * h_6 \quad (28)$$

- \dot{m}_6 = massavirta, virtausmittaus FI-2413.2 2,05 m³/h = 0,57 kg/s
- $h_6 = 24$ % ammoniakkiveden entalpia = -27,4 kJ/kg, arvoilla
 - lämpötila $T_6 = 16$ °C, mitattu termoparilämpömittarilla
 - paine $P_6 = 5,9$ bar, laskettu pumpun nostokorkeudesta 60 m kaavalla $\rho * g * h$, jossa:
 - ρ = veden tiheys 1000 kg/m³
 - g = putoamiskiihtyvyyden kiihtyvyyden vakio 9,81 m/s²
 - h = nostokorkeus

→ Ammoniakkiveden virtauksen tehoksi saatiin $Q_{\text{ammoniakkivesi}} = -15,6$ kW

Savukaasujen tuoma lämpöteho pesuriin oli $Q_{\text{in}} = 11\,091,1$ kW, joka laskettiin luvussa 11.3.

Ammoniakin ja rikkidioksidin reagoiessa muodostuu ammonium sulfiitti keittonestettä reaktioyhtälön 29 mukaisesti.



Reaktiossa vapautunut lämpöteho pesuriin laskettiin kaavan 30 mukaisesti:

$$Q_{\text{reaktiolämpö}} = \dot{n} * \Delta H * 0,7 \quad (30)$$

- $\dot{n} = (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ainemäärä = 33,1 mol/s
 - $\dot{n} = \frac{\dot{m} * 0,52}{M}$, jossa:
 - $\dot{m} * 0,52 =$ keittonesteen massavirta kerrottuna keittonesteen väkevyydellä eli ammoniumsulfiittipitoisuudella, jonka arvo on noin 52 %. Virtausmittaus: FIQ-2427 26,6 m³/h =
7,4 kg/s * 0,52 = 3,8 kg/s
 - M = ammoniumsulfiitin moolimassa (NH₄)₂SO₃ = 0,116 kg/mol, laskennat näkyvät Taulukossa 4

Taulukko 4. Ammoniumsulfiitin moolimassa

	Atomimassa, g/mol	kerroin	g/mol
Typpi, N	14,01	2	28,02
Vety, H	1,008	8	8,064
Rikki, S	32,07	1	32,07
Happi, O	16	3	48
Moolimassa (M), (NH ₄) ₂ O ₃			116,154

- $\Delta H =$ reaktiolämpö = -140,9 kJ/mol, eksoterminen reaktio eli lämpöä vapauttava reaktio, joten lämpötehon laskennassa käytetään positiivista arvoa 140,9 kJ/mol
 - $\Delta H = H(\text{reaktiotuotteet}) - H(\text{lähtöaineet})$

- $H(\text{l\"aht\"oaineet}) = \text{l\"aht\"oaineiden muodostumisentalpioiden summa} = -743,2$, arvot saatiin Valtasen Tekniikan taulukkokirjasta (382-383.)
 - $H(2 \text{ NH}_3) = 2 * (-80,3) \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -160,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
 - $H(\text{SO}_2) = -296 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
 - $H(\text{H}_2\text{O}) = -285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
 - $H(\text{reaktiotuotteet}) = (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ muodostumisentalpia
 $= -884,079 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$, arvo saatiin Weastin teoksesta (D-61.)
 - Kerroin 0,7, tarkoittaa sitä, että vain noin 70 % reaktiossa muuttuu ammoniumsulfiitiksi ja loput 30 % ovat bisulfiitin (HSO_3) tai sulfidin (S) muodossa (Virkola 1983, 511).
- Pesuriin kemiallisesta reaktiosta vapautuvaksi lämpötehoksi saatiin
 $Q_{\text{reaktiolämpö}} = 3\,262,1 \text{ kW}$

Savukaasupesuriin tulevien energioiden määrä kuukaudessa saadaan teho kerrottuna ajalla eli $30 \text{ pv} * 24 \text{ h}$ (ks. Taulukko 5). Energioiden määrät kuukaudessa ovat todellisuudessa Taulukon 4 arvoista poikkeavia, sillä ajotilanteet vaihtelevat. Mittauksia tulisi tehdä vähintään päivittäin, jotta todelliset energian määrät saataisiin selville.

Taulukko 5. Energioiden määrä savukaasupesuriin kuukaudessa

Savukaasupesuriin tulevan energian määrä kuukaudessa	energia, MWh
Hapanlauhde	1 173,5
Sekundäärilauhde	1 240,3
Suihkukaivon vesi	309,1
Vesi 1 lämmönvaihtimelle	4 439,6
Raakavesi 3 lämmönvaihtimelle	438,6
Ammoniakkivesi	-11,2
Kemiallisesta reaktiosta vapautunut lämpö	2 348,7
Savukaasu	7 985,6
yhteensä	17 924,1

10.2 Savukaasupesurista poistuvat energiavirrat

Savukaasupesurista lähteviä virtauksia ovat likainen vesi (\dot{m}_7), lämmin vesi lämmönvaihtimelta 1 (\dot{m}_8), lämmin vesi lämmönvaihtimelta 3 (\dot{m}_9), keittoneste (\dot{m}_{10}) ja savukaasut (Q_{out}). Tässä osiossa laskettiin pesurista lähtevien virtausten lämpötehot. Laskelmat tehtiin mittaustulosten perusteella.

Pesurista lähtevän likaisen veden virtauksen teho laskettiin kaavan 31 mukaisesti.

$$Q_{\text{likainen vesi}} = \dot{m}_7 * h_7 \quad (31)$$

- \dot{m}_7 = massavirta, virtausmittaus FRQ-2435 28,2 m³/h = 7,8 kg/s
- h_7 = veden entalpia = 278,5 kJ/kg, arvoilla:
 - lämpötila $T_6 = 66,5$ °C, lämpötilamittaus TI-2405
 - paine $P_6 = 1,6$ bar, painemittaus PIC-2404

→ Pesurista lähtevän likaisen veden virtauksen tehoksi saatiin

$$Q_{\text{likainen vesi}} = 2 181,6 \text{ kJ/s}$$

Likainen vesi menee jätevedenpuhdistamolle ilman lämmöntalteenottoa, joten kaikki veden mukana lähtevä lämpöenergia menee hukkaan. Tässä olisi yksi vaihtoehto mihin voitaisiin lämmöntalteenotto rakentaa sopivan lämpötilan ja energiavirran puolesta. Ongelmana mahdolliselle lämmöntalteenotolle on veden likaisuus.

Lämmöntalteenottoa harkitessa täytyisi pohtia millainen lämmönvaihdin sopisi kiintoainepitoisuuksia sisältävälle nesteelle.

Pesurin lämmönvaihtimelta 1 lähtevän veden virtauksen teho saatiin kaavan 32 mukaisesti:

$$Q_{\text{vesi 1 lämmönvaihtimelta}} = \dot{m}_8 * h_8 \quad (32)$$

- \dot{m}_8 = massavirta, virtausmittaus: FI-0508 = 63,7 kg/s
- h_8 = veden entalpia = 187,9 kJ/kg, arvoilla:
 - lämpötila $T_8 = 44,8$ °C, lämpötilamittaus TI-2416
 - paineessa $P_8 = 3,8$ bar, painemittaus PI-2438. Painemittaus on ennen lämmönvaihdinta, joten todellinen paine on alempi lämmönvaihtimen jälkeen

→ Lämmönvaihtimelta 1 lähtevän veden virtauksen tehoksi saatiin

$$Q_{\text{vesi lämmönvaihtimelta 1}} = 1\,1969,2 \text{ kW}$$

1 lämmönvaihtimelta lähtevä lämmin vesi menee kartonkitehtaan lämminvesisäiliölle, josta sitä otetaan käyttöön prosessivedeksi. Eli tässä tapauksessa hukkaan meneviä energioita ei ole. Tosin lämminvesisäiliössä on vettä jatkuvasti yli tarpeiden ja ylimääräistä vettä menee kanaaliin ylijooksuna. Eli lopulta ainakin osa 1 lämmönvaihtimella talteen otetusta lämmöstä menee hukkaan.

Pesurin 3 lämmönvaihtimelta lähtevän veden virtauksen teho laskettiin kaavan 33 mukaisesti:

$$Q_{\text{raakavesi 3 lämmönvaihtimelta}} = \dot{m}_9 * h_9 \quad (33)$$

- \dot{m}_9 = massavirta, virtausmittaus: FIQ-2450 86 m³/h = 23,9 kg/s
- h_9 = veden entalpia = 223,3 kJ/kg, arvoilla:
 - lämpötila $T_9 = 53,3$ °C, lämpömittaus TI-2421
 - paineessa $P_9 = 2,6$ bar, painemittaus PI-005. Painemittaus on ennen lämmönvaihdinta, joten todellinen paine hieman alempi lämmönvaihtimen jälkeen.

→ Lämmönvaihtimelta 3 lähtevän veden virtauksen tehoksi saatiin

$$Q_{\text{raakavesi 3 lämmönvaihtimelta}} = 5\,334,4 \text{ kW}$$

3 Lämmönvaihtimelta tuleva lämmin vesi ajetaan suoraan kanaaliin, joten sen lämpöenergia menee kokonaan hukkaan. Tälle hukkaan menevälle lämmölle täytyisi keksiä käyttökohde, jotta lämpö saataisiin hyödynnettyä. Lämmönvaihtimella lämmitettävä vesi on raakavettä joten se olisi puhdistettava käyttökohteen tarpeiden mukaan.

Keittonesteen rikkipitoisuus on noin 52 %. Työtä tehdessä todettiin, että keittonesteen lämmönsiirto-ominaisuuksia voidaan pitää lähellä veden lämmönsiirto-ominaisuuksia. Pesurista lähtevän keittonesteen energiavirta laskettiin kaavan 34 mukaisesti:

$$Q_{\text{keittoneste}} = \dot{m}_{10} * h_{10} \quad (34)$$

- \dot{m}_{10} = massavirta, virtausmittaus: FIQ-2427 26,6 m³/h = 7,4 kg/s
- h_{10} = veden entalpia = 201,4 kJ/kg, arvoilla:
 - lämpötila $T_{10} = 48$ °C, mitattiin infrapunamittarilla
 - paine $P_{10} = 4,5$ bar, virtausmittaus PI-13

→ Keittonesteen virtauksen tehoksi saatiin $Q_{\text{keittoneste}} = 1\,488,1$ kW

Keittonesteen mukana lähtevä lämpöenergia ei mene hukkaan sillä keittoneste menee puoliselän valmistukseen, jossa tarvitaan lämpöenergiaa.

Savukaasuvirtauksen mukana lähtevä lämpöteho pesurista oli $Q_{\text{in}} = 3\,189,1$ kW, joka laskettiin luvussa 11.

Savukaasupesurista lähtevien energioiden määrä kuukaudessa saadaan teho kerrottuna ajalla eli 30pv*24h (ks. Taulukko 6). Energioiden määrät kuukaudessa ovat todellisuudessa Taulukon 6 arvoista poikkeavia, sillä ajotilanteet vaihtelevat. Mittauksia tulisi tehdä vähintään päivittäin, jotta todelliset energian määrät saataisiin selville.

Taulukko 6. Savukaasupesurista lähtevien energioiden määrä kuukaudessa

Savukaasupesurista lähtevän energian määrä kuukaudessa	energia, MWh
Likavesi	1 570,7
Vesi 1 lämmönvaihtimelta	8 617,8
raakavesi 3 lämmönvaihtimelta	3 840,8
Keittoneste	1 071,4
savukaasu	2 296,2
yhteensä	17 924,1

10.3 Savukaasupesurin häviöt

Energiataseessa systeemiin tulevien ja lähtevien energiavirtojen summien täytyisi olla yhtä suuret. Taulukossa 7 nähdään koottuna savukaasupesuriin tulevat ja siitä lähtevät energiavirrat.

Taulukko 7. Savukaasupesuriin tulevat ja lähtevät energiavirrat

Savukaasupesuriin tulevat energiavirrat	teho, kW	Savukaasupesurista lähtevät energiavirrat	teho, kW
Hapanlauhde	1 629,9	Likavesi	2 181,6
Sekundäärilauhde	1 722,6	Vesi 1 lämmönvaihtimelta	11 969,2
Suihkukaivon vesi	429,3	raakavesi 3 lämmönvaihtimelta	5 334,4
Vesi 1 lämmönvaihtimelle	6 166,2	Keittoneste	1 488,1
Raakavesi 3 lämmönvaihtimelle	609,2	savukaasu	3 189,1
Ammoniakkivesi	-15,6		
Kemiallisesta reaktiosta vapautunut lämpöteho	3 262,1		
Savukaasu	11 091,1		
yhteensä	24 894,7	yhteensä	24 169,6

Mittaustulosten perusteella laskettujen tulevien energiavirtojen summa on suurempi kuin lähtevien energiavirtojen summa (732,2 kW). Jokaisessa todellisessa prosessissa

on aina häviöitä ja häviöitä ei yleensä voida mittaustulosten perusteella laskea. Joten 806,1 kilowatin erotuksen oletettiin johtuvan savukaasupesurin häviöistä.

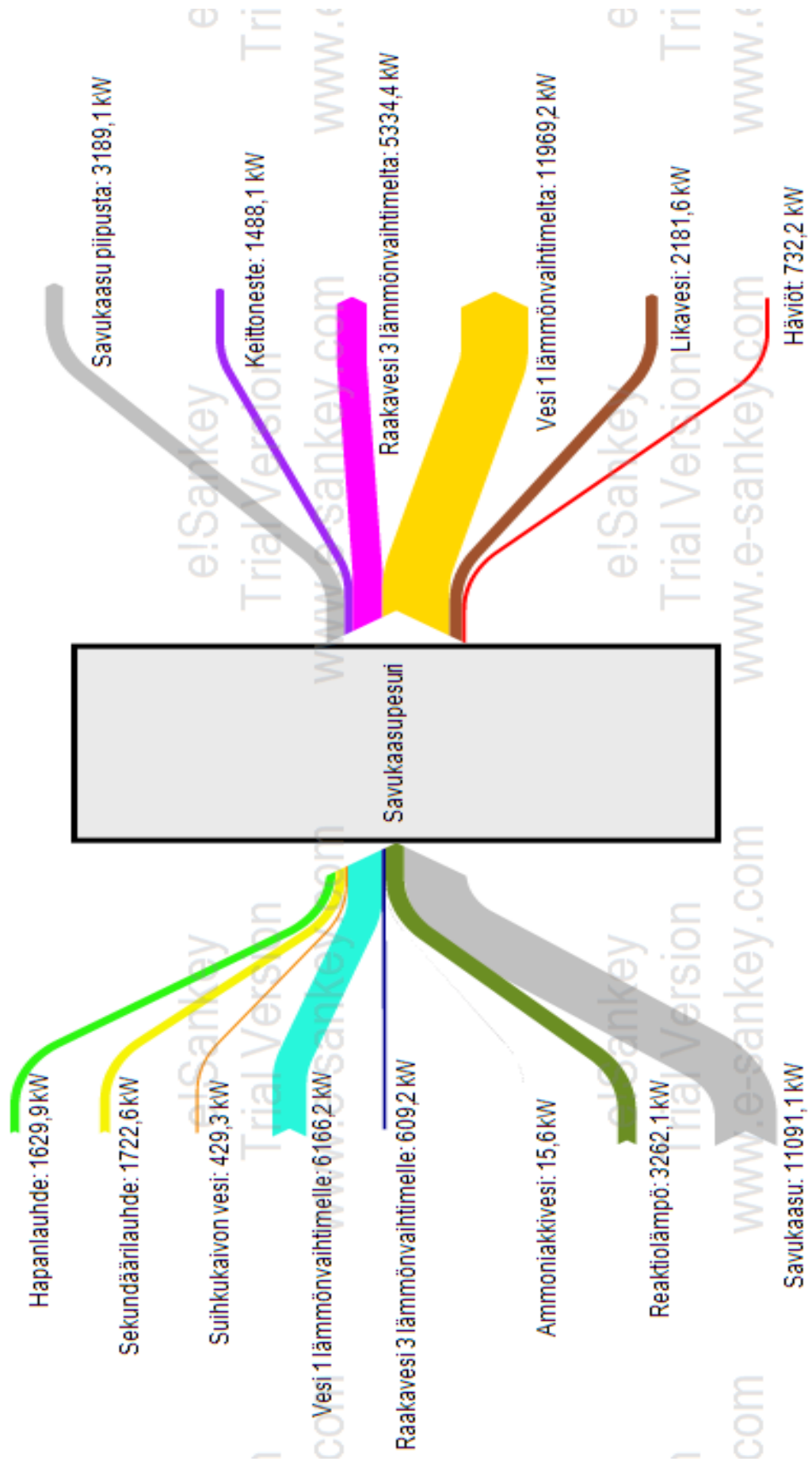
Savukaasupesurin häviöt aiheutuvat suurimmilta osin lämpöhäviöistä. Häviöiden osuus prosentteina on 2,9 joka kuulostaa varsin pieneltä. Todellisuudessa häviöt ovat todennäköisesti suuremmat.

11 Sankey-diagrammi

Sankey-diagrammilla kuvataan prosessien energia- tai materiaalivirtauksia.

Diagrammi muodostuu nuolista jotka kuvaavat virtauksia. Nuolien koko on suhteessa todellisiin virtauksiin. Tämä diagrammityyppi onkin hyvin havainnollistava teollisuuden prosesseissa, sillä siitä selviää nopeallakin katsauksella suurimmat ja merkittävimmät virtaukset. Samasta syystä myös tässä projektissa haluttiin tehdä sankey-diagrammi kuvaamaan savukaasupesurin energiavirtoja (ks. Kuvio 12).

Sankey-diagrammi tehtiin e!Sankey pro –ohjelman kokeiluversiolla. Ohjelmalla saatiin nuolet vastaamaan oikeita mittasuhteita.



Kuvio 12 Sankey-diagrammi savukaasupesurista

12 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Savon Sellun savukaasupesurin lämpövirtoja ja tehdä pesurista energiatase. Energiataseen perusteella oli tarkoituksena saada selville kuinka paljon lämpöenergiaa menee hukkaan ja olisiko mahdollista tehdä savukaasupesurille lisää lämmöntalteenottoja. Tämän lisäksi savukaasupesurin virtausten tehoista tehtiin sankey-diagrammi, joka tehtiin oikeassa mittakaavassa siihen tarkoitettulla ohjelmalla.

Likaisen veden energiavirta ja lämpötila osoittautui sen verran suureksi, että lämmöntalteenotto olisi mahdollinen vaihtoehto. Likaisesta vedestä lämmöntalteenottamisessa voi olla kuitenkin ongelmansa, sillä kaikki lämmönvaihtimet eivät kestä suuria kiintoainepitoisuuksia. Likaisen veden lisäksi lämpöä menee suuri määrä hukkaan savukaasupesurin 3 lämmönvaihtimelta. Lämpimälle vedelle täytyisi vain keksiä käyttötarkoitus ja pohtia voitaisiinko vettä käyttää johonkin sellaisenaan vai tarvitseeko sitä puhdistaa sillä vesi on raakavettä. Tärkeää kuitenkin oli saada selvitettyä hukkaan menevän energian määrä, joka antaa alun pohdinnalle mitä tuolla energialla voitaisiin jatkossa tehdä.

Jatkossa voitaisiin myös pohtia alemman absorptiokierron lämmöntalteenoton mahdollisuutta, kuten asiasta luvussa 10 mainittiin. Savukaasupesurin toimintaan täytyisi perehtyä entistä perusteellisemmin ja selvittää mahdollisen lämmöntalteenoton vaikutukset rikin talteenotolle pesurissa. Rikin talteenotto on kuitenkin pesurin päätehtävä, joka ei saa kärsiä tällaisten toimenpiteiden vuoksi. Lisäksi myöhemmin kannattaa tutkia olemassa olevien lämmönvaihtimien toimintaa. Voitaisiin pohtia ovatko ne riittävän suuret, jotta kaikki tarjolla oleva lämpö saadaan jäähdytysosasta talteen.

Ongelmana tutkielmassa oli savukaasupesurin mittausten eriaikaisuus. Jotta pystyttiin selvittämään savukaasujen osuus pesurin energiavirroista, oli käytettävä päästömittausraporttia joka tehtiin 2015 syksyllä. Loput mittaukset otettiin tutkielmaa tehdessä kuluvan kevään aikana. Mittausten eriaikaisuus toi todennäköisesti jonkin suuruisia virheitä laskelmiin ja voivat osin selittää laskelmien

mukaan saadut varsin vähäiset häviöt (noin 3 %). Tärkeämmässä osassa kuitenkin oli selvittää vesien mukana hukkaan menevät energian määrät, jotka saatiin selvitettyä mielestäni varsin todenmukaisesti olemassa olevien mittausten perusteella. Lisäksi jos työtä olisi voitu verrata vastaavan laiseen tutkielmaan, olisi todennäköisesti selvinnyt paremmin voivatko tulokset pitää paikkaansa. Vertaaminen ei kuitenkaan ollut mahdollista, koska vastaavanlaisia pesureita ei esimerkiksi Suomesta löydy, kuten työssä aiemmin kävikin ilmi. Maailmalla ilmeisesti joku samanlainen savukaasupesuri on, mutta tarkempaa tietoa en asiasta löytänyt.

Tulosten perusteella, kun tiedetään hukkaan menevien energioiden määrä, voidaan jatkossa alkaa pohtimaan teknisiltä osin miten hukkaan menevää lämpöä voitaisiin ottaa talteen ja mihin sitä voitaisiin käyttää. Lisäksi täytyisi myös miettiä miten kannattavaa se lopulta olisi.

Lähteet

Brogan, R.J. 2011. Lämmönvaihtimet. Thermopedia. Viitattu 5.4.2016

<http://www.thermopedia.com/content/832/>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004.

Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita Prima

Jaakkola, P. 2014. Termodynamiikan perusteet. Viitattu 1.3.2016.

<file:///C:/Users/Soile/Documents/koulujustkat/Opinn%C3%A4ytety%C3%B6/termodynamiikka.pdf>

Järvenreuna, J. & Nummila, M. N.d. Nykyaikainen savukaasupesuri. Caligo. Viitattu

18.1.2016. http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

Kalsi, L. 2015. Reaktiolämpö. Otavan opisto. Viitattu 12.4.2016.

http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/ke/ke3/5_lampokemia_ja_energian_muutokset/5.2_reaktiolampo?C:D=hNk7.hmVe&m:selres=hNk7.hmVe

Kontu, J. & Haimi, K. 2014. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva. Viitattu

12.1.2016. http://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

Kothandaraman, C. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3 uudistettu

painos. Verkkokirja. Viitattu 5.4.2016. New Delhi: New Age International

Lampinen, M. 2010. Termodynamiikan perusteet. Hakapaino Helsinki: Otatieto

Levylämmönsiirrin. 2012. Alfa Laval. Viitattu. 5.4.2016

<https://www.offshoreenergytoday.com/alfa-laval-to-supply-plate-heat-exchangers-for-brazilian-offshore-plaforms/>

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WSOY

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2 uudistettu painos. Vantaa:

Opetushallitus

Valtanen, E. 2012. Tekniikan taulukkokirja. 19 uudistettu painos. Mikkeli: Genesis-

Kirjat

Virkola, N-E. 1983. Puumassan valmistus Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja II osa I. 2 uudistettu painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien yhdistys

Wang, L. Sunden, B & Manglik R.M. 2007. Plate heat exchangers: desing, applications and performance. Verkkokirja. Viitattu 5.4.2016. Southampton: WIT Press

Weast, C. 1972. Handbook of Chemistr and Physics. 52 uudistettu painos. Cleveland: The Chemical rubber

Liite 2 Päästömittausraportti



POWERFLUTE OY, SAVON SELLU, VOIMALAITOS

PÄÄKATTILAN SAVUKAASUPÄÄSTÖMITTAUKSET 28.-1.10.2015

MITTAUSPAIKKA		ENNEN PESURIA	PESURIN JÄLKEEN
		30.9.2015 15:00 - 16:00	28. - 29.9.2015 12:35 - 12:35
Höyryn kehitys (FR 751)	t/h	112	111
Savukaasun tilavuusvirta (kuiva, NTP)	m ³ n/s	40	40
Savukaasun tilavuusvirta (kuiva, NTP)	m³n/h	144 000	144 000
Savukaasun tilavuusvirta (tositol.)	m ³ /s	80	56
Savukaasun tilavuusvirta (tositol.)	m ³ /h	288 000	201 600
Savukaasun tilavuusvirta (tositol.)	kg/s	63	59
Savukaasun kosteus	%	22	14
Savukaasun lämpötila	°C	152	53
Ilmakerroin		1,38	1,46

Savukaasun pitoisuudet keskimäärin (kuivassa savukaasussa)

O ₂ *	%	5,8	6,6
CO ₂ *	%	12,9	12,2
CO *	%	0,01	0,01
CO	ppm	96	100
CO	mg/m ³ n	120	124
CO redus. O ₂ -pit. 6 %	mg/m ³ n	119	130
CO massavirta	g/s	5	5
CO massavirta	kg/h	17	18

SO ₂ *	ppm	5 230	32
SO ₂	mg/m ³ n	15 303	93
SO ₂ redus. O ₂ -pit. 6 %	mg/m ³ n	15 103	97
SO ₂ massavirta	g/s	608	3,7
SO₂ massavirta	kg/h	2 190	13,4
SO ₂ massavirta ^a	g(S)/s	304	1,9
SO₂ massavirta^a	kg(S)/h	1 096	6,7

Pitoisuus ylläällä alkuperäisessä laeissa - ei ole alkuperäisiä

^{a)} laskettu alkuainerikkinä

NO _x *	ppm	159	191
NO _x ^b	mg/m ³ n	326	391
NO _x redus. O ₂ -pit. 6 % ^b	mg/m ³ n	322	408
NO _x massavirta ^b	g/s	13,0	15,7
NO_x massavirta^b	kg/h	46,6	56,4

^{b)} laskettu NO₂:na

		28.5.2015 klo 12:55-15:55	
N ₂ O	ppm	-	16
N ₂ O	mg/m ³ n		32
N ₂ O redus. O ₂ -pit. 6 %	mg/m ³ n		33
N ₂ O-päästö	g/s		1,3
N₂O-massavirta	kg/h		4,6

		30.9.2015 klo 14:45-16:50	28.9. klo 12:30-14:45
NH ₃	mg/m ³ n	1	23
(Näytteenottojaksojen pitoisuudet)	mg/m ³ n	(1 / 2)	(15 / 33)
NH ₃ redus. O ₂ -pit. 6 %	mg/m ³ n	1	26
NH ₃ massavirta	g/s	0,1	0,9
NH₃ massavirta	kg/h	0,2	3,4

**Liite 3 Kaasujen ominaislämpökapasiteetteja (Huhtinen ym.
2004. 98)**

t °C	H ₂	N ₂	O ₂	CO	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	ilma
0	14,25	1,039	0,914	1,041	1,855	0,819	0,607	1,005
100	14,36	1,043	0,925	1,043	1,867	0,871	0,637	1,009
200	14,44	1,047	0,934	1,047	1,888	0,917	0,663	1,013
300	14,48	1,051	0,950	1,055	1,909	0,959	0,687	1,022
400	14,50	1,059	0,967	1,063	1,939	0,988	0,707	1,030
500	14,52	1,068	0,980	1,076	1,968	1,022	0,724	1,043
600	14,56	1,076	0,992	1,089	1,997	1,051	0,740	1,051
700	14,60	1,084	1,005	1,097	2,031	1,072	0,753	1,059
800	14,67	1,097	1,017	1,110	2,064	1,093	0,765	1,072
900	14,73	1,110	1,026	1,122	2,102	1,114	0,776	1,084
1000	14,79	1,120	1,038	1,130	2,131	1,130	0,784	1,093
1100	14,85	1,130	1,043	1,143	2,165	1,147	0,791	1,101
1200	14,96	1,139	1,051	1,151	2,194	1,160	0,798	1,110
1300	15,04	1,147	1,059	1,160	2,227	1,172	0,804	1,118
1400	15,12	1,156	1,068	1,168	2,257	1,185	0,810	1,126
1500	15,21	1,164	1,072	1,172	2,286	1,193	0,815	1,135
1600	15,29	1,168	1,080	1,181	2,315	1,206	0,820	1,139
1700	15,37	1,177	1,084	1,185	2,345	1,214	0,832	1,143
1800	15,48	1,181	1,087	1,193	2,370	1,223	0,829	1,151
1900	15,56	1,186	1,094	1,198	2,412	1,233	0,834	1,155
2000	15,65	1,192	1,099	1,204	2,437	1,241	0,837	1,162
2100	15,74	1,197	1,103	1,209	2,461	1,249	0,842	1,167
2200	15,82	1,202	1,109	1,214	2,485	1,256	0,845	1,172
2300	15,91	1,207	1,114	1,218	2,508	1,263	0,848	1,176
2400	15,99	1,211	1,118	1,222	2,530	1,269	0,852	1,176