

Palamisilmankostuttimen ja lämpöpumppujen vertailu liitettynä savukaasupesuriin

Matti Piekkari

Opinnäytetyö

Joulukuu 2020

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Piekkari, Matti	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2020
	Sivumäärä 34	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Palamisilmankostuttimen ja lämpöpumppujen vertailu liitettynä savukaasupesuriin		
Tutkinto-ohjelma Insinööri(AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen, Jouni Jurvelin		
Toimeksiantaja(t) Elenia Lämpö Oy		
Tiivistelmä <p>Energiantuotannon varmistaminen ja taloudellinen kannattavuus ovat energiayhtiölle tärkeimpiä kriteerejä, kun tehdään päätöksiä uusista investoinneista. Nykyaikana ympäristöystävällisyys ja sitä kautta myös energiantuotannon hyötysuhde ja tuotantoon käytettävät polttoaineet ovat nousseet merkittäviksi tekijöiksi eri investointikohteita vertailtaessa. Myös uudet teknologiat ja sovellukset nähdään energiayhtiöissä mielenkiintoisina investointikohteina, jos niillä saadaan taloudellisesti parannettua hyötysuhdetta ja sitä kautta parannettua energiantuotannon ympäristöystävällisyyttä sekä leikattua polttoainekustannuksia.</p> <p>Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla lämpöpumppuja ja palamisilman kostutinta liitettynä savukaasupesuriin. Tavoitteena oli muodostaa laskelmat, joiden avulla pystytään vertailemaan näiden kahden sovelluksen kannattavuutta Vanajan voimalaitoksella ja hankittavan K6-kattilan savukaasupesurissa. Voimalaitoksella on ollut nykyisellä K5-kattilalla ongelmana, että ajoittain korkeasta kaukolämmön paluveden lämpötilasta johtuen savukaasupesurista ei saada kaikkea potentiaalia hyödynnettyä. Opinnäytetyössä tutkittavilla sovelluksilla uskotaan ehkäistävän vastaava ongelma tulevassa K6-kattilan savukaasupesurissa.</p> <p>Työ toteutettiin luomalla molempien pesuriversioiden tehoa kuvaavat kaavat ja sijoittamalla ne Hämeenlinnan kaukolämpöverkon lämmitystä kuvaavaan ajomalliin. Tuloksena opinnäytetyöstä saatiin suuntaa antavat laskelmat, joita voitiin käyttää apuna rakenteilla olevan K6-kattilan pesuritekniikan valinnassa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Savukaasupesuri, lämpöpumppu, palamisilmankostutin		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet) Liitteet 1, 2, 3, 4, 5 ja 6 ovat salassa pidettäviä, jotka on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste Julkisuuslain 621/1999 24§:n kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta. Salassapito päättyy 10.12.2030.		

Author(s) Piekkari Matti	Type of publication Bachelor's thesis	Date December 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 34	Permission for web publication: X
Title of publication Comparison between a heat pump and a combustion air humidifier connected to the flue gas scrubber		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Kari Hytönen, Jouni Jurvelin		
Assigned by Elenia Lämpö Oy		
Abstract <p>Ensuring the energy production, as well as economic viability are the main criterion when energy company is considering new investments. Nowadays, environmental friendliness, efficiency of energy production and fuels used in production have become significant factor when comparing potential investments. Energy companies see new and innovative technologies as attractive investment if they achieve savings by reducing the emissions and by cutting the fuel costs.</p> <p>The purpose of the thesis was to compare the flue gas scrubber with a heat pump and the flue gas scrubber with a combustion air humidifier. The aim was to make comparative calculations of these two solutions and to compare the viability of these solutions at Vanaja powerplant with new K6-boiler. At the powerplant there have been problems with too high temperature of the returning water of the district heating network. Too high temperature cause power loss on K5-scrubber and both solutions are assumed to prevent the problem on the new K6-scrubber.</p> <p>The calculations were made by creating a formula to simulate the heat produced by a scrubber on each case. These formulas were placed in simulation of heat production on district heating network of Hämeenlinna. The result of the thesis were calculations to support decision making when choosing scrubber technology for K6-boiler.</p>		
Keywords/tags (subjects) Combustion air humidifier, heat pump, flue gas scrubber		
Miscellaneous (Confidential information) Appendixes 1, 2, 3, 4, 5 and 6 are confidential and have been removed from the public thesis. Grounds for secrecy: Act on the Openness of Government Activities 621/1999, Section 24, 17: business or professional secret. The holding period lasts ten (10) years, the secrecy expires on 10.12.2030.		

Sisältö

1	Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet	3
1.1	Toimeksiantaja	3
1.2	Tavoitteet	4
2	Savukaasupesurin tarkoitus ja toiminta	6
2.1	Perinteinen savukaasupesuri	6
2.2	Lämpöpumppu savukaasupesurissa.....	11
2.3	Palamisilmankostutin	13
3	Työn toteutus	14
3.1	Lämpöpumppusovelluksen lähtötiedot	15
3.2	Palamisilmankostutinsovelluksen lähtötiedot	16
3.3	Laskelmat.....	16
4	Tulokset	17
4.1	Jatkolaskelmat	21
5	Pohdinta.....	22
	Lähteet	25
	Liitteet	26
	Liite 1. PI-kaavio K5-kattilan pesurin kytkennästä K6-kattilan pesurin lämpöpumppuihin	26
	Liite 2. Lämpöpumppu sovelluksen simuloidut arvot.....	27
	Liite 3. Palamisilmankostutin sovelluksen simuloidut arvot.....	28
	Liite 4. Kertoimien laaskentataulukko	29
	Liite 5. Laskelmien tulokset.....	30
	Liite 6. Kannattavuuslaskenta	31

Kuviot

Kuvio 1. Perinteinen märkäpesuri	7
Kuvio 2. Savukaasun luovuttama teho savukaasun lämpötilan funktiona	8
Kuvio 3. Putkipesurin havainnekuva	9
Kuvio 4. Perinteinen savukaasupesuri lämmöntalteenotolla	10
Kuvio 5. Esimerkki kaksivaiheisesta savukaasupesurista	10
Kuvio 6. Lämpöpumppu-savukaasupesuri	11
Kuvio 7. Esimerkki lämpöpumpun kytkennästä lämpöpumppuun	12
Kuvio 8. Esimerkki palamisilmankostuttimen kytkennästä	13
Kuvio 9. Perinteisen savukaasupesurin ja palamisilman kostuttimella varustetun pesurin suhteellinen teho kaukolämmön paluulämpötilan funktiona.	14
Kuvio 10. Käytetty polttoaine Vanajan voimalaitoksella kuukausittain	18
Kuvio 11. Käytetty polttoaine huippukuormalaitoksilla	19
Kuvio 12. Hämeenlinnan kaukolämmöntuotannon päästökauppaan kuuluvat hiilidioksidipäästöt	20
Kuvio 13. Omakäytösähkö Vanajan voimalaitoksella	21

Taulukot

Taulukko 1. Eri pölynerotusmenetelmien erotusasteet	6
---	---

1 Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Elenia Lämpö Oy. Elenia Lämpö Oy:n Vanajan voimalaitoksella on käynnissä investointihanke vanhan voimalaitoskattilan korvaamiseksi. Hankkeen myötä myös savukaasunpuhdistusjärjestelmä uusitaan. Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla palamisilman kustutinta ja lämpöpumppuja liitettynä savukaasupesuriin.

1.1 Toimeksiantaja

Elenia Lämpö Oy on osa Elenia-konsernia, johon kuuluu sen lisäksi sähköverkkoyhtiö Elenia Oy, energia- alan asiakaspalveluun erikoistunut Elenia Palvelut Oy ja rahoitusyhtiö Elenia Finance Oyj. Elenia Lämpö Oy:n toimialaa on kaukolämmön ja sähkön tuottaminen sekä kaukolämmön ja kaasun myynti ja jakelu. Elenia Lämpö Oy toimii Hämeessä, Keski-Suomessa, Pohjois-Pohjanmaalla ja Heinolassa. (Elenia Lämpö esittelykalvot 2019.)

Elenia-konsernin pääkonttori sijaitsee Tampereella. Vuonna 2018 konsernin liikevaihto oli 349,7 miljoonaa euroa ja työntekijöitä oli yhteensä 360 henkeä. Asiakkaita Elenialla on konsernitasolla noin 425 000. Elenia Lämpö Oy:n liikevaihto vuonna 2018 oli 77 miljoonaa euroa, pääkonttori sijaitsee Hämeenlinnassa ja suurin tuotantolaitos on Vanajan voimalaitos Hämeenlinnassa. Henkilöstöä oli 82 ja kokonaismyynti oli 1,1 TWh. Asiakassopimuksia Elenia Lämpö Oy:llä oli noin 5000, joka tarkoittaa noin 85 000 loppukäyttäjää. (Elenia Lämpö esittelykalvot 2019.)

Työn kirjoittamisen aikana vuoden 2019 lopulla Elenia Lämpö Oy irroitettiin Elenia-konsernista ja myytiin. Yritys jatkaa toimintaansa nimellä Loimua Oy. (Elenia Lämpö on nyt Loimua 2019.)

Vanajan voimalaitoksella on 50 MW:n ja 58 MW:n leijupetikattilat. Kattiloista uudempi 58 MW:n K5 on käyttöön otettu vuonna 2009 ja vanhempi 50 MW:n K4 on

alun perin hiilenpolttoon tarkoitettu arinakattila vuodelta 1952, mutta se on modifioitu leijupetikattilaksi vuonna 1997. Uudemmassa K5 kattilassa on myös savukaasupesuri, josta saadaan lisätehoa parhaimmillaan noin 10 MW. Voimalaitoksella on lisäksi sähköteholtaan 40 MW:n kaasuturbiini vuodelta 1988 ja sen yhteydessä 65 MW:n pakokaasukattila, 20 MW:n höyryturbiini vuodelta 1952, joka on muutettu lauhdekäytöstä vastapainekäyttöön vuonna 1982 sekä 10000 m³ kaukolämpöakku. Kaasuturbiinia ja pakokaasukattilaa käytetään lähinnä varavoimana korvaamaan leijupetikattiloita häiriö- tai vikaantumistilanteessa. (Elenia Lämmön laitokset Hämeen alueella 2014.)

Meneillään olevan investointiprojektin aikana Vanajan voimalaitokselle hankitaan uusi kuumavesikattila K6, jonka polttoaineteho tulee olemaan 39 MW. Uusi K6-kattila tulee korvaamaan vanhan K4-kattilan.

1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla palamisilman kostutinta ja lämpöpumppuja liitettynä savukaasupesuriin. Työn tavoitteena oli muodostaa arvio molempien savukaasupesurityyppien vaikutuksesta kaukolämmön tuotantoon. Työn tulokseksi haluttiin mahdollisimman realistiset laskelmat vaikutuksesta polttoaineen kulutukseen Hämeenlinnan kaukolämpöverkon lämmityksessä. Laskelmissa tuli kohdentaa vaikutukset eri polttoaineille. Lisäksi tavoitteena oli muodostaa alustavat kannattavuuslaskelmat investoinnille.

Tavoitteena oli arvioida pesuriversioiden vaikutusta tuotantoon lisäämällä pesurien tuottamaa lämpöä kuvaavat kaavat referenssivuodesta tehtyyn ajomalliin. Ajomalliin on mallinnettu tuntitasolla millä tehoilla tulevaa K6-kattilaa ja vanhaa K5-kattilaa ajettaisiin ja kuinka paljon lämpöä tarvitsee tuottaa näiden lisäksi huippukuormalaitoksilla. Laskelmissa oli tarkoitus ottaa huomioon myös referenssivuoden todelliset kaukolämmön paluuedenlämpötilat sekä polttoaineen kosteus. Nämä ovat merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttavat pesurista saatuun energiaan nykyisellä K5 kattilan savukaasupesurilla.

Sijoittamalla savukaasupesureista saatavaa tehoa kuvaavat kaavat referenssivuodesta muodostettuun ajomalliin, pyrittiin saamaan käsitys, kuinka paljon kukin pesuriversio vähentää minkäkin polttoaineen tarvetta. Tämän tiedon avulla voidaan kohdentaa savukaasupesurilla tuotettu energiamäärä säästökseen eri polttoaineille ja voidaan laskea taloudellisen hyödyt paremmin, kuin pelkän tuotetun energiamäärän perusteella.

Jos pesuri tuottaa täydellä kattilateholla ja korkean kaukolämmön paluuedenlämpötilan tilanteessa hyvin lisäenergiaa, sen avulla voidaan vähentää huippukuormalaitoksilla tuotetun lämmön määrää, joka tuotetaan kaasulla ja öljyllä. Jos taas pesuri tuottaa hyvin lisäenergiaa kattilan käydessä vajaalla teholla ja sakkaa korkeimman tehontarpeen tilanteessa, saatu lisäenergia vähentää biopolttoaineen käyttöä, joka ei ole taloudellisesti niin merkittävä hyöty kuin kaasun ja öljyn käytön vähentäminen. Jos havaitaan pesurisolujen välillä suuria eroja tuotetussa energiassa huipputeholla ja korkeilla kaukolämmön paluueden lämpötiloilla, muodostuu siitä merkittävä tekijä vertailtaessa eri pesuriversioiden taloudellista kannattavuutta.

Kaasun ja öljyn käytön vähentämisen taloudellista merkitystä nostaa hiilidioksidipäästöt ja niihin liittyvä päästökauppa. Jokaisella yli 20 MW:n lämpötehon laitoksella ja samassa kaukolämpöverkossa olevilla pienemmillä laitoksilla tulee olla päästölupa ja ne kuuluvat päästökaupan piiriin. Päästökaupassa mukana oleville toimijoille jaetaan tietty määrä ilmaisia päästöoikeuksia ja syntyneiden päästöjen mukaan päästölupia voi ostaa lisää tai myydä ylimääräiset luvat huutokaupalla. Näin ollen jokaisella säästetyllä hiilidioksiditonilla on myös taloudellinen merkitys. (Energiavirasto n.d.)

2 Savukaasupesurin tarkoitus ja toiminta

2.1 Perinteinen savukaasupesuri

Savukaasupesuri on alkujaan kehitetty vähentämään hiukkaspäästöjä. Taulukossa 1 esitetään eri pölynerotusmenetelmien erotusasteet ja huomataan, että savukaasupesurilla erotusaste on verrattain korkea. Savukaasupesurien kehittymisen myötä, savukaasupesurin hyötynä on myös savukaasujen hukkalämmön talteenotto. Nykyään hukkalämmön talteenotto ja sitä kautta laitoksen hyötysuhteen parantaminen on usein tärkeä syy savukaasupesurin hankkimiselle. Savukaasupesuri on kuitenkin edelleen taloudellinen tapa suodattaa hiukkaspäästöjä. (Järvenreuna & Nummila n.d.)

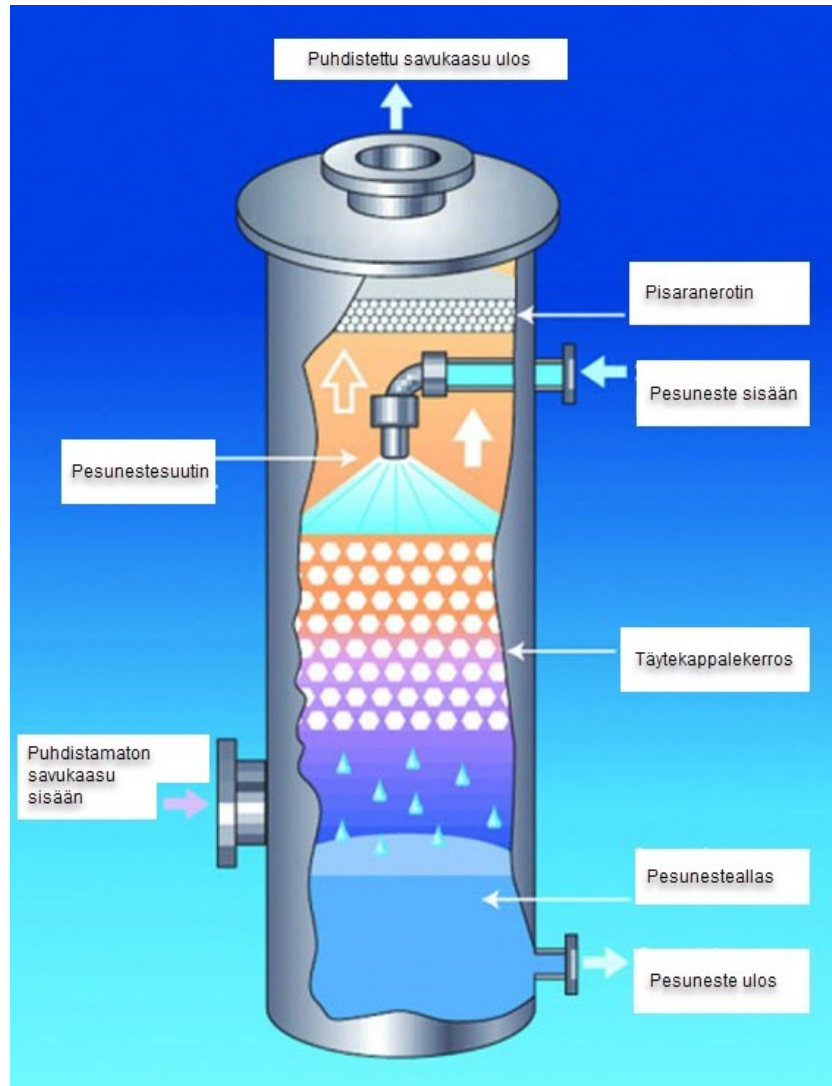
Taulukko 1. Eri pölynerotusmenetelmien erotusasteet (Huhtinen ym. 2004, 256)

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 %

Tyypillisesti pesurissa savukaasuista erottuvat epäpuhtaudet ovat rikkidioksidi, vetykloridi, hiukkaset sekä raskasmetallit. Myös typenoksideja voidaan vähentää pesurilla, mutta se ei ole kovin yleistä. Pesurin erotusastetta savukaasujen epäpuhtauksille hallitaan pesunesteen pH:ta säätämällä. Säätöön käytettävä kemikaali on tyypillisesti natriumhydroksidia. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016, 2)

Perinteisessä savukaasupesurissa savukaasut johdetaan pesutornin alaosaan ja pesuneste suihkutetaan tornin yläosasta. Tällöin pesuneste virtaa savukaasuihin nähden vastavirtaan. Savukaasupesurissa voi olla myös täytekappalekerros lisäämässä savukaasujen ja pesunesteen kontaktipinta-alaa (Ks. Kuvio 1.). Pesurissa savukaasusta

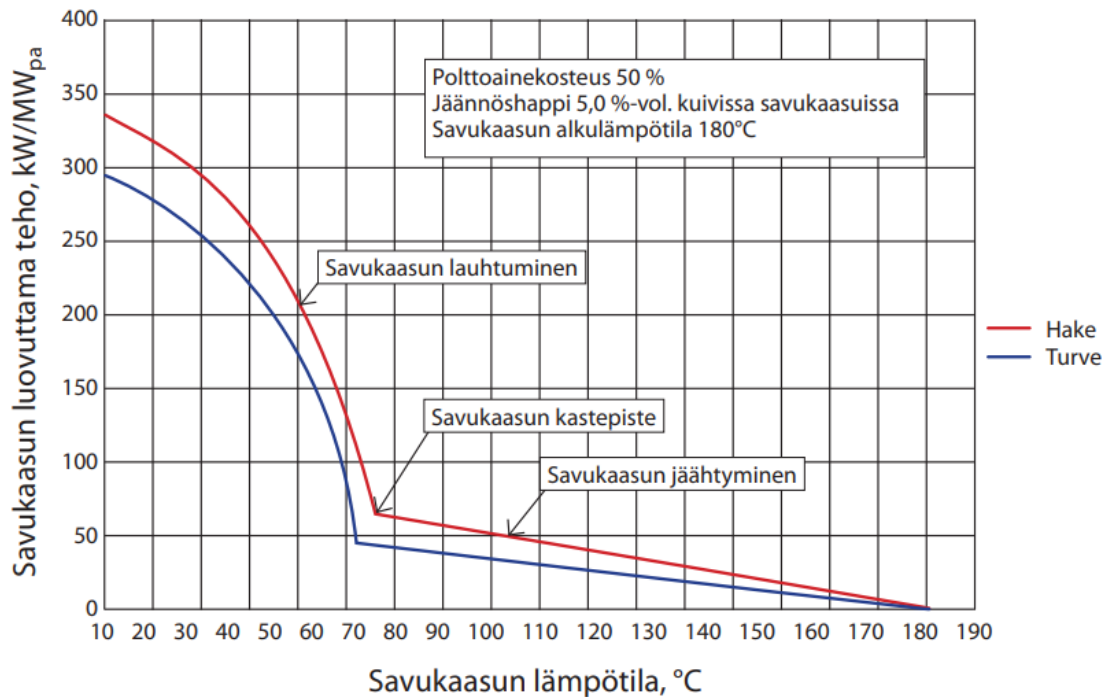
erottuneet epäpuhtaudet kerääntyvät pesunesteen mukana pesuritornin pohjalle pesunestealtaaseen, jonka pohjalta liete johdetaan jätevedenkäsittelyyn. Pesurin pohjalta tulee poistaa jätevettä, jotta se ei tuki pesunesteen kiertoa. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016, 2)



Kuvio 1. Perinteinen märkäpesuri (Air pollution control n.d.)

Savukaasupesurissa voi olla myös lämmöntalteenotto. Tällöin pesunesteet johdetaan pesutornin alaosasta lämmönvaihtimelle, jonka toisella puolella virtaa lämmitettävä neste, usein kaukolämpövesi. Lämmöntalteenotollisessa pesurissa tavoitteena on saada savukaasuissa oleva vesihöyry tiivistymään. Vesihöyryjen lauhtumisesta saatu

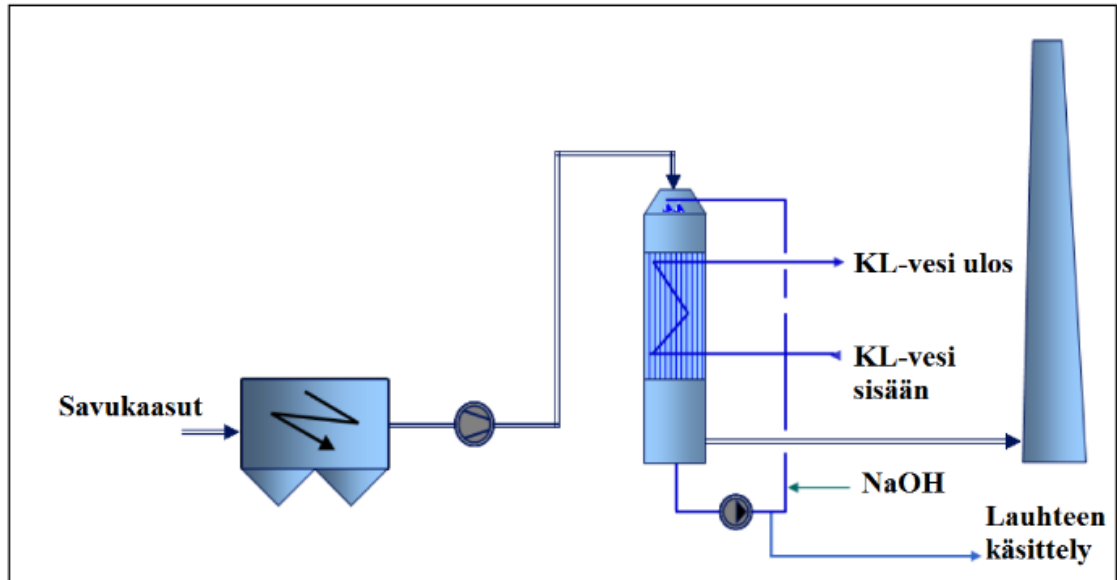
lämpö on huomattavasti suurempi kuin pelkästä savukaasujen jäädyttämisestä saatava lämpö. Kuvio 2 nähdään savukaasun kastepisteen saavuttamisen merkitys savukaasujen luovuttamaan tehoon. Jos pesurissa jäähdään huomattavasti savukaasujen kastepistettä korkeampiin lämpötiloihin, alkaa pesuri toimia lauhduttimena ja lisävettä höyrystyy savukaasuihin. Tämä romahduttaa pesurin lämmöntalteenottokyvyn. (Järvenreuna & Nummila n.d.)



Kuvio 2. Savukaasun luovuttama teho savukaasun lämpötilan funktiona (Järvenreuna & Nummila n.d.)

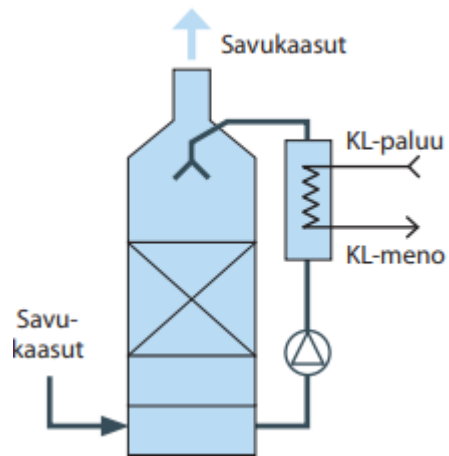
Lämmöntalteenotollisessa pesurissa savukaasuista lauhtuva vesihöyry lisää vesimäärää pesurin pesunestekierrossa. Tämän takia lämmöntalteenotolla varustetusta pesurista tulee poistaa likaista lauhdetta pesunestealtaan pohjalta enemmän kuin ilman lämmöntalteenottoa olevasta pesurista ja pesurin tuottaman jäteveden määrä kasvaa. (Energiateollisuuden ympäristöpooli 2016, 2)

Lämmöntalteenotollinen savukaasupesuri voi olla myös putkipesuri (Ks. Kuvio 3). Putkipesurissa savukaasut kulkevat putkien läpi ja vaippapuolella on lämmitettävä neste. Putkipesurissa lämpö saadaan savukaasuista suoraan lämmitettävään nesteeseen ilman välivaiheita ja erillisiä lämmönvaihtimia. (Rissanen 2016, 15)

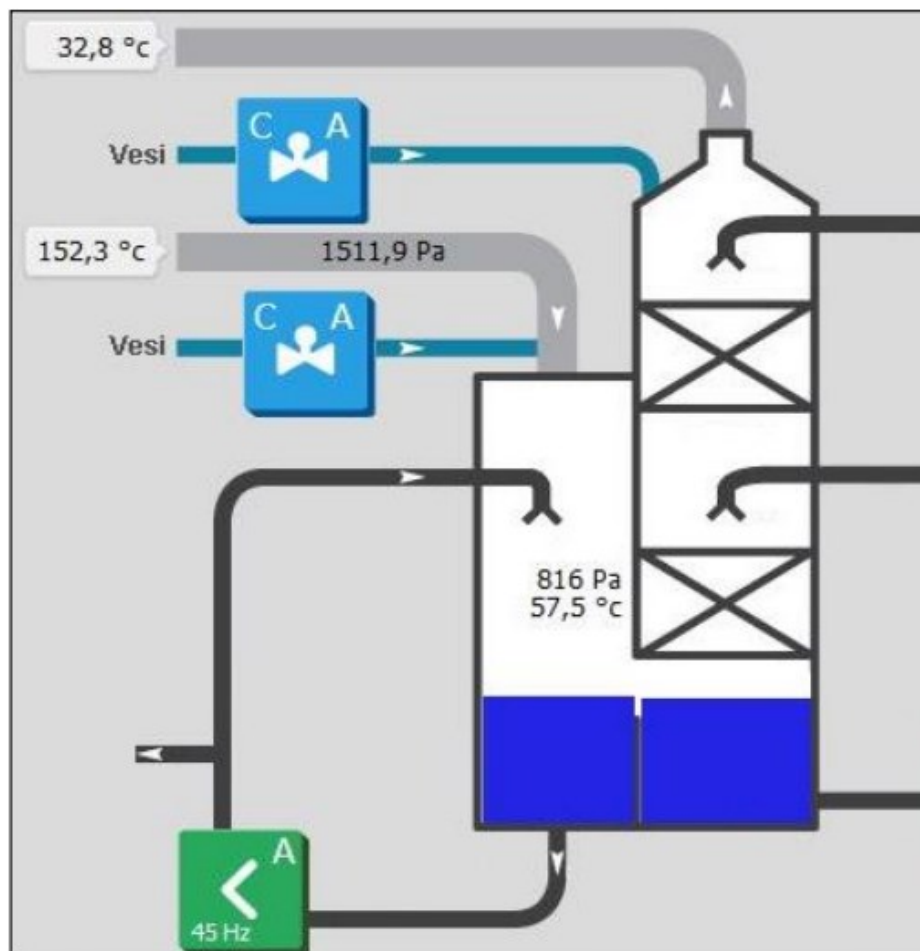


Kuvio 3. Putkipesurin havainnekuva Kuvio lainattu Ville-Matti Rissanen diplomyöstä. (Valmet 2015)

Kuviossa 4 esitetty pesuri on yksivaiheinen yhdellä täytekappalekerroksella varustettu pesuri. Yksivaiheisessa pesurissa ongelmana on savukaasuista erotetun lian kertyminen lämmönvaihtimeen. Lian kertyminen vaihtimeen heikentää lämmönsiirtokykyä ja virtausta lämmönvaihtimessa. Tähän ongelmaan on kehitetty ratkaisuksi kaksivaiheinen savukaasupesuri, jossa pesuvaihe ja lämmöntalteenottovaihe on eroteltu. Kuviossa 5 on esimerkki kaksivaiheisesta pesurista. Esimerkissä pesuvaihe on vasemmalla ja lämmöntalteenottovaihe oikealla. Pesurin pesuvaiheessa pesunestettä suihkutetaan savukaasuihin joko myötä- tai vastavirtaan. Pesuvaiheessa ei ole täytekappalekerroksia. Pesuvaiheen altaan pohjalle kertyy kiintoainetta, joka johdetaan lietteenkäsittelyyn ja pesuvaiheen altaan yläosan puhtaampi neste valuu lämmöntalteenottovaiheen puolelle. (Rissanen 2016, 17)



Kuvio 4. Perinteinen savukaasupesuri lämmöntalteenotolla (Järvenreuna & Nummila n.d.)

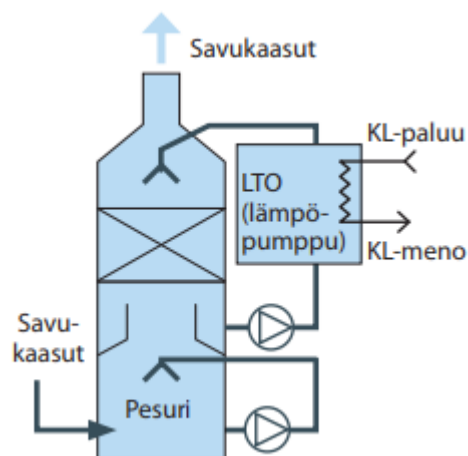


Kuvio 5. Esimerkki kaksivaiheisesta savukaasupesurista (Rissanen 2016, 17)

2.2 Lämpöpumppu savukaasupesurissa

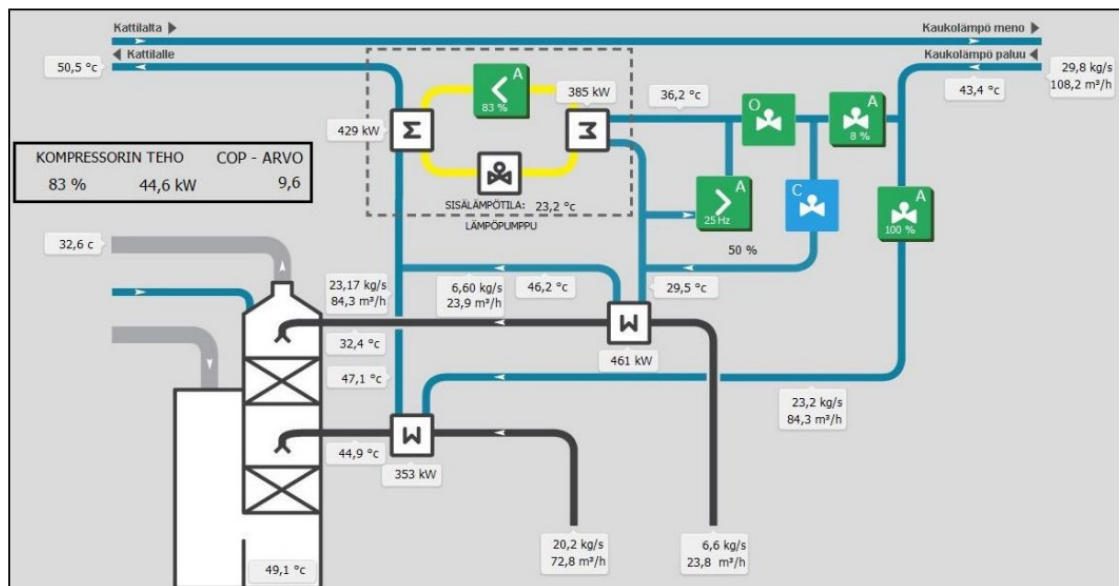
Perinteisissä savukaasupesureissa on ongelmana tehon tippuminen kaukolämpöverkon paluulämpötilan ollessa korkea. Korkea paluuveden lämpötila johtuu muun muassa asiakaspään heikoista lämmönvaihtimista ja korostuu varsinkin talvella lämmöntarpeen ollessa huipussaan. Huippukuorman aikaan voimalaitoksilla pyritään myös käyttämään laadukasta ja kuivaa polttoainetta. Kuiva polttoaine laskee savukaasujen kastepistelämpötilaa ja vesihöyryn tiivistymiseen vaadittaisiin alhaisempaa lämpötilaa. Tästä aiheutuu, että pesuvesi ei jäähdy tarpeeksi savukaasupesurin lämmönvaihtimessa. Tämä voi aiheuttaa sen, että savukaasujen sisältämää vesihöyryä ei saada lauhtumaan. (Järvenreuna & Nummila n.d.)

Vesihöyryn kastepisteen saavuttamiseksi voidaan pesurin yhteyteen liittää lämpöpumppu, joka jäähdyttää osaa kaukolämmön paluuvdestä. Kuviossa 6 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva lämpöpumpusta jäähdyttämässä pesurin yläkierron pesunestettä.



Kuvio 6. Lämpöpumppu-savukaasupesuri (Järvenreuna & Nummila n.d.)

Kuviossa 5 on esitetty tarkempi esimerkki lämpöpumpun kytkennästä pesuriin. Lämpöpumpukytkennässä savukaasupesurin alakierro ja alempi täytekappalekerros toimivat kuten perinteinen savukaasupesuri. Lämpöpumppu on kytketty pesurin yläkiertoa jäähdyttävään kaukolämpölinjaan ja sen avulla saadaan tarvittaessa jäähdytettyä yläkierron pesuvettä.

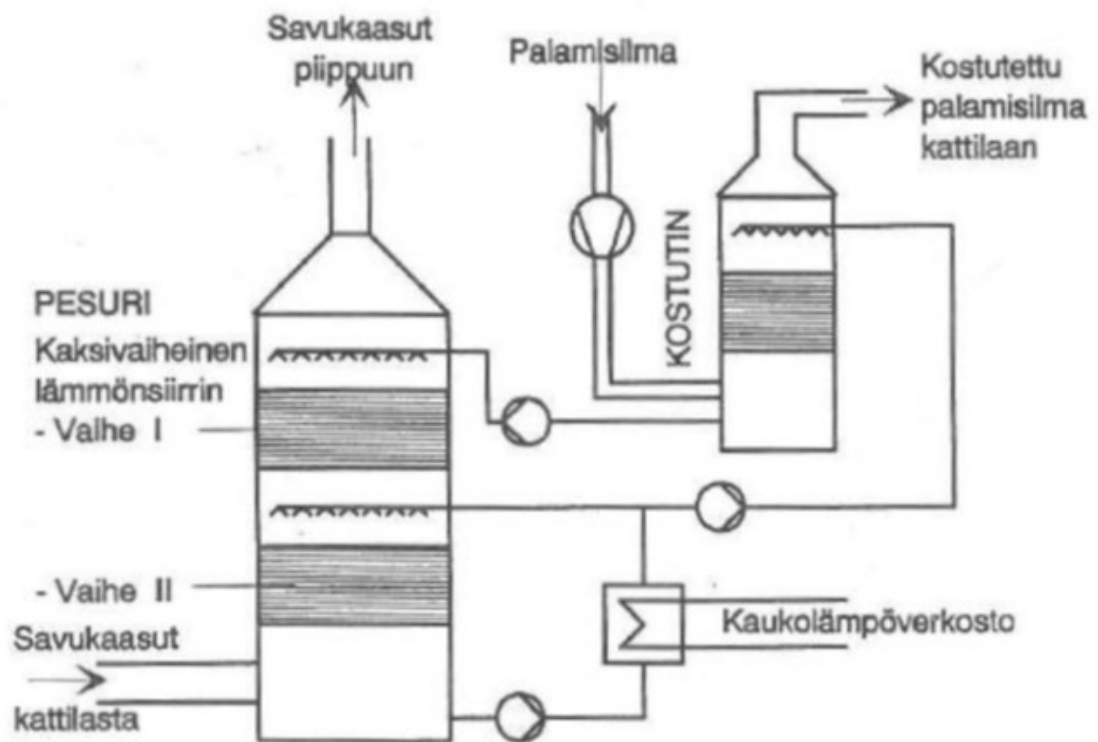


Kuvio 7. Esimerkki lämpöpumpun kytkennästä lämpöpumppuun (Rissanen 2016, 32)

Lämpöpumppu ei hukkaa kaukolämpövedestä otettu lämpöä, vaan se siirtyy termoaiheen välityksellä lauhduttimelle ja takaisin kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumpun avulla voidaan jäähdyttää savukaasuja jopa alle 30-35 asteiseksi, mutta näin alhaisissa lämmöissä savukaasujen absoluuttinen kosteus, ja siten lauhumisesta saatava lisäteho, on varsin vähäinen. Kehittyneissä lämpöpumppusovelluksissa jäähdytettävän paluuveden määrää säädetään ja pumpuilla jäähdytetään ainoastaan pesurin todellisuudessa tarvitsema määrä. Näin voidaan optimoida lämpöpumppujen koko ja mahdollisesti pienentää investointikustannuksia. (Järvenreuna & Nummila n.d.)

2.3 Palamisilmankostutin

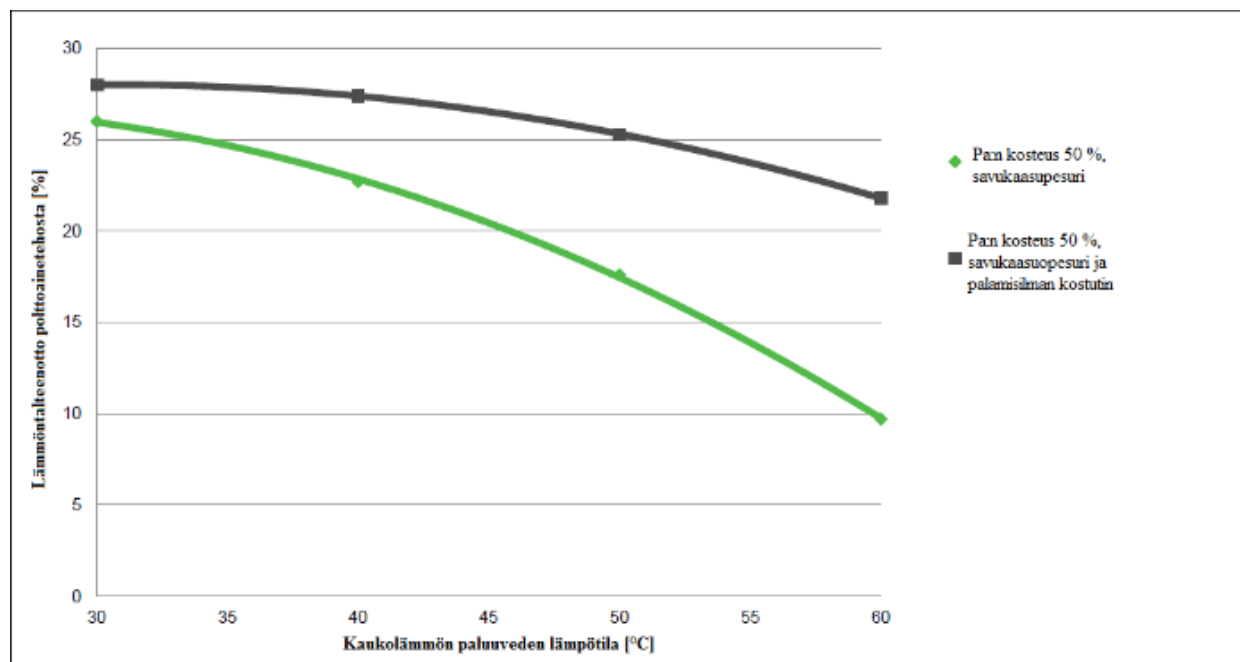
Palamisilmankostuttimella pyritään nostamaan savukaasujen kastepistelämpötilaa lisäämällä vesihöyryn määrää savukaasuissa. Tällöin savukaasupesurin lämmöntalteenottokyky paranee, kun lauhtuminen alkaa korkeammassa lämpötilassa ja lauhtettavan vesihöyryn määrä on suurempi. Kostutus toteutetaan kostuttamalla palamisilmaa lauhdevedellä ennen sen syöttämistä kattilaan (Ks. Kuvio 8). Kostutukseen käytetään pesurin yläkierron lauhdetta. Kostuttimessa viileä palamisilma jäähdyttää pesurin yläkierron lauhdetta ja vastaavasti lauhde nostaa palamisilman lämpötilaa, mikä mahdollistaa suuremman absoluuttisen vesihöyryn määrän palamisilmassa. (Huhtinen ym. 2004, 255-256)



Kuvio 8. Esimerkki palamisilmankostuttimen kytkennästä (Huhtinen ym. 2004, 256)

Palamisilman kostuttimesta saadaan suurin hyöty talviaikaan korkeilla kaukolämmön paluuvien lämpötiloilla. Mitä suurempi paluulämpötila on, sitä suurempi hyöty palamisilmankostuttimesta on suhteessa ilman kostutinta olevaan pesuriin (Ks. Kuvio

9). Palamisilmankostuttimen kanssa lämmöntalteenottoa ja tuotantoa tulee tarkastella kokonaisuutena kattilan kanssa, sillä kostutin vaikuttaa palamisolosuhteisiin ja savukaasujen koostumukseen ja määrään. Tämä vaikuttaa varsinkin pienellä kattilan teholla ja joissain tapauksissa pesurin lämmöntalteenottoa täytyy rajoittaa, jotta kattila voidaan pitää päällä. Tyypillisesti ensimmäisenä rajoituksena kytetään kostutin pois päältä. (Rissanen 2016, 35-37)



Kuvio 9. Perinteisen savukaasupesurin ja palamisilman kostuttimella varustetun pesurin suhteellinen teho kaukolämmön paluulämpötilan funktiona. Kuvio lainattu Ville-Matti Rissanen diplomityöstä. (Valmet 2015)

3 Työn toteutus

Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla palamisilman kostutinta ja lämpöpumppuja liitettynä savukaasupesuriin. Tavoitteena oli muodostaa käsitys molempien sovellusten vaikutus polttoaineenkulutukselle Hämeenlinnan kaukolämpöverkon lämmityksessä

vuositasolla ja selvittää mitä polttoaineita niihin investoimalla säästettäisiin. Säästettyjen polttoaineiden kautta saadaan selville rahallinen säästö ja voidaan laskea investoinnin kannattavuus.

Savukaasupesurisovellusten vertailussa käytettiin lähtötietoina pesurivalmistajilta saatuja simuloituja arvoja määritellyissä ajotilanteissa. Määrävinä arvoina simuloineissa olivat kattilan teho, kaukolämpöveden paluulämpötila ja polttoaineen kosteus. Molempien pesurityyppien valmistajilta pyydettiin simuloitua arvoa samoissa ajotilanteissa, jotta pystyttiin suorittamaan laskelmat molemmille tapauksille mahdollisimman samankaltaisesti. Ajotilanteet, joissa valmistajat suorittivat simuloinnit, olivat kattilatehon osalta puoliteho ja maksimiteho, kaukolämmönpaluueden lämpötilan osalta 42 °C, 47 °C ja 52 °C sekä polttoaineen kosteuden osalta 42 % ja 50 %.

3.1 Lämpöpumpusovelluksen lähtötiedot

Lämpöpumppu-savukaasupesurin valmistajan edustajien kanssa käytyjen keskustelujen perusteella ilmeni mahdollisuus, että K6-kattilan savukaasupesurin lämpöpumppuilla voisi erillisellä kytkennällä tehostaa myös K5-kattilan savukaasupesuria. Laskelmissa otettiin siis huomioon lämpöpumppu-savukaasupesurin tapauksessa sekä tulevan K6-kattilan savukaasupesurin tehon että jo olemassa olevan K5-kattilan savukaasupesurin tehostamisen.

Liitteessä 1 on esitetty K5-savukaasupesurin tehostamiseen vaadittava kytkentä. Kaaviossa on katkoviivoilla kuvattuna K5-pesuriin kytkennässä lisättävä ylempi lämmönvaihdin ja linjat, joiden kautta lämmönvaihtimen toisipuolen vesi kiertää K6-pesurin toisen lämpöpumpun läpi. Lisäksi kytkentään tarvitaan sulkuventtiilit, joilla voidaan ohjata, käytetäänkö lämpöpumppuja pelkälle K6-kattilalle vai myös K5-kattilalle.

Valmistaja tarjosi K6-kattilaan pesuria yhdistettynä kahteen lämpöpumppuun, joista toista olisi mahdollista hyödyntää erillisellä kytkennällä myös K5-kattilan savukaasupesurin tehostamiseen. Tämän takia lämpöpumppu-savukaasupesurin tapauksessa laskettavaksi tuli myös ajotilanteet, joissa K5-kattilan pesuria ei tehosteta ollenkaan,

sekä tilanne, että pesuria tehostetaan yhdellä pumpulla. Vanhan K5-kattilan pesurin tehostuksen myötä myös K6-kattilan laskelmiin jouduttiin lisäämään tilanne, jossa pesuria ajetaan vain yhdellä lämpöpumpulla. Lisäksi valmistajalta pyydettiin simulointi K6-kattilan pesurille ilman yhtäkään lämpöpumppua, jotta pystyttiin arvioimaan lämpöpumppujen osuus savukaasupesurilla tuotetusta lämmöstä. Pesuritoimittajalta saatujen simulointien tulokset on esitetty liitteessä 2. Simuloinneissa näkyy myös lämpöpumppujen käyttämä sähkö, joten myös sähkön kulutus saadaan otettua huomioon laskelmissa.

3.2 Palamisilmankostutinsovelluksen lähtötiedot

Palamisilmankostuttimen tapauksessa ei ollut mahdollista hyödyntää K6-kattilan savukaasupesurin laitteistoja K5-kattilan savukaasupesurilla. Valmistajalta pyydettiin simuloinnit K6-kattilan pesurille palamisilmankostuttimen kanssa sekä pesurille ilman palamisilmankostutinta. Näin saatiin laskelmiin erotettua palamisilmankostuttimen tuoman hyödyn savukaasupesurin tuotosta. Palamisilmankostutinsovelluksen simuloitujen arvojen esittämiseksi liitteessä 3.

3.3 Laskelmat

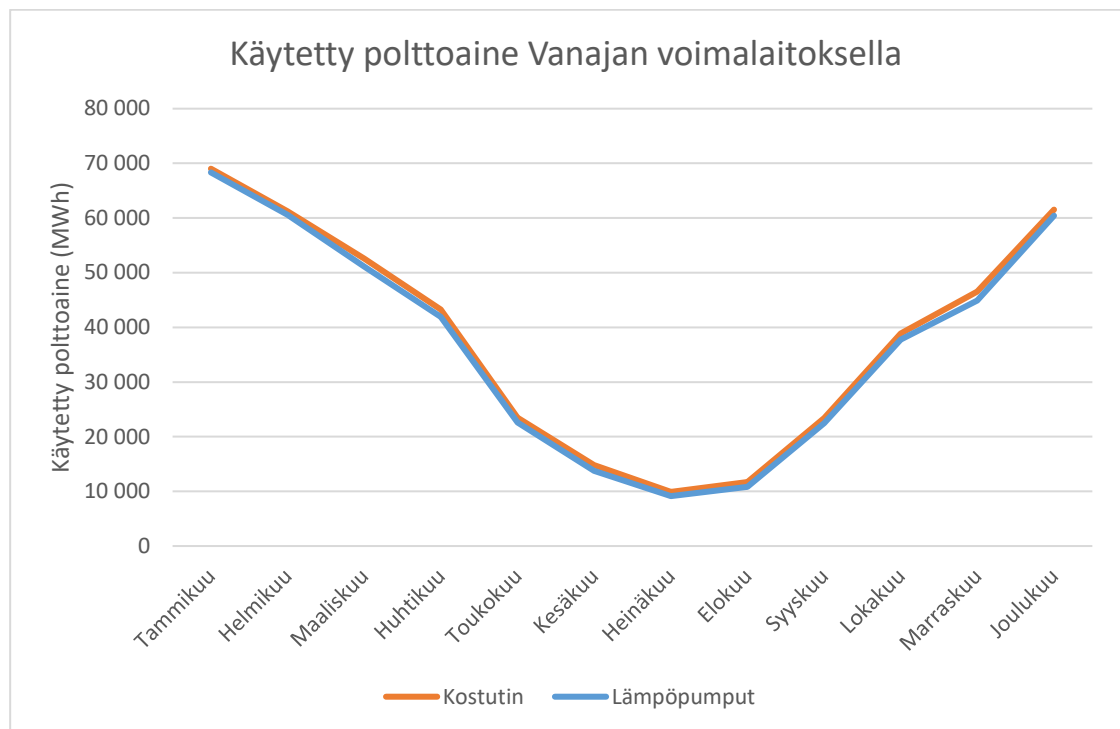
Savukaasupesurivalmistajilta saatujen simuloitujen arvojen avulla muodostettiin taulukkolaskentaohjelmaan kaavat, jotka mukailevat simuloitujen arvoja. Näiden kaavojen avulla pystyttiin laskemaan arvoja ajotilanteissa, jotka eivät vastaa suoraan valmistajien simuloimia pisteitä. Kaavat muodostettiin asettamalla määrääville tekijöille, kattilan teholle ja kaukolämmönpaluveden lämpötilalle kertoimet sekä vakion, jotka ratkaistiin taulukkolaskentaohjelman solver-toiminnolla asettaen tavoitteeksi simuloitujen pisteiden arvot. Tuloksena saatiin paloittain määritellyt funktiot, jotka kuvasivat pesurista kussakin tapauksessa saatua tehoa kattilatehon ja kaukolämmönpaluveden lämpötilan suhteen. Kertoimien muodostamisesta syntynyt taulukko on esitetty liitteessä 4. Molemmille sovelluksille kaava muodostettiin samalla periaatteella.

Laskelmissa otettiin huomioon lämpöpumppujen tuoma hyöty K6-pesurille, lämpöpumppujen tuoma hyöty K5-pesurille sekä palamisilmankostuttimen tuoma hyöty K6-pesurille. Kustakin osuudesta muodostettiin kaksi kaavaa polttoaineen kosteuden mukaan sekä 42 %:n polttoaineen kosteudelle että 50 %:n polttoaineen kosteudelle. Voimalaitoksen käyttödataa tarkastelemalla selvisi todellisten polttoaineiden kosteuksien olleen referenssivuotena melko lähellä 42 %:n kosteutta, joten laskelmissa päätettiin käyttää 42 %:n kosteudelle muodostettuja kaavoja.

Lopulliset tulokset saatiin sijoittamalla eri pesurisovellusten kaavat referenssivuodesta mallinnettuun kattiloiden ajomalliin. Ajomalliin sijoituksen kautta saatiin selville tuntikohtaisesti kuinka Hämeenlinnan kaukolämpöverkkoon liitettyjä kattiloita olisi ajettu referenssivuonna kullakin savukaasupesurisovelluksella. Ajomallista selvisi kunkin kattilan laskennallisesti tuottama kaukolämpö, polttoaineen käyttömäärät, omakäyttösähkön käyttömäärä sekä monia muita tuotantoon liittyviä lukuja. Kooste tuloksista on esitetty liitteessä 5.

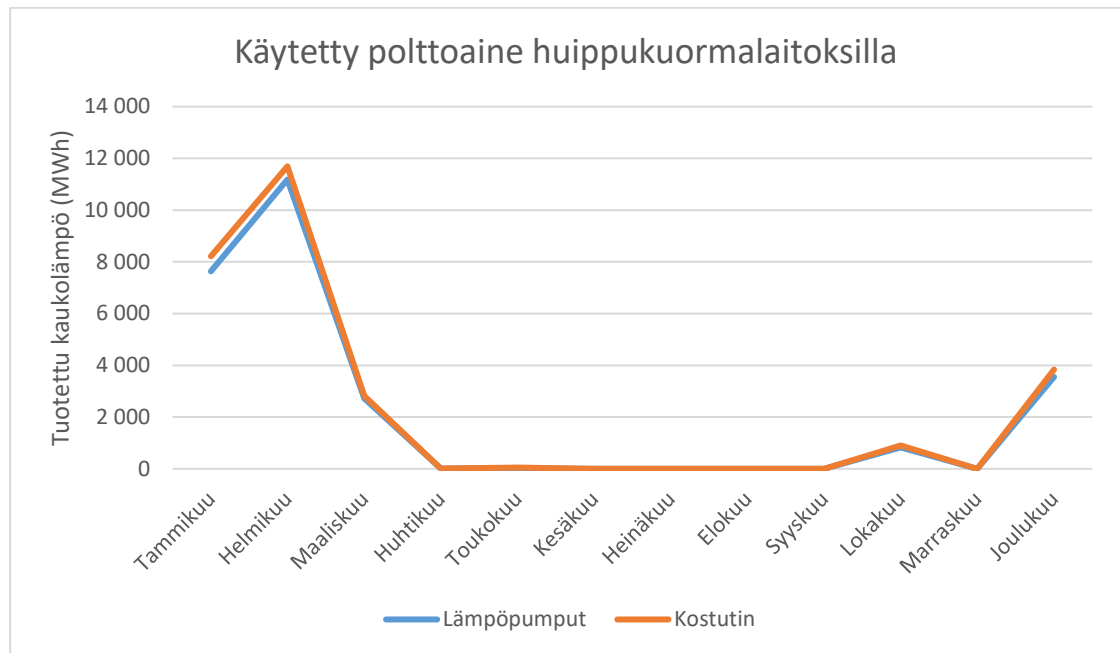
4 Tulokset

Työn tavoitteena oli selvittää molempien pesurisovellusten vaikutus polttoaineen kulutukseen Hämeenlinnan kaukolämpöverkon lämmityksessä. Kuviossa 10 nähdään, että pesuri yhdistettynä lämpöpumppuihin säästäisi polttoainetta Vanajan voimalaitoksella verrattuna pesuriin ja palamisilman kostuttimeen. Ero on läpi vuoden tasaisen pieni, mutta polttoaineen ollessa suurin kustannuserä voimalaitoksella, pienelläkin erolla on merkitystä.



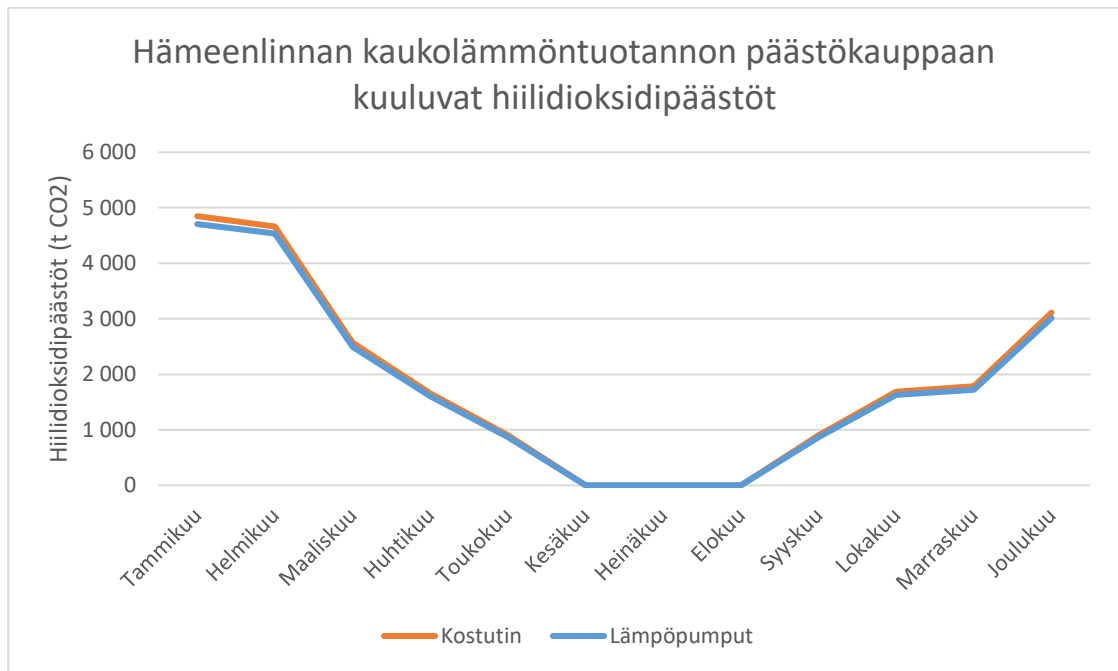
Kuvio 10. Käytetty polttoaine Vanajan voimalaitoksella kuukausittain

Vanajan voimalaitoksella käytetään polttoaineina biopolttoaineita ja kaasu on polttoaineena ainoastaan kattiloiden käynnistysvaiheessa ja häiriötilanteissa. Biopolttoaine on kaasuun verrattuna halpaa ja ympäristöystävällistä, joten säästö kaasun poltossa on merkittävämpi tekijä kuin säästö biopolttoaineissa. Kaasua käytetään polttoaineena vara- ja huippukuormalaitoksilla. Pesurisolukilla pystytään nostamaan Vanajan voimalaitoksella tuotetun kaukolämmön huipputehoa, joten näillä sovelluksilla pystytään säästämään myös huippukuormalaitoksien polttoainetta. Kuviossa 11 nähdään lämpöpumppujen nostavan Vanajan voimalaitoksen huipputehoa enemmän verrattuna palamisilman kostuttimeen ja näin ollen säästävän enemmän huippukuormalaitoksien polttoainetta huipputehon tarpeen aikana tammi-helmikuussa ja joulukuussa.



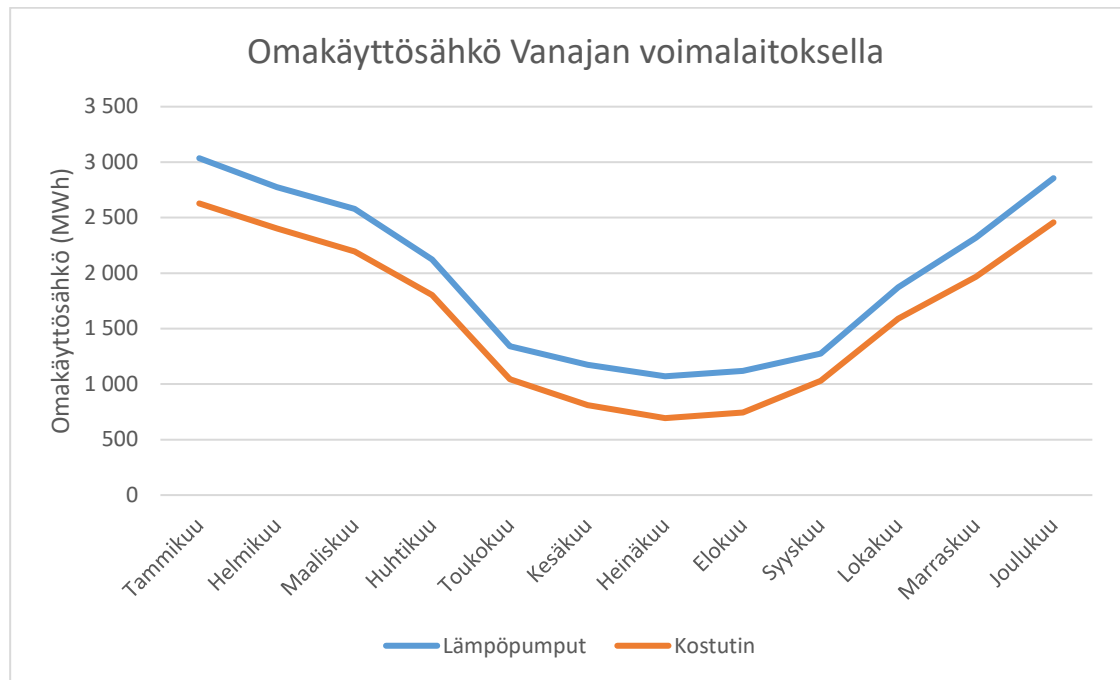
Kuvio 11. Käytetty polttoaine huippukuormalaitoksilla

Säästetty huippukuormalaitosten polttoaine vaikuttaa myös kaukolämmöntuotannosta aiheutuviin hiilidioksidipäästöihin. Hiilidioksidipäästöihin tarvitsee päästöoikeuden jokaista hiilidioksiditonnia kohden. Päästöoikeuksilla käydään kauppaa ja yritys voi myydä tai ostaa oikeuksia tarpeen mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että jokaisella vähennetyllä hiilidioksiditonilla on myös rahallinen hyöty. Kuvio 12 nähdään lämpöpumppujen vaikuttavan enemmän päästökaupan piiriin kuuluviin hiilidioksidipäästöihin kuin palamisilman kostutin. Tämä selittyy täysin huippukuormalaitoksien polttoaineen käytön vähentymisellä, sillä Vanajan voimalaitoksella pääasiassa poltettava biopolttoaine on päästökaupan näkökulmasta päästötöntä.



Kuvio 12. Hämeenlinnan kaukolämmöntuotannon päästökauppaan kuuluvat hiilidioksidipäästöt

Käytettäessä lämpöpumppuja lämmöntuotannossa, lämpöä tuotetaan käytännössä sähköllä. Kuviossa 13 on esitetty molempien pesuriversioiden vaikutus omakäytösähkön kulutukseen Vanajan voimalaitoksella. Kuviosta nähdään lämpöpumppujen kuluttavan selvästi enemmän sähköä kostuttimeen verrattuna.



Kuvio 13. Omakäyttösähkö Vanajan voimalaitoksella

4.1 Jatkolaskelmat

Ajomallista saadut tulokset kertovat pesuriversioiden vaikutukset polttoaineiden ja sähkön kulutuksiin. Jotta tuloksia voitaisiin käyttää mahdollisen investointipäätöksen tekemisessä, havaittujen erojen taloudelliset vaikutukset tuli laskea. Saatujen tulosten avulla suoritettiin alustava kannattavuuslaskenta.

Ajomallista saadut vaikutukset polttoaineiden kulutuksiin, hiilidioksidipäästöihin ja sähkön kulutukseen sijoitettiin toimeksiantajan käyttämään investointien kannattavuuslaskentapohjaan, jolla vertailtiin savukaasupesurisovellutusten kannattavuutta. Kannattavuuslaskentapohjaan sijoitettiin saatujen arvojen erotus sovellusten välillä. Näin saatiin laskettua kannattavuutta kalliimman lämpöpumppu-savukaasupesurin vaatimalle lisäinvestoinnille.

Kannattavuuslaskennassa on otettu huomioon inflaatio, polttoaineiden hinnan nousu, polttoaineiden verotuksen nousu, päästöoikeuden hinnan nousu sekä sähkön

hinnan nousu. Investointikustannukset on arvioitu laskelmiin pesuritoimittajien tarjouksien ja sopimuksien poisjättöhintojen perusteella. Laskelmiin arvioitiin kunnossapitokustannuksia toimeksiantajan aikaisemman kokemuksen mukaan vastaavista laitteista. Kannattavuuslaskentataulukko on esitetty liitteessä 6.

5 Pohdinta

Opinnäytetyön tehtävänä oli vertailla palamisilman kostutinta ja lämpöpumppuja liitettynä savukaasupesuriin. Työn tavoitteena oli muodostaa arvio molempien savukaasupesurityyppien vaikutuksesta kaukolämmön tuotantoon. Työn tulokseksi haluttiin mahdollisimman realistiset laskelmat vaikutuksesta polttoaineen kulutukseen Hämeenlinnan kaukolämpöverkon lämmityksessä. Laskelmissa vaikutukset tuli kohdentaa eri polttoaineille. Lisäksi tavoitteena oli tehdä alustavat kannattavuuslaskelmat investoinnille.

Tulokseksi työn laskelmista saatiin arvio molempien pesurisolventtien vaikutuksesta eri polttoaineiden kulutukseen, sähkön kulutukseen sekä päästökaupan piiriin kuuluiin hiilidioksidipäästöihin. Näiden tulosten avulla pystyttiin laskea taloudellinen vaikutus lämmöntuotantoon ja pystyttiin suorittamaan alustavat kannattavuuslaskelmat.

Tulosten luotettavuutta arvioitaessa ei voida pitää kovin luotettavana simuloituista tuloksista johdettujen kaavojen kautta laskettuja savukaasupesurin hetkellisiä tehoja. Laskelmia voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavia ja vuositasolla saadut eri polttoaineiden kulutusten erot ovat oikean suuntaisia. Laskelmat suoritettiin molemmille pesuriversioille mahdollisimman samalla tavalla, jotta ne olisi keskenään vertailukelpoisia. Investoinnin kannattavuuslaskelmien kannalta oleellisinta oli saada kohdennettua tuotettu lisäenergia säästöksi kullekin polttoaineelle ja tähän laskelmilla pystyttiin. Laskelmien luotettavuutta ja tarkkuutta voisi parantaa kehittämällä ajomalliin sijoitettua kaavaa pidemmälle. Tämä vaatisi tiivistä yhteistyötä pesurivalmistajien kanssa ja lähes täydellisen pesurisimulaation

kehittämistä, joka ei yksittäistä investointia harkittaessa olisi kovin mielekäs panostus. Työssä käytettyä yksinkertaistettua kaavaa voidaan pitää hyvänä kompromissina tulosten luotettavuuden ja työmäärän suhteen.

Investointikustannusten arvioiminen vertailukelpoisesti molemmille pesurityypeille oli haastavaa. Toiselle sovellukselle oli käytössä sopimukseen kirjattu poisjättöhinta, joka ei ole suoraan vertailukelpoinen toisen sovelluksen investointikustannuksiin, jotka perustuivat tarjoukseen. Pyrimme ottamaan tämän eron huomioon vertaamalla poisjättöhintaa aiemmin saatuihin tarjouksiin vastaavasta laitteistosta ja korjasimme kustannusarviota niiden perusteella paremmin vertailukelpoiseksi. Jos kannattavuuslaskelmaan haluaisi täysin vertailukelpoiset investointikustannukset, tulisi pesuritoimittajilta pyytää tarkkaan laaditun tarjouspyynnön mukaiset sitovat tarjoukset.

Investointilaskennassa pyrittiin ottamaan sähkön hinnan muutos huomioon tasaisena 2 % nousuna. Tämä on laskennan lopputuloksen kannalta oleellinen, sillä lämpöpumput käyttävät huomattavasti enemmän sähköä kuin palamisilmankostutin. Sähkön hinnan ennustaminen on vaikeaa ja raju hinnan nousu vaikuttaisi negatiivisesti varsinkin lämpöpumppu-savukaassupesurin kannattavuuteen. Myös polttoaineiden hintojen ja päästöoikeuden hinnan kehitys vaikuttavat merkittävästi investointien kannattavuuteen. Mahdollisissa jatkolaskelmissa tulisi suorittaa herkkyyshanalyysi tärkeimpien investoinnin kannattavuuteen vaikuttavien tekijöiden suhteen.

Lopulliseen investointipäätökseen vaikuttavia asioita on monia. Taloudellinen kannattavuus on yritykselle oleellisin investoinnin toteuttamista harkittaessa. Myös arvot, kuten ympäristöystävällisyys, voivat olla rajaavana kriteerinä. Erityisesti energiantuotannossa arvostetaan toimintavarmuutta, sillä jos laitteet eivät toimi, ei voida jättää kaukolämpöverkkoa lämmittämättä vaan lämpö tulee tuottaa muilla keinoilla suurilla lisäkustannuksilla. Eri sovellusten toimintavarmuutta arvioitaessa pyritään tutustumaan vastaaviin laitteisiin muilla laitoksilla, mutta jos laitteita ei ole toimitettu aiemmin muualle tai muualle toimitetut laitteet eroavat merkittävästi tarjotusta lait-

teesta on toimintavarmuuden arviointi vaikeaa. Näissä tilanteissa investointiin ryhtyessä yritys ottaa suuremman riskin kuin jo muualla toimivaksi todettuun teknologiaan sijoittaessaan.

Lähteet

Air pollution control. N.d. CR Clean Air Group:n www-sivuilla. Viitattu 22.5.2020.
https://www.crcleanair.com/wp-content/uploads/2016/02/CRCleanAir_Brochure.pdf

Elenia Lämmön laitokset Hämeen alueella. 2014. Esitysmateriaali. Elenia Lämpö. Viitattu 14.5.2019. Sisäinen materiaali.

Elenia Lämpö esittelykalvot. 2019. Esitysmateriaali. Elenia Lämpö. Viitattu 14.5.2019. Sisäinen materiaali.

Elenia Lämpö on nyt Loimua. 2019. Tiedote Loimua Oy:n www-sivuilla 23.12.2019. Viitattu 8.12.2020. <https://www.loimua.fi/elenia-lampo-on-nyt-loimua/>

Energiateollisuuden ympäristöpooli. 2016. Pöyryn selvitys polttolaitosten savukaasupesureiden jätevesien ja lietteiden laadusta, hyötykäytöstä ja siihen liittyvästä luvituksesta. Viitattu 11.12.2018.
https://energia.fi/files/1442/Savukaasupesurit_raportti_201216.pdf

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita Prima

Järvenreuna, J. & Nummila, M. N.d. Nykyaikainen savukaasupesuri. Artikkelit Caligon sivustolla. Viitattu 11.12.2018.
http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

Päästökauppa. N.d. Energiavirasto. Viitattu 6.12.2020.
<https://energiavirasto.fi/paastokauppa>

Rissanen, M. 2016. Savukaasupesurilauhteen lämmön hyötykäyttö Vanajan voimalaitoksella. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikka. Viitattu 11.12.2018.
<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2016101425293>

Scrubbers and flue gas heat recovery. 2015. Valmet Oy:n pdf-tiedosto. Viitattu 6.12.2020.

Liitteet

Liite 1. PI-kaavio K5-kattilan pesurin kytkennästä K6-kattilan pesurin lämpöpumppeihin

Liite 2. Lämpöpumppu sovelluksen simuloitut arvot

Liite 3. Palamisilmankostutin sovelluksen simuloitunut arvot

Liite 4. Kertoimien laaskentataulukko

Liite 5. Laskelmien tulokset

Liite 6. Kannattavuuslaskenta