



**YHTEISTUOTANTOLAITOKSEN SAVUKAASUJEN YLIJÄÄMÄLÄMMÖN
HYÖDYNTÄMISTUTKIMUS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Aleksi Varis

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti

Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Aleksi Varis

Yhteistuotantolaitoksen savukaasujen ylijäämälämmön hyödyntämistutkimus

Energiatekniikan diplomityö

2023

100 sivua, 44 kuvaa, 8 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti ja tutkijaopettaja Antti Uusitalo

Avainsanat: ylijäämälämpö, lämmöntalteenotto, CHP-laitos, savukaasupesuri

Alva-yhtiöt Oy:lla on herännyt kiinnostus tutkia ylijäämälämpöjen hyödyntämistä Keljonlahden voimalaitoksella. Alvalla on myös tarve kehittää kaukolämmökokonaistuotantoa vuositasolla. Tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että Keljonlahden voimalaitoksen kaukolämpötehon nostaminen ylijäämälämpöpotentiaalilla vaikuttaisi kokonaisuutena Jyväskylän kaukolämpöverkon lämmöntuotantoon. Saatavilla olevaa savukaasujen ylijäämälämpötehoa kartoitetaan tässä tutkimuksessa erilaisilla ajotilanteilla, joiden avulla pystytään tutkimaan eri skenaarioita.

Työn tavoitteena on selvittää Keljonlahden voimalaitoksen savukaasujen ylijäämälämpöpotentiaali ja siitä aiheutuvat muutokset sähköenergian tuotantoon ja polttoaineen massavirtaan eri mitoitustehoilla. Potentiaali kartoitetaan eri ajotilanteissa. Työn toisena tavoitteena on tehdä kannattavuustarkastelu, jossa tarkastellaan lämmöntalteenottojärjestelmän kannattavuutta omakustannushinnan avulla eri mitoitustehoilla.

Työn tuloksena saatiin selvitettyä savukaasujen ylijäämälämpöpotentiaali, vaikutukset ja omakustannushinnat yhteensä 15 erilaisella ajotilanteella sekä eri mitoitustehopisteissä 0 ja 100 MW välillä. Ajotilanteet määriteltiin yhdessä Alvan kanssa, mukailen heidän näkemystään tulevaisuuden ajotilanteista. Tulokset toimivat mahdollisten investointipäätöksien tukena. Toteutuneella lämmöntalteenottojärjestelmällä voidaan saavuttaa mm. optimaalisempi lämmöntuotantojakauma eri lämpölaitoksien välillä. Pitkällä aikavälillä toteutuneet ratkaisut vähentävät myös kasvihuonekaasupäästöjä paikallisesti ja globaalisti.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Alexi Varis

CHP-plant flue gas waste heat utilization research

Master's thesis

2023

100 pages, 44 figures, 8 tables and 5 appendices

Examiners: Professor Teemu Turunen-Saaresti and associate professor Antti Uusitalo

Keywords: waste heat, heat recovery, CHP-plant, flue gas scrubber

In Alva-yhtiöt Oy has raised interest to study the utilization of surplus heat from Keljonlahti power plant's heat recovery system. Also, there is a need to develop total district heat production on an annual basis. In practice, this would mean that increasing the power of the Keljonlahti power plant with the surplus heat potential would have an overall impact on the heat production of the Jyväskylä district heating network. The available surplus heat output of flue gases is discovered in this study with different plant operating situations, which can be used to study different scenarios.

The aim of the work is to determine the surplus heat potential of the flue gases at the Keljonlahti power plant and the resulting changes in the production of electrical energy and the mass flow of fuel with different sized rate power. The potential is studied in different operating situations. Another objective of the work is to conduct a feasibility study, which examines the profitability of the heat recovery system by utilizing the cost price at different sizing capacities.

As a result of this study, the surplus heat potential, effects and cost prices of flue gases in a total of 15 different operating situations and at different design power points between 0 and 100 MW were determined. Operating situations were defined together with Alva, in line with their vision of future plant operating situations. The results will support potential investment decisions. The implemented heat recovery system can achieve, among other things, a more optimal heat production distribution between different heating plants. Long-term solutions also reduce greenhouse gas emissions locally and globally.

KIITOKSET

Alva-yhtiöt Oy:n mahdollistama diplomityö Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen savukaasujen lämmöntalteenottopotentiaaliin osoittautui mielenkiintoiseksi ja antoisaksi tutkimusaiheeksi, selkeän tutkimustarpeen muodostuessa savukaasujen ylijäämälämmön talteenoton hyödyntämiseen. Lisäksi riittävät lähtötiedot mahdollistivat laajemman tutkimuksen aiheesta. Työn aikana myös aktiivinen kommunikointi työn etenemisestä, muutoksista ja tuloksista motivoi tekemistä entisestään.

Projektiin kuului myös haasteita, joihin oli saatavilla ammattitaitoista osaamista ja mielipiteitä kollegoilta kuin myös Alvalta ja LUT:n ohjaajilta. Haluankin kiittää kaikkia tässä työssä mukana olleita henkilöitä avusta ja yhteistyöstä, sekä perhettäni, läheisiäni ja ystäviäni tuesta, avusta ja jaksamisesta matkan varrella. Lopuksi haluan antaa erityismaininnan tyttäreleni, joka syntyi tutkimuksen kirjoituksen aikaan tuoden paljon iloa ja riemua. Erityisesti viikonloppuaamuina meillä kahdella oli tapana tehdä työtä yhdessä.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

p	paine	[Pa]
x	massaosuus	[%]
q_s	kalorimetrinen lämpöarvo	[kJ/kg]
q_i	tehollinen lämpöarvo kaikille polttoaineille	[kJ/kg]
q_{iw}	kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo kaikille polttoaineille	[kJ/kg]
w	vesipitoisuus paino-% kosteasta polttoaineesta	[%]
N	Määrä, tarve	[-]
y	mooliosuus	[%]
c	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg °C]
C	hiili	[-]
H	vety	[-]
S	rikki	[-]
O	happi	[-]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
T	lämpötila	[°C]
Q	lämpöteho	[kW]
h	entalpia	[kJ/kg]

Indeksit

$lauh$	lauhtuminen
$jääh$	jäähtyminen
H_2O	vesi
'	kylläinen neste
''	kylläinen höyry
$O_2(teor)$	teoreettinen palamishappi
$i(teor)$	teoreettinen palamisilma
$i(tod)$	todellinen palamisilma
$sk(teor)$	teoreettiset savukaasut

$sk(tod)$	todelliset savukaasut
k	kuiva-aineesta
kp	kastepistelämpötila
sk	savukaasun ominaislämpökapasiteetti
$m k$	kaasukomponentin k massaosuus
$p k$	kaasukomponentin k ominaislämpökapasiteetti
psk	savukaasun ominaislämpökapasiteetti
N_2	typpi
H_2	vety
tot	ilman kokonaispaine
(D)	Dulong
(G)	Grumell & Davies
t	turve
h_1	kylläisen vesihöyryn osapaine savukaasupesuria ennen
h_2	kylläisen vesihöyryn osapaine savukaasupesuria jälkeen
i, tot	kostean ilman osapaine
ik	kuiva ilma
i, H_2O	ilman kosteus
$p - \%$	paino-% tuhkattomasta kuiva-aineesta

Kreikkalaiset

λ	ilmakerroin
φ	ilman suhteellinen kosteus
Σ	summa

Lyhenteet

AT	ajotilanne
CHP	lämmön ja sähkön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
EKO	ekonomaiseri, syöttöveden esilämmitin
EU	euroopan unioni
KL	kaukolämpö
LUVO	palamisilman esilämmitin
MP	mitoituspiste

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Tutkimusongelma.....	11
1.2	Tavoitteet.....	12
1.3	Rajaukset.....	13
1.4	Toteutus ja tutkimusmenetelmät.....	14
1.5	Rakenne.....	15
2	Yhteistuotantohöyryvoimalaitokset.....	16
2.1	Kaukolämpövoimalaitokset.....	16
2.2	Kaukolämmöntuotanto.....	19
2.3	Kiertopetikatilat.....	20
2.4	Höyryvoimalaitoksen savukaasu-ilmajärjestelmä.....	24
3	Ylijäämälämmön lämmöntalteenoton periaatteet.....	26
3.1	Ylijäämälämpökohteen tunnistaminen ja hyödyntäminen.....	28
3.2	Ylijäämälämpö energiateollisuudessa.....	29
4	Palaminen ja savukaasut.....	30
4.1	Savukaasujen määrittäminen ja koostumus.....	31
4.2	Palamisilmantarve ja ilmakerroin.....	33
4.3	Savukaasujen koostumus.....	35
4.4	Ominaislämpökapasiteetti.....	36
4.5	Polttoaineen lämpöarvo.....	37
5	Savukaasujen lämmöntalteenotto savukaasupesurilla.....	39
5.1	Lämmöntalteenottotehon määrittäminen.....	41
5.2	Lämmöntalteenottomenetelmät ja toiminta.....	42
5.3	Kemikaalit.....	45
5.4	Lauhteen, jäteveden ja lietteen käsittely.....	45

5.5	Käyttö.....	47
6	Savukaasujen lämmöntalteenotto katselmus	48
6.1	Lähtötiedot	50
6.1.1	Määrittymiset, vakiot ja oletukset.....	51
6.1.2	Polttoaineiden alkuainekoostumus	52
6.1.3	Savukaasun lämpötila	52
6.1.4	Kaukolämpöverkon lämpöteho.....	53
6.1.5	Kaukolämpöverkon paluueden lämpötila	54
6.1.6	Savukaasujen jäännöshappi	55
6.1.7	Kattilan palamisilman esilämmitys.....	56
6.1.8	Ajokausien ulkolämpötilat.....	57
6.1.9	Ulkoilman suhteellinen kosteus	58
6.1.10	Lämmöntuotanto	59
6.1.11	Pysyvyyskäyrä	61
6.1.12	Polttoainetasejakauma	62
6.1.13	Polttoaineen kosteus	63
6.1.14	Polttoaineen lämpöarvo	64
6.2	Ajotilanteet.....	65
7	Tulokset	68
7.1	Lämmöntalteenottopotentiali ja muutosvaikutukset	68
7.1.1	Lämpöteho	70
7.1.2	Sähköteho.....	74
7.1.3	Polttoaineteho ja polttoaineen massavirta.....	75
7.2	Mitoitustehotarkastelu.....	78
7.2.1	Lämpöenergia	79
7.2.2	Sähköenergia.....	82
7.2.3	Käyttötunnit	83
7.2.4	Kattilan polttoaineen säästö	84
7.3	Kustannustarkastelu	86
7.3.1	Investointikustannukset	86
7.3.2	Käyttökustannukset.....	88
7.3.3	Omakustannushinta.....	89
8	Johtopäätökset	91

8.1	Tuloksien arviointi ja kriittisyys	93
8.2	Tuloksien vertailu.....	94
8.3	Jatkotutkimustarkastelu.....	95
	Lähteet	97

Liitteet

Liite 1. Puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia

Liite 2. Polttoainejakaumat polttoainejakeittain kuukausikohtaisesti

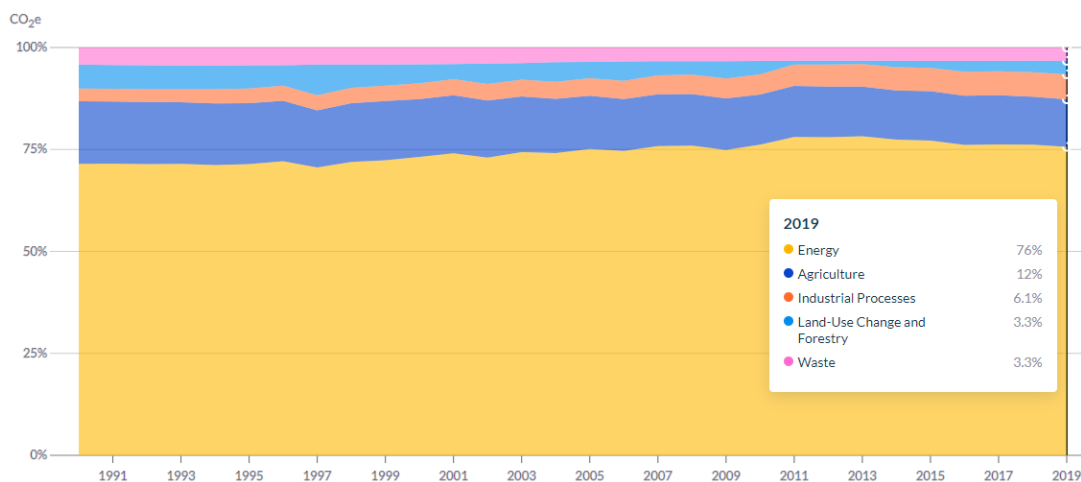
Liite 3. Polttoainejakaumat polttoaineryhmittäin kuukausikohtaisesti

Liite 4. Polttoaineiden painotettu kosteus polttoainejakeittain

Liite 5. Polttoaineiden painotettu lämpöarvo polttoainejakeittain

1 Johdanto

Kasvihuonepäästöjen vähentäminen ja globaali ilmastonmuutos on herättänyt keskustelua viimeisten vuosien aikana ja tulee herättämään sitä myös tulevaisuudessa. Tutkimuksissa on todettu, että ilmastonmuutoksen hidastamiseksi kasvihuonepäästöjen vähentäminen on välttämätöntä. Päästöjen vähentämiseksi valtiot sekä yhteisöt ovat tehneet erilaisia tavoitteita, säädöksiä ja ohjeistuksia muutoksien estämiseksi. Nämä toimet lisäävät luonnollista kilpailua ja kehitystarvetta nykyteknologialle ympäristöystävällisemmäksi sekä energiatehokkaammaksi. Kasvihuonepäästötavoitteiden saavuttamiseksi sähkön- ja lämmöntuotanto ovat merkittävässä osassa. Energiantuotannon globaalit kasvihuonepäästöt olivatkin n. 76 % vuonna 2019. Kasvihuonepäästöjen jakauma ja kehittyminen globaalisti voidaan nähdä kuvasta 1. (World resources institute. 2022)



Kuva 1. Globaalien kasvihuonepäästöjen jakauma (World Resources Institute. 2022)

Suomessa energiantuotanto ja kulutus aiheuttaa n. 80 % kasvihuonepäästöistä, mikä sisältää myös liikenteen päästöt. Suomen energia- ja ilmastopoliittikka ovatkin tästä syystä merkittävässä yhteydessä toisiinsa. Suomi on sitoutunut politiikassaan kasvihuonepäästöjen vähentämiseen ja pyrkii olemaan hiilineutraali yhteiskunta pitkällä aikavälillä. Keinoja ilmastotavoitteisiin pääsemiseksi on ollut mm. poliittiset päätökset sekä lähes päästötön lämmön- ja sähköntuotanto 2030-luvun lopussa. Energiapoliittisesti energiatehokkuuden ja uusiutuvien energialähteiden edistäminen ja tukeminen on tärkeää. (Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022)

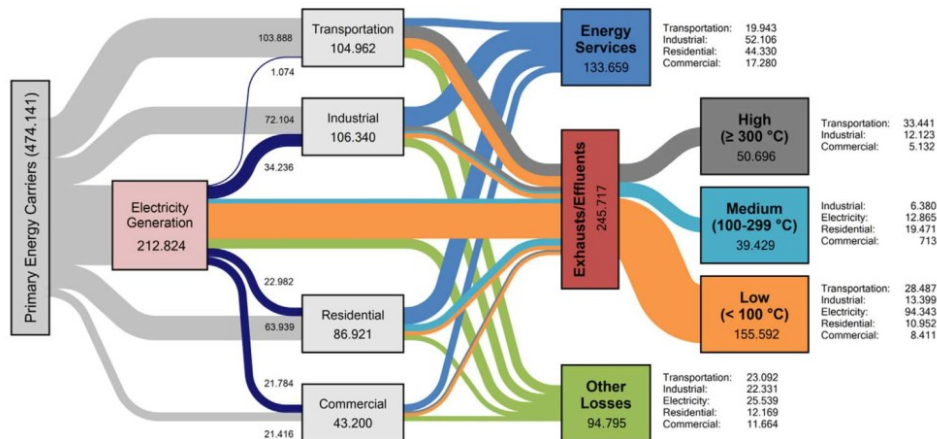
Kuitenkin 1,5 °C ilmastotavoite tarkoittaa myös Suomen päästövähennysten tiukentamista, vaikka Suomi saavutti EU:n vuoden 2020 ilmastotavoitteensa 20 % päästöjen vähentämisestä etuajassa. Suomi pyrkii muodostamaan EU:n ilmastotoimia siten, että EU saavuttaisi hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteen saavuttaminen edellyttää päästövähennysvelvoitteen tiukentamista 55 %:iin vuonna 2030 vuoden 1990 päästöistä. (Valtioneuvosto. 2019, 31-32)

Ylijäämälämmön hyödyntämiseen vaikuttaa politiikka kunnallispoliittisten, kansallis- ja EU-tason päätösten kautta. Kansallisella politiikalla tyypillisesti pyritään ylijäämälämmön hyödyntämisen lisäämiseen mm. verotuksen, energiatukien ja lainsäädännön avulla. Teollisuudessa ylijäämälämpöä usein hyödynnetään kunnallisen energialaitoksen kanssa yhteistyössä siirtämällä lämpöä kaukolämpöverkkoon. Yhteistyö ei aina kuitenkaan ole yksinkertaista, koska energia- ja teollisuusyhtiöiden intressit sekä riskienkanto- ja sitoutumishalukkuus voivat poiketa toisistaan. Tällöin kunnallispolitiikka ja peräti henkilösuhteet ovat tärkeässä osassa. Kunnallispolitiikassa olevien paikallispoliittisten päättäjien päätöksiin vaikuttaa merkittävästi kansalaismielipiteet. Vastustavien mielipiteiden muodostumisen estämiseksi on syytä informoida ja tiedottaa lähiympäristön asukkaita riittävästi ylijäämälämmön hyödyntämisprojektista. Tiedottamisen laiminlyönnillä voi muodostua vastustavia mielipiteitä perustuen väärin tai puutteellisiin tietoihin. Haastavana tekijänä osaltaan on myös ylijäämälämmön luokittelu, koska ylijäämälämpöä ei luokitella uusiutuvaksi energiaksi. Kuitenkaan EU-tasolla luokittelumuutosta ei ole vireillä tai esillä millään tapaa. Luokittelun muutoksella pystyttäisiin helpottamaan potentiaalinen hyödyntämistä. (Heikkilä & Kiuru. 2014, 9)

Lämmön- ja sähköntuotannon osalta Suomen pitää saavuttaa lähes päästötön tuotanto 2030-luvun loppuun mennessä, pois lukien huolto- ja toimitusvarmuus näkökulmat. Energiatehokkuutta tarvitaan osana kasvihuonepäästöttömään talouteen siirtymisessä. (Valtioneuvosto. 2019, 33) Päästötavoitteiden saavuttamiseksi on otettava huomioon tarvittavat investoinnit, niiden tarvitsemat markkinat ja rahoitus, joilla investoinnit olisivat liiketaloudellisesti kannattavia pitkällä aikavälillä. Ilman kustannustehokkuutta käytännön hyödyt eivät vastaa teoreettisia laskelmia optimaalisesta energiantuotannosta. (Huttunen 2017, 13-14.)

Energiatehokkuudessa merkittävässä osassa on ylijäämälämmöntalteenotto ja sen hyödyntäminen teknistaloudellisesti. Globaalisti ylijäämälämmön hyödyntämisessä on suuri potentiaali, kuten kuvasta 2 voidaan päätellä. Kuvasta havaitaan, kuinka ylijäämälämmön

potentiaali jakautuu eri lämpötila-alueille ja sektoreille. Ainoastaan eri prosesseista poistuvien päästöjen ylijäämlämmön potentiaali on yhteensä 245 717 PJ. Suoranaisesti eniten potentiaalia on nähtävissä alhaisilla lämpötiloilla, mutta myös korkeilla lämpötiloilla potentiaali on suuri.



Kuva 2. Ylijäämlämpöenergian potentiaali (Forman et al. 2016, 6)

Yhteisiin tavoitteisiin pääsemiseksi myös Alva-yhtiöt Oy (myöh. Alva) on sitoutuneet ympäristövaikutuksien vähentämiseen ja hallitsemiseen. Alva on asettanut omaksi tavoitteeksi hiilineutraalin energiantuotannon vuoteen 2030 mennessä ja vähintään 80 %:n hiilineutraaliuden vuoteen 2025. Toimia hiilineutraaliuteen pääsemiseksi ovat mm. panostaminen energian säästöön kehittämällä aktiivisesti erilaisia ratkaisuja lämmön kulutuksen tasaamiseen sekä ylijäämlämmön hyödyntämiseen. (Alva. 2023) Lisäksi nykykapasiteetillaan Alva pyrkii kasvattamaan biopolttoaineiden osuutta polttoainejakaumassa.

1.1 Tutkimusongelma

Alvalla on todettu, että savukaasujen lämmöntalteenottoa on syytä tutkia ja selvittää ylijäämlämmön hyödyntämispotentiaalia. Hyödyntämispotentiaalın tiedostamisen lisäksi, nykyinen savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmä sähkösuodattimen jälkeen vaatii tulevaisuudessa merkittävää huoltamista ja mahdollista uusimista. Investointipäätöksien tueksi olisi

tarkoituksenmukaista tarkastella savukaasujen lämmöntalteenottopotentiaalia kokonaisuutena eri ajotilanteissa.

Tämän lisäksi Rauhalahden CHP-laitos on tulossa käyttöikänsä päähän 2030, jonka vuoksi korvaavia tuotantomuotoja halutaan selvittää. Rauhalahden CHP-laitos tuottaa merkittävän osan kokonaiskaukolämmöntuotannosta Jyväskylän kaukolämpöverkkoon yhdessä Keljonlahden CHP-laitoksen kanssa. Yhdessä laitokset tuottavat n. 99 % kokonaislämmöntuotannosta häiriötilanteita lukuun ottamatta. Pääsääntöisesti Jyväskylän kaukolämpöverkon ajomallissa Rauhalahden CHP-laitos tuottaa kesäkauden lämmitystarpeet ja osan huipputehontarpeesta yhdessä Keljonlahden CHP-laitoksen kanssa. Keljonlahden CHP-laitos on pääsääntöisesti talvikaudella toimiva laitos. Keljonlahden CHP-laitoksen savukaasujen ylijäämälämpöjen hyödyntämisen avulla pystyttäisiin korvaamaan Rauhalahden ja muiden laitoksien huipputehojen osuutta lämmöntuotannossa talvikaudella. Lisäksi savukaasuista saatavalla ylijäämälämpöenergialla pystyttäisiin korvaamaan kattilan tuottamaa kaukolämpötehoa, jolloin säästettäisiin kattilassa käytettävää polttoainetta.

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen savukaasujen lämmöntalteenottoa sekä sen teoreettista hyödyntämispotentiaalia. Savukaasujen lämmöntalteenottoa tarkastellaan tutkimuksessa savukaasupesurin näkökulmasta. Savukaasupesurijärjestelmälle arvioidaan lämmöntalteenottopotentiaali eri ajotilanteissa sekä eri mitoitus-ehoilla. Tutkimuksessa käytetyt ajotilanteet perustuvat maksimi, minimi ja keskimääräiselle polttoainetehoille, muuttuville polttoaineseoksille ja -kosteuksille, ulkolämpötiloille ja vakioidulle kaukolämmön paluueden lämpötiloille. Lisäksi erillisessä ajotilanteessa tutkitaan lämmöntalteenoton potentiaalia toteutuneen kaukolämmön paluueden lämpötilan mukaan. Lopuksi lämmöntalteenottopotentiaalille tehdään herkkyystarkastelu polttoaineen kosteuden ja kaukolämmön paluueden lämpötilan mukaan. Lämmöntalteenoton potentiaalini lisäksi arvioidaan savukaasupesurin aiheuttamia muutoksia kattilan sähkötehon ja polttoaineen massavirran osalta.

Toisena tavoitteena on luoda savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän kannattavuustarkastelu saatujen laskelmien, taustatietojen ja tulosten perusteella. Kannattavuustarkastelussa selvitetään savukaasupesurijärjestelmän arvioitu omakustannushinta sisältäen investointi- ja käyttökustannukset eri mitoitustehoilla. Käyttökustannuksissa otetaan huomioon sähkön- ja lipeän kulutuksen kustannukset.

Työssä tavoitteena olevalla savukaasujen hyödyntämispotentiaalin tutkimisella on tärkeä rooli tulevaisuudessa ajankohtaiseksi tulevan lämmöntalteenottojärjestelmän huolto- tai uusimisinvestoinnissa.

Tavoitteen saavuttamiseksi kartoitettiin Keljonlahden voimalaitoksen ajotiedot ja Rauhalahden tarpeelliset taustatiedot, käytiin laitosvierailuilla sekä oltiin tiiviisti yhteydessä Alvan kanssa viikkopalavereissa ja laitospalavereissa voimalaitoksella Keljonlahdessa.

1.3 Rajaukset

Tutkimuksen viitekehys rajattiin koskemaan Keljonlahden voimalaitoksen aluetta ja sen prosessissa toimivia järjestelmiä. Viitekehykseen kuuluu myös savukaasujen lämmöntalteenoton tutkiminen teoreettisen hyödyntämispotentiaalin näkökulmasta, jossa rajoittavina tekijöinä olivat termodynaamiset ominaisuudet sekä kattilalle ominaiset rajoitteet. Työssä tutkitaan Keljonlahden voimalaitoksen nykytilannetta, eikä oteta huomioon suunnitteilla olevia investointeja tai muita tehokkuuteen vaikuttavia parannuksia. Tutkimuksessa myös oletetaan, että kaukolämpöverkko pystyy ottamaan vastaan savukaasujen ylijäämälämmön eri ajotilanteissa. Työ rajattiin koskemaan lämmöntalteenottomenetelmien osalta vain savukaasupesurijärjestelmiä. Tutkimuksen ulkopuolelle jätettiin LVI, automaatio- ja rakennusesisuunnittelu sekä tarvittavat ympäristöluvut. Tutkimuksessa ei myöskään arvioitu tarvittavia muutoksia tai vaikutuksia kattilaprosessiin.

1.4 Toteutus ja tutkimusmenetelmät

Tekniikan alan väitöskirjoissa on tyypillisesti viisi erilaista tutkimusprofiilia, jotka ovat mathematical design science, experimental design science, naturalistic design science, interpretive inquiry ja explanatory inquiry. Tämä tutkimus edustaa näistä tutkimusasetelmista luonnollisen suunnittelutieteen (naturalistic design science) tutkimusparadigmaa. Tälle tutkimusasetelmalle on tyypillistä tutkimuskohteen konkreettiset artefaktit sekä niihin liittyvät käsitteet, jotka tässä tutkimuksessa ovat olemassa oleva CHP-laitos ja siihen liittyvä savukaasujen lämmöntalteenoton hyödyntäminen nykyteknologialla. Tutkimuksessa suunnitellaan ja kuvataan sekä metodiikka perustuu kenttätutkimukseen, konstruktioiden testaamiseen ja suunnitteluun. (Naukkarinen. 2015)

Tutkimusaineisto ja lähtötiedot perustuvat vertaisarvioituihin, tieteellisiin sekä luotettaviin lähteisiin. Käytettävä aineisto perustuu tiedeyhteisöjen materiaaleihin, joita Lappeenrannan yliopiston opiskelijoilla on käytössä. Varsinaiset tutkimuksen lähtötiedot perustuvat pääsääntöisesti Alvalta saatuihin tietoihin.

Tutkimusmenetelmät perustuvat valmiiksi tehtyihin mittauksiin sekä tiedon keräämiseen Alvan tietokannoista. Tiedot, joita ei pystytty tutkimuksessa todentamaan mittaamalla tai keräämään Alvan tietokannasta, korvattiin energia-alalla toimivilla yleisillä arvoilla, jotka kohdennettiin vastaamaan tämän tutkimuksen tavoitteita.

Saatuja lähtötietoja analysoitiin luotettavuuden, pätevyyden ja virhetarkastelun avulla. Lämmöntalteenottopotentiaalın tuloksia analysoitiin eri ajotilanteissa, joista voitiin todeta erilaisten ajotilanteiden vaikutukset lämmöntalteenottojärjestelmän potentiaaliin.

Varsinainen tutkimuksen tulosten analysointi ja simulointi tapahtui Microsoft Excel -ohjelmistoon luodulla laskentamallilla. Laskentamallilla pystyttiin simuloimaan valittujen ajotilanteiden avulla kuinka savukaasujen lämmöntalteenottopotentiaali käyttäytyy. Laskentamallin avulla pystyttiin myös seuraamaan muutoksia erilaisten kuvaajien avulla sekä käyttämään valmiita veden ja höyryn taulukkoarvoja, lähtötietoihin perustuvia sovitteita sekä tutkimukseen luotuja Excel Visual Basic -kaavoja ja makroja.

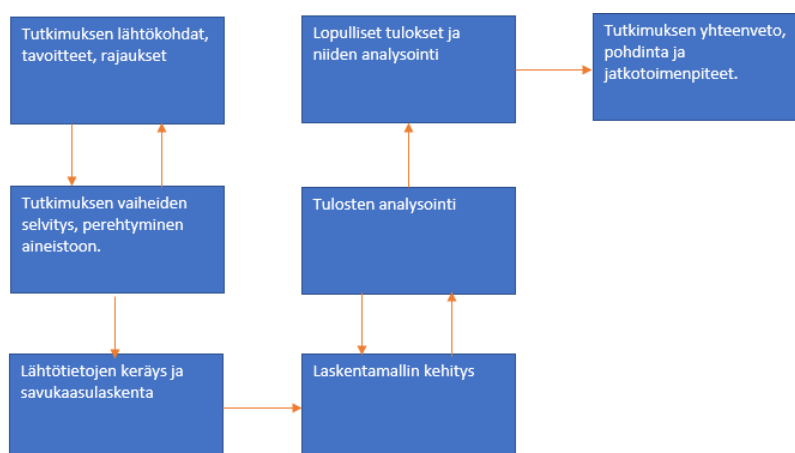
Työssä työskennelleet henkilöt koostuivat diplomityön tekijästä sekä sidosryhmistä, jotka liittyivät tutkimukseen. Näitä sidosryhmiä olivat mm. tilaaja, työn ohjaajat, Alvan asiantuntijat. Työhön kytkeytyy kaksi yritystä, jotka ovat Alva sekä Elomatic Oy. Tutkimus

toteutettiin pääsääntöisesti Elomatic Oy:n toimitiloissa ja Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen toimitiloissa tapahtuneissa palavereissa. Tämän lisäksi sovittiin viikoittainen palaverikäytäntö, jossa tarkasteltiin työn etenemistä ja vastattiin lähtötieto tarpeisiin.

1.5 Rakenne

Tässä luvussa käydään tarkemmin läpi työssä käytetyt tutkimustehtävät, rakenne ja periaatteet. Tutkimus koostui lähtökohtien, tavoitteiden ja rajoitusten selvityksestä. Ensimmäisen vaiheen jälkeen aloitettiin työn vaiheiden selvitys ja perehtyminen työn aineistoon. Tämä vaihe jatkui aktiivisesti koko tutkimuksen ajan, jolloin tarpeellinen, relevantti ja hyödyllinen tieto käytettiin työn tukena.

Tutkimuksen alkuvaiheiden jälkeen selvitettiin lähtötiedot tutkimukseen ja aloitettiin savukaasulaskenta. Menetelmät pitivät sisällään olemassa olevan datan keruuta ja selvittämistä yhdessä Alvan henkilöstön kanssa. Lähtötietojen jälkeen pystyttiin jatkamaan laskentamallin luomista ja kehittämään sitä. Laskentamallin ollessa valmis, pystyttiin luomaan eri ajotilanteille tulokset, joita pystyttiin analysoimaan. Analysointien perusteella virheitä havaitessa palattiin takaisin kehittämään laskentamallia. Lopuksi laskentamallin kehityksen myötä saatiin lopulliset tulokset, joita pystyttiin analysoimaan. Kaikkien edeltävien vaiheiden ollessa valmiita, tutkimuksesta suoritettiin yhteenvedon, pohdinnan ja ehdotettujen jatkotoimenpiteiden laadinta. Työn rakenne voidaan nähdä myös esitettynä kuvasta 3.



Kuva 3. Tutkimuksen rakenne

2 Yhteistuotantohöyryvoimalaitokset

Yleensä höyryvoimalaitokset jaotellaan lauhde- ja vastapainevoimalaitoksiin sen mukaan, millainen höyrynpaine vallitsee turbiinin jälkeen. Lauhdutusvoimalaitoksissa höyrynpaine on matala, mikä johtaa myös alhaiseen lauhtumislämpötilaan. Höyrystä saatavaa alhaista lauhtumislämpöä ei voida hyödyntää lämmöntuotannossa, joten lauhdutusvoimalaitoksella pystytään tuottamaan vain sähköä. Vastapainevoimalaitoksessa lauhtumislämpötila on huomattavasti korkeampi, korkeamman höyrynpaineen vuoksi turbiinin jälkeen. Höyryn sisältämä lämpö voidaan käyttää vastapainevoimalaitoksissa lämmöntuotantoon esimerkiksi kaukolämpöverkossa. (Huhtinen et al. 2013, 12)

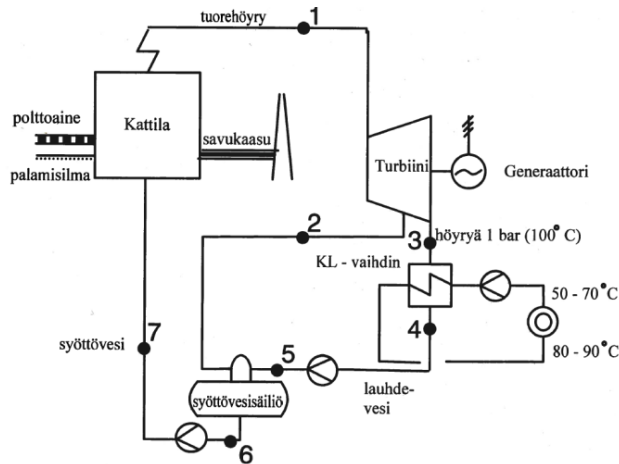
Suomessa sähkön ja lämmön yhteistuotanto on voimalaitoksissa erittäin yleistä, jopa 75 % kaukolämmön tuotannosta perustuu yhteistuotantoon. Yhteistuotanto on erittäin energiatehokasta ja ympäristöystävällistä, sillä polttoaineen energiasisältö saadaan talteen tehokkaasti. Ympäristöpäästöt ja polttoaineen käyttö saadaan vähenemään n. 30 % verrattuna erillistuotantoon. Yhteistuotantolaitoksen käyttö perustuu tyypillisesti kaukolämmön tarpeeseen, jolloin laitosta käytetään täydellä teholla silloin kun lämpöä tarvitaan eniten. Yleensä sähkön tarve on myös silloin suuri. Energiatehokkuutta ja säätökykyä pystytään parantamaan entisestään esimerkiksi savukaasulauhduttimilla ja lämpöakuilla. (Energiateollisuus Ry. N.d.)

Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi tälle tutkimustyölle oleellisia tietoja liittyen Keljonlahden voimalaitokseen. Höyryvoimalaitoksen osalta keskitytään tarkastelemaan teoriaa liittyen polttotekniikoihin ja ilma- ja savukaasujärjestelmiin, koska ne ovat olennaisessa osassa savukaasujen ylijäämälämmön talteenotossa. Höyryvoimalaitoksen lämpötehon määrittämiseen vaikuttavia asioita tarkastellaan kaukolämmöntuotannon näkökulmasta.

2.1 Kaukolämpövoimalaitokset

Kaukolämpöä tuottavista voimalaitoksista käytetään yleisesti nimitystä kaukolämpö- tai lämmitysvoimalaitos (Koskelainen et al. 2006, 47). Kaukolämpövoimalaitosta voidaan

kutsua myös CHP-laitokseksi, joka tulee englanninkielisistä sanoista (Combined Heat and Power). CHP-laitoksen höyryprosessiin kuuluvat oleellisesti tulistimella varustettu kattila, kaukolämmönvaihdin, turbiini, syöttövesisäiliö sekä lauhde- ja syöttövesipumput. Esimerkki yksinkertaisesta peruskytkennästä on esitetty kuvassa 4.



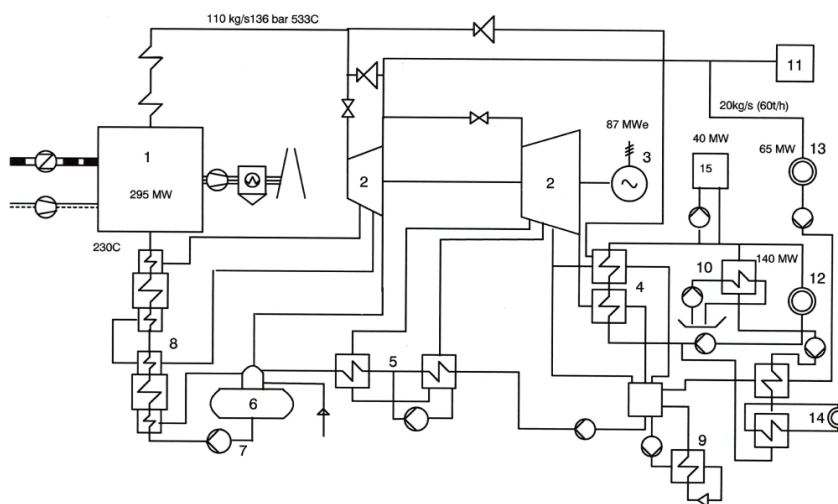
Kuva 4. Höyryvoimalaitoksen peruskytkentä, Kaukolämpöteho 10-40 MW (Huhtinen et al. 2013, 21)

Höyryvoimalaitoksessa tuotetaan sähköä ja lämpöä hyödyntämällä polttoaineen sisältämää kemiallista energiaa. Höyrykattilassa poltetaan polttoainetta, joka palaessaan vapauttaa siihen sitoutunutta kemiallista energiaa muuttuen samalla savukaasuksi ja tuhkaksi. Savukaasujen lämpöenergia pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti kattilan lämmönsiirtopinnoilla. Lämmönsiirtopintojen avulla lämpöenergia siirretään kattilaan syötettävän veden lämmitykseen, höyrystykseen ja lopulta tulistukseen. Prosessin energiatehokkuus on n. 90 %. Kattilan jälkeen höyryyn sitoutuneesta paine- ja lämpöenergiasta n. 15-45 % saadaan muunnettua mekaaniseksi energiaksi turbiinin akselille. Turbiinin pyörivä akseli tuottaa generaattorissa sähköä. Turbiinin jälkeen paisunut ja viilentynyt höyry lauhdutetaan vedeksi tyypillisesti vesijäähdytteisessä lämmönsiirtimessä. Höyry lauhduessa vapautuu merkittävästi lämpöä, joka siirtyy lämmönvaihtimen toisella puolella olevaan lämmitettävään veteen. Usein tämä lämmitettävä vesi on kaukolämpövettä. Lauhduttimen jälkeen vesi johdetaan syöttövesisäiliön kautta takaisin kattilaan. Näin saadaan aikaan kiertoprosessi. (Huhtinen et al. 2013, 21-22)

Tilanteessa, jossa kaukolämpövettä on tarkoitus lämmitellä esimerkiksi 50 °C:sta 90 °C:seen, pitää turbiinin jälkeen olevan vastapainehöyryn lauhduttaa lämmitettävää

kaukolämpövedettä korkeammassa lämpötilassa (esim. 100 °C:ssa). Tässä lämpötilassa höyry lauhtuu paineen ollessa 1 bar, joka on myös samalla turbiinin vastapaine. Turbiinista tulevan höyryn painetasen vuoksi turbiinia kutsutaan vastapaineturbiiniksi sekä koko voimalaitosta vastapainevoimalaitokseksi. (Huhtinen et al. 2013, 22)

Voimalaitoksen hyötysuhdetta voidaan parantaa suurissa voimalaitoksissa erilaisilla kytkentälisäyksillä. Voimalaitoksen rakennussuhdetta ja sähköntuotannon hyötysuhdetta parantavat lisäykset ovat mm. välitulistus, syöttöveden lämmitys väliottohöyryllä ja kaukolämpöveden lämmitys monivaiheisesti. Tyypillisesti höyryvoimalaitoksilla rakennussuhde vaihtelee 0,3-0,6 välillä riippuen sähköntuotantoa lisäävistä muutoksista perusprosessiin. Voimalaitoksen prosessit pyritään optimoimaan käyttö- ja investointikustannuksien osalta niin, että energia saadaan tuotettua mahdollisimman kannattavasti. Lopulta tämä tarkoittaa, että pienen kaukolämpötehon voimalaitoksille optimaalisinta on toteuttaa yksinkertainen kytkentä ilman sähköntuotantoa lisääviä vaihtoehtoja. (Huhtinen et al. 2013, 46-47) Kuvas-
 ssa 5 nähdään Alva Rauhalampi Oy:n kaukolämpövoimalaitos. Laitoksessa on hyödynnetty matala- ja korkeapaine-esilämmittimiä, väliottohöyryllä lämmitettyä syöttövedettä ja tulistusta. Laitoksella tuotetaan myös prosessihöyryä laitoksen ulkopuolelle sekä lämpöä kasvihuoneiden tarpeeseen.



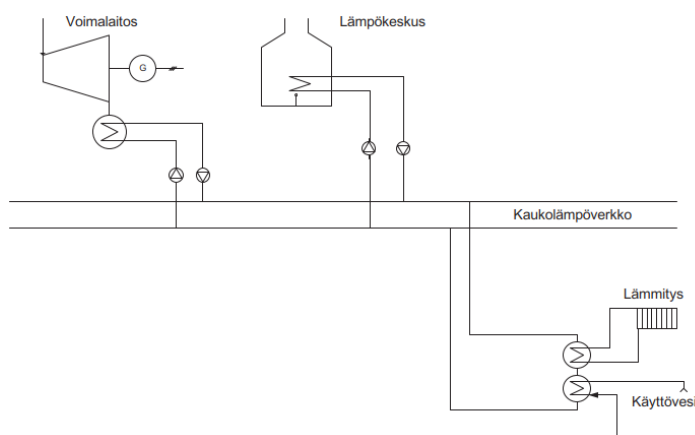
Kuva 5. Jyväskylän kaukolämpölaitoksen prosessikaavio (Huhtinen et al. 2013, 61)

2.2 Kaukolämmöntuotanto

Kaukolämmöntuotanto vaihtelee merkittävästi ulkolämpötilan mukaan siten, että ulkolämpötilan ollessa miinuksella lämpötehon määrä kasvaa. Kaukolämmöntuotannon tarve on suurimmillaan kovimmilla pakkasilla ja alhaisimmillaan kesällä kun lämpötilat ovat korkeimmillaan. Kesällä kaukolämpötehoa käytetään suurimmaksi osin vain kattamaan verkoston lämpöhäviöt ja käyttöveden lämmitys. Voimalaitoksen kannalta paras käyttövaste saadaan, kun laitos mitoitetaan vastaamaan n. 50 % osuutta kaukolämmön huipputehosta. Voimalaitoksen lämpöenergia kattaa n. 80 % tarvittavasta kokonaislämpöenergiasta edullisia polttoaineita hyödyntämällä. Voimalaitoksella myös käyttökustannukset ovat pienet. Kokonaislämpöenergian tarpeesta jäljelle jäävä 20 % tuotetaan tyypillisesti huippukuormalämpölaitoksilla. Huippukuormalämpölaitoksilla investointikustannukset ovat pienet, mutta käyttökustannukset suuret (mm. kallis polttoaine). Kokonaisuudessaan tällainen lämmöntuotannon jaottelu minimoi tuotantokustannukset. (Huhtinen et al. 2013, 12-13)

Kaukolämmöntuotannon lisäksi ulkolämpötila vaikuttaa kaukolämpöverkoston menoveden lämpötilatasoon. Tyypillisesti menoveden lämpötilaksi on asetettu talven kylmimpinä jaksoina n. 115 °C ja kesän lämpiminä jaksoina n. 70 °C. (Huhtinen et al. 2013, 14) Kuitenkin uuden Energiateollisuus Ry:n julkaiseman K1/2021 rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet (Energiateollisuus Ry. 2021, 8) mukaan kaukolämmön menoveden mitoituslämpötilataso lasketaan aiemmasta 115 °C lämpötilaan 90 °C. Tulevaisuudessa lämmönjakokeskuksen mitoituslämpötilan alentaminen mahdollistaa kaukolämpöverkon toimintalämpötilojen alentamisen, mikä monipuolistaa lämmönhankinnan vaihtoehtoja sekä parantaa koko energiajärjestelmän energia- ja kustannustehokkuutta. Mitoituslämpötilavaihdoksen aikana uudet mitoitettut ja asennetut laitteet on tarkoitus suunnitella niin, että ne toimivat toistaiseksi käytössä olevilla lämpötilatasoilla. Käytännössä kaukolämmön tulolämpötila on mitoitusulkolämpötilassa huomattavasti korkeampi vielä useiden vuosien ajan, mikä johtaa kaukolämpöveden pienempään virtaukseen, kuin mihin säätöventtiilit mitoitetaan. Lämmitysverkoston hyvän säädettävyyden ja energiatehokkuuden tavoittelemiseksi suositellaan tulevaisuudessa käytettäväksi myös mahdollisimman matalaa lämmitysverkon menolämpötilaa. Uudessa julkaisussa määritetään kaukolämmön paluuveden lämpötilaksi maksimissaan 33 °C. Tämän lisäksi kaukolämpöyhtiöt voivat määrittää ja asettaa lisämääräyksiä ja ohjeita, mitkä on otettava huomioon. (Energiateollisuus Ry. 2021, 5, 18, 19)

Kaukolämpöjärjestelmässä lämpö siirretään putkistoissa kiertävän veden avulla. Sama vesi kiertää suljetussa putkistossa luovuttaen lämmön asiakkaille lämmityslaitoksella tapahtuneen lämmittämisen jälkeen. Tyypillisesti järjestelmässä käytetään yksittäisiä saman kokoisia meno- ja paluuputkia lämmön siirtämiseen. Yhdessä nämä putkistot muodostavat kaukolämpöjohdon. Suuret kaukolämpöputket voidaan kuitenkin myös valmistaa omina johtoina. Kokonaisuudessaan kaukolämpöjärjestelmä koostuu vettä lämmittävistä laitoksista, kaukolämpöputkistoverkosta, lämmönvastaanottajista ja siirtämiseen vaadittavista laitteista. Veden siirtäminen ja paineenpito tapahtuu laitosten ja välipumppaamoiden pumpuilla. Kuvassa 6 on periaatekuva kaukolämpöjärjestelmän toiminnasta. (Koskelainen et al. 2006, 43)



Kuva 6. Kaksiputkijärjestelmän periaatekuva (Koskelainen et al. 2006, 43)

2.3 Kiertopetikattilat

Kiertopetikattiloissa käytettävien polttojärjestelmien tarkoitus on pyrkiä vapauttamaan polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia lämmöksi. Tehokkaan palamisen mahdollistamiseksi palavan aineen ja palamisilman täytyy reagoida keskenään hyvin muodostaen mahdollisimman vähän ylimääräilmaa. Mahdollisimman tehokkaan palamisen varmistamiseksi on kehitetty useita eri polttotekniikoita erilaisille polttoaineille. Yleisimmät biopolttoaineiden polttotekniikat ovat arina- ja leijukerrospoltto, joista leijukerrospoltto on syrjäyttänyt arinatekniikan miltei kokonaisuudessaan yli 20 MW tehoilla sekä on potentiaalinen tekniikka myös pienemmillä tehoalueilla. (Huhtinen et al. 2013, 35)

Leijukerrospolttotekniikalla tarkoitetaan polttotapaa, jossa leijutetun hiekan seassa poltetaan polttoainetta. Hiekan leijutus toteutetaan tulipesän alapuolelta puhallettavalla ilmalla. Leijukerroskattilat jaotellaan kiertoleiju- ja kerrosleijukattiloihin. Kattilatyypit eroavat toisistaan käytännössä hiekan leijutusnopeudessa. Kiertoleijukattiloissa käytetty hienompi hiekka leijutetaan suuremmalla leijutusnopeudella, jonka vuoksi hiekka virtaa kaasuvirran mukana pois tulipesästä. Hiekka palautuu takaisin tulipesään syklonin avulla, jossa hiekka ja savukaasut erotetaan toisistaan painovoiman avulla. Kerrosleijukattiloissa hiekka muodostaa tulipesän pohjalle selvästi nähtävän 0,4-0,8 metrin korkuisen kerroksen, mikä johtuu alhaisemmasta leijutusnopeudesta. Leijupolttotekniikalla toimivat kattilat soveltuvat erityisen hyvin myös kosteille polttoaineille. Suomessa kaukolämpövoimalaitoksilla on haluttu varautua myös hiilipolttolaitteisiin, joille kiertoleijupetikattilat soveltuvat. Savukaasut puhdistetaan lopuksi lentotuhkasta yleensä sähkösuodattimella, jonka lisäksi tuhkaa poistetaan myös savukaasukanavan vedoista. Kerätty tuhka siirretään tyypillisesti pneumatiikan avulla lentotuhkasiiloon. (Huhtinen et al. 2013, 36)

Leijupolttotekniikan suhteen tärkeitä tekijöitä ovat tasainen polttoaineen laatu ja syöttö sekä leijutuskaasun jakautuminen arinan läpi, oikea petin lämpötilataso (n. 700-900 °C polttoaineen laadusta riippuen), nopea palamisnopeus, polttoaineen tehokas sekoittuminen ja jauhaantuminen. Näiden lisäksi tuhkan poistuminen lentotuhkana, petimateriaalin raekoon pitäminen sopivana, sopiva petin korkeus sekä polttoaineen ja ilman oikea suhde on otettava huomioon. (Huhtinen et al. 2013, 37)

Ylösajoa varten leijupetin yläosassa on kevyt öljy tai maakaasu toimisia käynnistyspolttimia. Kiinteitä huonolaatuisia polttoaineita käyttäessä, riittävä kattilateho taataan kevyt öljy tai maakaasu toimisilla kuormapolttimilla. (Huhtinen et al. 2013, 37)

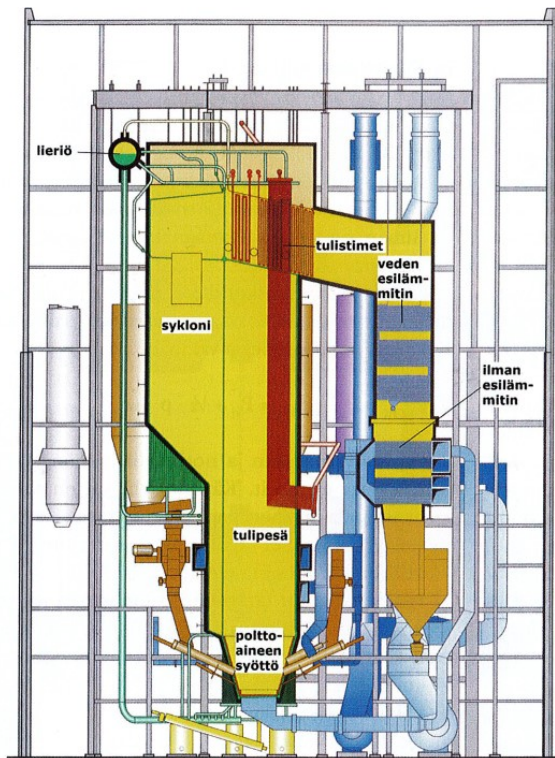
Kiertopetikattiloissa käytetään yleensä hiekan raekokona 0,1-0,5 mm ja leijutusnopeutena n. 3-10 m/s. Näiden arvojen vallitessa kiertopetikattilassa hiukkaset sekoittuvat hyvin ja leijutus on voimakas pyörteistä. Suuren leijutusnopeuden vuoksi petissä ei ole kerrosleijulle yleistä pintaa, vaan petin tiheys pienenee korkeuden kasvaessa savukaasujen mukana. (Huhtinen et al. 2013, 97) Kiertopetikattilan yleisesti käytettyjä toiminta-arvoja voi tarkastella kuvasta 7.

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

Kuva 7. Kiertopetikattilan tyypillisiä toiminta-arvoja (Huhtinen et al. 2013, 98)

Kiertoleijupetikattilan tärkeimmät osat ovat varsinainen tulipesä ja sen yhteydessä oleva sykloni, joka kuljettaa palamattomat hiukkaset ja kiertävän petimateriaalin takaisin tulipesän pohjalle. Näiden lisäksi savukaasukanavassa sijaitsee veden ja ilman esilämmittimet ja tulistimet. Päälämmönsiirtimien sijainti vaihtelee tapauskohtaisesti, koska jokainen kattila suunnitellaan yksilöinä. Kiertoleijupetikattiloissa käytetään Suomessa veden luonnonkiertoa, koska järjestelmien höyryn paineet ovat luonnonkierrolle soveltuvat. Tämä johtuu siitä, että höyryä käytetään paljon yhdyskuntien ja teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa. (Huhtinen et al. 2013, 97)

Syklonin tehokkaan erotusasteen varmistamiseksi savukaasun virtausnopeus on oltava korkea (n. 20 m/s). Myös syklonin halkaisija vaikuttaa heikentävästi erotusasteeseen, jonka vuoksi syklonin halkaisija pyritään pitämään aina alle kahdeksan metrin, tarvittaessa rakentamalla useita sykloneita. Suurissa kattiloissa voidaan käyttää sykloneita molemmiin puolin tulipesää. Syklonit ovat nykyään kehittyneet jäähdytetyiksi, aikaisempien jäähdyttämättömien tilalle. Jäähdytykselle saavutetaan erilaisia hyötyjä kuten laitoksen ylösajon nopeutuminen, lämpöhäviöiden väheneminen, syklonin pintojen korvaaminen lämmönsiirripintoina sekä muurauksen huollon tarpeen väheneminen. Kuvassa 8 voidaan nähdä kierto-leijupetikattilan leikkauskuva ja tärkeimmät kattilan osat. (Huhtinen et al. 2013, 98)



Kuva 8. Foster Wheeler Energian toimittama kiertopetikattila (Huhtinen et al. 2013, 99)

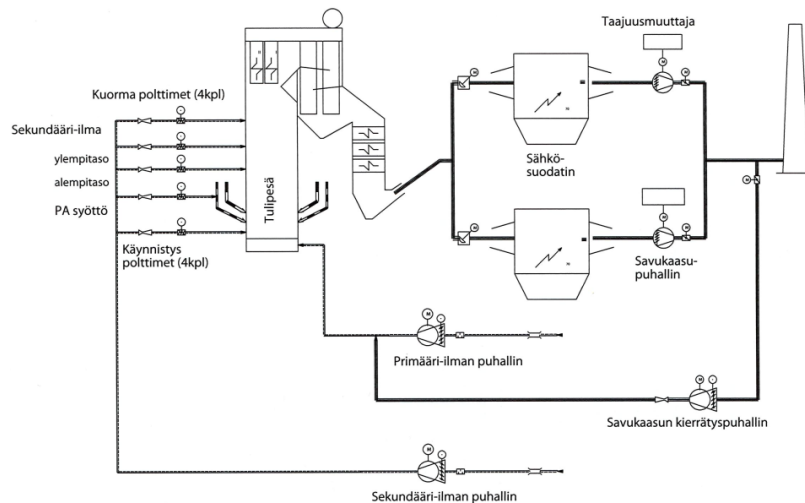
Polttoaine syötetään kiertopetikattilaan tulipesän alaosassa olevilla tunkijaruuveilla. Erillisellä syklonilla varusteluissa vanhemmissa kattiloissa polttoaine voidaan myös syöttää tulipesään palaavan hiekan sekaan syklonin laskuputken kohdalla. Kattilasta poistuu savukaasujen mukana hienojakoista lentotuhkaa, joka on tarpeeksi hienojakoista että se ei erotu enää palautussyklonissa. Lentotuhka jaotellaan savukaasuista normaaliin tapaan. (Huhtinen et al. 2013, 98) Syklonissa savukaasujen mukaan tempautuneet palamattomat polttoainepartikkelit erottuvat ja siirtyvät takaisin tulipesään parantaen palamishyötysuhdetta tarpeeksi pitkän palamisajan vuoksi (Huhtinen et al. 2013, 100).

Palamisilma jaetaan primääri- ja sekundääri-ilmoihin. Primääri-ilma (leijutusilma) puhalletaan kattilaan pohjasuuttimien kautta, n. 15-20 kPa paineella minkä osuus kokonaisilmasta on 40-60 % riippuen polttoaineesta. Sekundääri-ilma puhalletaan arinan yläpuolella eri tasoille muutamien metrien korkeuteen. Sekundääri-ilmaa säädetään liukuvasti 15-100 % alueella ja primääri-ilmaa 50-100 % kokonaisilmasta. Primääri-ilmaa on aina puhallettava minimissään leijutuksennopeuden vaatiman määrän. Kattilan säätöalue on kuitenkin laaja, koska minimiteho on n. 30 %. Käynnistystä ja ylösajoa varten kattila varustetaan käynnistyspolttimilla, kuten kerrosleijupetikattilatkin. (Huhtinen et al. 2013, 98)

Yksi kiertopetitekniiikan merkittävä etu on myös NO_x -päästöjen vähäisyys sekä savukaasujen rikinpoiston toteutuksen edullisuus. Alhaisiin NO_x -päästöihin vaikuttaa verrattain matala palamislämpötila (800-950 °C). Jos typpioksidipäästöjä halutaan vähentää edelleen, petiin syötetty ammoniakki saa typpidioksidipäästöt vähentymään 50 ppm tasolle ilman katalyyttejä (NCNR eli Non Catalytic NO_x Removal). Myös syöttämällä kattilan tulipesään kalkkia saadaan vähennettyä huomattavasti rikkipäästöjä. Polttoaineessa oleva rikki reagoi tulipesään syötettyyn kalkkiin muodostaen kipsiä. Kipsi poistetaan kattilasta tuhkan poiston yhteydessä. Kiertopetikattilassa saavutetaan rikinpoistovaatimukset moolisuhteen mukaan 1,5-2,0 Ca/S välillä, kun taas kerrosleijuteknikalla suhde nousee 2,0-3,0 Ca/S välille. (Huhtinen et al. 2013, 100)

2.4 Höyryvoimalaitoksen savukaasu-ilmajärjestelmä

Savukaasu-ilmajärjestelmä muodostuu savukaasu- ja kiertokaasujärjestelmästä sekä primääri- ja sekundääri-ilmajärjestelmästä. (Huhtinen et al. 2013, 43) Kuvasta 9 voidaan nähdä periaatekaavio savukaasu-ilmajärjestelmästä.



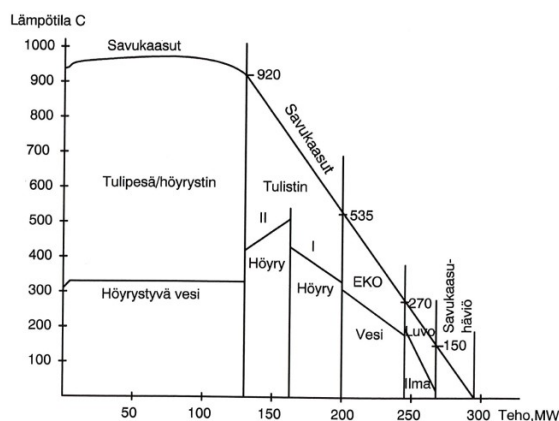
Kuva 9. Ilma-savukaasujärjestelmän PI-kaavio esimerkki (Foster Wheeler) (Huhtinen et al. 2013, 41)

Savukaasujärjestelmän tehtävä on poistaa kattilan tulipesästä palamisessa syntyneet savukaasut. Tulipesän paine ohjaa savukaasupuhaltimia, jonka paineentuohtoon vaikuttaa myös

kattiloiden savupiippujen veto (n. 150 Pa). Savupiipun veto ei kuitenkaan riitä, vaan savukaasupuhaltimelta vaaditaan jopa 1000 Pa paineentuotto. (Huhtinen et al. 2013, 41)

Kiertokaasujärjestelmällä pystytään tarvittaessa vähentämään happipitoisuutta leijutuskaasussa, mikä alentaa palamisessa syntyvää lämpö määrää ja saa petin lämpötilan laskemaan. Petin lämpötila pyritään pitämään n. 800-900 °C hyvän palamisen mahdollistamiseksi sekä tuhkan sulamisen estämiseksi. Happipitoisuuden säätämällä pystytään vaikuttamaan tarvittaessa lämpötilaan. Kiertokaasu on erityisen tärkeää silloin kun osakuormat ovat pienet ja käytetty polttoaine on kuivaa. Kiertokaasu kuljetetaan savukaasupuhaltimen jälkeen oman kanavan kautta savukaasun kierrätyspuhaltimelle, jolla painetta nostetaan samalle tasolle primääri-ilmakanavan kanssa. Kiertokaasu sekoittuu primääri-ilman kanssa esilämmittimien ja primääri-ilmapuhaltimen jälkeen primääri-ilmakanavassa. (Huhtinen et al. 2013, 42)

Savukaasujen lämpötilan muutosta pystytään tarkastelemaan kuvasta 10. Kuvasta huomataan, että suurin osa lämpötehosta siirtyy höyrystimissä, tulistimissa, EKO:ssa ja LUVO:ssa. Lopulta n. 15-20 % savukaasujen kokonaislämpötehosta (n. 50 MW) muodostaa savukaasujen häviöt.



Kuva 10. Kattilan lämpötiladiagrammi (Huhtinen et al. 2013, 98)

Ilmajärjestelmän tärkein tehtävä on jakaa ja syöttää ilmaa tulipesän eri tasoille palamisen edellyttämä määrä siten, että eri tehoilla polton tehokkuus ja päästöt ovat optimoituja. Kokonaisilmamäärän ohjaus tapahtuu suhteessa kattilaan syötettyyn polttoaineeseen. Lisäksi savukaasuista mitataan happipitoisuutta, mikä vaikuttaa etukäteen laskettuun ilma-polttoaineseossuhteeseen. Käytännössä happipitoisuusmittaus vaikuttaa tyypillisesti sekundääri-ilman määrään. (Huhtinen et al. 2013, 41-42)

Leijutuskaasuna käytetty primääri-ilma siirretään korkeapainepuhaltimen LUVO:n ja virtausmittauksen kautta tulipesään arinan pohjaan hitsattujen suuttimien kautta. Leijutuskaasu on tarkoitus saada leviämään tulipesään koko palamisalueen leveydeltä, mikä mahdollistetaan ilmasuuttimien riittävän suurella painehäviöllä verrattuna leijukerroksen painehäviöön. (Huhtinen et al. 2013, 42)

Primääri-ilman lisäksi ilmanjärjestelmään kuuluu sekundääri-ilma, jolla on monia käyttötarkoituksia, kuten toimia jäähdytys- ja palamisilmana kuorma- ja starttipolttimille, palamisilmana tulipesän seiniltä olevien suuttimien kautta usealta tasolta, kantoilmana petissä sekä tiivistysilmana nuohoimella. (Huhtinen et al. 2013, 42)

Sekundääri-ilma puhalletaan sekundääri-ilmapuhaltimen tekemällä paine-erolla kanavistoja pitkin eri kulutuskohteille esilämmittimen ja virtausmittauksen kautta. Sekundääri-ilma on tärkeä savukaasujen happipitoisuuden kontrolloimiseksi ja polttoaineen lopullisen palamisen varmistamiseksi. Ilmanjakamisella saavutetaan merkittäviä etuja polton laadussa, ja ilman toimivalla vaiheistuksella alennetaan NO_x-päästöjä. (Huhtinen et al. 2013, 42)

3 Ylijäämälämmön lämmöntalteenoton periaatteet

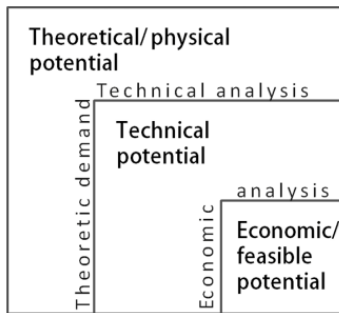
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 mukaisesti hukkalämpöä kuvataan seuraavasti; *”hukkalämmöllä ja -kylmällä’ tarkoitetaan teollisuus- tai sähköntuotantolaitoksissa tai palvelualalla sivutuotteena väistämättä syntyvää lämpöä tai kylmää, joka katoaisi käyttämättömänä ilmaan tai veteen, jos sitä ei johdetaisi kaukolämmitys- tai jäähdytysjärjestelmään, jos on käytetty tai käytetään yhteistuotantoprosessia tai jos yhteistuotanto ei ole mahdollista”*

Hukkalämpö on prosessista poistuvaa lämpöenergiavirtaa esim. savukaasuissa, poistoilmassa, koneellisten jäähdytysten lauhdelämmössä tai jäähdytys- ja jätevedessä. Hukkalämpöä voidaan kutsua myös jäte- tai ylijäämälämmöksi. Tässä työssä hukkalämpöä kutsutaan ylijäämälämmöksi. Ensisijaisesti ylijäämälämpöä pyritään hyödyntämään muissa tuotantoon kuuluvissa prosesseissa siten, että ylimääräistä lämpöenergiaa syntyy mahdollisimman vähän. (Heikkilä & Kiuru. 2014, 10)

Teollisuus- ja tuotantolaitoksissa esiintyy ylijäämälämpöä erilaisissa ominaisuuksissa ja muodoissa. Kohteiden erilaisuuden vuoksi on tärkeää, että jokainen ylijäämälämpökohde tarkastellaan yksilöinä. Ylijäämälämmön tarkastelussa voidaan kuitenkin esittää joitain ohjeita ja peruseriaatteita. Yleisimpiä vaikuttavia tekijöitä ylijäämälämmön hyödyntämismahdollisuuksiin ovat entalpiavirta ja sen suuruus, lämpötilataso, väliaineen puhtaus ja kemialliset ominaisuudet sekä lämpövirran faasi ja väliaine. (Heikkilä & Kiuru. 2014, 10)

Ylijäämälämpöön vaikuttavien tekijöiden ollessa tarpeeksi huonoja, lämpöenergian talteenottaminen voi muuttua kannattamattomaksi tai mahdottomaksi. Suuren ylijäämälämpöpotentiaalin hyödyntämisen ollessa kannattamaton, on aiheellista tutkia voidaanko prosessin varhaisempia vaiheita muuttamalla parantaa energiatehokkuutta. (Heikkilä & Kiuru. 2014, 11) Ylijäämälämmön hyödyntämiselle voi olla myös muita esteitä, kuten lämmön hyödyntämiskohteiden puuttuminen, tekniikan epäluotettavuus tai sen puuttuminen sekä poliittiset, lainsäädännölliset tai kansalaismielipiteet. Lainsäädännöllisiä esteitä ovat esimerkiksi ympäristölainsäädännössä olevat parhaiden kylmäaineiden käyttöä rajoittavat tekijät. Toisaalta ympäristölupaehdot myös pakottavat ylijäämälämmön tehokkaaseen hyödyntämiseen päästörajoitukset ja BAT-vaatimukset huomioiden. (Heikkilä & Kiuru. 2014, 8) Ylijäämälämmön talteenottamiseen vaikuttaa myös saatavuuteen vaikuttavat tekijät, kuten jatkuva ja katkonainen saatavuus sekä lämmönsiirron tyyppi (säteily, konvektio tai johtuminen) (Forman et al. 2016, 2).

Ylijäämälämpö itsessään jaotellaan pääasiassa kolmeen eri potentiaaliluokkaan, teoreettiseen, tekniseen ja ekonomiseen potentiaaliin. Potentiaalin teoreettisessa tarkastelussa tyypillisesti ylijäämälämpöä tutkitaan fysikaalisilla rajoitteilla. Teknisen potentiaalin lähtökohtina ovat teoreettiset rajoitteet, huomioiden myös käytössä olevien teknologioiden rajoitteet. Potentiaalin ekonomisessa tarkastelussa tutkitaan kokonaisuudessaan teknologian käytön kannattavuutta. Kuvasta 11 voidaan nähdä kuinka potentiaalit liittyvät toisiinsa ja niiden väliset rajapinnat. (Brückner et al. 2015, 2)



Kuva 11. Ylijäämälämpöpotentiaalien esitys graafisesti (Brückner et al. 2015, 2)

3.1 Ylijäämälämpökohteen tunnistaminen ja hyödyntäminen

Erilaisten ylijäämälämpökohteiden lämmöntalteenottomahdollisuuksien tunnistaminen ja arviointi tuotantolaitoksissa voi olla haastavaa varsinkin, jos valitaan ekonominen potentiaali tarkastelutavaksi. Tuotantolaitosten suuret kokoluokat ja monimutkaisuus hankaloittavat sopivimman kohteen tunnistamista ja mihin saatava ylijäämälämpö voitaisiin siirtää. Lisäksi, vaikka kohteet tunnistetaan, voi ongelmia ilmetä prosessien yhteensopivuudessa lämpöä tarvitsevien kohteiden ja ylijäämälämpökohteiden välillä. Kohteiden välisiä ristiriitoja aiheuttaa tyypillisesti ajallinen tai tehtasollinen yhteensopimattomuus. Lopulta oikean teknologian valitseminen voi olla vaikeaa laajan valikoiman tai sen puutteen vuoksi. (Woolley et al. 2018, 3)

Ylijäämälämpökohteen tunnistaminen aloitetaan paikkakartoituksella, jossa selvitetään todennäköisimmät lämpönielut ja -lähteet lämmöntalteenotolle. Tiedot olisi syytä kirjata laite-, prosessi- ja laitoskohtaisesti suurimpien kohteiden osalta, sekä tunnistetut lämmönlähteet tulisi suhteuttaa laitoksen kokoon ja toimintaan. Saadut tulokset ovat yleensä numeerisia ja kuvailevia. Suositeltavaa on myös pyrkiä havaitsemaan vähintään yhtä monta potentiaalista lämmönlähdettä kuin nielujakin lämmöntalteenoton hyödyntämisen mahdollistamisen varmistamiseksi. (Woolley et al. 2018, 3)

Ylijäämälämpökohteista voi olla olemassa olevia laitoskohtaisia energiakatselmuksia tai muuta hyödyllistä dataa tuotantolaitosten kasvattaessa prosessien monitorointia ja automaatiota. Jos kuitenkin tarvitaan lisädataa, on olemassa kolme suositeltua lähestymistapaa datan keräämiseen ylijäämälämpökohteista. Tyypillisesti lähestymistavat koostuvat tarkkuusjärjestyksessä empiirisistä mittauksista, tiedonhankinnasta laitevalmistajien spesifikaatioista

tai laitoksen olemassa olevasta tietokannasta sekä teoreettisesta laskennasta. On suositeltavaa kehittää laitoksen datan keräystä todettujen menetelmien avulla, jotta tulevaisuudessa seuranta on helpompaa. (Woolley et al. 2018, 4)

Ylijäämälämmön ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi myös valittavaan lämmöntalteenotto teknologiaan. Valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat tyypillisesti kohteessa vallitsevat ominaisuudet, kuten lämmönlähteen väliaine, lämmönsiirtotapa, käyttölämpötilat ja laitteiston koko. (Woolley et al. 2018, 5)

3.2 Ylijäämälämpö energiateollisuudessa

Energiateollisuudessa ylijäämälämpöpotentiaali koostuu pääasiassa kattila ja yhteistuotantolaitosten savukaasujen lämmöntalteenotosta sekä sähköasemien lämpöhäviöiden ja kaukojäähdytyksen hyödyntämisestä. Savukaasujen lämmöntalteenotossa erillisellä lämpöpumpulla hyödynnetty osa määritellään ylijäämälämmöksi, kun taas esimerkiksi yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotantoa ei katsota ylijäämälämmöksi. (Rämä et al. 2020, 14-15) Lämpöpumpulla suoraan savukaasuista tuotettua lämpöenergiaa voidaan hyödyntää kaukolämmössä tai erillisellä savukaasujen lämmöntalteenotolla, jotka hyödyntävät latenttilämpöä kuten esimerkiksi savukaasupesurit. Varsinkin savukaasujen sisältämän vesihöyryn lauhtuessa vapautuvaa latenttilämpöä hyödyntäviä ratkaisuja voidaan parantaa lämpöpumpulla pudottamalla kaukolämmön paluuveden lämpötilaa. Lämpötilan laskiessa pystytään suurempi osuus savukaasujen energiasisällöstä ottamaan talteen. Kytkenässä lämpöpumppu hyödyntää kaukolämmön paluuta lämmönlähteenä tuottamalla samalla riittävän lämmintä vettä kaukolämmön menoveden puolelle, tehostaen samalla savukaasujen lämmöntalteenottoa. Toisaalta lämpöpumpun ottama lämpö on poissa primäärisestä lämmöntuotannosta yhteistuotantolaitoksilla. Paluulämpötilan ollessa tarpeeksi matala, lämpöpumppu voi hyödyntää suoraan lämmönlähteenä myös savukaasuja. Savukaasujen lämmöntalteenotto on mahdollista etenkin vetypitoisia (maakaasu) tai kosteita polttoaineita (hake, turve) käyttäessä. (Rämä et al. 2020, 17)

Ylijäämälämmön määritelmä on kuitenkin monitulkintainen savukaasun lämmöntalteenoton osalta ilman lämpöpumppua, koska ylijäämälämmöntalteenotto voidaan katsoa

lisäinvestointina osaksi yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotantoa. Ylijäämälämmön määritelmää (EU 2018/2001, artikla 2, kohta 9) ei ole varsinaisesti määritelty tällaiseen rajatapaukseen. (Rämä et al. 2020, 17) Lisäksi erikoistapauksena ylijäämälämmöstä yhteistuotantolaitoksilla ovat sisäiset jäähdytyskytkennät, jolla pystytään jäähdyttämään esimerkiksi generaattoreita. Jäähdytyskiertoa jäähdytetään erikseen lämpöpumpuilla. (Rämä et al. 2020, 15)

Yksi kaupunkialueiden ylijäämälämmönlähde on häviösähkö, joka muodostuu muuntamoiden ja sähköasemien jännitetaso muutos mukana. Syntyvät häviöt ovat suhteellisen pieniä, mutta jotkut kohteet ovat kapasiteetiltaan suuria sekä määrällisesti sähköasemia on paljon. Lisäksi sähkönkulutuksen ollessa suurta, ylijäämälämpöpotentiaali mahdollisesti kasvaa. (Rämä et al. 2020, 15)

Direktiiveissä ei oteta erikseen kantaa kaukojäähdytyksestä ylijäämälämmönlähteenä, vaikka ylijäämälämmön yleismäärittelyyn se soveltuu hyvin. Lämpöpumppujen avulla kaukojäähdytyksen ja -lämmityksen yhdistämistä on kuitenkin jo pitkään ollut kokemusta. Tällä tavoin tuotettua jäähdytystä ja lämpöä ei nyky muodossaan katsota direktiivien mukaan ylijäämäkylmäksi tai -kuumaksi. Tulevaisuudessa kaukojäähdytystä voisi olla mahdollista hyödyntää keräämällä kaukojäähdytysverkon alueelta lauhdelämpöä pienemmiltä kohteilta, kuten eri kylmälaitteiden lauhduttimista. Tällä tavoin pystyttäisiin laskemaan lauhtumislämpötilaa paikallisissa prosesseissa sekä keskittämään talteenotettu lämpö lämpöpumppuprosessiin. (Rämä et al. 2020, 15)

4 Palaminen ja savukaasut

Tyypillisesti palamistarkasteluissa polttoaine koostuu vain viidestä eri alkuaineesta, jotka ovat vety, happi, hiili, typpi ja rikki. Savukaasutarkasteluissa yleensä vain näiden alkuaineiden määrillä ja reaktioilla on merkitystä, koska polttoaineet koostuvat pääsääntöisesti niistä. Tarkastelemalla reaktioita voidaan laskea syntyvän savukaasun koostumus ja määrä sekä tarvittava ilma- tai happimäärä täydellisessä palamisessa. (Raiko et al. 2002, 34)

Palamisessa polttoaineen molekyylien heikot sidokset yleensä purkautuvat ja korvautuvat vahvemmillä sidoksilla, samalla vapauttaen systeemiin ylimääräisen molekyylien sidosenergian. Sidosenergian vapautuminen nostaa usein merkittävästi lämpötilaa. (Raiko et al. 2002, 31) Palamista ja savukaasuja analysoidaan jatkuvasti käynnissä olevalla kattilalaitoksella. Analysointien perusteella pystytään päättämään polttoaine-ilmasuhteen oikeellisuutta sekä savukaasujen koostumusta. (Huhtinen et al. 2004, 83)

4.1 Savukaasujen määrittäminen ja koostumus

Polttoaine jaetaan poltettaessa reagoimattomiin ja reagoiviin komponentteihin, joista pystytään selvittämään palamisessa syntyvät ja kuluvat ainemäärät. Aluksi valitaan tarkasteltava polttoainemäärä, joka jaotellaan komponentteihin. Tyypillisesti nestemäisillä ja kiinteillä polttoaineilla polttoainemäärä tehdään massayksikköä kohden (1 kg). Polttoainekoostumukset esitetään massaosuuksina vety-, hiili-, happi-, rikki-, typpi-, vesi- ja tuhkapitoisuuksina. Polttoainekoostumuksesta palavia komponentteja ovat vety (H_2), hiili (C) ja rikki (S), kun taas polttoaineessa oleva happi (O_2) vähentää osaltaan tarvittavaa happimäärää palamisessa. Polttoaineen inerttikaasukomponentit hiilidioksidi, typpi ja vesihöyry siirtyvät savukaasuihin reagoimattomina. Myöskään tuhka ei reagoi palamisreaktiossa. Reaktioyhtälöiden avulla pystytään määrittämään syntyvien savukaasujen ja stökiometrisen (teoreettisen) hapen ja ilman määrät. (Raiko et al. 2002, 36-37)

Polttoaineen komponenttien palamisreaktiot on esitetty nettoreaktioina kaavoissa 1, 2 ja 3. Kaavoista selviävät lähtöaineet ja lopputuotteet, jotka ovat esitetty palamisnettoreaktioina. Kaavat ovat yksinkertaistettuja, koska muodostuvien savukaasujen ja palamisilmantarpeen laskentaa varten ne antavat riittävät tiedot. Todellisuudessa reaktioissa on monia eri välivaiheita, jotka monimutkaistavat reaktioita. Polttoaineen palaessa sen tyypillisesti yleisin palava komponentti on hiili. Käytännössä reaktiossa hiili reagoi hapen kanssa synnyttäen hiilidioksidia ja luovuttaen samalla lämpöä. (Huhtinen et al. 2004, 84) Hiilen palamisreaktio voidaan havaita kaavasta 1.



Reaktioyhtälöstä voidaan myös nähdä reaktion määräsuhteet mooleissa. Hiilen palaessa tarvitaan yksi mooli hiiltä ja happea puhtaaseen palamiseen. Epäpuhtaassa palamisessa syntyy hiilimonoksidia CO. (Huhtinen et al. 2004, 84)

Vedyn palaessa tarvitaan kaksi moolia vetyä ja yksi mooli happea puhtaaseen palamiseen. Palamisen lopputuotteena syntyy kaksi moolia vettä. Palaessa vesi on tyypillisesti puhdasta vesihöyryä. (Huhtinen et al. 2004, 84) Kaavassa 2 on esitetty vedyn nettoreaktioyhtälö.



Rikin palamisen nettoreaktioyhtälö voidaan nähdä kaavasta 3. Yhtälössä yksi mooli rikkiä ja happea reagoi keskenään synnyttäen rikkioksidia. Rikkioksidista pieni osuus reagoi edelleen kattilassa hapen kanssa muodostaen rikkitrioksidia (SO₃). Savukaasujen sisältämän veden kanssa rikkitrioksidi muodostaa myös rikkihappoa. Rikki ja sen muodostamat yhdisteet ovat haitallisia ympäristölle ja kattilalle. (Huhtinen et al. 2004, 84)



Hiilen, vedyn ja rikin lisäksi polttoaineissa on lisäksi muitakin komponentteja, jotka vaikuttavat palamistapahtumaan, vaikka eivät varsinaisesti pala. Näitä komponentteja ovat typpi, happi, tuhka ja kosteus. Polttoaineen typpi muuttuu osittain ympäristölle haitalliseksi typpioksidiksi. Happipitoisuus taas vähentää palamiseen tarvittavaa palamisilman tarvetta. Polttoaineen tuhkan tietyt komponentit (Na, V) lisäävät palamisnopeutta toimien palamisreaktion katalyytteina. Tuhkapitoisuus kasvattaa myös savukaasujen pölypitoisuutta sekä puhdistustarvetta. Polttoaineen sisältämä kosteus höyrystyy ennen palamista vähentäen lämpöarvoa. Palamistarkasteluissa voidaan olettaa typen, tuhkan ja kosteuden siirtyvän suoraan savukaasuihin. (Huhtinen et al. 2004, 84)

4.2 Palamisilmantarve ja ilmakerroin

Yleisesti polttoaineen palamisilmantarve lasketaan yhtä polttoainekiloa kohden. Palamisilmantarpeen laskemista varten on kuitenkin ensin selvitettävä kattilaan syötettävän polttoaineen määrä. Palamisilman määrän tarkastelu aloitetaan polttoaineen koostumuksen selvityksestä ja palamisen reaktioyhtälöistä. Tyypillisesti polttoaineen koostumus ilmoitetaan painoprosenteina tai paino-osuuksina kilossa polttoainetta. (Huhtinen et al. 2004, 84) Polttoaineen koostumuksen arvot saadaan selvitettyä polttoaineanalyysillä. Reaktioyhtälöissä reaktiokomponentit ovat esitetty mooleina, joten polttoaineen koostumus on muutettava myös mooleiksi. Polttoaineen komponenttien grammaosuudet jaetaan molekyylipainoilla tiedon saavuttamiseksi. (Huhtinen et al. 2004, 85)

Polttoaineen palamiseen tarvittava kokonaishappimäärä voidaan selvittää reaktioyhtälöiden avulla. Laskemalla yhteen jokaiseen reaktioyhtälöön tarvittavat hapen määrät sekä vähentämällä siitä polttoaineen sisältämä hapen määrä, saadaan selville teoreettinen hapen tarve. Palamiseen tarvittava happi saadaan ilmasta, joka sisältää muitakin kaasukomponentteja. Suurimmaksi osin ilma sisältää kuitenkin vain typpeä (78 %) ja happea (21 %) sekä argonia (1 %), joka usein sisällytetään typen osuuteen. Palamiseen tarvittava teoreettinen kuiva ilmamäärä saadaan laskettua kertomalla teoreettinen hapen määrä hapen suhteella ilmassa (4,76). Teoreettinen ilmamäärä saadaan laskettua kaavalla 4. Määrän muuttamiseksi grammoiksi tai tilavuudeksi on käytettävä ilman molekyylipainoa (28,96 g/mol) tai moolitilavuutta (22,5 l/mol). (Huhtinen et al. 2004, 85)

$$N_{i(teor)} = N_{O_2(teor)} * 4,76 \quad (4)$$

$N_{O_2(teor)}$ = teoreettinen palamishapen määrä

$N_{i(teor)}$ = teoreettinen palamisilman määrä

Tarkasteltaessa palamisilmaa on syytä tuntea ilman koostumus tarkasti. Todellisuudessa palamisilma on kostea, jolloin ilman vaihteleva vesihöyrypitoisuus on huomioitava.

Vesihöyrypitoisuus voidaan esittää suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan avulla. Ilmassa olevan vesihöyryn mooliosuus voidaan laskea kaavalla 5. (Raiko et al. 2002, 34)

$$y_{H_2O} = \frac{\varphi p_{H_2O}^{\text{sat}}}{p_{i,tot}} \quad (5)$$

y_{H_2O} = ilman sisältämän vesihöyryn mooliosuus

φ = ilman suhteellinen kosteus

$p_{H_2O}^{\text{sat}}$ = lämpötilaa vastaavan kylläisen höyryn osapaine

$p_{i,tot}$ = kostean ilman paine

Palamisilman tarpeen tarkastelussa tyypillisesti ensimmäisenä lasketaan palamisilma kuivana. Todellisen kostean palamisilman tarpeen selvittämiseksi hyödynnetään kuivan ilman tarpeen ja ilmassa olevan kosteuden suhdetta. Suhteen laskemiseksi käytetään ilman sisältämää vesihöyryn mooliosuutta. Laskenta tapahtuu kaavalla 6. (Raiko et al. 2002, 35) Kun suhde on tiedossa pystytään sen avulla lisäämään ilman sisältämä kosteus teoreettiseen palamisilmaan.

$$\frac{N_{H_2O}}{N_{ik}} = \frac{y_{H_2O}}{1 - y_{H_2O}} \quad (6)$$

N_{H_2O} = ilman sisältämä kosteus

N_{ik} = kuivan ilman tarve

Todellisuudessa teoreettisella minimi-palamisilmamäärällä ei saavuteta polttoaineen täydellistä palamista, vaan täydellisen palamisen varmistamiseksi tulipesään syötetään ylimääräistä ilmaa. Teoreettisen ja käytetyn todellisen ilmamäärän suhde on nimeltään ilmakerroin (λ). Ilmakerroin vaihtelee polttoaineiden mukaan. Kiinteillä polttoaineilla ilmakerroin on

yleensä korkeampi, kuin kaasumaisilla tai nestemäisillä polttoaineilla. (Huhtinen et al. 2004, 86) Käytännössä ilmakerroin on aina enemmän kuin 1, koska savukaasuissa olisi muuten palamattomia komponentteja (esim. hiilivetyjä tai hiilimonoksidia) (Perttula. 2000, 27). Todellinen palamisilma määrä saadaan kaavalla 7.

$$N_{i(tod)} = N_{i(teor)} * \lambda \quad (7)$$

$N_{i(tod)}$ = todellinen palamisilman määrä

λ = ilmakerroin

4.3 Savukaasujen koostumus

Savukaasujen koostumus ja määrä pystytään määrittämään samalla tavalla kuin palamisilman määrä palamisreaktioiden ja polttoaineen koostumuksen avulla. Palamisreaktioiden mukaan jokaista polttoaineen komponenttia kohden palaessa syntyy yhtä monta moolia lopputuotetta. Palamisen lopputuotteiden lisäksi savukaasuihin tulee merkittävä määrä typpeä ilman mukana. Savukaasuihin tulee typpeä 3,76 kertaa hapen määrä. Lisäksi savukaasuihin lisätään palamattomat komponentit, kuten vesi. Laskemalla yhteen kaikki komponentit saadaan syntyvän savukaasun määrä. Laskenta voidaan todeta kaavasta 8. (Huhtinen et al. 2004, 86)

$$N_{sk(teor)} = N_C + N_{H_2} + N_S + 3,76 * N_{O_2(teor)} + N_{N_2} + N_{H_2O} \quad (8)$$

$N_{sk(teor)}$ = teoreettinen savukaasujen määrä

N_C = hiilen moolimäärä

N_{H_2} = vedyn moolimäärä

N_S = rikin moolimäärä

N_{N_2} = typen moolimäärä

N_{H_2O} = veden moolimäärä

Laskettaessa todellista savukaasujen määrää, on otettava huomioon kattilan ilmakerroin. Todellinen savukaasujen määrä voidaan laskea kaavalla 9.

$$N_{sk(tod)} = N_{sk(teor)} + (\lambda - 1) * N_{i(teor)} \quad (9)$$

$N_{sk(tod)}$ = todellinen savukaasujen määrä

Lopulta polttoaineen massavirran ja moolimassojen avulla voidaan laskea savukaasujen massavirta eri polttoaineen massavirroilla. Tämä tapahtuu kertomalla polttoainekilogrammaa kohden oleva savukaasujen massavirta halutulla polttoaineen massavirralla.

4.4 Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti (c_v vakiotilavuudessa ja c_p vakiopaineessa) kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan lämmittämään aineen yhtä painoyksikköä yhden lämpötila yksikön verran. Kaasuilla on huomioitavaa, että ominaislämpökapasiteetti muuttuu huomattavasti lämpötilan ja paineen funktiona. Pieniä muutoksia paineessa ei kuitenkaan huomioida käytännön esimerkeissä. (Perttula. 2000, 27-28)

Lämpötekniisiä tarkasteluja varten on syytä tuntea savukaasujen lämmönsiirtoon vaikuttavat ominaisuudet, joista yksi tärkeimmistä on ominaislämpö. Savukaasut koostuvat useista sekoittuneista kaasuista, joilla on eri lämmönsiirto-ominaisuudet. Tarkasteluja varten on olemassa taulukoituja arvoja eri kaasujen aineominaisuuksille, joista pystytään määrittelemään tarkemmin savukaasujen ominaisuudet. Tietylle savukaasulle määritellään ominaislämpökapasiteetti osakaasujen massaosuuksien keskiarvona. Laskenta tapahtuu kaavalla 10. (Huhtinen et al. 2004, 96-97)

$$c_{p\ sk} = \sum x_k c_{p\ k} \quad (10)$$

$c_{p\ sk}$ = savukaasun ominaislämpökapasiteetti kJ/kg °C

x_k = kaasukomponentin k massa osuus

$c_{p\ k}$ = kaasukomponentin k ominaislämpökapasiteetti

4.5 Polttoaineen lämpöarvo

Lämpöarvo on energiantuotannon kannalta merkittävin polttoaineen ominaisuus, joka kertoo polttoaineesta saatavan lämpöenergian polttoainemassayksikköä kohden. Lämpöarvoa ilmaistaan tyypillisesti kahdessa eri muodossa, ylempänä (kalorimetrinen) ja alempana (tehollisena) lämpöarvona. Ylemmän lämpöarvon mittaaminen tapahtuu kalorimetrialitteessa, jossa polttoaineen sisältämän höyryn lämpöenergia käytännössä sisältyy lämpöarvoon. Alemmassa lämpöarvossa höyryn lämpöenergiaa ei lasketa mukaan lämpöarvoon, vaan se käytännössä häviää savukaasujen mukana. Alempi lämpöarvo vastaa paremmin todellisia käyttöolosuhteita, joissa ei pystytä hyödyntämään höyryn lämpösisältöä. (Huhtinen et al. 2004, 43)

Kosteiden kotimaisten polttoaineiden kosteus vaihtelee tyypillisesti paljon, joten on syytä käyttää lämpöarvon laskemiseen kuivan polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Polttoaineen kosteuden ollessa tiedossa pystytään määrittämään laskennallisesti lämpöarvo käyttökosteudessa. (Huhtinen et al. 2004, 43)

Polttoaineen tehollinen ja kalorimetrinen lämpöarvo pystytään arvioimaan likimääräisesti eri polttoaineille sopivilla korrelaatioilla. Korrelaatioiden avulla pystytään määrittelemään kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo kuivalle ja kostealle polttoaineelle. Turpeelle on olemassa oma korrelaatiokaava. Laskenta tapahtuu kaavoilla 11, 12, 13, 14 ja 15. (Raiko et al. 2002, 52-53)

$$q_{s(D)} = 338,2C_{p-\%} + 1442,8\left(H_{p-\%} - \frac{O_{p-\%}}{8}\right) + 94,2S_{p-\%} \quad (11)$$

$$q_{s(G)} = (15,22H_{p-\%} + 937)\left(\frac{C_{p-\%}}{3} + H_{p-\%} - \frac{O_{p-\%} - S_{p-\%}}{8}\right) \quad (12)$$

$$q_{s t} = 336C_k + 1420H_k - 153O_k + 0,72O^2 + 94S_k \quad (13)$$

$$q_i = q_s - 219,6H_k \quad (14)$$

$$q_{iw} = \frac{q_i(100 - w)}{100} - 24,43w \quad (15)$$

$q_{s(D)}$ = kiinteiden polttoaineiden kalorimetrinen lämpöarvo, Dulong (kJ/kg)

$q_{s(G)}$ = kiinteiden polttoaineiden kalorimetrinen lämpöarvo, Grumell & Davies (kJ/kg)

$q_{s t}$ = turpeen kalorimetrinen lämpöarvo (kJ/kg)

q_i = tehollinen lämpöarvo kaikille polttoaineille (kJ/kg)

q_{iw} = kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo kaikille polttoaineille (kJ/kg)

$C_{p-\%}$ = hiilen paino-% tuhkattomasta kuiva-aineesta (%)

C_k = hiilen paino-% kuiva-aineesta (%)

$H_{p-\%}$ = vedyn paino-% tuhkattomasta kuiva-aineesta (%)

H_k = vedyn paino-% kuiva-aineesta (%)

$S_{p-\%}$ = rikin paino-% tuhkattomasta kuiva-aineesta (%)

S_k = rikin paino-% kuiva-aineesta (%)

$O_{p-\%}$ = hapen paino-% tuhkattomasta kuiva-aineesta (%)

O_k = hapen paino-% kuiva-aineesta (%)

w = vesipitoisuus paino-% kosteasta polttoaineesta (%)

5 Savukaasujen lämmöntalteenotto savukaasupesurilla

Savukaasupesurissa vesi ja likaiset savukaasut ovat kosketuksissa toisiinsa, missä vesi leviää pieniksi pisaroiksi ja agglomeroituu savukaasuissa olevien pölyhiukkasten kanssa. Veden saa hajoamaan ja leviämään pesuriin ruiskutetun veden tai savukaasun virtauksen tarpeeksi suuri nopeus. Pisaraerottimessa vesi-pölypisarat erotetaan savukaasuista. (Huhtinen et al. 2004, 255)

Saatavilla oleva savukaasupesurin lämpöteho on verrannollinen siihen, kuinka paljon savukaasujen saadaan jäädytettyä. Jos savukaasupesurin lämpöteho käytetään esimerkiksi kaukolämmön paluuveden lämmitykseen, saadaan alhaisemmalla paluu veden lämpötilalla tehostettua jäähtymää. (Huhtinen et al. 2004, 255-256) Yhteistuotannossa kaukolämmön paluuveden lämmitys tyypillisesti vähentää höyryturbiinin sähkötehoa ja jäädytystä vähentäen myös pesurin kannattavuutta taloudellisesti. Sen sijaan lämmityskattiloissa pesureita käytetään Suomessa enemmän kannattavuuden parantamiseksi. Pesurit ovatkin edullisimpia lämpökeskuksissa, jotka käyttävät polttoaineena kosteita puupolttoaineita. (Flyktman et al. 2012, 22)

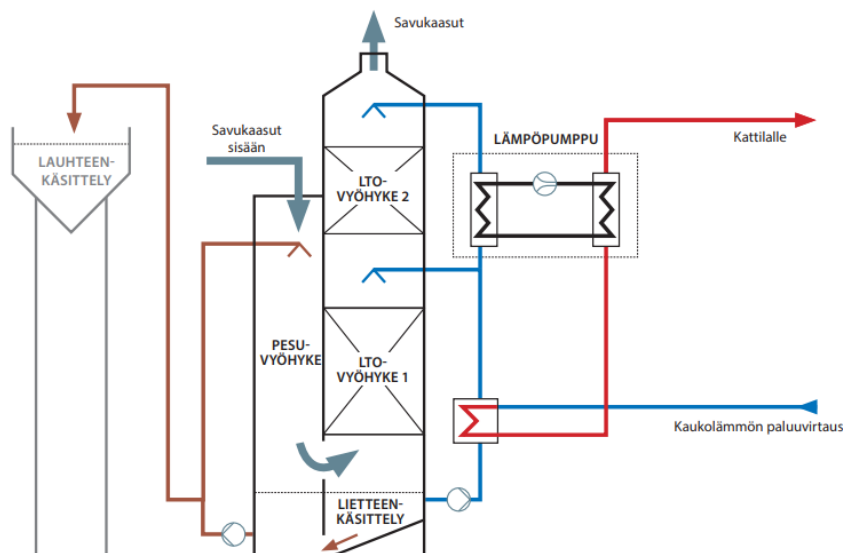
Lämpötehoon vaikuttaa oleellisesti savukaasujen kosteus, koska savukaasujen vesihöyryn osapaine on korkeampi mitä kosteampaa savukaasu on. Osapaineen ollessa korkeampi vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi korkeamassa lämpötilassa luovuttaen lämpöenergiaa lauhtuessaan. Pesurin toimintaa voidaan tehostaa lisäämällä prosessiin palamisilman kostutin, jonka tehtävä on kostuttaa palamisilman kautta savukaasuja sekä jäädyttää lopulta savukaasuja. Kostuttimella pystytään jäädyttämään savukaasupesurille ruiskutettu vesi alhaisempaan lämpötilaan, kuin kaukolämpövedellä on mahdollista. Ennen kostutinta savukaasupesurin kiertovesi jäädytetään epäsuorasti kaukolämmön paluuviedellä. (Huhtinen et al. 2004, 255-256)

Puraa ja kuorta polttoaineenaan käyttävillä laitoksilla lämmöntalteenottoteho savukaasupesurista on parhaassa tapauksessa n. 30 % kattilan kokonaistehosta. Suuri lämmöntalteenottoteho vaatii kuitenkin palamisilman kostutuksen pesurivedellä ja matalan kaukolämmön paluuvien lämpötilan (esim. 45 °C). Kostutuksen avulla savukaasupesurista saatava lämpöteho on suurempi ja tasaisempi, vaikka kaukolämmön paluuvien lämpötila vaihtelisi.

Lisäksi pesurin tehokkain toiminta-alue on kattilan nimellisteholla, koska pienellä osateholla ilmakerroin nousee ja savukaasut laimenevat pienentäen LTO-tehon osuutta. (Flyktman et al. 2012, 22-23)

Kattilan laskennallista kokonaishyötysuhdetta tarkasteltaessa voidaan päätyä tilanteeseen, jossa hyötysuhde on yli 100 %. Hyötysuhteessa verrataan kattilan ja pesurin yhteenlaskettua lämpötehoa alemman tehollisen lämpöarvon mukaan laskettuun polttoainetehoon. Alemman tehollisen lämpöarvon vuoksi polttoainetehoon ei sisälly polttoaineen sisältämän vedyn palamisreaktiossa tai kosteuden haihtumisesta syntyviä vesihöyryn lauhdelämpöjä. Hyötysuhteen osalta on suositeltavaa, että savukaasupesurin tuottama LTO-teho ja pesurilla varustetun laitoksen kattilateho esitetään omina arvoinaan väärin tulkintojen välttämiseksi. (Flyktman et al. 2012, 23)

Kuvassa 12 on havainnollistettu savukaasupesurin toimintaa ja tyypillistä savukaasupesurin ja lämpöpumpun kytkentää. Savukaasupesureissa, joissa ei käytetä lämpöpumppua kierto-vesilinjat kytketään suoraan lämpönielun lämmönvaihtimille. Lämmöntalteenottovyöhykkeet myös voidaan erotella omiin lohkoihinsa. Toimintaperiaatekuvassa on myös esitetty lauhteen- ja lietteenkäsittely ja savukaasujen kostutin pesuwyöhykkeenä.



Kuva 12. Savukaasupesurin toimintaperiaate (Caligo Industria Oy. 2023, 3)

5.1 Lämmöntalteenottotehon määrittäminen

Savukaasupesurissa lämmön siirtyminen savukaasuista savukaasupesuriin ruiskutettavaan nesteeseen tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa virtaava savukaasu jäähtyy pesuriin ruiskutettavan nesteen vaikutuksesta luovuttaen lämpöenergiaa nesteeseen. Toisessa vaiheessa savukaasujen kastepisteen jälkeen savukaasuissa lauhtunut vesihöyry vähennetään savukaasujen massavirrasta ja lasketaan savukaasujen jäähtyminen pesurista poistumislämpötilaan. Savukaasuihin siirtyvä jäähtymisen lämpöteho lasketaan kaavoilla 16 ja 17.

$$Q_{jääh} = \dot{m}_{sk,1} c_{p,sk} (T_{sk,1} - T_{sk,2}) \quad (16)$$

$$Q_{jääh} = \dot{m}_{sk,2} c_{p,sk} (T_{sk,2} - T_{sk,3}) \quad (17)$$

$Q_{jääh}$ = jäähtymisestä siirtyvä lämpöteho [kW]

$\dot{m}_{sk,1}$ = savukaasun massavirta [kg/s]

$\dot{m}_{sk,2}$ = savukaasun massavirta ilman lauhtunutta vesihöyryä [kg/s]

$c_{p,sk}$ = savukaasun ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]

$T_{sk,1}$ = savukaasun lämpötila ennen pesuria [°C]

$T_{sk,2}$ = savukaasun lämpötila kastepisteessä [°C]

$T_{sk,3}$ = savukaasun lämpötila pesurin jälkeen [°C]

Kolmannessa lämmönsiirtovaiheessa savukaasuissa oleva vesihöyry alkaa lauhtua vesilauhteeksi, savukaasujen ollessa kastepistelämpötilan alapuolella. Vapautunut höyrystymislämpö höyryn lauhtuessa tuottaa suurimman osan lämmöntalteenottotehosta. Savukaasujen kastepistelämpötila riippuu savukaasujen veden osapaineesta eli toisaalta savukaasujen sisältämän veden määrästä. Kylläisen höyryn paineen ollessa tarkastelulämpötilassa pienempi kuin savukaasujen vesihöyryn osapaine, savukaasuissa oleva höyry pyrkii lauhtumaan

vedeksi. (Huhtinen et al. 2004, 99) Savukaasuista lauhtunut vesi lasketaan osapaineen, kyl-
läisen höyryn paineen ja savukaasuissa olevan veden massavirran avulla kaavalla 18.

Ilmaylimäärä laskee savukaasujen kastepistelämpötilaa, koska vesihöyryn osapaine laskee
savukaasuissa ilmamäärän kasvaessa. Kastepistelämpötilat vaihtelevat tyypillisesti 40 - 60
°C välillä (Huhtinen et al. 2004, 99). Savukaasujen vesihöyryn lauhtumisesta syntyvä läm-
pöteho lasketaan kaavalla 19.

$$\dot{m}_{lauh} = \left(1 - \frac{p_{h2}}{p_{h1}}\right) \dot{m}_{sk H20} \quad (18)$$

$$Q_{lauh} = \dot{m}_{lauh} (h''_{kp} - h'_{sk,3}) \quad (19)$$

p_{h2} = vesihöyryn osapaine savukaasuissa [Pa]

p_{h1} = kylläisen vesihöyryn paine savukaasuissa pesurin jälkeen [Pa]

$\dot{m}_{sk H20}$ = savukaasuissa olevan veden massavirta [kg/s]

Q_{lauh} = lauhtumisesta siirtyvä lämpöteho [kW]

\dot{m}_{lauh} = savukaasuista lauhtuneen veden massavirta [kg/s]

h''_{kp} = kylläisen höyryn entalpia kastepistelämpötilassa [kJ/kg]

$h'_{sk,3}$ = kylläisen nesteen entalpia savukaasun ulostulolämpötilassa pesurissa [kJ/kg]

5.2 Lämmöntalteenottomenetelmät ja toiminta

Lämpötehon lisäksi lauhtumisesta syntyvä vesilauhde toimii poistettavan tuhkan kantoai-
neena sekä lisäksi poistaa klorideja, raskasmetalleja ja sulfaatteja. Tehokkaan lämmöntal-
teenoton kannalta tärkeintä on saavuttaa olosuhteet, joissa alitetaan savukaasujen kastepis-
telämpötila. Kastepisteen lämpötilatasoon vaikuttaa merkittävästi polttoaineen kosteus,
laatu, kaukolämmön paluulämpötila ja palamisen ilmakerroin. Palamisen ilmakerroin

vaikuttaa jäännöshapen määrään savukaasuissa, mikä on pyrittävä minimoimaan savukaasupesurin kannalta. Jos kastepistelämpötilaa ei saavuteta savukaasupesurissa, toimii savukaasupesuri kiertoveden haihduttimena. Lämpötehon kuluessa veden haihdutukseen, lämmöntalteenotto teho putoaa. Lisäksi prosessissa ei synny tuhkaa laimentavaa lauhdetta, mikä johtaa tuhkan konsentroitumiseen ja tukkeumaongelmiin. Haihdutustilanne myös ajaa käyttämään enemmän raakavettä. (Nummila. 2015; Nummila. 2023)

Savukaasupesuria voidaan käyttää yhdessä kostuttimen kanssa, jolloin kastepistelämpötila saavutetaan melko varmasti riippumatta kaukolämmön paluulämpötilasta. Käyttäessä kostutinta pesurissa ei normaalisti ole tarvetta raakavedelle ja lauhdetta syntyy tarpeeksi tukkeumaongelmien välttämiseksi. KytKentä on kuitenkin monimutkainen ja hankaläsäätöinen. Kostutuksella on myös suora vaikutus varsinaiseen polttoprosessiin, kuten savukaasujen massavirran kasvaminen. Lisäksi kastepistelämpötilan noustessa myös happokastepistelämpötila nousee, mikä lisää korroosio-ongelmia kattilan loppupäässä. (Nummila. 2015)

Savukaasupesuri voidaan myös toteuttaa lämpöpumppukytkennällä, jolloin lämpönielun korkea lämpötila (esim. kaukolämmön paluueden lämpötila) voidaan laskea saavuttaen suurempi lämmöntalteenotto teho. Lisäksi saavutetaan varmemmin savukaasujen kastepistelämpötila, jolloin syntyy riittävästi lauhdetta myös tuhkan poistamiseen savukaasupesurista. Lämpöpumppukytkentä ei vaikuta kattilan palamisprosessiin, mutta kytkentä on monimutkainen ja tarvitsee dynaamisen säädön parhaimman hyödyn saavuttamiseksi. (Nummila. 2015) Toisaalta korkea paluueden lämpötila pienentää tuotantolaitoksilla yleisesti olevien savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmien sekä muun matalasta paluueden lämpötilasta hyötyvän tuotannon määrää, kuten yhteistuotantosähköä. Ongelmaa voidaan vähentää tai poistaa kokonaan paluueden lämpötilaa alentavalla lämpöpumppukytkennällä sekä muulla lämmönkulutuksella heti ylijäämälämmön syöttöpisteen jälkeen. (Sirola & Tiitinen. 2018, 3)

Savukaasupesurin toteutus ilman kostutinta tai lämpöpumppua on riippuvainen kaukolämmön paluulämpötilasta. Jos paluulämpötila on korkea ja kastepistelämpötilaa ei saavuteta, pesuri voi muuttua haihduttimeksi. Ongelma korostuu tyypillisesti kylminä ajanjaksoina, jolloin paluulämpötila on korkea ja lämpötehon tarve on suurempi. Ilman kostutinta tai lämpöpumppua savukaasupesurin kytkentä on yksinkertaisempi. (Nummila. 2015)

Savukaasupesureilla on useita tyypillisiä ongelmia, jos oikeita toimintatapoja tai -arvoja ei saavuteta. Savukaasujen vesihöyryn huono lauhtuminen johtaa suuttimien ja savukaasupesurin tukkeutumiseen lietteestä sekä korroosio-ongelmiin. Korroosio-ongelmat johtuvat savukaasupesuriin konsentroituneesta rikki- ja suolahaposta. Savukaasupesurissa käytetty lipeä voi myös aiheuttaa ongelmia vääränlaisella syötöllä. Lipeän annostelun ollessa väärä savukaasupesuri voi alkaa kuohuta, koska lipeä reagoi orgaanisen aineen kanssa muodostaen saippuaa. Kuohumisongelma johtuu yleensä huonon palamisen synnyttävistä tervoista (orgaaniset yhdisteistä) sekä korkeasta pH-arvosta. Lipeän määrästä riippumatta kuohumisriskiä kasvattaa pH-arvoa nostava alkalinen lentotuhkan määrä ja korkeat kiintoainepitoisuudet pesurissa esim. letkusuotimen ollessa viallinen. Myös huono lauhtuminen kasvattaa kuohumista, koska likaa ei saada pois pesurista. Toisaalta korkea pH-arvo pesurissa pienentää raskasmetallien liukenemista lauhteeseen, mikä vähentää lauhteen laadullisia ongelmia. Liian suuri lipeä määrä aiheuttaa lipeällä neutraloitavan sulfaatin (Na_2SO_4) kivettymistä pesurissa. Ongelma esiintyy varsinkin kohdissa, jossa jäädyttävän vesivirtaaman ja kuumien savukaasujen kohtaamisessa syntyvä roiske pääsee kuivumaan. Yleensä ongelma johtuu korkeasta polttoaineen rikkipitoisuudesta tai vähäisestä lauhtumisesta. Nämä aiheuttavat korkean sulfaattikonsentraation vedessä, mikä kasvattaa erottumista kuumissa kohdissa. Lipeän annostelu toteutetaan prosessin vaatimusten mukaan (pH -säätö). (Nummila. 2015; Nummila. 2023)

Muita yleisiä ongelmia pesurin kanssa on myös huonosti toteutettu ohjaus ja automaatio sekä operaattorien tiedon puute pesurilaitoksesta, mikä kokonaisuudessaan johtaa laitoksen vääränlaiseen ajotapaan. Lisäksi lujitemuovipesureissa on ongelmaa niiden sulamisessa ja palamisessa liian suurilla lämpötiloilla. Lujitemuovin lisäksi pesureissa usein käytetään myös muovisia tätekappaleita, jotka eivät myöskään kestä korkeaa lämpötilaa. (Nummila. 2015; Nummila. 2023)

Yleisesti savukaasujen loppulämpötila savukaasupesurin jälkeen on n. 2-4 °C kaukolämpöverkon paluuv veden lämpötilaa korkeampi, jos kaikki savukaasuista saatavilla oleva lämmöntalteenottoenergia saadaan siirrettyä lämpönieluun (esim. kaukolämpöverkko tai muu matalalämpöinen lämpönielu). Joissakin tapauksissa, kuten prosessihöyryn osittaisessa tuotannossa tai yhteistuotantolaitoksilla savukaasuissa on enemmän hyödynnettävää lämmöntalteenottotehoa kuin lämpönielu kykenee vastaanottamaan. Näissä tapauksissa savukaasujen loppulämpötila nousee. Lämpönielun lämpöenergian vastaanottokykyä pystytään

parantamaan lämpöpumpulla, mikä mahdollistaa savukaasujen energiamäärän tehokkaamman hyödyntämisen. Lisäksi lämpöpumpulla pystytään jäähdyttämään savukaasuja tehokkaasti n. 30-35 °C loppulämpötilaan hyvällä COPh -arvolla. (Nummila. 2015; Nummila. 2023)

5.3 Kemikaalit

Savukaasupesureissa käytetään tavallisesti natriumhydroksidia (NaOH) neutralointikemikaalina, jonka kulutus kasvaa rikkipitoisuuden mukana lisäten kustannuksia. Natriumhydroksidia nimitetään myös lipeäksi. Kuitenkin lämpökeskuksilla kosteita puupolttoaineita käyttäessä neutralointikemikaalien käyttö on pientä HCl erotuksesta huolimatta, koska puusta tuleva emäksinen tuhka neutraloi syntyvää lauhdevettä. (Flyktman et al. 2012, 22)

5.4 Lauhteen, jäteveden ja lietteen käsittely

Savukaasupesureissa ja lauhduttimissa syntyvä lauhdevesi johdetaan selkeytsaltaasta suodatettuna ja neutraloituna vesistöön tai viemäriin asetuksen 445/2010 mukaisesti. Jos lauhdevesi johdetaan ojaan, se selkeytetään, saostetaan kemiallisesti ja suodatetaan. Lisäksi lauhdeveden ja tuhkalietteen käsittelyn vaatimuksista on sovittava ennalta paikallisen ympäristöviranomaisen kanssa. (Flyktman et al. 2012, 22, 33)

Savukaasupesurin lauhdeveden käsittelyssä käytetään puhdistinlaitteiden jätevesien käsittelyyn säädettyä asetusta 445/2010. Energiantuotantolaitoksen jätevesien laatu ja määrä on selvitettävä toiminnanharjoittajan toimesta. Lisäksi valtionneuvoston asetuksen 1022/2006 liitteessä 1 on määritelty vesiympäristölle haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet. (Flyktman et al. 2012, 32-33)

Lauhdeveteen liuenneet lyijy, sinkki ja kadmium vaikeuttavat eniten lauhdeveden johtamista yleiseen viemäriin. Savukaasupesurin lämmöntalteenottoasteen ollessa korkea, lauhdeveden haitta-ainepitoisuudet laimenevat suuremman syntyvän lauhdevesimäärän mukaan. Lisäksi

lauhdeveden pH-arvo ja kiintoainepitoisuudet vaihtelevat voimakkaasti. (Flyktman et al. 2012, 33)

Savukaasupesurien lietteet luokitellaan lähtökohtaisesti jätteeksi. Syntyvä jäte luokitellaan koostumuksen, syntyvän tai muun tekijän pohjalta. Suomessa on jätteiden luokitteluun käytössä ympäristöministeriön asetus ongelmajätteiden ja yleisimpien jätteiden luettelosta (YMa 1129/2001), jonka pohjana on EU:n komission päätös Euroopan jäteluettelosta (2000/532/EY). Lisäksi tuotannosta syntyvän jätteen laatu, määrä sekä terveys- ja ympäristövaikutukset ovat oltava tiedossa sekä siitä on pidettävä kirjaa tarpeen vaatiessa jätelain mukaisesti (Jätelaki 646/2011). (Flyktman et al. 2012, 30)

Ympäristöhallinnon laatimien jätesuunnitelmien ja jätelainsäädännön mukaisesti syntyvä tuhka pitäisi ensisijaisesti hyödyntää, mikäli se ei aiheuta liiallisia kustannuksia jätteen muuhun käsittelyyn verrattuna ja se on teknisesti mahdollista. Tuhka pitäisi pyrkiä kaatopaikkasijoituksen sijaan hyödyntämään materiaalina jätelain etusijajärjestyksen mukaan. Lisäksi puuperäisten ja muiden kotimaisten polttoaineiden tuhka tulisi lähtökohtaisesti hyödyntää lannoitevalmisteena ja vasta sitten maanrakennuksessa. (Flyktman et al. 2012, 31)

Ympäristönsuojelulaki (86/2000) 28 § määrittää, että kaikkeen jätteen ammattimaiseen tai laitospäiseen käsittelyyn ja hyödyntämiseen tarvitaan muutamia poikkeuksia laskematta ympäristölupa. Lupa haetaan ympäristölupaviranomaiselta tai aluehallintovirastosta jätteen määrän mukaan. Tuhkaa on mahdollista hyödyntää lannoitevalmisteena ilman ympäristölupaa, mikäli ehdot lannoitelainsäädännössä täyttyvät tai maanrakennuksessa ilmoitusmenettelyllä, jos ehdot täyttyvät maanrakennusasetuksen (VNa 591/2006) mukaisesti. (Flyktman et al. 2012, 31)

Tapauksissa jossa pesurin lauhdeveden käsittelyssä syntyvä tuhkaliete haetaan erikseen, on tuhkaliete toimitettava laitokseen, jossa on sallittua lietteiden käsittely ja vastaanotto ympäristöluvassa. Tuhkia kuljettavan tai välittäjän ammattimaisen jäteyrittäjän on oltava rekisteröitynä ELY-keskuksen ylläpitämässä jätehuoltorekisterissä. Jätelain (121 §) siirtoasiakirjavaatimus ei päde savukaasupesurissa syntyviin lietteisiin tai kattilan pesuun. (Flyktman et al. 2012, 31)

5.5 Käyttö

Savukaasupesureiden ensisijainen käyttö pölynerottamiseen on suhteellisen vähäistä, koska syntynyt jätevesi vaatii usein kalliit vedenpuhdistusjärjestelmät. Selluteollisuudessa savukaasupesurit ovat yleisiä, koska pesurissa syntyvät lietteet ja niihin sitoutunut lämpö voidaan palauttaa uudelleen prosessiin. Lisäksi pesureiden etuna on korkeissa savukaasujen lämpötiloissa pölyn erottaminen ilman, että savukaasut jäähtyvät merkittävästi. (Huhtinen et al. 2004, 255) Hiukkasten märkäpesu ei ole kuitenkaan välttämätöntä, jos käytetään sähkösuodatinta hiukkaserottimena. (Flyktman et al. 2012, 22).

Varsinaisesti rikinpoistoon savukaasuista on kehitetty siihen tarkoitettuja savukaasun pesumenetelmiä (rikkipesuri). Tämän tyyppinen pesuri poikkeaa tyypillisestä lämmöntalteenottoon tai savukaasujen puhdistukseen tarkoitetusta savukaasupesurista. Siinä savukaasuja puhdistetaan absorptiotornissa erityisellä kalsiumpohjaisella pesunesteellä. (Huhtinen et al. 2004, 257) Suurin osa Suomen polttolaitoksilla käytössä olevista märkäerottimista ovat rikkipesureita hiukkaserotimella varustettuna. Tilanteissa joissa käytetään esierottimena sykloonia, pesurin rakenne muodostuu erillisestä lämmöntalteenottoyksiköstä ja märkäerottimesta, joka on tarkoitettu karkeiden hiukkasten erotteluun. Tyypillisesti lämmöntalteenotto on toteutettu täytekappalekolonnina. (Flyktman et al. 2012, 22)

Savukaasupesurien varsinaisena hankintaperusteena on ollut taloudellinen hyöty, mikä syntyy savukaasujen vesihöyryn lauhtuessa lämmöntalteenotossa. Yleistyessään savukaasupesurit ovat kehittäneet laitosten savukaasupäästöjen hallintaa ja vähentäneet yleisesti päästöjä sekä kasvattaneet energiatehokkuutta. Yleistyminen on lisäksi nostanut laitoksien kokonaishyötysuhdetta. Toisaalta savukaasupesurien käyttö lisää huomattavasti lauhdeveden ja tuhkalietteen käsittelyä, mikä lisää käyttöturvallisuuteen samankaltaisia haitta tai etu näkökulmia. (Flyktman et al. 2012, 1-2, 22)

Hiukkaserotukseen pesumenetelmä ei ole kustannustehokas, koska yhtä tehokkaaseen tulokseen päästään edullisemmilla multisykloneilla. Sen sijaan vetykloridin (HCl) ja rikkidioksidin erottamiseen savukaasupesurit ovat tehokkaita. Turpeenpoltossa rikkidioksidin (sekä hiukkasten) erotusaste vaihtelee tyypillisesti 80 – 98 % välillä. Erotusaste nousee päästökaasun alkupitoisuuden mukana. Rikkidioksidin osalta pesuveden pH ja lämpötila vaikuttaa erotusasteeseen. Vetykloridin osalta erotusaste on yleensä 70 – 95 %. Savukaasuhiukkasten kanssa syötettyyn pesuvedeen erottuu lisäksi raskasmetalleja. (Flyktman et al. 2012, 22)

6 Savukaasujen lämmöntalteenotto katselmus

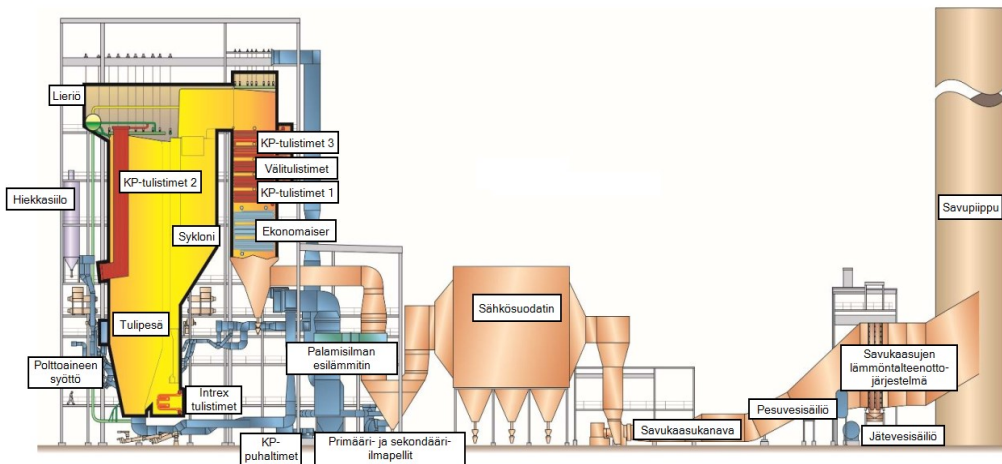
Tutkimuksen kohteena oleva Keljonlahden CHP-laitos on Jyväskylän suurin yhteistuotantolaitos. Keljonlahden voimalaitoksella voidaan tuottaa sähköä lauhdetuotantona, lämpöä reduktiotuotannossa ja yhteistuotannossa molempia. Voimalaitoksen sähköteho on 190 MW ja kaukolämpöteho 260 MW (Alva. 2023). Keljonlahden laitos on suhteellisen suuri voimalaitos Suomen mittakaavassa. Fingridin tilaston mukaan se on sähköntuotantokapasiteetiltaan Suomen viidenneksi suurin polttotekniikkaan perustuva laitos (Fingrid. 2023). Pääsääntöisesti polttoaineena käytetään puuta, mutta myös turvetta käytetään apupolttoaineena. Savukaasuja puhdistetaan mm. sähkösuodattimella, joka puhdistaa 99,9 % savukaasujen hiukaspäästöistä. Puhdistuksen lisäksi savukaasujen ylijäämälämmöstä otetaan lämpöä talteen laitoksen prosessiin. (Alva. 2023) Kuvasta 13 voidaan nähdä Keljonlahden voimalaitoksen ilmakuva. Voimalaitos sijaitsee Jyväskylän Keljonlahdella ja se on rakennettu vuonna 2010.



Kuva 13. Keljonlahden voimalaitos (A-insinöörit. N.d.)

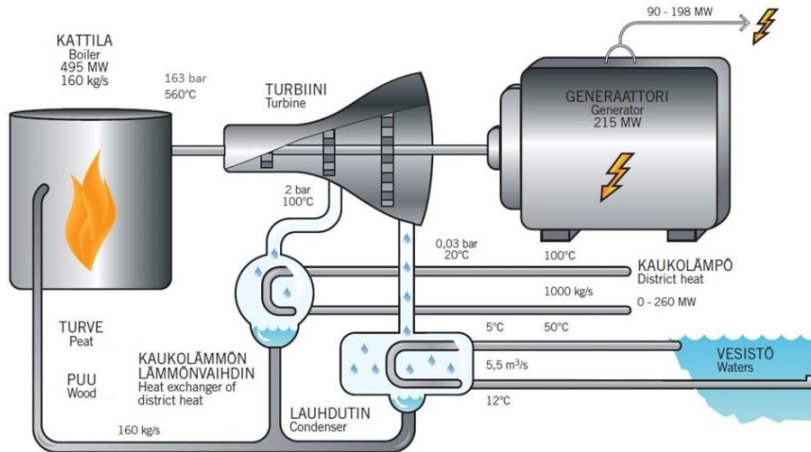
Keljonlahden voimalaitoksen kattilatyyppinä toimii Foster Wheelerin toimittama kiertoileijukattila, jonka polttoaineteho on kokonaisuudessaan 495 MW. Kattilassa on useampia veden ja ilman esilämmittimiä, joilla parannetaan laitoksen hyötysuhdetta. Esilämmittimien lisäksi laitoksella on savukaasuista ylijäämälämpöä hyödyntävä lämmöntalteenottojärjestelmä. Järjestelmän toimintaperiaate perustuu savukaasujen jäädyttämiseen kastepisteen yläpuolella. Savukaasujen epäpuhtauksia erotetaan sähkösuodattimella. Sähkösuodattimen

ja lämmöntalteenottojärjestelmän jälkeen savukaasut johdetaan n. 140 metrin korkuiseen savupiippuun. Laitoksella on yhteensä kolme eri korkeapainetulistinta, välitulistimet ja Intrextulistimet tulipesän läheisyydessä. (Alva. 2023) Laitoksen yksinkertaistettu laitekuvaus voidaan nähdä kuvasta 14.



Kuva 14. Keljonlahden voimalaitoksen laitekuvaus (Alva N.d, muokannut Aleksi Varis)

Keljonlahden voimalaitoksella tuotetaan paineeltaan n. 163 bar ja lämpötilaltaan 560 °C olevaa korkeapainehöyryä. Höyryä käytetään kattilan ajotavasta ja laitoksen rakennusasteesta riippuen yhteistuotantoon tai erikseen sähkön tai kaukolämmöntuotantoon. Laitoksessa on yksi turbiini, jossa on erikseen matala- ja korkeapainepesät. Laitoksella on erilliset lämmönvaihtinvaihtoehdot kaukolämmölle ja lauhdutukselle, joka on johtaa lämmön tarvittaessa Päijänteeseen. Lämmönvaihtimia käytetään kattilan ajotavasta riippuen. Keljonlahden periaatteellinen toimintakaavio voidaan nähdä kuvasta 15. Kuvasta poiketen laitoksella on tulistimet, joissa höyryä voidaan lämmittää uudestaan.



Kuva 15. Keljonlahden voimalaitoksen toimintakaavio (Alva. N.d)

6.1 Lähtötiedot

Savukaasujen lämmöntalteenoton katselmusta varten saatiin kattavat lähtötiedot Alvalta. Työn alussa luotiin alustava lähtötietoluettelo, joka toimitettiin Alvalle aloituspalaverin yhteydessä. Aloituspalaverissa käytiin myös läpi lähtökohdat katselmukselle ja Keljonlahden CHP-laitoksen yleiskuvaus.

Lähtötietoina tässä tutkimuksessa käytettiin Keljonlahden voimalaitoksen ajotietoja, polttoainetasejakaumia ja polttoaineanalysejä eri kausilta (2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 ja 2022-2023). Ajotiedot sisälsivät voimalaitoksen tuntikohtaisesti jaotellut tiedot ulkolämpötilasta, kaukolämmön paluu- ja menolämpötiloista, polttoainetehosta, savukaasun lämpötiloista sähkösuodattimen jälkeen ja ennen savupiippua sekä savukaasun virtaus ja pitoisuustiedoista (O_2 , pöly, CO_2 , H_2O , NO_2 , NO , N_2O , NO_x , CO , SO_2 , CH_4 , NH_3 , HCL). Polttoainetasejakaumat sisälsivät tiedot ajokausien kuukausikohtaisista polttoainejakaumista. Käytetyt polttoaineet olivat aineryhmittäin raskaat öljyt, kivihiili, jyrshinturve, teollisuuden puutähte ja metsäpolttoaine jaoteltuna kokopuu- ja rantahakkeeksi sekä metsätähdehakeeksi ja -murskeeksi. Polttoainejakaumista pystyttiin tarkastelemaan keskimääräinen kuukausi- ja polttoainekohtainen kulutus, kosteus, lämpöarvo, tilavuus ja massa. Polttoaineryhmät oli myös avattu tarkemmin polttoainejakeittain. Polttoaineanalyysien avulla pystyttiin selvittämään polttoaineiden kuiva-ainekoostumuksia sekä tarkastamaan voimalaitoksella käytettyjen polttoaineiden kosteuspitoisuuksia ja tehollisia lämpöarvoja.

6.1.1 Määrittymiset, vakiot ja oletukset

Tutkimuksen tulosten ja päätelmien saavuttamiseksi tehtiin useita oletuksia ja määrittymiä sekä luotiin erilaisia vakioita. Toimintatavan avulla pystyttiin ratkaisemaan tulokset ja kohdentamaan tutkimuksen pääpainoa asioihin, joita haluttiin tutkia tarkemmin. Tutkimuksessa käytetyt määrittymiset, vakiot ja oletukset ovat lueteltu taulukossa 1.

Taulukko 1. Lämmöntalteenotto tutkimuksen määrittymiset, vakiot ja oletukset

Määrittäminen	Arvo
Kaukolämpöverkon peruskuorma	20 MW
Ilman paine	101 325 Pa
Savukaasun paine pesurin jälkeen	103 325 Pa
Kattilan maksimi polttoaineteho	495 MW
Kattilan minimi polttoaineteho	220 MW
Kattilan maksimi kaukolämpöteho	260 MW
Kattilan minimi kaukolämpöteho	124 MW
Pesurin asteisuus	3 °C
Rakennusaste	0,5
Kaukolämmön kulutussuhde	1,15
Sähkön kulutussuhde	1,25

Kaukolämpöverkon peruskuormalla tarkoitetaan Jyväskylän kaukolämpöverkkoon tuotettua muuta lämmöntuotantoa, joka oletettiin olevan 20 MW koko mitoitusajanjakson ajan. Peruskuorman lämpöteho vaikuttaa oleellisesti Keljonlahden voimalaitoksen lämmöntuotantomäärään tai vähintään siirtää lämmöntuotannon tarvetta pysyvyyssäyrällä suuremmille kaukolämpöverkon lämpökuormille. Tutkimuksessa savukaasujen lämmöntalteenottopotentiaali hyödynnetään Jyväskylän kaukolämpöverkossa ja oletuksena on, että kaukolämpöverkko pystyy vastaanottamaan täysin tuotetun lämpötehon.

Ilman- ja savukaasun paineita käytettiin savukaasulaskuissa lähtötietoina. Savukaasupesurin jälkeinen paine arvioitiin kirjallisuuden perusteella (1000 Pa) (Huhtinen et al. 2004, 41). Tämä arvo kaksinkertaistettiin varmuuden lisäämiseksi. Savupiipun alipainetta (vetoa) tai tarkkaa painetta savupiipussa ei tässä tutkimuksessa tutkittu tarkemmin, koska lopputuloksiin sillä arvioitiin olevan pieni vaikutus.

Kattilan maksimi ja minimi polttoaine- ja kaukolämpötehot sekä rakennusaste ja kulutus- suhteet sovittiin vakioiksi tutkimuksessa, perustuen voimalaitoksen toiminta-arvoihin. Kattilan minimi ja maksimi sähköteho laskettiin rakennusasteen mukaisesti. Polttoainetehot, rakennusaste ja kulutussuhteet rajoittavat oleellisesti prosessista saatavaa lämpö- ja sähköenergiaa sekä pysyvyyskäyrän muodostumista. Rakennusaste 0,5 on tyypillinen suuremman kaukolämpövoimalaitoksilla (Huhtinen et al. 2004, 11) Pesurin asteisuus sovittiin olevan 3 °C perustuen kirjallisuuteen ja Rauhalahden savukaasupesurin toimintaan.

Tutkimuksen laskentamallissa luotiin useita eri sovitteita, jonka perusteella simulointimalli laski automaattisesti tulokset eri ajotilanteissa. Normaalin savukaasulaskennan perusteella pystyttiin rakentamaan laskenta 1 MW muutoksella polttoainetehoon, minkä perusteella pystyttiin luomaan sovitteet eri savukaasulaskennan osa-alueille. Sovitteiden avulla pystyttiin laajentamaan laskentaa.

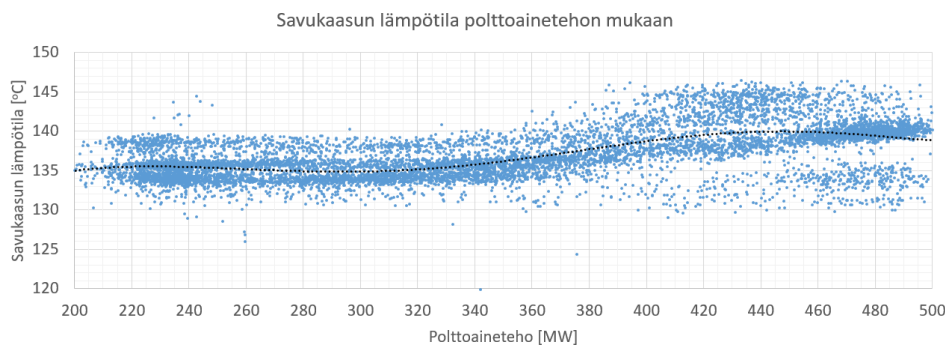
6.1.2 Polttoaineiden alkuainekoostumus

Tutkimuksessa käytettiin polttoaineiden alkuainemäärytyksiin polttoaineille eri tietolähteitä. Hakkeen osalta käytettiin Alvan toimittamia polttoaineanalyysyjä sekä purun ja kuoren osalta käytettiin VTT:n tekemää tutkimuslähdettä (Alakangas et al. 2016, 56). Purulle käytettiin arvoina kuoretonta mäntypohjaista sahanpurua ja kuorelle männyn kuorta. Polttoaineiden alkuainemäärytykset voidaan havaita liitteestä 1.

6.1.3 Savukaasun lämpötila

Savukaasun lämpötilan määrytykseen ennen savukaasupesuria käytettiin Keljonlahden voimalaitoksen prosessimittaustietoja, joissa mitattiin savukaasujen lämpötilaa ennen nykyistä LTO-järjestelmää. Savukaasun mittaustiedot olivat oleellisessa osassa savukaasujen jäähtymisestä ja lauhtumisesta syntyvän lämpöenergiapotentialin selvityksessä. Mittaustulokset perustuivat kolmen vuoden tuntikohtaiseen mittausdataan, joista pystyttiin tekemään sovitteet kattilan polttoainetehon mukaan. Savukaasun lämpötilan vaihtelu polttoainetehon

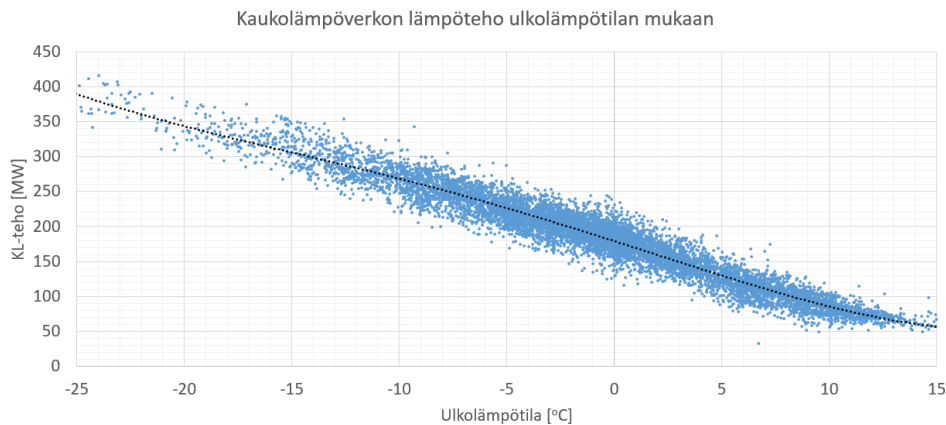
mukaan oli maksimissaan n. 15 °C, mutta pääsääntöisesti soviteen vaihteluväli oli n. 5 °C. Mittausten perusteella savukaasujen lämpötila hieman kasvaa polttoainetehon kasvaessa. Savukaasun lämpötilaa voidaan tarkastella kuvasta 16. Kuvaajassa sinisellä näkyy mittauspisteet ja mustalla mittauspisteistä muodostunut polynominen trendikäyrä, jonka perusteella sovite laskee savukaasun lämpötilan.



Kuva 16. Savukaasun lämpötila polttoainetehon mukaan

6.1.4 Kaukolämpöverkon lämpöteho

Hetkittäisen tarvittavan kokonaiskaukolämpötehon määrittäminen tehtiin simulointimallissa Jyväskylän kaukolämpöverkon mukaisesti. Jyväskylän kaukolämpöverkon lämpötehoa tutkittiin ulkolämpötilan mukaan, koska lämpöteho kasvaa tyypillisesti ulkolämpötilan laskiessa. Simulaatiomalli pyrkii tuottamaan Keljonlahden voimalaitoksella Jyväskylän kaukolämpöverkon tarvitseman lämpötehon peruskuorman jälkeen. Tuloksista voidaan päätellä, että Jyväskylän verkon huipputeho on ollut n. 420 MW ja alhaisin lämpöteho n. 33 MW. Pääosin kaukolämpöverkon lämpötehoalueet ovat sijoittuneet -10 °C ja +10 °C välille. Jyväskylän kaukolämpöverkon lämpötehot voidaan nähdä kuvasta 17. Kuvaajassa on esitetty mustalla tiedoista tehty polynominen trendikäyrä, joka toimii simulaation sovitteena. Sinisellä on esitetty lämpötehojen mittauspisteet ulkolämpötilan mukaan.

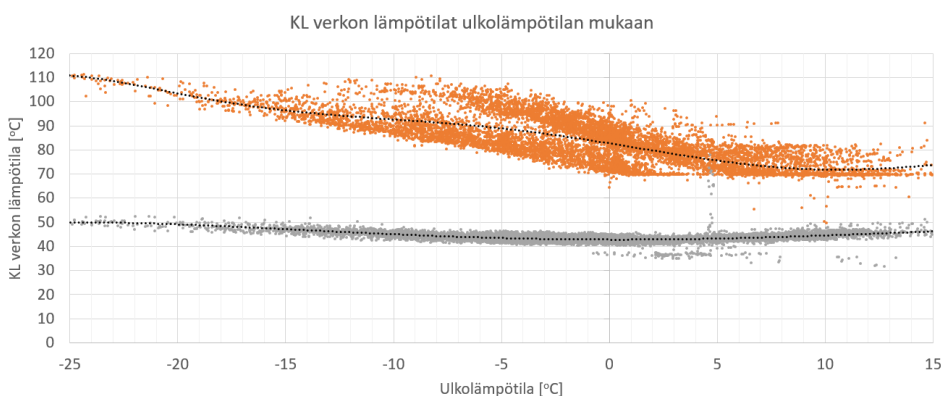


Kuva 17. Jyväskylän kaukolämpöverkon lämpöteho ulkolämpötilan mukaan

6.1.5 Kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila

Tutkimuksessa savukaasupesurin savukaasujen lämmöntalteenottopotentiaali hyödynnetään Jyväskylän kaukolämpöverkossa siten, että savukaasujen jäähtymis- ja veden lauhtumislämpöenergia siirretään savukaasupesurin kiertonesteen kautta lämmönvaihtimille. Lämmönvaihtimien avulla lämpöenergia siirretään kaukolämpöverkon paluuveteen.

Lämmöntalteenottopotentiaalin kannalta oleellista on lämpönielun lämpötilataso, mikä vaikuttaa energiataseen nesteiden lämpötilaeroon. Lämpönieluna toimiva kaukolämpöverkko ja sen paluuveden lämpötilat eri ulkolämpötiloissa saatiin selville voimalaitoksen tuntidatasta kolmelta vuodelta. Mittaukset sijaitsivat voimalaitoksella meno- ja paluuveden runkoputkissa. Kaukolämpöverkon lämpötilat voidaan nähdä kuvasta 18.

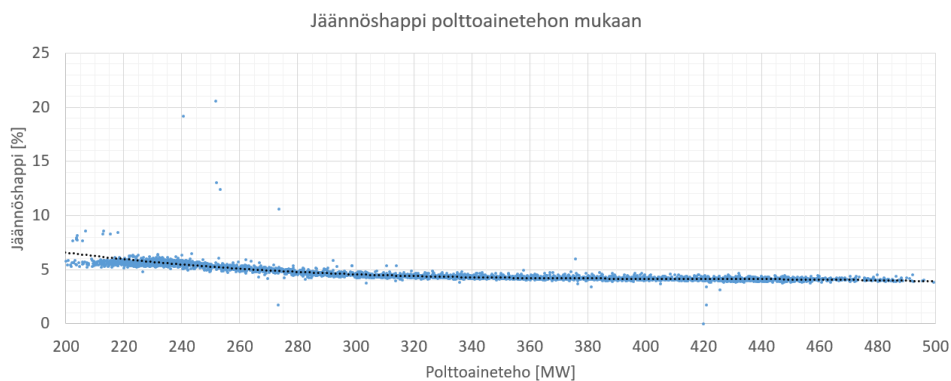


Kuva 18. Kaukolämpöveden lämpötilat ulkolämpötilan mukaan

Kuvassa kaukolämmön menoveden lämpötila on esitettyä oranssilla ja paluuveden lämpötila harmaalla. Kuvasta voidaan nähdä, että kaukolämmön paluuveden lämpötilan vaihtelu sijoittuu n. 10-15 °C asteen välille, kun taas menoveden lämpötila vaihtelee enemmän. Menoveden lämpötilatason vaihtelu riippuu muusta kaukolämpöverkon lämmöntuotannosta, kuten Rauhalahden voimalaitoksesta. Tutkimuksessa oleellisemmalle kaukolämmön paluuveden lämpötilalle käytettiin polynomista trendikäyrää, jolla vaihteluväli sijoittui n. 10 °C välille riippuen ulkolämpötilasta. Kylmillä ja lämpimillä ulkolämpötilan jaksoilla paluuveden lämpötilan voidaan nähdä nousevan muutamilla asteilla, joka vaikuttaa lämpötilaeron kautta lämmöntalteenottopotentiaaliin. Tutkimuksen osalta trendikäyrän tulos on riittävällä tasolla, jolloin saadaan keskimääräinen arvio kaukolämmön paluuveden lämpötilasta ja lämpötilaerosta savukaasun ja kaukolämpöveden välillä.

6.1.6 Savukaasujen jäännöshappi

Savukaasujen jäännöshapen määrää tarvitaan savukaasulaskennassa ilmakertoimen määrittämiseen. Ilmakertoimen avulla pystytään laskemaan palamisilman määrä ja savukaasuihin siirtyvät alkuainekomponentit palamisprosessissa. Jäännöshapen määrää mitataan voimalaitoksella, joten lähtötiedoiksi saaduista tuntidatoista pystyttiin määrittelemään polynominen trendikäyrä polttoainetehon mukaan. Jäännöshapen muutos polttoainetehon mukaan voidaan nähdä kuvasta 19.

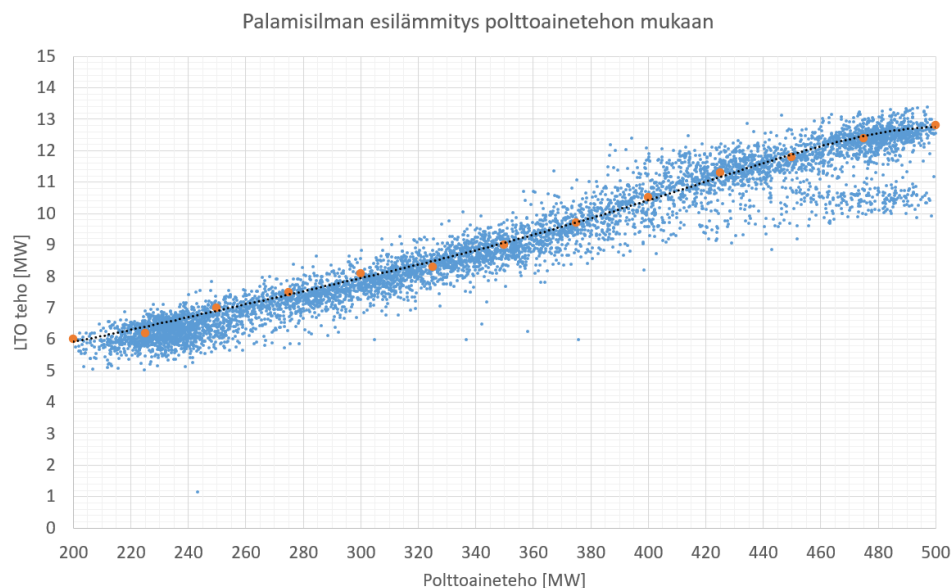


Kuva 19. Jäännöshappi polttoainetehon mukaan

Kuvasta ja datasta voidaan todeta, että jäännöshapen määrä savukaasuissa on melko stabiili riippumatta polttoainetehosta. Jäännöshapen määrässä voidaan nähdä n. 1 % muutos alhaisilla 200-300 MW polttoaineteoilla. Myös jäännöshapen mittauksesta tehtiin polynominen trendikäyrä, jonka perusteella jäännöshapen määrä määritettiin simulaation eri ajotilanteissa.

6.1.7 Kattilan palamisilman esilämmitys

Savukaasujen lämmöntalteenottopotentialin selvityksessä vähennettiin kattilan palamisilman esilämmitys savukaasuista saatavilla olevasta kokonaislämpöenergiasta. Voimalaitoksen nykyisen savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän lämpöenergia hyödynnetään kokonaisuudessaan palamisilman esilämmityksessä. Laitoksella mitataan palamisilman esilämmityksen lämpötehoa, jolloin mittausdataa voidaan käyttää tässä tutkimuksessa lähtötietona. Kun palamisilman esilämmityksen lämpöteho vähennetään savukaasupesurin kokonaislämpöenergiasta, jäljelle jää kaukolämpöverkossa hyödynnettävä kokonaislämpöteho. Palamisilman esilämmityksen muutos polttoainetehon mukaan voidaan nähdä kuvasta 20.

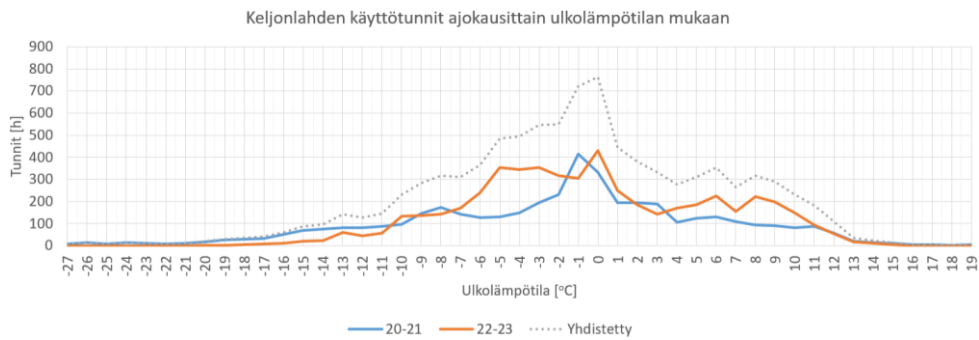


Kuva 20. Palamisilman esilämmitys polttoainetehon mukaan

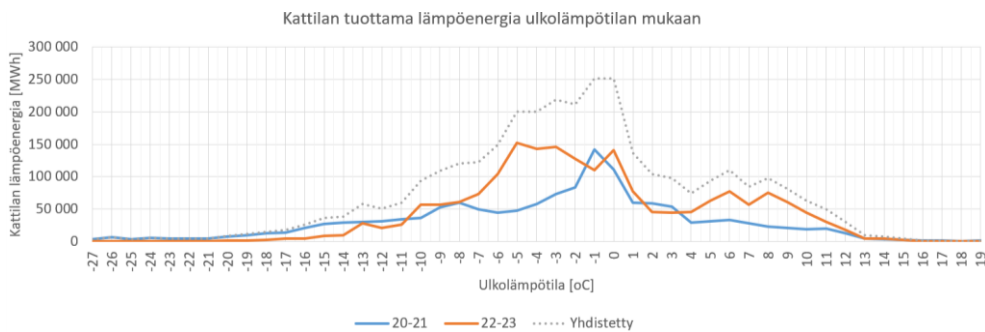
Kuvasta nähdään kuinka palamisilman esilämmityksen lämpöteho kasvaa tasaisesti polttoainetehon kasvaessa, mutta vaihtelua on myös samojen polttoainetehojen välillä. Tutkimuksessa luotiin polynominen trendikäyrä datan perusteella siten, että käyrä kulki 25 MW välein tehtyjen pisteiden kautta. Erikseen määritellyt oranssit pisteet auttoivat luomaan tasaisemman trendikäyrän, koska muuten suurilla polttoainetehoilla palamisilman esilämmitys olisi laskenut suhteellisen paljon. Työssä savukaasujen lämmöntalteenottopotentialista vähennettiin lopuksi kattilan palamisilman esilämmitys, jolloin lopputulokseksi saatiin hyödynnettävissä oleva kaukolämpöteho.

6.1.8 Ajokausien ulkolämpötilat

Voimalaitoksen ajokausien ja ajotapojen ymmärtämiseksi tutkittiin myös käyttötuntien ulkolämpötiloja eri ajokausilla. Lähtötietoina saatiin ajokausien 2020-2021 ja 2022-2023 ajotuntikohtaiset ulkolämpötilat sekä ajotunneille kohdistuneet tuotetun lämpöenergian määrät Keljonlahden voimalaitoksella. Lähtötiedoista tehdyistä analyyseistä voidaan päätellä, että suurin osa voimalaitoksen käyttötunneista kohdistuu -6 °C ja $+1\text{ °C}$ välille. Suurin käyttötuntien määrä voidaan nähdä 0 °C käyttötuntien mukaan ja -1 °C tuotetun lämpöenergian mukaan. Huomioitavaa on, että ajokaudet ovat hieman poikenneet toisistaan, koska ajokaudella 2020-2021 on ollut enemmän kylmiä alle -11 °C pakkasjaksoja, mutta vähemmän $+4\text{ °C}$ - $+11\text{ °C}$ jaksoja. Ajokaudella 2022-2023 poikkeavuuksia toiseen ajokauteen nähdään -2 °C ja -7 °C välisillä pakkastunneilla. Keljonlahden voimalaitoksen käyttötunnit ajokausittain ulkolämpötilan mukaisesti voidaan nähdä kuvasta 21, kun taas lämpöenergian mukainen jaottelu kuvasta 22.



Kuva 21. Voimalaitoksen käyttötunnit ajokausittain ulkolämpötilan mukaan

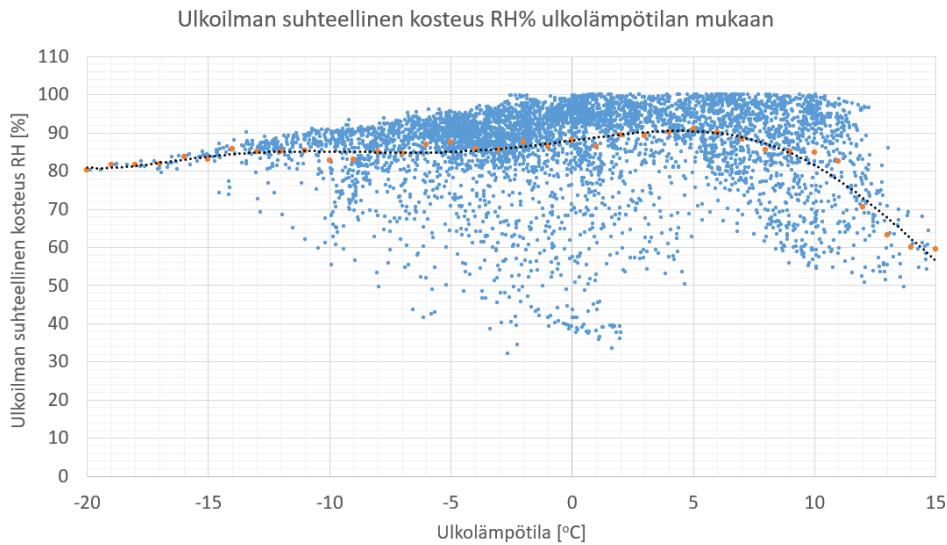


Kuva 22. Voimalaitoksen tuottama lämpöenergia ulkolämpötilan mukaan

Ulkolämpötilojen tarkastelusta voidaan päätellä, mitkä ulkolämpötilan alueet ovat oleellimmat myös kattilalaitoksen savukaasujen lämmöntalteenoton potentiaalin osalta. Mitä enemmän kattilalaitos on käytössä ja sillä tuotetaan lämpöä, sitä enemmän savukaasuista on saatavilla lämpöenergiaa.

6.1.9 Ulkoilman suhteellinen kosteus

Ulkoilman suhteellista kosteutta käytettiin savukaasulaskennassa palamisilman mukana tulevan kosteuden määrittämiseen. Ulkoilman suhteellista kosteutta mitataan Keljonlahden voimalaitoksella omalla mittauksellaan tuntikohtaisesti, jolloin sitä pystyttiin käyttämään tutkimuksessa. Mittausdataa saatiin ajokausilta 2021-2022 ja 2022-2023. Tuntidata voidaan nähdä kuvasta 23.

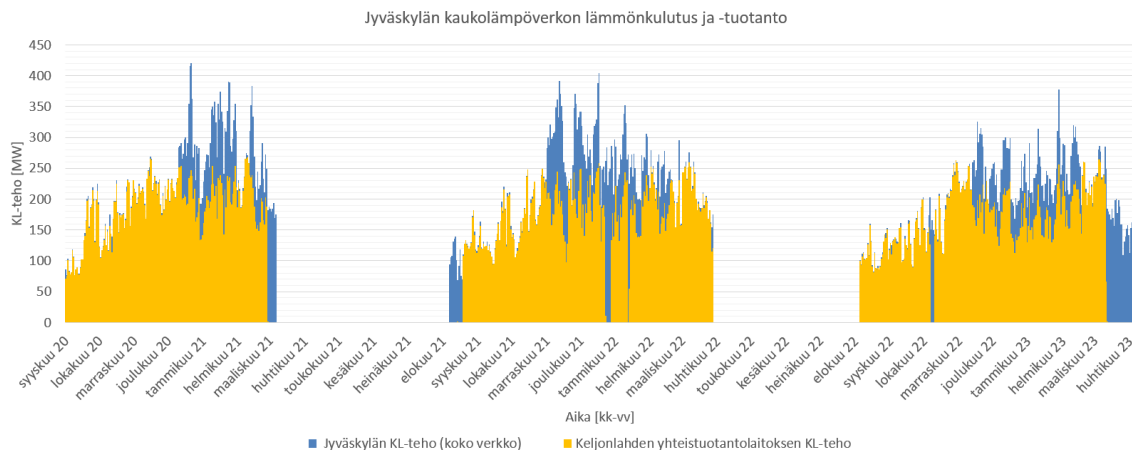


Kuva 23. Ulkoilman suhteellinen kosteus ulkolämpötilan mukaan

Mittausdatan ja kuvan perusteella suhteellinen kosteus on vaihdellut laajasti 30 – 100 % välillä, varsinkin leudommilla ja lämpimillä keleillä. Hajonnan ollessa suuri, käytettiin suhteellisen kosteuden trendikäyrän määrittämiseen ulkolämpötilan ja kosteuden mukaan painotettuja arvoja. Painotetut ulkoilman suhteelliset kosteudet voidaan nähdä kuvasta oransseilla pisteillä. Painotettujen arvojen mukaan polynominen trendikäyrä kulkee pääsääntöisesti 80 - 90 % alueella lukuun ottamatta yli 12 °C lämpötiloja. Suhteutettuna savukaasuihin muodostuvasta kosteudesta palamisilman kosteuden osuus on pieni verrattuna polttoaineen palamisesta syntyvään kosteuteen.

6.1.10 Lämmöntuotanto

Tutkimuksessa selvitettiin kolmen ajokauden lämmöntuotanto Jyväskylän kaukolämpöverkossa ja Keljonlahden yhteistuotantolaitoksella. Lämmöntuotantotiedot saatiin Keljonlahden laitokselta lähtötietoina. Ajokausien osalta ei ole käsitelty kesäkausia, jolloin Keljonlahden voimalaitos on ajettu alas ja lämmöntuotanto tuotetaan Rauhanlahden voimalaitoksella. Käsittelemättömät kesäkauden ajat sijoittuvat vuosittain touko-elokuulle, jolloin myös kaukolämmönkokonaistuotanto on alhaisempaa. Ajokausien 2020-2021, 2021-2022 ja 2022-2023 lämmöntuotantotiedot voidaan nähdä kuvasta 24.



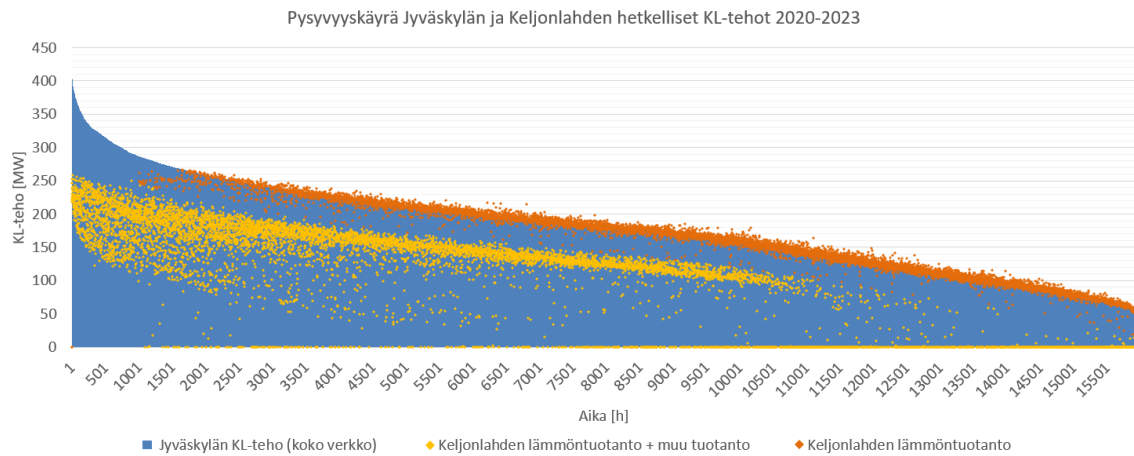
Kuva 24. Jyväskylän kaukolämpöverkon kulutus ja Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotanto

Kuvasta nähdään sinisellä Jyväskylän kaukolämpöverkon kokonaiskaukolämmönkulutus ja keltaisella Keljonlahden CHP-laitoksen lämmöntuotanto. Kuvasta voidaan todeta, että Keljonlahden CHP-laitos tuottaa suurimman osan Jyväskylän kaukolämpöverkon lämmön tarpeesta. Lämmöntuotanto on jaettu Keljonlahden ja Rauhalahden voimalaitoksille, siten että Rauhalahden voimalaitosta käytetään Keljonlahden laitoksen kaukolämpötehojen käyttöalueiden ulkopuolella. Käytännössä Rauhalahden laitos tuottaa yksin Keljonlahden minimitehon alittavan ja yhdessä Keljonlahden voimalaitoksen kanssa maksimitehon ylittävän kaukolämpötehon. Talven kylmimpinä ajanjaksoina lämmöntuotannon osuutta on myös jaettu muiden tuotantomenetelmien kanssa riippuen kannattavuudesta (sähkönhinnan vaikutus Keljonlahden lämmöntuotannon ajotapaan). Kuvasta voidaan myös nähdä muutamia tilanteita, joissa Keljonlahden yhteistuotantolaitos on ollut alhaalla kesken ajokauden huoltotoimenpiteiden vuoksi.

Poiketen tuotanto- ja kulutusdatasta, tutkimuksessa Keljonlahden yhteistuotantolaitoksella pyryttiin tuottamaan kaukolämpötehoa kattilan ja savukaasupesurin yhteistuotantona. Tuotanto perustui vakioituihin kattilan minimi- ja maksimi kaukolämpötehoihin sekä rakennus- ja kulutusasteisiin kaukolämpötehoalueilla 124 MW – 260 MW sekä savukaasupesurista saatavan kaukolämpötehoon kattilan polttoainetehon mukaisesti. Tällä kokonaislämpötehoilla pyrittiin täyttämään kaukolämpöverkon vaatima lämpöteho.

6.1.11 Pysyvyyskäyrä

Tutkittaessa Jyväskylän kaukolämpöverkon lämmönkulutusta ja Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen pysyvyyskäyrän avulla, pystytään havaitsemaan erilaisia tuotantotilanteita kuin tarkastellessa kuvan 24 mukaan. Pysyvyyskäyrästä pystytään havaitsemaan paremmin esimerkiksi ajokausien huippu (n. 420 MW) ja minimiteho (n. 30 MW) sekä kuinka Keljonlahden CHP-laitoksen lämmöntuotanto on suhteutettuna lämmönkulutukseen Jyväskylän kaukolämpöverkossa. Pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 25.



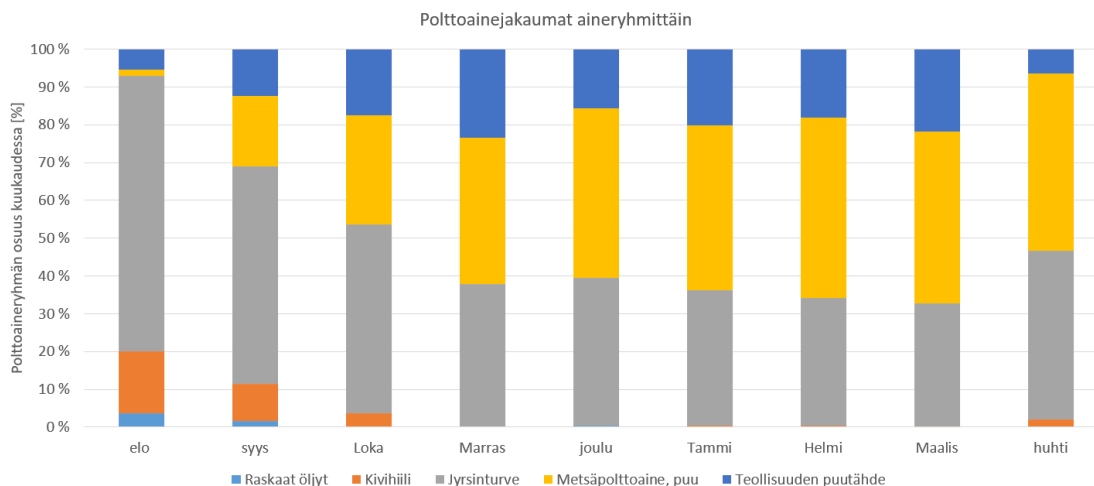
Kuva 25. Jyväskylän kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrä ja Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotanto

Kuvasta 25 voidaan havaita, kuinka Keljonlahdessa on tuotettu kaukolämpöä eri ajotilanteilla. Ajotilanteeseen ja lämmöntuotantoon vaikuttaa esimerkiksi sähkön hinta, saatavilla olevat polttoaineet ja niiden hinnat sekä kaukolämpöverkon eri tuotantotapojen kannattavuus keskenään. Käytännössä tämä tarkoittaa Rauhalahden yhteistuotantolaitoksen osuutta kaukolämmön tuotannossa, käyttövarmuudesta huolehtimisesta laitoksien välillä ja ulkolämpötilan ennustuskäytön vaikutuksista lämmöntuotantoon. Kuvasta myös nähdään, kuinka Keljonlahden maksimi kaukolämpöteho on ollut lähellä tutkimuksessa vakioitua maksimaalista 260 MW kaukolämpötehoa.

6.1.12 Polttoainetasejakauma

Kattilalle syötettävä polttoainejakauma on tärkeässä osassa tutkimusta, koska sen perusteella määritellään polttoaineen kokonaiskosteus ja lasketaan syntyvät savukaasut. Polttoainejakauman arvioimiseksi tutkimuksen eri ajotilanteissa selvitettiin Keljonlahden yhteistuotantolaitoksen polttoainetasejakaumia aikaisemmilta ajokausilta (2019-2020, 2020-2021 ja 2022-2023). Tuloksia hyödynnettiin työn lähtötietoina lopullisten polttoainejakaumien määrittelyssä. Polttoainetasejakaumat kuukausikohtaisesti ajokausien keskiarvona voidaan nähdä kuvasta 26. Lisäksi liitteissä 2 ja 3 voidaan nähdä tarkemmat yksilöidyt polttoainejakaumat kuukausikohtaisesti eri ajokausilla.

Kuukausikohtaisesta polttoainejakaumasta voidaan nähdä kuinka ajokausien ensimmäisillä kuukausilla jyrshinturpeen, kivihiilen ja raskaiden öljyjen osuudet ovat suuremmat kuin myöhemmillä kuukausilla. Tämä johtuu tyypillisesti kattilan käynnistyksen aikaisesta erilaisesta polttoainejakaumasta. Talvikuukausina näiden polttoaineiden käyttö on huomattavasti laskenut ja metsäpolttoaineiden käyttö noussut. Jyrshinturpeen käyttö on laskenut n. 40 %, kun taas metsäpolttoaineiden käyttö on kasvanut n. 50 %. Teollisuuden puutähdde mukaan lukien maaliskuussa metsäpolttoaineiden osuus on melkein 70 %. Lisäksi jyrshinturpeen vähentyminen vuosittain voidaan nähdä tarkemmin liitteistä 2 ja 3. Kuvan 26 ja liitteiden havainnot ovat linjassa Keljonlahden CHP-laitoksen tavoitteen kanssa, jossa pyritään tulevaisuudessa lopettamaan turpeen poltto kokonaisuudessaan. Tähän tavoitteeseen linjatien myös tutkimuksen ajotilanteissa päädyttiin käyttämään polttoainejakaumia, jossa ei käytetä turvetta.



Kuva 26. Polttoainetasejakaumat aineryhmittäin ajokausittain kuukausikohtaisesti keskiarvona

Saatuihin polttoainejakaumien lähtötietoihin pohjautuen ja tulevaisuuden näkymiin perustuen luotiin ajotilanteille kolme erilaista polttoainejakaumaa. Tulevaisuuden näkymien arviointiin saatiin lähtötietoja Keljonlahden CHP-laitoksen avainhenkilöiltä, joilla oli tietoa tulevaisuuden näkymistä. Tutkimuksessa käytetyt polttoainejakaumat ovat esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ajotilanteiden polttoainejakaumat

	Hakkeen osuus	Sahanpurun osuus	Kuoren osuus	Muuta
Polttoainejakauma 1	100 %	-	-	
Polttoainejakauma 2	20 %	60 %	20 %	
Polttoainejakauma 3	70 %	10 %	20 %	Hakkeen kosteus 55 %

Ensimmäisessä polttoainejakaumassa käytettiin 100 % hakkeen osuutta, jota pidetään tulevaisuudessa potentiaalisena polttoaineen käytön näkymänä. Toisessa polttoainejakaumassa kasvatettiin sahanpurun osuutta 60 %:iin ja hakkeen sekä kuoren osuutena käytettiin 20 %. Kolmannessa polttoainejakaumassa pyrittiin hakemaan polttoaineseokselle 55 % kokonaiskosteus, joka saavutettiin hakkeen 70 %:n osuudella sekä tyypillisesti kuivan sahanpurun 10 %:n ja kostean kuoren 20 %:n osuuksilla. Tässä polttoainejakaumassa jouduttiin nostamaan hakkeen yksilöllistä kosteutta korkeammaksi, kuin Keljonlahden polttoaineen mittausdatasta käy ilmi (kohta 7.2.13). Mittausdatasta poikkeaminen tehtiin, koska kolmannella polttoainejakaumalla haluttiin tutkia savukaasupesurin teoreettista lämmöntalteenottopotentiaalia normaalia kosteammalla polttoaineella. Kattilarajoitteen vuoksi kuoren osuutta ei voitu nostaa polttoainejakaumissa yli 20 %, jolloin hakkeen kosteuden muutoksella saadaan haluttu lopputulos kolmannessa polttoainejakaumassa. Polttoainejakaumissa myös haluttiin korostaa hakkeen ja muiden biopolttoaineiden osuuksia, jolloin jyrshinturve, kivihiili ja raskas öljy jätettiin pois tutkimuksista.

6.1.13 Polttoaineen kosteus

Savukaasulaskennan lähtötiedoiksi oli tarpeellista määrittää polttoaineiden kosteudet. Tässä tutkimuksessa polttoaineen kosteus määritettiin polttoaineseoksen yhteenlasketusta

tuloksesta polttoainejakaumien mukaan. Varsinainen yksittäisen polttoaineen kosteus määritettiin mitatuista Keljonlahden CHP-laitoksen polttoaineiden kosteuksista painotetulla keskiarvolla eri ajokausien ajoilta. Käytetyt ajokaudet olivat 2019-2020, 2020-2021 ja 2022-2023. Painotetulla keskiarvo kosteudella tarkoitetaan kuukausikohtaisesti eri ajokausilla käytetyn polttoaineen kosteuden suhteuttamista mitattuun massaan. Kaikista polttoaineiden kosteuksista laskettiin polttoainekohtaisesti keskiarvot ja lopuksi polttoaineryhmän keskiarvo. Tulokset voidaan nähdä liitteestä 4.

Liitteessä sinisellä on esitetty polttoainekohtainen painotettu keskiarvo kosteus, sekä oranssilla polttoaineryhmän painotettu keskiarvo kosteus kolmen ajokauden aikana. Tuloksista voidaan todeta, että kuori on kaikkein kosteinta (58 %), kun taas hake kuivinta (44,9 %). Sahanpurun kosteudeksi saatiin 48,7 %, joka perustui yhteen polttoainejakeeseen. Hakkeen osalta voidaan nähdä, kuinka kosteus kasvaa mitä lähemmäs biopolttoaine lähestyy hakettamatonta kokopuuta tai metsätähdettä. Hakkeen kosteuden kasvuun vaikuttaa myös oksien osuuden määrä. Kuoren kosteuden osalta huomattiin suuriakin eroja eri lähteiden välillä, mutta painotettuna keskiarvona kosteus saatiin vastaamaan paremmin keskimääräistä kosteutta.

Tässä tutkimuksessa käytettiin eri ajotilanteissa polttoaineryhmäkohtaisia painotettuja keskiarvo kosteuksia. Poikkeus keskiarvoista tehtiin polttoainejakauma kolmessa, jossa hakkeen kosteutta nostettiin 55 %:iin, olettaen polttoaineen olevan poikkeuksellisen kostea. Tällä tavoin saatiin tutkia kostean polttoaineen vaikutusta tuloksiin.

6.1.14 Polttoaineen lämpöarvo

Savukaasulaskennan lähtötietoina oli tarpeellista määrittää myös polttoaineen lämpöarvo. Tässä tutkimuksessa polttoaineen lämpöarvo määritettiin saaduista polttoainetiedoista Keljonlahden CHP-laitoksella eri ajokausilta. Ajokaudet olivat 2019-2020, 2020-2021 ja 2022-2023. Lämpöarvo määritettiin polttoainetiedoista painotettuna keskiarvona polttoaineiden massan mukaan. Tulokset voidaan nähdä liitteestä 5.

Liitteestä voidaan havaita polttoainekohtaiset lämpöarvot sinisellä ja oranssilla polttoaineryhmän keskiarvot. Tuloksista nähdään, että lämpöarvon muutokset ovat pieniä varsinkin

hakepolttoaineilla. Suurin ero huomataan kuoren eri lähteiden välillä, mutta painotettuna keskiarvona lämpöarvo laskee lähelle hakkeen ja sahanpurun arvoja. Lämpöarvot ovat esitettyinä kuiva-aineen tehollisina lämpöarvoina. Tuloksiksi saatiin hakkeelle 19,04 MJ/kg, sahanpurulle 19,04 MJ/kg ja kuorelle 19,59 MJ/kg. Tarkastelun tuloksia käytettiin kaikissa ajotilanteissa polttoaineiden lämpöarvoina.

6.2 Ajotilanteet

Savukaasujen teoreettisen lämmöntalteenottopotentialin tutkimiseksi savukaasupesurilla luotiin erilaisia mallinnuksen ajotilanteita, joilla pystyttiin tarkentamaan muuttujien vaikutusta tuloksiin. Päätasolla ajotilanteet jaoteltiin kattilan minimi (220 MW), keskimääräisen (300 MW) ja maksimi (450 MW) polttoainetehon mukaan. Minimi ja maksimi polttoainetehot perustuivat kattilarajoituksiin. Keskimääräinen polttoaineteho perustui arvioon, jolla päästäisiin lähelle -10 °C ulkolämpötilaa muun Jyväskylän kaukolämpöverkon peruskuorman kanssa. Polttoainetehot määritykset tehtiin Keljonlahden CHP-laitoksen avainhenkilöiden tietojen perusteella, mitkä perustuivat kattilarajoituksiin ja yleisimpiin ajotapoihin.

Minimi ja keskimääräisellä polttoaineteholla ajotilanteet olivat jaoteltu kuuteen eri tilanteeseen polttoainetehokohtaisesti, siten että kummallakin polttoaineteholla tarkasteltiin 45 %, 50 % ja 55 % polttoainekosteutta. Maksimi polttoaineteholla tarkasteltiin vain 45 % polttoainekosteutta, koska kattilarajoitteet estävät kosteamman polttoaineen polttamisen.

Ajotilanteet herkkyytettiin kaukolämmön paluueden lämpötilan muutoksella, joka oli -5 °C ajotilanteen ulkolämpötilan mukaisesta kaukolämmön paluueden lämpötilasta. Polttoainekosteudet saavutettiin eri ajotilanteissa muuttamalla polttoainejakaumia, jotka on esitetty kappaleessa 7.2.12.







Tutkimuksen simulaatiomallissa ulkolämpötila toimii lähtötietona simulaatiolle, koska se määrittelee eri sovitteiden avulla Jyväskylän kaukolämpöverkon lämpötehon tarpeen, kaukolämmön paluueden lämpötilan ja palamisilman ominaisuudet. Määriteltyjen ajotilanteiden lähtöarvojen mukaisesti kattilan ja savukaasupesurin tuottama kaukolämpöteho haettiin vastaamaan ulkolämpötilan mukaista Jyväskylän kaukolämpöverkon lämmöntarvetta. Ulkolämpötila määritteli myös vakio kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan perustuen

ajokausien toteuman sovitteeseen. Päätasolla olevat polttoainetehot määräsivät kaukolämpöteho tason, johon ajotilanteissa pyrittiin. Käytännössä ulkolämpötila laskee, mitä enemmän savukaasupesuri pystyy korvaamaan kattilalla tuotettua kaukolämpötehoa. Luotuja ajotilanteita oli tutkimuksessa yhteensä 15 ja ne voidaan havaita taulukoista 3, 4, 5 ja 6.

Päätason ajotilanteiden lisäksi mallinnuksella haluttiin tutkia toteutuneen Jyväskylän kaukolämpöverkonkulutuksen, ulkolämpötilan ja kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan tunnikohtaisia muutoksia. Päätason ajotilanteissa (1-14) eri polttoainetehoilla ulkolämpötila ja paluueden lämpötila olivat vakioita. Toteutuneen kaukolämpöverkon kulutustietoina käytettiin dataa ajokausilta 2020-2021, 2021-2022 ja 2022-2023. Tilannetta tarkasteltiin 50 % polttoainekosteudella ja polttoainejakaumalla 2. Muut lähtötiedot olivat samat kuin taulukossa 1. Skenaariosta käytetään työssä nimitystä ajotilanne 15 ja sen määritykset näkyvät taulukossa 6.






Kuudesta ensimmäisestä ajotilanteesta (1-6) polttoaineteholla 220 MW voidaan havaita kuinka ulkolämpötilatasot vaihtelevat 0,4 °C ja -1,7 °C välillä. Seuraavat kuusi ajotilannetta (7-12) Keskimääräisen 300 MW polttoaineteholla vaihtelu on -5,5 °C ja -8,6 °C ja maksimi polttoaineteholla 450 MW ajotilanteet (13-14) ovat ulkolämpötiloissa -17,6 °C ja -19,1 °C. Kaukolämpöverkon paluueden lämpötila pysyy melko vakiona minimi polttoainekuormalla, mutta suuremmilla polttoainetehoilla ja kylmemmillä ulkolämpötiloilla kaukolämmön paluueden lämpötila alkaa nousta. 300 MW polttoaineteholla nähdään n. 1-2 °C nousua, kun taas maksimi polttoaineteholla eroa syntyy yli 5 °C minimitehoalueen kaukolämmön paluueden lämpötiloihin. Lämpötila erot vaikuttavat savukaasupesurista hyödynnettävään lämpötehoon.

Taulukko 3. Ajotilanteet polttoaineteholla 220 MW

Polttoainetehto 220 MW						
	AT 1 	AT 2 	AT 3 	AT 4 	AT 5 	AT 6 
Polttoainekosteus [%]	45	50	55	45	50	55
Polttoainejakauma*	1	2	3	1	2	3
Ulkolämpötila [°C]	0,4	-0,2	-1,1	-0,1	-0,8	-1,7
KL paluuveden lämpötila [°C]	42,9	42,9	43	37,9	37,9	38



* Polttoainejakaumien määritykset kts. taulukko 2.

Taulukko 4. Ajotilanteet polttoaineteholla 300 MW

Polttoainetehto 300 MW						
	AT 7 	AT 8 	AT 9 	AT 10 	AT 11 	AT 12 
Polttoainekosteus [%]	45	50	55	45	50	55
Polttoainejakauma*	1	2	3	1	2	3
Ulkolämpötila [°C]	-5,5	-6,3	-7,7	-6,3	-7,2	-8,6
KL paluuveden lämpötila [°C]	43,6	43,8	44,2	39,2	39,1	39,5


* Polttoainejakaumien määritykset kts. taulukko 2.

Taulukko 5. Ajotilanteet polttoaineteholla 450 MW

Polttoainetehto 450 MW		
	AT 13 	AT 14 
Polttoainekosteus [%]	45	45
Polttoainejakauma*	1	1
Ulkolämpötila [°C]	-17,6	-19,1
KL paluuveden lämpötila [°C]	48,2	43,8

* Polttoainejakaumien määritykset kts. taulukko 2.

Taulukko 6. Ajotilanteet ajokausien toteuman mukaan

Ajokausien toteuman mukainen simulointi	
AT 15 	
Polttoainekosteus [%]	50
Polttoainejakauma*	2
Ulkolämpötila [°C]	toteuman mukainen
KL paluuveden lämpötila [°C]	toteuman mukainen

* Polttoainejakaumien määritykset kts. taulukko 2.

7 Tulokset

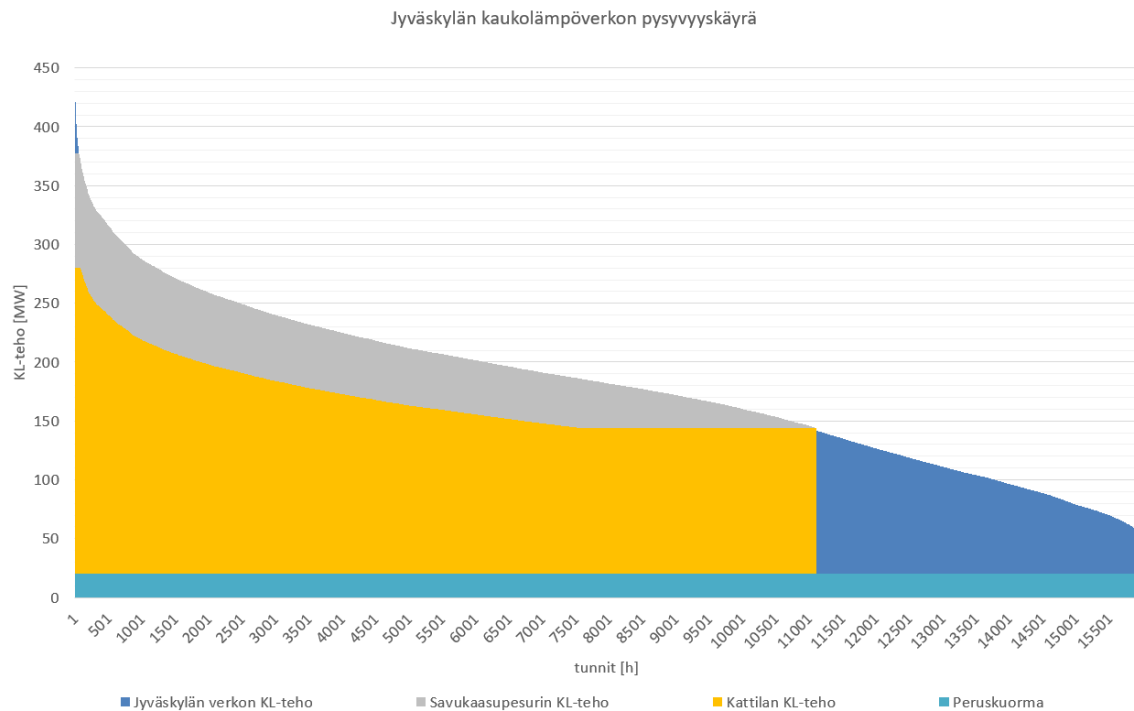
Tässä kappaleessa esitellään tutkimuksen merkittävimmät tulokset, jotka ovat lämmöntalteenottopotentiaali ja sen muutosvaikutukset, savukaasupesurin mitoitustehovertailu ja kustannustarkastelu. Tulokset käydään läpi yksityiskohtaisemmin omissa kappaleissaan.

Tuloksissa on esitetty esimerkki simulaatioita, joissa on käytetty ajotilanteen 2 lähtötietoja. Näitä simulaatioita ovat lämpötehon, sähkötehon, polttoainetehosuhteen, polttoaineen massavirran ja pysyvyyskäyrän kuvaajat. Ajotilanne 2 valittiin siksi, koska siinä käytetty ulkolämpötila on lähellä toteuman mukaista yleisintä ulkolämpötilaa (0 °C). Lisäksi ajotilanteessa ei ole käytetty kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan herkkyytystä.

7.1 Lämmöntalteenottopotentiaali ja muutosvaikutukset

Savukaasuista saatava lämmöntalteenottopotentiaali on esitetty Jyväskylän kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrän, savukaasujen jäähtymisen ja lauhtumisen näkökulmasta sekä lämmöntalteenottojärjestelmän vaikutuksista sähkötehoon, kokonaiskaukolämpötehoon ja kattilan polttoaineensyötön massavirtaan.

Tarkasteltaessa lämmöntalteenottopotentiaalia Jyväskylän kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrän toteuman mukaan, Keljonlahden CHP-laitos pyrkii tuottamaan tarvittavan lämpötehon savukaasuista saatavan kaukolämpötehon kanssa. Ajotilanteen 2 lähtötiedoilla voidaan havaita kuvan 27 mukainen toteuma.

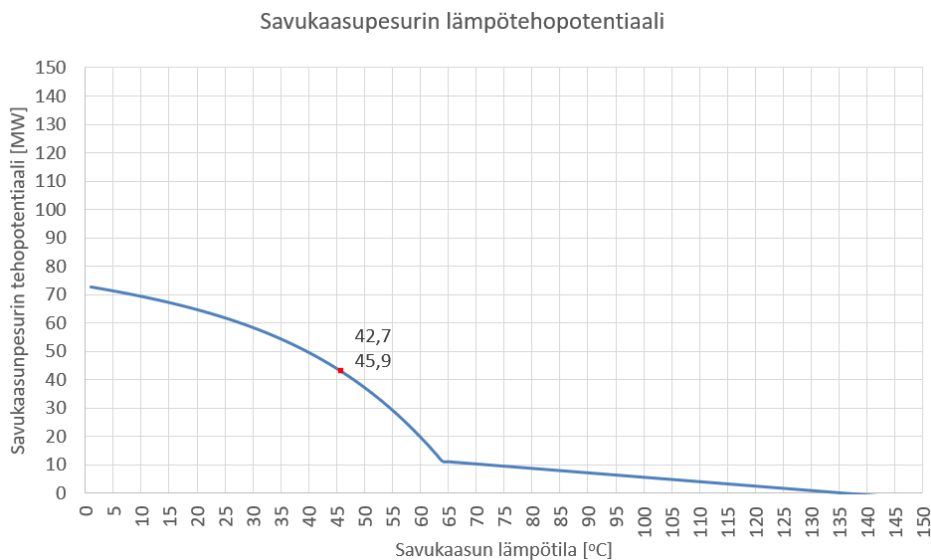


Kuva 27. Jyväskylän kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrän mukainen tuotanto LTO-potentiaalilla

Kuvassa 27 on esitetty peruskuorma 20 MW koko kolmen vuoden ajokausien pysyvyyskäyrälle, jolloin Keljonlahden kaukolämmöntuotanto pystyy teoreettisesti aloittamaan tehdyillä oletuksilla lämmöntuotannon 144 MW kaukolämmön kulutusteholla. Tästä pisteestä eteenpäin laitos pystyy tuottamaan kaukolämpöverkon lämmöntarpeen verran lämpötehoa yhdessä savukaasuista on saatavilla olevan lämmöntalteenottopotentialin kanssa. Poikkeuksena on kaukolämpöverkon huippukuormat n. 375-420 MW alueella. Lämmöntalteenottopotentialin tuottama osuus riippuu mm. polttoaineen ominaisuuksista ja määrästä. Tuntien 8000 – 11000 h välillä voidaan myös nähdä kuinka kattilan kaukolämpöteho on vakio (kattilan minimitiho), koska savukaasupesurilla voidaan tuottaa tarvittava lisälämpöteho kaukolämpöverkkoon. Kun minimipolttoainetehon mukainen savukaasupesurin maksimaalinen lämmöntalteenottopotentiali saavutetaan, alkaa myös polttoaineteho nousta. Tämä nostaa myös savukaasujen lämmöntalteenottotehoa. Kuvan perusteella voidaan todeta, että kokonaisuudessaan savukaasujen lämmöntalteenottopotentialilla pystyttäisiin teoreettisesti yhdessä kattilan ja peruskuorman kanssa tuottamaan kaikki tarvittava lämpö Jyväskylän kaukolämpöverkkoon, lukuun ottamatta harvoja huippukuormatunteja. Kuvassa oikeassa laidassa oleva sininen alue kuvaa Jyväskylän kaukolämpöverkon muuta lämmöntuotantoa, mitä ei toteuteta Keljonlahden laitoksella.

7.1.1 Lämpöteho

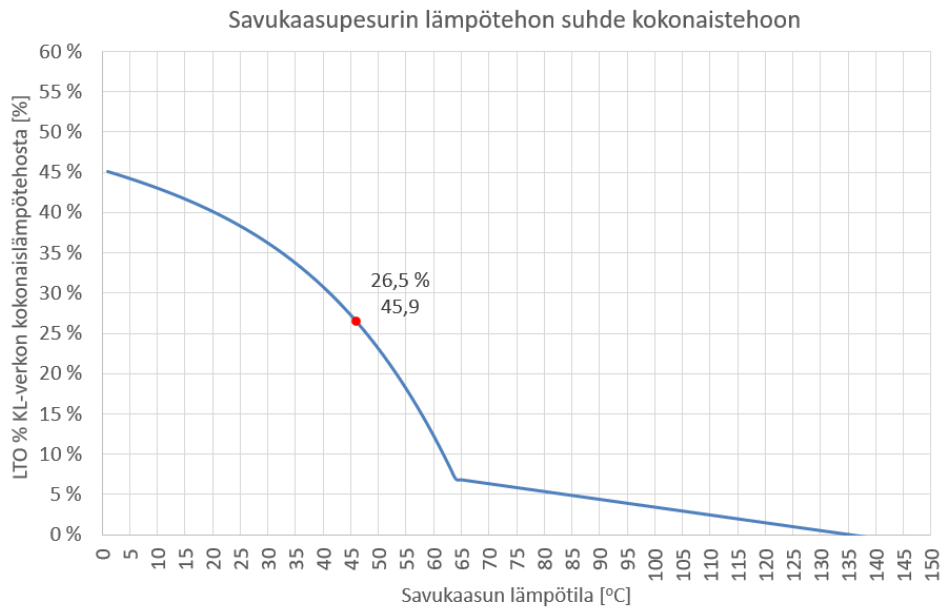
Savukaasupesurin lämmöntalteenottotehoa tutkittiin tässä työssä sähkösuodattimen jälkeen tapahtuvassa jäähtymisestä ja savukaasujen vesihöyryn lauhtumisesta. Lämpötehon tutkimiseksi selvitettiin savukaasulaskelmien avulla savukaasuissa tapahtuva lämpöenergian siirtymisen savukaasujen lämpötilan alentuessa. Lämpöenergian siirtymisen havainnollistamiseksi luotiin kuvaajat lämpötehopotentiaalista sekä lämpötehon suhteesta Jyväskylän kaukolämpöverkon lämpötehotarpeeseen. Kuvassa 28 on esitetty lämpötehopotentiaali ajotilanteessa 2.



Kuva 28. Savukaasupesurin lämpötehopotentiaali

Kuvasta 28 voidaan nähdä kuinka oikealta vasemmalle kulkeva sininen linja kuvaa savukaasujen jäähtymistä. Kastepisteen jälkeen käyrä alkaa nousta jyrkemmin luovuttaen myös suurimman potentiaalisen lämpöenergian vesihöyryn lauhtuessa. Punaisella oleva punainen piste kuvaa savukaasujen teoreettista loppulämpötilaa (45,9 °C) savukaasupesurin jälkeen. Tässä pisteessä savukaasuista saadaan lämpötehoa yhteensä 42,7 MW. Jos savukaasujen loppulämpötilaa saadaan laskettua alemmas voidaan savukaasuista saada enemmän lämpötehoa kuvan käyrän perusteella. Savukaasujen loppulämpötilaan vaikuttaa mm. kaukolämpöverkon paluu lämpötila, jota pystytään laskemaan esim. lämpöpumpulla. Myös tutkimuksessa käytetyn savukaasupesurin asteisuuden (3 °C) muutos vaikuttaa suoraan loppulämpötilaan.

Kuvasta 29 voidaan nähdä kuinka savukaasupesurin teoreettinen lämpöteho suhteutuu Jyväskylän kaukolämpöverkon kokonaislämpötehon tarpeeseen ajotilanteessa 2. Kuvan ajotilanteen lähtötiedoilla osuus kokonaistuotannosta on 26,5 %, kun kaukolämpöverkon lämpötehon tarve on n. 161 MW.

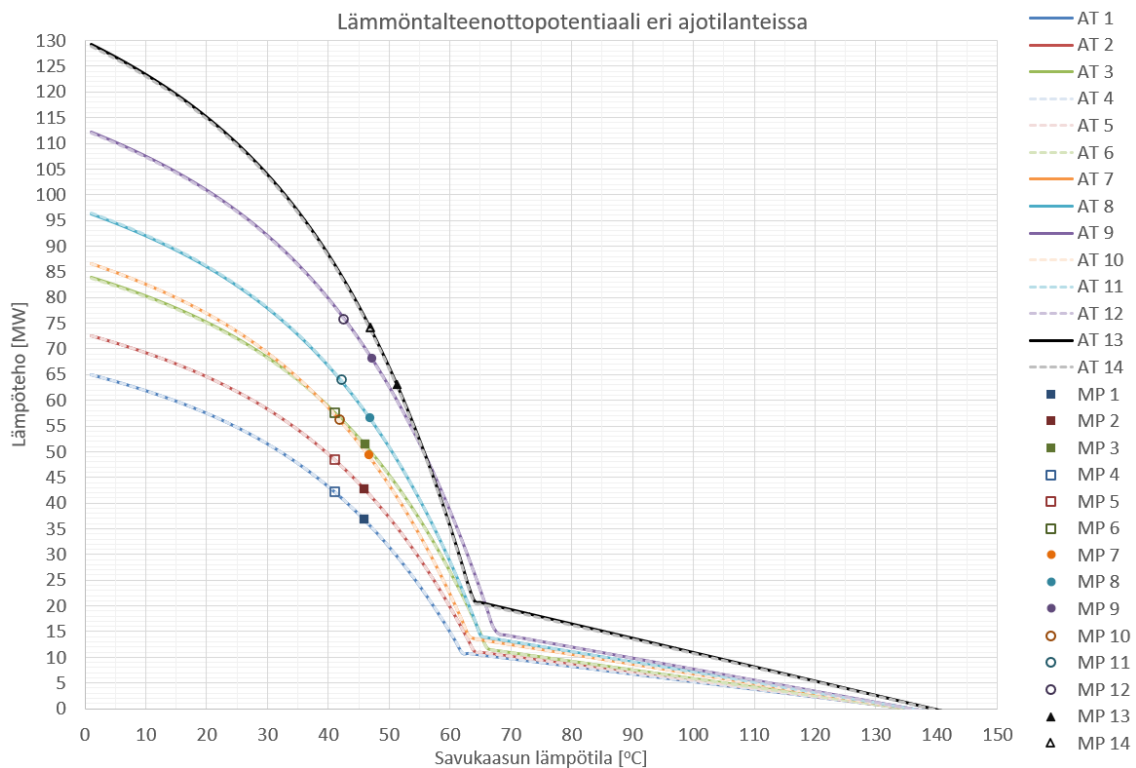


Kuva 29. Savukaasupesurin lämpötehon suhde kaukolämpöverkon kokonaislämpötehon tarpeeseen

Lämpötehon kuvista 28 ja 29 voidaan myös arvioida nykyisen savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmän toiminta-alue kuvan 20 palamisilman esilämmityksen lämpötehon mukaan. Kuvasta 20 nähdään, että palamisilman esilämmityksen lämpöteho on vaihdellut tyypillisesti 6-13 MW alueella riippuen mm. polttoainetehosta ja savukaasujen koostumuksesta. Jos palamisilman esilämmityksen lämpötehoa verrataan savukaasupesurin lämpötehopotentiaaliin, jää lämpöteho jäähtymiskäyrälle eikä lämmöntalteenotolla saavuteta lauhtumisesta saatavaa suurempaa lämpöenergiaa. Huomioitavaa myös on, että nykyinen lämmöntalteenottojärjestelmä toimii tarkoituksella savukaasujen jäähtymisen toiminta-alueella, eikä sillä pyritä saavuttamaan savukaasujen veden lauhtumista.

Kun lämmöntalteenottopotentiaali savukaasupesurista tutkitaan eri ajotilanteissa, voidaan havaita eroavaisuuksia kuvan 30 mukaisesti. Kuvassa on esitetty samanaikaisesti kaikki 14 eri ajotilannetta, joista suurin lämmöntalteenottotehopotentiaali saavutetaan ajotilanteilla 9 ja 12 riippuen tutkitaanko tilannetta kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan

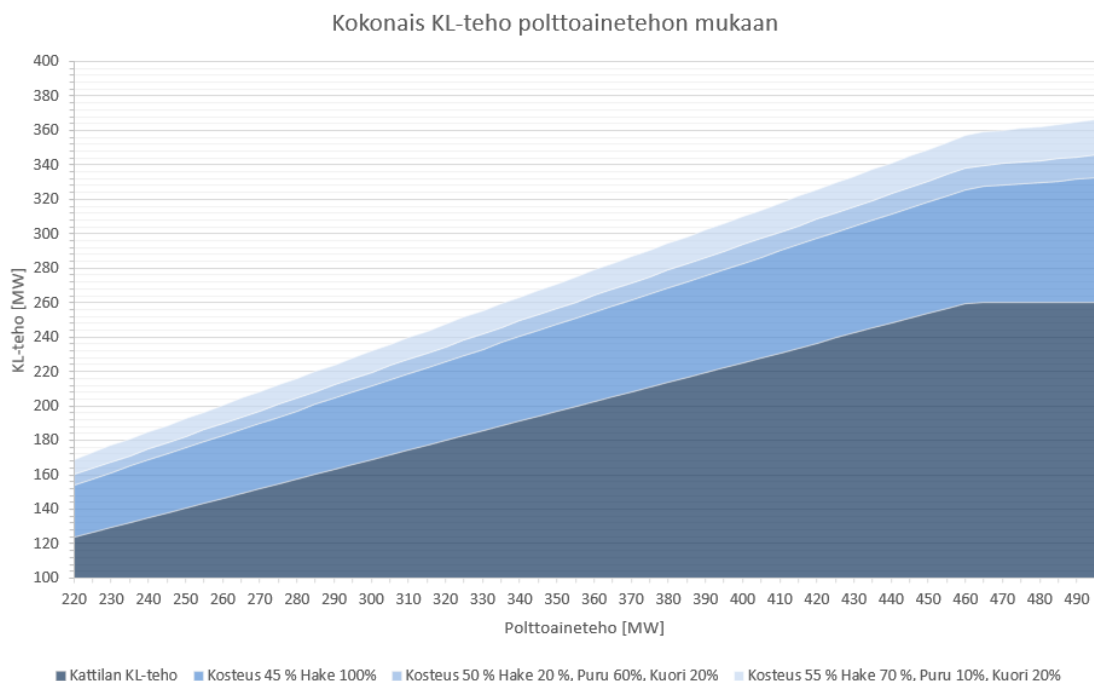
herkkytyksellä. Yleisesti kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan laskeminen $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:lla vaikuttaa kaikilla ajotilanteilla savukaasujen loppulämpötila alenemisena, joka kasvattaa hyödynnettävää lämpötehoa. Kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan laskemisen vaikutukset ovat esitetty kuvassa onttoina mitoituspisteinä. Vastaavasti täytetyt mitoituspisteet esittävät tilannetta, jossa kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila perustuu ulkolämpötilaan. Huomattavaa on myös, että kaukolämpöverkon paluuveden laskeminen ei juuri vaikuta samoilla lähtötiedoilla olevien ajotilanteiden savukaasukäyriin vaan ne kulkevat lähes identtisesti keskenään. Paluuveden lämpötilan laskeminen vaikuttaa vain savukaasukäyrien mitoituspisteisiin. Ajotilanteista korkeimman savukaasukäyrän muodostavat ajotilanteet 13 ja 14, joissa käytetään polttoainetehoa 450 MW. Savukaasujen suurella massavirralla ja ominaisuuksilla käyrä muodostuu jyrkästi, mutta lämmöntalteenottotehopotentiaalin mitoituspisteet jää alhaisemmaksi kaukolämpöverkon paluuveden korkean lämpötilan ja polttoaineen alhaisen kosteuden vuoksi. Mitoituspisteissä 9 ja 12 saavutetaan tutkimuksen korkeimmat lämpötehopotentiaalit, joka johtuu pääsääntöisesti korkeasta polttoaineen kosteudesta.



Kuva 30. Savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiali eri ajotilanteissa

Ajotilanteiden savukaasujen jäähtymiskäyrien osalta havaitaan korkeuseroa riippuen mm. polttoainetehosta, polttoaineen ja palamisilman kosteudesta ja polttoaineseoksesta. Polttoainetehto vaikuttaa merkittävästi savukaasujen massavirtaan polttoaineen massavirran kautta. Savukaasujen massavirran kasvaessa, myös savukaasuissa olevan vesihöyryn määrä kasvaa. Tämä kasvattaa myös lauhtumisesta syntyvää lämpöenergiaa. Polttoainetehon lisäksi polttoaineen kosteudella on suuri merkitys lämpötehoon. Palamisilman kosteudella on myös vaikutusta, mutta sen osuus on suhteessa huomattavasti pienempi. Verratessa ajotilanteita (1 vrt. 2 ja 3 sekä 4 vrt. 5 ja 6), joissa polttoainetehto pysyy samana, mutta polttoaineen kosteus kasvaa, voidaan käyriä nähdä selvää kasvua. Polttoaineseoksen eri polttoaineiden osuudet vaikuttavat myös savukaasujen kosteuteen ja mm. lämpöarvon kautta polttoaineen massavirtaan.

Tarkasteltaessa kokonaiskaukolämpötehon muodostumista kattilan ja savukaasupesurin yhteenlasketusta lämpötehosta, voidaan asia esittää kuvan 31 mukaisesti. Kuvassa tilannetta kuvataan polttoainetehon mukaan eri polttoaineen kosteuksilla ajotilanteessa 2. Kuvassa pohjalla kulkee kattilan peruskaukolämpökuorma minimitheosta 124 MW maksimitheoon 260 MW vallitsevilla vakioarvoilla. Vaaleamman sinisillä olevat alueet kattilan kaukolämpötehon päällä kuvaavat savukaasupesurin tuottamaa kaukolämpötehoa eri polttoaineseoksilla ja kosteuksilla. Kuvasta erottuu selvästi kattilan 260 MW kaukolämpötehorajoite.

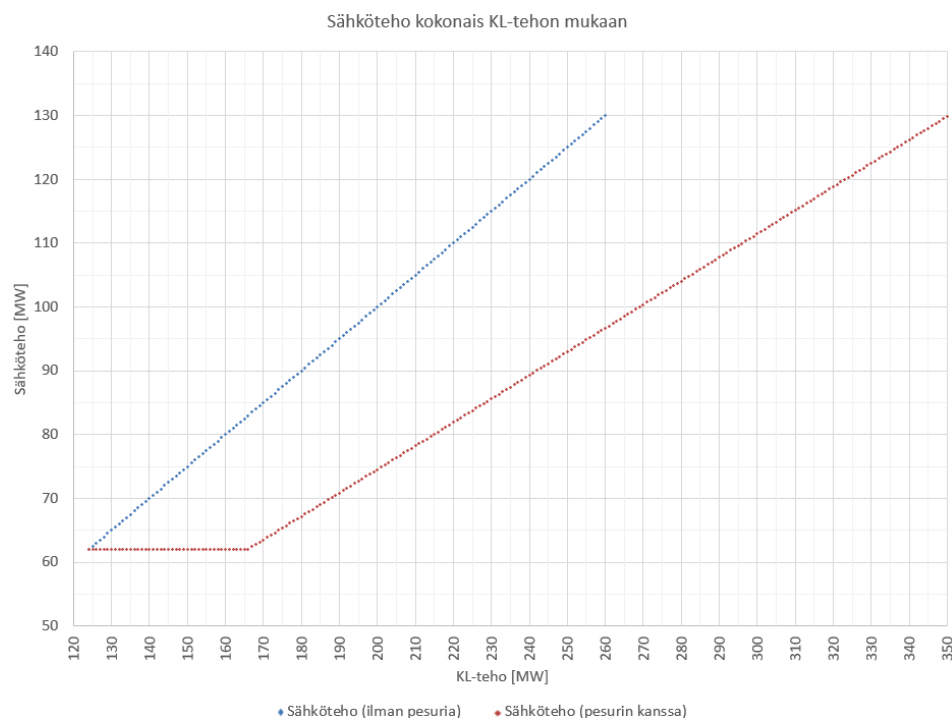


Kuva 31. Kokonaiskaukolämpötehon muodostuminen savukaasupesurin kanssa eri polttoaineolosuhteilla

Tuloksista huomataan, että polttoaineen kosteuden kasvaessa myös hyödynnettävä lämpöteho kasvaa. Suhteellisesti kaukolämpötehon kasvaminen eri polttoaineen kosteuksilla on kuitenkin pientä ja määrällisesti merkittävä potentiaali saavutetaan jo 45 % polttoainekosteudella. Savukaasupesurista saatava lämpöteho myös kasvaa jokaisella polttoainekosteudella tasaisesti polttoainetehon kasvaessa. Teoreettisesti savukaasupesurilla voidaan saavuttaa minimipolttoaineteholla n. 30 - 45 MW ja maksimipolttoaineteholla 72-106 MW lisäkaukolämpöteho.

7.1.2 Sähköteho

Sähkötehon tutkimiseksi oletettiin, että savukaasupesurilla tuotettu kaukolämpöteho korvaa kattilalla tuotettua kaukolämpötehoa. Kattilan kaukolämpöteho vaatimuksen vähentyessä myös polttoaineteho laskee. Polttoainetehon laskiessa myös saatava sähköteho laskee. Sähkötehon muutokset nähdään hyvin suoraviivaisina, koska tutkimuksessa käytettiin vakioituja rakennusasteen ja kulutusasteiden arvoja. Sähkötehon alenemaa voidaan havainnoida suhteessa tuotettuun kokonaiskaukolämpötehoon kuvasta 32.

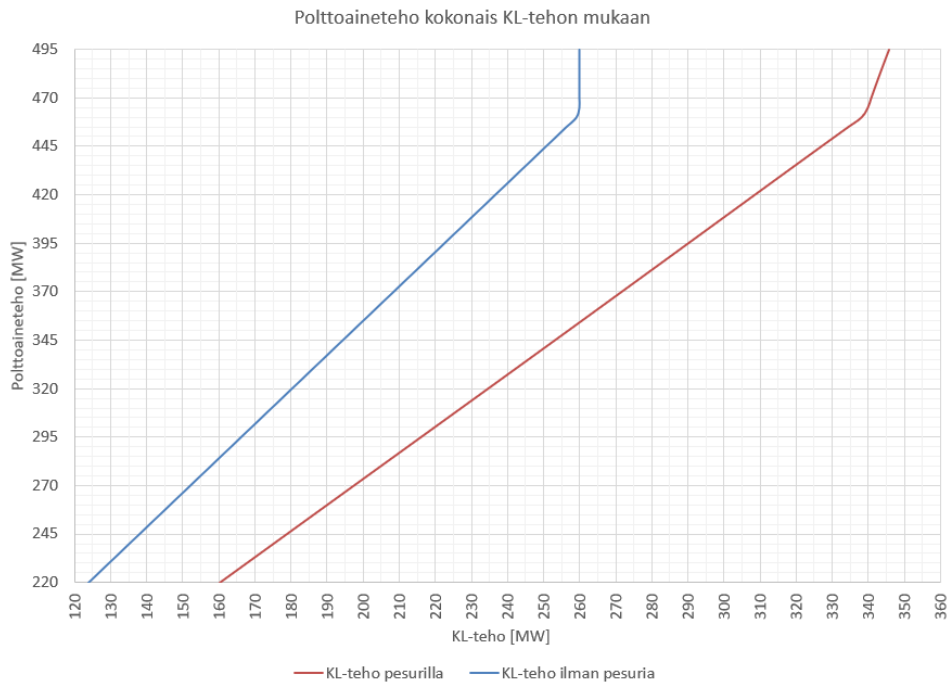


Kuva 32. Sähköteho suhteessa tuotettuun kokonaiskaukolämpötehoon

Kuvassa sinisellä on esitetty sähkötehon lineaarinen kasvukäyrä tilanteessa, jossa savukaasupesuria ei ole käytössä. Punaisella on esitetty tilanne, jossa savukaasupesuri on käytössä ajotilanteen 2 mukaisilla lähtötiedoilla. Savukaasupesurin kanssa saatava sähköteho on alhaisempi kuin ilman savukaasupesuria, koska polttoaineteho on alhaisempi. Kuvasta nähdään selkeästi kuinka kattilan minimipolttoaineteholla sähköteho pysyy vakiona, koska polttoaineteho ei muutu kun kaukolämpötehoa kasvatetaan savukaasupesurin lämmöntuotannolla. Pisteiden jälkeen, jossa minimipolttoaineteholla saavutetaan, savukaasupesurin maksimaalinen kaukolämpöteho aloitetaan nostamaan polttoainetehoa kaukolämpötehon nostamiseksi. Tästä pisteestä eteenpäin myös savukaasupesurin kanssa oleva sähköteho käyrä kulkee lineaarisesti, mutta eri kulmakertoimella kuin ilman pesuria kulkeva käyrä. Tästä johtuen sähkötehojen ero kasvaa suuremmilla polttoaine- ja kaukolämpötehoilla. Vakioitujen rakennusasteen ja kulutussuhteiden vuoksi tutkimuksessa ei saavutettu kattilan todellista maksimaalista sähkötehoa 190 MW.

7.1.3 Polttoaineteho ja polttoaineen massavirta

Savukaasupesurin tuottaman kaukolämpötehon korvattaessa kattilalla tuotettua kaukolämpötehoa, alenee kattilan tarvitsema polttoaineteho. Polttoainetehton ja polttoaineen massavirran kuvaajissa on käytetty ajotilanteen 2 lähtötietoja. Savukaasupesurin tuottaman kaukolämpötehon vaikutusta polttoainetehoon voidaan nähdä kuvasta 33.

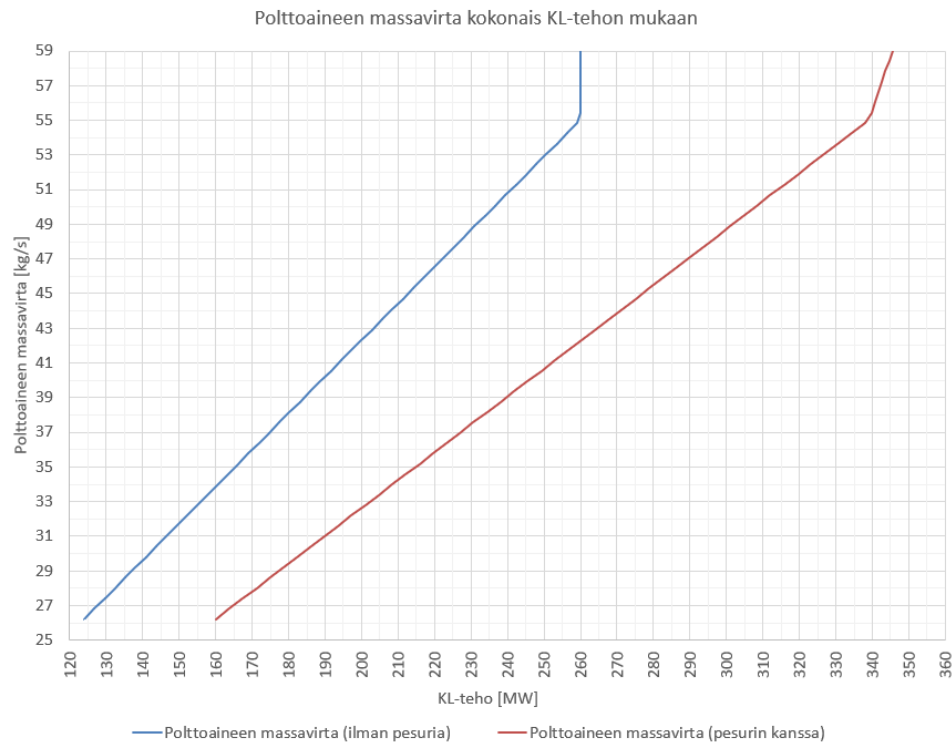


Kuva 33. Polttoainetehto suhteessa tuotettuun kokonaiskaukolämpötehoon

Kuvasta nähdään että kattilan polttoainetehto kaukolämmön minimitehosta 124 MW maksimitehoon 260 MW sinisellä käyrällä, sekä punaisella käyrällä n. 345 MW kun käytössä on myös savukaasupesurin tuottama kaukolämpöteho. Polttoainetehton ollessa minimi 220 MW, savukaasupesurilla pystytään tuottamaan esimerkin ajotilanteessa n. 35 MW lisälämpöteho. Polttoainetehton kasvaessa voidaan päätellä, että savukaasupesurin kanssa tuotettu kaukolämpöteho kasvaa huomattavasta enemmän sekä suuremmilla polttoainetehoilla ero kasvaa.

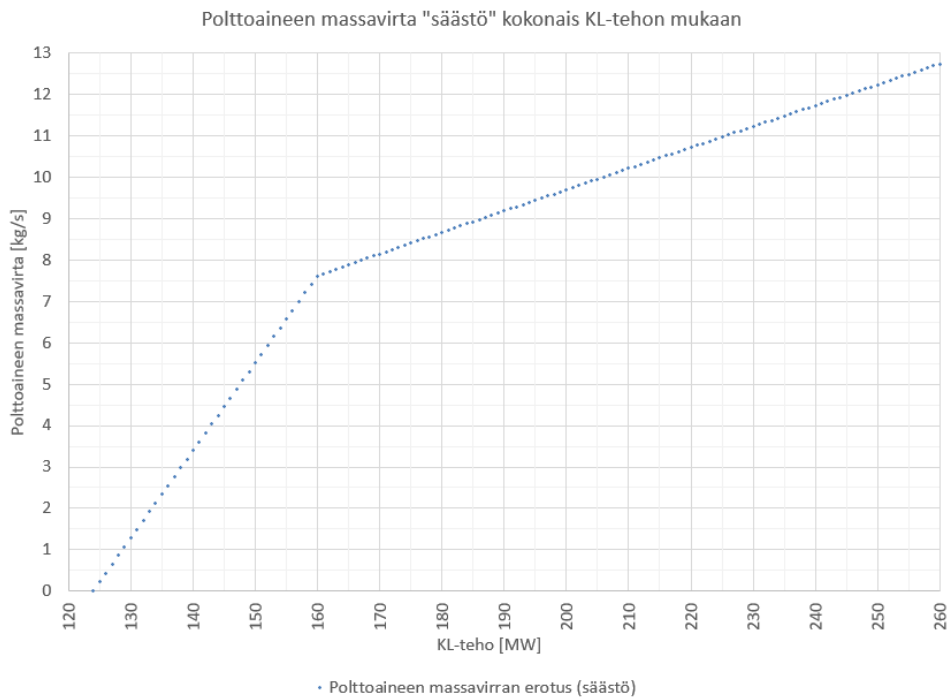
Lisäksi polttoainetehton ja kaukolämpötehton noustessa myös polttoaineen massavirta kasvaa. Kuvasta 34 nähdään kuinka polttoaineen massavirtakäyrät savukaasupesurin kanssa ja ilman käyttäytyvät suhteessa kokonaiskaukolämpötehoon. Kuvasta voidaan havaita samankaltaisia yhtäläisyyksiä sähkötehon ja polttoainetehton suhteen. Minimipolttoaineteholla polttoaineen massavirta on n. 26 kg/s ja ilman savukaasupesuria massavirta kasvaa suoraan suhteessa polttoainetehoon tai tuotettuun kaukolämpötehoon. Savukaasupesurin kanssa pystytään tuottamaan kaukolämpöä n. 160 MW samalla kattilan polttoaineen massavirralla, jos oletetaan että savukaasupesurista voidaan hyödyntää lämpötehoa asteittain. Minimipolttoainevirtaaman jälkeen punainen käyrä kulkee hieman pienemmällä kulmakertoimella, koska savukaasupesurin tuottama kaukolämpöteho alentaa kulmakerrointa. Tästä syystä myös polttoaineen säästö kasvaa polttoainetehton kasvaessa. Käytännössä polttoaineen massavirran kasvaessa savukaasuissa kulkeva kosteus kasvaa, jolloin savukaasupesurissa pystyy

lauhtumaan enemmän vesihöyryä. Lauhtumisen lisääntyessä lämpöteho kasvaa. Kuvasta nähdään myös kuinka kattilan saavuttaessa maksimaalisen kaukolämpötehon 260 MW, polttoaineen massavirran kulutuksen kulmakertoimet suhteessa kaukolämpötehoon muuttuvat. Tämän pisteen jälkeen kaukolämpötehoa ei saavuteta kuin savukaasupesurista.



Kuva 34. Polttoaineen massavirta suhteessa tuotettuun kokonaiskaukolämpötehoon

Kuvasta 35 voidaan nähdä polttoaineen massavirran erotus suhteessa tuotettuun kokonaiskaukolämpötehoon. Kuvasta nähdään selkeästi kuinka minimipolttoaineenmassavirralla polttoaineen massavirran erotus on erilainen, kun massavirtaa kasvatetaan minimipolttoainemassavirran jälkeen myös kattilan ja savukaasupesurin yhteistuotannossa. Kattilan maksimikaukolämpöteholla voidaan saavuttaa n. 13 kg/s polttoainesäästöt tutkimuksen oletuksilla ja määrittäyksillä. Polttoainesäästöön vaikuttaa oleellisesti mm. kaukolämpöverkon rajoitteet, kaukolämpöverkon lämpötilatasot sekä polttoaineiden ominaisuudet.

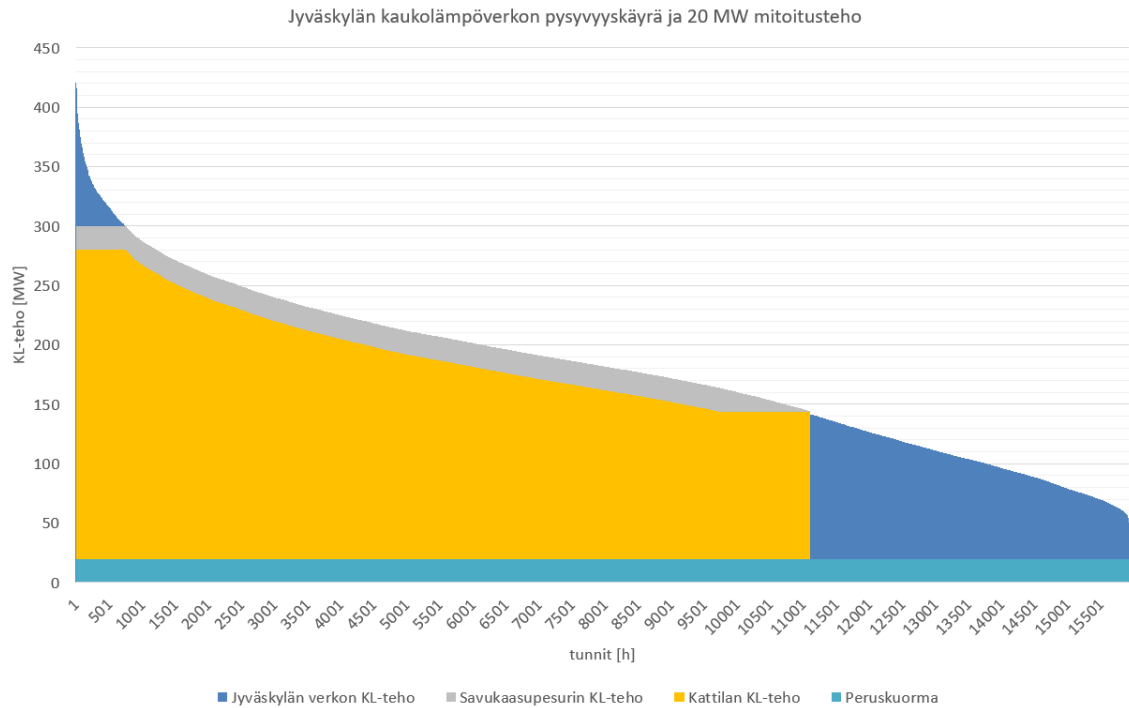


Kuva 35. Polttoaineen massavirtojen erotus kokonaiskaukolämpötehon mukaan

7.2 Mitoitustehotarkastelu

Mitoitustehotarkastelun tarkoituksena oli tutkia savukaasupesurin mitoitustehon asettamia rajoituksia ja muutoksia kaukolämmöntuotantoon, kokonaislämpö- ja sähköenergiaan sekä huipunkäyttötuntien määrään, polttoaineen säästöön, ja omakustannushintaan. Mitoitustehoarvon oletettiin rajoittavan suoraan kokonaislämmöntalteenottopotentiaalia mitoitustehon verran. Rajoitettu lämpöteho korvattiin simuloinnissa kattilan tuottamalla kaukolämpötehollla. Tarkastelussa käsiteltiin mitoitustehon muutoksia 5 MW välein 0-100 MW alueella.

Ensimmäiseksi kokonaiskaukolämmöntuotannon vaikutusta analysoitiin suhteessa Jyväskylän kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrään kolmelta eri ajokaudelta. Mitoitustehon vaikutusta kaukolämmöntuotannon pysyvyyskäyrään voidaan tutkia kuvasta 36. Kuvassa on käytetty 20 MW mitoitustehoa sekä ajotilanteen 2 lähtötietoja.



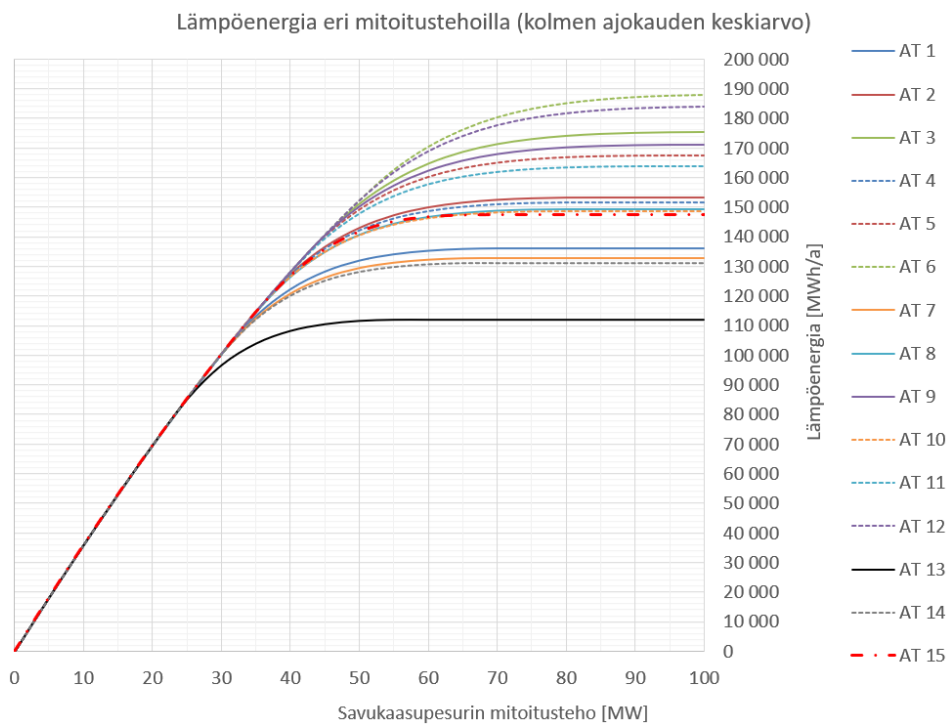
Kuva 36. Mitoitustehon 20 MW vaikutus kaukolämmöntuotannon pysyvyyskäyrään

Kuvasta 36 voidaan nähdä merkittäviä eroavaisuuksia kuvaan 27, jossa arvioitiin savukaasupesurin lämmöntalteenoton kokonaispotentiaalia Jyväskylän kaukolämpöverkkoon. Kun arvioidaan lämmöntalteenottoa mitoitustehon näkökulmasta, leikkaantuu harmaasta savukaasupesurin lämpötehon potentiaalista mitoitustehon määrittelemä alue. Leikkaantumisen suuruus riippuu mitoitustehosta, jolloin pienemmillä mitoitustehoilla lämmöntalteenottopotentiaalia jää enemmän käyttämättä. Potentiaalinen menetys korostuu entisestään suurilla polttoaineen massavirroilla ja kosteilla polttoaineilla. Simulointimallilla pystyttiin luomaan pysyvyyskäyrä eri mitoitustehoilla kuvaamaan eri mitoitustehojen vaikutusta kokonaispotentiaaliin, mutta asian havainnollistamiseksi työssä on esitetty vain yksi mitoitustehokuvaaja. Tästä ominaisuudesta oli hyötyä Alvalle kuvaamaan eri mitoitustehojen rajoitteita.

7.2.1 Lämpöenergia

Savukaasupesurista saatavaa lämpöenergiaa tarkasteltiin tässä työssä suhteessa mitoitustehoon eri ajotilanteiden mukaan. Kuvasta 37 voidaan nähdä tulokset, jossa esitetään hyödynnettävä lämpöenergia mitoitustehon mukaan eri ajotilanteilla. Tuloksista nähdään, että alle

25 MW mitoitusteholla ajotilanteilla ei ole merkitystä lämpöenergiaan, koska mitoitusteho rajoittaa saatavaa lämpötehoa yhtä paljon. Ajotilanteiden tekemä muutos alkaa näkyä selkeimmin 25 MW jälkeen, kun ajotilanteen 13 lämpöenergia käyrä alkaa kaartua kohti maksimaalista hyötyä 55 MW kohdalla. Heikoin saavutettava lämpöenergia johtuu mm. kuivasta polttoaineesta ja korkeasta kaukolämmön paluuveden lämpötilasta. Lämpöenergian ja mitoitustehon suhteen kuvassa näkyy selkeästi, kuinka ajotilanteet jakautuvat polttoaineen kosteuden ja kaukolämmön paluuveden lämpötilan herkkyyden mukaan. Toisin sanoen mitä kosteampi polttoaine ja kylmempi kaukolämpöveden paluuveden lämpötila, sitä suurempi lämpöenergia voidaan hyödyntää suuremmilla mitoitustehoilla. Toisaalta kuivilla polttoaineilla riittää mitoitusteholtaan alhaisempi savukaasupesuri, jolloin saavutetaan käyrän mukainen lämpöenergia.

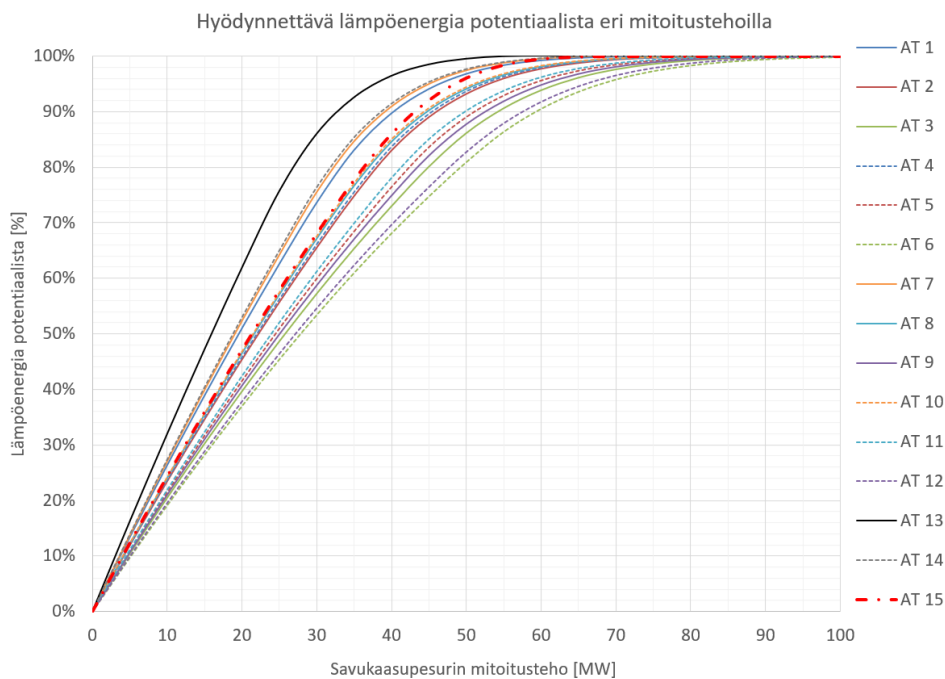


Kuva 37. Savukaasupesurin lämpöenergia mitoitustehon mukaan eri ajotilanteilla

Ajokausien toteuman mukainen ajotilanne 15 kulkee kuvassa keskimääräisesti, mikä johtuu pääosin polttoaineen 50 % kosteudesta. Lisäksi kaukolämmön paluuveden lämpötilan vaihtelun vaikutukset vuositasolla eivät tuo suurta muutosta lopputulokseen, vaan ne ovat linjassa muiden ajotilanteiden (2 ja 8) kanssa, joissa polttoaineseoksen kosteus on sama 50 %

ja kaukolämmön paluveden lämpötila on vakio. Tarkasteltaessa paluveden lämpötilan herkkyytyksen vaikutusta, voidaan todeta että $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutos tuo vuositasolla merkittävän korotuksen lämpöenergiaan. Korotuksen nousun määrä on kuitenkin ajotilannekohtainen. Lämpöenergian maksimaaliset määrät eri mitoitustehoilla vaihtelee n. 112-190 GWh välillä riippuen ajotilanteiden luomista olosuhteista. Pienemmillä mitoitustehoilla lämpöenergiat laskevat lämpötehon rajoitteen vuoksi.

Hyödynnettävä lämpöenergia voidaan suhteuttaa potentiaaliseen lämpöenergiaan, joka on kokonaisuudessaan saavutettavissa eri ajotilanteissa. Tämänkaltainen suhteuttaminen auttaa ymmärtämään, kuinka paljon mitoitusteho rajoittaa eri ajotilanteissa potentiaalia. Tutkimuksen lämpöenergian osuudet potentiaalista eri ajotilanteissa mitoitustehon mukaan on esitetty kuvassa 38.



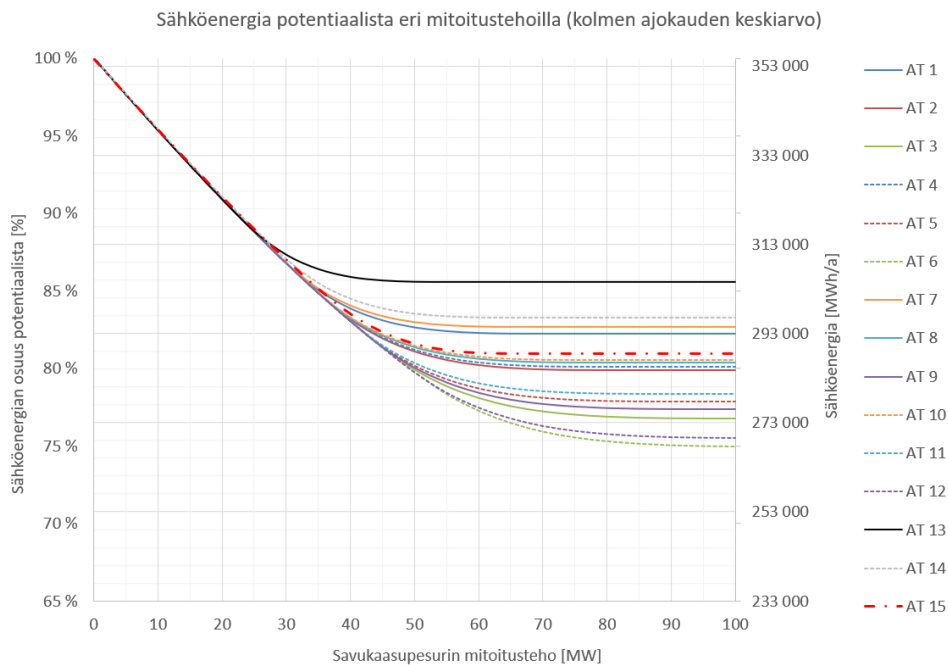
Kuva 38. Hyödynnettävän lämpöenergian osuus potentiaalista eri mitoitustehoilla

Tulokset kertovat kuinka mitoitustehon mukaan hyödyksi saatava lämpöenergian suhde potentiaaliin muuttuu eri ajotilanteilla. Kuvasta voidaan päätellä, millä mitoitusteholla saadaan hyödynnettyä potentiaalista suurin osa. Suurimmat erot ajotilanteiden välillä nähdään 30-40 MW mitoitustehojen välillä, jolloin ajotilanteilla 6 ja 12 saavutetaan 60 % potentiaalista kun ajotilanteella 13 yli 90 %. Lisäksi suuren määrän lämpöenergiaa synnyttävien ajotilanteiden

(kuva 37) lämpöenergian osuus potentiaalista kasvaa tasaisemmin kuin alhaisen lämpöenergian ajotilanteilla. Ajotilanne 15 kulkee hyödynnettävän potentiaalilin suhteen keskimääräisesti.

7.2.2 Sähköenergia

Kuten luvussa 7.1.2 todettiin, sähköteho on verrannollinen polttoainetehon kanssa, kun savukaasupesurin lämmöntalteenotto teho korvaa kattilan tuottamaa kaukolämpötehoa. Sähkötehon menetystä voidaan myös kuvata sähköenergian menetyksenä vuositason perustuen toteutuneisiin ajokausiin eri ajotilanteilla. Sähköenergian määrä ja prosentuaalinen muutos potentiaalista voidaan nähdä kuvasta 39. Tässä tutkimuksessa käytettiin kolmen ajokauden sähköenergian keskiarvoa.



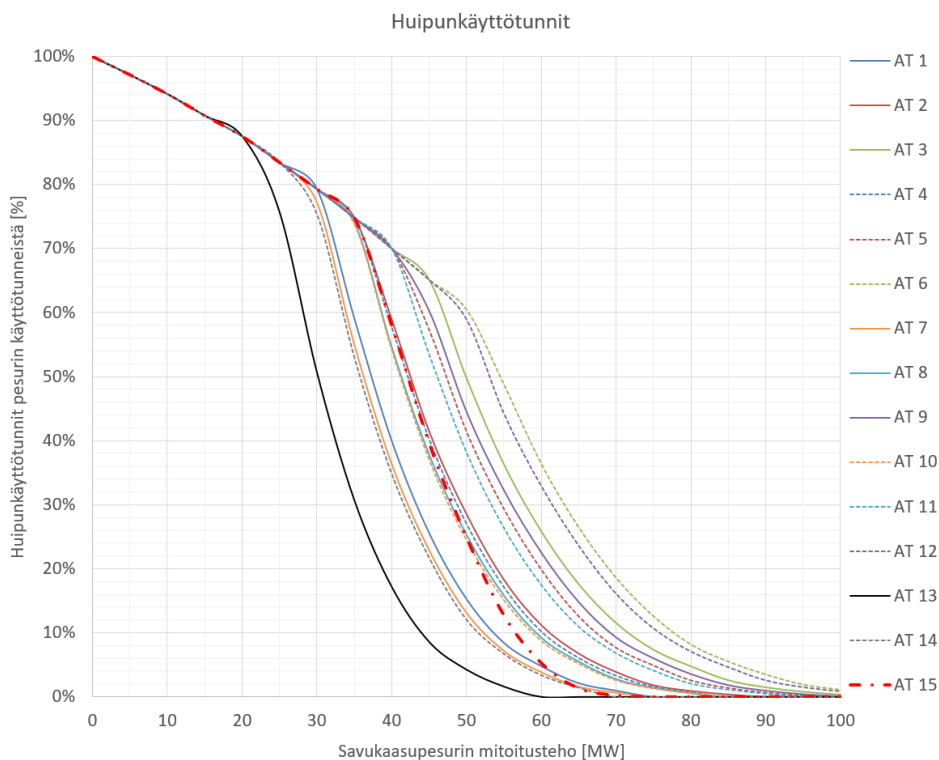
Kuva 39. Tuotetun sähköenergian määrä ja osuus potentiaalista mitoitustehon mukaan eri ajotilanteilla

Tuloksista nähdään, että mitä enemmän savukaasupesurin lämpöenergia korvaa kattilan tuottamasta kaukolämpöenergiasta vähentäen kattilan polttoainetehoa, vähenee myös sähköenergian määrä rakennusasteen ja kulutussuhteiden mukaisesti.

Laskennallisesti, jos kaikki mahdollinen kaukolämmön kulutus pyritään tuottamaan kattilalla, syntyy sähköenergiaa yhteensä n. 355 GWh. Tästä tilanteesta lämmöntalteenoton lämpöenergian tuottama muutos vähentää sähköenergian määrää n. 25 % ajotilanteen 6 ja 12 mukaisesti. Sähköenergian muutos vaihtelee kuitenkin mitoitusasteen ja ajotilanteen mukaan. Esimerkiksi ajotilanteessa 13 mitoitusasteella 50 MW menetetty sähköenergia on 15 %, koska hyödynnettävä savukaasupesurin lämpöenergia on pienempi. Toteuman mukainen ajotilanne 15 asettuu keskimääräiselle 20 % menetetyin sähköenergian tasolle.

7.2.3 Käyttötunnit

Työssä arvioitiin lämmöntalteenoton lämpötehon huipunkäyttötuntien määrän suhdetta kokonaiskäyttötunteihin eri mitoitusasteilla. Kuvassa 40 on esitetty eri ajotilanteiden huipunkäyttötuntien skenaariot mitoitusasteiden mukaan.



Kuva 40. Lämmöntalteenoton lämpötehon huipunkäyttötunnit mitoitusasteen mukaan

Kuvasta nähdään kuinka pienillä mitoitustehoilla huipunkäyttöaika on korkeampi kuin suuremmilla mitoitustehoilla. Tämä johtuu siitä, että pienillä mitoitustehoilla suurin osa ajasta mitoitusteho on rajoittavana tekijänä potentiaaliin nähden. Suurilla mitoitustehoilla taas kasvaa käyttötunnit jolloin huipputehoa ei saavuteta.

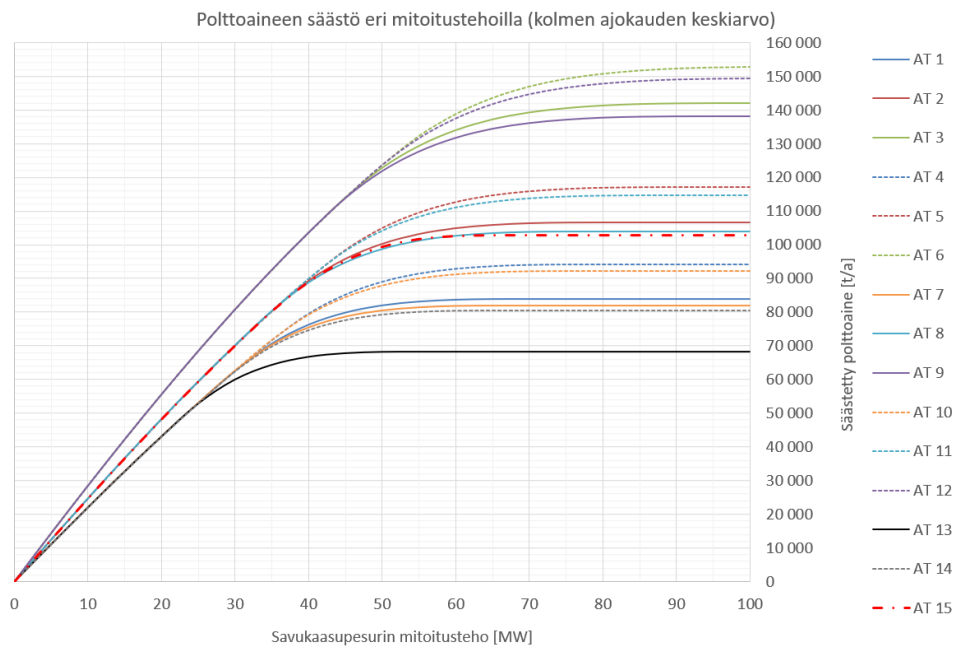
Tuloksien perusteella nähdään, että pienillä mitoitustehoilla huipunkäyttötunnit eivät juuri muutu eri ajotilanteilla. Muutokset alkavat näkyä n. 20MW kohdalla kun ajotilanteet kuivalla polttoaineseoksilla alkavat menettää huipunkäyttöaika mitoitustehon mukaan. Kaukolämmön paluuveden lämpötilan herkkyytys vaikuttaa ajotilanteesta riippumatta n. 15-20 % korkeammalla huipunkäyttöajalla. Ajotilanne 15 asettuu keskimäärin 50 % polttoainekosteuden mukaisille käyrille, mutta havaittavissa on muutosta suurilla mitoitustehoilla 55-70 MW välillä. Muutosvaikutus johtuu todellisen kaukolämmön paluuveden lämpötilan toteutuksesta, joka on korkea kylmillä pakkaskeleillä. Kylmillä pakkaskeleillä kaukolämpöverkon tehontarve on suurin, kasvattaen kattilalta tarvittavaa lämpö- ja polttoainetehoa. Suurella polttoaineteholla myös savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiaali on suuri, mutta korkean kaukolämmön paluuveden lämpötila vuoksi potentiaalia ei täysin pystytä hyödyntämään.

7.2.4 Kattilan polttoaineen säästö

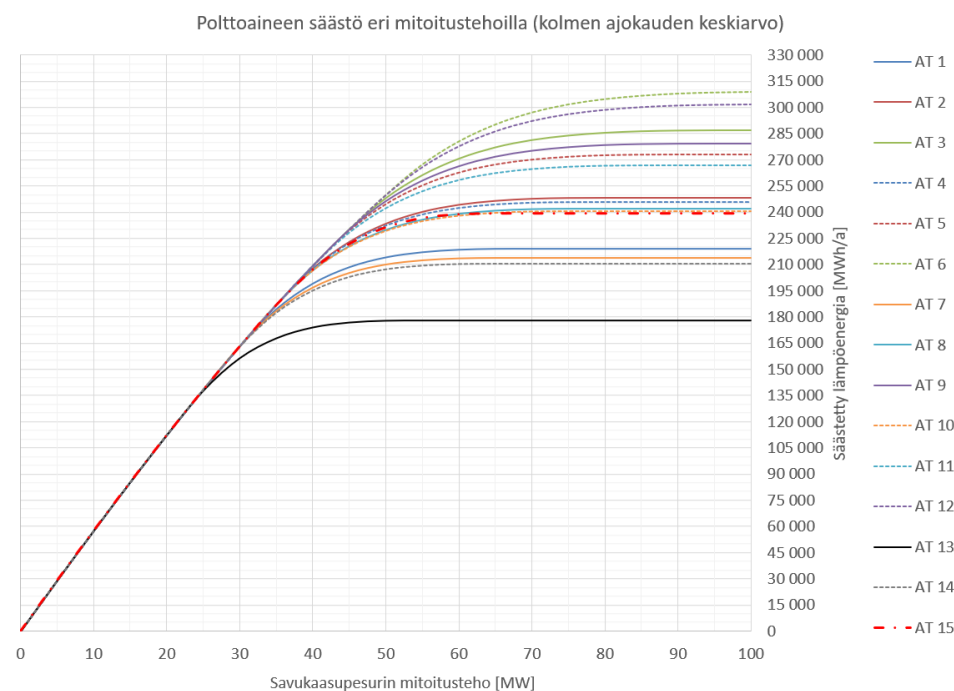
Tutkimuksessa tarkasteltiin aikaisemmin savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiaalinvaiikutusta kattilaan syötettävään polttoaineen massavirtaan, mutta tässä kappaleessa tutkitaan kokonaisuudessaan polttoainemäärää, joka pystytään säästämään. Polttoaineen säästö on kuvattu polttoaineen massana sekä energiana vuodessa eri mitoitustehoilla. Säästetty polttoaineen massa ja energia perustuu ajotilanteille määriteltyihin polttoaineen ominaisuuksiin kuten kosteuteen ja lämpöarvoon. Polttoaineen säästö polttoaineen massana mitoitustehon mukaan voidaan nähdä kuvasta 41 ja energiana kuvasta 42. Säästetty massa- tai energiayksikkö on kuvattu kolmen ajokauden keskiarvona.

Kuvista voidaan nähdä, että ajotilanteilla joissa on käytössä kosteat polttoaineseokset tuottavat suurimman polttoaineen säästön. Tämän lisäksi kaukolämmön paluuveden jäähdytys kasvattaa säästöä. Polttoaineen massaosuuksina säästöissä tulee suuremmat erot eri

ajotilanteiden välillä, johtuen polttoaineseoksessa olevasta kosteudesta ja sen eroista. Kuva 41, nähdään kuinka heti käyrien alkutilanteesta ajotilanteet jakautuu polttoaineen kosteuksien mukaan eri ryhmiin. Ryhmistä kosteimmat polttoaineseokset nousevat korkeimmalle kuvaajassa. Polttoaineen säästöt sijoittuvat massana n. 68-153 t/a ja energiana n. 178-309 GWh välille riippuen ajotilanteiden muuttujista.



Kuva 41. Polttoaineen säästöpotentiaali [t/a] mitoitustehon mukaan



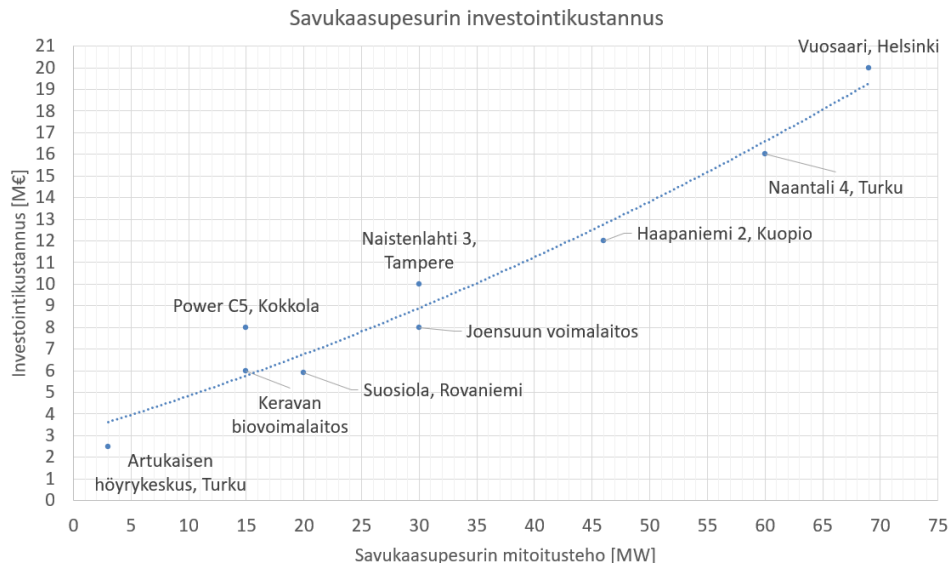
Kuva 42. Polttoaineen säästöpotentiaali [MWh/a] mitoitustehon mukaan

7.3 Kustannustarkastelu

Kustannustarkastelun tarkoituksena oli tutkia savukaasupesurin kustannusta omakustannushinnan avulla. Tarkastelussa arvioitiin merkittävimmät savukaasupesurin investointiin liittyvät tekijät, joiden mukaan arvioitiin omakustannushinnan osuutta lämmöntalteenottojärjestelmälle. Omakustannushintaan otettiin huomioon investointi- ja käyttökustannukset. Investointikustannukset perustuivat toteutuneisiin savukaasupesurihankkeiden investointikustannusarvioihin. Käyttökustannukset perustuivat arvioihin sähkön ja lipeän kulutuksen tuottamista kustannuksista. Omakustannushintaan ei otettu huomioon lauhteen käsittelyjärjestelmän vaatimia erikoistarpeita, kuten varsinaisen lauhteen käsittelyn tai ympäristöluvituksen aiheuttamia kustannuksia.

7.3.1 Investointikustannukset

Investointikustannuksien arvioimiseen käytettiin vuonna 2022 tehdyssä diplomityössä (Luumi. 2022, 68) saatuja selvitystuloksia savukaasupesureiden toteutuneista investointikustannuksista. Toteutuneiden investointikustannuksien lisäksi tietoihin lisättiin arvio Helsingissä sijaitsevan Vuosaaren biolämpölaitoksen (Valmet. 2020), Tampereen Naistenlahti 3 biovoimalaitoksen (Heinonen. 2023) sekä Turun Artukaisen höyrykeskuksen (Turku Energia. 2023) savukaasupesurien investointikustannuksista. Selvitystuloksista tehtiin investointi-mitoitustehokuvaaja, jonka perusteella luotiin polynominen trendikäyrä. Tulokset on nähtävistä kuvasta 43.



Kuva 43. Savukaasupesurien toteutuneet investointikustannukset (Luumi. 2022, 68, muokannut Aleksi Varis)

Tutkimuksessa arvioitiin savukaasupesurin investointikustannusta mitoitus-tehon mukaan käyttäen annuiteettimenetelmää. Annuiteettimenetelmällä saatiin selvitettyä vuosikohtainen kustannus määritellyllä korkotasolla ja pitoajalla. Tutkimuksessa käytettiin 5 % korkotasoa ja 20 vuoden pitoaika. Korkotaso ja pitoaika saatiin lähtötietoina Alvalta. Savukaasupesurille syntyvä investointikustannuksen annuiteetti on nähtävillä taulukosta 7.

Taulukko 7. Savukaasupesuri investointikustannuksen annuiteetti mitoitus-tehon mukaan

Savukaasupesurin mitoitus-teho [MW]	Annuiteetti [€/a]
0	- €
5	278 000 €
10	401 000 €
15	501 000 €
20	585 000 €
25	656 000 €
30	722 000 €
35	787 000 €
40	856 000 €
45	934 000 €
50	1 027 000 €
55	1 141 000 €
60	1 279 000 €
65	1 449 000 €
70	1 654 000 €
75	1 900 000 €
80	2 193 000 €
85	2 538 000 €
90	2 940 000 €
95	3 404 000 €
100	3 935 000 €

Investointikustannuksen annuiteetin omakustannushinta saatiin jakamalla annuiteetti mitoitustehon tuottamalla lämpöenergialla eri ajotilanteiden mukaan. Investoinnin aiheuttama omakustannushinnan osuus kokonaisinvestoinnista on merkittävä, koska se kattaa yli puolet kokonaisuudesta ajotilanteesta riippumatta. Yksilöllisiä investointien omakustannushintoja ajotilanteiden ja mitoitustehojen mukaan ei esitetty, vaan ne on esitetty yhteenlaskettuna omakustannushinnoissa kappaleessa 7.3.3. Tarkempi investoinnin omakustannushinnan osuus saadaan vähentämällä käyttökustannuksien osuudet, jotka tutkimuksessa olivat vakiot.

7.3.2 Käyttökustannukset

Käyttökustannuksien osalta otettiin huomioon lipeän ja sähkön kulutuksesta syntyvät kustannukset. Savukaasupesurin lipeän kulutusta arvioitiin Alva Rauhalahden voimalaitoksen savukaasupesurin lipeän kulutuksen mukaisesti tuotettua lämmöntalteenottoenergiaa kohden. Saadut tiedot Rauhalahden savukaasupesurista saatiin Alvan asiantuntijoilta sähköpostilla. Savukaasupesurin sähkön kulutusta arvioitiin sähkön kulutuksen suhteella tuotettua lämpöenergiaa kohden (Nummila. 2015). Käyttökustannuksien lähtötiedot voidaan nähdä taulukosta 8.

Taulukko 8. Käyttökustannusten lähtötiedot ja määritykset

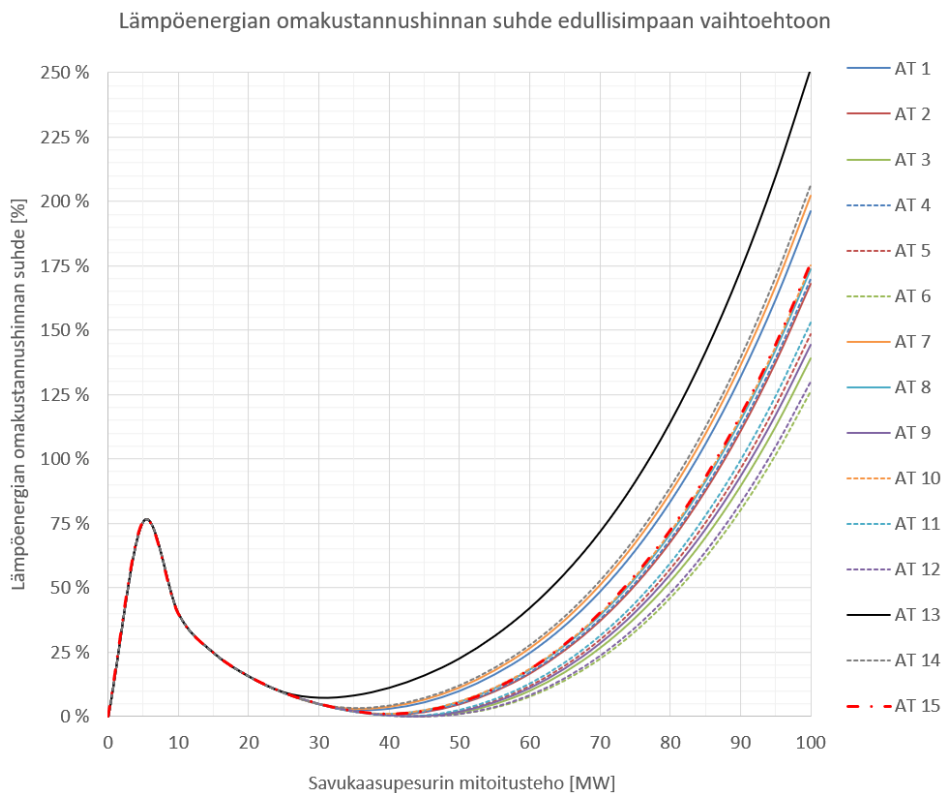
Nimike	Arvo	Yksikkö
Lipeän kulutus vuodessa	150	m ³ /a
Lipeän tiheys (50 % liuos)	1530	kg/m ³
Lipeän hinta (50 % liuos)	600	€/t
Rauhalahden savukaasupesurin lämpöenergia	62 672	MWh
Lipeän kulutus tuotettua lämpöenergiaa kohden	2,39	dm ³ /MWh
Sähkön kulutuksen suhde tuotettuun lämpöenergiaan	18	
Sähkön hinta	45	€/MWh

Lipeän kulutus ja savukaasupesurin lämpöenergian määrä vuodessa perustuu arvioon Rauhalahden voimalaitoksen lipeän vuosikulutuksesta ja savukaasupesurin lämmöntuotannosta biopolttoaineilla ilman turvetta. Lipeän hinta perustuu lipeän globaaliin hintaindeksiin (Hays. 2023) ja Alvan asiantuntijoiden arvioon. lämpöenergiaa kohden lipeää kuluu 2,39 dm³/MWh. Lipeän omakustannushinnan osuus kustannustarkastelussa oli 2,2 €/MWh.

Savukaasupesurin sähkön kulutusta arvioitiin lämpöenergian tuottoon suhteutettuna. Tarkastelussa käytetty arvio lämpöenergian tuotosta oli 18-kertainen sähkön kulutukseen nähden. Sähkön omakustannushinnan osuus kustannustarkastelussa oli 2,5 €/MWh. Sähkön yksikköhintana käytettiin tarkastelussa 45 €/MWh, joka saatiin Alvalta lähtötietoina.

7.3.3 Omakustannushinta

Omakustannushinnan tarkastelussa arvioitiin kustannuksia eri ajotilanteilla savukaasupesurin mitoitusasteen mukaan. Savukaasupesurin lämpöenergian omakustannushintaan otettiin huomioon lipeän ja sähkön kulutuksen osuudet 2,2 €/MWh ja 2,5 €/MWh sekä investointikustannuksen annuiteetti tuotetun lämpöenergian mukaan. Savukaasupesurin kustannustarkastelu eri ajotilanteilla mitoitusasteen mukaan on esitetty kuvassa 44. Kuvassa on esitetty eri ajotilanteiden ja mitoitusasteiden omakustannushinnan suhde edullisimpaan omakustannushintaan. Suhteena käytetään omakustannushinnan kasvua prosentuaalisesti.



Kuva 44. Savukaasupesurin lämmöntuotannon omakustannushinta mitoitusasteen mukaan

Tuloksista nähdään kuinka pienellä mitoitusteholla eri ajotilanteilla tulos on sama. Lisäksi voidaan todeta, että investointina pienen mitoitustehon savukaasupesuri on kallis suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan. Tuloksista nähdään omakustannushinnan alentuminen n. 6 MW jälkeen, jolloin omakustannushinnan suhde edullisimpaan on n. 76 % korkeampi. Alentumisen jälkeen lämpöenergian suhde kustannuksiin alkaa laskea saavuttaen edullisimman kokonaisomakustannushinnan. Edullisimpaan omakustannushintaan päästään 35-50 MW mitoitustehoilla, ajotilanteissa joissa polttoaineseoksen kosteus on 50 ja 55 %. Ajotilanteet, joissa on ollut käytössä kuivempi polttoaineseoksia jäävät omakustannushinnaltaan n. 5-7 % korkeammalle. Kuivilla polttoaineseoksilla edullisin omakustannushinta saavutetaan 25-35 MW mitoitustehoilla. Toteuman mukainen ajotilanne 15 asettuu edullisimman omakustannushinnan perusteella 40 MW kohdalle. Edullisimman omakustannushintatason jälkeen käyristä huomataan selvää nousua, koska mitoitustehon huipunkäyttöaika alkaa laskea ja kokonaiskustannukset kasvamaan. Erityisesti investointikustannukset kasvavat käyttökustannuksia enemmän.

8 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli tutkia Keljonlahden CHP-laitoksen savukaasujen lämmöntalteenotto-potentiaalia, muutosvaikutuksia ja kannattavuutta, minkä lähtökohtana oli lämpötehojen lisääminen ja ylijäämälämmön hyödyntäminen tarkoittaen käytännössä maksimaalisen kaukolämpötehon nostamista ja polttoainesäästöjä. Työn ajankohdan tukena oli olemassa olevan lämmöntalteenottojärjestelmän tulevat huolto- ja uusimistarpeet. Kokonaisuudessaan tutkimus oli varsin kattava selvitys Keljonlahden CHP-laitoksen ajotiedoista useammalta ajokaudelta, minkä perusteella pystyttiin luomaan erilaisia skenaarioita tulevaisuuden ajomalleista. Tutkimuksessa selvitettiin syvällisesti laitoksen savukaasujen muodostuminen ja niiden jäähtymisestä sekä lauhtumisesta syntyvä lämmöntalteenottoenergia teoreettisesti. Lämmöntalteenottopotentiaalia tutkittiin savukaasupesurin näkökulmasta.

Lämmöntalteenottopotentiaalia analysoitiin laajasti tutkimukseen erikseen luodulla laskentamallilla, jolla pystyttiin simuloimaan erikseen määriteltyjä ajotilanteita sekä muodostamaan laskennan tueksi selkeitä kuvaajia. Varsinaisen laskennan ja simuloinnin lisäksi, tutkimuksen tueksi käytiin useilla laitosvierailuilla Keljonlahdessa sekä pidettiin tutkimuksen seurantalavereita viikoittain työn sidoshenkilöiden kanssa. Tulokseksi saatiin 15 eri ajotilanteen analysoinnit lämmöntalteenottopotentiaalista lämpö- ja sähköenergian, käyttötuntien, polttoaineen säästön ja kustannuksien osalta. Ajotilanteet perustuivat polttoainetehon, polttoaineseoksen ja -kosteuden, ulkolämpötilan ja kaukolämmön paluuveden lämpötilan muutoksiin. Ajotilanteille tehtiin myös kaukolämmön paluuveden lämpötilan herkkyytys laskemalla lämpötilaa systemaattisesti $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Työssä arvioitiin myös savukaasupesurin eri mitoitustehojen vaikutusta lämmöntalteenottopotentiaaliin, polttoaineen säästöön, sähköenergiaan ja kustannuksiin.

Tulosten perusteella ajotilanteet, joissa polttoaineseoksen kosteudet ovat korkeat saavuttavat suurimman lämmöntalteenottopotentiaalin savukaasupesurilla eri mitoitustehoilla. Näillä ajotilanteilla saavutetaan jopa n. 190 GWh maksimaalinen kaukolämmöntuotanto vuositasolla. Omakustannushinnan perusteella ajotilanteet, joissa käytetään kosteaa polttoainetta näyttäytyy edullisimmiksi. Savukaasupesurin mitoitustehon ollessa 35-50 MW välillä saavutetaan omakustannushinnaksi tutkimuksen edullisin taso.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan tehdä erilaisia päätelmiä oikean mitoitus-
tehon valinnasta Keljonlahden CHP-laitokselle perustuen esimerkiksi kustannuksiin tai lämpöener-
giantuotannon maksimointiin. Jos valintakriteeriksi otetaan omakustannushinta, mitoitus-
teho sijoittuu 45 MW tasolle, jolloin esimerkiksi ajotilanteella 15 kaukolämpöenergiaa tuo-
tetaan n. 136 GWh, polttoainetta säästetään n. 225 GWh, huipunkäyttötunnit saavutetaan n.
45 %:sti, mutta sähköenergiaa menetetään n. 18 %. Toisaalta jos korvattavan lämpöenergian
omakustannushinta on korkeampi kuin suurien savukaasupesurien mitoitus-
tehojen omakus-
tannushinta, on järkevää miettiä valinnaksi edullisimman omakustannushinnan omaavan mi-
toitus-
tehon sijaan mitoitus-
tehoa, jolla saadaan enemmän lämmöntalteenottopotentiaalia hyö-
dynnettyä.

Huomioitavaa on myös ajotilanteen 15 yhtäläisyydet muiden ajotilanteiden kanssa. Vaikka
ajotilanteessa 15 kaukolämpöverkon paluulämpötilaa tarkennettiin riippuvaiseksi ulkoläm-
pötilaan, tulokset olivat samankaltaiset kuin muilla 50 % polttoainekosteuden ajotilanteilla.
Huomattavimmat muutokset olivat pääosin kylmillä pakkasjaksoilla, jolloin kaukolämmön
paluuveden lämpötilataso on korkeampi Jyväskylän kaukolämpöverkossa.

Tuloksien perusteella voidaan tehdä mielenkiintoisia päätelmiä, kuinka polttoaineiden kos-
teus pääsääntöisesti vaikuttaa positiivisesti savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiaa-
liin. Ajotilanteissa, joissa käytettiin 55 % polttoainekosteutta, saavutettiin laskennallisesti n.
40 % suurempi lämpötehopotentiaali verrattuna 45 % polttoainekosteuksiin. Polttoaineen
kosteudella on suuri painoarvo savukaasuista saatavan lämmöntalteenottopotentiaalin mää-
rityksessä. Polttoaineen kosteutta voitaisiin mahdollisesti kasvattaa, kun kuivan polttoaineen
sijaan pyrittäisiin biopolttoaineen käyttöön aikana pitämään polttoaine mahdollisimman
kosteana. Tämä voisi olla mahdollista esimerkiksi, jos logistisesti biopolttoaine tuotaisiin
hakuun jälkeen mahdollisimman nopeasti polttoon ilman välivarastointia. Välivarastoin-
nista luopuminen voisi myös vähentää siitä aiheutuvia kustannuksia. Toisaalta välivarastoin-
nilla saavutetaan kattilan kannalta haitallisten aineiden väheneminen biopolttoaineissa, jol-
loin tämä pitäisi ratkaista tavalla. Lisäksi on huomioitava, että 55 % polttoainekosteuden
käyttäminen on haastavaa ja jopa mahdotonta kattilan ajotavoille. Savukaasujen kosteuden
kasvaessa myös happokastepistelämpötila nousee, jolloin on tarkistettava, että happokaste-
pistettä ei saavuteta väärässä paikassa. Toisaalta vaihtoehtoisesti polttoaineen kosteuden li-
säämiselle voitaisiin käyttää lämpöpumppua alentamaan kaukolämpöverkon paluuveden
lämpötilaa, jolloin saataisiin kuivemminkin polttoaineilla enemmän hyödynnettävää

lämpötehoa. Tutkimuksessa lämpöpumpun vaikutusta arvioitiin karkeasti laskemalla paluuv veden lämpötilaa $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin tulokseksi saatiin selkeä kasvu lämpötehoon.

Polttoaineen kosteuden lisäksi lämpöarvolla on merkitys lämmöntalteenottopotentiaal in määrittämisessä. Tässä tutkimuksessa käytettiin ajotietoihin perustuvia keskiarvoisia lämpö arvoja, mutta todellisuudessa lämpöarvo vaihtelee hetkittäisesti palavan polttoaineen mu kaan. Lämpöarvon suora vaikutus polttoainetehtoon ja kattilan kaukolämpötehoon vaikuttaa myös savukaasupesurista saatavaan lämmöntalteenottotehtoon. Lämpöarvon muutos vaikut taa myös laskennallisesti säästettävän polttoaineen määrään.

Työn tuloksilla on merkittävä rooli tulevaisuudessa Alvalle. Työn tuloksilla saadaan avattua kokonaistilannetta ja mahdollisuuksia parantaa mm. savukaasujen lämmöntalteenottojärjes telmää energiatehokkaammaksi. Savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiaal in avulla pystyttäisiin myös siirtymään kohti optimaalisempaa lämmöntuotantoa eri lämpölaitoksien välillä, jolla on myös positiivisia ympäristövaikutuksia. Optimaalisempi jakauma saavute taan lisäämällä Keljonlahden CHP-laitoksella savukaasuista hyödynnettävissä olevaa läm pötehoa, mikä vähentää muiden laitoksien tuottamaa lämpötehoa. Mikäli savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentiaali saadaan hyödynnettyä, muiden kalliimpien lämmöntuotanto muotojen käynnistämistä voitaisiin välttyä kalliina kaukolämpöverkon kulutuksen huippu tunteina kylmillä pakkasjaksoilla.

8.1 Tuloksien arviointi ja kriittisyys

Työn tuloksia arvioidessa on huomioitavaa, että laskentamalli itsessään sisältää paljon eri laisia muuttujia, jotka vaikuttavat saatuihin lopputuloksiin. Laskentamallin ja tutkimuksen kannalta merkittävimmät muuttujat ovat mm. polttoaineen ominaisuudet (kosteus ja seoksen jakautuminen), kaukolämpöverkon tehontarve ja kaukolämpöverkon paluuv veden lämpötila. Polttoaineen ominaisuuksien osalta työssä käytetyt lähtötiedot ovat arvioita tulevaisuuden näkymistä, joten toteuma voi vaihdella käytetyistä arvoista.

Yleisesti simulaatiomallin osalta on hyvä tiedostaa tuloksien pohjautuminen sovitteisiin, jotka perustuvat laitoksen ajotietoihin. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ajotietojen suu ren massan vuoksi myös hajonta on suurta eri mittauksilla. Sovitteet perustuvat trendikäyriin

ajotiedoista, jolloin sovite antaa yleiskuvan ja keskimääräisen arvon ajotiedosta. Ääripisteiden tilanteet pitäisi tarkastella erikseen ja arvioida niiden vaikutusta lopputuloksiin.

Savukaasupesurin ja kattilan yhteistoiminnan kannalta on myös huomioitavaa, pystyvätkö ne toimimaan suurilla lämpötehoilla keskenään ilman että havaitaan ongelmia kattilan ajamisessa. Kosteiden polttoaineiden käyttäminen saattaa tuottaa rajoitteita kattilan käyttämiselle. Lisäksi on varmistettava, pystyykö kattila priimaamaan kaukolämpöverkon menoveden tarpeeksi korkealle lämpötilatasolle, jos savukaasupesurin tuottama lämmöntalteenoton kaukolämpöteho korvaa suuren osan kattilan tuottamasta kaukolämpötehosta. Savukaasupesurin tuottama kaukolämpöteho on ns. matalan lämpötilan lämpötehoa, jolla ei pystytä tyyppillisesti nostamaan kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilaa suoraan menoveden tasolle vaan se kierrätetään vielä kattilan kautta.

Kaukolämpöverkon käyttäytyminen on oleellinen tutkimuksen kannalta, koska se toimii lämpönieluna savukaasupesurista saatavalle lämpöteholle. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että kaukolämpöverkko pystyy vastaanottamaan kokonaisuudessaan tuotetun lämpötehon, mutta tämä pitäisi selvittää ja varmistaa oman simuloinnin kautta. Kaukolämpöverkon ominaisuuksien muutokset vaikuttavat myös suuresti savukaasupesurin energiataseeseen esimerkiksi kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan myötä. Lopulta lämmöntalteenottopotentiaalin hyödyntäminen riippuu paljon lämpönielun kyvystä vastaanottaa lämpöä. Tässä tutkimuksessa ei tutkittu erikseen lämpönielun rajoitteita, jolloin tuloksien arvioinnissa on syytä kiinnittää tähän huomiota. Oleellinen rajoite kaukolämpöverkon lämmönsiirron runkoputkissa havaittiin Keljonlahden CHP-laitoksen jälkeen, mikä rajoittaa lämmönsiirron 300 MW:iin.

8.2 Tuloksien vertailu

Kananen (2012, 43) kirjoittaa teoksessaan tuloksien vertailukelpoisuudesta näin: ”*muutosprosessin toteuttaminen voidaan siirtää vastaavaan kontekstiin, mutta ei tulosta sellaiseen, koska tulos edellyttää muutosprosessia. Tulosta voidaan hyödyntää muuallakin ottamalla huomioon muutoksen vaatimat toimenpiteet ja konteksti*” Tämän tutkimuksen tuloksia ja päätelmiä voidaan käyttää ja hyödyntää vastaavanlaisissa laitoksissa ja tilanteissa, jos

otetaan huomioon konteksti ja toimenpiteet joita muutos vaatii. Työn laskentamallin ja tuloksien perustessa Keljonlahden CHP-laitoksen ajokausien tietoihin on syytä todeta, että päätelmät ja tulokset eivät kuitenkaan ole suoraan yleistettävissä.

Vertailukelpoisia tutkimuksia savukaasupesurin lämmöntalteenottopotentialista ei tutkimusjaksolla löydetty. Savukaasujen lämmöntalteenottopotentialin määrityksen riippuessa täysin polttoaineseoksesta ja muista savukaasulaskennan lähtötiedoista, on tuloksia hankalaverrata muihin vastaavanlaisiin tutkimuksiin. Savukaasupesureja on tutkittu laajasti, mutta pääsääntöisesti on tutkimukset liittyneet kannattavuuteen tai muihin toimintaperiaatteiden tutkimuksiin.

Tutkimuksen tuloksia olisi mielenkiintoista verrata lähiaikoina valmistuneiden Tampereen Naissaari 3 ja Helsingin Vuosaaren biolämpölaitoksien savukaasupesureihin, koska ne edustavat nykyteknologian laitteistoja sekä edustavat suuremman koko luokan savukaasupesureita. Valmistuneiden laitoksien mitoitusravoihin on kuitenkin haastava päästä tutkimuksen puitteissa.

8.3 Jatkotutkimustarkastelu

Tutkimuksen teoreettisen tarkastelun tueksi olisi syytä tehdä teknillistaloudellinen tarkastelu, mikäli savukaasupesurista tehdään jatkoselvityksiä. Tutkimuksen teoreettinen tarkastelu antaa kattavan kuvan savukaasujen lämmöntalteenottopotentialista savukaasulaskennan avulla, mutta savukaasupesurien toimittajilla ja valmistajilla on omat rajoitteensa teoreettisen potentiaalinhödyntämisestä. Tässä tutkimuksessa ei otettu huomioon erilaitetoimittajien laiterajoitteita tai mahdollisuuksia erilaisilla laitekytkennöillä tai tekniikoilla.

Tutkimuksessa lähtökohtaisesti rajattiin pois kaukolämpöverkon luomat rajoitteet lämmöntalteenottopotentialinhödyntämisestä. Rajaus tehtiin tietoisesti, koska kaukolämmön rajoitteet lämmöntalteenoton suhteen havaittiin selkeästi omaksi tutkimuksen alueeksi. Jatkossa kaukolämpöverkon ja savukaasujen lämmöntalteenoton kannalta on tärkeää tutkia molempien rajoitteet. Käytännössä kaukolämpöverkon rajoite voi vähentää höydyntettävän lämmöntalteenottopotentialin määrää. Työn aikana havaittiin merkittävä rajoite, joka on n. 300 MW lämmönsiirtorajoite Keljonlahden CHP-laitokselta lähtevässä kaukolämmön

runkoputkissa. Tästä syystä voi olla järkevä tarkastella savukaasupesurin mitoitustehoa rajoitteen valossa. Toisaalta jos runkoputkistoa päivitetään rajoitteen nostamiseksi, ongelmaa ei ole.

Tutkimuksen tulokset toimivat lähtötietoina Keljonlahden CHP-laitoksen savukaasupesurin mahdollisille jatkotutkimuksille ja suunnittelulle. Tuloksien käyttäminen jatkotutkimuksissa on kuitenkin tarkistettava tarkoin, että ne vastaavat uutta kontekstia.

Lähteet

- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. ISBN 978-951-38-8418-5 (nid.). [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.10.2023] Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- Alva. 2023. Energiatehokas ja kestävä energiantuotanto. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://www.alva.fi/alva/yhtio/energiantuotanto/>
- Alva. N.d. Keljonlahden voimalaitos esittely. Esitysmateriaali. [Julkaisematon materiaali] [Viitattu 14.10.2023]
- A-insinöörit. N.d. Keljonlahden voimalaitos, Jyväskylä. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://www.ains.fi/referenssit/keljonlahden-voimalaitos-jyvaskyla>
- Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F. & Lävemann, E. 2015. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. Applied Energy, 151, 157–167. [Verkkoaineisto] [Viitattu 16.08.2023] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
- Caligo industria Oy. 2023. Caligo -savukaasupesurijärjestelmä. Esite. [Verkkoaineisto] [Viitattu 27.10.2023] Saatavissa: <https://www.caligoindustria.com/wp-content/uploads/2023/08/Caligo-Scrubber-Brochure-2023.pdf>
- Energiateollisuus Ry. 2021. Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2021. [Verkkoaineisto] [Viitattu 24.05.2023] Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/rakennusten_kaukolammitys_maaraykset_ja_ohjeet_julkaisu_k1_2021.html
- Energiateollisuus Ry. N.d. Yhteistuotanto. [Verkkoaineisto] [Viitattu 25.05.2023] Saatavissa: <https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto/>
- Fingrid. 2023. Voimalaitokset. Tilasto. [Verkkoaineisto] [Viitattu 14.10.2023] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/alkuperatakuun-tapahtumat/voimalaitokset/>

- Flyktman, M., Impola, R., & Linna, V. 2012 Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Energiateollisuus ry ja Ympäristöministeriö. [Verkkoaineisto] [Viitattu 19.05.2023] Saatavissa: https://energia.fi/files/393/Pienten_polttolaitosten_palamisen_hallinta_loppuraportti.pdf
- Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R. & Meyer, B. 2016. Estimating the global waste heat potential. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. [Verkkoaineisto] [Viitattu 11.05.2023] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- Heikkilä, I. & Kiuru, T. 2014. Ylijäämälämmön Taloudellinen Hyödyntäminen. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Yhteenvetoraportti. Motiva. pp. 60. [Verkkoaineisto] [Viitattu 16.06.2023] Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalamponenergia-analyysit.pdf
- Heinonen, T. 2023. Naistenlahti 3 savukaasupesurin lisätiedot. Tampereen Energia. Sähköpostiviesti. [Julkaisematon materiaali][Viitattu 11.10.2023]
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 5. painos. Helsinki: Opetushallitus. [Viitattu 24.05.2023]
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita Prima Oy. [Viitattu 10.08.2023]
- Huttunen, R. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön –julkaisu. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>
- Hays, K. 2023. Shintech sees global caustic soda prices inching up in H2 2023: Shin-Etsu. S&P Global. [Verkkoaineisto] [Viitattu 16.11.2023] Saatavissa: [Shintech sees global caustic soda prices inching up in H2 2023: Shin-Etsu | S&P Global Commodity Insights \(spglobal.com\)](https://www.spglobal.com/commodityinsights/insights/shintech-sees-global-caustic-soda-prices-inching-up-in-h2-2023-shin-etsu)
- Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä, kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. [Julkaisematon materiaali] [Viitattu 09.08.2023]
- Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus. [Viitattu 01.09.2023]

- Luumi, E. 2022. Biovoimalaitoksen savukaasujen lämmöntalteenottotutkimus. Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT [Verkkoaineisto] [Viitattu 11.10.2023] Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022050231926>
- Naukkarinen, J. 2015. What Engineering Scientists Know and How They Know It: Towards Understanding the Philosophy of Engineering Science in Finland. Väitöskirja. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Tampere. [Viitattu 05.05.2023]
- Nummila. M. 2015. Savukaasupesurikoulutus. Koulutusmateriaali. Caligo industria Oy [Julkaisematon materiaali] [Viitattu 12.10.2023]
- Nummila. M. 2023. Koulutusmateriaalin lisäykset. Sähköpostiviesti. Caligo industria Oy [Julkaisematon materiaali] [Viitattu 12.10.2023]
- Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo. 1. painos. WSOY [Viitattu 11.08.2023]
- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydenetty painos. Teknillistieteelliset akatemit. Helsinki. [Viitattu 18.8.2023]
- Rämä, M. & Klobut, K. 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. Asiakasraportti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. [Verkkoaineisto] [Viitattu 17.08.2023] Saatavilla: https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ ja_luokittelu_VTT_2020.pdf
- Sirola, V-P. & Tiitinen, M. 2018. Tekniset toimintaohjeet verkkoon liittämistä Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä. Energiateollisuus. [Verkkoaineisto] [Viitattu 15.10.2023] Saatavissa: https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot_kaukolampoverkkoon_tekniset_ohjeet_20181016.pdf
- Turku Energia. 2023. Artukaisten höyrykeskuksen savukaasupesuri vähentää hiilidioksidipäästöjä. Nettiartikkeli. [Verkkoaineisto] [Viitattu 16.10.2023] Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/uutiset/artukaisten-hoyrykeskuksen-savukaasupesuri-otettiin-kayttoon-entista-vahemman-paikallisia-hiilidioksidipaastoja/>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Energia- ja ilmastostrategia. Valtionneuvosto ja ministeriöt. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://tem.fi/energia-ja-ilmastostrategia>

Valmet. 2020. Valmet toimittaa savukaasujen lauhdutusjärjestelmän Helenin Vuosaaren biolämpölaitokselle Helsinkiin. Valmet Oyj:n lehdistötiedote. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/lehdistotiedotteet/2020/valmet-toimittaa-savukaasujen-lauhdutussarjestelman-helenin-vuosaaren-biolampolaitokselle-helsinkiin/>

Valtionneuvosto. 2019. Osallistava ja osaava Suomi – Sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Hallitusohjelma. Valtionneuvosto ja ministeriöt. Helsinki. ISBN epub 978-952-287-812-0. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/documents/10184/13883062/Neuvottelutulos+hallitusohjelmasta+3.6.2019.pdf/e60d2023-3596-dae0-05db-d36c96e629fa/Neuvottelutulos+hallitusohjelmasta+3.6.2019.pdf?version=1.0&download=true&t=1559547262000>

Vilja, V. 2007. Laitoksen yleiskuvaus. Vantaa: ÅF-Enprima Oy [Julkaisematon materiaali] [Viitattu 08.05.2023]

Ympäristöministeriö. 2022. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Valtionneuvosto ja ministeriöt. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>

Woolley, E., Luo, Y. & Simeone, A. 2018. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 29, 50–59. [Verkkoaineisto] [Viitattu 08.05.2023] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.001>

World Resources Institute. 2022. Climate Watch Historical GHG Emissions. Washington DC. [Verkkoaineisto] [Viitattu 19.10.2023] Saatavissa: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>

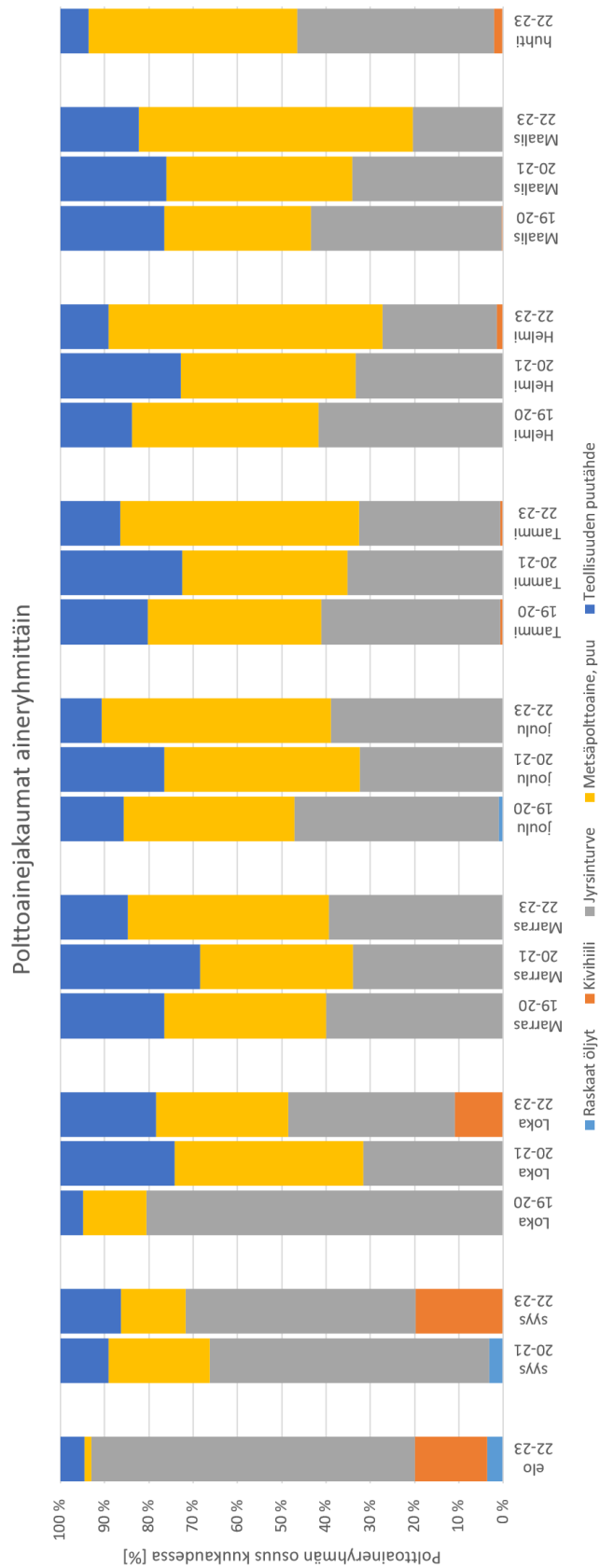
Liite 1. Puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia (Alakangas et al. 2016, 56)

Taulukko 4.3. Eri puupolttoainelajien alkuainepitoisuuksia (Moilanen et al. 1996, Taipale 1996, Wilén et al. 1996, Tahvanainen 1995, Pesonen et al. 2014).

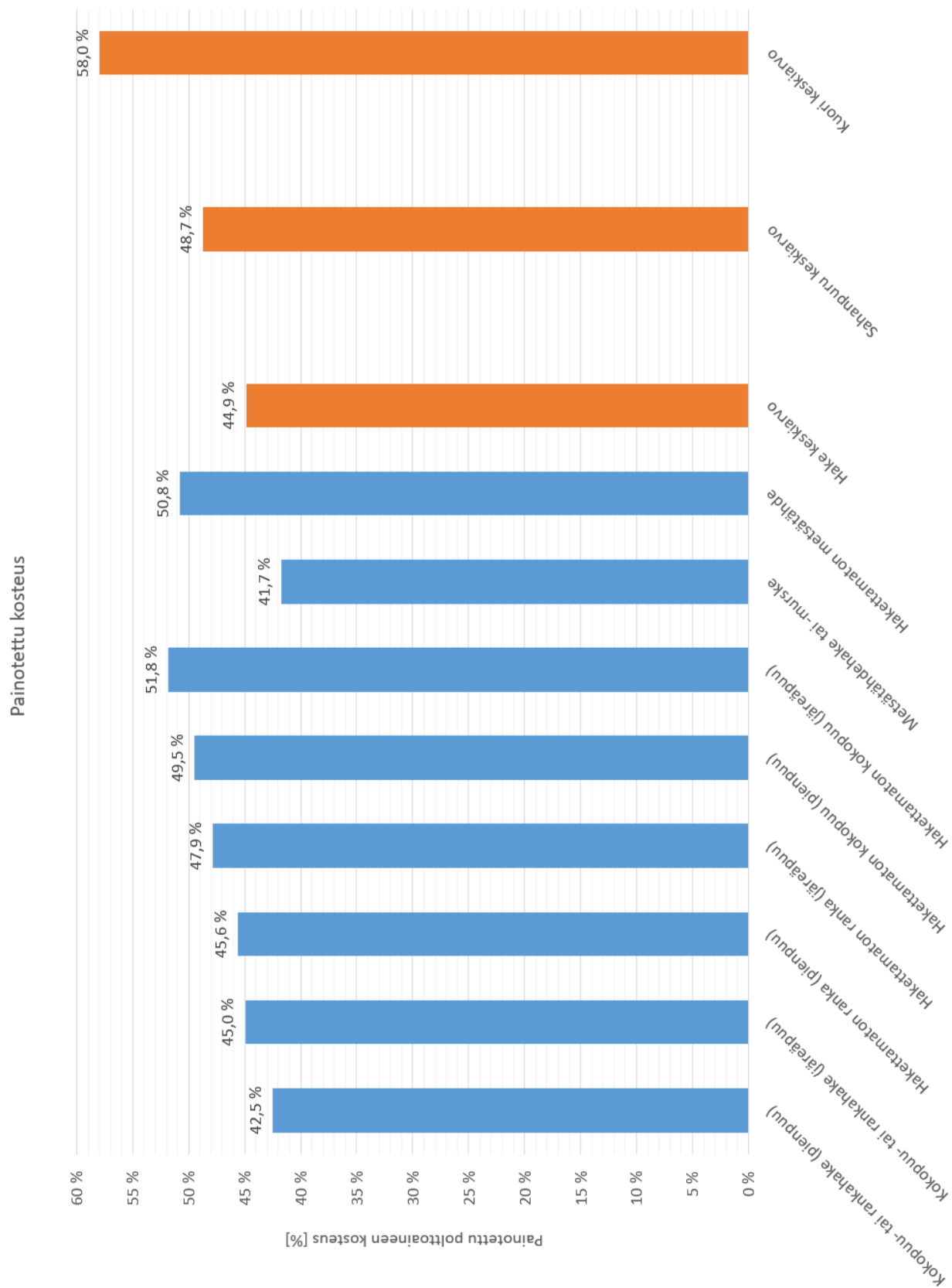
Puupolttoainelaji	Alkuainekoostumus, p-% kuiva-aineessa					
	C	H	N	O	S	Cl
Puu, yleensä	48–50	6,0–6,5	0,5–2,3	38–42	0,05	< 0,01
Kokopuuhake, mänty	51,8	6,1	0,3	41,2**	0,01	0,0042
Metsätähdehake	51,3	6,1	0,4	40,8**	0,02	0,0076
Havupuuhake					0,02–0,045	0,011–0,031
Lehtipuuhake					0,02–0,09	
Sahanpuru, mänty, kuoreton	51,0	6,0	0,08	42,8**	0	< 0,0050
Paju, kuorellinen (<i>Salix mysinifolia</i>)	47,8	5,7	0,2		0,03	0,005–0,022
Paju, kuoreton (<i>Salix mysinifolia</i>)	47,6	6,2	0,1		0,015	< 0,0005
Rusko-paju, kuorellinen (<i>Salix schwerinii</i>)	47,7	6,1	0,2		0,025	0,005–0,022
Rusko-paju, kuoreton (<i>Salix schwerinii</i>)	47,6	6,1	0,1		0,013	< 0,0005
Paju, kuorellinen (Klara)	47,5	6,0	0,1		0,027	
Paju, kuoreton (Klara)	47,4	6,0	0,2		0,016	
Paju	49,7	6,1	0,4	42,6**	0,03–0,05	0,0037
Männyn kuori*	52,5	5,7	0,4	39,7**	0,03	0,0085
	54,5	5,9	0,3	37,7		
Kuusen kuori*	49,9	5,9	0,4	41,4**	0,03	0,0279
	50,6	5,9	0,5	40,2		
Koivun kuori	56,6	6,8	0,8	34,2		

*Arvot kahdesta eri lähteestä. **Happi on laskettu erotuksena.

Liite 3. Polttoainejakaumat polttoaineryhmittäin kuukausikohtaisesti



Liite 4. Polttoaineiden painotettu kosteus polttoainejakeittain



Liite 5. Polttoaineiden painotettu lämpöarvo polttoainejakeittain

