



VOIMALAITOKSEN JOUSTOJEN KEHITTÄMINEN SÄHKÖMARKKINAN HINTAVAIHTELUN HYÖDYNTÄMISEKSI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Janne Matilainen

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Satu Lipiäinen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Samuli Räisänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Janne Matilainen

Voimalaitoksen joustojen kehittäminen sähkömarkkinan hintavaihtelun hyödyntämiseksi

Energiatekniikan diplomityö

2023

79 sivua, 27 kuvaa, 5 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Satu Lipiäinen

Avainsanat: Leijupetikattila, yhteistuotantolaitos, joustavuus

Sääriippuvainen, uusiutuva energiantuotantomuoto vaikuttaa nykyisin merkittävästi pörs-sisähkön hinnan muodostumisessa, suureksi kasvaneen kapasiteettinsa myötä. Sähköjärjes-telmässä sekä kulutuksen että tarjonnan täytyy olla tasapainossa toimiakseen. Sen tasapai-nottamisessa lämpökuormasta riippuvaisen yhteistuotantolaitoksen sähköntuotanto on ympärivuotisesti haasteellista.

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia kuormajoustavuusmenetelmiä tutkimuksen koh-teena olevan yhteistuotantolaitoksen hyödynnettäväksi. Laajempi kuormajoustavuus mah-dollistaa sähkömarkkinahintojen vaihteluun tehokkaamman vastaamisen. Merkittävimmäksi kuormajoustavuutta rajoittavaksi tekijäksi löydettiin kattilalaitoksen tuottaman höyryn läm-pötilan lasku. Tutkittaviksi ratkaisukeinoiksi ongelmaan valittiin kattilan osapetiratkaisun sekä kiertokaasun lisäämisen havainnollistamiset. Matalan kuorman haasteisiin työssä mi-toitettiin laitokselle oma apujäähdytin sekä selvitettiin sen kustannukset.

Osapetiratkaisun havainnollistamisen perusteella höyryn lämpötilan havaittiin laskevan en-tisestään, vaikka petilämpötila menetelmässä nousi. Menetelmän muut saavutettavat hyödyt todettiin olevan vähäisiä kyseisen kattilan tapauksessa. Kiertokaasun lisäämisen havaittiin tehostavan höyryn tulistamista alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Laskennan tuloksia pi-dettiin suuntaa antavia, jotka todettiin tarvitsevan jatkossa luotettavamman todentamisen. Matalan kuorman haasteisiin mitoitettun apujäähdyttimen lämpöteho todettiin olevan riittävä alasajotoimenpiteiden välttämiseksi. Sähköntuotannon lisäämisen kautta projekti ei lasken-nassa muodostunut kannattavaksi, vaikka lasketun korottoman takaisinmaksuajan perus-teella investointi maksaisi itsensä takaisin 11 vuoden kuluttua. Toisen kattilayksikön muu-tostyön takia, selvitystyön todettiin kuitenkin olleen tärkeä toteuttaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Janne Matilainen

Development of power plant's flexibility for utilizing electricity market price fluctuations

Master's thesis

2023

79 pages, 27 figures, 5 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post doctoral researcher Satu Lipiäinen

Keywords: Fluidized bed boiler, co-generation, flexibility

Weather dependent renewable energy production has nowadays a significant role in the formation of exchange electricity price due to its increased capacity. Electrical system's power consumption and supply must be in balance to function, for which heat load dependent co-generation plant's electricity generation is not functional year-round.

This thesis' goal is to examine load flexibility methods that a co-generation plant could utilize for electricity market price fluctuations. The main restricting factor of lowering the boiler's part load operation was found to be the decrease of live steam temperature. Demonstration of partial bed and blowing circulation gas were chosen as the methods as solution, based on the problem. An auxiliary cooler was dimensioned for the challenges of part load operation and the costs of the heat exchanger were discovered.

Live steam temperature was found decreasing in the demonstration of the partial bed, even though the bed temperature increased. The other benefits of the method were found to be little for the particular boiler. Blowing circulation gas method was found increasing super heating temperature, when compared to the reference case. However, indicative results of the method were noted to be verified in the future. The dimensioned auxiliary cooler's heat output was found to be sufficient for mitigation of the challenges of part load operation. The heat exchanger project was found not profitable for increasing plant's power output, even though in the calculation of interest-free repayment period, the project was found to pay itself back in 11 years. Nonetheless, it was noted that the investigation was crucial to implement due to coming modification in the power plant's other boiler unit.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

$a_{n,i}$	nykyarvotekijä	[-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
h	yksikköhinta	[€/MWh]
I	investointi	[€]
i	tuottovaatimus	[%]
k	kustannus	[€]
n	taloudellinen pitoaika	[a]
NPV	nettonykyarvo	[€]
P	teho	[W]
p	paine	[bar]
Q	energia	[Wh]
q_m	massavirta	[kg/s]
S	tulo	[€]
T	lämpötila	[°C]
t	käyttöaika	[h]

Kreikkalaiset

ϕ	lämpöteho	[W]
η	hyötysuhde	[-, %]
σ	rakennusaste	[-]

Alaindeksit

el	sähkö
h	huolto
in	sisäänvirtaus
JÄVE	järvivesi
KL	kaukolämpö
net	netto
out	ulosvirtaus
pa	polttoaine
ref	referenssi
th	lämpö
tot	kokonais

Lyhenteet

BFB	kuplapetikattila (Bubbling Fluidized Bed)
CFB	kiertopetikattila (Circulating Fluidized Bed)
CHP	lämmön- ja sähkön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
KLV	kaukolämmönvaihdin
LV	lämmönvaihdin
MCR	mitoitettu maksimikuorma (Maximum Continuous Rating)
SNCR	selektiivinen ei-katalyyttinen pelkistys (Selective Non Catalytic Reduction)
TEMA	putkimaisten vaihtimien valmistajien yhdistys (Tubular Exchanger Manufacturers Association)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
2	Kuopion Energia -konsernin yleisesittely	10
2.1	Energiantuotanto	11
2.2	Haapaniemen voimalaitos	12
3	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto.....	15
3.1	Yhteistuotannon pääkomponentit.....	18
3.1.1	Lämmönsiirto ja siihen liittyvät komponentit	19
3.1.2	Vastapaineturbiini sekä muita turbiinityyppejä	24
3.2	Sähköntuotannon joustavuuskeinot yhteistuotannossa	27
3.2.1	Lauhdeperäturbiini.....	27
3.2.2	Apujäähdytin.....	28
3.2.3	Kaukolämpöakku	28
3.2.4	Muita sähköntuotannon joustavuuskeinoja.....	30
4	Leijukerrospolttotekniikka	32
4.1	Kuplapetikattila	34
4.2	Kiertopetikattila.....	37
5	Haapaniemen voimalaitoksen käytössä olevat joustot	41
5.1	HP2 kattilan polttotekniikan muutos.....	41
5.2	HP2 kattilan savukaasupesuri	42
5.3	Voimalaitosalueen kaukolämpöakku	42
5.4	Voimalaitoksen apujäähdytys, lauhdesähköntuotanto sekä reduktioajo	44
6	HP3 voimalaitosyksikön joustojen kehittäminen	46
6.1	Minimikuormapistettä rajoittavat tekijät.....	46
6.1.1	NO _x -päästöt.....	47
6.1.2	Petilämpötila	49
6.1.3	Tulistetun höyryn lämpötila.....	50

6.2	Kiertopetikattilan osapetimuutos	51
6.2.1	Referenssi kiertopetikattila	53
6.2.2	HP3 kattilan matalan kuorman osapetiratkaisu	56
6.3	Kiertokaasun lisääminen kiertopetikattilassa	57
6.3.1	HP3 kattilan matalan kuorman kiertokaasuratkaisu	59
6.4	Apujäähdyttimen selvitystyö.....	60
6.4.1	Apujäähdyttämisen tarve Haapaniemen voimalaitoksella	60
6.4.2	Apujäähdyttimen laskentatyökalu.....	61
6.4.3	Apujäähdyttimen kannattavuus sekä takaisinmaksuaika	64
7	Tulosten johtopäätökset.....	69
8	Yhteenveto.....	73
	Lähteet	77

Liitteet

Liite 1. TEMA:n lämmönsiirtimet.

Liite 2. Vesihöyryn T-S-piirros.

1 Johdanto

Ilmastonmuutos sekä hiilineutraaliustavoitteet ovat olleet uusiutuvan energiantuotantomuodon kapasiteetin kasvun takana. Suureksi kasvaneen kapasiteettinsa myötä, sääriippuvaisella tuotannolla on nykyään merkittävä rooli sähkön hinnan muodostumisessa Suomen sähköpörssissä. Pörssihinnan muodostumiseen vaikuttaa sähkön kysynnän ja tarjonnan suhde. Sähkön ylitarjontaa esiintyy erityisesti kesän tuulisina, vähäisemmän kulutuksen ajanhetkinä, jolloin pörssihinnassa nähdään jopa negatiivisia lukemia. Kylminä, tuulettomina pakkaspäivinä puolestaan sähkön pörssihinta voi nousta korkeaksi, jos lisäksi siirtoyhteyksissä on rajoituksia. (Fingrid, 2023a.)

Haasteellisena tämä sähkömarkkinahinnan vaihteluväli nähdään polttoon perustuvissa, kaukolämpöä tuottavissa yhteistuotantolaitoksissa. Lämpökuormasta riippuvaisen laitoksen sähköntuotannon säätökyky on rajoittunutta, mikä asettaa haasteita sähköverkon tasapainottamisessa, varsinkin kesän minimilämpökuormalla.

Tämän työn tavoitteena on tutkia menetelmiä, joilla tutkimuksen kohteena olevan yhteistuotantolaitoksen kuormajoustavuutta saadaan laajennettua nykyistä monipuolisemmaksi. Laajempi kuormajoustavuus mahdollistaa laitoksen paremman sähkötehon säätökyvyn. Tutkimuksen aluksi tarkoituksena on selvittää tekijät, jotka nykyisin rajoittavat laitoksen kuormajoustavuutta. Tämän pohjalta voidaan valita sopivaksi nähty menetelmä, jonka toivotaan ratkaisevan käsiteltävä ongelma. Menetelmän käsittelyssä selvitetään tarvittavat toimenpiteet käyttöönottoa varten sekä havainnollistetaan saavutettavat hyödyt. Tulosten perusteella voidaan tehdä johtopäätös menetelmän hyödyllisyydestä tai sen hyödyttömyydestä kyseisen laitoksen ajotavassa. Kuormajoustavuustutkimuksen lisäksi työssä on tarkoituksena selvittää voimalaitoksella käytettävän lämmönvaihtimen tarpeellisuus. Sen perusteella voidaan mitoittaa vaihdin, selvittää tarvittavat toimenpiteet sekä hankintakustannukset. Tavoitteena on myös tarkastella vaihtimen kannattavuutta sekä sen takaisinmaksuaikaa.

Johdantokappaleesta työn käsitteleminen jatkuu toimintaympäristön kuvaamiseen, jossa työ on tarkoitus tehdä. Kyseisen toimintaympäristön yritysrakenteen kuvaamisessa keskitytään energiantuotannon näkökulmaan.

Työn kirjallisuusosiossa käsitellään yleisellä tasolla toimintaympäristön taustalla toimiva tekniikka sekä johdatellaan työn toteuttamisen tärkeyteen.

Työn käsittely jatkuu yhtiön aikaisemmin kohtaamiin haasteisiin, joihin sen on täytynyt vastata. Osiossa kerrotaan, mihin tarkoitukseen käyttöönotettuja menetelmiä käytetään sekä havainnollistetaan, mitä niiden avulla on saavutettu.

Työn lopussa tehtäväosuudesta saatuja tuloksia pohditaan sekä tehdään niiden perusteella johtopäätös. Yhteenvedossa kerrataan, mitä työssä tehtiin ja haluttiin ratkaista.

2 Kuopion Energia -konsernin yleisesittely

Tämän työn toimeksiantaja, Kuopion Energia -konserni, on Kuopiossa toimiva paikallinen energiayhtiö, joka vastaa alueensa asiakkaiden kotitalouksien sekä muiden kiinteistöjen lämmittämisestä ja sähköistämisestä, samalla huolehtien energiaverkkojensa ylläpidosta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 1) on kuvattuna konsernin yritysraakenne, jossa konsernin emoyhtiönä toimii Kuopion Energia Oy, vastuualueenaan energiantuotanto, kaukolämmitys -ja jäähdytys sekä konsernin hallinnoiminen että liiketoimintateknologia. Sähköverkkoliiketoimista vastaa tytäryhtiö Kuopion Sähköverkko Oy. (Kuopion Energia, 2023a.)

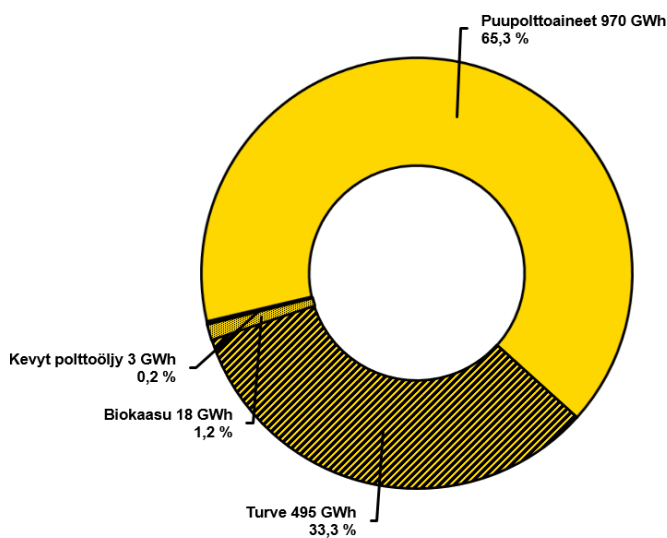


Kuva 1. Kuopion Energia -konsernin yritysraakenne (Kuopion Energia, 2023a).

Vuonna 2022 konsernin liikevaihto oli noin 123 miljoonaa euroa, joka oli noin 11 miljoonaa euroa suurempi edellisvuoteen verrattuna. Konsernin liikevoitto puolestaan oli noin 28 miljoonaa euroa, mikä laski noin 3 miljoonalla eurolla edellisvuodesta. Myyntituloja tuottivat kaukolämmityksen -ja jäähdytyksen myyminen asiakkaille (946 GWh ja 5 GWh), sähkönsiirtopalvelut (605 GWh) sekä tuotetun sähkön myyminen tukkumarkkinoille (365 GWh). (Kuopion Energia, 2023a.)

2.1 Energiantuotanto

Konsernin energiantuotannosta vastaa pääosin Haapaniemen kaupunginosassa toimiva Haapaniemen voimalaitos, mikä koostuu kahdesta voimalaitosyksiköstä HP2 ja HP3. Voimalaitos on yhteistuotantolaitos, jossa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä ulkolämpötilaa ja sähkön hinnan muutoksia myötäillen. Sähkön vuosituotanto on vaihdellut 300–350 GWh välillä sekä tuotettu lämpö 900–1000 GWh välillä. Myös Pitkälahden kaupunginosassa sijaitseva biokaasumoottorilaitos on konsernin omistama yhteistuotantolaitos, jossa tuotetaan sähköä verkkoon sekä siirretään syntyvä hukkalämpö kaukolämpöverkoston. Moottorivoimalaitoksen osuus on kuitenkin pieni osa kokonaistuotantoa, vaihdellen 8–10 GWh välillä sekä sähkön, että lämmön osalta. (Kuopion Energia, 2023b.) Seuraavassa kuvassa (Kuva 2) havainnollistetaan konsernin näissä yhteistuotantolaitoksissa käytettyjen polttoaineiden osuudet.



Kuva 2. Konsernin yhteistuotannon vuonna 2022 käyttämät polttoaineet (Kuopion Energia, 2023b).

Kaukolämpöverkon tuotannon varmistamisessa hyödynnetään eri puolille kaupunkia sijoitettuja öljyllä toimivia lämpökeskuksia. Tarvittaessa lämpökeskukset voidaan käynnistää tuottamaan kaupungin tarvitsema lämpö, kuitenkin niiden käyttäminen on ollut vähäistä, kuten yllä olevasta kuvasta nähdään. Normaalituotannossa öljyä käytetään ainoastaan

voimalaitoskattiloiden käynnistyspolttoaineena. Lämpökeskusten lisäksi energiantuotannon huoltovarmuutta parannetaan polttoainevarastoilla. Voimalaitosalueella biomassaterminaaliiin varastoidaan rankapuita sekä konsernin omistamille turvetuotantoalueille biopolttoaineita. Konserni on myös uusien investoinnein parantanut kaukolämmöntuotannon kannattavuutta. HP2 laitosyksikkö on varustettu savukaasupesurilla sekä voimalaitosalueelle on rakennettu kaukolämpöakku. Kaukolämpöverkkoon voidaan tuottaa lämpöä myös aurinkokehäimillä sekä kaukojäähdytysprosessin hukkalämmöllä. (Kuopion Energia, 2023b.)

Konsernin tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Näihin tavoitteisiin pääseminen edellyttää muun muassa uusien energiantuotantomenetelmien omaksumista. Konserni on tämän myötä mukana pienydinvoiman sijoituspaikkaselvityksessä sekä osakkaana Lestijärven tuulivoimapuistohankkeessa. (Kuopion Energia, 2023b.)

2.2 Haapaniemen voimalaitos

Haapaniemen voimalaitos koostuu kahdesta vastapainevoimalaitosyksiköstä HP2 ja HP3, jotka ovat mitoitettu kaupungin kaukolämpökuorman mukaan. Yksikköjen kaukolämpötehot sekä muut mitoitusparametrit ovat kuvattu alempana taulukkoon (Taulukko 1). HP2 on kattiloista vanhempi, vuonna 1982 turvepölypolttokattilana käyttöönotettu, mutta sittemmin vuonna 2013 modernisoitu kuplapetikattilaksi, muun muassa tiukentuneisiin NO_x-päästörajiin vastaten. Tekniikan muutostyö mahdollisti biopolttoaineosuuden merkittävän nostamisen, vähentäen näin myös hiilidioksidipäästöjä. HP2 kattilan savupiipun yhteyteen on vuonna 2015 rakennettu savukaasupesuri, jolla entisestään voidaan vähentää syntyviä päästöjä, kuten rikkiä sekä pienhiukkasia. Pesurin tekniikka mahdollistaa myös lämmöntalteenoton savukaasuista, mikä parantaa sekä polttoainetehokkuutta että laitoksen kokonaishyötysuhdetta, vähentyneen polttoainetarpeen myötä. Kattilaan on suunniteltu vuonna 2024 toteutettava polttotekniikan jatkokehittäminen, millä fossiilisten polttoaineiden käytöstä voidaan hallitusti luopua kokonaan. Fossiilisista polttoaineista luopuminen on yksi vaadittavista keinoista hiilineutraaliustavoitteeseen pääsemisessä. (Kuopion Energia, 2023b.)

HP3 kattila on vuonna 2011 valmistunut kattilalaitos, joka on varustettu uusimmalla mahdollisella tekniikalla. Valmistuessaan kattila korvasi vanhan HP1 turvepölypolttokattilan. Polttotekniikaltaan HP3 on kiertopetikattila, millä voidaan joustavasti polttaa biopolttoaineita täysin ilman fossiilisia tukipolttoaineita. Tekniikka mahdollistaa vähäiset päästötasot,

mitä edelleen voidaan tehostaa ammoniakkiveden sekä kalkkikiven syöttämisellä kattilaan. (Kuopion Energia, 2023b.)

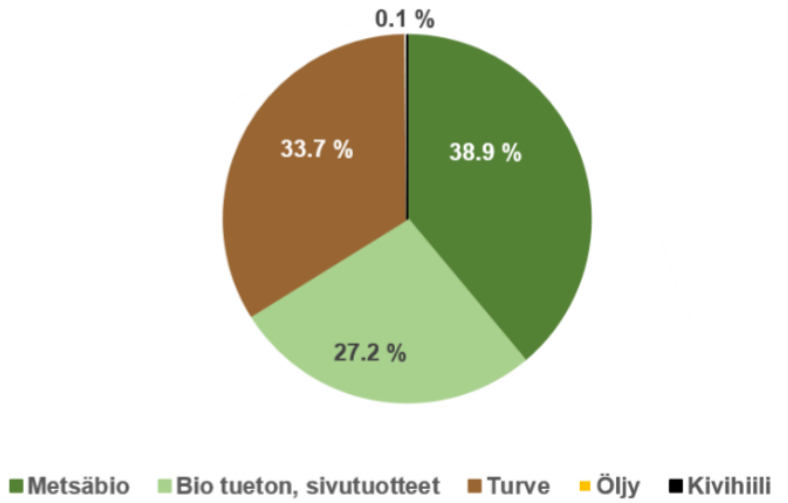
Taulukko 1. Voimalaitoskattiloiden mitoitusarvot (Kuopion Energia, 2023c).

	HP2	HP3
Höyryteho P_{th} [MW]	220	160
Tuorehöyryn massavirta q_m [kg/s]	88	65
Tuorehöyryn paine p [bar]	114	130
Tuorehöyryn lämpötila T [°C]	530	535
Kaukolämpöteho P_{th} [MW]	* 200	100
Sähköteho P_{el} [MW]	70	50

* Savukaasupesuri mukaan luettuna

Kuten yllä olevasta taulukosta nähdään, HP2 on kattiloista höyryteholtaan myös suurempi. Tämän lisäksi kattilan tekniikka mahdollistaa matalamman kuormatason saavuttamisen, jolloin sen kokonaiskäyttöaika muodostuu vuoden aikana suuremmaksi. Taulukossa kuvatut kaukolämpö -ja sähkötehot riippuvat muun muassa kaupungin lämpökuormasta sekä laitoksen ajotavasta. HP2 kattilan savukaasupesurilta saatavissa oleva kaukolämpöteho on esimerkiksi riippuvainen sen hetkisen käytetyn polttoaineen sisältämästä kosteudesta.

Normaalijossa kattilayksiköt tuottavat turbiiniyksiköillään sekä kaukolämpöä että sähköä. Tarvittaessa tuotannossa voidaan hyödyntää vanhan HP1 kattilayksikön turbiinia. Laitosyksiköt hyödyntävät alueella sijaitsevaa kaukolämpöakkaa kaukolämpöveden varastointiin, mikä sekä tuo lämmöntoimitusvarmuutta että mahdollistaa joustavamman sähköntuotannon ajoittamisen. Tekniikoista sekä joustotavoista kuvataan tarkemmin seuraavissa kappaleissa. (Kuopion Energia, 2023b.) Alla olevaan kuvaan (Kuva 3) havainnollistetaan Haapaniemen voimalaitoksen tuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuudet.

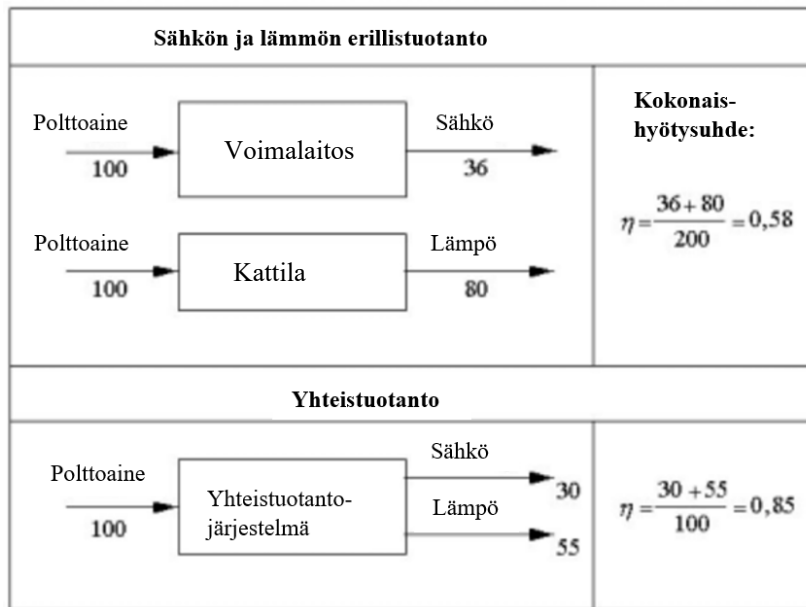


Kuva 3. Haapaniemen voimalaitoksen polttoaineiden osuudet vuonna 2022 (Kuopion Energia, 2023c).

Vuositasolla polttoainetta Haapaniemen voimalaitoksella kuluu 1,5–1,8 miljoonaa kuutiota, mistä uusiutuvien biopolttoaineiden osuus oli noin 65 % yllä olevan kuvan mukaisesti vuonna 2022. Metsäbiopolttoaine (tuellinen) koostuu lähiseuduilta saatavista hakkuutähleistä, rankahakkeesta, sekä muista metsästä saatavista biomassajakeista. Sivutuotteet (tueton) ovat puolestaan sahatteollisuuden sivuvirtoja sekä turve tuotetaan lähimaakunnissa. Tämän myötä voimalaitoksen polttoainehuolto on nykyään lähes täysin kotimainen, mikä luo paljon työpaikkoja lähiseuduille. Kivihiililtä on hankittu varmuusvarastoksi, eikä sitä nykyään käytetä polttoaineena. Fossiilisten polttoaineiden osuus tulee kuitenkin jatkossa pienentymään, sillä yhtiön tavoitteena on päästä eroon fossiilisten polttoaineiden CO₂-päästöistä. Tämä tarkoittaa käytännössä turpeen käytön hallittua alasajoa, mikä tuo omat haasteensa sen korvaamisella nykyisin kallistuneilla sekä toisaalta kilpailluilla puupolttoaineilla. (Kuopion Energia, 2023b.)

3 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto

Edellä kuvattiin Haapaniemen voimalaitoksen olevan yhteistuotantolaitos. Yhdistetyllä lämmön- ja sähköntuotannolla, lyhyemmin CHP (Combined Heat and Power) tarkoitetaan energiantuotantomuotoa, jossa hyvällä hyötysuhteella hyödynnetään polttoaineen sisältämä energia käyttöön, tuottamalla sekä lämpöä että sähköä. Höyrykattilassa hyötyenergia tuotetaan polttamalla kattilassa polttoainetta, missä vapautuva lämpöenergia siirretään seinäputkissa kulkevaan veteen. Putkissa vesi höyrystyy korkeapaineiseksi höyryksi, jota voidaan edelleen tulistimissa tulistaa, nostaen sen lämpötilaa. Tulistaminen varmistaa, ettei höyry lauhdu takaisin nesteeksi ennen seuraavia prosesseja sekä sen lämpötila saadaan myös vaihtuvissa olosuhteissa pidettyä tasalaatuisena. Yhdistetyssä tuotannossa tulistettu höyry ohjataan pääosin turbiinille, minkä avulla tuotetaan sähköä verkkoon sekä lämpöä kuluttajalle. Turbiinissa höyryn paisunta pyörittää turbiinin siivistöä, joka puolestaan pyörittää akselin välityksellä generaattoria, tuottaen sähköä. Osa turbiiniin ohjatusta höyrystä voidaan tietyssä lämpötilassa sekä paineessa ohjata kesken paisunnan turbiinin välitosta lämmönkuluttajalle höyrynä, eli prosessihöyrynä tai höyryn annetaan paisua turbiinissa kauemmin, jolloin höyryn lämpö hyödynnetään lämmönvaihtimella. Lämmönvaihtimella kiertää tyypillisesti lämmönkuluttajalle virtaava vesi, johon lämpö siirretään. Kaukolämpövoimalaitos, toiselta nimeltään vastapainevoimalaitos, hyödyntää tätä jälkimmäistä menetelmää. (Breeze, 2019, 134–135.) Seuraavassa kuvassa (Kuva 4) vertaillaan edellä kuvatun yhteistuotantolaitoksen tuotantoa ainoastaan lämpöä tai sähköä tuottavaan laitokseen.



Kuva 4. Erillistuotannon sekä yhteistuotannon hyötysuhteiden eroavaisuus (mukailtu lähteestä EDUCOGEN, 2001, 8).

Kuten yllä oleva kuva havainnollistaa, yhdistetyssä tuotannossa polttoaineen sisältämä energia saadaan paremmalla kokonaishyötysuhteella hyödynnettyä, mutta kuitenkin huonommalla sähköntuotannon hyötysuhteella. Erillistuotannossa, eli esimerkiksi pelkästään sähköä tuottavassa lauhdevoimalaitoksessa, höyryn paisunta päätetään turbiinissa mahdollisimman lähelle tyhjiötä, mikä maksimoi sähköntuotannon. Tämän mahdollistaa matalalämpöinen ja lähes paineeton lauhdutin, jossa höyryn lämpö hukataan ympäristöön, kuten mereen tai ilmaan. Tällöin sähköntuotannon hyötysuhteessa voidaan päästä jopa 45 %:n lukemiin (Frangopoulos, 2017, 43), mutta höyryn sisältämää lämpöä ei saada enää hyödynnettyä, mikä laskee laitoksen kokonaishyötysuhdetta.

Kaukolämpöä tuottavissa laitoksissa höyryn paisunta sen sijaan päätetään riittävän korkeaan paineeseen ja lämpötilaan, jotta sitä voidaan hyödyntää lämmittämässä, tästä nimitys vastapainevoimalaitos. Höyryn lauhtumislämpötila lämmönvaihtimella määrittää kuluttajalta palaavan kaukolämpöveden paluulämpötila. Paluulämpötilaan vaikuttaa asiakaslaitteissa tapahtuva jäähtymä, joka on parhaimmillaan ulkolämpötilan ollessa lähellä nollaa celsiusastetta. Sekä hyvin kylmällä tai toisaalta hyvin lämpimällä säällä vaihtimelle palaavan veden lämpötila nousee. Tämä nostaa turbiinilla saavutettavaa vastapainetta, mikä vaikuttaa laskevasti turbiinin sähköntuotantoon. Voimalaitokselle palaavan veden lämpötila vaihtelee 40–

70 °C välillä sekä virtaa takaisin kuluttajalle 70–120 °C menolämpötilassa. Haapaniemen voimalaitoksella palaavan veden lämpötila vaihtelee hieman alle 40 celsiusasteesta hieman yli 60 °C. Menolämpötila puolestaan vaihtelee kesän matalasta noin 72 celsiusasteesta, talven huipun lähes 120 °C. (Kaikko & Saari, 2021.; Räisänen, 2023.)

Seuraavissa yhtälöissä käsitellään yhteistuotantolaitoksen tunnuslukuja, joilla voidaan kuvata laitoksen lämmön, sähkön ja polttoaineen suhdetta tuotannossa.

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{pa}} \quad (1)$$

Sähköntuotannon hyötysuhde η_{el} [-] saadaan jakamalla sähköteho P_{el} [MW] polttoainete-holla P_{pa} [MW].

$$\eta_t = \frac{P_{th}}{P_{pa}} \quad (2)$$

Lämmöntuotannon hyötysuhde η_{th} [-] puolestaan lasketaan jakamalla lämpöteho P_{th} [MW] polttoainete-holla.

$$\eta_{tot} = \eta_{CHP} = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{pa}} \quad (3)$$

Kokonaishyötysuhde, eli CHP hyötysuhde η_{CHP} [-] lasketaan jakamalla yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon tehot polttoainete-holla.

Vastapainevoimalaitoksen sähköntuotanto riippuu lämmönkuluttajan lämmöntarpeesta ja täten turbiinille menevän höyryn määrästä. Näiden suhdetta kuvaa alla oleva rakennusasteen yhtälö.

$$\sigma = \frac{P_{el}}{P_{th}} \quad (4)$$

Missä σ on rakennusaste [-].

Primäärienergian säästösuhdetta yhteistuotannossa kuvaa seuraava yhtälö.

$$\Delta Q_{pa} = \frac{Q_{pa,el+th} - Q_{pa,CHP}}{Q_{pa,el+th}} \quad (5)$$

Missä ΔQ_{pa} on primäärienergian, eli polttoaineen suhteellinen säästö [-], $Q_{pa,el+th}$ on käytetty polttoaine tuottaessa erikseen sähkö- ja lämpöenergia [MWh], $Q_{pa,CHP}$ on CHP-laitoksen käyttämä polttoaine, jolla tuotetaan sekä sähkö- että lämpöenergia [MWh].

Jos otetaan huomioon tuotannon referenssihyötysuhteet, saadaan samainen yhtälö seuraavanlaiseen muotoon.

$$1 - \frac{Q_{pa,CHP}}{Q_{pa,el} + Q_{pa,th}} = 1 - \frac{Q_{pa,CHP}}{\frac{P_{el}}{\eta_{ref,el}} + \frac{P_{th}}{\eta_{ref,th}}} \quad (6)$$

Missä referenssihyötysuhteet $\eta_{ref,el}$ ja $\eta_{ref,th}$ ovat määritetty EU-asetuksessa (2015/2402) laitoksen sekä käytettävän polttoaineen mukaan.

Edellä kuvatulla yhtälöllä voidaan kuvata tilanne, kun yhteistuotannon sähkön tuottaminen ja sen myyminen ei ole kannattavaa, jolloin muilla keinoilla etsitään säästöjä. Esimerkiksi lämmöntalteenottoon yhdistetyn savukaasupesurin tehoa pyritään nostamaan ja siirtämään vapautuvaa lämpöä kaukolämpöveden lämmittämiseen. Vastavuoroisesti menetelmä laskee sähkötehoa, mutta palamiseen tarvittavaa primäärienergiaa, eli polttoainetta saadaan vähennettyä, verrattuna normaaliajoon. (Räisänen, 2023.)

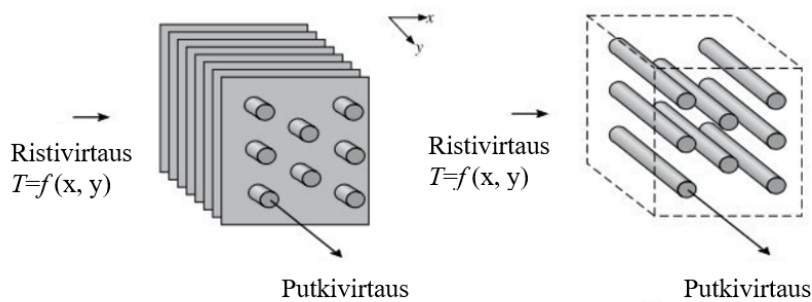
3.1 Yhteistuotannon pääkomponentit

Tämän osion alaotsikoissa käsitellään yhteistuotantolaitoksen komponentteja kaukolämmön tuotannossa. Käsiteltäviksi komponenteiksi on valittu lämmönsiirtimet sekä turbiinityypit.

Muita tuotannon komponentteja, kuten esimerkiksi generaattoria sähkön syöttämiseen verkkoon ei käsitellä.

3.1.1 Lämmönsiirto ja siihen liittyvät komponentit

Yleinen prosessi yhteistuotantolaitoksen toimintaympäristössä on kahden eri lämpötilassa olevan fluidin välinen lämmönsiirto. Komponenttina tässä toimii lämmönsiirrin, joita löytyy niin käyttöveden lämmittämisestä aina kemiallisiin prosesseihin asti. Lämmön siirtymismekanismit voidaan jakaa sen mukaan, kuinka fluidit virtaavat toisiinsa nähden tai lämmönsiirrimen fyysisen muodon mukaan. Yksinkertaisimmillaan kuuma sekä kylmä fluidi virtaavat putkistossa, joko myötä -tai vastavirtaan toisiinsa nähden. Lämpö siirtyy tällöin putkistojen pintojen välityksellä, kuumemmasta fluidista viileämpään. Myötävirtaisessa menetelmässä sekä kuuma että kylmä fluidi virtaavat rinnakkain omissa kanavissaan sekoittumatta toisiinsa. Vastavirtaisessa putkistossa puolestaan fluidit virtaavat nimensä mukaisesti vastavirtaan toisiinsa nähden. Virtaukset voivat myös olla kohtisuorassa toisiinsa nähden, kuten seuraava kuva (Kuva 5) havainnollistaa. (Bergman et al. 2017, 654.)

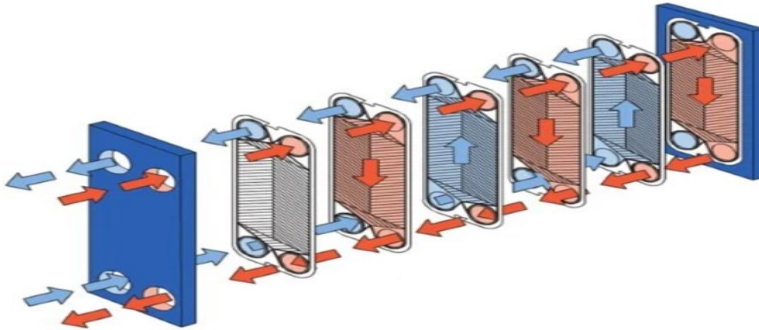


Kuva 5. Ristivirtalämmönsiirtimien toimintaperiaate. Vasemmalla sekoittumaton virtaus, oikealla sekoittuva virtaus (mukailtu lähteestä Bergman et al. 2017, 654).

Ristivirtalämmönsiirtimessä virtaus joko sekoittuu tai pysyy sekoittumattomana, riippuen fluidin virtauksesta putkikohtaamisen jälkeen. Sekoittumattomassa ristivirtauksessa fluidin virtaus pysyy suoraviivaisena rivillisen putkirakenteen kohdattuaan. Lämmönsiirto tapahtuu tämän rivillisen rakennelman välityksellä, esimerkiksi putkessa virtaavasta kuumasta

fluidista sitä ympäröivään ilmaan. Sekoittuvassa ristivirtauksessa tällaista riparakennetta ei putkien päällä ole. Tässä vapaana virtaavan fluidin putkikohtaaminen aiheuttaa turbulenttisia pyörteitä putken taakse, minkä myötä paikallinen lämmönsiirto tehostuu voimakkaan sekoittumisen takia. (Bergman et al. 2017, 655.)

Putkimaisen rakenteen lisäksi on olemassa erilaisia lämmönsiirtimiä, jotka koostuvat levyistä. Tyypillinen vastavirtaan virtaavien fluidien muodostamasta rakenteesta tunnetaan prosessiteollisuudessa nimellä tiivistetty levylämmönsiirrin, jonka toimintaperiaatetta havainnollistaa alla oleva kuva (Kuva 6).

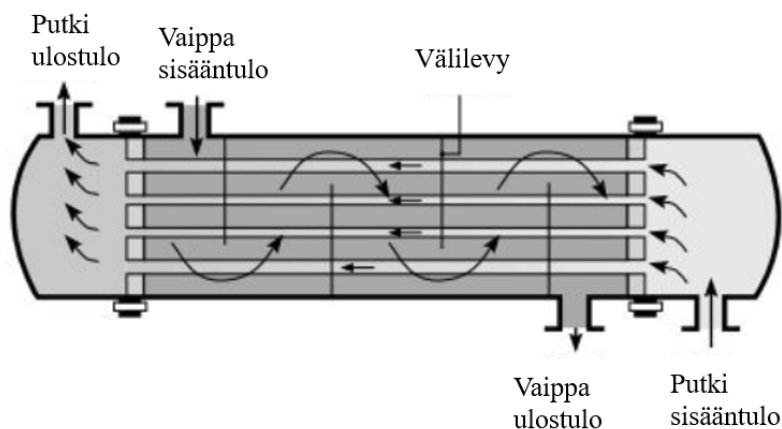


Kuva 6. Tiivistetyn levylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Alfa Laval).

Tiivistetty levylämmönsiirrin muodostuu monesta yhteen nivotusta tiivistetystä lämmönsiirtolevystä, niitä kiinnittävistä kiristetyistä kierretangoista sekä tukirakenteesta. Tällainen rakenne mahdollistaa vaivattoman lämmönsiirtimen muutostyön sekä puhdistamisen, kun levyjä voidaan irrottaa puhdistustoimenpiteitä varten sekä lisätä lämpötehon tarpeen mukaan. Vastakkain asetettujen levyjen pinnoilla virtaa tyypillisesti kaksi eri lämpötilassa olevaa nestettä, joiden toisiinsa sekoittumista ehkäistään tiivisteillä, jotka vuoroin päästävät kuuman tai kylmän fluidin virtaamaan koko levypinnalle. Lämmönsiirto fluidien välillä tapahtuu ohuiden levypintojen välillä, mikä on tehokasta sekä mahdollista toteuttaa pienellä lämpötilaerolla. Tehokkaan lämmönsiirron mahdollistaa ohut, mutta suuren pinta-alan muodostama levyrakenne, joiden pinnat ovat rivoitettuja. Rivoitetulla pinnalla fluidit jakaantuvat tasaisesti koko pinta-alalle, mikä sekä tehostaa lämmönsiirtoa että voimistaa leikkausjännityksiä, ehkäisten pinnan likaantumista. Tiivistettyjen levylämmönsiirtimien kokoluokkaa kuitenkin rajoittaa tiivisteiden kestävyys. Serth & Lestina (2014, 74) mukaan lämpötila ei saisi ylittää 250 celsiusastetta sekä paine pitäisi pitää alle 25 bar. Lämmönsiirrin ei myöskään sovellu

käytettäväksi kaasujen välisessä lämmönsiirrossa, eikä höyryn lauhduttamisessa. Nesteiden välisessä lämmönsiirrossa se on kuitenkin yleinen. (Alfa Laval)

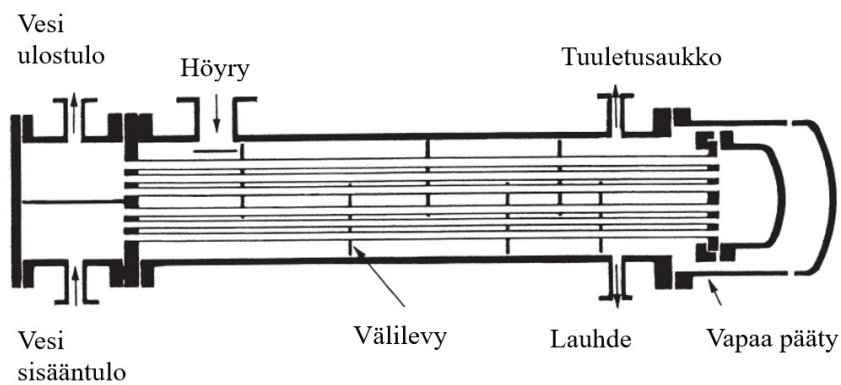
Prosessiteollisuudessa esiintyy myös lämmönsiirrin, joka koostuu putkivaippa -rakenteesta, mitä seuraava kuva havainnollistaa (Kuva 7). Yksinkertaisimmillaan lämmönsiirrin sisältää yhden vaippa- ja putkirakenteen, jossa fluidit ovat kohtisuorassa virtauksessa toisiinsa nähden. Yleisesti nestemäinen fluidi virtaa putkissa ja vaipassa kaasumainen fluidi, joka lauhdutetaan putkipinnoille. Kaasun virtausta rakenteesta voidaan ohjata välilevyjen avulla, mitkä myös tehostavat konvektiivista lämmönsiirtoa muodostamalla turbulenttisia virtauksia vaipassa. Välilevyt toimivat myös rakenteen tukena virtauksesta aiheutuvia värinöitä vastaan. Erilaisia putkivaippa variaatioita saadaan muodostettua lisäämällä putkien tai vaippojen lukumäärää, tai niin kutsuttuja vetoja. Putkivetojen lukumäärät vaikuttavat lämmönsiirron tehokkuuteen, mutta myös materiaalikustannuksiin. Lämmönsiirtimien suunnittelussa voidaan esimerkiksi hyödyntää TEMA:n (Tubular Exchanger Manufacturers Association) määrittämää standardia, joka on nähtävissä liitteessä (Liite 1). (Bergman et al. 2017, 655.)



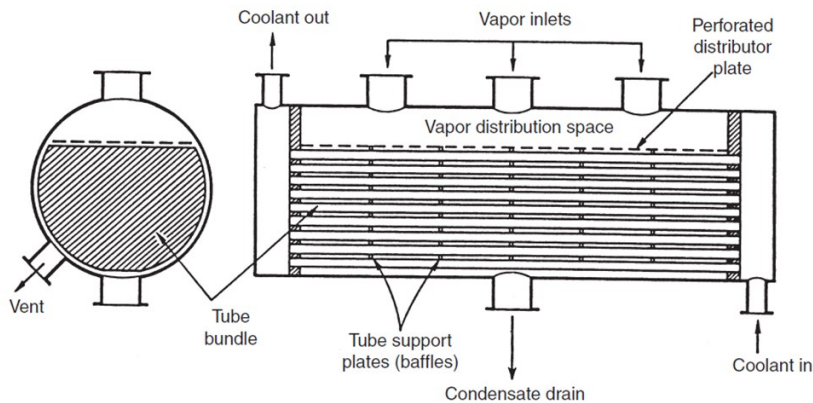
Kuva 7. Yksinkertainen putkivaippalämmönsiirrin (mukailtu lähteestä Bergman et al. 2017, 655).

Voimalaitosympäristössä putkivaippalämmönsiirrin tunnetaan myös nimellä pintalämmönsiirrin, millä viitataan kaasun putkipinnalle lauhduttamiseen. Kaasumaiset yhdisteet koostuvat suurimmaksi osaksi vesihöyrystä, jotka lauhdutetaan putkipinnoilla nesteeksi sekä saadaan siten takaisin prosessikiertoon. Muut kaasumaiset yhdisteet, kuten esimerkiksi happi,

pyritään poistamaan putkipinnoilta, jotta ne eivät vahingoita lämmönsiirtimen materiaaleja. Tyypillisesti lämmönsiirtimet asennetaan vaakamallisesti tukirakennekustannusten minimoimiseksi sekä huollon helpottamiseksi, mutta myös pystysuuntaisia lämmönsiirtimiä käytetään. Putkivetojen lukumäärä on tyypillisesti parillinen, jolloin lämmönsiirtimessä virtaavan nesteen tulo sekä poisto toteutetaan samasta päädyistä, kuten alla oleva kuva (Kuva 8) havainnollistaa. Pienemmän kokoluokan vaipparakenteet ovat tyypillisesti yksivaippaisia, sillä ne ovat myös edullisimpia rakentaa. Jos taas painehäviö on haasteena lämmönsiirtimen toiminnalle, vaipparakenteena käytetään matalan lauhdutuspaineen mahdollistavaa rakennetta, kuten esimerkiksi lauhdevoimalaitoksen lauhduttimena käytetään (Kuva 9). (Serth & Lestina, 2014, 431.)

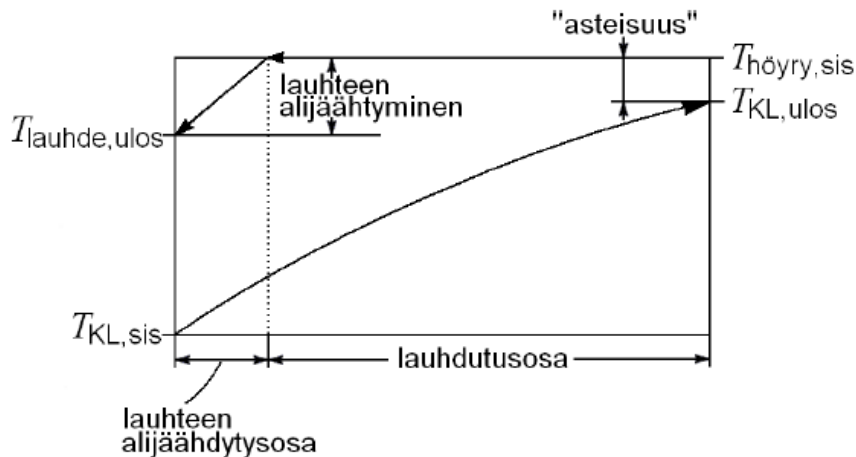


Kuva 8. Putkivaippalämmönsiirrin, jossa putkivetojen lukumäärä on parillinen (mukailtu lähteestä Serth & Lestina, 2014, 432).



Kuva 9. Putkivaippalämmönsiirrin, jossa höyry virtaa keskeltä lämmönsiirrintä (Serth & Lestina, 2014, 432).

Vastapainevoimalaitoksella esiintyvät putkivaippalämmönsiirtimet ovat toimintaperiaatteeltaan sekä rakenteeltaan vastavanlaisia, kuin edellä kuvattiin. Nimityksiltään ne voivat laitoskohtaisesti erota, sillä esimerkiksi Haapaniemen voimalaitoksella kaukolämmöntuotannossa käytettyjä vaihtimia kutsutaan kaukolämmönvaihtimiksi (KLV) tai lämmönvaihtimiksi (LV). Lämmönsiirto vaihtimessa perustuu höyryn lauhtumisessa vapautuvan energian hyödyntämiseen, joka siirretään putkissa kulkevan kaukolämpöveden lämmittämiseen. Höyryn lauhtumislämpötilan vaihtimessa määrää kaukolämpöveden lämpötila sekä paine. Yleensä vaihtimelle ohjattu höyry on kostea, jolloin höyryn tulistuksen poistoa ei tarvita, kuten esimerkiksi syöttöveden esilämmittimillä, joka on vastaavanlainen putkivaippavaihdin. Höyryn lauhde voi kuitenkin kylmien lämmönsiirtopintojen vaikutuksesta olla alijäähtynyttä. Alijäähtyminen tarkoittaa lauhtumislämpötilaa matalammaksi jäähtyvää nestettä, mikä heikentää prosessihyötysuhdetta, mutta toisaalta se voi olla toivottua kattilan toimintapisteen kannalta. Seuraava yksinkertaistettu kuvaaja (Kuva 10) havainnollistaa tätä höyryn ja kaukolämpöveden yhteyttä kaukolämmönvaihtimessa. (Kaikko & Saari, 2021.)



Kuva 10. Kaukolämmönvaihtimen toimintaperiaatetta havainnollistava kuvaaja (Kaikko & Saari, 2021.)

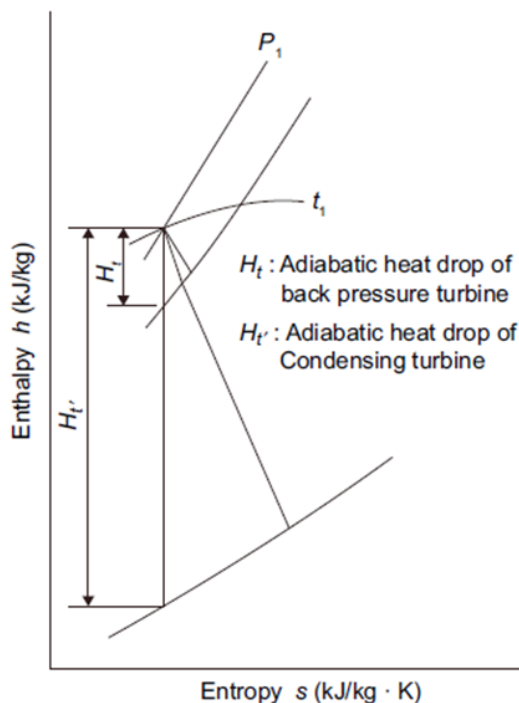
Kaukolämpötehon kasvaessa, tyypillisesti myös kaukolämmönvaihtimien sekä esilämmittimien lukumäärät kasvavat, milloin kaukolämpöveden sekä syöttöveden lämmittäminen jakaantuu useammalle vaihtimelle. Esimerkiksi kahden kaukolämmönvaihtimen hyödyntäminen mahdollistaa toisen vaihtimen lauhduspaineen laskemisen matalammaksi, jolloin höyry saadaan paisumaan turbiinissa entistä matalampaan paineeseen. Tällöin sähköntuotantoa saadaan kasvatettua, mutta menetelmä lisää polttoaineen kulutusta, suuremman höyryntuotannon myötä. (Kaikko & Saari, 2021.)

Yhteistuotantolaitos voi myös hyödyntää kaukolämmöntuotannossa reduktiokaukolämmönvaihtimia, jos turbiinin jälkeisten vaihtimien tuottama lämpö ei riitä vastaamaan lämmönkuluttajan tarpeeseen. Reduktiovaihtimelle höyry ohjataan turbiinin ohi paineenalennusventtiilien kautta, minkä avulla laitos voi tuottaa kaukolämpöä myös silloin, kun turbiini ei ole käytössä, kuten turbiinin huoltotoimenpiteiden aikaan. (Kaikko & Saari, 2021.)

3.1.2 Vastapaineturbiini sekä muita turbiinityyppejä

Kaukolämmöntuotannossa sekä prosessiteollisuudessa käytettävä höyryturbiinityyppi tunnetaan nimellä vastapaineturbiini. Vastapaineturbiineja käyttävät voimalaitokset ovat optimoitu tuottamaan pääosin prosessissa tai lämmityksessä tarvittava lämpö, jolloin turbiinin läpi kulkevan höyryn paisuminen päätetään tarpeeksi korkeaan paineeseen, jotta höyryn sisältämä energia riittää kuluttajan lämmöntarpeen tyydyttämiseen. Sähköntuotanto turbiinilla

on siten vastapainetuotannossa lämmöntuotannon sivutuote. Lauhdevoimalaitosten turbiinityypit on sen sijaan mitoitettu hyödyntämään höyrystä kaikki hyödynnettävissä oleva energia turbiinin pyörittämiseen. Höyry tällöin paisuu lauhdeturbiinin ulostuloon niin matalaan paineeseen, jolloin siinä ei ole enää jäljellä hyödyllistä energiaa käytettäväksi lämmittämiseen. Turbiinityyppien välimuotoa kutsutaan väliottolauhdutusturbiiniksi. Kyseisellä turbiinityypillä voidaan lämmönkuluttajan lämmöntarve tyydyttää turbiinin väliotoilla kesken paisunnan, mikä mahdollistaa loppu höyryn paisumisen päättymään lauhduttimen matalaan paineeseen. Tällöin sähköntuotanto on säädettävissä riippumatta lämmön tarpeesta, mutta lämpöä hukataan ympäristöön, mikä heikentää kokonaishyötysuhdetta. Tehotasoiltaan höyryturbiinit ovat pienimmillään muutaman kilowatin tehoisia pumppuja tai puhaltimia pyörittäviä turbiineja sekä suurimmat ovat ydinvoimaloissa käytettäviä lauhdutusturbiineja, joilla voidaan saavuttaa jopa 1900 MW:n sähköntuotantoteho. (GE Steam Power; Perez & Lawhon, 2016.) Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 11) havainnollistetaan vastapaineturbiinin sekä lauhdutusturbiinin eroavaisuutta höyryn paisunnan kannalta.



Kuva 11. Höyryn paisunta turbiinissa entalpiain (h) ja entropian (s) kuvaajassa (Tanuma, 2017, 25).

Kuten kuvasta nähdään, vastapainevoimalaitoksen höyryn paisunta turbiinissa päättyy korkeampaa paineeseen sekä entalpiaan. Kuvassa pystysuorat viivat kuvaavat häviötöntä paisuntaa (adiabaattinen), kun taas häviöllisessä paisunnassa entalpiaero muodostuu pienemmäksi. Mitä suurempi entalpiaero turbiinin sisään - ja ulostulon välillä on, sitä suuremmaksi muodostuu turbiinin sähköntuotantoteho. Toisaalta matalammassa lauhduspaineessa höyryn kosteuspitoisuus lisääntyy, mikä asettaa muun muassa haasteita siivistön kulumisen kannalta.

Tuorehöyryn virtausta on hallittava ennen turbiinia, kattilan kuormatason vaihdellessa. Yleisesti käytetään kahta menetelmää virtauksen hallitsemisessa, jotta turbiinin pyörimisnopeus pidetään sille asetettujen rajojen sisällä. Yksi menetelmä on kuristaa virtausta säätöventtiileillä. Virtauksen kuristus pienentää turbiinin sisään menevän höyryn painetta, mutta pitää entalpian muuttumattomana. Seurauksena on massavirran pieneneminen, jolloin turbiinin tuottama teho vähenee. Säätöventtiilit voivat toimia myös säätökammiossa tai niin sanotussa suutinryhmässä. Tässä menetelmässä toisistaan riippumattomia venttiileitä avaamalla tai sulkemalla saadaan säädettyä turbiinin tuottamaa tehoa. Kuristaminen toteutetaan ensimmäiseksi ensimmäisessä suutinryhmässä, muiden ryhmien pysyessä täysin tai osittain auki. Ensimmäinen suutinryhmä on yleensä käytössä matalan kuorman ajossa, jolloin siihen kohdistuvat kokonaisuudessa suurimmat painehäviöt. Kuorman kasvaessa matalan kuorman ajosta, on ensimmäinen säätöventtiili avautunut täysin auki. Seuraava suutinryhmä saadaan käyttöön, kun siihen johtavaa säätöventtiiliä avataan. Täydellä kuormalla kaikki säätöventtiilit sekä ryhmät avautuvat täysin tai lähes täysin kokonaan auki. (Kaikko, 2022.; Tanuma, 2022, 271–272.)

Virtauksen hallitsemisen lisäksi vastapainevoimalaitoksen turbiinille asetetaan ajotapa, jonka mukaan turbiinia operoidaan tuotannossa. Yleisesti käytetään kolmea erilaista menetelmää; turbiini on vastapaine-, etupaine- tai sähkötehonsäädöllä. Vastapainesäädön ajotavassa turbiini on asetettu säätämään kaukolämmönvaihtimilta lähtevää kaukolämpöveden menolämpötilaa. Haluttu lämpötila saadaan kaukolämpökäyrältä, joka on riippuvainen muun muassa ulkolämpötilasta. Turbiinilta tulevaa höyryä säädetään sen mukaan, kuinka paljon höyryä tarvitaan vaihtimella virtaavan kaukolämpöveden lämmittämiseen tietyn lämpöiseksi, eli käyrän pisteen lämpöiseksi. Vastapainesäädöllä laitoksen sähköntuotanto seuraa turbiinin kaukolämmöntuotantoa. Etupainesäädöllä turbiini ei myöskään ole asetettu säätämään sähköntuotantoa, vaan sen tuotanto on riippuvainen kaukolämmöntuotannosta. Tässä

ajotavassa puolestaan kattila on asetettu seuraamaan kaukolämpökäyrää, mutta tuorehöyryn painetta säädetään turbiinilla. Ajotapa on yleensä käytössä silloin, kun kattila uhkaa ajautua alas jonkin odottamattoman tapahtuman seurauksena, millä varmistetaan tuorehöyryn tuotannon pitäminen kattilan ajotavan mukaisissa rajoissa (Basu & Debnath, 2014, 750). Sähkötehonsäädössä turbiini puolestaan säätää haluttua sähköntuotantotehoa, jolloin kaukolämmöntuotanto on riippuvainen siitä. Tällöin kattila seuraa turbiinia sekä säätää tuorehöyryn painetta ja lämpötilaa muun muassa polttoaineen syöttämisellä. (Ellonen et al. 2011.)

Höyryn virtauksen säädön lisäksi tuorehöyryn lämpötilaa sekä painetta tarkkaillaan ja pidetään tiettyjen rajojen sisäpuolella ennen turbiinin siivistöä. Näitä muuttujia käsitellään myöhemmin HP3 laitosyksikön turbiinin laitetoimittajan näkökulmasta sekä käsitellään niiden rajoituksia.

3.2 Sähköntuotannon joustavuuskeinot yhteistuotannossa

Kuten kappaleessa aiemmin mainittiin, vastapainevoimalaitosta ei voida operoida sähkön kysynnän mukaan, sillä tuotanto on riippuvainen lämmönkuluttajan lämpökuormasta. Seuraavaksi käsitellään keinoja, joita yhteistuotantolaitos voi hyödyntää sähköntuotannon optimimisessä sekä lisäämisessä.

3.2.1 Lauhdeperäturbiini

Lauhdeperäturbiini tarkoittaa vastapaineturbiinin perään kytkettyä matalapaineista turbiinivaihetta, missä höyryn paisuminen saadaan päättymään matalaan paineeseen. Matala paisuntapaine saadaan ympäristöön lauhduttamisella, kun lauhduttavana nesteenä käytetään kylmää vettä, kuten merivettä. Menetelmä mahdollistaa sähköntuotannon lisäämisen hyvällä sähköntuotantohyötysuhteella, sillä tuotannon lisääminen ei ole riippuvainen lämpökuormasta, kun kuluttajan lämmöntarve voidaan tyydyttää vastapaineturbiinivaiheen takana olevilla kaukolämmönvaihtimilla. Menetelmässä kuitenkin kokonaishyötysuhde laskee, kun hyödyllinen lämpö hukataan ympäristöön lisäsähköntuotannossa. Matalapaineista turbiinivaihetta joudutaan myös jatkuvasti jäähdyttämään, jos turbiinivaiheet kytketään samalle akselille. Tällöin myös pelkässä vastapainetuotannossa lauhdeperän siivistö pyörii, vaikka tarvetta lisäsähkön tuotantoon ei ole, lisäten jäähdytyskustannuksia. Menetelmä investointina

on myös kallis toteuttaa, sillä suuri matalapaineturbiiniyksikkö joudutaan rakentamaan. Kannattavuuden kannalta edellytetään siten kallista sähkön hintaa. (Kaikko & Saari, 2021.)

3.2.2 Apujäähdytin

Huomattavasti halvempi keino lisätä sähköntuotantoa yhteistuotantolaitoksella on käyttää niin sanottua apujäähdyttämistä. Sen toimintaperiaate perustuu keinotekoisien lämpökuorman tekemiseen kaukolämpöverkkoon, missä kaukolämmönvaihtimelle palaavan veden lämpötila saadaan laskettua. Matalamman kaukolämpöveden lämpötilan myötä vaihtimen vastapaine laskee. Tämä mahdollistaa suuremman höyryntuotannon ja täten sähköntuotannon lisäämisen. Apujäähdyttimenä voi esimerkiksi toimia yksinkertainen lämmönsiirrin, joka kytketään voimalaitoksen kaukolämpöveden paluulinjaan. Lämmönsiirtimeen ohjataan kaukolämpövesi, jonka jäähtyminen toteutetaan lämmönsiirtimen toisella puolella virtaavan veden vaikutuksesta. Virtaamia säätämällä saadaan aikaan haluttu jäähdytysteho, jolloin jäähtynyt kaukolämpövesi ohjataan takaisin kaukolämpöverkkoon, takaisin kaukolämpöveden paluupuolelle. Kaukolämmönvaihtimelle virtaava vesi on tällöin viileämpää, ja täten mahdollistaa suuremman sähköntuotannon. Menetelmän kannattavuus on kuitenkin riippuvainen korkeasta sähkön hinnasta, sillä menetelmässä kokonaishyötysuhde laskee sekä kasvattaa polttoainekustannuksia. Investointina se on kuitenkin huomattavasti edullisempi kuin lauhdeperään investoiminen, mutta huonommalla sähköntuottohyötysuhteella. (Kaikko & Saari, 2021.)

3.2.3 Kaukolämpöakku

Yhteistuotantolaitoksen sähköntuotannon optimointikeinona hyödynnetään kaukolämpöveden varastoimista lämpövarastoon. Yhteistuotantolaitoksen ajotavassa akku mahdollistaa sähkön myynnin maksimoimisen sekä polttoainekulujen vähentämisen. Veden lämpöenergian varastoimiseen käytetyt akkutyypit voidaan jakaa fyysisten ominaisuuksien (tuntuva, latentti tai kemiallinen), varaston keston (lyhyt-, pitkäaikainen) tai koon mukaan (hajautettu, keskitetty tai siirrettävä). Kaukolämmöntuotannossa lämmön varastoimiseen käytetään tuntuva, lyhytaikaista ja keskitettyä lämpövarastoa, mikä tunnetaan nimellä kaukolämpöakku. Tällainen akku voidaan esimerkiksi sijoittaa voimalaitosalueelle, jossa siihen varastoitunut

vesi puretaan lämmönkuluttajille päivätasolla kaukolämpöverkoston kautta, ilman olomuodon muutosta. (Guelpa & Verda, 2019, 2–3.)

Käyttöpaineiltaan akut paineistetaan joko putkiston paineeseen tai akut ovat paineistamattomia (paine hieman yli ympäristön paineen). Paineistamattomat akut ovat investointikustannuksiltaan huomattavasti matalammat, kuin paineistetut akut muun muassa materiaalikustannusten takia, minkä takia ne soveltuvat paremmin lyhytaikaiseen hyödyntämiseen. Akut eroavat kytkentätavoiltaan siten, että paineistamattomat akut kytketään epäsuorasti kaukolämpöverkkoon. Tällöin haluttua paine-eroa kaukolämpöverkoston sekä akun välillä säädetään pumppu- ja venttiilijärjestelmien avulla. Paineistettu akku voidaan sen sijaan kytkeä suoraan verkkoon, jossa sitä voidaan myös hyödyntää erillisenä painesäiliönä. Molempien akkujen tapauksessa niiden yläosaan varastoidaan kuumempi, kaukolämpömenovesi sekä alaosaan viileämpi voimalaitokselle palaava kaukolämpövesi. Eri lämpötilassa olevien kaukolämpövesien välille muodostuu niin sanottu termokliini, eli ne eivät varastossa sekoitu. Paineistamattoman akun veden maksimilämpötila rajoittuu alle sadan celsiusasteen, alaosan ollessa kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilassa. Paineistetussa akussa näiden vesialueiden lämpötilaero on noin 20 celsiusastetta suurempi. (Guelpa & Verda, 2019, 5–7.)

Kaukolämpöakun varaustila ladataan voimalaitoksella tuotetulla kuumalla kaukolämpömenovedellä, ohjaamalla vesi lähtevän verkon linjasta akun yläosaan. Paineistamattoman akun tapauksessa kaukolämpöverkoston paine on suurempi kuin varastossa vallitseva staattinen paine, joten lataustehoa säädetään kuristamalla virtausta säätöventtiileillä. Samanaikaisesti vastaava määrä viileämpää vettä akun alaosaan pumpataan kaukolämpöveden paluulinjan paineeseen. Akun varaustilan purkamisessa puolestaan yläosan kuumaa vettä pumpataan lähtevän linjan paineeseen sekä paluulinjasta vesi ohjataan akun alaosaan. (Räisänen, 2023.)

Sähköntuotannon joustokeinona akku mahdollistaa voimalaitoksen tuotannon tehokkaamman optimoinnin. Kun sähköstä maksettava hinta sähkömarkkinoilla on korkeammalla tasolla, pyritään silloin voimalaitoksen tuotanto maksimoimaan. Tällöin turbiinilla tuotetaan mahdollisimman paljon kaukolämpöä ja sähköä. Kaikki tuotettu lämpö ei kuitenkaan mahdu verkkoon, jolloin ylimääräinen lämpö varastoidaan akkuun myöhempää käyttöä varten. Varastoitu lämpö hyödynnetään esimerkiksi silloin, kun sähkön markkinahinta on matalammalla tasolla. Tällöin akun varaustilaa puretaan kuluttajan lämmöntarpeen tyydyttämiseen mahdollisimman paljon, ja vastaavasti voimalaitoksen tuotanto pidetään minimissä. Tällainen optimoiminen säästää muun muassa polttoainekuluissa vähentyneen

polttoainekulutuksen myötä, mutta toisaalta se mahdollistaa sähkön myynnin ajoittamisen kalliimmille markkinahinnoille. (Cabeza, 2021, 627.)

Sähköntuotannon joustokeinon lisäksi kaukolämpöakku mahdollistaa varmemman sekä toisaalta joustavamman lämmöntuotannon. Akun avulla voidaan lyhytaikaisesti varautua talven huipun lämmöntarpeeseen ennakolta, kun lämpö varastoidaan akkuun esimerkiksi yöllä ennen aamun kulutushuippua. Kulutushuippuna purettava lämpö sekä tuotannon kasvattaminen riittävät parhaimmassa tapauksessa lämmöntarpeen tyydyttämiseen, ilman kalliiden lämpökeskusten käynnistämistä. Varastoa hyödynnetään myös puskurina voimalaitoksen lämmöntuotannon häiriötilanteiden varalta, kun lämpöä voidaan lyhytaikaisesti siirtää kuluttajille, ilman voimalaitoksen tuotantoa.

3.2.4 Muita sähköntuotannon joustavuuskeinoja

Tämän työn tarkoituksena ei ole käsitellä kaikkia mahdollisia keinoja, joita yhteistuotantolaitos voisi hyödyntää sähköntuotannon joustavuuskeinona. Osa näistä menetelmistä on vielä tutkimusasteella, eivätkä ne siten ole vielä vakiintuneita, joten menetelmien käyttötarkoitukset esitellään lyhyesti. Näitä menetelmiä ovat muun muassa lämpöpumpun, sähkökattilan sekä monienergiajärjestelmien hyödyntäminen yhteistuotannon tukena sekä edellä kuvattujen menetelmien yhdistäminen lämpövarastoihin. (Salman et al. 2021, 5.)

Teollisen kokoluokan, monen kymmenen megawatin tehoisia lämpöpumppuja voidaan integroida osaksi kaukolämmöntuotantoa. Lämpöpumppujen avulla voidaan nopeasti reagoida sähkö- ja lämpöverkon muutoksiin vähentämällä tai lisäämällä niiden sähkönkulutusta tai sammuttamalla/käynnistämällä laite kokonaan. Lämpöpumpun pienellä tehon lisäyksellä tai vähennyksellä yhteistuotantolaitosta voidaan mahdollisesti hyödyntää entistä paremmin säästövoiman tarjoajana. (Salman et al. 2021, 7.) Esimerkiksi Kuopion Energia käyttää tällaisia lämpöpumppuja kaukojäähdytyksessä, jossa jäähdytyksessä muodostuva hukkalämpö voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa.

Yhteistuotantolaitos voi myös hyödyntää erillistä sähkökattilaa höyryn tuotannossa. Salman et al. (2021, 7) mukaan kattiloiden teholuokat vaihtelevat tyypillisesti 5–60 MW välillä ja ovat siten kykeneviä tyydyttämään monen kuluttajan lämmöntarpeen. Sähkökattilan tuotantoa voidaan hyödyntää silloin, kun sähkömarkkinoilla hallitsee halpa tai jopa negatiivinen

pörssisähköhinta. Tämä mahdollistaa joustoja pääkattilan ajotapaan sekä tuo säästöjä sen tuotantokustannuksiin.

Yhteistuotantolaitos voidaan myös yhdistää niin kutsuttujen toisenlaisten energiankantajamenetelmien kanssa. Laitoksella tuotettu ylimääräsähkö tai halpa ostettu sähkö voidaan esimerkiksi varastoida elektrolyysin avulla vedyksi. Vedyn energiasisältö saadaan tarvittaessa nopeasti vapautettua polttokennossa, kun sähköä on kannattavaa tuottaa. Tämän menetelmän huonona puolena on suhteellisen korkea hankintahinta, sekä huono hyötysuhde. Prosessissa syntyvä hukkalämpö voidaan myös suoraan hyödyntää lämmöntarpeeseen tai hyödyntää yhdessä laitoksen hukkalämmön kanssa erillisessä pyrolyysi -tai kaasutuslaitoksessa. Prosessien vähähappisissa olosuhteissa lämmön avulla tuotetaan palavia kaasuja sekä erilaisia nestemäisiä yhdisteitä. Yhdisteet voidaan polttaa sellaisenaan niille tarkoitettussa polttolaitoksessa tuottamaan sähköä ja lämpöä tai yhdisteet voidaan jatkojalostaa edelleen laadukkaammiksi polttoaineiksi. Tällöin yhteistuotantolaitos saisi tuloja myös myytävän polttoaineen muodossa. (Salman et al. 2021, 8.)

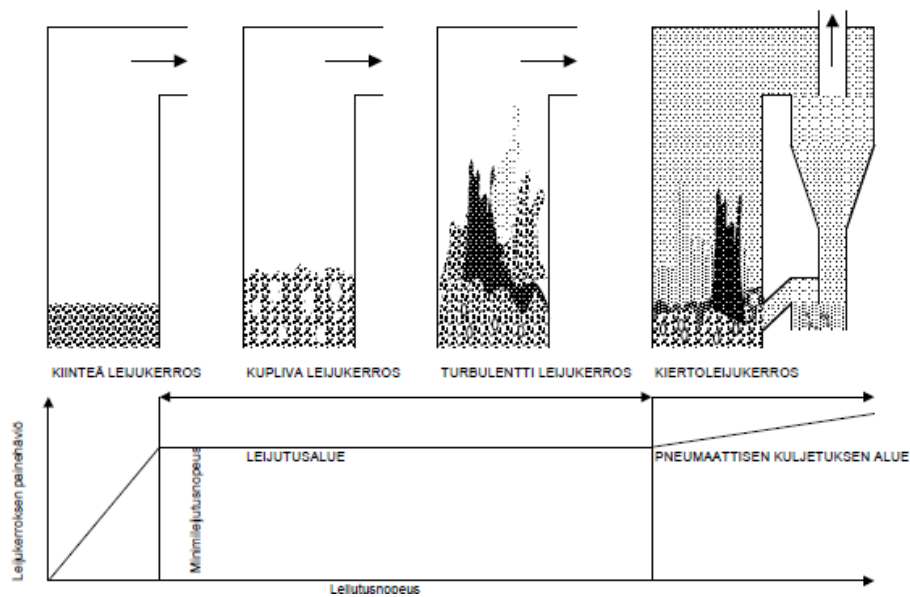
4 Leijukerrospolttotekniikka

Tämän työn toimintaympäristön takana toimii 1970-luvulta alkaen yleistynyt polttotekniikka, mikä mahdollistaa märkien sekä huonolaatuisten polttoaineiden, kuten biomassan polttamisen (Vakkilainen, 2017, 13). Tekniikkaa kutsutaan leijukerrospoltoksi, missä kattilan palamisolosuhteet luodaan kuuman, yleisimmin hiekkapartikkeleista koostuvan pedin avulla. Tekniikan hyvällä palamishyötysuhteella saavutetaan matalammat päästötasot, kuin edellisillä polttotekniikoilla saavutettiin. Palamisessa samalla vapautuva energia hyödynnetään kattilan seinäputkissa kulkevan veden höyrytämiseen. Leijukerrospoltto perustuu niin kutsuttuun fluidisaatio-ilmiöön, missä kattilassa oleva petimateriaali käyttäytyy nesteen kaltaisena, kun siihen puhalletaan palamisilmaa (primääri-ilma). (Hurskainen & Vainikka, 2016, 181.)

Petimateriaali sekä siihen syötetyn polttoaineen leijuttaminen mahdollistaa tasaiset palamisolosuhteet, minkä myötä polttotekniikka ei ole herkkä polttoaineen kosteuden tai koon muutoksille, sillä petimateriaali tasaa ja varaa itseensä lämpöä. Leijukerrospoltoissa myös tulipesän lämpötila pysyy hallinnassa, jolloin termisen NO_x -päästön muodostuminen on vähäistä. Pedin optimaalista palamislämpötilaa sekä päästöjen muodostumista kontrolloidaan palamisilman vaiheistamisella (primääri-ilman suhde kokonaispalamisilmamäärän), savukaasujen kierrättämisellä sekä polttoaineen syötön vaiheistuksella. Rikkipäästöjä voidaan tarvittaessa sitoa kalkkikiven syöttämisellä petimateriaalin sekaan sekä muodostuneita NO_x -päästöjä pelkistää ammoniakkiveden tai urean syöttämisellä tulipesään. Haittapuolena polttotekniikalle nähdään joidenkin haasteellisten polttoaineiden sekä materiaalin sisältämien aineiden yhteen kasautumisen riski. Biomassapolttoaineet, kuten oljet, sisältävät paljon alkaleja sekä petimateriaalina tyypillisesti käytetty hiekka sisältää kvartsia. Näiden aineiden reaktion tuloksena muodostuu tahmea yhdiste, jolla on matala sulamispiste. Suureksi muodostuva kasautuma uhkaa leijuttamista, jolloin vaarana on kattilan alasajo. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 181.)

Leijukerrospolttotekniikat jaetaan yleisesti pedin käyttäytymisen perusteella. Petimateriaali on kiinteä, kupliva (BFB, Bubbling Fluidized Bed) tai kiertävä (CFB, Circulating Fluidized Bed). Kuplivassa pedissä siihen puhallettu kaasu saavuttaa tietyn nopeuden, millä petimateriaali alkaa leijumaan, eli käyttäytyy ominaisuuksiltaan nesteen kaltaisena. Kiertävässä

pedissä sen sijaan leijutusnopeus kasvaa niin korkeaksi, jolloin petimateriaali tempautuu kaasun mukana kattilan yläosiin. Osa petimateriaalista palautuu takaisin tulipesän pohjalle seiniä pitkin, kun taas osa kierrätetään erillisellä hiukkasen erottimella takaisin tulipesään, palamisprosessin ja kiintoainekierron ylläpitämiseksi. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 182.) Leijutusnopeuksien sekä petimateriaalin käyttäytymisen yhteyttä havainnollistaa alla oleva kuva (Kuva 12).



Kuva 12. Leijukerrostyyppin leijupedin painehäviö leijutusnopeuden funktiona (Metso Power, 2011a).

Kuvassa kuplapetikattilan leijutusnopeus saavuttaa minimileijutusnopeuden, jolla peti kuplii. Kiertopetikattilassa puolestaan leijutusnopeus saavuttaa pneumaattisen kuljetuksen alueen, jolloin petimateriaali kiertää kattilassa. Kuvan leijutusnopeus lasketaan leijutuskaasulle kattilan arinan vapaalle poikkipinta-alalle, leijupedin paineessa ja lämpötilassa. Kaasun virratessa leijukerrokseen syntyy painehäviö. Tämän paine-eron mittaaminen ja tarkkaileminen kertoo leijukerroksen tilasta, minkä perusteella tiedetään, tarvitaanko poistaa sinne kuulumatonta materiaalia. (Metso Power Oy, 2011b.)

4.1 Kuplapetikattila

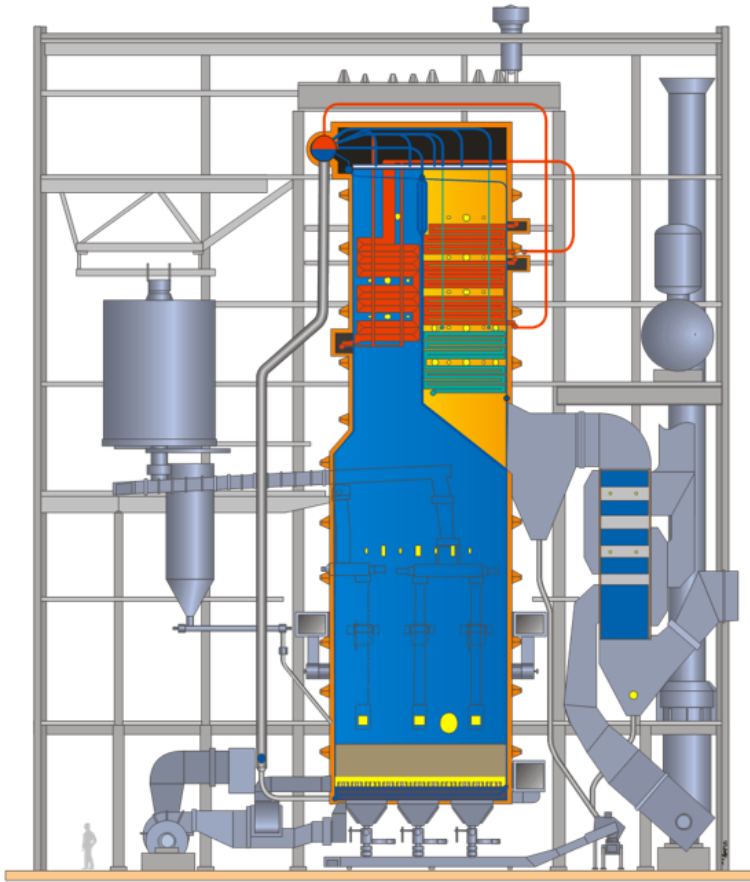
Kuplapetikattilassa kupliva petimateriaali pidetään palamisprosessissa tulipesän pohjalla. Tyypillisesti kiinteän pedin korkeus vaihtelee 0,4–0,8 metrin välillä, mikä aiheuttaa 6–12 kPa:n painehäviön petiin virtaavaan kaasuun. Tyypilliset leijutusnopeudet vaihtelevat 1–3 m/s välillä, petimateriaalin partikkelikoon ollessa keskimäärin noin 1 mm halkaisijaltaan. Tekniikan minimileijutusnopeuteen vaikuttaa petipartikkeleiden fyysisten ominaisuuksien lisäksi kaasun käyttäytyminen eri lämpötilassa sekä pedin lämpötila. (Vakkilainen, 2017, 217.)

Polttoaine syötetään kuplivaan sekä esikuumennettuun petiin sen yläpuolelta. Painavimmat polttoainepartikkelit painautuvat petiin, jossa ne jauhautuvat sekä sekoittuvat tehokkaasti. Pedissä polttoainepartikkelit käyvät palamisen vaiheet läpi aina kuivumisesta, tuhkaksi palamiseen asti. Kevyemmät jakeet sen sijaan haihtuvat ja palavat pedin yläpuolella sekä jäljelle jäävä tuhka poistuu tulipesästä lentotuhkana savukaasun mukana. Palamista kontrolloidaan vaiheittaisella ilman syöttämisellä, jossa primääri-ilman suhde kokonaisilmamäärään on tyypillisesti 40 %. Palavien yhdisteiden loppuun palaminen toteutetaan ylempänä tulipesässä, jossa ilma-aukoista puhalletaan sekundääri- sekä tertiääri-ilmaa. Vaiheittainen palaminen ehkäisee NO_x-päästöjen muodostumista, mutta pedin yläpuolisten ilmojen syöttö voi johtaa äkilliseen lämpötilan nousuun, mikä aiheuttaa lentotuhkan sulamista tulipesän lämmönsiirtopinnoille. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 182.)

Normaalijossa, kiinteän polttoaineen poltossa, tulipesän lämpötila vaihtelee 600–1000 celsiusasteen välillä, riippuen polttoaineen laadusta sekä kuormatasosta. Petilämpötila on hieinan tämän vaihteluvälin korkeinta lämpötilaa matalampi, vaihdellen 700–950 °C välillä. Riittävän kuumalla petilämpötilalla varmistetaan palamisen tasaisuus. Toisaalta liian korkea petilämpötila voi johtaa petimateriaalien partikkeleiden sulamisen toisiinsa kiinni. Vaiheittaisen ilman syöttämisen lisäksi, petilämpötilaa kontrolloidaan savukaasun kierrättämisellä petiin kiertokaasupuhaltimen avulla. Menetelmä pienentää pedin jäännöshappipitoisuutta, jolloin pedin lämpötila laskee vähentyneen palamisen myötä. Käytettävän polttoaineen kosteuspitoisuuden avulla voidaan myös vaikuttaa pedin lämpötilaan. Kosteampi polttoaine vaikuttaa viilentävästi petiin, kun taas kuiva polttoaine nostaa pedin lämpötilaa. Kuplapetikattila soveltuu kuitenkin hyvin sekä kostean että huonolaatuisen polttoaineen polttamiseen. Tämän mahdollistaa pedin sekä tulipesän vuoratun alaosan tehokas lämmön varaaminen,

mikä tasaa palamisolosuhteita polttoaineen kosteusvaihtelulta. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 183.; Vakkilainen, 2017, 218.)

Polttoaineteholuokaltaan kuplapetikattilat vaihtelevat 20–200 MW välillä (Hurskainen & Vainikka, 2016, 183). Tyypilliset käyttökohteet ovat alle 300 MW höyrytehosovellukset, sillä tätä suuremman kokoluokan sovelluksissa haasteeksi muodostuu muun muassa suurentunut arinakoko. Tekniikkaa myös tyypillisesti hyödynnetään vanhojen arinakattiloiden tai pölypolttokattiloiden korvaamisessa. Tyypillinen minimikuormapiste rajoittuu 30–40 % mitoitetusta maksimikuormasta (MCR, Maximum Continuous Rating) laskettuna, kun käytetään kiinteitä polttoaineita. Tätä matalampaan kuormaan pääsemistä rajoittaa muun muassa alentunut petilämpötila, joka tarvitaan täydelliseen palamiseen. Tarvittaessa joudutaan tukeutumaan kalliiden tukipolttoaineiden, eli fossiilisten polttoaineiden käyttämiseen, jotta kattila ei jäähdy. (Vakkilainen, 2017, 24, 219.) Seuraavaan kuvaan (Kuva 13) havainnollistetaan esimerkki kuplapetikattilasta, kuten Haapaniemen voimalaitoksen HP2 kattilayksikkö on tekniikaltaan.



Kuva 13. HP2 kuplapetikkattila (Kuopion Energia, 2023c).

Yksinkertaistetussa kuvaajassa nähdään kuplapetikkattila ja sen tekniikkaan kuuluvat ohjelaitteet. Kattilan höyrystinpintoja havainnollistaa sininen väri, jonka vesikierto alkaa syöttöveden pumppaamisella lieriöön (kattilan yläosassa), kuvan vihertävien esilämmittimien, eli ekonomaiserien kautta. Lieriöltä vesi laskeutuu suuria laskuputkia pitkin alas kattilan tulisään alapuolelle, josta se jakaantuu kattilan seiniin, eli keittoputkiin. Kattilassa palamisprosessin seurauksena syntyvät savukaasut täytyy jäähdyttää, jolloin lämpöä siirretään keittoputkiston veteen. Keittoputkissa vesi höyrystyy ja sen tiheys pienenee. Tällöin lieriöltä laskeutuva, painavampi kylläinen vesi työntää muodostuvan vesihöyry -seoksen putkistossa eteenpäin, takaisin lieriöön. Tiheyseron myötä kattilan vesikierron luomisessa ei tarvita pumppuja, eli kattilaa kutsutaan luonnonkiertokattilaksi.

Lieriössä vesihöyry -seos erottuu kylläisestä vedestä, josta höyry johdetaan kuvan punaista putkea pitkin tulistukseen tulistinlämpöpinnoille, mikä HP2 kattilassa toteutetaan kolmivaiheisesti. Ensimmäinen tulistinvaihe alkaa takavedon konvektiotulistimilta (primääri), jossa

savukaasut ovat jäähtyneet tulipesän lämpötilasta. Höyryn tulistamista jatketaan säteilytulistimella (sekundääri), joka sijaitsee tulipesässä. Tulistaminen päätetään takavedon yläosassa olevassa konvektiotulistimessa (tertiääri). Sekä primääri- että sekundääritulistimen jälkeen höyryä jäähdytetään normaaliajossa. Jäähdyttämällä ja tulistimien järjestyksellä saadaan tasainen tulistus laajalla kuormitusalueella sekä ehkäistään lämpötilaerosta aiheutuvia haittoja. Tulistuksen jälkeen höyry on riittävän kuumaa sekä kuivaa, jolloin sitä voidaan hyödyntää seuraavassa prosessissa. Kyseisellä laitoksella tulistettu höyry ohjataan turbiiniin lämmön -ja sähkön tuotantoon.

Kuvassa on myös kuvattu tulipesän alaosan ilmasuuttimien leijuttama hiekkakerros, muurattu seinämä sekä tuhkan ja hiekkamateriaalin kerääminen kattilan pohjalta. Tulipesään puhallettu palamisilma esilämmitetään kuvan sinisissä lämpöpinnoissa (luvo) kattilan peräpäässä, eli kattilan 3-vedossa, jossa savukaasu jäähtyy mitoitettuun loppulämpötilaan. Ylemmänä kattilan tulipesässä nähdään polttoaineen syöttökanavat sivuseiniltä, mihin polttoaine syötetään hetkellisesti käytettävistä varastoista, eli päiväsiiloista. Kuvassa pienempi säiliö kuvaa hiekkasiiloa ja siitä laskeutuva putki hiekan syöttöä tulipesään.

4.2 Kiertopetikattila

Kiertopetikattilassa leijutuskaasun nopeus ylittää niin kutsutun terminaalinopeuden, jolloin partikkelit tempautuvat kaasuvirtauksen mukana tulipesän yläosiin. Tulipesästä karanneita partikkeleita täytyy tällöin kierrättää takaisin tulipesään prosessin ylläpitämiseksi. Tämä toteutetaan erillisellä hiukkasen erottimella, kuten esimerkiksi syklonin avulla. Tulipesän takana oleva sykloni aiheuttaa sisään virtaavan savukaasun ja mukana tempautuvat partikkelit pyörivään liikkeeseen, sen tangentiaalisen sisääntuloaukon vaikutuksesta. Tämän keskipaikoisvoiman myötä savukaasun sisältämät suuremmat partikkelit törmäävät syklonin kartiomaiseen seinämään, ja valuvat seiniä pitkin alas hiekkalukkaan. Hiekkalukkoa käytetään petimateriaalin takaisin palauttamiseen tulipesään. Sen rakenne on myös sellainen, että tulipesän savukaasut eivät voi oikaista sitä kautta pois kattilasta. Savukaasujen suunniteltu poistumisreitti kattilasta on syklonin ja takavedon välinen kanava. Tätä syklonin avustuksella toteutettavaa kiintoainemateriaalin kiertämistä kutsutaan ulkoiseksi kierroksi. Sisäiseksi kierroksi kutsutaan tilannetta, jossa partikkelit eivät tempaudu erottimelle asti, vaan ne pysyvät tulipesässä, ja valuvat pitkin tulipesän seiniä alemmaksi tulipesässä. Kiertävän pedin

etuna nähdään hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet pedin tasaisen lämpötilaprofiili myötä. Palamisolosuhteet ovat tällöin erinomaiset sekä palamisprosessille että päästöjen muodostumisen ehkäisemiseen. (Vakkilainen, 2017, 221.)

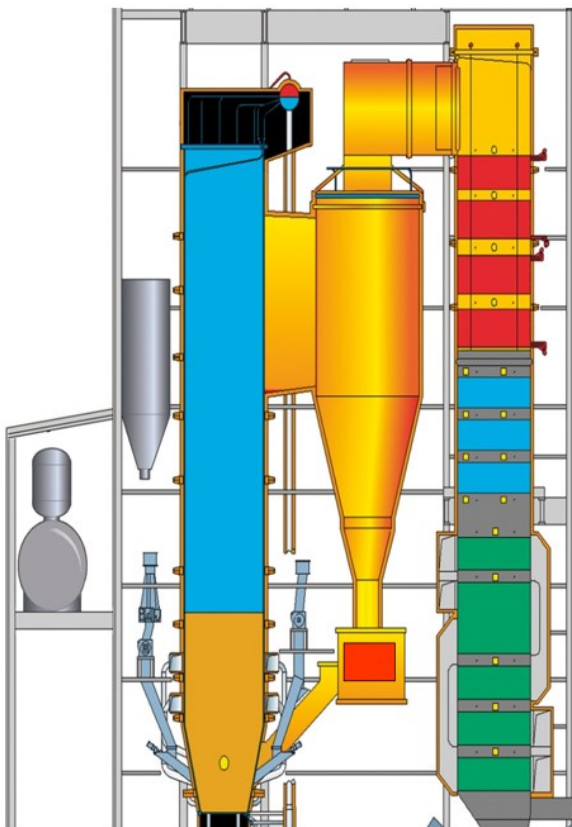
Polttoaine syötetään kiertopetikattilaan samalla periaatteella, kuten kuplapetikattilassa. Tekniikka tyypillisesti mahdollistaa myös polttoaineen syöttämisen hiekkalukkoon, jossa sen sekoittuminen on tehokasta. Tekniikat eroavat toisistaan primääri-ilman osuuden suhteen. Kiertävässä pedissä primääri-ilman suhteellinen osuus kasvaa suuremmaksi, jolloin se tyypillisesti vaihtelee 30–60 % välillä. Petimateriaalin täytyy myös olla hienojakoisempaa, jotta se saadaan kiertämään kattilassa. Tyypillisesti partikkelikoko on halkaisijaltaan alle 0,5 mm, mitä leijutetaan 3–10 m/s nopeusvälillä. Kiertopetikattilan tulipesän poikkipinta-ala muodostuu myös rakenteeltaan pienemmäksi, kuin saman tehoisessa kuplapetikattilassa. Tähän vaikuttaa suurempi leijutusnopeus sekä lämmönsiirto-ominaisuudet. Leijutusolosuhteisiin voidaan myös vaikuttaa kartiomaisella pohjan pinta-alalla. (Basu, 2015, 7; Vakkilainen, 2017, 222–223.)

Lämpötilaprofiili pysyy tasaisena läpi kattilan kiertävän pedin myötä, missä pedin lämpötilan vaihtelee 850–950 celsiusasteen välillä. Tehokkaasti sekoittava peti mahdollistaa laajan polttoainevalikoiman hyödyntämisen sekä seospolton. Haastavia polttoaineita, kuten kierrätyspolttoaineita voidaan polttaa täysin ilman tukipolttoaineita sekä tekniikka soveltuu täysin hiilen polttamiseen. Laajalla polttoainejoustavuudella voidaan myös vaikuttaa savukaasun tuhkan koostumukseen, kun poltetaan haasteellisia polttoaineita, muiden polttoaineiden, kuten hiilen kanssa. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 183.)

Matalan palamislämpötilan sekä polttoaineen pitkän viipymisajan myötä myös päästötasot pysyvät tekniikassa alhaisena. Päästöjen syntymistä ehkäistään ensisijaisesti primäärisesti, eli palamisilman vaiheistamisella. Syntyneitä rikkipäästöjä voidaan tarvittaessa sitoa kalkkikiven syöttämisellä tulipesään sekä NO_x-päästöjä redusoida ammoniakki- tai ureavedellä. Tämän lisäksi viimeinen tulistinvaihe voidaan sijoittaa hiekkalukkoon, jossa se on suojassa näiltä haitallisilta savukaasuilta. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 183.)

Kiertopetikattilan polttoaineteholuokat vaihtelevat 50–500 MW välillä ja jopa 1000 MW sovelluksia on rakennettu. Tyypillisesti tekniikkaa käytetään suuremman kokoluokan sovelluksessa, jossa polttoainevalikoimassa on käytössä hiiltä tai polttoaine on liian kuivaa käytettäväksi kuplapetikattilassa. (Hurskainen & Vainikka, 2016, 184.)

Kiertopetikattilan minimikuorma tyypillisesti vaihtelee 25–40 % MCR välillä, milloin sen tulipesä alkaa vähitellen muistuttamaan käyttäytymiseltään kuplapetikattilaa (Vakkilainen, 2017, 233). Matalammalla kuormatasolla yhä vähemmän materiaalia tempautuu tulipesästä, jolloin kiintoainekierrosta muodostuu suurimmaksi osaksi sisäistä. Tällöin tulipesän yläosan lämmönsiirto-ominaisuudet heikkenevät petimateriaalin jäähtymisen takia. Tämä vaikuttaa kiertopetikattilatekniikan säätökykyyn sekä matalamman kuormatason saavuttamiseen. (Kallio et al. 2017, 586.) Seuraavassa kuvassa (Kuva 14) havainnollistetaan esimerkki kiertopetikattilasta, kuten vastaavasti HP3 kattilayksikkö on.



Kuva 14. HP3 kiertopetikattila (Kuopion Energia, 2023c).

Kuvassa havainnollistetaan yksinkertaistetusti kiertopetikattila ja siihen kuuluvat pääkomponentit; tulipesä, sykloni ja takaveto. Syklonin alaosassa nähdään myös laatikkomallinen hiekkalukko. Kiertopetikattilan vesikierto on vastaavanlainen, kuin kuplapetikattilan kuvauksen tapauksessa, eli se perustuu luonnonkiertoon. Kyseisen kattilan höyrystinpinnat

kuvataan myös sinisellä värillä, mutta myös sykloni ja hiekkalukko toimivat osana vesikiertoa, eli ne ovat vesijäähdytteisiä. Höyrystinpinnat eivät tässä kuvassa näy sillä, ne ovat keltaisella värillä kuvatun muurauksen alla. Erona edelliseen kuvaan (Kuva 13), tässä syöttöveden esilämmittimen pinnat kuvataan samalla sinisellä värillä, kuin höyrystinpinnat sekä tässä vihertävä väri vastaa palamisilman esilämmittimiä.

HP3 kattilan höyryn tulistaminen tulistimilla on kolmivaiheinen. Tulistaminen alkaa taka-vedon alaosan sekundääritulistimilta 1–2, mistä höyry jatkaa tulistumista ylempänä primääritulistimissa 1–2 sekä päättyy tertiääritulistimessa, joka sijaitsee hiekkalukossa. Höyryn lämpötilan liiallista nousemista säädetään primääri- ja sekundääritulistimien välillä, ruiskuttamalla virtaukseen syöttövettä.

Kuvaan on myös havainnollistettu polttoaineen syöttö tulipesän sivuilta, mutta leijutusilman puhaltaminen sekä petimateriaalin vaihtamista kattilan alaosassa ei ole kuvattu. Kuvassa nähtävä ainoa siilo on hiekkasiilo, eli kuvasta puuttuu sekä kalkki- että polttoainesiiilot.

5 Haapaniemen voimalaitoksen käytössä olevat joustot

Kuopion Energia -konserni on viime vuosina investoinut menetelmiin, joilla se on parantanut voimalaitoksen energiatehokkuutta sekä vähentänyt polttamisesta syntyviä päästöjä, tiukentuneisiin päästörajoihin vastaten. Menetelmät ovat myös mahdollistaneet sähköntuotannon optimointia. Seuraavat alaotsikot käsittelevät näitä investointeja sekä havainnollistavat, mitä menetelmillä on saavutettu.

5.1 HP2 kattilan polttotekniikan muutos

Vuonna 2013 valmistuneella HP2 voimalaitosyksikön polttotekniikan muutoksella konserni vähensi merkittävästi päästöjään. Polttotekniikan muutoksessa vanha turvepölypolttokattila muutettiin kuplapetikattilaksi, millä muun muassa hiukkasten sekä typen oksidien muodostuminen on maltillisempaa. Polttotekniikkaan siirtyminen mahdollisti polttoaineen bioosuuden nostamisen, ja nykyään kyseisellä kattilalla on mahdollista saavuttaa jopa täysin turpeesta riippumaton tuotanto, kuitenkin vielä alhaisella kuormatasolla. Suuremmalla kuormalla haasteeksi muodostuu biopolttoaineen polttamisen seurauksena syntyvä runsas savukaasuvirta, mikä yhdessä kulkeutuneen lentotuhkan kanssa voi aiheuttaa kattilan liiallista likaantumista sekä lämmönsiirtopintojen eroosiota ahtaassa tulipesässä. Vuonna 2024 kattilalla odotetaan saavutettavan täysin biopohjainen tuotanto myös suuremmilla kuormilla, sillä kattilan takaveto tullaan laajentamaan. Leveämmän kattilan myötä savukaasuvirta hidastuu ja täten ehkäisee siitä aiheutuvia haittoja. Vielä ei kuitenkaan ole tiedossa, kuinka matalaan kuormatasoon kattilalla jatkossa päästään.

Polttotekniikan muutos on kuitenkin tuonut joustoja laitosyksikön ajotapaan sen 10-vuotisen käytön aikana, kun verrataan edelliseen tekniikkaan. Nykyinen kattilatekniikka on mahdollistanut joustavuutta, koska se ei ole yhtä herkkä polttoaineen laadun muutoksille, kuten kapaleessa 4.1 tekniikasta todettiin. Tekniikan avulla sähkön tuottaminen on ollut varmempaa ja toisaalta paremmin säädettävissä, varmemman kaukolämmön tuotantoa unohtamatta.

5.2 HP2 kattilan savukaasupesuri

Edellinen kattilamuutos sai jatkoa vuonna 2015 valmistuneella savukaasupesurilla, millä savukaasun sisältämiä rikkidioksidi- ja pölypäästöjä saatiin puhdistettua entistä tehokkaammin. Kesäaikaan on jopa mahdollista täysin ohittaa savukaasupesuri, jos sähkösuodatin pysyy suodattamaan hiukkaspäästöt riittävän hyvin sekä rikkipäästöt pysyvät kurissa matalan kuorman täysin biopohjaisessa poltossa. HP2 kattilan pesuri on lisäksi yhdistettynä lämmöntalteenottolaitteistoon, millä laitoksen kokonaishyötysuhteessa voidaan saavuttaa yli 95 %:n hyötysuhde. Pesurin lämmöntalteenotto perustuu savukaasun sisältämän kosteuden lauhtumisessa vapautuvan energian hyödyntämiseen, joka siirretään voimalaitokselle palaavan kaukolämpöveden lämmittämiseen. Lämmöntalteenotto tällöin säästää vuositasolla polttoainetta merkittävästi. Vuonna 2022 savukaasupesurin lämmöntalteenotolla tuotettiin noin 170 GWh lämpöä, mikä vastasi 16,5 % kyseisen vuoden kokonaiskaukolämmöntuotannosta. Pesuri myös mahdollistaa säästöjä silloin, kun sähkön tuottaminen on vähemmän kannattavaa. Tällöin polttoaineen kulutus ja siitä aiheutuvat kulut pyritään minimoimaan, eli laitoksen sähköntuotantoa pyritään vähentämään ja vastavuoroisesti pesurin lämmöntalteenoton tehoa kasvattamaan. Toisinaan sähkön tuottaminen on enemmän kannattavaa, jolloin laitoksen tuotantoa kasvatetaan sekä pesurin lämmöntalteenottoa vuorostaan vähennetään.

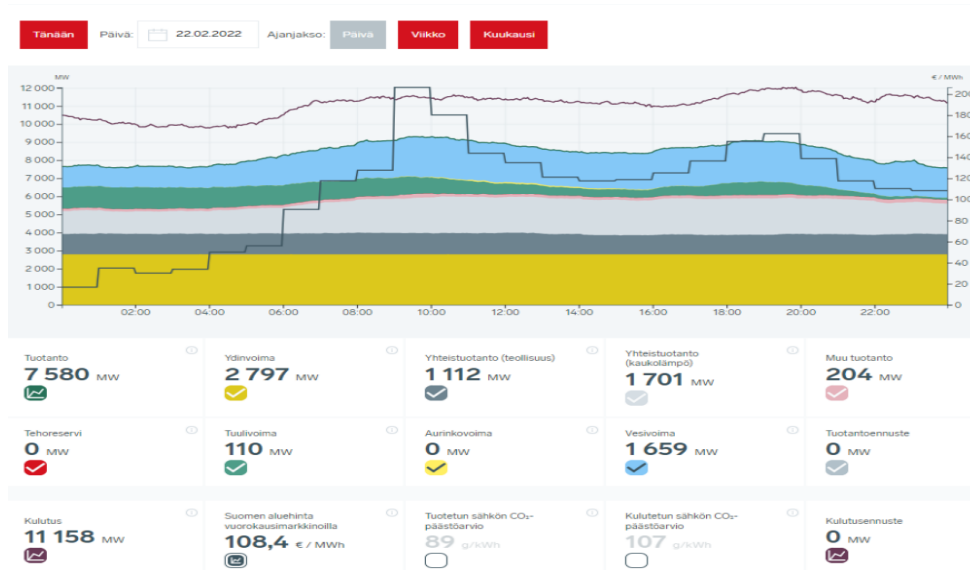
5.3 Voimalaitosalueen kaukolämpöakku

Haapaniemen voimalaitosalueelle vuoden 2020 alussa valmistui noin 6 miljoonaa euroa maksanut kaukolämpöakku, minkä odotettiin maksavan itsensä takaisin 6–8 vuoden kuluessa valmistumisajankohdasta laskettuna. Investointi on sittemmin osoittautunut kannattavaksi sähkön runsaan hinnan vaihteluvälin vaikutuksesta. Voimalaitoksen kaukolämpöakkuun varastoidaan lähes Kuopion kaukolämpöverkkoa vastaava vesimäärä, eli noin 13 500 kuutiota vettä, jonka lämpötila vaihtelee verkon lämpötilan mukaisesti, kuten kappaleessa 3.2.3 tekniikasta kuvattiin. Vuonna 2021 akun purkutehossa saavutettiin hetkellisesti yli 70 MW lukemia, jolloin virtaamat akkuun ja akusta kaukolämpöverkkoon olivat 400–430 kg/s välillä. Lämmityskaudella virtaamat ovat luonnollisesti korkeammalla tasolla, kun taas keuhkaisin virtaamat ovat tyypillisesti vaihdelleet 100–200 kg/s välillä. Hetkellisesti akkuun

varastoitunut energiamäärä on ollut noin 720 MWh, kesäisin lukema on tyypillisesti puolet tästä.

Haapaniemen voimalaitoksella kaukolämpöakun hyödyntäminen on tuonut vastaavanlaisia hyötyjä, kuten kappaleessa 3.2.3 kuvattiin. Akun avulla on voimalaitoksen tuotantoa ollut mahdollista ajoittaa kalliimmille sähkön markkinahinnan tunneille sekä puolestaan tuotantoa on voitu vähentää halvempien sähkön hintojen vallitessa. Akku on myös tuonut lämmön- toimitusvarmuutta lyhyiden voimalaitoksen tuotannon katkojen aikana. Investointi on myös konsernin kaukolämpöasiakkaille ollut hyödyllinen edullisempien kaukolämpöhintojen sekä toimitusvarmemman lämmön- toimituksen myötä.

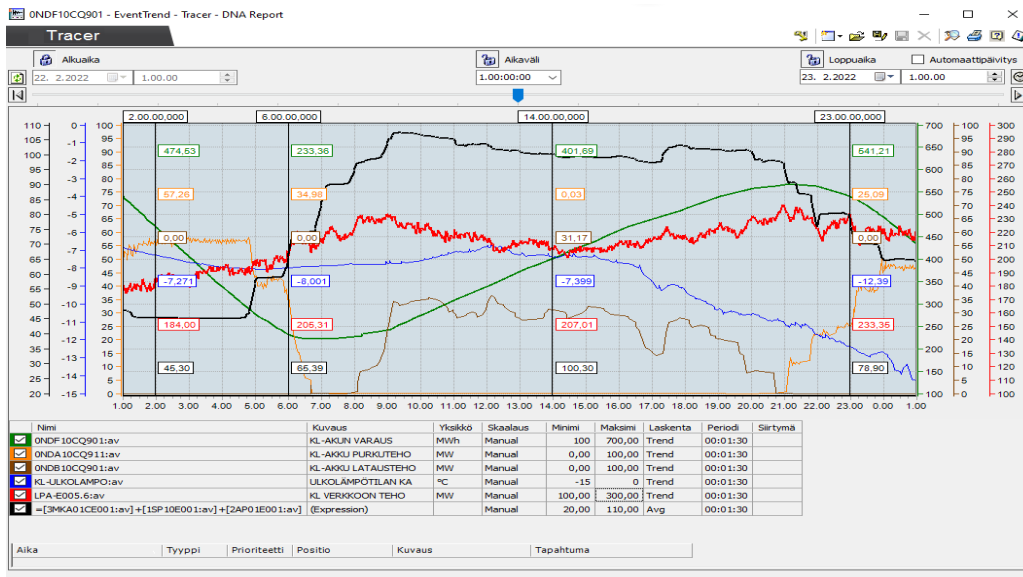
Kaukolämpöakun käyttöä ajotavan optimoimisessa voidaan havainnollistaa esimerkiksi eräänä lämmityskauden vuorokautena, milloin sähköjärjestelmän tila oli alla olevan kuvan (Kuva 15) mukainen.



Kuva 15. Suomen sähköjärjestelmän tila 22.02.2022 (Fingrid, 2023b).

Kuvassa sähkön kuluttaminen (punertava trendi) sekä sähköntuotanto (vihreä trendi) nähdään olevan kytköksissä toisiinsa, sillä molemmat trendit laskevat yön tunteina sekä nousevat huippuunsa aamun sähkön käytön kulutushuippuna. Tällaisessa sähköjärjestelmän tilassa voimalaitoksen kaukolämpöakun varaustilan purkamisen pyritään ajoittamaan yön halvemmille tunneille sekä vastaavasti voimalaitoksen tuotanto kasvattamaan aamun

kulutushuippuun. Kyseisenä vuorokautena kaukolämpöakun hyödyntäminen oli alla olevan kuvan (Kuva 16) kaltainen.



Kuva 16. Haapaniemen voimalaitoksen ajokuva akun sekä tuotannon suhteen 22.02.2022 (Valmet DNA, 2023).

Kuvaajasta nähdään, kuinka akun varaustila (vihreä trendi) puretaan yön sekä varhaisaamun aikana, milloin lämmönkuluttajan lämmöntarve (punainen trendi) on vähäisempi sekä markkinoilla vallitsee matalampi sähkön pörssihinta (edellinen kuva). Aamun kulutushuippuna voimalaitoksen generaattorien yhteenlaskettu sähköntuotantoteho (musta trendi) kasvatetaan huippuunsa, joka suurenee kaukolämpötehon kasvamisen mukaisesti. Kuvaajasta myös havaitaan voimalaitoksen tuotannon ylimäärälämmön varastoiminen akkuun (ruskea trendi). Yötä kohti mentäessä voimalaitoksen tuotantotehoa vähennetään, kun sähkön markkinahinta laskee. Kyseisenä ajankohtana akun varaustilaa joudutaan kuitenkin purkamaan kiristyvän pakkasen takia (sininen trendi).

5.4 Voimalaitoksen apujäähdytys, lauhdesähkötuotanto sekä reduktioajo

Apujäähdyttimen käyttäminen edellyttää korkeaa sähkön markkinahintaa, jotta sähköntuotannon lisäämiskeinona se on kannattavaa, kuten kappaleessa 3.2.2 todettiin. Haapaniemen

voimalaitoksella tällaista lämmönvaihdinta, eli LV-4:ää on hyödynnetty lisäämään sähköntuotantoa, kun sähkömarkkinoille myytävän sähkön hinta on ollut 3–4 kertainen verrattuna polttoaineen kustannuksiin. Ensisijaisesti voimalaitoksen sähkötehon säätäminen on toteutettu ajotavan, kaukolämpöakun sekä savukaasupesurin avulla. Kesäisin apujäähdytintä joudutaan kuitenkin toisinaan käyttämään epäedulliseen aikaan, kun voimalaitoksella tuotettu lämpö ei saada mahtumaan kaukolämpöverkkoon, eikä akkuun sekä sähkön markkinahinta on alhaalla. Jäähdyttimellä tehdään tällöin keinotekoista kuormaa hukkaamalla palaavan kaukolämpöveden lämpöä ympäröivään vesistöön, jotta käytössä oleva kattila saadaan pidettyä sen toimintapisteen sisäpuolella.

Lauhdesähkötuotanto, eli lauhdeperätuotanto ei puolestaan Haapaniemen voimalaitoksella ole merkittävää sähköntuotannon joustokeinona. Lauhdesähköä voidaan tarvittaessa tuottaa HP1 turbiiniyksikön perässä olevalla lauhdeperällä. Vuonna 2022 lauhdesähköenergiaa tuotettiin 15,2 GWh, joka vastasi noin 4 % kyseisen vuoden kokonaissähköntuotannosta. HP1 turbiini sekä siihen kytketty lauhdeperä saadaan käyttöön ohjaamalla HP2 tai HP3 yksikössä tuotettu höyry kyseiseen turbiiniin. Yleensä näin toimitaan vain kesäisin, kun laitoksia operoidaan niiden minimikuormalla, vähäisen lämmöntarpeen takia. Turbiiniyksikkö mahdollistaa hieman matalammassa lämpötilassa ja paineessa sekä toisaalta pienemmässä virtauksessa olevan höyryn hyödyntämisen, kuin kattilayksikköjen omat turbiinit mahdollistavat. Toisaalta talvikaudella, kun HP2 ja HP3 kattiloita operoidaan lähes niiden mitoitettulla maksimikuormalla, voidaan tuotettu ylimäärä höyry ohjata HP1 turbiinille lisäsähköntuotantoon.

Voimalaitoksen joustokeinona voidaan myös mainita reductioventtiilien hyödyntäminen tuotannossa. Reductioventtiilin avulla kattilassa tuotettu tuorehöyry voidaan turbiinin sijaan ohjata tuottamaan kaukolämpöä erillisessä lämmönvaihtimessa, kuten esimerkiksi HP3 kattilan reductiokaukolämmönvaihtimessa KLV3. Normaaliajossa reductioventtiili otetaan käyttöön, jos turbiinilla havaitaan häiriötilanne. Toimenpiteellä saadaan pidettyä kaukolämmöntuotanto yllä ja täten kattila toiminnassa. Toisaalta, jos reductioventtiilillä tuotettu kaukolämpöteho riittää tyydyttämään lämmöntarpeen, voidaan vaihdinta hyödyntää lämmöntuotannossa sekä vastaavasti turbiinin tuotantoa vähentämään. Reductioajo mahdollistaa myös matalamman kuormatason, jolloin polttoainekulutus saadaan pienennettyä vähäisemmän höyryn tuotannon myötä.

6 HP3 voimalaitosyksikön joustojen kehittäminen

Kuormajoustavuutta polttoon perustuvilla kattiloilla pyritään nykyään lisäämään monin eri keinoin, jotta niillä pystytään paremmin vastaamaan sähkömarkkinoilla lisääntyneen uusiutuvan sähköntuotannon aiheuttamiin vaikutuksiin. Uusiutuva energia sähköntuotannossa on sääriippuvaista, minkä vuoksi sillä on nykyään merkittävä rooli sähkön pörssihinnan muodostumisessa. Yleisesti tuulisina päivinä on nähty sähkön runsasta tuotantoa, mikä on laskeutunut pörssihinnan alas sekä päinvastoin vähätuulisena päivänä sähkön hinta on ollut korkeammalla tasolla. Lämpökuormasta riippuvaisen yhteistuotantolaitoksen sähköntuotanto asettaa omat haasteensa sähkön markkinahintojen vaihteluun vastaamisessa. Sähköntuotanto ei voida rajattomasti säätää sekä matalalla kuormalla operoiminen on haasteellista kattilan toimintapisteen kannalta.

Seuraavaksi työssä otetaan tutkittavaksi keinoja, joiden avulla HP3 laitosisyksikön tuotanto saadaan joustavammaksi sekä mahdollisesti niiden avulla voidaan saavuttaa matalampi minimikuormataso. Tämän myötä kattilaa voidaan operoida sellaisella teholla kuin on tarpeellista, kuten kesällä vähäisen lämmönkulutuksen aikana. Tällä muun muassa säästetään polttoainekustannuksissa, joka nykyään tarkoittaa merkittäviä säästöjä kallistuneiden polttoainneiden takia. Ongelmaa aluksi lähestytään tarkastelemalla tekijöitä, jotka tällä hetkellä rajoittavat kattilan matalamman kuormatason saavuttamista. Sen jälkeen ongelmaan esitetään ratkaisukeinoja muun muassa referenssi kattilan muutostoimenpiteen sekä kiertokaasun lisäämisen avulla. Kattilan kuormajoustavuusselvityksen jälkeen tutkitaan HP3 kattilalle apujäähdyttimen käyttömahdollisuutta, joka auttaa matalalla kuormatasolla operoimisessa sekä toisinaan mahdollistaisi joustavuutta sähköntuotannon lisäämiseen.

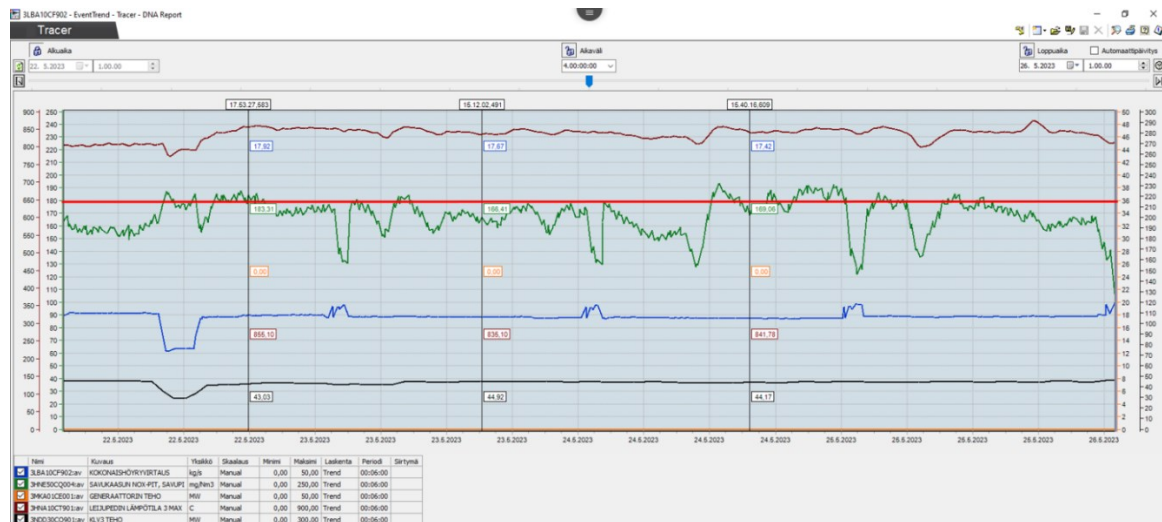
6.1 Minimikuormapistettä rajoittavat tekijät

HP3 kattilatekniikan matalan kuorman haasteet liittyvät viranomaisten määrittämien päästörajoiden sisällä pysymiseen (NO_x), petilämpötilan jäähtymiseen sekä tuorehöyryn pitämiseen turbiinille sekä materiaaleille suotuisessa lämpötilassa. Petilämpötila täytyy olla asetetun lämpötilarajan yläpuolella, millä sekä varmistetaan palamisen täydellisyys, että ehkäistään kattilan ajautumista lukitustilaan, liian viileän pedin takia. Höyryn lämpötilaa

puolestaan rajoittaa materiaalien kestävyys. Äkilliset höyryn lämpötilan muutokset rasittavat lämmönsiirtimien, kuten tulistimien materiaaleja, lämpölaajenemisen sekä supistumisen takia. Myös turbiinille laitetoimittaja on määrittänyt sallitut lämpötila- ja painerajat. Viileämmässä höyryssä on enemmän kosteutta, eli vesipisaroita, kun verrataan saman painetason höyryyn. Pisarat aiheuttavat ennen aikaista kulumista turbiinin siivistössä sekä pesässä, mitkä lisäävät ylimääräisiä huoltokustannuksia. Seuraavaksi tarkastellaan näitä tekijöitä HP3 kattilan matalan kuorman ajossa.

6.1.1 NO_x-päästöt

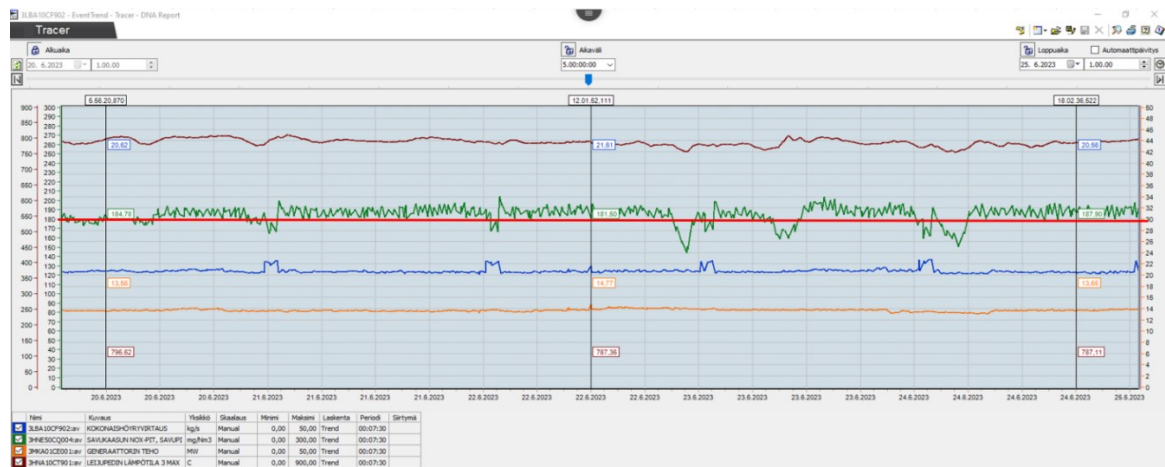
Yhteistuotantolaitoksia, kuten HP3 kattilaa operoidaan lämmityskauden ulkopuolella paljon matalammalla kuormatasolla, kuin lämmityskaudella. Tällöin kattilatekniikan suuren leijutusilman takia NO_x-päästöt kasvavat. Seuraavissa kuvissa (Kuva 17 ja Kuva 18) havainnollistetaan viime kesän HP3 kattilan matalan kuorman ajoa NO_x-päästöjen osalta.



Kuva 17. HP3 kattilan reduktioajo toukokuun 2023 aikana (Valmet DNA, 2023).

Toukokuun loppuvaiheilla sähkön pörssihinta oli ennennäkemättömän alhaalla, minkä seurauksena tuotantokustannukset muodostuivat liian suuriksi turbiinin tuotannossa. Tämän myötä kattilan ajotavassa siirryttiin reduktioajoon, jossa tuorehöyry ohjattiin KLV3 reduktiovaihtimelle. Yllä olevan kuvan trendit havainnollistavat tämän ajankohdan matalan

kuorman ajoa reduktiolla, mihin on punaisella vaakasuoralla viivalla esitetty laitoksen sallittu vuosiraja-arvo NO_x -päästöjen suhteen, joka on 180 mg/Nm^3 . Sallitut NO_x -päästöt vuorokaudelle puolestaan ovat 220 mg/Nm^3 , joka ei kuvassa ole esitetty. Kuvaajan vihreän trendin, eli savukaasun NO_x -pitoisuuden perusteella nähdään, että kattilan teho on rajoittunut siihen kuormatasoon, jolla pysytään juuri vuosiraja-arvon alla. Höyryn tuotanto tämän ajanjakson aikana pysyi tasaisena noin 17 kg/s (sininen trendi).



Kuva 18. HP3 kattilan turbiini minimituotannossa keskikesän 2023 aikana (Valmet DNA, 2023).

Keskikesällä sähkön myyntihinta muodostui ajoittain kannattavaksi, vaikka välillä pörssi-hinnassa nähtiin jopa negatiivisia lukemia. Reduktioventtiilin rikkoontumisen takia jouduttiin kuitenkin siirtymään kaukolämmöntuotantoon turbiinilla. Yllä olevat trendit kuvaavat tilannetta, kun turbiinilla pyrittiin ajamaan mahdollisimman pientä sähköntuottoa, eli mini-miä, jotta sen tuotantokustannukset pysyvät mahdollisimman alhaisina. Kuvaajan perusteella ajanjakson höyryn tuotanto oli noin 20 kg/s , jolla saatiin tuotettua bruttona noin 14 MW sähköä (oranssi trendi). NO_x -päästötrendiä tarkastelemalla huomataan, että päästöt ovat liki viranomaisten määrittämässä rajassa tai hieman sen yläpuolella, kun verrataan sallittuun vuosikeskiarvoon. Vuosikeskiarvo voidaan laitoksella ylittää tiettyinä ajankohtina, kuten kesän matalalla kuormalla. Tämä ylitys kuitenkin vaikuttaa muiden ajankohtien ajotapaan, jotta vuoden lopussa keskiarvossa pysytään rajan alapuolella. Tämän takia myös turbiinin

minimituotannossa NO_x-päästöjen vuorokausikeskiarvo on rajoittanut kattilan kuorman laskemista.

Ensisijaisesti kattilan NO_x-päästöjen muodostumista ehkäistään primäärisesti, eli palamisolosuhteet pidetään mahdollisimman täydellisenä. Normaaliajossa tähän päästään vaiheittaisella ilman syöttämällä tulipesän eri osissa. Matalan kuorman operoimisessa NO_x-päästöjen muodostuminen on haaste, kuten edellä kuvattiin. Matalan kuorman ajossa ei primääri-ilmaa tai jäähdytysilmaa ole varaa paljoa enempää vähentää, jotta tekniikan leijutusolosuhteet saadaan ylläpidettyä. Tämän myötä savukaasujen jäännöshappipitoisuus kasvaa, joka on seurausta liiallisesta ilmamäärästä suhteessa palavaan materiaaliin. Tällöin hapen ja typen reaktion tuloksena muodostuu NO_x-päästöjä. Tässä tilanteessa muodostuneita typen yhdisteitä täytyy redusoida takaisin typeksi (N₂), jotta pysytään päästörajojen sisäpuolella. HP3 kattila hyödyntää NO_x-päästöjen vähentämismenetelmänä ammoniakkiveden ruiskuttamista syklonin sisäänmenoaukossa, mitä kutsutaan SNCR-menetelmäksi (Selective Non Catalytic Reduction). Menetelmä vaatii kuitenkin tietyn lämpötilaikkunan ja viipymäajan, jotta typen oksidien sitomisreaktioita tapahtuu. Liian matalassa lämpötilassa, kuten edellä kuvatussa osakuormassa, ammoniakkivesi voi osin poistua kattilasta savukaasujen mukana reagoimattomana NH₃:na.

Tähän päästöjen vähentämismenetelmään on tutkittu parannuskeino, jotta HP3 kattilan NO_x-päästöt saadaan kuriin myös matalalla kuormalla. Tässä ammoniakkiveden ruiskuttaminen siirretään tulipesän alempiin osiin, missä kyseinen lämpötilaikkuna on suotuisampi NO_x-päästöjen redusoimiseen. Tämän parannuksen myötä, voidaan NO_x-päästöjen suhteen kattilan kuormatasoa laskea. Työn tekemisen ajankohtana kyseisen muutostyön mekaaniset asennukset ovat tehty sekä sen käyttöönotto on suunniteltu vuodenvaihteeseen. Seuraava minikuormaa rajoittava tekijä voidaan tämän myötä ottaa tarkasteluun.

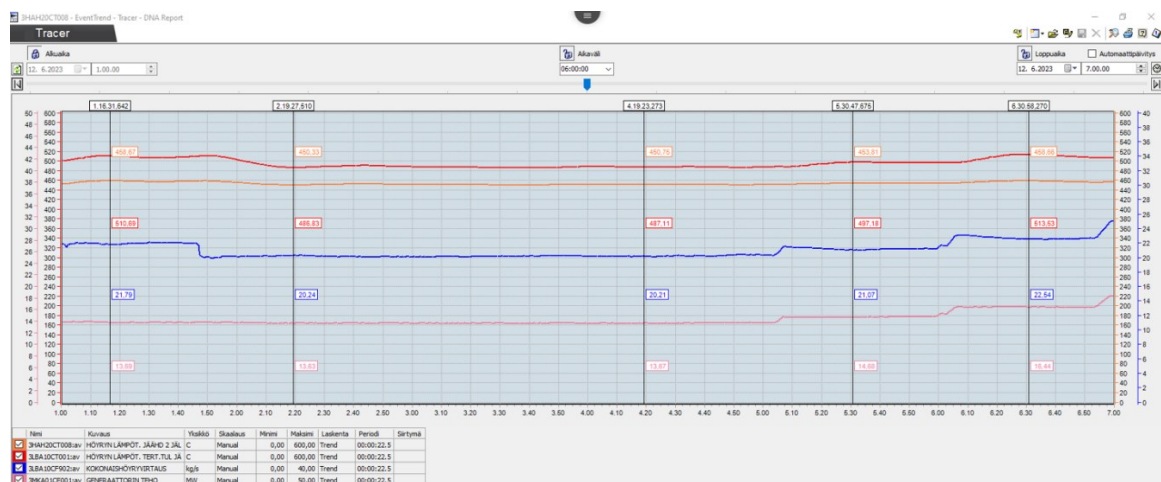
6.1.2 Petilämpötila

Yllä kuvattujen trendien perusteella (Kuva 17, Kuva 18) petilämpötilat ovat pysyneet 750 celsiusasteen yläpuolella. Keskikesän turbiinin tuotannossa trendi on liikkunut matalammalla tasolla kuin toukokuun reduktioajossa. Välillä trendit ovat roikkuneet, eli petilämpötilat ovat olleet laskusuunnassa, mikä on aiheutunut muun muassa kuorman muutoksesta tai polttoaineen kosteuspitoisesta. Petilämpötilat eivät kuitenkaan ole alittaneet

lämpötilapistettä 730 °C, jota pidetään rajana tukipolttoaineiden käytön lopettamiseen käynnistystoimenpiteiden aikana. Turvalukitusjärjestelmän rajaksi puolestaan on asetettu 600 °C, jonka alapuolella järjestelmä sammuttaa kattilan, mikäli ollaan pelkän kiinteän polttoaineen ajossa. Petilämpötiloissa on näiden trendien perusteella laskemisen varaa, mutta on varmistettava palamisen täydellisyys, sillä epätäydellinen palaminen johtaa häikäpäästöjen kasvuun. Myös yllättävä muutos polttoaineen kosteudessa voi romahduttaa petilämmön alle lukitusrajan, jonka varalta on hyvä olla hieman puskuria. Kyseisessä kattilatekniikassa petilämpötila vaikuttaa myös viimeisen tulistinvaiheen, eli hiekkatulistimen höyryn tulistamiseen. Seuraavaksi käsitellään tämän tuorehöyryn lämpötilan käyttäytymistä matalalla kuormalla.

6.1.3 Tulistetun höyryn lämpötila

Kuten todettua, kyseisen kattilan höyryn tulistaminen viimeistellään hiekkatulistimessa, jotta sen lämpötila on suotuisa seuraavaa prosessia, kuten turbiinin tuotantoa varten. Matalan kuorman ajon hiekkatulistimen tulistamista havainnollistetaan alla olevan kuvan (Kuva 19) avulla.



Kuva 19. Höyryn lämpötilan käyttäytyminen matalan kuorman turbiinin tuotannossa (Valmet DNA, 2023).

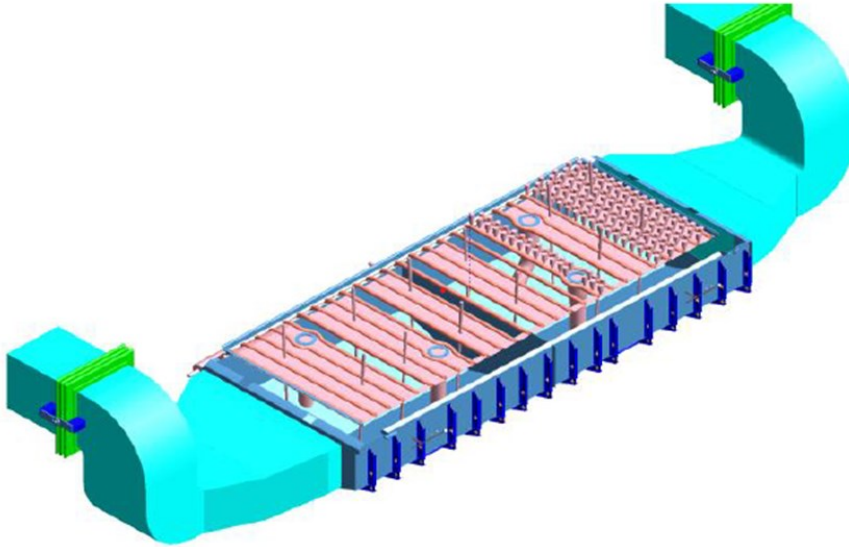
Kuvassa höyryn lämpötilaa ennen ja jälkeen hiekkatulistimen havainnollistavat oranssi ja punainen trendi. Trendien käyttäytymisessä havaitaan tapahtuvan notkahdus, kun matalan

kuorman pisteestä (sininen trendi) laskeudutaan alaspäin. Merkittävämpi lämpötilan lasku nähdään hiekkatulistimen tulistuslämpötilassa, jolloin käyrien lämpötilaero kapenee. Noin 20 kg/s kuormalla höyry tulistuu enää noin 487 celsiusasteeseen, kun taas noin 2 kg/s suuremmalla kuormalla tulistaminen päättyy yli 510 °C. Syy tähän romahdukseen voidaan arvioida liittyvän matalamman kuorman hidastuneeseen kaasuvirtaukseen ja sitä kautta vähentyneeseen kiintoainekiertoön hiekkatulistimelle. Tällöin hiekkatulistimella kiertävän hiekan lämmönsiirto höyryyn on heikentynyt.

Höyryyn lämpötilan alarajana turbiinin tuotannossa pidetään noin 470 celsiusastetta, jonka alapuolella paisunta alkaa päättymään liian kostealle alueelle turbiinin matalapaineosassa. Myös jatkuva lämpötilaeron sahaaminen aiheuttaa kulumista tulistinputkien materiaaleissa, joten sitä on vältettävä. Nykyisillä keinoilla ei turbiinin noin 20 kg/s kuorman tuotannossa ole paljon laskemisen varaa, kuten edellä havainnollistettiin. Seuraavaksi tähän höyryyn lämpötilan romahtamiseen matalan kuorman ajotavassa tutkitaan ratkaisukeinoja.

6.2 Kiertopetikattilan osapetimuutos

Leijupetikattilan osapetimuutoksessa on tulipesän käytössä olevaa pohjan pinta-alaa muutettu siten, että se mahdollistaa osan arinan yläpuolisen petimateriaalin leijuttamisen sekä osan pitämisen leijumattomassa tilassa. Tätä tulipesän pohjan arinaa havainnollistaa alla oleva kuva (Kuva 20).



Kuva 20. HP3 kattilan tulipesän arina ja ilmalaatikko (Metso Power, 2011b).

Kuvan esimerkissä on kuvattu HP3 kattilan leijuarinan ilmalaatikko, ilmasuuttimet sekä neljä tuhkanpoistoaukkoa. Sen perusteella nähdään, että palamisilman jakautuminen leijuarinalle toteutetaan kaksiosaisesti, millä normaaliajossa varmistetaan palamisilman tasainen jakautuminen suuttimille. Kyseisen kattilan osapetimuutos voidaan esimerkiksi toteuttaa jakamalla kuvattu ilmalaatikko väliseinän sekä toimilaitteellisen sulkupellin avulla kahteen osaan. Toimilaitteellinen sulkupelti mahdollistaa arinalle virtaavan palamisilman jakautumisen säätämisen. Pellin ollessa täysin kiinni, ei toisen puolen leijutusilmasuuttimille jakaannu ilmaa, jolloin sen yläpuolinen petimateriaali ei myöskään leiju. Tällöin kattila on niin sanotussa osapetiajossa. Kuvaan muutostoimenpidettä ei ole havainnollistettu, sillä sen nähdään olevan liikesalaista. (Kattilavalmistaja, 2023.)

Kun kiertopetikattilaa operoidaan lähellä sen nimellistä minimikuormapistettä, alkaa sen toiminta vähitellen muistuttamaan kuplapetikattilaa, kuten kappaleessa 4.2 todettiin. Tämä on seurausta vähentyneestä kaasuvirtauksesta, minkä myötä pedin lämpötila jäähtyy sekä ulkoinen kiintoainekierto heikkenee tai uhkaa loppua kokonaan. Seurauksena on tulituksen hiipuminen viimeisessä tulistinvaiheessa, eli hiekkalukon hiekkatulistimessa. Tilanteessa voikin olla järkevää siirtyä osapetiajoon, millä petilämpötilat saadaan mahdollisesti pidettyä paremmin yllä pienemmällä pinta-alalla tapahtuvan palamisen myötä. Osapetiajossa mahdollisesti myös palamista siirtyy tulipesän ylempiin osiin, jolloin takavedon tulistimien tulistaminen tehostuu. Seuraavaksi esitellään erään kiertopetikattilan osapetiratkaisua.

6.2.1 Referenssi kiertopetikattila

Syksyn 2023 aikana suoritimme yritysvierailun eräälle kattilalaitokselle, jossa oli kevään ja kesän vaihteessa otettu käyttöön kattilan osapetiratkaistu. Kyseinen kattila valikoitui vierailukohteeksi sen samankaltaisuuden takia. HP3 kattilaa sekä referenssi kattilaa kutsutaankin toistensa sisarkattiloiksi. Molemmat kattilat ovat mitoitettu toimimaan biopolttoainepohjaisesti sekä kaukolämmön- että sähköntuotannossa. Eroavaisuutena on referenssi kattilan tuotama prosessihöyry alueensa teollisuudelle sekä kattilan polttoaineena voidaan hyödyntää haasteellisia kierrätyspolttoaineita. Tarkemmat kattiloiden tekniset tiedot ovat vertailtu alla olevassa taulukossa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Referenssi kattilan sekä HP3 kattilan vertailtavat arvot mitoituspisteessä.

	Referenssi kattila	HP3
Höyryteho P_{th} [MW]	177	160
Sähköteho P_{el} [MW]	65	50
Tuorehöyryn massavirta q_m [kg/s]	67	65
Tuorehöyryn paine p [bar]	84	130
Tuorehöyryn lämpötila T [°C]	522	535

Arvojen vertailutaulukosta voidaan huomioida kattilassa tuotetun tuorehöyryn tila, minkä perusteella referenssi kattilan operointipaine on huomattavasti matalampi. Tuorehöyryn kannalta tämä tarkoittaa sitä, että paisunta turbiinissa alkaa tulistetummalta alueelta, jolloin myös paisunta päättyy hieman kuivempaan tilaan. Toisaalta matalampi painetaso johtaa huonompaan prosessihyötysuhteeseen. Tämä höyryn paisunnan käyttäytyminen ilmenee esimerkiksi liitteen (Liite 2) vesihöyryn T-S-piirroksessa. Muilta osin kattiloiden arvot ovat lähes identtiset.

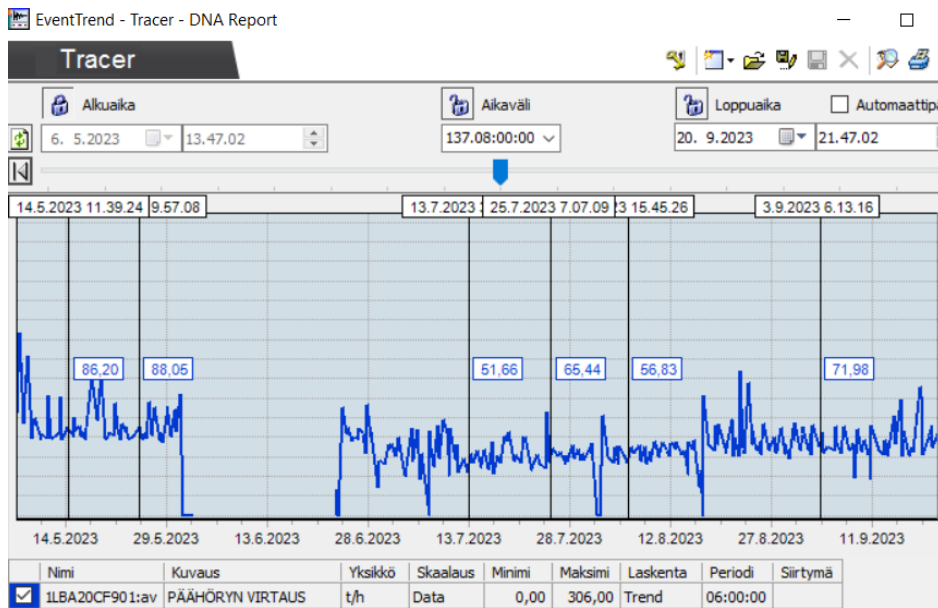
Referenssi kattilan haasteeksi on muodostunut pedin lämpötilan jäähtyminen sekä kiintoainekierron hidastuminen sen lähestyessä mitoitettua minimikuormapistettä. Pedin

lämpötilan roikkuminen on aikaisemmin johtanut kattilan äkilliseen jäähtymiseen, jolloin uhkaksi on muodostunut kattilan ajautuminen lukitustilaan. Kattilaan toteutetun osapetimuu-
toksen tavoitteena oli löytää ratkaisu pedin lämpötilan ongelmiin sekä mahdollisesti saavut-
taa matalampi kuormataso. (Referenssi kattilan tuotantomestari, 2023.) Seuraavassa kuvassa
(Kuva 21) on trendien avulla havainnollistettu kyseisen kattilamuutoksen vaikutuksia.



Kuva 21. Referenssi kattilan parametrejä sekä ennen että jälkeen kattilamuutoksen (Tuotantomestari, 2023).

Muutostoimenpide toteutettiin kuvassa nähtävän trendikäyrien muodostaman sukelluksen aikana. Pedin lämpötilan trendissä (vaaleanpunainen) havaitaan muutos aikaisempaan tasoon, sillä kattilaa on muutostoimenpiteen myötä opeoitu kuin kuplapetikattilana. Tämän myötä pedin lämpötila nähdään olevan kuumemmalla tasolla. Muutoksen myötä myös tuorehöyryn lämpötila sekä paine nähdään olevan alemmalla tasolla (sininen ja vihreä trendi). Tasojen laskemisen on mahdollistanut kattilan matala painetaso sekä toisaalta nyt kuumemmassa lämpötilassa oleva peti. Seuraavassa kuvassa (Kuva 22) tarkastellaan vielä erikseen muutoksen vaikutusta tuorehöyryn virtaukseen.



Kuva 22. Referenssi kattilan tuorehöyryn virtaus sekä ennen että jälkeen kattilamuutoksen (Tuotantomestari, 2023).

Aikaisempi kattilan minimikuorman höyryntuotannon taso oli noin 70 t/h (noin 19 kg/s). Yllä olevan trendin perusteella kattilaa on operoitu tätä pistettä matalammalla kuormatasolla, mutta kesän käyttöönoton testeissä ei kuitenkaan aivan minimikuormaa ajettu, kuin vain tavoitekuorman osalta. Tämä kuormataso todettiin ratkaisulla saavutettavan. Mahdollisesti osapetiajon tuotannossa voidaan saavuttaa tavoiteltua kuormaa matalampia lukemia. Referenssi kattilan ainoaksi rajoittavaksi tekijäksi muodostuu turbiinivalmistajan asettama miniteho, mitä ei voida alittaa. NO_x -päästöt ovat myös pysyneet kurissa ilman ammoniakkiveden syöttämistä aikaisempaan minikuormapisteeseen saakka. Sitä alemmalla tasolla syöttöä täytyy lisätä, jotta kattilalaitos pysyy sille asetetuissa päästörajoissa. (Tuotantomestari, 2023.)

Referenssi kattilan tulokset havainnollistivat petilämpötilan paremman pysymisen yllä, kun kuormatasoa laskettiin. Tulokset eivät kuitenkaan havainnollistaneet menetelmän tuorehöyryn lämpötilan tehostamista. Tämän takia kattilavalmistajan avustuksella seuraavaksi pyritään selvittämään osapetiratkaisun vaikutuksia HP3 kattilan tapauksessa.

6.2.2 HP3 kattilan matalan kuorman osapetiratkaistu

Kattilavalmistajan avustuksella suoritetaan laskenta, minkä tavoitteena on havainnollistaa tilanne, jossa osapetiratkaistu otetaan käyttöön HP3 kattilan tapauksessa. Laskennassa hyödynnetään edellä kuvattua HP3 kattilan alkuperäisen matalan kuorman tilannetta, jossa noin 20 kg/s kuormatasolla höyryn lämpötila tulistuu hiekkatulistimen jälkeen noin 487 celsiusasteeseen. Tästä tilanteesta laskennassa siirrytään osapetiajioon sekä saatuja tuloksia vertailaan. Tulosten lukuarvoja ei voida kuitenkaan työn julkisessa versiossa esittää, minkä takia tuloksia avataan vain sanallisesti. Laskennassa joitakin parametrejä, kuten esimerkiksi käytetyn polttoaineen kosteus joudutaan laskentatyökaluun syöttämään arviolla. Tämän myötä laskennan tulokset ovat suuntaa antavia.

Laskennan tulosten perusteella höyryn lämpötila sekä ennen että jälkeen hiekkatulistimen on laskenut, kun osapedin tilannetta verrataan alkuperäiseen tilanteeseen. Osapedissä tulistimien välinen lämpötilaero havaitaan kuitenkin olevan suurentunut, mikä viittaa siihen, että hiekkatulistimen tulistaminen ei ole täysin hiipunut. Laskennassa osapedin ilmakerrointa on mahdollista laskea, minkä myötä kokonaispalamisilman määrä havaitaan laskevan alkuperäisestä tilanteesta.

Osapetilaskennan höyryn lämpötilaeron suureneminen sekä toisaalta pienempi palamisilman määrä voivat selittyä referenssi kattilan tuloksiin peilaten kuumemmalla petilämpötilalla. Tämän havainnollistamisessa petilämpötilan käyttäytymistä laskennassa tulkitaan savukaasun lämpötilan sekä jäännöshappipitoisuuden avulla. Näiden tulosten perusteella savukaasu poistuu tulipesästä osapetiratkaistun tilanteesta alkuperäistä kuumempaan. Tilanteesta myös jäännöshappipitoisuuden havaitaan laskevan alkuperäisestä.

Saadut tulokset viittaavat osapetiratkaistun sekä täydellisempään että kuumempaan pedissä tapahtuvaan palamiseen. Savukaasun lämpötilan ei kuitenkaan aivan voida olettaa vastaavan pedin lämpötilaa, sillä osapetiratkaistussa kattilaa operoidaan kuin kuplapetikattilaa, eli petimateriaali ei ulkoisesti kierrä yhtä tehokkaasti.

Referenssi kattilan kokemusten sekä laskennan tulosten perusteella on mahdollista, että osapetiratkaistu mahdollistaa matalamman kuormatason saavuttamisen HP3 kattilalla. Höyryn tulistuksen parantavaa vaikutusta menetelmällä ei kuitenkaan havaittu olevan, vaikka pedin lämpötila on tilanteesta kuumempi. Tämän myötä matalan kuorman tulistuksen

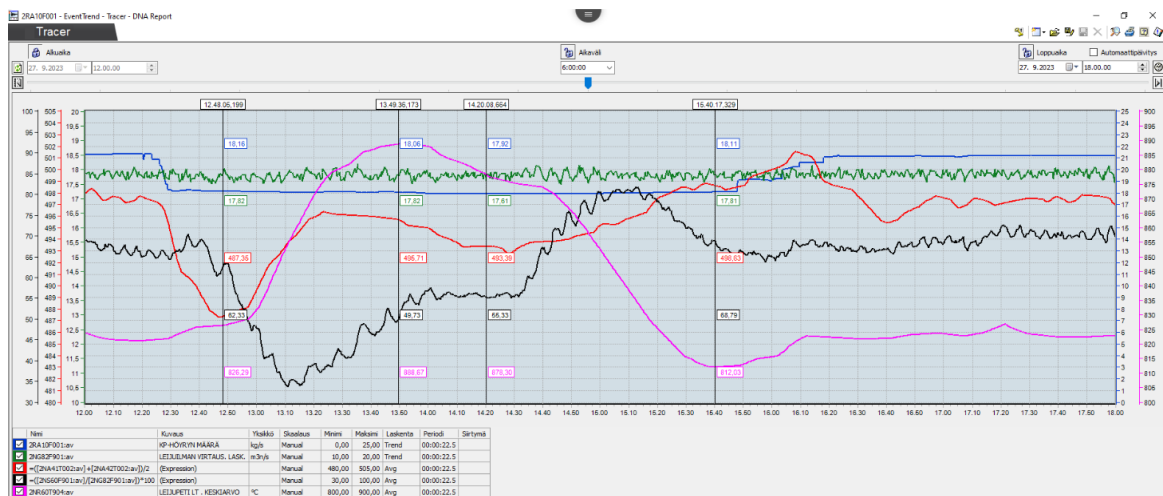
parantamiseen tutkittavaksi keinoksi valitaan toinen menetelmä, kuten seuraavaksi käsitellään kiertokaasun lisäämistä.

6.3 Kiertokaasun lisääminen kiertopetikattilassa

Normaaliajossa kiertokaasupuhallinta hyödynnetään pedin lämpötilan hallitsemiseen, kuten kappaleessa 4 todettiin. Puhallinta harvemmin käytetään matalan kuorman ajossa sen pedin lämpötilaa laskevan vaikutuksen takia. HP3 kattilalaitoksessa kiertokaasupuhallin ei ole käytössä, mutta vastaavan tekniikan kattiloissa niitä esiintyy, kuten edellä mainitussa referenssi kattilassa. Kyseisessä kattilassa puhallinta on käytetty juuri pedin lämpötilan hallitsemiseen normaaliajossa.

Kiertokaasun lisääminen palamisilman sekaan suurentaa savukaasuvirtausta, minkä myötä takavedon tulistimien lämmönsiirto tehostuu. Teoriassa, jos matalan kuorman ajossa kaasuvirtausta kasvatetaan kiertokaasun avulla, voidaan kiintoaineiden tempautumista lisätä ja täten petimateriaalin kiertoa hiekkatulistimelle ylläpidettyä tai jopa kasvatettua. Jatkuvan ulkoisen kiintoainekierron myötä myös höyryn tulistaminen hiekkatulistimella ylläpidetään. Toisaalta kiertokaasun lisääminen laskee petimateriaalin jäännöshappipitoisuutta, eli vähentää pedissä tapahtuvaa palamista. Tämän myötä palaminen mahdollisesti painottuu tulipesän ylempiin osiin, palamisilman vaiheistuksen myötä.

Tämän teoreettisen pohdinnan tueksi havainnollistetaan kiertokaasun lisäämisen vaikutuksia matalan kuorman ajossa suoritettulla testiajolla. Kiertokaasutesti suoritetaan HP2 kattilalla, jossa kiertokaasupuhallin on käytössä. Testin vaikutukset esitetään alla olevassa kuvaajassa (Kuva 23).



Kuva 23. HP2 kattilan kiertokaasupuhaltimen testi (Valmet DNA, 2023).

Testiajon aluksi HP2 kattilan kuormatase laskettiin niin alas, kuin kyseisenä ajankohtana oli mahdollista laskea. Kuorman laskemista kuvaa yllä olevan kuvan sininen trendi. Testin valmisteluissa myös kiertokaasun suhde kokonaisleijutusilmaan pienennettiin, jotta sen suurentamisen vaikutuksista saadaan myöhemmin tuloksia. Tätä suhdetta havainnollistaa kuvan musta trendi, jolla nähdään olevan vaikutus pedin lämpötilaan (lila trendi), sillä pedin lämpötila nousee lyhyessä ajassa noin 60 celsiusastetta. Testin pääpaino kohdistui kuvan punaisen trendin käyttäytymisen tutkimiseen, eli tulistimien jälkeisen höyryn lämpötilaan (kahden mittauspisteen keskiarvo). Testin perusteella havaitaan, että kiertokaasun osuuden kasvattaminen nostaa suhteellisen lyhyessä ajassa höyryn lämpötilaa noin 5 °C, kun tarkkaillaan kello 14.20 ja 15.20 välistä ajanjaksoa. Tämän jälkeen kattilan ajotavassa siirryttiin takaisin normaaliajioon, käyrien hieman laahatessa perässä.

Suoritettua testiä pidetään suuntaa antavana, vaikka siinä havaittiin tulistuksen parantuvan. Testin tulistamisen parantaminen mahdollisesti liittyi palamisen vaiheistukseen, missä takavedon tulistimien tulistaminen tehostuu. Testissä kokonaiskaasuvirtaus ei merkittävästi kasva, sillä kuvan vihreä trendi, eli leijutusilman virtaus on pysynyt vakiona läpi testin. Kiertopetikattilan tapauksessa tällöin myös kiintoainekierto pysyy vakiona. Lupaavampia tuloksia voidaan saada aikaan, jos kiertokaasun lisääminen aloitetaan puhaltimen ollessa 0 % säädöllä. Tämän takia menetelmän havainnollistaminen on tarpeen toteuttaa tarkemmin. Seuraavaksi kiertokaasun lisäämisen vaikutuksia pyritään havainnollistamaan kattilavalmistajan avustuksella.

6.3.1 HP3 kattilan matalan kuorman kiertokaasuratkaisu

Kattilavalmistajan avustuksella suoritetaan laskenta, jonka tavoitteena on todentaa edellä kuvattu pohdinta kiertokaasun lisäämisen vaikutuksista matalan kuorman ajossa. Laskenta suoritetaan HP3 kattilan tapauksessa, missä lähtötilanteena hyödynnetään edellä kuvattua referenssitapausta. Kiertokaasun laskennassa alkuperäistä tilannetta verrataan kahteen erillaiseen skenaarioon. Ensimmäisessä tapauksessa kiertokaasua lisätään palamisilman sekaan sekä toisessa vaihtoehdossa kiertokaasu korvaa palamisilman osuutta. Myös tämän laskennan tulokset avataan pelkästään sanallisesti auki.

Tulosten perusteella kiertokaasun lisääminen palamisilman sekaan havaitaan kasvattavan tulistetun höyryn lämpötilaa sekä ennen että jälkeen hiekkatulistimen. Suurempi, mutta kuitenkin hienoinen parannus havaitaan tapahtuvan hiekkatulistimen höyryn lämpötilassa. Puolestaan tilanteessa, jossa kiertokaasu korvaa osan palamisilmasta, höyryn lämpötilan tulistuminen päättyy lähes vastaaviin lämpötiloihin, kuten alkuperäisessä tilanteessa.

Mahdollisesti tulistuksen tehostuminen on liittynyt kokonaiskaasun virtauksen kasvamiseen. Tämän lisäksi tulistamiseen vaikuttaa petimateriaalin lämpötila, minkä havainnollistamiseksi laskennan savukaasun lämpötilan avulla pyritään tulkitsemaan petilämpötilan käyttäytymistä eri tilanteissa. Kun kiertokaasua lisätään, havaitaan savukaasun lämpötilan tulipesän ulostulossa laskevan, alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Kiertokaasun puolestaan korvatessa palamisilmaa, ei vastaavanlaista jäähtymistä havaita, vaan savukaasu poistuu tulipesästä lähes vastaavassa lämpötilassa, kuin alkuperäisessä tilanteessa. Savukaasun jäännöshappipitoisuuden tarkastelussa havaitaan palamisilman korvaamisen tilanteessa pitoisuuden olevan hieman matalammalla tasolla. Sen sijaan sekä alkuperäisessä että kiertokaasun lisäämisen tilanteessa pitoisuudet ovat lähes vastaavia.

Havainnollistavien laskennan ja testiajon perusteella kiertokaasumenetelmän havaittiin vaikuttavan tulistimien tulistamiseen matalan kuorman ajossa. Esitettyjen kuormajoustavuuskeinojen lisäksi työssä on tarkoitus tutkia HP3 kattilalle oman apujäähdyttimen käyttämisen mahdollisuutta matalan kuorman haasteisiin.

6.4 Apujäähdyttimen selvitystyö

Kappaleen aluksi havainnollistetaan Haapaniemen voimalaitoksen apujäähdyttämisen tausta. Kuvattujen parametrien perusteella voidaan mitoittaa apujäähdytin, selvittää vaihtimen kustannukset sekä pohtia sen kannattavuutta.

6.4.1 Apujäähdyttämisen tarve Haapaniemen voimalaitoksella

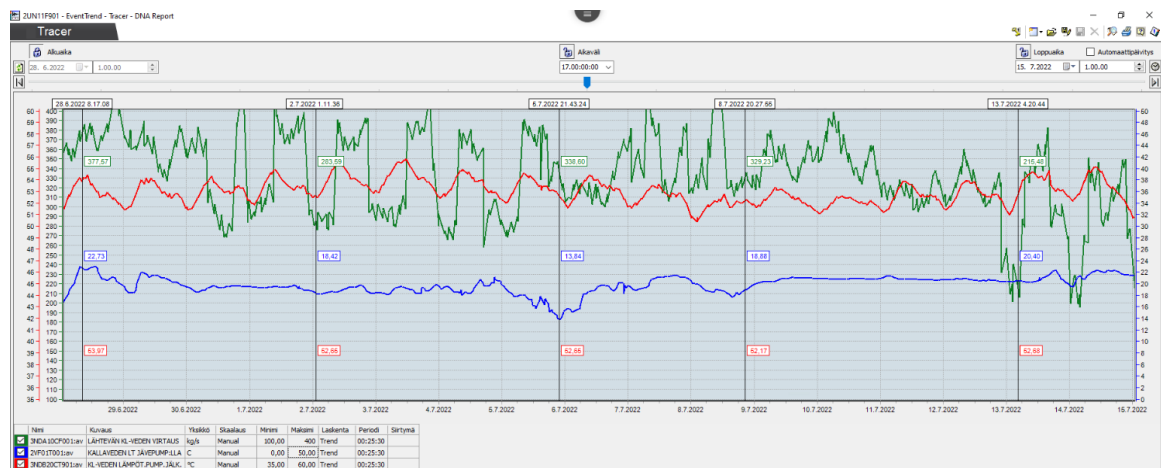
Haapaniemen voimalaitoksella palaavan kaukolämpöveden jäähdytys toteutetaan kaukolämpöputkistossa sijaitsevassa lämmönvaihtimessa LV-4. Kyseinen vaihdin sijaitsee HP2 laitoksen putkistossa, minkä takia voimalaitosyksikköjen kaukolämpövesien samanaikainen jäähdyttäminen ei ole mahdollista. Tämän lisäksi HP2 laitoksen kaukolämmönvaihtimille suoritetaan joka toinen vuosi lakisääteinen painelaitetarkastus, jolloin kyseistä vaihdinta ei voida hyödyntää. Myös mahdolliset laitoksen kaukolämpöpuolen huollot vaativat linjastojen tyhjentämisen, estäen LV-4:n käyttämisen jäähdyttämiseen. Haasteellisena ajankohtana nähdään myös mahdolliset kevään ja alkukesän hellejaksot, sillä silloin kaupungin lämmöntarve on laskenut minimikuorman tasolle, tai jopa sitä alemmaksi, jolloin apujäähdyttämistä tarvitaan. Ajanjaksoon sijoittuu myös aina HP2 laitoksen huoltoseisakki, sillä kattila on käytössä myös kesäkattilana. HP2 kattilan huollon aikaistaminen ei myöskään ole mahdollista, sillä HP3 kattilan lämpöteho ei välttämättä riitä yksin alkukevään lämpökuormalle.

Kyseisenä haasteellisena ajanjaksona joudutaan siten HP3 kattila ottamaan ajoon kaupungin lämmöntarpeen tuottamiseen. Edellisenä vuosina on selvitty ilman merkittäviä haasteita, sillä lämpöä on voitu hetkellisesti varastoida kaukolämpöakkuun. Pidempiaikaiseen hyödyntämiseen se ei kuitenkaan sovellu, sillä lämpimällä säällä sen kapasiteetti on rajallinen ja akun kapasiteetti täyttyy jo muutaman päivän pienestä lataustehosta. Edellä kuvatun tilanteen takia, HP3 kattilalle nähdään tarve oman apujäähdyttimen hyödyntämiseen.

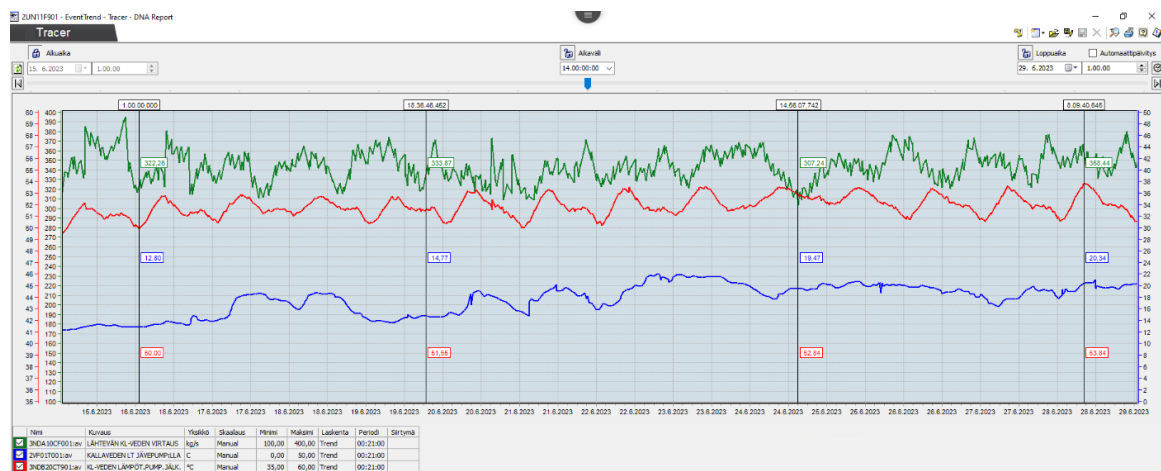
Seuraavaksi käsitellään tilanteita, millaisia parametrejä HP3 laitoksen kaukolämpöpuolella on. Parametrien perusteella voidaan muodostaa apujäähdyttimen laskentatyökalu, selvittää vaadittavat muutostyöt sekä määrittää vaihtimen investoinnin kannattavuus.

6.4.2 Apujäähdyttimen laskentatyökalu

Tarkemmaksi tarkastelun kohteeksi valitaan edellisten kesien minimilämpökuorman ajanjaksot. Laskentatyökalua varten tarkastellaan HP3 laitokselle palaavan kaukolämpöveden virtausta ja sen lämpötilaa sekä jäähdyttämässä käytettävän järviveden lämpötilaa. Parametrejä havainnollistetaan alla olevissa kuvissa (Kuva 24 ja Kuva 25). Talven lämmityskauden parametrit jätetään huomioimatta, sillä silloin tuotantoa voidaan optimoida muilla keinoilla, kuten kaukolämpöakun avulla, eikä jäähdyttämiseen ole yhtä merkittävää tarvetta.



Kuva 24. HP3 laitosesikön tarkasteltavat kaukolämpöparametrit kesällä 2022 (Valmet DNA, 2023).



Kuva 25. HP3 laitosesikön tarkasteltavat kaukolämpöparametrit kesällä 2023 (Valmet DNA, 2023).

HP3 laitokselle palaavan kaukolämpöveden lämpötila on kesäisin tyypillisesti yli 50 celsiusasteista, kuvien punaisen trendin käyttäytymisen perusteella. Hetkellisesti veden lämpötila on lähestynyt 55 °C. Kuvissa kaukolämpövirtausta puolestaan havainnollistaa vihreä trendi, mikä tyypillisesti on kesäisin vaihdellut 300–400 kg/s välillä, ja sen minimivirtaus on laskeutunut lähes 200 kg/s tuntumaan. Laitoksen tarvitsema jäähdytysvesi pumpataan noin kahden metrin syvyydestä. Tällä syvyydellä veden lämpötila lämpenee noin 20 celsiusasteeseen kesäkesäisin, kuten kuvien sininen trendi havainnollistaa. Korkeimmillaan veden lämpötila on lähestynyt 25 °C rajaa.

Parametrien avulla voidaan muodostaa laskentatyökalu, jolla lasketaan lämmönvaihtimen lämpöteho, seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$\begin{aligned}\Phi_{KL} &= q_{m,KL} \cdot c_{p,KL} \cdot (T_{KL,in} - T_{KL,out}) \\ &= \Phi_{J\ddot{A}VE} = q_{m,J\ddot{A}VE} \cdot c_{p,J\ddot{A}VE} \cdot (T_{J\ddot{A}VE,out} - T_{J\ddot{A}VE,in})\end{aligned}\quad (7)$$

missä Φ on lämpöteho [kW], c_p on ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK], T on lämpötila [°C], KL on kaukolämpöpuolen virtaus sekä JÄVE on järvivesipuolen virtaus.

Jos tiedetään sisään virtaavien virtauksien lämpötilat sekä siirtyvä lämpöteho, voidaan vaihtimesta ulos virtaavien virtauksien lämpötilat laskea seuraavien yhtälöiden mukaisesti.

$$T_{KL,out} = T_{KL,in} - \frac{\Phi}{q_{m,KL} \cdot c_{p,KL}} \quad (8)$$

$$T_{J\ddot{A}VE,out} = T_{J\ddot{A}VE,in} + \frac{\Phi}{q_{m,J\ddot{A}VE} \cdot c_{p,J\ddot{A}VE}} \quad (9)$$

Laskentatyökalun lämmönvaihtimen jäähdytystehoksi valitaan 5 MW, mikä voimalaitoksen henkilökunnan mukaan voisi olla sopiva tasainen jäähdytysteho kesän pakkojäähdyttämisen ajankohtaan. Tämän jäähdytystehon avulla lasketaan seuraavaan taulukkoon (Taulukko 3) lämmönvaihtimesta ulos virtaavien virtauksien lämpötilat. Vaihtimen virtauksiksi oletetaan molemmille puolille sama 200 kg/s virtaus, joka edellä havaittiin olevan kaukolämpöpuolen

minimivirtaus. Sisään virtaavien virtauksien lämpötiloiksi valitaan edellä mainitut korkeimmat lämpötilat sekä virtauksien ominaislämpökapasiteettina käytetään veden ominaislämpökapasiteettia 4,18 kJ/kg. Tarvittaessa ominaislämpökapasiteetin arvoksi voidaan interpoloida tarkka lukema taulukkokirjasta.

Taulukko 3. Lämmönvaihtimen laskentatyökalun tulos.

	Kaukolämpöpuoli	Järvivesipuoli
Lämpöteho P_{th} [MW]	5	5
Lämpötila sisään T_{in} [°C]	55	25
Massavirta q_m [kg/s]	200	200
Lämpötila ulos T_{out} [°C]	49	31

Vaihtimelta ulos virtaava kaukolämpövesi jäähtyy sekä järvivesipuolen virtaus lämpenee, yllä olevan laskennan perusteella. Tämä lämpötilanmuutos on molemmissa tapauksissa kuusi celsiusastetta, kun molemmille puolille oletettiin sama massavirta sekä sama lämpöteho. Käytännössä halutut ulostulolämpötilat saadaan virtauksia säätämällä, jolloin lämpöä saadaan siirtymään virtaukseen enemmän tai vähemmän. Esimerkiksi järvivesipuolen virtausta kuristamalla saadaan lisättyä siihen siirtyvää kaukolämpöveden lämpöä, jolloin virtaus poistuu lämpimämpänä. Tilanteessa kaukolämpöveden virtaus luovuttaa enemmän lämpöä, jos sen virtaus pidetään vakiona. Kuitenkin molempia virtauksia täytyy hieman säätää, jotta lämpötila pysyy myös kaukolämmönvaihtimella suotuisessa lämpötilassa. Jos vaihdintyyppinä käytetään vastavirtalevyllämmönsiirrintä, voidaan virtauksien välillä saavuttaa jopa asteen lähestymislämpötila.

Kyseistä laskentaa voidaan tarvittaessa tarkentaa ottamalla huomioon mahdolliset virtaushäviöt, jolloin lämpötilaksi saadaan alkuperäisestä laskennasta poikkeava tulos. Sen laskennassa voidaan hyödyntää lämpötilan massapainotettua laskentaa, jossa jäähdyttimelle ohjataan vain osa palaavasta kaukolämpöveden virtauksesta, osan virratessa suoraan kaukolämmönvaihtimelle.

Seuraavaksi voidaan selvittää kyseisen lämpötehon vaihtimen kustannukset sekä lasketaan sen takaisinmaksuaika.

6.4.3 Apujäähdyttimen kannattavuus sekä takaisinmaksuaika

Apujäähdyttimen takaisinmaksuajan laskennassa oletuksena on, että kyseinen lämmönvaihtimen -investointi päätetään toteuttaa. Projektin kannattavuutta tarkastellaan huomioimalla jäähdyttimen käyttämisestä aiheutuvat lisäkustannukset sekä käytön mahdollistamat lisätulot. Jäähdytin oletetaan olevan osana yhteistuotannon piiriä, jossa se toimii ikään kuin keinotekoisena lämpökuormana. Jäähtyneen kaukolämpöveden myötä, sen käyttö mahdollistaa tuotannon sähkötehon kasvattamisen.

Lämmönvaihtimen kiinteä kustannus muodostuu itse vaihtimen kustannuksesta, mikä perustuu laitevalmistajan arvioon. Kiinteään kustannukseen huomioidaan myös muut asennustyöt, kuten putkisto- ja automaatiotyöt sekä mahdolliset vuosittaiset huoltotyöt. Näiden kustannusarvio saadaan voimalaitoksen henkilökunnalta. Muuttuvat kustannukset muodostuvat lisääntyneestä polttoaineenkulutuksesta vaihtimen käytön myötä. Polttoaineen yksikköhinta on henkilökunnan sen hetkinen arvio. Kasvaneella tuotantoteholla tuotettu sähkö oletetaan laskennassa myytävän verkkoon. Laskennassa ei huomioida laitoksen muun tuotannon kuluja tai tuloja, kuten lämmön myyntiä asiakkaille. Seuraavaan taulukkoon (Taulukko 4) taulukoidaan edellä mainittuja arvoja.

Taulukko 4. Apujäähdyttimen arvot kesän yhteistuotannossa.

Lämpöteho P_{th} [MW]	5
Laitoksen kesän rakennusaste σ [-]	0,42
Sähköteho P_{el} [MW]	2,1
Yhteistuotannon hyötysuhde η_{CHP} [-]	0,85
Polttoaineteho P_{pa} [MW]	8,4

Kesän minimilämpökuormalla jäähdytintä käytetään tasaisella 5 MW:n jäähdytysteholla, kuten edellä todettiin. Jäähdytystehosta saadaan karkeasti muodostettua jäähdytyksen mahdollistava sähkötehon tuotannon kasvattaminen sekä polttoaineteho, kun huomioidaan kesän ajan rakennusaste sekä yhteistuotannon hyötysuhde. Näiden laskentayhtälöt esitettiin kappaleessa 3 . Kun laskentaan huomioidaan jäähdyttimen käyttöaika, saadaan edellä lasketut

tehot muutettua energiayksiköihin sekä muodostettua seuraavanlainen kustannusten ja tulojen muodostama taulukko (Taulukko 5).

Taulukko 5. Jäähdyttimen käytön kustannukset ja tulot.

Investointi I [€]	70 000
Käyttöaika t [h]	24
Jäähdytysenergia Q_{th} [MWh]	120
Sähköenergia Q_{el} [MWh]	50,4
Sähkön myyntihinta h_{el} [€/MWh]	300
Sähkön myyntitulot S_{el} [€]	15 120
Polttoaineen kulutus Q_{pa} [MWh]	200,5
Polttoaineen hinta h_{pa} [€/MWh]	40
Polttoainekustannus k_{pa} [€]	8018,8
Huoltokustannus k_h [€]	700
Vuosittaiset kustannukset k_{tot} [€]	8718,8
Vuosittainen nettotulo S_{net} [€]	6401,2

Laskennassa käytetty jäähdyttimen käyttöaika on henkilökunnan arvio kesän aikana tarvittavasta apujäähdyttämisestä, joka voidaan olettaa vastaavan koko vuoden keskiarvoa. Tuotettu sähkö oletetaan myytävän säätösähkömarkkinoille, missä tyypillisesti on korkeampi hintataso kuin vuorokausisähkömarkkinoilla. Kesäkäytössä HP3 kattila toimii täysin biopolttoainepohjaisesti, jolloin polttoainekustannukset muodostuvat laskennan ajankohdan biopolttoaineen hinnasta. Vuosittaiset nettotuotot muodostetaan tällöin sähkön myyntitulojen sekä muuttuvien kustannusten ja huoltokustannusten erotuksesta, minkä tulokseksi saadaan positiivinen vuosittainen rahavirta.

Projektin kannattavuutta täytyy myös muilla keinoin perustella. Menetelmäksi voidaan valita esimerkiksi nettonykyarvon menetelmä (NPV, Net Present Value), jossa tulevat rahavirrat diskontataan valitulla tuottovaatimuksella, mistä vähennetään vaihtimen alkuinvestointi. Menetelmä määritetään seuraavassa yhtälössä.

$$NPV = a_{n,i} \cdot S_{net} - I \quad (10)$$

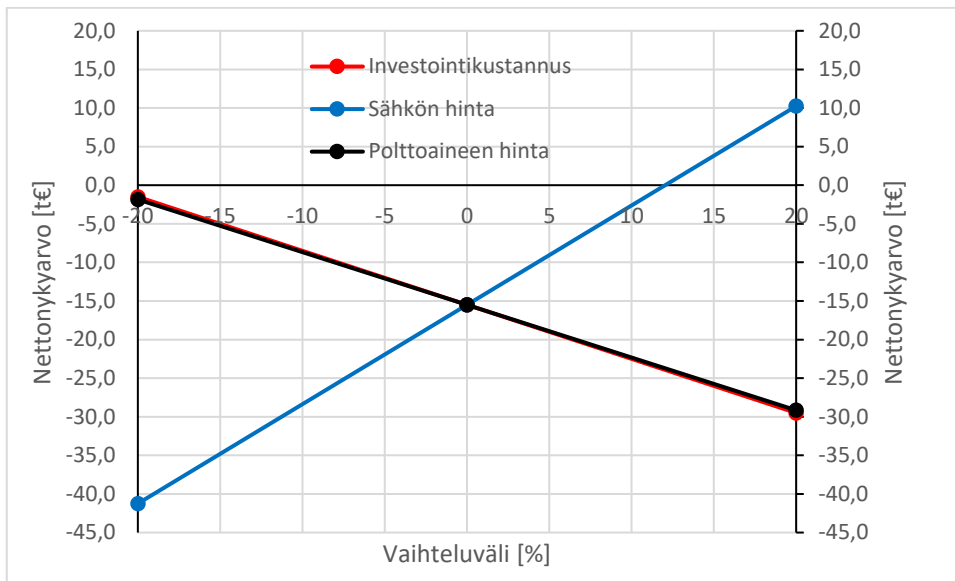
Missä NPV on nettonykyarvo [€], S_{net} on vuosittainen nettotulo [€], I on investointi [€] sekä $a_{n,i}$ on nykyarvotekijä [-], joka määritetään seuraavanlaisesti.

$$a_{n,i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (11)$$

Missä i on tuottovaatimus [%] ja n on investoinnin taloudellinen pitoaika [a].

Edellisiin yhtälöihin taloudelliseksi pitoajaksi valitaan 20 vuotta, sillä esimerkiksi HP3 kat-tilan taloudellinen pitoaika on 40 vuotta, eli laitos on käytössä ainakin vuoteen 2050 asti. Tuottovaatimus energiaprojekteissa vaihtelee 3–10 % välillä (Energy education), mistä laskentaan valitaan 10 %. Nykyarvotekijäksi saadaan tällöin 8,514. Kun nykyarvotekijä sijoitetaan NPV:n yhtälöön, saadaan näillä lähtötiedoilla vastaukseksi -15 500 euroa.

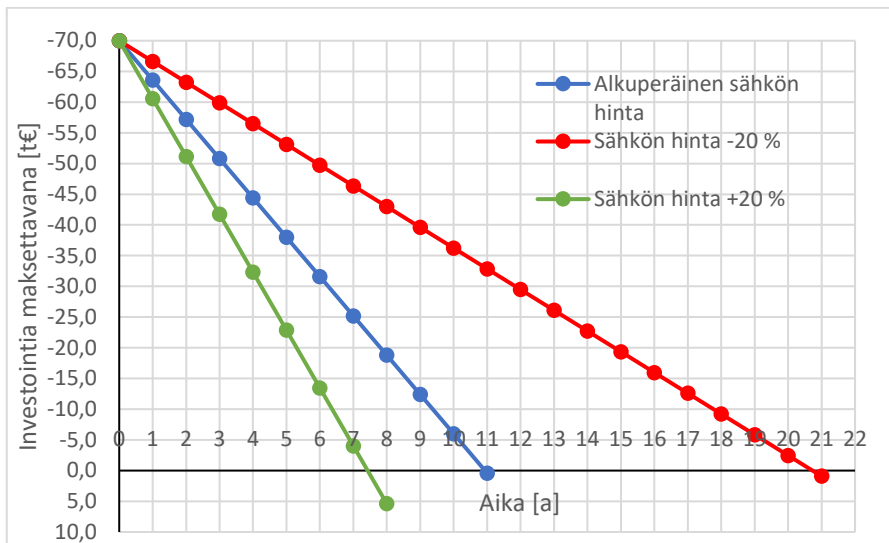
Kun nettonykyarvo on negatiiviinen, ei lähtötiedoilla laskettuna investointi ole kannattava toteutettavaksi. Tällöin käytettyjä arvoja täytyy muuttaa, jos investoinnista halutaan muodostuvan kannattava. Investoinnin kannattavuutta voidaan esimerkiksi tarkastella herkkyyssanalyysin avulla, jossa käytettyjä lähtötietoja muutetaan sekä tarkastellaan niiden vaikutuksia kannattavuuteen. Tässä tarkasteltaviksi muuttujiksi valitaan investointikustannus, sähkön hinta sekä polttoaineen hinta. Muuttujien vaihteluvälinä käytetään ± 20 % alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna, ja tilanteita havainnollistetaan alla olevassa kuvaajassa (Kuva 26).



Kuva 26. Investoinnin nettonykyarvo vaihteluvälin funktiona.

Alkuperäinen lähtötilanne on kuvattuna suoraan vaihteluvälin nolla-arvopisteen alapuolella. Herkkyysanalyysikuvaajan perusteella ainoastaan sähkön hinnan positiivinen muutos tekee investoinnista kannattavan. Noin 12 % nousu myytävän sähkön hinnassa kasvattaa saatavia tuloja sen verran, että investoinnin nettonykyarvo ylittää positiivisen rajan, jolloin investointi muodostuu kannattavaksi toteuttaa. Sähkön myyntihinnan laskulla havaitaan myös olevan suurin negatiivisin vaikutus kannattavuuteen. Investoinnin sekä polttoaineen hinnan muutokset sen sijaan vaikuttavat kulkevan rinnakkain, kuitenkin molempien nettonykyarvojen pysyessä vaihteluvälialueella negatiivisena.

Investoinnin korottoman takaisinmaksuajan laskennassa, alkuinvestointi jaetaan vuosittaisella nettorahavirralla yhtä suuriksi tasaeriksi. Takaisinmaksuajan kestoa vertaillaan edellisen kuvaajan eri sähkön hinnoilla, sillä sen havaittiin vaikuttavan kannattavuuteen merkittävästi. Tilanteet on kuvattu alla olevaan kuvaajaan (Kuva 27).



Kuva 27. Investoinnin koroton takaisinmaksuaika eri sähkön hinnoilla vertailtuna.

Alkuperäisessä tilanteessa investointi on oletettavasti kuoletettu, eli jäädytin on maksanut itsensä takaisin 11 vuoden kuluttua, aloitushetkestä laskettuna. Yllä olevan kuvaajan perusteella takaisinmaksuaika lyhenee noin 3,5 vuodella, jos vuosittaiset nettotulot suurenevät, eli sähköä myydään korkeammalla hinnalla. Luonnollisesti takaisinmaksuaika pitenee, kun nettotulot vähenevät, eli myytävän sähkön hinta laskee. Tällöin takaisinmaksuaika on jopa 10 vuotta pidempi, kuin alkuperäisessä tilanteessa.

7 Tulosten johtopäätökset

Työssä tutkittiin menetelmiä, joilla HP3 voimalaitosyksikön matalan kuorman joustavuutta voidaan mahdollisesti laajentaa. Pääpaino kohdistettiin tuorehöyryn lämpötilan parantamiseen, sillä petilämpötiloissa todetaan olevan laskemisen varaa sekä NO_x-päästöjen muodostuminen tullaan saamaan hallintaan uuden päästöjen vähentämismenetelmän myötä. Menetelmiksi valikoitui kiertopetikattilan osapetiratkaisun sekä kiertokaasun lisäämisen havainnollistamiset. Menetelmien lisäksi työssä mitoitettiin HP3 laitosesyksikölle apujäähdytin minimilämpökuorman haasteisiin sekä selvitettiin vaihtimen kustannukset ja takaisinmaksuaika.

Osapetiratkaisun havainnollistamisen tavoitteena oli tutkia, millaisia muutostoimenpiteitä ratkaisu vaatii sekä, kuinka sen käyttöön ottaminen matalan kuorman ajossa vaikuttaa tuorehöyryn lämpötilaan. Muutoksen havainnollistamisessa hyödynnettiin erään kattilalaitoksen osapetiratkaisun tuloksia sekä kattilavalmistajan avustuksella suoritettua laskentaa HP3 kattilan tapauksessa.

Tulosten perusteella menetelmän todetaan mahdollistavan kuumemman petilämpötilan saavuttamisen kiertopetikattilan tapauksessa. Tämän myötä kattilan minimikuormatasossa on mahdollista päästä alemmaksi, jos pedin lämpötila on ollut sen esteenä. Menetelmässä höyryn lämpötilan kuitenkin todetaan laskevan. Tämän perusteella ei osapetiratkaisun avulla HP3 kattilan kuormajoustavuuteen saada toivottua hiekkatulistimen tulistamisen tehostamista. Tämän takia osapetiratkaisun hyödyntäminen muodostuu haasteelliseksi HP3 kattilan matalan kuorman joustokeinona. Suurimpana rajoittavana tekijänä on turbiinin tuotanto, sillä kyseisen kattilan turbiinin höyryn lämpötilan alaraja rajoittaa kuormatason laskemista. Sen sijaan reduktioajossa ratkaisun avulla voidaan saavuttaa lupaavampia tuloksia. Nykyisin kattilan reduktioajossa saavutetaan turbiinin tuotantoa matalampi kuorma, mitä referenssiin peilaten voidaan entisestään laskea. Tällä saavutettavat hyödyt liittyvät siten vähentyneeseen polttoaineen kulutukseen kesän minimilämpökuormalla.

Menetelmän voidaan kuitenkin yleisesti todeta olevan lupaava kuormajoustavuuskeino kiertopetikattilalle, jos sen turbiini sallii matalalämpöisen höyryn hyödyntämisen. Tämän myötä on mahdollista saavuttaa matalampi minimikuormapiste myös turbiinin tuotannossa, kuten

referenssi kattilan tapauksessa. Menetelmä mahdollistaa yhteistuotantolaitoksen sähköntuotantoon täten enemmän joustavuutta minimikuorman tuotannossa, ilman aikaisempia matalan kuorman haasteita. Ennen investointipäätöstä on kuitenkin todennettava luotettavasti kattilan kiintoainekierron jatkuminen hiekkatulistimelle sekä huomioida petilämpötilan muutokset. Kyseisiä tuloksia tässä työssä suuntaa antavasti sivuttiin, joiden pohjalta voidaan todeta, että jatkotutkimuksia ei todennäköisesti tarvita. Tähän vaikuttaa HP3 kattilalaitoksen matalan kuorman höyryongelma, mihin menetelmällä ei todennäköisesti voida vaikuttaa.

Kiertokaasun lisäämisen menetelmässä tavoiteltiin myös sen vaikutusten havainnollistamista höyryn lämpötilaan sekä muihin tekijöihin matalan kuorman ajossa. Mahdollisia menetelmän vaikutuksia pohdittiin teoreettisesti, jonka tukena käytettiin HP2 kattilalla suoritettua testiajoa. Myös kattilavalmistajan avustuksella laskettiin HP3 kattilan tapaus. Suuntaa antavassa laskennassa alkuperäistä tilannetta verrattiin tilanteisiin, joissa palamisilman joukkoon lisättiin kiertokaasua sekä kiertokaasulla korvattiin palamisilman osuutta.

Testiajon perusteella todetaan, että kiertokaasulla voidaan vaikuttaa pedin lämpötilaan sekä laskevasti että nousevasti. Kiertokaasun osuuden lisäämisellä havaitaan olevan tehostava vaikutus tulistimien tulistamisessa, kuitenkin testin perusteella hienoisesti. Siinä tulistuksen tehostuminen mahdollisesti liittyy palamisen vaiheistuksen siirtymiseen tulipesän ylempiin osiin, jossa kyseisen HP2 kattilan tulistinlämpöpinnat sijaitsevat. Tämän myötä ei voida varmuudella todeta, että vastaavanlaisia tuloksia saadaan myös HP3 kattilalla, sillä testissä ei kokonaiskaasuvirtaus kasvanut.

HP3 kattilan kiertokaasulaskennan perusteella todetaan myös, että kiertokaasun lisääminen palamisilman joukkoon tehostaa tulistimien tulistamista. Sen voidaan todeta olevan seurausta kokonaiskaasuvirran kasvamisesta, minkä myötä tulistimien lämmönsiirto tehostuu. Tilanteessa voidaan myös todeta kiintoainekierron hienoisesti suurentuvan. Tämän selittää hiekkatulistimen tulistuksen tehostuminen. Sen sijaan kiertokaasun korvataessa palamisilmaa, vastaavanlaista parannusta ei havaita. Tämä tulos puolestaan liittyy siihen, että kokonaiskaasuvirtaus ei kyseisessä tilanteessa suurene. Tällöin hiekkatulistimelle kiertävän materiaalin määrä ei myöskään lisäänty.

Menetelmät kiertokaasun lisäämisen vaikutuksista ovat kuitenkin suuntaa antavia. Kiertokaasutesti suoritettiin eri kattilatekniikkaa omaavassa kattilassa eikä kiertokaasulaskennassa muun muassa petilämpötilan käyttäytymistä otettu tarkasti huomioon. Laskennassa

hyödynnettiin myös vain tiettyä matalan kuorman pistettä, jolloin saatujen tulosten avulla ei voida varmuudella arvioida, kuinka matalan kuormatason kiertokaasun lisääminen mahdollistaa. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että menetelmä on mahdollinen joustokeino matalan kuorman tulistamisen tehostamisessa. Menetelmän avulla voidaan kiintoainekiertoa kasvattaa, jos se ei ole mahdollista toteuttaa palamisilman kasvattamisella. Kiertokaasuvirtauksen kasvattaminen kuitenkin laskee pedin lämpötilaa, jolloin sen käyttäminen on enemmän perusteltua kuivan polttoaineen tapauksessa. Tällöin matalan kuorman ajossa kiertokaasun lisääminen ei äkillisesti romahduta petilämpötilaa. Tässä tilanteessa voidaan paremmalla todennäköisyydellä olettaa saavutettavan matalampi kuormataso, jos esimerkiksi höyryn lämpötilan lasku on ollut sen esteenä. Menetelmän käyttöä voidaan myös perustella NO_x -päästöjen vähentämisen keinona, sillä sen todetaan laskevan pedin jäännöshappipitoisuutta.

Suuntaa antavien tulosten perusteella todetaan, että kiertokaasun lisääminen voi jatkossa mahdollistaa HP3 kattilan kuormajoustavuutta. Kiertokaasun lisäämistä ei pedin lämpötila nykyisin merkittävästi rajoita, jolloin menetelmällä on mahdollistaa tehostaa hiekkatulistimen tulistamista. Kuitenkin äkillinen muutos polttoaineen kosteudessa voi romahduttaa petilämpötilan ja täten hiekkatulistimen tulistamisen. Tämän myötä sen käytössä täytyy olla tietoinen polttoaineen sen hetkisestä kosteudesta, jotta menetelmän avulla voidaan saavuttaa hyötyjä. Tulosten pohjalta ei voida myöskään arvioida, kuinka matalaan minimikuormapisteeseen menetelmän avulla päästään. Tämän takia kiintoainekierron sekä petilämpötilan muutokset tulee jatkotutkimuksissa tarkasti mallintaa. Investointipäätöstä varten tulee myös selvittää kiertokaasupuhaltimen asennustyön kustannukset sekä arvioida laitteen omakäytösähköteho.

Kuormajoustavuusmenetelmien lisäksi työssä mitoitettiin HP3 kattilalle apujäähdytin matalan kuorman haasteisiin. Kyseinen selvitystyö todettiin olevan tarpeellinen voimalaitoksen haasteellisen putkiston takia sekä tulevan HP2 kattilan muutustyön varalta.

Vaihtimen kannattavuuden tarkastelussa sen ei kuitenkaan havaita sähköntuotannon lisäämisen kannalta olevan kannattava investointi. Eniten vaihtimen kannattavuuteen vaikuttaa sähköön myyntihinta, jonka hinnan arvioimiseen liittyy paljon epävarmuuksia, lisääntyneen sääriippuvaisen tuotannon takia. Hinnan muutoksen tarkastelun perusteella voidaan todeta, että investointi jossain tapauksessa muodostuu kannattavaksi. Tämän myötä myös vaihtimen laskettu takaisinmaksuaika lyhenee huomattavasti. Laskennassa myös käytettiin arvioituja

lähtötietoja, missä esimerkiksi vaihtimen käyttöaika voi poiketa huomattavasti enemmän lähtötilanteesta. Laskennassa ei myöskään vertailtu suuremman vaihtimen tapaukseen. Sen hyödyntämisen voidaan todeta mahdollistavan sähköntuotannon kasvattamisen, minkä myötä tulot ovat suuremmat. Toisaalta kesäkäytössä se ei todennäköisesti lisää merkittävästi sähköntuotantoa, jolloin mitoitettu vaihdin on kannattavampi toteuttaa kyseisen ajankohdan perusteella.

Vaihtimen selvitystyön voidaan kuitenkin todeta olleen tarpeellinen, vaikka investointi ei osoittautu kannattavaksi. Tähän vaikuttaa tuleva HP2 laitosesäilytyksen tulistin- ja tulipesämuutos, minkä myötä ei vielä tiedetä, kuinka matalaan kuormaan kattilalla jatkossa on mahdollista päästä. Kesäkattilana käytettävän HP2 kattilan sijaan kesän lämmön tuottaminen voi jatkossa olla järkevää tuottaa jollakin muulla tekniikalla, kuten HP3 kattilan avulla. Kyseisen kattilan tekniikka vaatii kesän minimilämmöntuotannossa palaavan kaukolämpöveden jäähdyttämistä, millä varmistetaan kattilan pysyminen sen toimintapisteen sisäpuolella. Toimintapisteen alapuolella kattilassa tuotetun höyryn lämpötila alkaa ensiksi viilenemään, jolloin sen hyödyntäminen turbiinissa tulee haasteelliseksi. Tämän jälkeen uhkana on kattilan alasaajo, jolloin joudutaan käynnistämään öljytukipolttimia, jotta kattila pysyy toiminnassa. Tähän mitoitetun vaihtimen todetaan olevan riittävä, jotta sähköntuotanto ei merkittävästi häiriinny sekä vältytään kalliilta turbiinin siivistön lisähuoltotöiltä sekä öljyn käytöltä kattilan tukipoltossa. Tämän myötä investointi muodostuu kannattavaksi toteuttaa, mikäli HP2 kattilamuutos johtaa siihen, että joudutaan operoimaan tulevaisuudessa kesäisin pitkiä jaksoja HP3 laitoksella.

8 Yhteenveto

Työssä tutkittiin kuormajoustavuuden mahdollistavia menetelmiä tutkimuksen kohteena olevan voimalaitosyksikön hyödynnettäväksi. Työn aluksi johdateltiin aiheeseen, perusteltiin aiheen tärkeyttä kirjallisuusosion perusteella sekä havainnollistettiin, mitä tutkittavien menetelmien avulla voidaan saavuttaa.

Suurimmaksi tekijäksi mainittiin sähkömarkkinan hinnanvaihtelu, mihin kyseisellä kattilatekniikalla on haasteellista vastata. Eniten kattilan säätökykyyn vaikuttaa matalan kuorman haasteet, mitkä HP3 kattilan tekniikassa liittyivät NO_x-päästöjen kasvamiseen, petilämpötilan laskemiseen sekä tuorehöyryn lämpötilan pitämiseen materiaaleille suotuisessa lämpötilassa. Petilämpötiloissa todettiin olevan laskemisen varaa sekä NO_x-päästöjen muodostuminen saadaan hallintaan rakenteilla olevan päästöjen vähentämiskeinon myötä. Tällöin työssä keskityttiin ainoastaan keinoihin, joilla tuorehöyryn lämpötilaa voidaan tehostaa matalan kuorman ajossa. Työssä lisäksi selvitettiin matalan kuorman haasteissa tarvittavan apujäähdyttimen kustannuksia, tarkasteltiin sen kannattavuutta sekä laskettiin sille takaisinmaksuaika.

Ensimmäiseksi kuormajoustavuuden mahdollistavaksi menetelmäksi valikoitui kiertopetikatilan osapetiratkaistu. Menetelmän havainnollistamisessa hyödynnettiin erään kattilalaitoksen osapetiratkaistua referenssitapauksena. Kyseisen kattilan matalan kuorman haasteet liittyivät petilämpötilojen hallintaan, johon ratkaisun toivottiin tuovan apua. Koeajojen perusteella petilämpötilat saatiin nostettua menetelmän avulla korkeammalle tasolle, sillä kattilaa operoidaan tällöin kuin kuplapetikattilaa. Ratkaisun avulla myös kattilan painetaso sekä tuorehöyryn lämpötila voitiin laskea alemmalle tasolle. Kuumempi peti mahdollisti myös tavoitellun matalamman minimikuormapisteen saavuttamisen. Havainnollistamisessa ei kuitenkaan höyryn lämpötilan havaittu nousevan. Tämän myötä höyryn lämpötilan käyttäytymistä tarkasteltiin kattilavalmistajan avustuksella HP3 kattilan tapauksessa.

Osapetiratkaistun laskennan tuloksia verrattiin nykyiseen HP3 kattilan matalan kuorman ajon tilanteeseen. Tulosten perusteella höyryn tulistaminen hiekkatulistimella havaittiin osapetiratkaistussa hiipuvan, kun verrattiin nykyiseen matalan kuorman ajoon, vaikka osapetiratkaistussa oletettu pedin lämpötila saavutti korkeamman lämpötilan. Tuloksista havaittiin, että

siihen on voinut vaikuttaa pedin jäännöshappipitoisuus, joka osapetiratkaisussa oli matalammalla tasolla. Tämän keinon lisäksi, matalan kuorman ajoon tutkittiin kiertokaasun lisäämistä.

Teoriassa kiertokaasun lisäämisen todettiin lisäävän kokonaiskaasun virtausta, mikä mahdollisesti tehostaa matalan kuorman ajon tulistamista. Pohdinnan tukena havainnollistettiin kiertokaasun lisäämisen vaikutuksia voimalaitoksen toisessa kattilayksikössä, eli testiajo suoritettiin HP2 kattilalla. Lyhyen testiajon perusteella höyryn lämpötilaa saatiin kasvatettua. Syy tähän vaikutti olevan palamisen vaiheistus tulipesässä ylemmäksi. Kokonaiskaasuvirtaus ei testissä kuitenkaan lisääntynyt, sillä leijutusilman määrä pysyi testin aikana lähes vakiona. Tulosten perusteella menetelmän jatkotutkiminen oli tarpeen jatkaa kattilavalmistajan avustuksella suoritettavaan laskentaan HP3 kattilan tapauksessa.

Kiertokaasun lisäämisen laskennassa vertailtiin kahta erilaista tilannetta alkuperäiseen matalan kuorman ajotilanteeseen. Tilanteissa kiertokaasua lisättiin palamisilman joukkoon sekä kiertokaasulla korvattiin palamisilman osuutta. Tulosten perusteella kiertokaasun lisäämisen havaittiin vaikuttaneen tehokkaimmin tulistuslämpötiloihin. Palamisilman korvaamisella ei sen sijaan tulistamisen parantavaa vaikutusta havaittu.

Laskennan avulla pyrittiin myös havainnollistamaan petilämpötilan käyttäytymistä savukaasun lämpötilan avulla. Kiertokaasun lisäämisen havaittiin jähdyttävän savukaasun lämpötilaa, kun taas kiertokaasun korvaamisen tilanteessa lämpötila oli lähes vastaava, kuin alkuperäisessä tilanteessa.

Työn tehtäväosuuden viimeisessä vaiheessa suoritettiin selvitystyö HP3 laitoksen oman apujähdyttimen käyttömahdollisuudesta sekä selvitettiin sen kustannukset ja laskettiin sille takaisinmaksuaika. Apujähdyttimen mitoittamista perusteltiin kuvatulla tilanteella, miksi kyseistä vaihdinta tarvitaan. Apujähdyttämisen tarve kuvattiin tulevan vastaan kesän minimilämpökuormalla, kun laitoksen tuottamaa lämpöä ei saada mahtumaan verkkoon eikä akkuun. Tällöin palaavaa kaukolämpövertä on jähdytettävä, jotta laitos pidetään sen toimintapisteen sisäpuolella. Haasteita nähtiin asettavan myös Haapaniemen voimalaitoksen kaukolämpöputkiston ongelmallinen rakenne, sillä HP2 laitoksen kaukolämpölinjaston laitteiden huoltojen ja tarkastusten aikana ei voida hyödyntää kyseisen laitoksen olemassa olevaa apujähdytintä.

Selvityksessä määritettiin laskentatyökalu, jonka avulla voitiin laskea vaihtimessa tapahtuva kaukolämpöveden jäähtymä tietyllä lämpöteholla. Valitun lämpötehon sekä virtaamien avulla vaihtimen kustannukset selvitettiin sekä laitevalmistajan että voimalaitoksen henkilökunnan arvioiden mukaisesti. Kiinteästä kustannuksesta muodostettiin alkuinvestointi, minkä kannattavuutta tarkasteltiin. Jäähdyttimen käytön tilannetta havainnollistettiin muuttuvien kustannusten sekä tulovirtojen kannalta. Tilanne oletettiin sijoittuvan kesän minimilämpökuormalle, jossa vaihdin toimii keinotekoisena lämpökuormana. Osana yhteistuotannon piiriä vaihtimen käyttö kasvattaa polttoainekustannuksia, mutta mahdollistaa laitoksen suuremman sähkötehotuotannon.

Polttoaineen ja sähkön yksikköhinnoista sekä vaihtimen käyttöajasta pyydettiin henkilökunnalta arviot, joiden avulla saatiin laskettua vaihtimen polttoainekustannukset sekä sähkön myyntitulot. Näiden erotuksesta muodostui vuosittainen nettotulo, joka laskennassa oli positiivinen. Projektin kannattavuutta tarkasteltiin tämän lisäksi menetelmällä, jossa edellisen tuloksen, valitun tuottovaatimuksen ja pitoajan perusteella määritettiin investoinnin tulevien rahavirtojen nettonykyarvo. Sen arvoksi saatiin laskennassa negatiivinen lukema, joka viittasi siihen, että investointi ei olisi kannattavaa toteuttaa käytetyillä lähtötiedoilla.

Projektin nettonykyarvon vaihtelua tarkasteltiin herkkyyksianalyysin avulla, jossa laskennassa käytettyjen muuttujien arvoja muutettiin. Analyysin tuloksen perusteella huomattiin, että sähkön hinnan muutoksella oli merkittävin vaikutus investoinnin kannattavuuteen, tehden siitä jossain tapauksessa kannattavan. Projektille laskettiin myös koroton takaisinmaksuaika eri sähkön myyntihinnoilla vertailtuna. Sen perusteella investointi tulisi maksamaan itsensä takaisin aikaisintaan alle kahdeksassa vuodessa, kun tarkastelun kohteena oli korkein saatavien sähkön myyntihinta. Pisimmillään takaisinmaksuaika venyisi yli 20 vuoteen, jos sähkön myynnistä saisi vähiten korvausta.

Työn käsittely lopetettiin tulosten pohjalta tehtäviin johtopäätöksiin. Osapetiratkaisun tuloksista todettiin, ettei sillä havaittu saatavan toivotunlaisia tuloksia höyryn lämpötilan suhteen. Lupaavampia tuloksia kyseiselle kattilalle saataisiin reduktioajossa, jossa höyryn laadun suhteen ei ole yhtä paljon rajoitteita. Menetelmän kuitenkin todettiin yleisellä tasolla mahdollistavan matalamman minimikuormatason saavuttamisen, minkä myötä se voi olla hyödyllinen kuormajoustavuuskeino kiertopetikattilalle. Suuremmat hyödyt saavutettaisiin, jos kattilan turbiini sallii matalassa lämpötilassa olevan höyryn hyödyntämisen, kuten referenssi kattilan tapauksessa.

Suuntaa antavan kiertokaasun lisäämisen tarkastelussa menetelmän todettiin hienoisesti parantavan tulistuslämpötilaa sekä HP2 että HP3 kattilassa. Menetelmän mahdollista hyödyntämistä perusteltiin kuivan polttoaineen tapauksessa, mutta saavutettavien hyötyjen arvioimiseen liittyi paljon epävarmuuksia.

Sähköntuotannon lisäämisen keinona apujäähdytin -investointi ei todettu muodostuvan kannattavaksi. Selvityksen kuitenkin todettiin olleen tärkeä tulevan HP2 kattilan muutostyön myötä, sillä jatkossa HP3 kattilaa mahdollisesti käytettäisiin myös kesäkattilana. HP3 laitoksen oman apujäähdyttimen hyödyntämisellä tällöin vältettäisiin minimilämpökuorman tuomia haasteita, jolloin vaihtimen hankinta voikin muodostua kannattavaksi.

Lähteet

Alfa Laval. How does a plate heat exchanger work. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.7.2023]. Saatavissa:

<https://www.alfalaval.my/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/>

Arabelle nuclear steam turbine. GE Steam Power. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.8.2023]. Saatavissa:

<https://www.ge.com/steam-power/products/steam-turbines/nuclear-arabelle>

Basu, P. 2015. Circulating fluidized bed boilers: Design, operation and maintenance. [Online]. Cham: Springer International Publishing

Bergman, T. L. et al. 2017. Incropera's principles of heat and mass transfer. Global edition. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

Breeze, P. A. 2019. Power generation technologies. Third edition. Oxford, United Kingdom; Newnes.

Cabeza, L. F. 2020. Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications. 2nd edition. [Online]. San Diego: Elsevier Science & Technology.

Energy Education. Discounting. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.10.2023]. Saatavissa: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Discounting#cite_note-7

Fingrid 2023a. Sähkön hinta heilahtelee – näin sähkön hinta määräytyy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.11.2023]. Saatavissa:

<https://www.fingridlehti.fi/sahkon-hinta-heilahtelee-nain-sahkon-hinta-maaraytyy/>

Fingrid 2023b. Sähköjärjestelmän tila. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.8.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/>

Frangopoulos, C. A. 2017. Cogeneration: Technologies, optimization and implementation: Technologies, optimization and implementation. 1st edition. Vol. 87. [Online]. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology.

- Guelpa, E. & Verda, V. 2019. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied energy*. [Online] 252113474–.
- Hurskainen, M. & Vainikka, P. 2016. ‘7 - Technology options for large-scale solid-fuel combustion’, in *Fuel Flexible Energy Generation*. [Online]. Elsevier Ltd. s. 177–199.
- Kallio et al. 2017. Analysis of the processes in fluidized bed boiler furnaces during load changes. *Energy Procedia*. Vol. 120. s. 580-587.
- Kaikko, J. 2022. *Power Plant Design - Utilization and control of power plants*. Luentomateriaali. LUT.
- Kaikko, J. & Saari, J. 2021. *Voimalaitosopin perusteet - Sähkön ja lämmön yhteistuotanto höyryvoimalaitoksissa*. Luentomateriaali. LUT.
- Kattilavalmistaja. 2023. *CFB kattilan osapetiratkaisun esitysmateriaali*. Henkilökohtainen tiedonanto.
- Kuopion Energia. 2023a. *Vuosikertomus 2022*. [Verkkoaineisto]. Saatavissa pdf-muodossa: https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2023/04/ke_vuosikertomus_2022_web.pdf
- Kuopion Energia. 2023b. *Konsernin kotisivut*. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.6.2023]. Saatavissa: <https://www.kuopionenergia.fi/>
- Kuopion Energia. 2023c. *Energiantuotannon yleisesittely*. Sisäinen materiaali.
- Metso Power Oy, nykyisin Valmet Oyj. 2011a. *HYBEX kattilan toimintakuvaus*. Kattilan käyttö- ja huolto-ohjeet. Sisäinen materiaali.
- Metso Power Oy, nykyisin Valmet Oyj. 2011b. *CFB kattilan toimintaperiaatteet*. Sisäinen materiaali.
- Perez, R. X. & Lawhon, D. W. 2016. *Operator’s Guide to General Purpose Steam Turbines: An Overview of Operating Principles, Construction, Best Practices, and Troubleshooting*. 1st edition. [Online]. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated.

Salman, C. A. et al. 2021. Improve the flexibility provided by combined heat and power plants (CHPs) – a review of potential technologies. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. [Online] 1.

Serth, R. W. & Lestina, T. 2014. Process Heat Transfer - Principles, Applications and Rules of Thumb. 2nd Edition. San Diego: Elsevier.

Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association. 8th ed. Tarrytown, NY: Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA). Saatavissa pdf-muodossa:

[http://www.webaero.net/ingenieria/equipos/Estaticos/Intercambiadores%20de%20calor/Normativa_Codigo/TEMA/1999_TEMA%20\(8th%201999\)%20Standards%20Of%20The%20Tubular%20Exchanger.pdf](http://www.webaero.net/ingenieria/equipos/Estaticos/Intercambiadores%20de%20calor/Normativa_Codigo/TEMA/1999_TEMA%20(8th%201999)%20Standards%20Of%20The%20Tubular%20Exchanger.pdf)

Swapn Basu, A. K. D. 2014. Power Plant Instrumentation and Control Handbook: A Guide to Thermal Power Plants. 1st edition. [Online]. San Diego: Elsevier Science.

Tanuma, T. 2017. Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants. Cambridge: Elsevier Science.

The European Educational Tool on Cogeneration (EDUCOGEN). 2001. Second edition.

Tuotantomestari. 2023. Referenssi kattilan materiaali. Henkilökohtainen tiedonanto.

Räisänen, S. 2023. Haapaniemen voimalaitoksen käyttöpäällikkö. Henkilökohtainen tiedonanto.

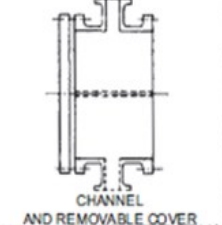
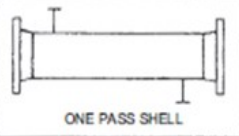
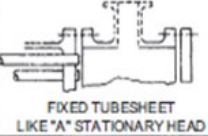
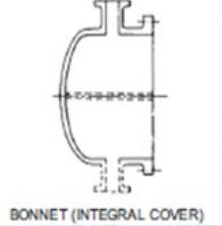
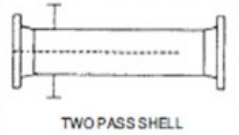
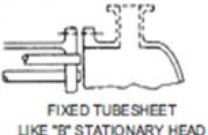
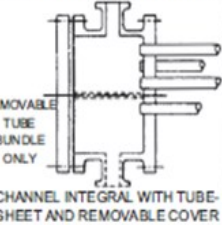
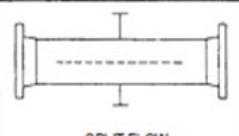
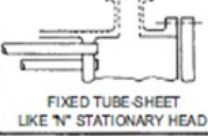
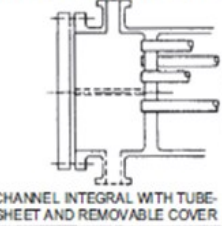
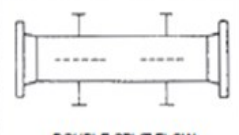
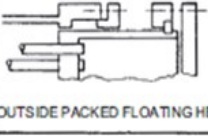
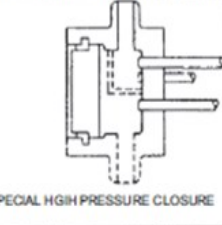
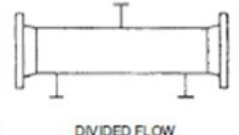
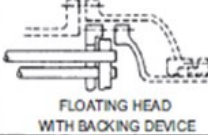
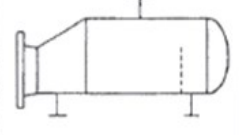
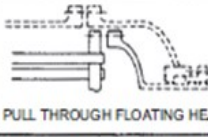
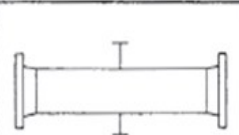
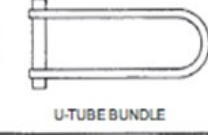
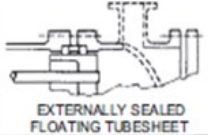
Vakkilainen, E. 2017. Steam generation from biomass: construction and design of large boilers. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.

Valmet DNA. 2023. Voimalaitoksen operointityöpöytä. Sisäinen järjestelmä.

Wikipedia Commons. 2014. T-S diagram of water vapor. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.9.2023]. Saatavissa:

<https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:T-s-diagram-steam.png>

Liite 1. TEMA:n lämmönsiirtimet (TEMA, 1999).

	FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBE-SHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Liite 2. Vesihöyryn T-S-piirros (Wikipedia Commons, 2014).

