

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Teknillinen tiedekunta
Energy Technology
BH10A2000 Master's Thesis

**KAASUKATTILAN ELINIKÄSELVITYS JA TEHTAAN
HÖYRYTUOTANNON TURVAAMINEN UUDELLA KATTILALLA**

Lappeenrannassa, 1.4.2019

0499397 Sami Niemi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energy Technology

Sami Niemi

Kaasukattilan elinikäselvitys ja tehtaan höyrytuotannon turvaaminen uudella kattilalla

Diplomityö

2019

77 sivua, 7 taulukkoa ja 15 kuvaa

Tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Ohjaajat: DI Outi Matikainen ja DI Mika Varis

Hakusanat: Imatran tehtaas, voimalaitos, elinikäselvitys, kuntokartoitus, leijupetikattila, pellettikattila, kaasukattila, kattilainvestointi
Keywords: Imatra mills, power plant, life expectancy study, fluidized bed boiler, pellet boiler, gas boiler, boiler investment.

Tässä diplomityössä selvitettiin Stora Enson Imatran tehtaiden voimalaitoksen kaasukattiloiden K9, K10 ja K11 elinikä kuntokartoituksen avulla. Lisäksi selvitettiin, minkälainen kattila olisi sopivin tehtaalle korvaamaan K9 – 11 kaasukattilat tulevaisuudessa. Uudelta kattilalta odotetaan hyvää käyttövarmuutta, säädettävyyttä sekä taloudellista kannattavuutta.

Kuntokartoituksen mukaan K9 – 11 kattiloiden merkittävin käyttöaikaan vaikuttava tekijä on II-tulistin ja sen kokoojatukin pitkälle edennyt viruminen. Myös käyttökokemusten sekä viime vuosien vuototapausten perusteella kattiloiden kunto on huono, minkä takia uuden kattilan hankintaprosessia suositellaan aloitettavan pikimmiten.

Uutta kattilaa lähdettiin suunnittelemaan polttoainevaihtoehtojen kautta, mistä käyttökelpoisiksi Imatran tehtaalle todettiin metsätähdehake, pelletit sekä maakaasu. Kattilavaihtoehtoiksi polttoaineiden perusteella valittiin leijupetikattila, pellettikattila ja kaasukattila. Näistä kattilavaihtoehtoista otettiin vertailuun myös matalapaine kattilavaihtoehdot. Lisäksi pelletti- ja maakaasukattiloista tutkittiin vaihtoehdot, joissa yhden kattilan sijasta kattiloita on kaksi. Kattilainvestointiin liittyvissä kustannuslaskelmissa otettiin huomioon investointikustannusten lisäksi muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset 20 vuoden käytön ajalta.

Sopivimmaksi kattilaksi Imatran tehtaalle todettiin matalapaineleijupetikattila. Leijupetikattila on useiden mahdollisten polttoainevaihtoehtojen sekä tulevaisuuden hintojen kehityksen kannalta varmin vaihtoehto. Pellettikattilan suurin ongelma on epävarmuus pellettien saatavuudessa ja maakaasukattilan merkittävin haitta on hiilidioksidipäästöt.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of technology
Energy Technology

Sami Niemi

Gas boiler life expectancy study and securing the mill's steam production with a new boiler

Master's Thesis

2019

77 pages, 7 charts and 15 figures

Examiner: Professor, TkT Esa Vakkilainen

Instructors: DI Outi Matikainen ja DI Mika Varis

Keywords: Imatra mills, power plant, life expectancy study, fluidized bed boiler, pellet boiler, gas boiler, boiler investment.

In this thesis the current conditions of Stora Enso Imatra mills power plant's gas boilers K9, K10 and K11 were examined with a life expectancy study. Also, different options for a new boiler were investigated to find the most suitable boiler to replace the K9 – 11 boilers in the future. Good dependability, adjustability and financial profitability were expected from the new boiler.

The results from the life expectancy study indicate that the most influential factor impacting the remaining operating time of the K9 – 11 boilers is the secondary superheater's and its merger section's long advanced creep. In addition, as indicated by user experience and the multiple leak incidents during the past few years, the condition of the boilers is poor. Therefore, the new boiler's investment process should be started as soon as possible.

Planning of the new boiler started with investigating different fuel alternatives, of which forest residues, pellets and natural gas were found to be suitable for Imatra mills. Based on these fuels, the chosen boiler options were a fluidized bed boiler, a pellet boiler and a natural gas boiler. Low-pressure versions of the chosen boiler options were also investigated. In addition, options for two pellet or natural gas boilers instead of one were examined. Boiler investment calculations, along with boiler investment costs, operating costs and fuel costs were considered for 20 years of operating time.

The most suitable boiler for Imatra mills was established to be a low pressure fluidized bed boiler. A fluidized bed boiler is the safest option considering the multiple available fuel options and the fuel price developments in the future. The biggest challenge in using a pellet boiler is the uncertainty in the fuel availability, while the natural gas boiler faces its greatest challenge in carbon dioxide emissions.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	4
2 VOIMALAITOS.....	5
2.1 Voimalaitoksen vesihöyrypiiri	5
2.1.1 Höyryturbiini ja generaattori	7
2.1.2 Lämmön talteenotto	7
2.1.3 Syöttövesisäiliö.....	8
2.1.4 Syöttövesipumppu	8
2.2 Kattilan rakenne	9
2.2.1 Lieriö.....	11
2.2.2 Keittoputkisto.....	12
2.2.3 Tulistin	12
2.2.4 Syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiser	13
2.2.5 Palamisilman esilämmitin eli luvo.....	14
3 STORA ENSO IMATRAN TEHTAAT	15
3.1 Tehtaan höyryverkko	15
3.1.1 Soodakattilat	17
3.1.2 Kuorikattila	18
3.1.3 Kaasukattila 12	18
3.1.4 Kaasukattilat 9 – 11	18
4 ELINIKÄSELVITYS	23
4.1 Kuntokartoitus.....	23
4.1.1 Visuaalinen tarkastus	23
4.1.2 Paksuusmittaus.....	25
4.1.3 Jäljennetarkastus ja kovuusmittaus.....	26

4.1.4	Näyteputki.....	28
4.2	Kuntokartoituksen yhteenveto	30
5	UUDEN KATTILAN POLTTOAINE	31
5.1	Polttoaineen tarve.....	31
5.2	Kuori	32
5.3	Hake	33
5.4	Pelletit ja briketit	35
5.5	Peltobiomassat.....	37
5.6	Maakaasu.....	38
5.7	Turve	39
5.8	Kierrätyspolttoaineet	39
6	UUDEN KATTILAN TYYPPI	42
6.1	Leijupetikattila	43
6.2	Pellettikattila	46
6.3	Kaasukattila.....	48
6.4	Matalapainekattila	49
6.5	Päästöt uudella kattilalla	52
7	KUSTANNUKSET	54
7.1	K9 – 11 Korjauskustannukset	54
7.2	Polttoainekustannukset.....	55
7.3	Uuden kattilan kustannukset	57
7.4	Investoinnin kokonaiskustannukset	60
8	PÄÄTELMÄT	65
9	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET	73

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

<i>K</i>	Vuosittaiset muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset	[M€]
<i>n</i>	Investoinnin pitoaika	[a]
<i>i</i>	Laskentakorkokanta	[%]
<i>t</i>	Aika	[a]

Alaindeksit

X	Yhdiste
---	---------

Lyhenteet

K9	Kaasukattila 9
K10	Kaasukattila 10
K11	Kaasukattila 11
K12	Kaasukattila 12
KK2	Kuorikattila 2
SK5	Soodakattila 5
SK6	Soodakattila 6
TU6	Turbiini 6
TU7	Turbiini 7
G6	Generaattori 6
G7	Generaattori 7
HKP	Korkeapainehöyry
HVP	Välipainehöyry
HMP	Matalapainehöyry
HLP	Lämmityshöyry
CTMP	Chemi-thermomechanical pulp
UCI	Ultrasonic contact impedance
SRF	Solid recovered fuel
SNCR	Selective non-catalytic reduction
BAT	Best available technique

1 JOHDANTO

Stora Enson Imatran tehtaiden voimalaitoksella on kolme vuonna 1977 valmistunutta kaasukattilaa K9, K10 ja K11. Nämä kattilat ovat lähestymässä elinkaarensa loppua ja niiden käytettävyys on lukuisten ongelmien kautta osoittautunut hankalaksi. Tämän työn aiheena on kattiloiden elinikäselvitys sekä parhaimman korvaavan kattilavaihtoehdon löytäminen. Tarkoituksena on selvittää, kuinka pitkään kaasukattiloilla voi tuottaa höyryä, ennen kuin korjauskustannukset nousevat liian korkeiksi tehden ajamisesta taloudellisesti kannattamatonta, tai käyttövarmuus osoittautuu liian epävarmaksi. Lisäksi selvitetään paras mahdollinen vaihtoehto uudelle kattilalle, jolla K9 – 11 kattilat voidaan korvata tulevaisuudessa.

Kattiloiden K9 – 11 jäljellä olevaa elinikää selvitetään kuntokartoituksella, johon kuuluvat visuaalinen tarkastus, paksuusmittaukset sekä jäljennetarkastus. Visuaaliseen tarkastukseen kuuluvat lieriön, kattilan tulipesän sekä lämmönsiirtopintojen näkö tarkastus. Paksuusmittaukset tehdään tulisinputkille, ekonomaisereille sekä poltinaukkoja ympäröiville putkille. Jäljennetarkastuksen avulla tutkitaan II-tulistimen ja höyryn kokoojatukin virumista. Tulistinputkesta otetaan myös näytekappale, jolle tehdään mikrorakennetarkastelu, kovuusmittaus, vetokoe sekä sisäpuolisen oksidikalvon paksuusmittaus laboratorio-olosuhteissa.

Uuden kattilan tyyppiä pohditaan polttoaineen, tehon, tehtaan höyryverkkoon sopivuuden ja kustannusten perusteella. Tavoitteena on löytää käytettävyydeltään, taloudellisuudeltaan ja toimintavarmuudeltaan paras vaihtoehto, jolla tulevaisuudessa varmistetaan höyryn riittävyys tehtaalla. Kattilavaihtoehdoille lasketaan kokonaiskustannukset, joissa otetaan huomioon investointikustannusten lisäksi muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset seuraavalta 20 vuoden ajalta.

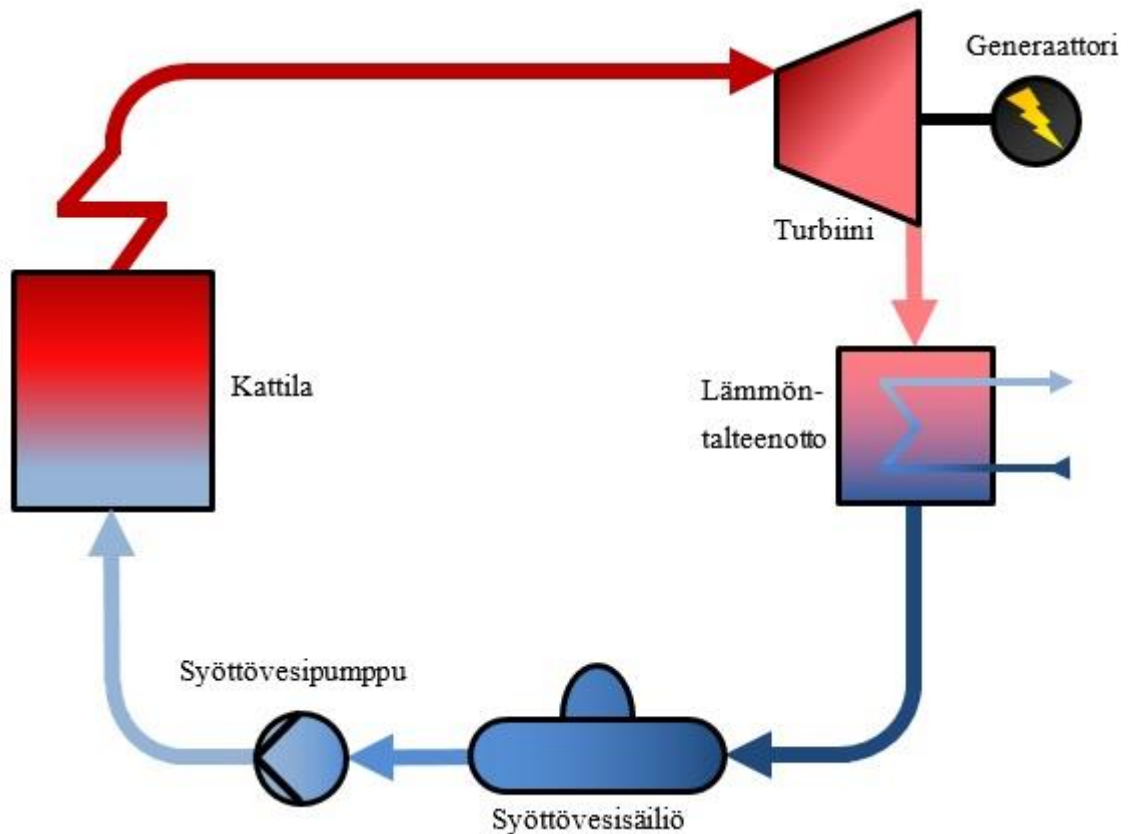
Työssä esitellään myös voimalaitoksen toimintaperiaate, tärkeimmät komponentit, kattilan rakenne sekä elinikäselvityksen perusteet uuden kattilavalinnan tekemisen tueksi.

2 VOIMALAITOS

Tässä kappaleessa esitellään voimalaitoksen toiminnan kannalta tärkeimmät laitteet ja toimintaperiaatteet. Tarkempi katsaus tehdään kattilan sisäpuoliseen rakenteeseen ja vesihöyrypiirin toimintaan. Voimalaitoksia ja kattilatyyppejä on monia erilaisia, joten voimalaitoksen kuvauksessa keskitytään yleisesti laitokselta löytyviin tärkeimpiin komponentteihin, toimintaperiaatteisiin sekä esimerkikattilana toimivan leijupetikattilan rakenteeseen.

2.1 Voimalaitoksen vesihöyrypiiri

Voimalaitoksen tavoitteena on tuottaa haluttu höyrymäärä oikeassa lämpötilassa ja paineessa, tuottaa sähköä ja lämpöä hyödyntäen kuumassa höyryssä olevaa energiaa sekä kierrättää lauhtunut höyry takaisin käyttöön. Voimalaitoksen vesihöyrypiiri on esitettyä kuvassa 1. Voimalaitokseen kuuluvat peruskomponentit ovat kattila, turbiini, generaattori, lämmön talteenotto, syöttövesisäiliö ja syöttövesipumppu. Kattilassa palavasta polttoaineesta muodostuvilla kuumilla savukaasuilla muutetaan vesi tulistetuksi höyryksi. Turbiinissa höyryn paine ja lämpötila laskevat, kun energia muutetaan turbiinin ja generaattorin avulla sähköksi. Lämmön talteenotossa höyry lauhtuu vedeksi, kun höyryssä oleva energia otetaan talteen sähkönä ja lämpönä. Tämän jälkeen vesi jatkaa kiertoaan takaisin kattilaan syöttövesisäiliön ja syöttövesipumpun kautta.



Kuva 1. Höyryvoimalaitoksen toimintaperiaate.

Todellisuudessa voimalaitoksen vesihöyrypiiri on usein huomattavasti monimutkaisempi. Turbiinilta lähteivissä höyryissä voi olla useitakin väliottoja, joissa höyryn lämpötila ja paine vaihtelevat tarpeen mukaan. Väliottohöyryjä käytetään muun muassa syöttöveden korkeaja matalapaine-esilämmittimissä sekä polttoaineesta ja kattilan tyypistä riippuen polttoaineen tai palamisilman esilämmitykseen. Esilämmityksillä pystytään nostamaan voimalaitoksen sähkön tuotannon hyötysuhdetta muutamia prosentteja. Väliottohöyryä voidaan käyttää myös suoraan esimerkiksi tehdasalueella prosessissa tarvittaviin lämmityksiin. Lisäksi lämmön talteenotto jaetaan usein suuremmilla laitoksilla kahteen tai useampaan lämmönvaihtimeen. Pelkkää sähköä tuottavalla laitoksella sen tilalla on lauhdutin, jossa vesi lauhdutetaan jäähdytysvedellä ottamatta lämpöenergiaa talteen. (Huhtinen et al. 2008, 58 – 62.)

2.1.1 Höyryturbiini ja generaattori

Höyryturbiinissa kattilalta tulevan korkeapainehöyryn paine- ja lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Höyryn avulla pyöritetään turbiinin akselia, jonka yhteydessä on myös generaattori. Höyryturbiinien teho vaihtelee alle kilowatista jopa yli gigawattiin asti. Turbiinit voidaan rakenteeltaan jakaa kahteen päätyyppiin, aksiaali- ja radiaaliturbiineihin, höyryn virtaussuunnan mukaan. Aksiaaliturbiineissa höyry virtaa akselin suuntaisesti turbiiniin ja radiaaliturbiineissa höyry virtaa akselia kohti. Radiaaliturbiinit ovat usein pienikokoisempia ja aksiaaliturbiinit ovat käytössä suuremmilla tehtailla.

Turbiinit voidaan jakaa myös poistuvan höyryn paineen ja lämpötilan kautta eri ryhmiin. Lauhdeturbiinia käytetään laitoksilla, joilla ei ole tarvetta lämmön tuotannolle. Turbiinista höyry poistuu lähes ilmanpaineessa, jotta mahdollisimman suuri osa energiasta saadaan sähkönä talteen. Turbiinin jälkeen höyry lauhdutetaan lauhduttimessa takaisin vedeksi. Vastapaineturbiinia käytetään tehtailla, joilla tuotetaan sähköä lisäksi myös lämpöä. Höyry poistuu turbiinista ylipaineessa, jotta tarvittava lämpö saadaan tuotettua lämmön talteenotossa. Tyypillisiä vastapaineturbiinin sijoituskohteita ovat esimerkiksi kaukolämpölaitokset sekä tehdasalueilla sijaitsevat voimalaitokset. Vastapainevoimalaitoksella lämmön tuotannosta tulee määräävä tekijä, jonka perusteella laitos mitoitetaan. Sähköä tuotetaan sivutuotteena. (Huhtinen et al. 2008, 109 – 111.)

Generaattorissa turbiinin mekaaninen energia muutetaan sähköenergiaksi. Generaattorin roottori on usein valettu teräskappale, joka on kytkettynä suoraan akseliin. Roottorin rungossa on magnetointikäänitys, joka valmistetaan siten, että generaattoriin muodostuu napaluvun mukainen määrä magneettinapoja. Useilla generaattoreilla on yksi napaluku, mikä tarkoittaa sitä, että turbiini pyörii 3000 kierrosta minuutissa. Suurien keskipakovoimien pienentämiseksi isotehoisilla generaattoreilla napaluku nostetaan kahteen, jolloin turbiinin pyörimisnopeus puolittuu 1500 kierrokseen minuutissa. (Huhtinen et al. 2008, 297.)

2.1.2 Lämmön talteenotto

Voimalaitoksen lämmön talteenotolla on monia eri toimintatapoja. Talteenotolla on tarkoitus lauhduttaa turbiinilta tuleva höyry ja ottaa lämpöenergia talteen. Vastapainevoimalaitoksissa

eli voimalaitoksissa, joissa tuotetaan sähköä ja lämpöä, lämmöntalteenotolla tuotetaan usein kaukolämpöä. Turbiinilta tuleva höyry lauhdutetaan vedeksi kaukolämmön viileällä paluuedellä. Samalla kaukolämpövesi lämpenee ja jatkaa virtausta takaisin kaukolämpöverkoston. Prosessiteollisuuden yhteydessä olevalla vastapainevoimalaitoksella höyry käytetään usein tehtaalla rakennusten tai prosessin lämmitystarpeisiin, esimerkiksi sellun kuivaukseen kuivauskoneella. Tämän jälkeen höyry palautuu voimalaitokselle lauhdeena. Lauhdevoimalaitoksissa eli voimalaitoksissa, joissa tuotetaan pelkästään sähköä, ei ole lämmön talteenottoa ollenkaan. Tämän tyyppisissä laitoksissa turbiinin jälkeinen höyry ajetaan lauhduttimeen, jossa höyry muutetaan vedeksi jäähdytysveden avulla. Jäähdytysvedestä ei oteta lämpöä talteen, vaan se virtaa takaisin alkuperäiseen lähteeseensä, esimerkiksi mereen. (Huhtinen et al. 2000, 22.)

2.1.3 Syöttövesisäiliö

Syöttövesisäiliössä esilämmitetään ja paineistetaan syöttövettä höyryllä kylläiseen tilaan. Kylläisessä tilassa korroosiota aiheuttavien kaasujen eli hapen ja hiilidioksidin liukoisuus veteen on minimaalista. Nämä kaasut höyrystyvät ja poistuvat syöttövesisäiliön yläosassa olevan kaasunpoistokuvun kautta. Syöttövesisäiliöön tuleva lisävesi syötetään kaasunpoistokuvun yläosaan, jotta myös lisäveten liuenneet kaasut saadaan poistettua. Syöttövesisäiliö toimii myös kattilan lyhytaikaisena vesivaraajana, joka häiriötilanteessa ehkäisee veden loppumisen kattilasta. (Huhtinen et al. 2000, 23.)

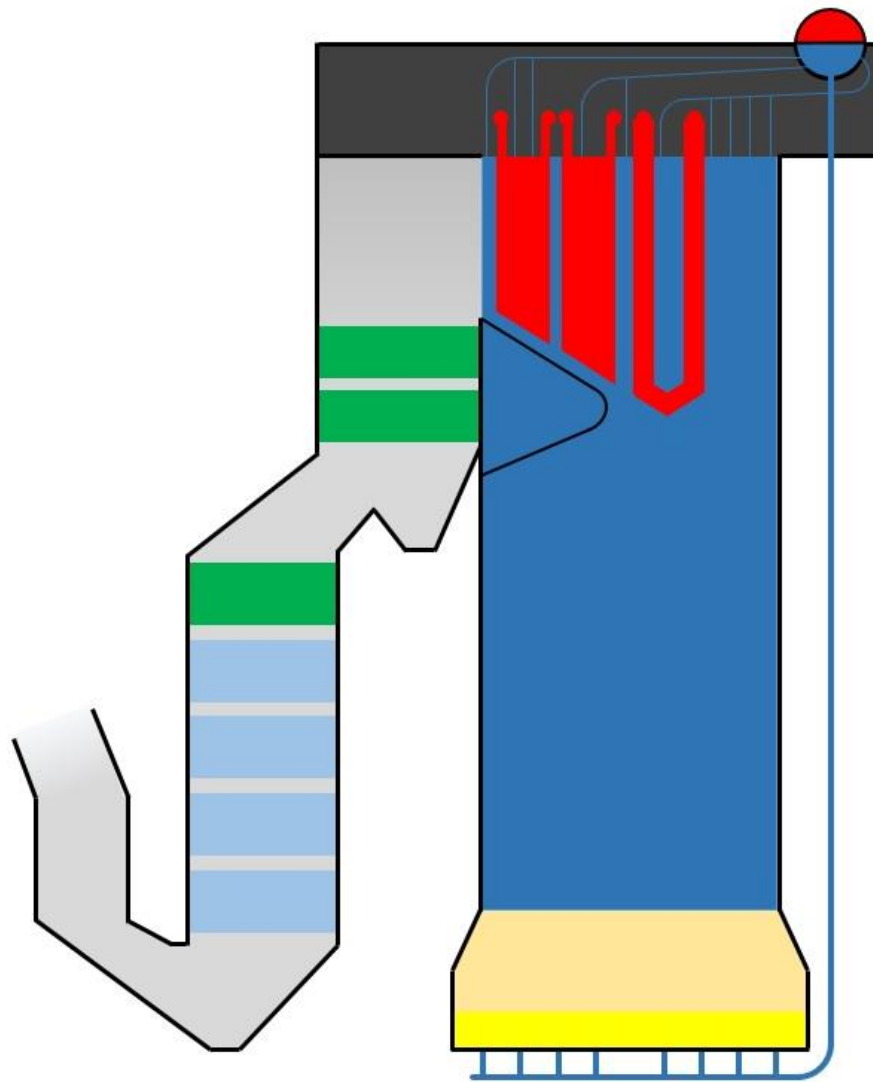
2.1.4 Syöttövesipumppu

Syöttövesipumpulla nostetaan veden painetta ja pumpataan vesi syöttövesisäiliöstä kattilaan. Vesihöyrykierrossa paine on suurimmillaan syöttövesipumpulla. Lisäksi myös syöttöveden lämpötila on korkea (100 – 200 °C). Tästä syystä pumpuilta vaaditaan rakenteellisesti paljon. Yhdellä kattilalla on lähes aina kaksi, tai useampi syöttövesipumppu käyttövarmuuden takaamiseksi. Voimanlähteenä käytetään usein sähköä, mutta myös höyryturbiinilla toimivat pumpput ovat yleisiä. Höyrykäyttöisellä pumpulla sähkönkulutus on huomattavasti pienempi, mikä tekee siitä käytön aikana edullisemman.

Rakenteeltaan pumput ovat monivaiheisia sarjapumppuja. Pumpun akselilla on useita juoksupyöriä. Juoksupyörän läpi virtaavassa vedessä kasvatetaan virtausnopeutta, joka juoksupyörän jälkeisessä virtauskanavassa hidastuu muuttaen liike-energian paine-energiaksi. Akselille asennetaan tarvittava määrä juoksupyöriä halutun paineen saavuttamiseksi. Syöttövesipumpuilla on minimikiertolinja, joka varmistaa, että pumpun läpi virtaa aina tarvittava määrä vettä ylikuumentamisen estämiseksi. (Huhtinen et al. 2000, 225 – 226.)

2.2 Kattilan rakenne

Kattiloita on rakenteeltaan ja tyypiltään monenlaisia riippuen koosta ja käytettävästä polttoaineesta. Tässä osiossa käytetään esimerkkinä kuvassa 2 olevaa luonnonkiertoleijupetikattilaa. Kattilan tärkeimmät rakenteelliset osat ovat punaisella kuvattu tulistin, sinisellä kuvattu keittoputkisto, vihreällä kuvattu ekonomaiser ja vaaleansinisellä kuvattu luvo. Lisäksi kattilan lieriö on kuvattuna sinipunaisella ympyrällä ja kattilan pohjalla oleva hiekkapeti keltaisella sekä hiekkapedin muuraus kellertävällä värillä. Kattilan tulipesän jälkeinen osio eli takaveto on kuvattuna harmaalla pohjalla.



Kuva 2. Leijupetikattilan rakenne.

Syöttövesisäiliöstä tuleva vesi pumpataan kattilaan syöttöveden esilämmittimien eli ekonomaiserien kautta lieriöön. Ekonomaiserissa syöttövettä lämmitetään savukaasuilla kattilan takavedossa kolmessa osassa. Lieriössä vesi ja höyry erotetaan toisistaan. Luonnonkiertokattilassa tuleva vesi virtaa painovoiman avulla lieriöstä laskuputkea pitkin kattilan alaosaan, josta vesi nousee höyrystyen takaisin lieriöön kattilan höyrystinosaa eli keittoputkistoa pitkin. Höyrystin koostuu kattilan seinämissä olevista putkista. Lieriössä vedestä erotettu höyry jatkaa matkaansa tulistimiin, joissa höyryä tulistetaan eli lämmitetään yli kylläisen pisteen. Tulistimet ovat kolmessa osassa kattilan tulipesän yläosassa, jonka jälkeen korkeapainehöyry virtaa turbiinille.

Palamisilma kattilaan kulkee puhaltimen kautta palamisilman esilämmittimeen eli luvon. Esilämmityksellä saadaan nostettua kattilan hyötysuhdetta ja parannettua palamisreaktion tapahtumista tulipesässä. Luvo on kattilan takavedossa neljässä osassa. Luvon jälkeen palamisilma virtaa kattilaan pohjan läpi leijuilmana sekä tulipesän seinämiltä sekundääri-ilmana. Leijuilman tarkoitus on pitää kattilan pohjalla oleva hiekkapeti leijuvana, jotta kostean ja kiinteän polttoaineen palamisreaktio onnistuu paremmin. Sekundääri-ilma tuo happea tulipesän keski- ja yläosiin palamisreaktion parantamiseksi.

Polttoaineen palaessa muodostuvat savukaasut kulkevat kattilan tulipesän pohjalta yläosaan ja siirtävät ensimmäiseksi lämpöään tulistimissa virtaavaan höyryyn. Savukaasut jatkavat kattilan takavetoon, jossa lämpö siirtyy ekonomaiserien välityksellä syöttöveteen ja luvon kautta palamisilmaan. Syöttöveden ja palamisilman esilämmitysten avulla savukaasuja pyritään viilentämään mahdollisimman paljon häviöiden minimoimiseksi. Rikkiä sisältävien polttoaineiden kanssa täytyy kuitenkin huolehtia happokastepistelämpötilasta, joka on minimissään noin 140 °C astetta. Tätä alemmilla lämpötiloilla savukaasuissa oleva rikki muodostaa veden kanssa rikkihappoa, joka aiheuttaa lämmönsiirtopinnoissa korroosioaurioita. (Huhtinen et al. 2000, 108.)

2.2.1 Lieriö

Lieriössä kylläinen vesi ja kylläinen höyry erotetaan toisistaan. Lisäksi veteen liuenneet haitallisia kerrostumia aiheuttavat suolat erottuvat höyrystä, eivätkä aiheuta ongelmia tulistimilla. Vesi ja höyry erotetaan toisistaan hyödyntämällä painovoimaa ja aineiden tiheuseroja. Erottuminen on tehokkaampaa kun vesi- ja höyryvirtaukset lieriöön ovat mahdollisimman tasaiset ja kun lieriön halkaisija on mahdollisimman suuri aiheuttaen hitaan virtausnopeuden. Vesi poistuu lieriöstä lieriön alaosasta laskuputkea pitkin kattilan höyrystimen alaosaan, kun taas höyry poistuu lieriön yläosasta tulistimiin. Höyryn seassa sallitaan maksimissaan 0,01 % vettä. (Vakkilainen 2005, 7-13.)

Lieriön rakenteella pyritään parantamaan painovoimaista erotusta. Lieriöön voidaan sijoittaa sisään tulevien vesi- ja höyry-yhteiden eteen ohjauslevyjä, joilla estetään veden suora virtaus tulistinputkistoon. Toinen vaihtoehto on rakennuttaa sykloneita ja pisaraerottimia lieriöön. Kattilalta tuleva vesihöyryseos ajetaan lieriön sykloneiden läpi, joissa vesipisarat erottuvat

keskipakovoiman ansiosta. Syklonin jälkeen höyry virtaa läpi pisaraerottimien, joissa jäljelle jääneet vesipisarot törmäävät mutkakohdissa aaltomaisien levyrakenteiden seinämiin. Luonnonkiertokattiloiden lieriöiden tilavuus on suuri, mikä tarkoittaa hidasta ylös- ja alasajoa. Suuri tilavuus kuitenkin mahdollistaa lieriön toiminnan puskurina äkkinäisille kuorman muutoksille. (Huhtinen et al. 2000, 117 – 118.)

2.2.2 Keittoputkisto

Keittoputkisto sijaitsee kattilan sisäisessä vesihöyrykierrossa ekonomaiserin ja lieriön jälkeen. Putkistoa kutsutaan myös nimellä höyrystin, jossa nimensä mukaisesti vesi höyrystetään. Kattilan tulipesän seinämät muodostuvat usein höyrystinputkistosta. Voimalaitoskattiloissa voi olla myös erillinen savukaasukanavaan tai tulipesän yläosaan sijoitettu keittoputkisto, mikäli tulipesän seinien lämmönsiirtopinta-ala ei riitä kaiken veden höyrystämiseen. Vesi virtaa lieriöstä laskuputkea pitkin kattilan alaosaan, josta vesi lähtee nousemaan kattilan putkistoa ylöspäin samalla höyrystyen. Vesihöyryseos palaa lieriöön suurimmaksi osaksi höyrystyneenä.

Höyrystimen sijoittamisella kattilan seinämiin saadaan tulipesän rakenteisiin samalla jäähdytys, eikä ylikuumentumisen vaaraa ole. Se muodostaa myös kaasutiiviin putkiseinämän tulipesän ympärille. Tulipesässä lämpö siirtyy höyrystinputkistoon säteilemällä. (Huhtinen et al. 2000, 186 – 188.)

2.2.3 Tulistin

Tulistimessa höyryä tulistetaan eli lämmitetään höyryä yli kylläisen pisteen. Höyryä tulistetaan, koska turbiiniin menevän höyryn lämpötilalla on suora yhteys siihen kuinka paljon liike-energiaa pystytään tuottamaan. Rakenteeltaan tulistimet ovat yksinkertaisesti nippu roikkuvia teräsputkia. Materiaalitekniikan rajoitusten takia tulistetulla höyryllä on korkein sallittu lämpötila noin 550 °C. Tulistimet sijoitetaan kattilassa tulipesän yläosaan, jossa savukaasujen lämpötila on riittävä höyryn tulistamiseen, mutta tulipesän liekkien säteilylämmönsiirto ei ole liian suuri aiheuttaen ylikuumentumista.

Tulistimia on neljää eri tyyppiä säteilytulistimia, verhotulistimia, konvektiotulistimia ja yhdistelmätulistimia. Säteilytulistin saa nimensä siitä miten suurin osa lämmöstä siirtyy siihen säteilemällä. Se sijaitsee tulipesän yläosassa seinällä ja sijainnin takia tulistaa höyryä niin nopeasti, että höyryssä on tarpeellista käyttää suuria virtausnopeuksia putkiston jäähdyttämiseksi. Verhotulistin sijoitetaan tulipesän yläosan savukaasujen poistoaukkoon ensimmäiseksi suojatakseen muita tulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. Niitä käytetään usein vain likaavia polttoaineita polttavien kattiloiden kanssa, esimerkiksi hiilen tai turpeen kanssa. Konvektiotulistin on yleisin tulistintyyppi, joka sijoitetaan tulipesän jälkeiseen tilaan suojaan säteilyltä. Lämpö siirtyy kuumasta savukaasuvirtauksesta höyryyn konvektion eli virtaavan väliaineen kosketuksen kautta. Konvektiotulistimia voidaan rakentaa pysty- sekä vaakatasoon. Yhdistelmätulistimissa osa tulistinta toimii säteilytulistimena ja jälkimmäinen osa konvektiotulistimena. Niitä käytetään jos kattilan rakenteesta johtuen pystytään tilaa hyödyntämään paremmin rakentamalla yhdistelmätulistin tulipesän yläosan ja savukaasukanavan poistoaukon kohdalle. (Huhtinen et al. 2000, 188 – 190.)

2.2.4 Syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiser

Syöttöveden esilämmitin eli ekonomaiser lämmittää kattilaan menevää syöttövettä ennen lieriötä. Ekonomaiserit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin: höyrystämättömiin ja höyrystyviin. Höyrystämättömissä esilämmittimissä veden lämpötila pidetään noin 20 °C kiehumispisteen alapuolella, jotta kattilassa tapahtuvat kuorman muutokset eivät aiheuta kiehumista ekonomaiserissa. Höyrystyvissä esilämmittimissä vesi lämmitetään kiehumispisteeseen asti ja osa vedestä höyrystyy. Syöttövettä esilämmitetään usein myös höyryllä ennen kattilan ekonomaiseriin virtaamista, varsinkin suuremmissa voimalaitoksissa. Useammalla esilämmitysvaiheella saadaan kattilaan parempi hyötysuhde.

Ekonomaiserit ovat rakenteeltaan samanlainen putkinippu kuin tulistin. Koska kyseessä on lämmönsiirrin, jossa energia siirtyy kaasumaisesta aineesta nestemäiseen aineeseen, valmistetaan esilämmittimiä myös rivoitettuin putkina. Rivoitetussa mallissa putken ympärille rakennetaan tiheästi levyjä, jotka vahvistavat putken rakennetta ja lisäävät lämmönsiirtopintaa. Rivoitetut putket sopivat kattilaan, jossa savukaasut ovat hyvin puhtaita, esimerkiksi maakaasukattilaan, koska rivoitettua putkea on vaikeampi puhdistaa ja

ne aiheuttavat enemmän painehäviöitä savukaasuille kuin sileäpintainen putki. (Huhtinen et al. 2000, 194 – 196.)

2.2.5 Palamisilman esilämmitin eli luvo

Palamisilman esilämmittimen eli luvon nimitys tulee saksankielisestä sanasta luftvorwärmer. Ilman esilämmityksellä on useita positiivisia vaikutuksia kattilan toimintaan. Luvon avulla saadaan poistettua polttoaineesta kosteutta, nopeutetaan palamista sekä tehostetaan syttymistä. Haluttu ilman lämpötila vaihtelee paljon riippuen kattilassa käytetystä polttoaineesta. Erityisen tärkeää esilämmitys on esimerkiksi turpeen ja hiilen pölypoltossa. Luvo on kattilan savukaasukanavan viimeinen lämmönsiirrin. Rakenteeltaan luvvoja on kahta erilaista: rekuperatiivisia ja regeneratiivisia.

Rekuperatiivisissa ilman esilämmittimissä lämpö siirtyy savukaasuista teräsputken läpi virtaavaan ilmaan. Luvo voidaan valmistaa myös valurautaelementeistä, jolloin rakenne on rivoitettu lämmönsiirtopinnan maksimoimiseksi. Rekuperatiiviset ilman esilämmittimet ovat usein ristivirtaisia ja niitä kytketään usein useampia päällekkäin kuten kuvassa 2.

Regeneratiivinen ilman esilämmitin siirtää lämpöä massan välityksellä. Samaa lämpöä siirtävää materiaalia koskettavat vuorotellen kylmä ilma ja lämpimät savukaasut. Regeneratiiviset luvot tarvitsevat huomattavasti vähemmän tilaa rekuperatiivisiin verrattuna. Regeneratiivisessa esilämmitin koostuu levykennoista, joka ensin lämpenee savukaasuvirtauksessa ja sen jälkeen jäähtyy tulevan palamisilman virtauksessa lämmittäen sitä. Levykennoja tai savukaasukanavaa pyöritetään savukaasu- ja ilmanakanavan välillä, jotta virtaukset kennojen sisällä saadaan vaihtumaan. Pyörimisnopeus on noin 1,5 – 4 kertaa minuutissa.

Ilman esilämmittimessä savukaasuissa olevasta lämpöenergiasta saadaan talteen noin 10 %, vaikka rekuperatiivinen ilman esilämmitin saattaa viedä kattilan savukaasukanavassa olevasta tilasta suurimman osan. (Huhtinen et al. 2000, 196 – 201.)

3 STORA ENSO IMATRAN TEHTAAT

Stora Enson Imatran tehtailla toiminta on alkanut jo vuonna 1935, kun ensimmäinen sellutehdas käynnistyi. Tällä hetkellä Imatran tehtaat työllistävät noin tuhat henkilöä ja tuottavat noin miljoona tonnia kartonkia vuodessa tehden tehtaasta yhden maailman suurimmista kartongin tuottajista. Tuotettu kartonki käytetään pääosin nestepakkaus- ja elintarvikemateriaalina.

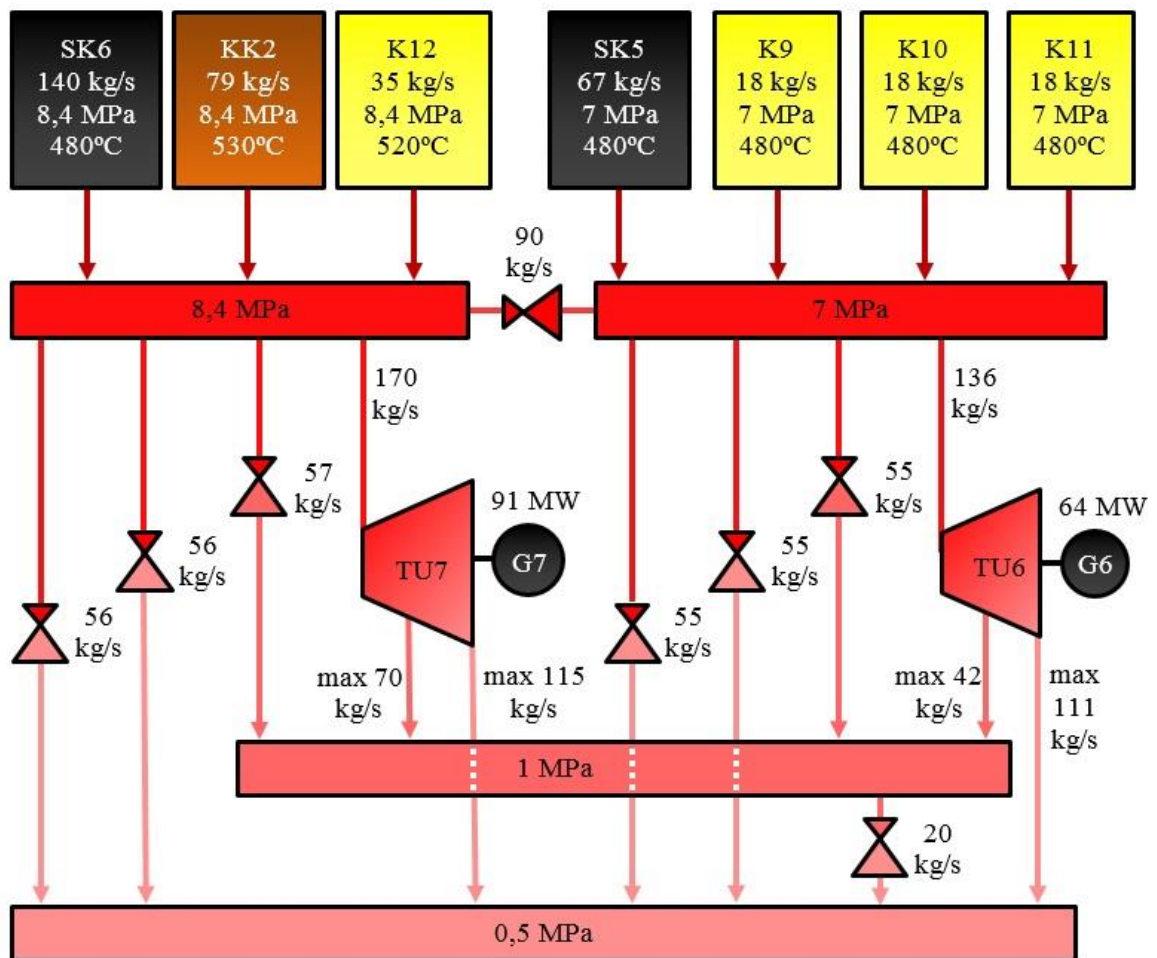
Tehdasalue jakautuu kahteen osaan Kaukopäähän ja Tainionkoskeen. Tehtaalla on yhteensä neljä kartonkikonetta, neljä päällystyskonetta ja kaksi sellutehdasta. Sellutehtaisiin kuuluu Tainionkosken havusellutehdas, Kaukopään koivu- ja havukuitulinja sekä voimalaitoksen talteenotto ja höyryn tuotanto. (Stora Enso 2018.)

3.1 Tehtaan höyryverkko

Imatran tehtaiden voimalaitoksen tärkeimmät tehtävät ovat kemikaalien talteenotto sekä tarvittavan höyrymäärän tuottaminen sellutehdasta ja kartongin tuotantoa varten. Höyryä tuotetaan seitsemällä eri kattilalla. Suurin osa höyrystä tuotetaan kahdella soodakattilalla, soodakattilalla viisi (SK5) ja soodakattilalla kuusi (SK6). Höyryverkostossa höyryn tuotanto täytyy aina vastata kulutusta. Säättävänä voimana verkostossa toimivat kuorikattila (KK2) sekä kaasukattila 12 (K12). Lisäksi höyryverkossa on kolme keskenään samanlaista pienikokoista kaasukattilaa (K9 – 11). Kaasukattilat ovat käytössä ainoastaan kun tehdas tarvitsee enemmän höyryä kuin kuorikattilalla ja soodakattiloilla pystytään tuottamaan. Kyseinen tilanne on yleinen etenkin talvisin kun lämmityshöyryn kulutus on suurempi. Vuoden lämpiminä aikoina tehtaan höyrytarpeet pystytään tyydyttämään pelkästään soodakattiloilla ja kuorikattilalla.

Kuvassa 3 esitetään tehtaan höyryverkosto. Kuvassa kattilat ovat kuvattu suorakulmioina, joiden sisältä löytyvät järjestyksessä kattilan tunnus, höyryn tuotannon maksimikapasiteetti, tuotetun höyryn paine ja tuotetun höyryn lämpötila. Höyryverkostossa on kaksi eri korkeapainetukkia 8,4 MPa sekä 7 MPa. Korkeapainehöyry (HKP) ajetaan turbiinin seitsemän (TU7) ja turbiinin kuusi (TU6) läpi. Turbiinit pyörittävät generaattoreita (G6 ja G7), joilla tuotetaan sähköä sekä alennetaan höyryn painetta ja lämpötilaa tehtaan käyttöä

varten. Molemmissa turbiineissa on väliotot, joista otetaan 1 MPa välipainehöyryä (HVP). HVP-höyry menee välipainetukkiin, josta höyry jaetaan tehtaalle käyttöä varten. Turbiinien perästä tulee 0,5 MPa matalapainehöyryä (HMP) tukille, josta jakelu tehtaan käyttöön alkaa. Korkeapainehöyry-, välipainehöyry- ja matalapainehöyrytukkien välillä on reduktioventtiileitä, joita voidaan käyttää höyryn lämpötilan ja paineen alentamista varten turbiinien sijasta. Normaalitilanteessa kaikki höyry menee turbiinien läpi, mutta ylösajo- ja ongelmatilanteissa turbiinit voidaan kokonaan ohittaa reduktioventtiilien avulla.



Kuva 3. Stora Enson Imatran tehtaiden höyryverkosto ja sähkön tuotanto. (Stora Enso, 2016)

Kuvassa 3 esitetyn höyryverkoston lisäksi tehtaalla on myös 0,5 MPa lämmityshöyryverkosto (HLP), jolla lämmitetään tehdasalueen prosessitiloja ja toimistorakennuksia. Lisäksi höyryverkostossa on kaksi hajukaasukattilaa, jotka tuottavat täydellä teholla noin kuusi kiloa sekunnissa HVP-höyryä. Pienen höyryn tuotantokapasiteetin takia kattiloita ei ole sisällytetty kuvaan. Verkostossa on myös

apulauhdutin, jolla tasataan höyrynkulutuksen äkilliset muutokset sekä tarvittaessa tuotetaan lämmintä vettä tehtaan käyttöön lauhduttamalla HMP-höyryä. Lisäksi apulauhduttimen kautta saadaan käytetyt höyryt lauhteina talteen uudelleenkäyttöä varten. Noin 70 % tehtaan käyttöön menevistä HVP- ja HMP-höyryistä palautuvat lauhteena syöttövesilaitokselle.

Korkeapainehöyry hyödynnetään turbiinien kautta sähkön tuotantoon. Väli- ja matalapainehöyry jaetaan tukkien kautta kuitulinjojen, talteenoton ja kartonkikoneiden käyttöön. Suurimmat yksittäiset kuluttajat tehdasalueella ovat kartonkikoneet. Myös merkittäviä määriä käyttävät talteenoton haihduttamot. Lisäksi höyryä menee kuitulinjoille, kuivauskoneelle, CTMP-laitokselle, kuorimolle ja paperikoneille. Tainionkoskelle HVP-höyry kulkee Kaukopäästä noin viiden kilometrin matkan putkea pitkin, koska alueella ei ole enää toiminnassa olevaa voimalaitosta. Lauhteet Tainionkoskelta palautuvat Kaukopään voimalaitokselle samaa putkisiltaa pitkin.

3.1.1 Soodakattilat

Soodakattiloissa poltetaan sellutuotannon sivutuotteena syntyvää mustalipeää. Kattiloiden tärkein tehtävä on mahdollistaa lipeän talteenotto. Tarkoituksena on polttaa mustalipeästä kaikki orgaaninen aine, jotta lipeä voidaan regeneroida uudelleen käytettäväksi. Mustalipeän palaessa syntyy runsaasti lämpöä, joka otetaan talteen kattilan vesihöyryjärjestelmässä. (KnowPulp, 2018.)

SK5 on soodakattiloista vanhempi ja pienempi. Vuonna 1987 käyttöön otettu kattila polttaa mustalipeää täydellä teholla 1700 kuiva-ainetonna päivässä ja tuottaa 67 kg/s korkeapainehöyryä. SK6 on vuonna 1992 käynnistynyt maksimissaan 3300 kuiva-ainetonna päivässä polttava kattila. Soodakattila kuusi on myös tehtaan suurin höyryntuottaja, joka maksimikapasiteetillaan tuottaa jopa 140 kg/s korkeapainehöyryä.

Kattiloita pyritään ajamaan lähellä maksimituotantoa, mutta ongelmat kuitulinjoilla tai haihduttamalla vähentävät mustalipeän tuotannon määrää, mitkä pitkäkestoisina johtavat lipeän polton vähentämiseen. Tämä vaikuttaa suoraan myös höyryn tuotannon määrään. Soodakattiloissa on myös käynnistys- ja kuormapolttimet, joilla lipeän syötön tai

saatavuuden ongelmien aikana voidaan tarvittaessa polttaa maakaasua tai öljyä höyryn tuotantoa varten.

3.1.2 Kuorikattila

Soodakattiloiden tasainen höyryn tuotanto luo vankan perustason tehtaan höyryverkostolle. Höyryn kulutus kuitenkin vaihtelee paljon tehtaan suuren koon ja useiden eri koneiden takia. Höyryn tuotannon täytyy aina pystyä vastaamaan vaihtelevaan kulutukseen. Tästä syystä kuorikattila on tehtaan tärkein säätävä kattila. Kuorikattilan höyryn tuotanto vaihtelee tehtaan kulutuksen mukaan välillä 27 - 79 kg/s korkeapainehöyryä.

Kuorikattila on vuonna 1992 käyttöönotettu 235 megawatin leijupetikattila, jossa poltetaan kuorimolta tulevaa selluntuotantoon kelpaamatonta kuorta sekä vedenpuhdistamolta tulevaa biolietettä. Lietteen ja kuoren sekoituksessa kuorta on noin 85 prosenttia. Kuorikattilalla pystytään myös tarvittaessa tuottamaan höyryä maakaasulla neljän kuormapolttimen avulla.

3.1.3 Kaasukattila 12

Kuten kuorikattila, myös kaasukattila 12 toimii höyryverkoston säätävänä voimana. Kaasun polttaminen on selvästi kalliimpaa kuoreen verrattuna, joten kattilaa K12 käytetään ainoastaan, kun tehtaan höyryn kulutus on liian suuri soodakattiloiden ja kuorikattilan tuotettavaksi. K12 On edellä mainitussa tilanteissa aina ensimmäinen ylös ajettava kaasukattila.

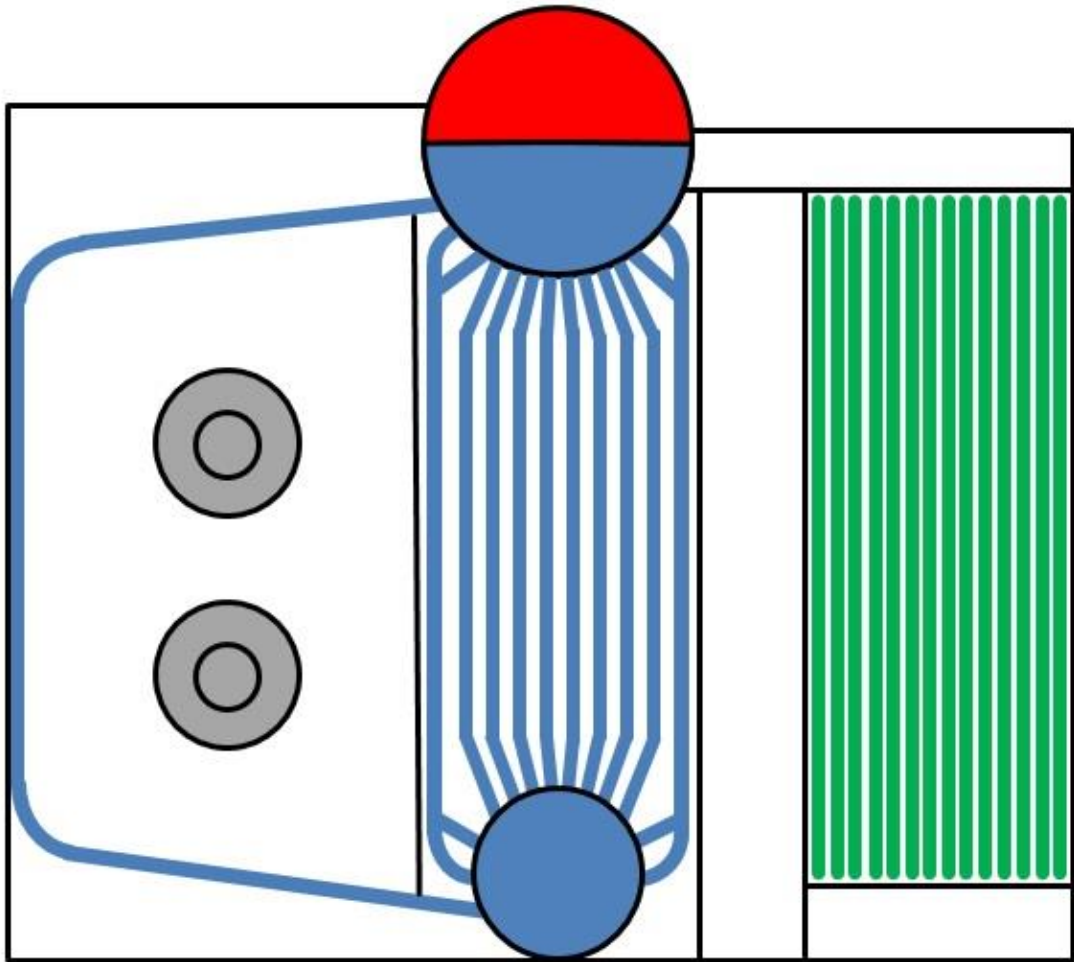
Vuonna 1992 valmistuneessa K12 kattilassa on kolme maakaasupoltinta kattoon sijoitettuna. Se tuottaa 8 - 35 kg/s korkeapainehöyryä ja on teholtaan 104 megawattia. Käynnissä ollessaan K12 pystyy säätävänä kattilana lisäämään tai vähentämään tuotantoa huomattavasti nopeammin kuorikattilaan verrattuna.

3.1.4 Kaasukattilat 9 – 11

Kaasukattilat 9 - 11 ovat kaikki kolme identtisiä keskenään. Kattilat ovat Warko-tyyppisiä luonnonkiertokattiloita, jotka ovat valmistuneet vuonna 1977. Kattilat ovat teholtaan 52

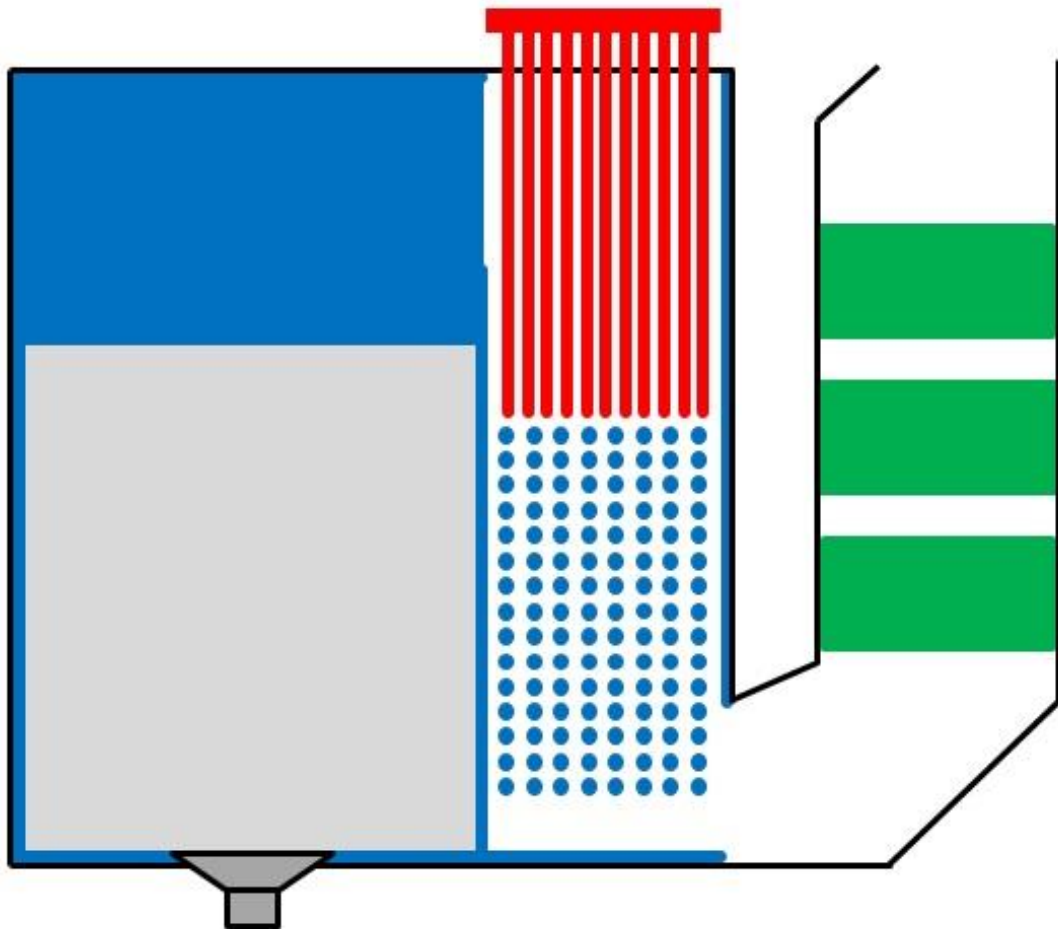
megawattia ja niillä voidaan tuottaa 7 - 18 kg/s korkeapainehöyryä. Automaatiojärjestelmän puuttumisen vuoksi K9 – 11 kattiloita ei käytetä säätävänä voimana höyryverkostossa, vaan niitä ajetaan tasaisella tuotannolla tarpeen mukaan. Syöttövesi kattiloille K9 – 11 pumpataan samasta syöttövesisäiliöstä, josta vettä jaetaan myös tehtaan hajukaasukattiloille. Syöttövesisäiliö on valmistunut vuonna 2001 tehden siitä huomattavasti modernimman kattiloihin verrattuna. Kattiloilla tuotettu korkeapainehöyry on noin 6,5 MPa, joka virtaa 7 MPa korkeapainetukkiin. Hieman matalamman höyryn paineen mahdollistaa samaan tukkiin tuleva SK 5:n höyry, joka on hieman yli 7 MPa. (Stora Enso 2014.)

Kattilat ovat rakenteeltaan kaksilieriöisiä ja etuseinämällä on päällekkäin kaksi maakaasupoltinta. Kattiloiden K9 – 11 rakenne on esitetty seuraavissa kuvissa edestä- ja ylhäältäpäin. Kuvassa 4 esitetään kattilan rakenne etuseinän suunnalta. Kattilan lieriöt ovat kuvattu ympyröillä ja ylälieriön höyryosiota on korostettu punaisella värillä. Höyrystinputkisto on sininen ja ekonomaiserit näkyvät kattilan takavedossa vihreällä. Maakaasupolttimet ovat etuseinällä päällekkäin kuvattuna harmailla ympyröillä. Tulistimet jäävät tässä kuvassa lieriöiden välisen konvektioputkiston taakse. (Ahlström 1976.)



Kuva 4. Kaasukattila 9 - 11 edestäpäin kuvattuna. (Ahlström 1976)

Kuvassa 5 on kuvattu kattilan rakenne ylhäältäpäin. Tulipesän seinämät, osa savukaasukanavan putkistosta ja osa tulipesän lattiasta ovat höyrystinputkistoa, joita kuvataan sinisellä värillä. Tulistinputkisto on tulipesän jälkeisessä tilassa ensimmäisenä kuvattuna punaisilla viivoilla ja kolmessa osassa olevat ekonomaiserit näkyvät kuvassa vihreällä. Tulipesän muurattua lattiaa kuvataan harmaalla värillä. Savukaasut kulkevat kattilan sisällä vaakatasossa. Poikkeuksellisesti tehtaan muihin kattiloihin verrattuna K9 - 11 kattiloissa ei ole erillistä palamisilman esilämmitintä. (Ahlström 1976.)



Kuva 5. Kaasukattila 9 - 11 rakenne ylhäältäpäin kuvattuna. (Ahlström 1976)

Viimeisen neljän vuoden aikana yhtä K9 – 11 kattilaa on käytetty keskimäärin vain noin 700 tuntia vuodessa (Stora Enso 2017). Tämä johtuu siitä, että tehtaalla tarvittava höyry pystytään suurimman osan ajasta tuottamaan muilla kattiloilla. Kun kattilat eivät ole linjassa, niitä pidetään säilönnässä. Märkäsäilönnässä kattila täytetään syöttövedellä, siten että lieriön vesipintaa pidetään normaalilla tasolla. Lieriöön ajetaan jatkuvasti pieni määrä säilöntähöyryä. Tällä tavalla hapen pääsy kattilan putkistoon ja lieriöön estetään korroosion ehkäisemiseksi. (Huhtinen et al. 2000, 315.)

Ongelmatapausten määrä kattiloiden käyttötunteihin verrattuna on suuri. Vuosien 2013 – 2018 aikana kattiloissa K9 – 11 on ollut 13 kappaletta vuotoja, joiden takia kattila on pois käytöstä usein yli viikon ajan korjauksen takia. Vuotoja on ilmennyt kattiloiden lämmönsiirtopinnoista, joita on K9 kattilalla ollut neljä, K10 kattilalla viisi ja K11 kattilalla neljä. Vuotokohdat eivät ole millään kattilalla kohdistuneet yhteen paikkaan, vaan vuotoja

on löytynyt tulistinputkista, höyrystinputkista sekä ekonomaiserien putkista. Lisäksi kattiloilla on esiintynyt kuusi muuta ongelmaa, jotka ovat tehneet kattilasta vähintään yhden päivän ajaksi toimintakelvottoman. Edellä mainittuja ongelmia on ollut polttimissa, ilmapelleissä sekä pääilmapuhaltimissa. Monet pienistäkin ongelmista saattavat aiheuttaa kattilan käytettävyyden kanssa ongelmia useamman päivän ajan, koska varaosia ei ole enää yli 40 vuotta vanhoihin laitteisiin nopeasti saatavilla. Lisäksi kattiloiden ylä- ja etenkin alalieriö ovat erittäin pieniä, joten sisään mahtuvia hitsaajia on erittäin hankala nykypäivänä löytää.

Kattiloihin on vuonna 2019 tulossa automaatiouudistus sekä uudet polttimet. Automaatiouudistuksessa kattiloiden operointi siirretään vanhasta pulpetista tehtaalla käytettävään DNA-automaatiojärjestelmään. Maakaasupolttimet uusitaan typenoksidipäästöjen pienentämiseksi, koska vuonna 2020 voimaan tulevassa ympäristöluvassa typenoksidien päästörajat tiukentuvat huomattavasti.

4 ELINIKÄSELVITYS

Elinikäselvitys kaasukattiloille K9 – 11 tehdään lisätiedon saamiseksi kattiloiden jäljellä olevasta eliniästä. Kattilat ovat tällä hetkellä jo 42 vuotta vanhoja ja ne joudutaan ennemmin tai myöhemmin korvaamaan uudella kattilalla tai kattiloilla. Elinikäselvityksen tarkoituksena on selvittää kuinka pitkään kattiloilla pystytään tuottamaan höyryä turvallisesti ja hyväksyttävällä käyttövarmuudella.

4.1 Kuntokartoitus

Kuntokartoitus tehdään Kiwa Inspectan toimesta ainoastaan yhdelle K9 – 11 kattiloista, koska tehtaan höyrytarpeiden takia kaikkia kolmea kattilaa ei voida ottaa pois käyttövalmiudesta. Kuntokartoitukseen valittiin kattila K9, koska viimeisen neljän vuoden aikana kattilaa on ajettu lähes tuplasti enemmän kuin kattiloita K10 tai K11. Kattiloissa ei myöskään ole ollut suuria eroja, esimerkiksi lämmönsiirtopintojen vuotojen määrissä tai paikoissa. Lisäksi aikaisemmin tehdyissä tulistimien paksuusmittauksissa K9 kattilan tulistinputket olivat eniten kuluneita. Tässä tutkimuksessa oletetaan että K10 ja K11 ovat samassa kunnossa kuin K9. (Stora Enso, 2017.)

Kuntokartoituksessa tarkastettaviin kohteisiin kuuluvat kattilan tulipesä, höyrystinputket, tulistimet, ekonomaiser, ylä- ja alalieriö sekä kattilasta lähtevän korkeapainehöyryn kokoojatukki. Syöttövesisäiliötä ei sisällytetty tarkastukseen, koska nykyinen käytössä oleva syöttövesisäiliö on valmistettu vuonna 2001. Kattiloilta lähtevää päähöyrylinjaa ei myöskään tarkastettu, sillä sitä ei tehtaan käynnin aikana voi tehdä.

4.1.1 Visuaalinen tarkastus

Visuaalinen tarkastus on nimensä mukainen ilman erityisiä työkaluja tehtävä näkö tarkastus kattilalle. Se perustuu laajalti kokemuspohjaiseen tarkasteluun, jossa tarkastajan täytyy tietää mikä on normaalista kulumisesta poikkeavaa ja minkälaiset asiat aiheuttavat ongelmia tällä hetkellä tai tulevaisuudessa. Tarkastuksessa kattilan lämmönsiirtopinnoista tutkitaan mahdollisten korroosion, eroosion ja kerrostumien muodostumista sekä rakenteellisia

murtumia. Lieriössä tarkastetaan magnetiittikerroksen eheys sekä reikäkenttien ja tiivistehitsien kunto.

Kattilan tulipesässä tehdyssä visuaalisessa tarkastuksessa havaittiin höyrystinputkien olevan pääosin hyvässä kunnossa ilman havaittavaa eroosiota tai korroosiota. Myös tulipesän pohjan massauksen ja putkien kunto on tyydyttävä. Pohjan höyrystinputkisto on etu- ja takaseinän puolelta tuettu palkeilla. Etuseinän edustalta palkeen kohdalta on kattilassa ollut aikaisemmin vuoto. Tarkastuksessa havaittiin, että myös takaseinän luona olevan palkeen päällä olevissa putkissa on mahdollinen lineaarinen indikaatio, joka saattaa aiheuttaa vuodon lähitulevaisuudessa. Palkeen kohdalla oleva höyrystinputki suositellaan vaihdettavaksi ja palkeen rakenne muutettavaksi siten, että kuorma jakautuu tasaisemmin laajemmalle pinta-alalle.

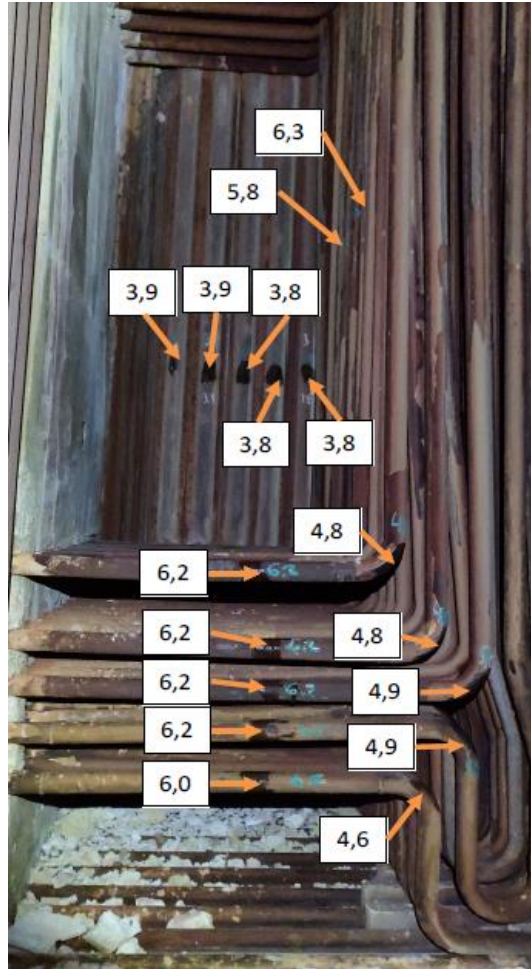
Tulistimien tarkastuksessa huomattiin, että II-tulistimen putket ovat hieman vääntyneet varsinkin tulipesän puoleiselta sivulta. Myös useita putkien välisiä siteitä on vaurioitunut ja irronnut. Tulistinputkien ulkopinnan oksidikerros on paikoitellen lohkeillut, mutta näkyvää korroosiota tai eroosiota ei havaittu. II-Tulistinta ja kokoojatukkia tutkittiin myös sisäpuolelta endoskoopilla. Sisäpinnan oksidi oli monikerroksinen sekä paikoitellen kokonaan irronnut. Tulistimen kokoojatukin sisäpuoleinen magnetiittikalvo oli hyväkuntoinen. Myös ekonomaiserin putkisto näytti tarkastuksessa pääosin hyvältä, vaikka putkien pinnalla oli havaittavissa pientä kerrostumaa.

Lieriöiden tarkastuksessa magnetiittikalvo havaittiin pääosin ehjäksi ja hyväkuntoiseksi lukuun ottamatta paikoittaisia lieviä happikorroosiokuoppia. Ylä- ja alalieriön väliset konvektioputket ovat mankeloitu lieriöiden vaippaan ja tiivistehitsattu lieriöiden sisäpuolelta jälkeinpäin. Tiivistehitsit näyttivät molemmissa lieriöissä visuaalisesti hyvältä. Ylälieriön mankeloinneista osa ei ulottunut koko lieriön seinämävahvuudelle. Mankeloinnin reunoille suoritettiin pistekoemaisesti tunkeumanestetarkastuksia. Vikanäyttämiä ei tarkastuksessa havaittu. Alalieriön etuseinän puoleisen päädyn peti havaittiin antaneen periksi noin viisi senttimetriä, joka on johtanut siihen, että lieriö on hieman vinossa. Alalieriön kautta tutkittuna konvektioputkien hitsauksissa oli havaittavissa pehmeää kerrostumaa ja putkien sisäpuolella oli paikoittain happikorroosiorakkuloita. (Puttonen et al. 2019, 4 – 19.)

4.1.2 Paksuusmittaus

Kattilan lämmönsiirtoputkistolle aiheutuu luonnollista eroosiota savukaasujen virratessa putkiston yli. Vuosien kuluessa kattilan putkisto ohentuu ja minimipaksuuden lähestyessä putkisto täytyy uusida. Paksuusmittauksia tehdään usein säännöllisin väliajoin putkiston kulumisen etenemisen seuraamiseksi. Kattilan putkistolle määritellään rakennusvaiheessa laskennallinen minimipaksuus, joka vaihtelee kattilakohtaisesti paineen, lämpötilojen ja käytetyn putkistomateriaalin ja mitoitusmuotojen mukaan.

Paksuusmittauksia on tehty pistekoemaisesti K9 – 11 kattiloiden tulistimille muutamia vuosien aikana. Viimeiset mittaukset tehtiin elokuussa 2018, joten kuntokartoituksen yhteydessä ei tehty uusia mittauksia. Kuvassa 6 näkyvät II-tulistimen paksuusmittausten tulokset millimetreinä. Vaakatasossa olevat putken pätkät ovat tulipesän puolelta uusittu joitain vuosia sitten. Normaalista kulumista ei ole ehtinyt tapahtumaan yhtä paljon, joten paksuus näissä kohdissa on suurempi. Takaseinällä näkyvät lieriön konvektioputket, joissa paksuudet ovat hieman alle neljä millimetriä. (Oksanen 2018.)



Kuva 6. Kattilan K9 II-tulistimen paksuusmittausten tulokset. (Oksanen, 2018)

Myös ekonomaiserin kylmimmän osan putkiston käyrille ja poltinaukkoa ympäröiville putkille tehtiin pistekoemaisesti paksuusmittauksia. Mittauksissa ei havaittu mitään poikkeavaa. (Oksanen 2018.) Paksuusmittausten tulosten perusteella suurempia korjaustöitä ei ole odotettavissa. Kaikkien putkien paksuudet ovat hyvässä kunnossa ja yli minimirajan. Paksuusmittaustulokset ovat olleet lähes samanlaisia kattiloilla K10 ja K11.

4.1.3 Jäljennetarkastus ja kovuusmittaus

Jäljennetarkastus on ennakoivaa kunnossapitoa, jonka avulla etsitään ja seurataan materiaalin virumisesta johtuvia vaurioita. Viruminen on materiaalin hidasta venymistä lämpötilan, ajan ja voiman vaikutuksista. Virumisesta johtuva venyminen on palautumatonta vaikka olosuhteet muuttuisivatkin. Kuumankestävillä teräksillä viruminen alkaa vasta noin

400 °C asteessa. Viruminen aiheuttaa rakennetta heikentäviä mikroskooppisia säröjä teräksen rakenteeseen. (Tuiremo 2017, 18 – 20.)

Ensimmäinen jäljennetarkastuksen vaihe on hionta, jossa teräksen oksidikerros poistetaan ja hitsin sularaja tasoitetaan. Hiontaa tehdään eri karheusasteilla, jotta lopputulos on riittävän sileä. Ennen jäljennetarkastusta tehdään magneettijauhetarkastus, jolla pystytään tarkastamaan suurempia alueita suhteellisen nopeasti. Magneettijauheella pystytään havaitsemaan yli kahden millimetrin virumis- sekä muut säröt. Jäljennetarkastusta varten pinta kiillotetaan, minkä jälkeen valmistetaan hie. Tarkastettava kohde syövytetään materiaaliin sopivalla hapolla, jotta teräksen mikrorakenne saadaan paremmin esille. Mikrorakenne kopioituu peilikuvana muovikalvolle, kun muovin ja teräksen välissä oleva liuotinaine haihtuu. Tällä tavalla jäljennettä voidaan tutkia myöhemmin paremmissa olosuhteissa optisella mikroskoopilla. (Tuiremo ja Winqvist 2017, 22 – 23.)

Tarkastukset suoritettiin II-tulistimen putkille sekä kokoojatukille. Tarkastuspisteet näkyvät kuvassa 7. II-Tulistimesta tarkastettiin lähimpänä tulipesää oleva putki, jossa kattilan höyry on kuumimmillaan ja ympärillä virtaa tulipesästä poistuva kuumimmillaan oleva savukaasu. Perusainejäljenteissä oli II-tulistimen ja kokoojatukin osalta havaittavissa paljon suuntautuneita raerajakoloja sekä runsaasti karbideja, joka on merkki materiaalin hajaantumisen. Kokoojatukista havaittiin myös muutamia mikrosäröjä. (Puttonen et al. 2019, 4 – 6.)



Kuva 7. II-tulistimen ja kokoojatukin jäljennetarkastuspisteet. (Puttonen et al. 2019, 5)

Kenttäkovuusmittaus on jäljennetarkastuksen lisäksi toinen menetelmä, jolla voidaan arvioida materiaalin tilaa. Tulokset ovat suuntaa-antavia ja vaativat hiotulta pinnalta tarkan karheusasteen, materiaalikohtaisen kalibroinnin sekä kohteeseen soveltuvan

kenttäkovuusmittarin luotettavien tulosten saamiseksi. Kovuuskokeella selvitetään kuinka kovaa tai pehmeää aine on. Mitä pehmeämpää aine, sitä helpommin siihen syntyy painauma. Kenttäkovuusmittaukset tehtiin UCI-mittauslaitteella, joka perustuu Vickers-kovuuskokeeseen. Kovuuskoe toimii timanttipyramidilla kappaleen pintaan tehtyyn painallukseen. Kovuusarvoa varten mittauskohdasta mitataan pintaan jääneen painauman lävistäjät. Pinauman pinta-ala ja kuormitukseen käytetyn voiman suhde antavat kovuusmittauksen tuloksen, jossa käytetään yksikköä HV. Vickers-kovuuskoe soveltuu parhaiten ohuiden ja valmiiden osien kovuusmittaukseen, sillä mittausjälki on huomattavasti pienempi muihin metodeihin verrattuna. (Tuiremo ja Winqvist 2017, 23), (Ansaharju et al. 1994, 200.)

Kenttäkovuusmittauksessa käytettiin ultrasonic contact impedance eli UCI-menetelmää. UCI-anturissa on Vickers-timantti sekä metallitanko, jota sähköinen lähetin väräyttää noin 70 kHz taajuisella pitkittäisaallolla. Metallitankoa kutsutaan nimellä värähtelytanko ja sen toimintaa kuvaillaan kierrejousen kaltaisena. Kahden atomin välinen sidos metallitangossa toimii kuten jousen kierteet. Mitä pehmeämpi materiaali, sitä useampi jousen kierre osuu toisiinsa aiheuttaen resonanssitaajuuden muutoksen. Taajuudenmuutos on siis riippuvainen materiaalin ja Vickers-timantin kosketuspinta-alasta. (Frank 2001, 5.)

Kovuusmittaukset tehtiin II-tulistimella sekä kokoojatukille ja tulokset olivat 127 – 135 HV, jotka ovat valmistuksen aikaisen standardin viitearvojen 140 – 187 HV alapuolella tulistinputken materiaalille 10CrMo910. Jäljennetarkastusten ja kovuusmittausten tulosten perusteella voidaan sanoa, että II-tulistin on elinikänsä loppupäässä. (Puttonen et al. 2019, 4 – 5.)

4.1.4 Näyteputki

Kattilan II-tulistimesta otettiin myös alkuperäisestä tulistinputkesta näyteputki kohdasta, jossa savukaasu ja höyry ovat kuumimmillaan. Näyteputken irrotuskohta näkyy kuvassa 7 merkattuna numerolla yksi. Putkelle suoritettiin visuaalinen tarkastelu, mikrorakennetutkimus, kovuusmittaus, vetokoe sekä sisäpuolisen oksidikalvon paksuudenmittaus. Näytepala oli noin 160 mm pitkä ja sen ulkopinnalla oleva oksidikerros

oli paikoin lohkeillut, mutta silmin havaittavaa korroosiota ei ollut. Näyteputki on esitettyä kuvassa 8. (Tuiremo 2019, 1 – 2.)



Kuva 8. II-tulistimen näyteputki. (Tuiremo 2019, 2)

Näyteputken sisäpinta oli huonokuntoinen. Pinnan oksidikerrostuma oli kuoppainen, paksu sekä paikoittain lohkeillut. Lisäksi sisäpinnalle oli kertynyt ruostetta. Näyteputken sisäpinta näkyy kuvassa 9. (Tuiremo 2019, 2 – 3.)



Kuva 9. Näyteputken sisäpinnan oksidi- ja ruostekerrostumat. (Tuiremo 2019, 3)

Vetokoetta varten näyteputkesta valmistettiin koesauva. Kokeen tuloksena näyteputken myötölujuus oli pienempi kuin standardin DIN 17175 minimiarvot. Lisäksi näytesauvan venymä oli suurempi kuin standardissa sallittu määrä. Kovuusmittauksessa näyteputken kovuusprofiili mitattiin kahdesta mittalinjasta. Linja 1 oli alueella, jossa mikrorakenteen hajoaminen oli edennyt pisimmälle ja linja 2 alueelta, jossa mikrorakenne oli vähiten hajonnut. Kovuusprofiili mitattiin yhden millimetrin välein putken ulkopinnalta sisäpintaa kohden. Materiaalin kovuudet olivat osittain viitearvojen alapuolella. Tulokset ovat yhteneviä mikrorakenteen havaintojen sekä kentällä tehtyjen kovuusmittausten kanssa.

Mikrorakenteen tutkimista varten näyteputkesta valmistettiin poikkileikkaushie. Hieen perusteella putken mikrorakenne oli selvästi hajaantunut. Pahimmillaan hajaantuminen oli kohdissa, joissa myös putken ulkopuolen oksidi oli lohjennut. Poikkileikkaushieistä määriteltiin myös putken sisäpuolen oksidikalvon paksuudet. Oksidikalvo oli kerrostunutta, sisälsi huokoisuutta sekä merkittävän paksu. Paksuus vaikuttaa putken lämmönsiirtokykyyn ja nostaa putken lämpötilaa, joka edistää materiaalin virumista. (Tuiremo 2019, 3 – 6.)

4.2 Kuntokartoituksen yhteenveto

Kuntokartoituksen perusteella merkittävin kattilan elinikään vaikuttava tekijä on II-tulistimen putkiston sekä kokoojatukin pitkälle edennyt viruminen. Lisäksi paksun oksidikalvon takia lämmönsiirto ei toimi suunnitellulla tavalla ja putkimateriaalin lämpötila nousee. Tulistinputkissa on myös tapahtunut merkittävää lujisuuden laskua, mikä altistaa putkiston nopeammalle virumisvaurioiden etenemiselle.

Tulevaisuudessa vuotoja on odotettavissa lieriöiden välisissä konvektioputkissa, joissa osa mankeloinnista ei ulotu koko lieriön seinämävahvuudelle. Pohjan höyrystinputken alla olevan palkeen ympärillä kuorma jakautuu pienelle alueelle. Lisäksi alalieriön painuminen alaspäin jatkuu, kun sitä tukeva betonipeti murenee. Tehtaalla käytettävän puhtaan veden ansiosta lieriöiden ja konvektioputkien kunto on hyvä, eikä paikoittaisen happikorroosion odoteta etenevän. (Puttonen et al. 2019, 20.)

Kiwa Inspectan antamat toimenpidesuositukset tarkastuksen jälkeen ovat:

- II-Tulistimen ja kokoojatukin uusinta tai vähintään virumisvaurioiden etenemisen seuranta jäljennetarkastusten ja kovuusmittausten avulla.
- Pohjan höyrystinputken uusinta takaseinän palkeen kohdalta mahdollisen tulevan vuodon estämiseksi sekä palkeen muutos siten, että kuorma jakaantuu laajemmalle alueelle.
- Alalieriön betonipedin korjaus, jotta lieriön toisen päädyn vajoaminen saadaan loppumaan. (Puttonen et al. 2019, 20.)

5 UUDEN KATTILAN POLTTOAINE

Käytettävällä polttoaineella on suuri vaikutus kattilan tyyppiin. Ennen kattilatyypin valitsemista on tiedettävä käytettävä polttoaine. Tässä osiossa käydään läpi Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia ja niiden soveltuvuus Imatran tehtaiden voimalaitoksen uuteen kattilaan. Tarkastelusta on jätetty pois öljy ja hiili, sillä fossiilisista polttoainevaihtoehdoista tehtaalla on jo yhteys maakaasuverkostoon. Uuden kattilan liittäminen maakaasuverkostoon on huomattavasti helpompaa ja edullisempaa kuin öljyn tai hiilen käyttö ja varastointi.

Polttoaineiden saatavuutta määrittelee erittäin vahvasti tehtaan sijainti. Taloudellisesti kannattavaa toimitussädettä pidetään kiinteillä biopolttoaineilla noin sadassa kilometrissä. Imatra sijaitsee polttoaineiden saatavuuden kannalta osittain hankalalla paikalla, koska suuri osa toimitusalueesta on Saimaata ja toinen osa on Venäjän puolella. Tästä syystä mahdollisten polttoaineiden saatavuus ja riittävyys Imatran tehtaille täytyy selvittää tarkkaan ennen investointia.

5.1 Polttoaineen tarve

Uuden kattilan käyttö tulee oletettavasti olemaan taloudellisesti kannattavampaa kuin K12 kattilan käyttö. Tällöin uusi kattila ohittaa K12 kattilan käynnistysprioriteetissa, joten ajoaikaa uudelle kattilalle kertyy vuodessa arviolta yhtä paljon kuin K12 kattilalle. Taulukossa 1 on lista K9 – K12 käyttötuntien ja maakaasun kulutuksen keskiarvoista vuosien 2013 – 2017 ajalta.

Taulukko 1. K9 - K12 Käyttötuntien ja maakaasun kulutuksen keskiarvot viimeisen viiden vuoden ajalta. (Stora Enso 2017)

Kattila	Käyntitunnit (h/a)	Maakaasun kulutus (1000*m ³ /a)	Maakaasun kulutus (GWh/a)
K9	1011	2780	28
K10	597	2200	22
K11	434	1620	16
K12	4562	20800	211

Taulukon 1 perusteella uutta kattilaa tullaan ajamaan noin 4 600 tuntia vuodessa. Tämä tarkoittaa sitä, että kattila tulee seisomaan noin 4 000 tuntia vuodessa. Pitkät seisonta-ajat tuovat haasteita mahdollisen polttoaineen sekä kattilan säilönnän kannalta. Mikäli uutta kattilaa on taloudellisesti kannattavampaa käyttää kuin K12 kattilaa, vähenevät K12 kattilan ajotunnit noin kahteen tuhanteen vuodessa.

Käytetyn maakaasun keskiarvo viimeisen viiden vuoden ajalta esitetään myös taulukossa 1. K9 – 11 ovat kooltaan 52 MW/kattila, joten uusi kattila tulisi olemaan samankokoinen eli noin 150 MW. Uusi kattila tulee siis keskimäärin viemään yhtä paljon polttoainetta, kuin K12 ja yksi K9 – 11 kattiloista, jos hyötysuhteen muutosta uuden ja vanhojen kattiloiden välillä ei oteta huomioon. Vuosittain tarvittava uuden kattilan polttoainetarve lasketaan K12 kattilan kulutuksen ja K9 – 11 kattiloiden kulutusten keskiarvoilla kaavassa 1.

$$210\,708\text{ MWh} + \left(\frac{28\,084\text{ MWh} + 22\,195\text{ MWh} + 16\,339\text{ MWh}}{3} \right) \quad (1)$$

$$\approx 230\,000\text{ MWh}$$

Uusi kattila tarvitsee siis keskiarvolta vuosittain 230 GWh:n edestä polttoainetta. Polttoaineen tarve muuttuu riippuen uuden kattilan hyötysuhteesta. Lisäksi laskussa ei ole otettu huomioon tilannetta, jossa K9 – 11 kattiloista on kaksi tai useampi päällä. Edellä mainitut tilanteet ovat kuitenkin vuositasolla harvinaisia, joten tarkempaa laskua polttoaineen tarvittavalle määrälle ei tarvitse tässä vaiheessa tutkimusta suorittaa. Uuden kattilan polttoaineen tarvetta pyöristetään hieman ylöspäin noin 250 gigawattituntiin vuodessa vastaamaan todellista polttoainetarpeen määrää.

5.2 Kuori

Kuorta Imatran tehtailla saadaan kuorimolta, kun sellunkeittoon kelpaamaton kuori irrotetaan puusta ennen haketusta. Runkopuusta kuorta on noin 10 % ja oksissa jopa 60 %. Kuoren lämpöarvot vaihtelevat puulajin mukaan ja ovat pääsääntöisesti lehtipuilla korkeammat. Yleensä kuorta käytetään metsäteollisuuslaitosten tai lämpökeskusten kattiloissa. Kuoren poltto-ominaisuuksia voidaan parantaa puristamalla tai kuivaamalla. Kuivaus tapahtuu lämmön avulla ja puristaminen poistaa kosteutta mekaanisesti. Kuori sopii

myös hyvin sekoituksena muiden polttoaineiden kanssa. Lämpöarvoa kuorella on noin 0,6 – 0,7 MWh/i-m³ puulajista riippuen. (Alakangas et al. 2016, 81 – 82.)

Imatran tehtaiden kuorikattila käyttää keskimäärin vuosittain noin 480 000 tonnia kuorta, joista kaikki saadaan tehtaan kuorimoilta. Kuorta myydään myös tehtaan ulkopuolelle 30 000 – 50 000 tonnia vuosittain (Stora Enso, 2017). Mikäli myynti lopetettaisiin, voitaisiin tehtaalla nostaa kuoren polton määrää tämän verran. Määrä on kuitenkin pieni ja viime vuosina kuoren määrä tehtaan kuorikentällä on talven loppupuolella käynyt erittäin vähiin. Näistä syistä voidaan olettaa, mikäli uusi kattila käyttäisi kuorta polttoaineena, että kaikki kuori täytyy ostaa tehtaan ulkopuolelta.

Saatavuudeltaan kuori on heikossa asemassa Imatralla. Tehtaalta kuorta on myyty Imatran Lämpö Oy:lle kaukolämmöntuotantoon, mutta vuoden 2018 loppupuolella myynti lopetettiin toistaiseksi, koska kuori on meinannut loppua tehtaan kuorikentältä. Kuorta on korvattu ostamalla rankahaketta ja muita polttoaineita tehtaan ulkopuolelta. Tehtaan toimitussäteen sisällä kuorta ei ole tarjolla tarpeeksi uuden kattilan polttoainetarpeiden tyydyttämiseksi. (Kaukoaho, 2019.) Tästä syystä pääosin kuorta polttavan kattilan rakentamista ei pidetä hyvänä vaihtoehtona.

5.3 Hake

Polttoon menevä hake valmistetaan hakettamalla puuta. Haketyypit voidaan jakaa eri laatuihin haketetun puumateriaalin mukaan. Laatuihin kuuluu muun muassa kokopuu-, ranka-, kanto- ja hakkuutähdehake. Kokopuuhake tehdään kokonaisista puista, kun taas rankahaketta valmistetaan ainoastaan karsituista rangoista. Kantohakkeeseen kuuluu puunkannoista tehty hake tai murske ja hakkuutähdehakkeeseen kuuluvat haketetut hakkuutähteet eli latvat, oksat ja raivauspuut. Polttoon menevän hakkeen tärkeimmät ominaisuudet ovat kosteus, lämpöarvo, tiheys ja palakokojakauma. Yhden irtokuutiometrin kuiva-ainesisältö vaihtelee huomattavasti hakkuupaikasta ja puulajista riippuen. (Alakangas et al. 2016, 66.)

Hakkeita varten on luotu puupolttoaineiden laatuohje, joka perustuu kansainvälisiin tai eurooppalaisiin kiinteiden polttoaineiden standardeihin. Standardissa määritellään

polttoaineen laatu ja energiamäärä. Laatustandardilla varmistetaan, että hake on palakooltaan ja kosteuspitoisuudeltaan etukäteen sovitun mukaista. Hakkeessa ei saa myöskään olla mukana sammalta, kiviä, metallia, pitkiä tikkuja tai oksia. (Alakangas ja Impola 2014, 17 – 22.)

Hakkuutähteitä muodostuu esimerkiksi paperiteollisuutta varten kerättävien harvennuspuiden hakkuualueilta. Hakkuutähteen koostumus ja määrä vaihtelevat hakkuukohteittain. Suurimmat vaikuttavat tekijät ovat puulaji, puuston järeys, oksaisuus ja lahon määrä. Kuusikkojen hakkuutähdekertymä on huomattavasti suurempi koivikkoon tai männikköön verrattuna. Hakkuutähteitä kuivatetaan usein 2 – 6 viikkoa ennen korjausta, jolloin suuri osa neulasista ja osa kuoresta jää hakkuualalle ravitsemaan metsää. Kuivauksen aikana korjattavan hakkeen määrä pienenee lähinnä pudonneiden neulasten takia noin 20 – 30 %, mutta kuiva-aineen osuus kasvaa. Kosteus hakkuutähteillä on normaalisti noin 50 – 60 %, mutta kesäaikana kuivatuksen avulla kosteusprosentti voi laskea alle 30:n. Vaihtelevan kosteusprosentin takia hakkuutähdehakkeen energiatiheysarvot vaihtelevat noin 0,6 – 1 MWh/i-m³ välillä (Alakangas et al. 2016, 73). Hakkuutähteet soveltuvat erityisesti suurille monipolttoainekattiloille, jotka ovat suunniteltu märälle puupolttoaineelle. Pieninä määrinä hakkuutähteitä olisi hyvä säilyttää katoksen alla, jolloin kosteusprosentin nousu varastoinnin aikana pystytään välttämään. Suurina määrinä haketta voi säilyttää taivasalla. Neulasissa olevat ravinnepitoisuudet alentavat tuhkan sulamislämpötilaa, mikä täytyy ottaa huomioon kattilaa suunniteltaessa. Esimerkiksi leijupetikattilassa sulava tuhka voi aiheuttaa hiekkapedin sintraantumisen. Polton kannalta on parempi, että neulaset jäisivät metsään, koska niiden sisältämät natrium-, kalsium- ja kaliumpitoisuudet voivat palaessa aiheuttaa korroosioaurioita kattilan lämmönsiirtopinnoissa. (Alakangas et al. 2016, 68 – 75.)

Kokopuu- ja rankahake valmistetaan hukkarunkopuiden tai teollisuudelle kelpaamattomien pienpuiden rungoista. Nämä haketyypit haketetaan kuorineen ja ovat Suomessa suurin pienpuuhakkeen lähde. Eniten kokopuuhaketta käytetään kiinteistöjen lämmitykseen ja pienemmissä kaukolämpökeskuksissa, joissa vaatimukset polttoaineelle ovat tiukemmat verrattuna suurempiin laitoksiin. Polttoon kokopuu- ja rankahake sopivat ominaisuuksiltaan hyvin. Ne ovat tasalaatuisempia ja lämpöarvoltaan suurempia kuin metsätähdehakkeet. Tehollinen lämpöarvo eri Suomessa esiintyvien puiden ranka- ja kokopuuhakkeissa vaihtelee 18,65 – 19,53 MJ/kg välillä, joista keskiarvoksi saadaan 19,15 MJ/kg. Yleinen

hakkeen tiheys on noin 400 kg/m^3 (Alakangas et al. 2016, 68), josta laskemalla saadaan 50 %:n kosteudella kokopuu- ja rankahakkeen energiatiheudeksi noin $1,1 \text{ MWh/i-m}^3$. (Alakangas et al. 2016, 75 – 79.)

Kannoista haketta valmistetaan murskaamalla poistettuja kantoja esimerkiksi tie- ja rakennustyömailta tai päätehakkuualueilta. Kantojen mukana saattaa kulkeutua maa-ainesta, joka nostaa kantohakkeen tuhkan osuuden huomattavasti suuremmaksi muihin haketyyppeihin verrattuna. VTT:llä tehdyn tutkimuksen mukaan kantomurskeen tehollinen lämpöarvo on keskimäärin $19,3 \text{ MJ/kg}$, kuiva-ainetiheys 182 kg/i-m^3 ja kosteus 34 %. Näistä arvoista saadaan kantohakkeen energiatiheudeksi laskettua $0,64 \text{ MWh/i-m}^3$. (Alakangas et al. 2016, 83.)

Imatran tehtaiden uudella kattilalla käytettävä hake olisi pääosin metsätähdehaketta. Rankapuuhakkeen osto on tällä hetkellä vaikeassa asemassa valtion avustukseen liittyvien byrokratioiden takia. Rankapuuhake vaatii esimerkiksi kuormakohtaisen jäljitettävyyden järjestämistä, kun haketta toimitetaan sähköä ja lämpöä tuottavalle laitokselle. Kantojen haketukseen liittyy tällä hetkellä voimakkaita ympäristöpaineita, minkä takia kantoja ei tällä hetkellä kerätä hakkuualueilta. Lisäksi kantomurske sisältää parhaimmillaankin noin viisi prosenttia kiveä, multaa tai muuta palamatonta maa-ainesta. Mikään ei kuitenkaan estä tilanteen muuttuessa myös muiden haketyypien käyttöä. Stora Enson metsäenergiapäällikön mukaan 250 GWh:n edestä metsätähdehaketta on mahdollista toimittaa Imatran tehtaille tulevaisuudessa noin 100 kilometrin toimitussäteen sisäpuolelta. (Kaukoaho, 2019.)

5.4 Pelletit ja brikitit

Pelletit ja brikitit tehdään mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteista purusta, hiontapölystä ja kutterinlastusta. Raaka-aineena voidaan käyttää myös kuorta, biomassaa tai metsähaketta. Näissä tapauksissa polttoaine täytyy kuivata ennen pelletointia. Sideaineita pellettien tai brikkettien tekoon ei tarvita, koska puussa oleva ligniini pitää puristeet koossa itsestään. (Alakangas et al. 2016, 94 – 95.)

Pellettien jauhatuksessa raaka-aine jauhetaan vasaramyllyllä sopivan kokoiseksi puruksi. Tämän jälkeen purut puristetaan yhteen pellettipuristimella, jossa lämpötila nousee jopa 90 °C asteeseen. Tässä lämpötilassa puun ligniini sulaa, mikä toimii liiman tavoin ja pitää pelletit kasassa. Pelletintekoprosessin viimeisessä vaiheessa eli seulonnassa erotetaan jäljelle jäänyt raaka-ainepuru, joka johdetaan takaisin prosessin alkuvaiheisiin. Tällä tavalla lopputuloksesta saadaan tasalaatuinen polttoaine, joka ei aiheuta ongelmia voimalaitoksen poltto- tai kuljetuslaitteistoissa. Puupellettejä käytetään usein suurkiinteistöjen ja maatilojen lämmitykseen. Suuremmissa teollisuuden kattiloissa pelletit murskataan ennen kattilaan syöttämistä, jolloin palaminen tapahtuu pölypolttona. Pellettien halkaisija Suomessa on noin 8 mm ja pituus vaihtelee 10 – 30 mm välillä. Kosteusprosentti pelleteillä on 6 – 10 % ja energiatiheys on keskimäärin noin 3 MWh/i-m³. Kansainvälinen laatustandardi SFS-EN ISO 17225-2:2014 määrittelee pelletin laadun. Eri laatuluokkia on useita erikseen pienen kokoluokan käyttöön sekä suuremman kokoluokan teollisuuskäyttöön. Tärkeimmät ominaisuudet ovat kosteus, mekaaninen kestävyys ja hienoaineksen määrä. (Alakangas et al. 2016, 95 – 97.)

Briketit ovat suurempia kuin pelletit ja muodoltaan lieriömäisiä tai tiiliskiven muotoisia. Pienimmät kappalekoot briketeillä ovat yleensä 50 – 75 mm. Ne valmistetaan purusta, kutterinlastuista ja/tai hiontapölystä puristamalla. Suomessa brikettejä käytetään lähinnä lämpölaitosten arinakattiloissa ja tulisijoissa. Lämpöarvo ja kosteus ovat samaa luokkaa kuin pelleteillä, mutta suuremman irtotiheyden ansiosta energiatiheys on suurempi noin 5,5 MWh/i-m³. (Alakangas et al. 2016, 94.)

Pellettien energiatiheys on huomattavasti suurempi verrattuna hakkeeseen ja kuoreen. Tämä nostaa polttoaineen toimitussädetä ja vähentää tehtaalle tulevaa rekkaliikennettä huomattavasti hakkeeseen verrattuna. Pellettien riittävydestä Imatran tehtaille täytyisi tehdä laajempaa tutkimusta. Uusi kattila olisi kokoluokaltaan pellettikattilaksi hyvin suuri. On kuitenkin mahdollista, että pellettejä riittäisi Imatran tehtaille tulevaisuudessa. Varsinkin, jos Stora Enson sisäistä voimalaitoskäyttöön soveltuvaa pelletin tuotantoa kasvatetaan tulevaisuudessa. (Kaukoaho, 2019.) Stora Enso valmistaa tällä hetkellä pellettejä ympäri maailmaa kahdeksalla eri sahalla, joista Suomessa sijaitsee kaksi. Nämä sahat valmistavat premium-laadun pellettejä, jotka täyttävät pellettistandardin vaativimmatkin ehdot. Premium-pelletit soveltuvat parhaiten pienikokoiseen kotitalouskäyttöön ja ovat laadultaan

liiankin hyviä voimalaitokselle. Mikäli pellettejä alettaisiin käyttämään Imatran tehtailla, on mahdollista lisätä firman sisäistä teollisuuteen sopivien pellettien tuotantoa. Tämä saattaa vaikuttaa myös positiivisesti polttoaineen hintaan, sillä polttoainetta pystyttäisiin myymään ja ostamaan yhtiön sisäisesti. (Väyrynen, 2018.)

5.5 Peltobiomassat

Peltobiomassojen käyttö energialähteenä sisältää monia eri polttoainemahdollisuuksia. Monia kasveja voidaan käyttää esimerkiksi dieselöljyn, etanolin sekä bensiinin osakomponenttien tuotantoon. Viljeltäviä biomassoja voidaan polttaa myös kiinteässä muodossa esimerkiksi viljaa, olkea, jyviä, öljykasveja, ruokohelmiä ja järviruokoa. (Alakangas et al. 2016, 130.)

Viljaa ja olkea voidaan käyttää maatilojen lämmitykseen tai lämpökeskusten polttoaineena. Olki on palamisominaisuuksiltaan hyvin paljon puun kaltainen, mutta oljen irtokuution tiheys on erittäin alhainen $30 - 40 \text{ kg/i-m}^3$, joka tekee sen kuljetuksesta ja säilönnästä hankalaa. Lisäksi suuri tuhkapitoisuus ja alhainen tuhkan sulamislämpötila tekevät siitä vaikeasti käytettävän polttoaineen. Jyvät täytyy polttaa oljista erikseen suurten palamisominaisuuserojen takia. Harvemmin käytettyjä öljykasveja rypsiä, rapsia ja pellavaa voidaan myös polttaa kiinteässä muodossa. Öljykasvien lämpöarvo on samaa luokkaa puun ja oljen kanssa, mutta kärsivät kuitenkin samoista polttoon liittyvistä ongelmista kuin olki ja vilja. (Alakangas et al. 2016, 131 – 135.)

Parhaiten peltobiomassoista voimalaitoskäyttöön soveltuvat ruokohelmi ja järviruoko. Viljeltyjen ruokohelpilajikkeiden sato on ollut yli 10 kuiva-ainetonna hehtaaria kohden, joka on yli viisi kertaa suurempi edellisessä kappaleessa esiteltyihin öljykasveihin verrattuna. Poltto-ominaisuuksiltaan ruokohelmi on puupolttoaineeseen verrattuna kuivempaa ja täten lämpöarvoltaan parempaa. Ruokohelpipaalin tiheys vaihtelee $108 - 171 \text{ kg/i-m}^3$ välillä ja sen palamisominaisuudet sekä alkuainepitoisuudet vaihtelevat kasvualustan ja sadonkorjuuajankohdan mukaan. Ruokohelven tuhkapitoisuus on huomattavasti korkeampi puuhun verrattuna. Järviruoko on kaikilta ominaisuuksiltaan hyvin samanlainen ruokohelven kanssa, mutta viljelystä tekee hankalaa se, että kasvista puolet kasvaa veden alla. (Alakangas et al. 2016, 139 – 145.)

Peltobiomassojen palamisominaisuuksien ja muiden edellä mainittujen hankaluuksien takia peltobiomassa ei sovellu polttoaineeksi Imatran tehtaille. Uuden kattilan koko on liian suuri ja vaatisi suuria määriä poltettavaa peltobiomassaa. Peltobiomassat soveltuvat paremmin pienimuotoisiin lämmitystarkoituksiin. Lisäksi tarvittava pinta-ala peltobiomassojen viljelyyn kilpailee aina ruoan tuotantoon käytettävästä viljelymaasta. Tästä syystä halukkuus sijoittaa peltobiomassan tuotantoon on usein vähäistä.

5.6 Maakaasu

Maakaasu on syntynyt luonnollisista lähteistä tuhansien vuosien kuluessa tai syntyy öljyn tuotannon sivutuotteena. Suomeen tulevassa maakaasulinjassa kulkee Siperiasta kerättyä maakaasua. Kaasussa on vähintään 98 % metaania. Loput kaksi prosenttia ovat pieniä määriä etaania, propaania, butaania, typpeä ja hiilidioksidia. Maakaasun siirtoverkosto kulkee Venäjältä Imatran kautta Mäntsälään, josta putkilinja jakautuu Helsinkiin, Lohjalle ja Tampereelle. Lisäksi Kouvolasta on rakennettu yhteys Kotkaan (Gasum, 2018). (Alakangas et al. 2016, 186.)

Maakaasu sopii erittäin hyvin polttoon. Palaminen on lähes aina täydellistä, eikä aiheuta kattilassa likaantumista tai tuhkaa. Kaasua polttavat kattilat eivät myöskään tarvitse savukaasujen puhdistusjärjestelmiä. Kaasua ei myöskään tarvitse varastoida, kunhan laitos sijaitsee maakaasulinjan läheisyydessä. Maakaasun lämpöarvo vaihtelee vuoden aikana muutamia sadasosia ja se on ollut vuonna 2018 Gasumin sivuston mukaan ollut $36,4 \text{ MJ/m}^3$ (Gasum, 2018). Maakaasuverkostoon syötetään myös pieniä määriä biokaasua, jota on mahdollista ostaa korkeammalla hinnalla. Syötetyn kaasun määrä on kuitenkin niin pieni, ettei pelkästään sen ostaminen sovellu näin suureen voimalaitoskäyttöön.

Mikäli uusi kattila käyttää maakaasua polttoaineena, ei polttoaineen kulutus tehtaalla lisäännny ollenkaan. Todennäköisesti kulutus laskee olettaen, että nykyaikaisessa kattilassa hyötysuhde on parempi kuin vuonna 1977 ja 1992 rakennetuissa kaasukattiloissa.

5.7 Turve

Turve muodostuu vuosien aikana kuolleista kasveista, jotka eivät hajoa täysin hapen puutteen ja runsaan veden takia. Polttoon menevää turvetta on kahta eri mallia pala- ja jrsinturvetta. Noin 90 % käytetystä turpeesta on jrsinturvetta. Tärkeimmät turpeen ominaisuudet ovat kosteus, palakoko ja tiheys. Turvepolttoaineiden laatu luokitellaan NT ENVIR 009:n mukaan. Laatuluokittelussa otetaan huomioon muun muassa palakoko, lämpöarvo, kosteus, tuhkan määrä sekä rikkipitoisuus. Suomessa turvetta käytetään esimerkiksi kaukolämpölaitoksissa sekä yhdyskuntien ja teollisuuden voimalaitoksissa. (Alakangas et al. 2016, 116 – 119.)

Jrsinturpeen valmistuksessa turvekentän pinnalta kerätään ohut kerros turvetta, joka on kuivatettu auringossa. Turvetta poltetaan yleensä puun tai kierrätyspolttoaineiden kanssa seoksena. Jrsinturpeen kosteus on noin 45 % ja energiatiheys noin 0,9 MWh/m³. (Alakangas et al. 2016, 117.)

Palaturpeen valmistuksessa kenttään jrsitään ura, josta irtoava turve puristetaan ja tiivistetään palaturpeeksi. Palaturvetta kuivataan kentällä usein noin 35 % kosteuteen. Tyypillisesti palaturve on lieriön, kuution tai lainepalan muotoisia alle 80 millimetriä halkaisijaltaan olevia kappaleita. Energiatiheys palaturpeella on matalamman kosteusprosentin ansiosta hieman korkeampi kuin jrsinturpeella noin 1,2 MWh/m³. (Alakangas et al. 2016, 118.)

Turve soveltuu hyvin seospolttoaineeksi puun kanssa. Stora Ensolla turvetta poltetaan Oulun, Veitsiluodon ja Heinolan tehtailla. Näillä tehtailla yritetään kuitenkin päästä turpeen poltosta eroon. Fossiilisena polttoaineena turve ei ole houkutteleva vaihtoehto, eikä Imatran toimitussäteen sisäpuolella ole suurempia turvemaita tarjolla. Näistä syistä turvetta ei tulla polttamaan Imatran tehtaiden uudessa kattilassa. (Kaukoaho, 2019.)

5.8 Kierrätyspolttoaineet

Suomen ja EU:n lainsäädännön mukaan jätteet tulee ensisijaisesti kierrättää, mikäli tämä ei ole ympäristösyistä tai taloudellisesti mahdollista, voidaan jätteet hyödyntää polttamalla.

Lämpö- ja voimalaitosten polttoaineita korvaava jäte voi olla yritysten, teollisuuden tai yhdyskunnissa lajiteltua kuivaa polttokelpoista materiaalia. Parhaiten energiakäyttöön soveltuvat teollisuuden ja kaupan paperi-, pakkaus-, ja muovijätteet. Yhdyskuntajätteestä poltetaan Suomessa noin 50 prosenttia. Polton osuus on kasvanut viimeisen kymmenen vuoden aikana paljon ja kaatopaikkajätteen määrä on vähentynyt samassa suhteessa, eli käytännössä kaikki poltettu jäte on pois kaatopaikoilta. (Alakangas et al. 2016, 148.)

Kierrätyspolttoaineiden (SRF, Solid Recovered Fuel) energiakäytön haittapuolina ovat polttoaineen vastaanottoon ja käsittelyyn liittyvät investoinnit sekä polttoaineen suuret laatuvaihtelut ja niistä johtuvat tekniset riskit. Puhdasta polttoprosessia varten on tiedettävä polttoaineen ominaisuudet tarkasti, ettei ympäristövaikutuksiin liittyviin laitteisiin synny toimintahäiriöitä. Laatuvaihtelu johtuu suureksi osaksi kierrätyspolttoaineen keräyspaikkojen sijainneista, joissa jätteen raaka-ainekoostumus voi vaihdella paljonkin. Keskimääräinen koostumus energiajätteelle on noin 46 % paperia/kartonkia, 33 % muovia, 15 % epäpuhtauksia, 4 % puuta ja 2 % muuta palavaa materiaalia. Esimerkiksi muutokset polttoaineen muovin osuudessa muuttavat polttoaineen kosteutta ja lämpöarvoa huomattavasti. (Alakangas et al. 2016, 150 – 151.)

Tärkeimmät ominaisuudet kierrätyspolttoaineelle ovat palakoko, kosteus, epäpuhtaudet ja kemiallinen koostumus. Epäpuhtaudet muodostuvat esimerkiksi metalleista ja lasista. Kemialliseen koostumuksen vaikuttavimmat tekijät ovat esimerkiksi klooripitoisuus sekä alumiinin ja raskasmetallien osuus polttojätteestä. Polttoaineen tasalaatuisuuteen vaikuttava tärkein muuttuja on palakoko. Polttoaineen syötettävyys ja palaminen onnistuvat parhaiten kun poltettavat kappaleet ovat samankokoisia. Korkeilla yli 480 °C asteen lämpötiloilla täytyy ottaa huomioon kierrätyspolttoaineen klooripitoisuuden aiheuttama kuumakorrosioriski. Myös muut raskasmetallit aiheuttavat kattilan likaantumista ja mahdollisia ympäristöpäästöjä sekä vaikeuttavat tuhkan hyötykäyttöä. Polttoaineseoksena käytettäessä jätteessä olevat aineet saattavat reagoida muun polttoaineen tuhkien kanssa ja muuttaa niiden sulamiskäyttäytymistä. Jätteen mukana kulkeutuu usein myös alumiinia, joka sulaa jo 660 °C asteessa. Alumiini muodostaa sulaessaan oksidikalvon peittämiä pisaroita, jotka tarttuvat helposti kattilassa lämmönsiirtopintaan aiheuttaen korroosiota ja jopa mahdollisia tukkeutumia. (Alakangas et al. 2016, 149 – 151.)

Lassila & Tikanojan suorittaman tutkimuksen mukaan vuosina 2006 – 2014 kierrätyspolttoaineen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa on keskiarvolta 17,9 MJ/kg välillä ja kosteus 20,2 %. Tulevaisuudessa on mahdollista, että suurempi osa pahvista, paperista ja muovista ohjautuu kierrätykseen, jolloin polttojätteen koostumus ja lämpöarvo ovat huomattavan erilaiset. (Alakangas et al. 2016, 151 – 152.)

Kierrätyspolttoaine on hyvin hankalaa, likaannuttavaa ja laadultaan vaihtelevaa polttoainetta. Lisäksi muodostuvan tuhkan määrä on suuri. Leijupetipoltossa on todettu, että kattilan huoltotarve sekä kunnossapitokustannukset nousevat kierrätyspolttoaineiden käytön takia. Myös kattilan polttoaineen syöttölaitteistoihin, savukaasujen puhdistukseen ja päästömittauslaitteistoon tarvitaan lisäinvestointeja kierrätyspolttoaineita varten. (Vesanto et al. 2007, 3 – 4.) Lisäksi petihiekkaa täytyy uusia huomattavasti enemmän muihin polttoaineisiin verrattuna. Savukaasujen puhdistukseen ei riitä pelkästään esimerkiksi sähkösuodatin, vaan suodattimen lisäksi tarvitaan myös savukaasupesuri. Lisäksi huoltoseisokkien määrä lisääntyy kattilan likaantumisen takia. (Nuutinen, haastattelu 14.2.2019.) Näiden edellä mainittujen syiden takia kierrätyspolttoainetta ei tulla polttamaan Imatran tehtailta tulevaisuudessa. Yksi uuden kattilan tärkeimmistä ominaisuuksista on käyttövarmuus, jota kierrätyspolttoaineiden käyttö ei paranna. Kierrätyspolttoaineiden poltto soveltuu paremmin erilliselle voimalaitokselle kuin sellutehtaalle.

6 UUDEN KATTILAN TYYPPI

Uuden kattilan suunnittelua toteutetaan eri polttoainevaihtoehtojen ja kokoluokan perusteella. Kattilan täytyy pystyä korvaamaan K9 – K11 kattiloilla tuotettu höyry. Kaikkia kolmea kattilaa on pidetty samaan aikaan päällä muutamia kertoja viime vuosien aikana. Syyt ovat liittyneet usein soodakattila 6:lla esiintyneisiin ongelmiin ja seisokkeihin. Lisäksi ongelmat höyrylinjoissa ovat aiheuttaneet muutamia suunnittelemattomia höyrykatkoja tehtaan eri osastoilla. Näitä tilanteita ei pystytä kuitenkaan poistamaan rakentamalla suurempaa uutta kattilaa. Kattilan täytyisi olla niin suuri, että se pystyisi korvaamaan koko soodakattila 6 höyrytuotannon. Tämä ei ole missään nimessä taloudellisesti kannattavaa ja höyrypulatilanne on kuitenkin harvinainen, että suuremman höyrytuotantokapasiteetin rakentamiseen ei ole syytä. Tämä tarkoittaa sitä, että kattilan täytyy olla teholtaan suurin piirtein samankokoinen kuin K9 – 11 yhteensä, eli noin 150 MW.

Kattiloiden K9 – 11 yhteenlaskettu höyryn tuotantokapasiteetti on noin 54 kg/s, joka täytyy pystyä tuottamaan myös uudella kattilalla. Uudella kattilalla sähkön tuotannon ja energiatehokkuuden kannalta on järkevämpää tuottaa tehtaalla käytössä olevaa korkeamman paineluokan noin 520 °C asteista ja paineeltaan 8,4 MPa HKP-höyryä. Tällöin höyryn virtaus samalla kattilateholla on noin 53 kg/s. Tällä tavalla kattilalla tuotettua höyryä voidaan ajaa myös TU7 läpi ja reduktioventtiilin avulla TU6:n läpi.

Kattilaa tullaan käyttämään höyryverkostossa säätävänä kattilana. On tärkeää, että kattilaa pystytään ajamaan myös pienellä kuormalla tasaisesti ja, että höyrytuotannon säädettävyys on suhteellisen nopeaa. Kattiloiden höyryn tuotantorajoitukset sopivat harvoin täysin yhteen tehtaan kulutuksen kanssa, esimerkiksi kuorikattilan tuotanto minimikuormalla on noin 27 kg/s korkeapainehöyryä, mutta tehdas saattaa soodakattiloiden lisäksi tarvita esimerkiksi vain 15 kg/s HKP-höyryä. Tällöin tuotetusta höyrystä ylimääräinen osa lauhdutetaan apulauhduksessa takaisin vedeksi ottamatta energiaa talteen. Tästä syystä uuden kattilan höyryn tuotannossa toivotaan olevan suuri säätövara minimi- ja maksimituotannon välillä. Uudelle kattilavaihtoehdolle on eduksi myös nopea lämpenemisaika. Tehtaan jatkuvasti muuttuvasta höyrynkulutuksesta johtuen kattila voidaan joutua käynnistämään yllättäen. Lämpenemisen aikana esimerkiksi kartonkikone voi joutua odottamaan käynnistystä, kunnes höyryä on riittävästi tarjolla. Kattilan täytyy pystyä myös hallitsemaan suuretkin

kuorman muutokset ilman keskeytyksiä. Höyrynkulutus tehtaalla saattaa kartonkikoneen äkillisessä pysäytyksessä pudota, tai käynnistyksessä nousta, jopa 25 kg/s.

Aikaisemmin tarkastelluista polttoaineista todettiin Imatran tehtailla käyttökelpoiseksi metsätähdehake, pelletit ja maakaasu. Tarkasteluun valittiin näille polttoaineille parhaiten sopivat kattilatyypit: leijupetikattila, pellettikattila ja maakaasukattila. Tarkasteluun ei sisällytetty biopolttoaineita varten arinakattilaa tai kiertopetikattilaa, sillä arinakattila soveltuu paremmin pienempiin käyttökohteisiin, kun taas kiertopetikattila soveltuu suurempiin kohteisiin. (Raiko et al. 2002, 466.) Kattilavaihtoehtojen lisäksi tutkitaan myös mahdollisuutta matalapainekattilaan, jolla tuotettaisiin välipainehöyryä korkeapainehöyryn sijasta.

6.1 Leijupetikattila

Leijupetikattila valittiin tarkempaan tutkintaan sopivan kokoluokan ja käytettävien polttoaineiden takia. Kupliva leijupeti mahdollistaa monien erilaisten, myös huonolaatuisten, polttoaineiden palamisen korkealla hyötysuhteella. Prosessin alhainen palamislämpötila pienentää typenoksidien muodostumista ja kalkkia syöttämällä suoraan tulipesään voidaan hallita mahdollisia rikkipäästöjä.

Leijupetikattilan tulipesän pohjalla on noin 0,4–0,8 metriä korkea hiekkapatja. Hiekkapedin alta puhalletaan kattilaan palamisilmaa, jonka massavirta ja nopeus suhteutetaan hiekkapedin kokoon. Ilmavirran suuruus täytyy olla yhtä suuri kuin pedin hydrostaattinen paine, jolloin hiekkakerros alkaa leijumaan. Ilmavirran nopeus riippuu hiekan hiukkaskoosta. Pienemmälle hiukkaskoolle riittää pienempi ilmavirta leijumistapahtuman aikaansaamiseksi. Leijuilmaasta saadaan osa palamiseen tarvittavasta hapesta. Loput tarvittavasta palamisilmasta tuodaan tulipesän ala- ja keskiosaan sekundääri-ilmana. Suuremmissa leijupetikattiloissa palamisilmaa työnnetään myös sekundääritason yläpuolelle kattilan tulipesään tertiääri- ja kvartaalitasolta.

Polttoaine syötetään suoraan pedin päälle usean sulkusyöttimen ja syöttötorven kautta tasaisesti koko pedin alueelle. Pedissä olevan hiekan suuren lämpökapasiteetin takia leijupetikattila soveltuu hyvin kosteiden polttoaineiden polttamista varten, eikä polttoainetta

tarvitse erikseen kuivata ennen kattilaan syöttöä. Hiekkaan sekoittuva polttoaine lämpenee ja kuivaa nopeasti kattilassa. Lisäksi pedin lämpökapasiteetti itsestään tasapainottaa polttoaineen laadun vaihtelut. Leijupetikattilan käynnistys tarvitsee aina kuorma- tai sytytyspolttimet, joilla kattilaa ja petiä lämmitetään ennen varsinaisen kiinteän polttoaineen syöttöä. Polttimilla poltetaan yleensä kaasua tai vaihtoehtoisesti öljyä ja niillä lämmitetään peti noin 500 – 600 °C asteeseen.

Säätöalue leijupetikattilalla on noin 30 – 100 % kuormasta. Minimitheoa rajoittaa pedin lämpötila sekä leijuilman minimivirtaus. Maksimitehoa taas rajoittaa usein pedin maksimilämpötila, joka riippuu käytettävän polttoaineen tuhkan pehmenemispisteestä. Lisäksi palamattomien aineiden määrän kasvu rajoittaa maksimituotantoa. Säätöaluetta voi lisäksi laajentaa savukaasujen kierrätyksellä leijuilman sekaan tai pedin jakamisella osastoihin. Tämä tarkoittaa 54 kg/s maksimituotannolla noin 16 kg/s minimituotantoa. (Huhtinen et al. 2000, 153 – 159.)

Leijupetikattila soveltuu monien eri polttoaineiden tai polttoaineseosten polttamiseen. Parhaiten polttoon sopivat kiinteät ja kosteat polttoaineet. Polttoaineeksi aikaisemmin työssä tarkastelluista vaihtoehtoista soveltuvat kuori ja hakkeet. Myös lietteen poltto on mahdollista leijupetikattilassa.

Imatran tehtaille leijupetikattila soveltuu erinomaisen hyvin säädettävyyden ja laajan polttoainekirjon kannalta. Kattilan avulla pystyttäisiin myös tarvittaessa jakamaan tehtaan jätevedenpuhdistamolla syntyvä poltettava liete kahdelle kattilalle. Lisäksi polttoaineena voitaisiin helposti käyttää tehtaan kuorimolta tulevaa kuorta, esimerkiksi kuorikattilalla esiintyvän pitkäkestoisen ongelman aikana. Myös monien muiden polttoaineiden käyttö on mahdollista, esimerkiksi halpaa kierrätyspuuta voidaan ostaa poltettavaksi. Kierrätyspuuta on saatavilla kuitenkin vain pieni osa kokonaisuudesta. Lisäksi korvaavaa polttoainetta löytyy suuremmalla todennäköisyydellä, esimerkiksi metsätähdehакkeen saatavuusongelmien aikana muihin kattilatyyppeihin verrattuna. Kattilalla pystytään helposti tuottamaan höyryä myös maakaasulla kuormapolttimien avulla mahdollisten polttoaineen syöttöongelmien aikana.

Käytettävät polttoaineet tarvitsevat polttoaineen syöttöjärjestelmän sekä säilytystilaa, jota tehtaalta löytyy jo nykyiseltä kuorikentältä. Selvitettäväksi jää riittääkö kuorikentän tilavuus säilömään kahdella leijupetikattilalla poltettavia polttoaineita, vai täytyykö säilytystilaa laajentaa. Polttoaineen käsittelyjärjestelmään kuuluvat säilytystilan lisäksi purkainruuvit, kuljetushihnat ja polttoainesiilot. Lisäksi varsinainen polttoaineen syöttöjärjestelmä kattilaan, mikä koostuu syöttöruuveista, kuljettimista, sulkusyöttimistä ja syöttöilmapuhaltimista. Lisäksi leijupetikattilassa syntyvät savukaasut täytyy puhdistaa käytettävästä polttoaineesta riippuen suodattimilla. Usein käytössä ovat sähkösuodattimet, joilla saadaan erotettua savukaasuista pienimmätkin hiukkaset.

Leijupetikattilassa palamisen aikana syntyvä tuhka poistetaan tulipesästä pudotustorvien kautta kuljettimille, joista tuhka kuljetetaan lavalle poistettavaksi. Samalla kattilasta poistuu käytettyä petihiekkaa, jota korvataan uudella hiekkasiilosta. Lentotuhkaa kerätään usein ekonomaiserin ja luvon jälkeen savukaasukanavasta. Suurin osa lentotuhkasta päätyy kuitenkin sähkösuodattimeen, josta tuhka lähetetään paineilman avulla tuhkasiiloon. Siilosta tuhka puretaan kuorma-auton lavalle tehdasalueelta poistettavaksi.

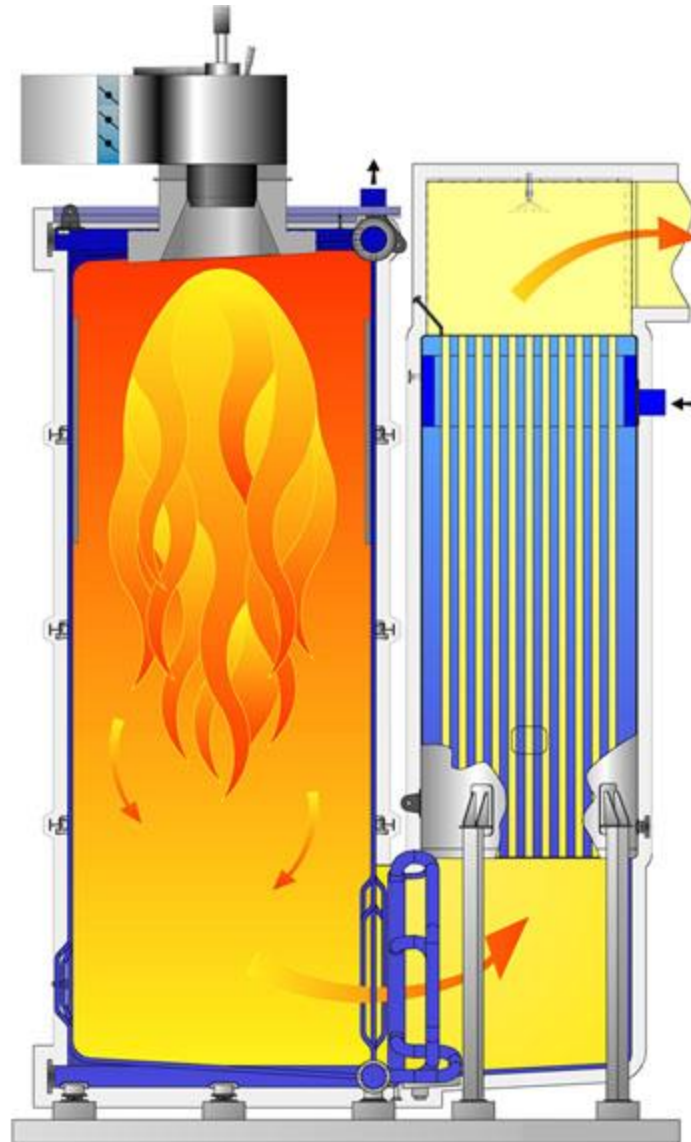
Polttoaineen, savukaasujen ja tuhkan käsittelyjärjestelmät lisäävät suurikokoisten osien ja laajuuden vuoksi kattilan kokonaiskustannuksiin merkittävän osan. Lisäksi polttoaineen käsittelyjärjestelmä saattaa aiheuttaa kattilan pitkäaikaisen säilönnän aikana ongelmia. Polttoainekasan alla sijaitsevat ruuvit saattavat jäädä jumiin, mikäli ne ovat pitkiä aikoja pyörimättä, kun polttoainekasa pakkautuu tiiviimmäksi ruuvin ympärille. Ennen kattilan tulien sammuttamista polttoainesiilojen sekä polttoainekentän ruuveja täytyisi tässä tapauksessa pyörittää niin kauan, että polttoainetta ei ole niiden päällä ollenkaan jumiutumisen estämiseksi. Tämä pidentää kattilan tulien sammutusaikaa sekä saattaa lisätä ylösajoaikaa riippuen polttoainejärjestelmän siilojen täyttymisvauhdista. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan todennäköisesti metsätähdehakkeen kanssa ole, sillä esimerkiksi monet kaukolämpökeskukset toimivat metsätähdehakkeella ja saattavat seistä pitkiäkin aikoja kesän aikana.

6.2 Pellettikattila

Voimalaitosten suurikokoisissa pellettikattiloissa pelletit tai brikitit murskataan ennen polttoa pölyksi ja palaminen tapahtuu pölypolttimien kautta. Pellettejä on myös mahdollista polttaa arina- tai petikattilassa, mutta arinakattila soveltuu paremmin pienempiin kohteisiin ja petikattilassa pelletit poltetaan usein sekoituksena muiden polttoaineiden kanssa. (Döring, 2012, 163 – 168.)

Pellettejä säilötään siiloissa, joihin mahtuu muutaman päivän polttoainetarpeet. Siiloista pelletit annostellaan vasaramyllyyn, missä pelletit jauhetaan pölyksi. Pöly johdetaan suodatinyksikön läpi, jotta ylimääräinen ilma saadaan polttoaineen seasta pois. Ennen polttoa pöly säilötään vielä pölysiilossa, jonka polttoainekapasiteetti riittää muutamaksi tunniksi. Palamisen jälkeen savukaasut puhdistetaan vielä sähkö-, kuitu-, tai letkusuodattimissa. (Valmet, 2016.) Pohjatuhkaa kerätään tulipesän pohjalta, joka siirretään kuljettimella konttiin. Lentotuhkaa kerätään suodattimilta, joista tuhka siirretään tuhkasiilon. Siilosta purku tapahtuu tuhkaruuvien avulla.

Pellettikattilat ovat rakenteeltaan tulitorvi- tai vesiputkikattiloita riippuen tehotarpeesta ja tarvittavasta höyryn paineesta. Kuvassa 10 on rakenteeltaan vesiputkikattila, joka polttaa pelletit pölynä kattopolttimella. (KPA Unicon, N.d.)



Kuva 10. Pellettikattila. (KPA Unicon, N.d.)

Kuvassa 10 esitetty kattila on kooltaan 10 MW lämpökeskus, joka toimii huippukuorma- ja varavoimalaitoksena talven kylmimpinä aikoina kaukolämpöverkossa. Kyseinen lämpökeskus sisältää ainoastaan lämmönsiirrinputkiston, jolla kaukolämpöverkostossa virtaavaa vettä lämmitetään. Kattilan kokoluokan kasvaessa ei kuitenkaan ole mitään estettä höyryn kehittämisen, tulistuksen sekä palamisilman esilämmityksen sisällyttämiselle kattilan rakenteeseen.

Pellettikattila on rakenteeltaan hyvin samanlainen kaasukattilaan verrattuna. Pellettejä poltettaessa tarvitaan kuitenkin tulipesään noin 40 % enemmän tilavuutta erilaisen liekin

takia. Säädettyvyys pellettikattilalla on hyvä. Höyryä pystytään tuottamaan tasaisesti noin neljäsosateholla maksimista. (Juutinen, puhelinhaastattelu 25.2.2019.) Pelletit sopivat taloudellisesti parhaiten huippu- ja varavoimalaitoksiin, joita käytetään keskimäärin noin 3 000 tuntia vuodessa. Kattila pystyy muuttamaan kuormaa nopeasti tilanteen mukaan ja käynnistyy nopeasti. (Energiauutiset, 2015.) Tehtaan kannalta olisi järkevää rakentaa yhden 150 megawatin kaasukattilan sijasta kaksi 75 MW kattilaa. Tällöin höyryn tuotannon säädettyvyys ja käyttövarmuus paranevat huomattavasti. Ainoana mahdollisena esteenä kahden kattilan rakentamiselle ovat taloudelliset syyt.

6.3 Kaasukattila

Kaasukattila on valittu tarkasteluun olemassa olevien maakaasulinjojen ja nykyisten kattiloiden positiivisten käyttökokemusten takia. Lisäksi maakaasu on erittäin helppokäyttöinen polttoaine, kun laitos sijaitsee siirtoverkoston läheisyydessä.

Kaasukattilan polttimet voidaan sijoittaa monella eri tavalla. Nurkkapoltossa polttimet ovat kattilan nurkissa ja muodostavat kattilaan ylöspäin nousevan pyörivän savukaasuvirtauksen. Vastakkaispoltossa kattilan vastakkaisilla seinillä olevien polttimien liekit kohtaavat tulipesän keskiosassa. Pohjapoltossa polttimet sijaitsevat tulipesän lattiassa ja kattopoltossa katossa. Etuseinäpoltossa kaasupolttimet ovat ainoastaan yhdellä kattilan seinällä.

Nurkka- ja vastakkaispoltolla liekit koskettavat tulipesän keskiosassa toisiaan muodostaen tasaisen lämmön kattilan lämmönsiirtopintoihin. Kattopoltto on yleinen valinta teollisuuden voimalaitoksissa. Liekki voidaan sijoittaa helposti tulipesään ja kattilasta saadaan rakennettua korkeampi ja kapeampi helpottaen luonnonkiertoa. Polttimen sijainti kattilahuoneen korkeimmassa ja kuumimmassa kohdassa saattaa kuitenkin aiheuttaa ylikuumentumisvaaran. Etuseinäpoltto on polttotavoista helppokäyttöisin ja investoinneilta edullisin. Haittapuolena etuseinäpoltossa on tulipesän syvyysvaatimus, jolla estetään vastakkaisen seinän ylikuumentuminen ja lämpökuorma saattaa jakautua tulipesässä epätasaisesti. (Huhtinen et al. 2000, 128.)

Maakaasun poltossa polttoaineen käsittelyjärjestelmä koostuu suureksi osaksi maakaasuputkesta ja muutamista suodattimista. Polton jälkeinen savukaasujen suodatus on

myös tarpeetonta ja tuhkaa ei palamisesta muodostu lähes ollenkaan. Näistä syistä maakaasukattilan investointi-, sekä muuttuvat kustannukset ovat luonnollisesti pienemmät verrattuna leijupeti- ja pellettikattilaan.

Maakaasukattila sopii Imatran tehtaiden tarpeisiin erinomaisesti nopean säädettävyyden ja helppokäyttöisyyden takia. Haittapuolena on fossiilisen polttoaineen käytöstä muodostuvat hiilidioksidipäästöt. Polttoaineen kulutus tehtaalla ei paljolti muutu mikäli uudessa kattilassa poltetaan maakaasua. Modernin kattilan paremman hyötysuhteen ansiosta polttoaineen kulutus todennäköisesti vähentyy. Myös maakaasukattiloita olisi tehtaan toiminnan kannalta kannattavaa rakentaa kaksi 75 megawatin kokoista kattilaa yhden sijasta.

6.4 Matalapainekattila

Matalapainekattilalla tarkoitetaan tässä tapauksessa kattilaa, jolla tuotettaisiin HKP-höyryn sijasta HVP-höyryä suoraan tehtaan käyttöön tai reduktioventtiilillä HMP-höyryksi redusoituna. Tällaisella kattilalla lämpenemisaika olisi nopeampi ja tehon tarve pienempi, mutta sähkön tuotanto jäisi tehtaalla pienemmäksi. Lisäksi paineenalaisten osien kustannukset ovat pienemmät, kun käytössä on alhaisempi paine ja lämpötila.

Matalapainekattila tuottaisi noin 210 °C asteista 1 MPa höyryä, jolloin lämpenemisaika lyhenisi nykyisestä neljästä tunnista noin yhteen tuntiin. Tästä parin tunnin aikataulun nopeutuksesta olisi todennäköisesti tehtaalle hyötyä muutamia kertoja vuodessa, kun kartonkikoneet pystyisivät aloittamaan lämmityksen nopeammin. Lisäksi kattilan käynnistyksen yhteydessä kuluva polttoaineen määrä lämmitykseen ja paineen nostoon olisi huomattavasti pienempi.

Matalapainekattilalla täytyy edelleen tuottaa saman verran höyryä kuin korkeapainekattilalla, mutta HVP-höyryn lämpötila- ja painearvoilla höyryn entalpia on pienempi kuin HKP-höyryllä. Tästä syystä kattilan teho voi olla pienempi ja tehtaalla tarvittava höyry pystytään edelleen tuottamaan. Matalapainekattilan teho lasketaan kaavassa 2.

$$150\,000\text{ kW} - \left(3\,444,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 52,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 2\,852,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 52,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad (2)$$

$$\approx 119\,000\text{ kW}$$

Kaavassa käytetään aikaisemmin työssä laskettua höyryn virtausmäärää 52,7 kg/s uudelle kattilalle. Höyryn entalpia 8,4 MPa paineessa ja 520 °C asteen lämpötilassa on 3 444,2 kJ/kg ja 1 MPa paineessa 210 °C asteen lämpötilassa 2 852,2 kJ/kg. Vähentämällä nämä höyryjen energiat toisistaan saadaan korkeapainekattilan ja matalapainekattilan tehoero. Tämä tehoero vähennetään alkuperäisestä 150 MW kattilan tehosta ja tuloksena on matalapainekattilan teho. Matalapainekattila olisi siis kooltaan noin 120 MW.

Matalapainekattilan käyttö lisää todennäköisyyttä turbiinin alasajolle. Ongelmat yhdellä soodakattiloista tai kuorikattilalla luovat tilanteen, jossa höyryä ei pystytä tuottamaan tarpeeksi molemmille turbiineille. Korkeapainekattilalla pystyttäisiin tuottamaan höyryä väliaikaisesti enemmän, jotta turbiinia ei tarvitsisi poikkeustilanteessa ajaa alas, mutta matalapainekattilalla tuotetusta höyrystä ei ole tähän tilanteeseen apua. Nämä tilanteet ovat harvinaisia, mutta saattavat vähentää tehtaan vuosittaista sähkön tuotantoa ja lisätä turbiinin vuosittaista alas- ja ylösajomäärää.

Vuosittainen tuotettu höyrymäärä uudella kattilalla tulisi koon perusteella olemaan sama kuin K12 kattilalla ja yhdellä K9 – 11 kattiloista. Keskiarvo viimeisen neljän vuoden ajalta höyryn tuotannossa on ajotuntien mukaan K12 kattilalla noin 12 kg/s ja yhdellä K9 – 11 kattiloista noin 8 kg/s. Nämä luvut muutetaan tasaiseksi tuotannoksi ympäri vuoden kattiloiden ajotuntien perusteella, jotka ovat K12 kattilalla 4 562 h ja keskimäärin 700 h yhdellä K9 – 11 kattiloista. Näistä luvuista saamme höyryvirtauksen summaksi määrän 7 kg/s, joka jäisi matalapainekattilan myötä pois sähkön tuotannosta. Menetetty sähkön tuotanto matalapainekattilalla on laskettu kaavassa 3. (Stora Enso, 2017.)

$$\left(7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3\,444,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left(\frac{7\text{kg}}{\text{s}} * 0,43 * 2\,927 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (1 - 0,43) * 2\,828 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right) * \quad (3)$$

$$0,9 * 0,98 \approx 3\,500\text{ kW}$$

HVP-, ja HMP-höyryn suhde on TU7:sta poistuessa ajovauhdista riippuen keskimäärin noin 43 prosenttia HVP-höyryä ja loput HMP-höyryä. Turbiinista poistuvan HVP-höyryn entalpia on 2 927 kJ/kg ja HMP-höyryn 2 828 kJ/kg. Laskukaavassa käytetään myös

oletettua turbiinin hyötysuhdetta 90 % ja generaattorin hyötysuhdetta 98 %. Menetetty sähkön tuotanto on 3,5 MW ja vuosittain, laskettuna 8 500 ajotunnille, noin 30 100 MWh. Turbiinia pyritään ajamaan ympäri vuoden, mutta vuosittaista ajotuntien määrää on laskettu laskuissa 8 500 tuntiin vuosittaisen syysseisokin takia.

Matalapainekattilan polttoainetarve tässä tapauksessa on laskettu kaavassa 4.

$$\frac{120 \text{ MW}}{150 \text{ MW}} * 250\,000 \text{ MWh} = 200\,000 \text{ MWh} \quad (4)$$

Kaavassa 4 käytetään matalapainekattilan ja korkeapainekattilan tehojen suhdetta, joka kerrotaan uuden korkeapainekattilan polttoaineenkulutuksella. Tulokseksi saadaan vuosittainen 200 GWh:n polttoaineen tarve.

Menetetyn sähkön tuotannon kustannuksista riippuen K12 kattilan käyttö saattaa olla taloudellisesti kannattavampaa kuin matalapainekattilan. Tällöin matalapainekattilalla tuotettaisiin ainoastaan se määrä höyryä mitä K9 – 11 kattiloilla tuotetaan tällä hetkellä. Tällöin menetetty sähkön tuotannon määrä on laskettu kaavassa 5.

$$\left(2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 3\,362,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left(2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0,24 * 2\,927 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (1 - 0,24) * 2\,828 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right) * 0,9 * 0,98 \approx 900 \text{ kW} \quad (5)$$

K9 – 11 kattiloiden keskimääräinen vuosittainen höyryn virtaus viimeisen neljän vuoden ajalta on 2 kg/s, joka virtaa TU6:n läpi. TU6 HVP-höyryn osuus lähtevistä höyryistä on 24 % ja loput HMP-höyryä. Menetetty sähkön tuotanto on tällä ajotavalla vain 0,88 MW, josta tulee vuosittain 8 500 ajotunnilla noin 7 700 MWh. (Stora Enso, 2017.)

Tällä ajomallilla polttoaineen tarve matalapainekattilalle on laskettu kaavassa 6.

$$\frac{120 \text{ MW}}{150 \text{ MW}} * (28\,084 \text{ MWh} + 22\,195 \text{ MWh} + 16\,339 \text{ MWh}) = 53\,000 \text{ MWh} \quad (6)$$

Kaavassa on käytetty samaa korkea- ja matalapainekattilan tehon suhdelukua sekä aikaisemmin työssä käytettyjä K9 – 11 keskimääräisiä vuosittaisia polttoaineenkulutuksia. Mikäli K12 kattilan ajaminen on taloudellisesti kannattavampaa kuin uuden matalapainekattilan, saadaan polttoaineenkulutukseksi vuosittain noin 53 GWh.

Myös matalapainekattiloita kannattaa tehtaan kannalta valmistaa kaksi säädettävyyden ja käyttövarmuuden takia. Matalapainekattila voi olla aikaisemmin työssä esitellyistä kattilavaihtoehdoista mikä tahansa.

6.5 Päästöt uudella kattilalla

Uudella kattilalla käytettävien polttoaineiden kanssa suurin päästöihin liittyvä ero on maakaasun polttamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt. Polttoaineiden savukaasujen koostumusten välillä on kuitenkin muitakin eroja. Kaikilla kattiloilla syntyy haitallisena päästönä myös typenoksideja eli NO_x -päästöjä. Maakaasupoltossa NO_x -päästöt pystytään pitämään valtioneuvoston asetuksen 936/2014 määrittämän rajan alapuolella säätämällä palamisilman mukana tulevaa happipitoisuutta kierrättämällä tulipesässä syntyviä savukaasuja ilmavirtauksen sekaan. Lisäksi polttimen liekin lämpötilaa laskemalla voidaan vähentää typenoksidien muodostumista. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi vähentämällä palamisilman esilämmitystä tai syöttämällä höyryä polttimen liekkiin. (Matikainen, haastattelu 14.3.2019.) Pellettien ja metsätähdehakkeen kohdalla palamisilmassa olevan typen lisäksi typpeä on myös polttoaineen alkuainekoostumuksessa. Typen määrä pelleteissä on kuitenkin erittäin pieni eikä todennäköisesti vaadi lisätoimenpiteitä maakaasukattilaan verrattuna. Leijupetikattilassa poltettavassa metsätähdehakkeessa taas typen määrä on huomattavasti suurempi etenkin lehdissä ja neulasissa (Alakangas et al. 2016, 56, 97). Jotta pysytään valtioneuvoston asetuksen määrittämissä päästörajoissa, täytyy kattilaan todennäköisesti asentaa myös toinen typenoksidien vähennysmenetelmä esimerkiksi SNCR eli Selective Non-Catalytic Reduction (Finlex 936/2014). SNCR-menetelmä on yleisin bio- ja hiilivoimalaitoksissa käytetty typenoksidien vähennysmenetelmä. Menetelmä perustuu urean tai ammoniakkin syöttöön tulipesän yläosassa. Tulipesässä urea tai ammoniakki reagoi typen kanssa pelkistäen sitä typpimolekyyleiksi, jolloin typenoksidien muodostuminen vähentyy. (Zevenhoven & Kilpinen, 2004, 32 – 33.)

Kattilassa syntyy myös rikkipäästöjä, mikäli polttoaine sisältää rikkiä. Valituista polttoaineista rikkiä on metsätähdehakkeessa sekä pelleteissä. Maakaasukattilalla rikkipäästöjä ei synny lainkaan. Metsätähdehakkeessa on selvästi enemmän rikkiä kuin pelleteissä neulasien ja lehtien takia. Rikin määrät ovat kuitenkin molemmilla polttoaineilla huomattavasti pienempiä esimerkiksi hiileen ja turpeeseen verrattuna, eivätkä leijupeti- tai pellettikattila vaadi erityisiä toimenpiteitä rikkipäästöjen vähentämiseksi. (Alakangas et al. 2016, 56, 97, 121, 173.)

Euroopan unionin parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa (BAT) koskevassa päätelmässä määritellään yli 50 MW:n kokoisissa laitoksissa eri polttoaineiden päästömittausten seurannan vähimmäistiheydet. Metsätähdehakkeella, pelleteillä ja maakaasulla täytyy kaikilla olla jatkuva NO_x- ja häkäpäästömittaus. Jatkuva mittaus tarkoittaa aina käytössä olevaa onlinemittausta. Rikkidioksidi- ja pölypäästöjä täytyy seurata jatkuvasti metsätähdehakkeen ja pellettien poltossa. Lisäksi SNCR-järjestelmän ollessa käytössä täytyy olla jatkuva mittaus NH₃ eli ammoniakkipäästöille. Metsätähdehakkeen ja pellettien osalta täytyy myös seurata kaasumaisten kloridien, elohopean sekä useiden metallien ja puolimetallien päästöjä vähintään kerran vuodessa. (EU 2017/1442, L13/39 – 40)

7 KUSTANNUKSET

Kustannuksia tarkastellaan vertailemalla eri kattila- ja polttoainevaihtoehtoja. Jokaiselle kattilatyypille lasketaan kokonaiskustannukset 20 vuoden investoinnin ajalta, jolloin saadaan vertailukelpoisia tuloksia eri kattilavaihtoehdoista. Lisäksi tutkitaan K9 – 11 kattiloiden lähitulevaisuuden suurkorjausten kustannuksia, joita kuntokartoituksen mukaan joudutaan tekemään.

7.1 K9 – 11 Korjauskustannukset

Elinikäselvityksen tulosten ja toimenpidesuosituksen perusteella K9 – 11 kattilan korjauskustannuksiin sisällytetään II-tulistimen ja tulipesän pohjaputkien palkeiden uusinta. II-Tulistimien uusiminen kaikille kolmelle kattilalle kustantaa kattilaputkistoja korjaavan yhtiön edustajan arvion mukaan noin 750 000 €. Muut toimenpidesuosituslistan korjaukset mukaan lukien korjauksista selvittäisiin todennäköisesti noin miljoonalla eurolla.

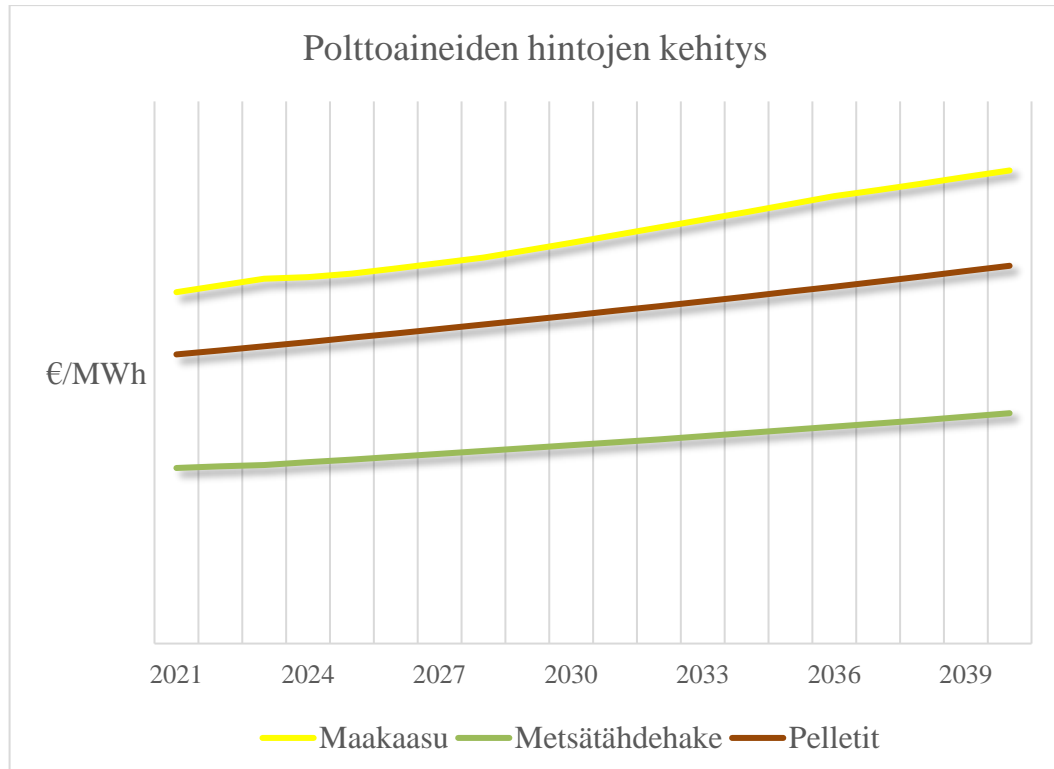
Kattiloiden K9 – 11 kunnossapitokustannusten tarkemmalla tutkinnalla saadaan lisätietoa kattiloiden nykyisestä kunnosta. Vuosien 2013 – 2017 aikana kunnossapitokustannuksia on kertynyt noin 813 000 euroa. Kun tätä summaa verrataan tuotettuun energiamäärään samalla aikavälillä, kunnossapitokustannusten määräksi saadaan 2,5 €/MWh. Vertailukohteena käytetään tehtaan K12 kaasukattilaa, jonka kunnossapitokustannuksiin on vuosien 2013 – 2017 aikana mennyt 331 000 euroa. Tuotettuun energiamäärään verrattuna kunnossapitokustannuksille hintaa K12 kattilalla kertyy 0,3 €/MWh. Kunnossapitokustannukset kattiloille K9 – 11 ovat siis melkein kahdeksan kertaa suuremmat tuotantoon verrattuna kuin samalla tehtaalla olevalla K12 kattilalla. Näistä summista voidaan todeta, että yhtiölle kertyy vähintään 100 000 € säästöä kunnossapitokustannuksista vuodessa, kun K9 – 11 kattiloita ei tarvitse huoltaa. (Saarinen, sähköpostiviesti 12.12.2018.) Taloudellisesti säästö ei yhtiön mittakaavassa ole erityisen suuri, mutta tästä summasta voidaan nähdä miten huonolla tasolla kattiloiden kunto ja käyttövarmuus ovat.

7.2 Polttoainekustannukset

Tarkempaan tarkasteluun valittujen polttoaineiden eli metsätähdehakkeen, pellettien ja maakaasun hinnat sekä niiden kehitys perustuvat Stora Enson energiapalveluiden tekemään ennusteeseen polttoaineiden hinnoista, jossa Stora Enson tehtaiden käyttämien polttoaineiden, sähkön ja päästöoikeuksien vuosittaiset keskiarvohinnat ennustetaan vuoteen 2040 asti.

Metsätähdehakkeen hintaan sisältyvät kuljetuskustannukset, jotka ovat arvion mukaan noin neljäsosa kokonaissummasta. Hakkeen energiatiheys on pelletteihin verrattuna huomattavasti pienempi. Lisäksi hakkeet haetaan usein metsäteiden laidalta, joihin rekkojen täytyy pystyä ajamaan. Pellettien kuljetuksessa tarvittavien rekkojen määrä on huomattavasti pienempi suuremman energiatiheyden ansiosta. Lisäksi pellettien valmistus tapahtuu usein tehtaalla hyväkuntoisten tieyhteyksien varrella, joten pellettejä voidaan kuljettaa suuremmilla rekoilla. Näistä syistä pellettien kuljetuskustannukset ovat huomattavasti pienemmät metsätähdehakkeeseen verrattuna. Pellettien hinta perustuu tämänhetkiseen markkinahinnan keskiarvoon ja arvioon tulevaisuuden hinnan kehityksestä huomioiden samalla inflaation (Metsälehti, 2019.)

Maakaasun hinta koostuu energiasta, siirrosta, huoltovarmuusmaksusta ja veroista. Lisäksi hintaan lasketaan hiilidioksidipäästöjen määrän mukaan päästömaksu. Tämä päästömaksu on noin 10 % maakaasun kokonaishinnasta. Maakaasu hankitaan keskitetysti kaikille maakaasua käyttäville Stora Enson tehtaille energiapalveluiden toimesta. Keskitetyn oston avulla vuosittaisia polttoainekustannuksia saadaan optimoitua. Hinnassa huomioidaan lämmön tuotannosta johtuva vero sekä veronpalautukset, joita saa kun höyryä käytetään sähkön tuotantoon. Maakaasun hinta tulevaisuudessa saattaa muuttua paljonkin ennustuksesta, kun otetaan huomioon vuonna 2019 valmistuva Baltic Connector - kaasuputkihanke. Hankkeessa rakennetaan maakaasuputkisyhteys Viron ja Suomen välille, mikä mahdollistaa markkinoiden avautumisen sekä vaihtoehtoisten polttoainelähteiden, esimerkiksi nesteytetyn maakaasun käytön (Baltic Connector, 2019). Polttoaineiden hinnat ja niiden kehitys seuraavalta 20 vuoden ajalta esitellään kuvassa 11.



Kuva 11. Polttoaineiden hintojen kehitys.

Kuvassa ei ole arvoja y-asteikolla, sillä polttoaineiden ennustetut hinnat ovat luottamuksellisia. Hinnat sisältävät ennustuksia muutamia vuosia tulevaisuuteen, minkä jälkeen hinnan määrää inflaatio. Ennusteet alkavat vuodelta 2021, sillä uusi kattila ei tule valmistumaan ennen sitä. Polttoaineista maakaasu on kalleinta lähinnä siihen sisältyvistä päästö- ja veromaksuista johtuen. Pelletit ovat jalostettuna polttoaineena toiseksi kalleinta, kun taas metsätähdehakkeen lopullinen hinta on huomattavasti alhaisempi. Hinnan nousu ennustetaan kaikilla polttoaineilla olevan lähes sama inflaation takia. Suurimmat epävarmuudet hintojen kehityksessä liittyvät pelletteihin ja maakaasuun. Pelletit ovat markkinoilla vielä melko uusi tuote, jonka tuotanto ja kulutus lisääntyvät jatkuvasti. Hinta saattaa muuttua paljonkin riippuen miten paljon tuotanto ja kulutus kasvavat tai miten tuotannon ja kulutuksen kapasiteetit muuttuvat suhteessa toisiinsa. Maakaasu on myös epävarmassa tilanteessa aikaisemmin mainitun Baltic Connector -kaasuputkihankkeen takia sekä Euroopan unionin jatkuvasti tiukentuvien päästötavoitteiden takia fossiilisten polttoaineiden hintojen kehitys on aina epävarmaa.

7.3 Uuden kattilan kustannukset

Uudelle kattilalle valittiin tutkittavaksi kymmenen erilaista mahdollista vaihtoehtoa. Kaikista kolmesta tutkitusta kattilatyypeistä on korkea- sekä matalapaineversiot. Lisäksi pelletti- ja maakaasukattiloista tarkastellaan vaihtoehtoja, joissa yhden kattilan sijasta rakennetaan kaksi kattilaa molemmissa paineluokissa. Taulukossa 2 on lista tarkasteltavista kattiloista. Kahden leijupetikattilan vaihtoehtoa ei tarkasteltu, sillä teholtaan ne jäisivät hieman pieniksi petikattiloiksi.

Taulukko 2. Uuden kattilan vaihtoehdot.

Korkeapainekattilat	Teho (MW)
Leijupetikattila	150
Pellettikattila	150
2 kpl Pellettikattila	2 x 75
Maakaasukattila	150
2 kpl Maakaasukattila	2 x 75
Matalapainekattilat	
Leijupetikattila	120
Pellettikattila	120
2 kpl Pellettikattila	2 x 60
Maakaasukattila	120
2 kpl Maakaasukattila	2 x 60

Kattiloiden investointikustannushinnat perustuvat arvioihin, joita on pohdittu yhdessä kattilavalmistajien sekä työn ohjaajan ja tarkastajan kanssa. Muutaman kattilan kustannusarvio perustuu kattilavalmistajilta saatuihin tarjouksiin. Näitä summia on käytetty hyödyksi ja niiden perusteella on arvioitu muiden kattiloiden kustannuksia. Kattiloiden investointikustannukset esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Uuden kattilan investointikustannusarviot.

Korkeapainekattilat	Kattilan investointikustannukset (M€)
Leijupetikattila	60
Pellettikattila	35
2 kpl Pellettikattila	35
Maakaasukattila	18
2 kpl Maakaasukattila	18
Matalapainekattilat	
Leijupetikattila	48
Pellettikattila	28
2 kpl Pellettikattila	28
Maakaasukattila	12
2 kpl Maakaasukattila	12

Investointikustannuksiltaan kattiloista selvästi kallein on leijupetikattila. Tämä johtuu suureksi osaksi polttoaineen käsittelyjärjestelmän kokoluokasta muihin kattiloihin verrattuna. Leijupeti- ja pellettikattila tarvitsevat polttoainekäsittelyjärjestelmän lisäksi tuhkan käsittelyjärjestelmän sekä savukaasujen suodatuksen. Tästä syystä maakaasukattilan investointikustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Pellettikattilan polttoaineen käsittelyjärjestelmä on kokoluokaltaan huomattavasti pienempi leijupetikattilaan verrattuna ja polttoaineen säilöntä vaatii huomattavasti vähemmän tilaa. Kahden kattilan rakentaminen yhden sijaista arvioidaan olevan kustannuksiltaan samaa suuruusluokkaa, vaikka kaksi kattilaa vaativatkin useita suuria laitteita kaksinkertaisen määrän, esimerkiksi palamisilma- ja savukaasupuhaltimia. Tämä johtuu siitä, että kooltaan noin 100 MW:n ja pienemmät kattilat voidaan rakentaa seisovina kattiloina, kun taas suuremmat joudutaan rakentamaan roikkuviksi malleiksi. Roikkuva kattila lisää rakennukseen ja kattilan rakenteeseen kohdistuvia kustannuksia.

Varsinaisen kattilan lisäksi investointikustannuksiin kuuluu lisäkustannuksia, jotka koostuvat maarakennustöistä, putkistosta, kattilarakennuksesta sekä suunnittelusta ja työmaavalvonnasta. Kokonaisinvestointikustannukseen varataan lisäksi kymmenen prosentin yleisvaraus kattilan kokonaisinvestointisummasta, millä katetaan muut pienemmät kulut sekä mahdolliset yllättävät muutokset rakennusvaiheessa. Lisäkustannusten osuus oletetaan olevan sama kaikilla kattilatyypeillä, sillä suuria eroja kattilarakennukseen, putkistoon tai maarakennustöihin ei ole kattilavaihtoehtoista riippumatta. Lisäkustannusten

arviot perustuvat Lappeenrannan teknillisen yliopiston Power to Gas -laitoksen kustannuserittelyarvioon, josta summia on muokattu sopimaan paremmin uuden kattilan investointiin. Lisäkustannusarviot esitellään taulukossa 4.

Taulukko 4. Kattilainvestoinnin lisäkustannusarviot.

Kattilainvestoinnin lisäkustannusten jaottelu	Lisäkustannukset (M€)
Maarakennustyöt	0,5
Rakennus	10
Putkisto	7
Suunnittelu ja työmaavalvonta	2
Yleisvaraus	10 %
Yhteensä	19,5

Lisäkustannuksista suurimman osan vievät kattilarakennus ja putkisto. Myös maarakennustöitä, suunnittelua sekä työmaavalvontaa varten varataan rahaa. Usein käyttöönotto kuuluu myös lisäkustannuksiin, mutta tässä tapauksessa käyttöönotto sisältyy jo kattilan investointihintaan, johtuen kattilavalmistajilta saaduista tarjousehdoista. Yleisvaraus ei sisälly lisäkustannusten yhteenlaskettuun summaan.

Uuden kattilan kokonaisinvestointikustannukset saadaan summaamalla kattilan investointikustannukset lisäkustannusten kanssa ja lisäämällä yleisvaraus. Investointikustannusten lisäksi täytyy ottaa vuosittaiset muuttuvat kustannukset huomioon. Muuttuvista kustannuksista suurin osa voimalaitosympäristössä on kunnossapitokustannuksia, mutta siihen kuuluvat myös henkilöstö- ja sähkökustannukset sekä muut käyttöön liittyvät kulut. Kokonaisinvestointi ja muuttuvat kustannukset esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Kokonaisinvestointien ja muuttuvien kustannusten arviot.

Korkeapainekattilat	Kokonaisinvestointikustannukset (M€)	Muuttuvien kustannusten osuus investoinnista (%)
Leijupetikattila	87	2
Pellettikattila	60	1,4
2 kpl Pellettikattila	60	1,6
Maakaasukattila	41	0,7
2 kpl Maakaasukattila	41	0,9
Matalapainekattilat		
Leijupetikattila	74	2
Pellettikattila	52	1,4
2 kpl Pellettikattila	52	1,6
Maakaasukattila	35	0,7
2 kpl Maakaasukattila	35	0,9

Muuttuvat kustannukset ovat selvästi suuremmat leijupetikattilalla, jossa polttoaineenkäsittelyjärjestelmässä on paljon liikkuvia ja kuluvia osia. Lisäksi tuhka ja savukaasut käsitellään sekä petihiekkaa täytyy vaihtaa. Pellettikattilalla tilanne on lähes sama. Muun muassa pellettejä murskaavat vasaramyllyt tarvitsevat kunnossapitoa sekä kuluttavat energiaa. Maakaasukattilalla ei vastaavia laitteita tarvita, joten muuttuvien kustannusten osuus on huomattavasti pienempi. Kahdella kattilalla useita laitteita tarvitaan kaksinkertainen määrä, joten muuttuvat kustannukset ovat hieman suuremmat yhteen kattilaan verrattuna. Muuttuvien kustannusten prosentuaaliset arvot perustuvat arvioihin, jotka tehtiin yhdessä työn tarkastajan ja ohjaajan kanssa. Lisäksi arvioiden tueksi on vertailukohteena käytetty Imatran tehtaiden voimalaitoksen kuorikattilan sekä K12 kaasukattilan toteutuneita kustannuksia viimeisen viiden vuoden ajalta.

7.4 Investoinnin kokonaiskustannukset

Investoinnin kokonaiskustannuksissa lasketaan yhteen kattilan investointikustannukset sekä muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset 20 vuoden ajalta. Muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset diskontataan nykyarvomenetelmän avulla, eli tulevaisuudessa maksettavat summat muutetaan nykyarvoon käyttämällä laskentakorkokantaa. Mitä kauempana tulevaisuudessa maksaminen tapahtuu, sitä vähemmän arvoa sillä on tällä hetkellä. Laskentakorkokannan prosentiksi valittiin 10 % sillä kattiloiden uusinta on

välttämätöntä, eikä hankinnalla etsitä varsinaista taloudellista tuottoa nykytilanteeseen verrattuna. Diskonttaus tehdään nykyarvomenetelmällä kaavalla 7.

$$Nykyarvo = \sum_{t=1}^n \frac{K}{(1+i)^t} \quad (7)$$

K = Vuosittaiset muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset [M€]

n = Investoinnin pitoaika [a]

i = Laskentakorkokanta [%]

t = Aika [a]

Matalapainekattiloiden osalta myös sähkön tuotannon väheneminen huomioidaan muuttuvissa kustannuksissa ja diskontataan nykyarvoon. Sähkön hinnassa käytetään Elspot-hintaa ja sen ennustetaan putoavan nykytilanteesta huomattavasti pääosin Olkiluoto 3 ydinvoimalaitoksen käynnistymisen takia. Tällä laskentatavalla kaikki uuden kattilan vaihtoehdot ovat vertailukelpoisia keskenään. Kokonaisinvestointikustannusten tulokset ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Uuden kattilan kokonaiskustannukset.

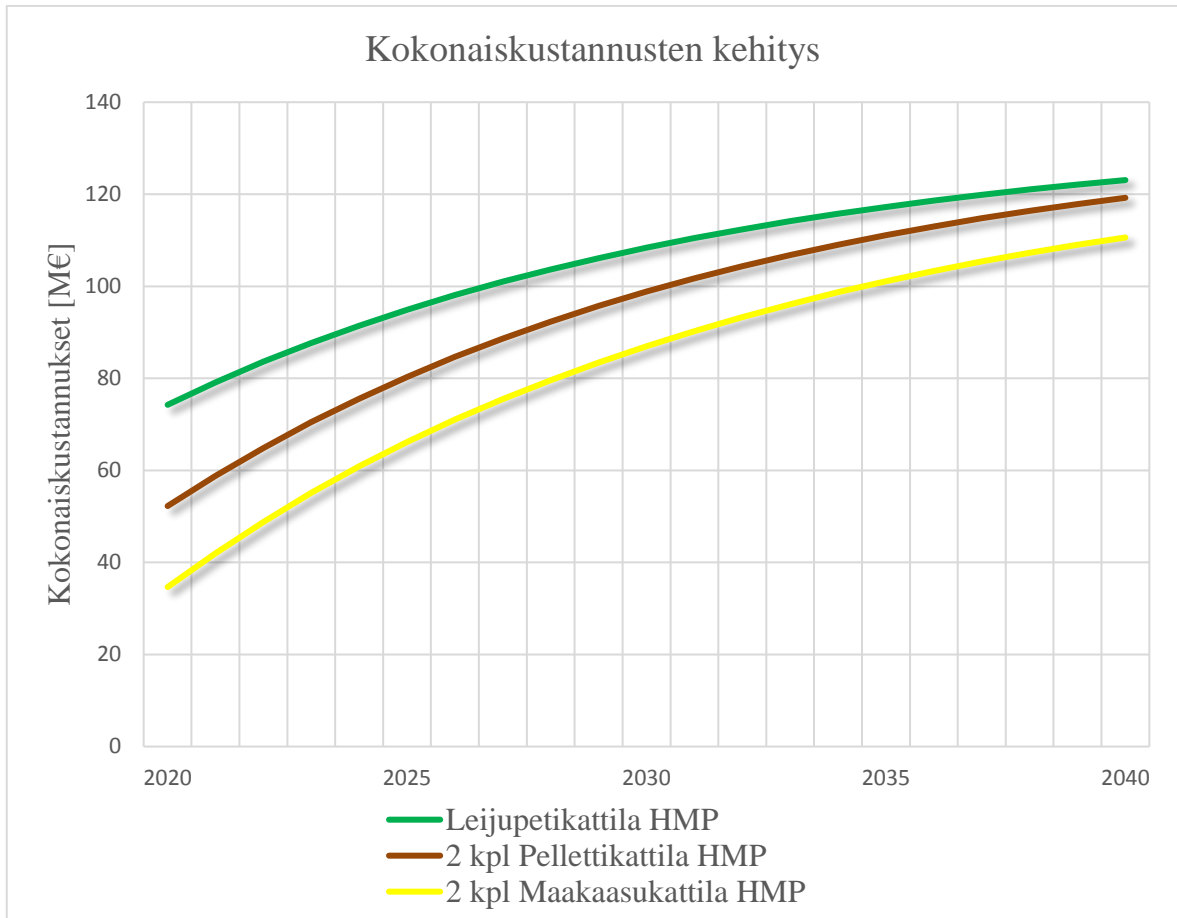
Korkeapainekattilat	Kokonaiskustannukset (M€)
Leijupetikattila	148
Pellettikattila	142
2 kpl Pellettikattila	143
Maakaasukattila	135
2 kpl Maakaasukattila	136
Matalapainekattilat	
Leijupetikattila	132
Pellettikattila	127
2 kpl Pellettikattila	128
Maakaasukattila	118
2 kpl Maakaasukattila	119

Taulukossa 6 nähdään uuden kattilan kokonaiskustannukset 20 vuoden ajalta, missä huomioidaan investointikustannukset, muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset sekä matalapainekattiloiden tapauksessa ostettavan sähkön hinta. Tuloksista voidaan nähdä

miten sähkön alhaisen hinnan takia matalapainekattilan rakentaminen olisi taloudellisesti kannattavampaa kaikilla eri kattilavaihtoehdoilla. Leijupetikattila jää vertailussa kalleimmaksi alhaisesta polttoainehinnasta huolimatta, sillä investointi sekä muuttuvat kustannukset ovat niin paljon suurempia pelletti- ja maakaasukattilaan verrattuna. Kokonaiskustannuksista halvimpana ratkaisuna ovat matalapainemaakaasukattilat.

Kokonaiskustannuslaskennat suoritettiin myös matalapainekattilavaihtoehdoille tilanteessa, jossa uudella kattilalla korvattaisiin vain kattilat K9 – 11 ja K12 kattilaa käytettäisiin nykyisellä tavalla. Tällainen ajotapa osoittautui kuitenkin huomattavasti kalliimmaksi. Eli mikäli uusi kattila on matalapainekattila, ohittaa se kaikissa tapauksissa käynnistysprioriteetissa K12 kattilan.

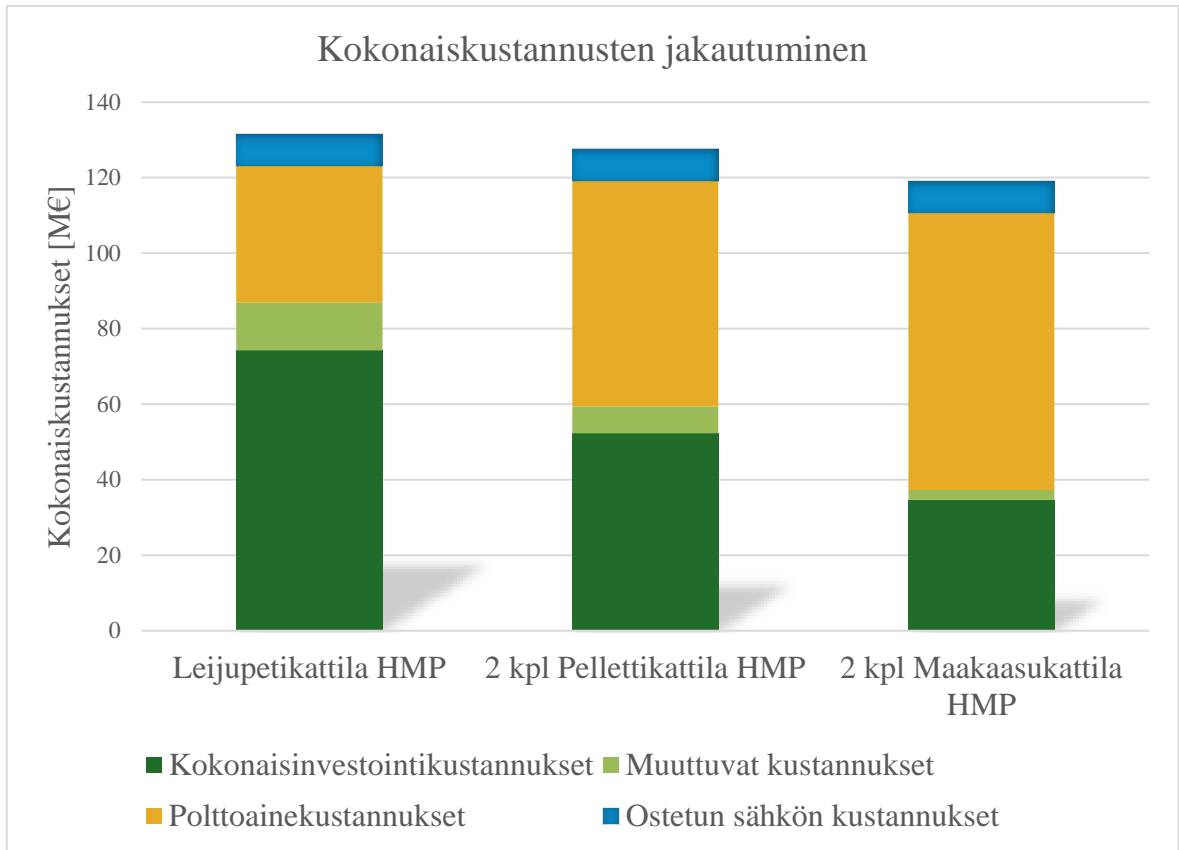
Kokonaiskustannusten perusteella pystytään sulkemaan tarkastelluista kattilavaihtoehdoista jo monia vaihtoehtoja pois. Korkeapainekattilan rakentaminen kustannusten perusteella on kannattamatonta, ja kun matalapainekattilalla on jo tehtaan kannalta monia hyötyjä korkeapainekattilaan verrattuna voidaan kaikki korkeapainekattilavaihtoehdot sulkea pois. Matalapainekattiloiden osalta ei ole kannattavaa rakentaa yhtä kappaletta pelletti- tai maakaasukattilaa, sillä kahden pienemmän kattilan kustannukset ovat lähes identtiset. Täten vaihtoehdoiksi jäävät matalapainehöyryä tuottavat leijupetikattila, kaksi kappaletta pellettikattiloita sekä kaksi kappaletta maakaasukattiloita. Näiden kattiloiden kustannukset otetaan tarkempaan tarkasteluun kuvassa 12.



Kuva 12. Kokonaiskustannusten kehitys.

Kuvassa 12 voidaan nähdä miten eri kattilavaihtoehtojen kustannukset jakautuvat 20 vuoden ajalle. Leijupetikattilan investointikustannukset nostavat hinnan heti korkealle, mutta ajan kuluessa hinta tasoittuu muiden vaihtoehtojen kanssa halvemman polttoaineen ansiosta. Maakaasu- ja pellettikattilan investointikustannukset ovat selvästi edullisemmat, mutta polttoainehintojen takia ajan kuluessa kokonaiskustannukset kasvavat suhteessa leijupetikattilaan. Suurimmat erot ovat maakaasukattilan ja leijupetikattilan välillä.

Kokonaiskustannusten jakautumisen tarkastelua varten luotiin kuva 13. Kuvassa nähdään tarkemmin miten investointi ja muuttuvat kustannukset jakautuvat kattilavaihtoehtojen välillä.



Kuva 13. Kokonaiskustannusten jakautuminen.

Kuvan 13 mukaan muuttuvat kustannukset ovat selkeästi suurimmat leijupetikattilalla ja pienimmät maakaasukattilalla. Polttoainekustannukset ovat selvästi ajan myötä kertyvistä kustannuksista suurimmat, etenkin maakaasukattilalla. Ostetun sähkön kustannukset ovat kaikilla kattiloilla samat. Polttoaine- ja investointikustannukset ovat selvästi suurin kulujen kohde uuden kattilan investoinnissa.

8 PÄÄTELMÄT

Kattiloiden K9 – 11 tulevaisuuden toimintavarmuus on kuntokartoituksen ja Imatran tehtaiden voimalaitoksen työntekijöiden käyttökokemusten mukaan huono. Vaikka K9 – 11 kattiloiden kuntokartoituksen toimenpidesuosituslistalta suoritettaisiin kaikki suositellut korjaustoimenpiteet, voidaan olettaa, että toimenpiteet eivät ole riittävät. Pelkkä II-tulistimen uusinta ei vähennä vuotojen määrää höyrystinosassa tai ekonomaiserien putkissa. Tämän tutkimuksen, aikaisemman työkokemuksen ja useiden tehtaan työntekijöiden kanssa käytyjen keskustelujen perusteella pelkät toimenpidesuosituslistan sisältämät asiat eivät nosta kattiloiden käyttövarmuutta riittäväälle tasolle. Jotta saavutettaisiin hyväksyttävä käyttövarmuustaso, pitäisi myös kattiloiden höyrystinputket sekä ekonomaiserit uusia. Tämä tarkoittaisi lähes koko kattilan uusimista, mikä ei ole enää kannattavaa. Vastaava putkistousuinta ei myöskään poistaisi ongelmia jumiutuvista ilmapelleistä, vanhoista palamisilmapuhaltimista tai lukuisista vuotavista höyry- ja vesiventtiileistä. Tuleva polttimien uusinta vuonna 2019 parantaa kattiloiden käyttövarmuutta jonkin verran. Tulevaisuudessa polttimiin liittyvien ongelmien yhteydessä varaosia on saatavilla nopeammin. Pelkällä poltinmuutoksella kattilan ongelmat eivät kuitenkaan poistu. Näistä syistä suositeltavaa on, että uuden kattilan investointia lähdetään ajamaan yhtiössä eteenpäin mahdollisimman pian, ennen kuin tuotanto tai turvallisuus ehtivät kärsiä vanhojen kattiloiden heikon käyttövarmuuden takia.

Uuden kattilan vaihtoehtoista karsittiin kustannusarvioiden perusteella kaikki korkeapainekattilavaihtoehdot. Kun huomioidaan nopeampi lämmitys aika, pienempi kattilakoko ja polttoaineentarve, on matalapainekattila lähes kaikin puolin parempi vaihtoehto korkeapainekattilaan verrattuna. Myös pelletti- ja maakaasukattiloiden osalta yhden kattilan versiot karsittiin mahdollisista valinnoista pois, sillä kokonaiskustannukset ovat lähes samat, mutta säädettävyys ja käyttövarmuus ovat huomattavasti paremmat kahdella pienellä kattilalla. Muuttuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista on myös erittäin pieni, joten kahden kattilan vaihtoehto on kaikin tavoin parempi. Vaihtoehtoiksi jäivät siis matalapaineleijupetikattila sekä kaksi kappaletta matalapainepelletti- tai maakaasukattiloita.

Leijupetikattilalla pystytään tarpeen vaatiessa polttamaan monia eri biopolttoaineita. Metsätähdehakkeen lisäksi voidaan mahdollisesti käyttää kanto- ja rankahaketta sekä tilaisuuden tullen kierrätyspuuta, joka on palamisominaisuuksiltaan lähes samanlaista, mutta halvempaa. Tämän takia on mahdollista, että polttoainekustannukset ovat pienemmät kuin arvioitu summa metsätähdehakkeelle. Polttoaineiden saatavuus ja hinnan kehitys ovat myös kolmesta vaihtoehdosta selvästi varmimmat. Pellettien ja maakaasun hinnan kehitys riippuu monesta kansainvälisestä tekijästä, joita on vaikea ennustaa, kun taas metsätähdehakkeen hinta on enemmän kiinni Suomen rajojen sisäpuolella tapahtuvista tekijöistä, koska polttoaineen toimitussäde on paljon pienempi. Lisäksi kattilalla pystytään tuottamaan höyryä kuormapolttimilla maakaasun avulla. Uudella leijupetikattilalla on myös mahdollista polttaa tehtaan kuorimolta tulevaa kuorta. Tätä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi keväisin kuorikattilan huoltoseisokin aikana. Kentällä säilöttävä kuoren määrä pysyisi kesän aikana pienempänä, jolloin kuoren maatumisen vähentyisi säilytyksen aikana. Toukokuun ja syyskuun välisellä ajalla kuorta kertyy kentälle paljon ja palavan aineen määrä kuoressa saattaa vähentyä jopa 10 % maatumisen takia (Varis, haastattelu 15.3.2019). Tällainen pieni säilönnän optimointi tarkoittaa sitä, että tehtaan kuorikattilalla poltettaisiin talvella osittain metsätähdehaketta korvaamaan uudella kattilalla poltettua kuoren määrää. Tällä tavalla tehtaan kuorimolla syntyvästä kuoresta saataisiin hieman enemmän tehoa irti. Metsätähdehakkeen kuljetukseen tullaan tarvitsemaan useita rekkoja, joita etenkin talven aikana tulee kulkemaan useita. Tämä saattaa aiheuttaa muutoksia liikennejärjestelyissä. Tehtaan sisäpuolisilla teillä on kuitenkin harvoin ruuhkaa, joten pienestä liikennemäärän lisääntymisestä ei todennäköisesti ole haittaa.

Leijupetikattilalla on myös huonoja puolia. Koska kattiloita on vain yksi, käyttövarmuus ja etenkin säädettävyys ovat heikommassa asemassa muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Yksi ongelma riittää pysäyttämään höyryntuotannon kokonaan uudella kattilalla, kun muilla vaihtoehtoilla olisi vielä puolet kapasiteetista käytettävänä. Lisäksi polttoaine on vaihtoehtoista kaikista hankalin. Polttoaineen mukana saattaa kulkeutua esimerkiksi isohko kivi, joka saattaa pysäyttää polttoainekentän purkainruuvien pyörimisen. Säädettävyys modernilla leijupetikattilalla on hyvä, mutta silti heikompi pelletti- ja maakaasukattiloihin verrattuna. Satunnainen pieni höyryn ylimääräinen tuotanto ei kuitenkaan ole niin suuri ongelma leijupetikattilalla polttoaineen alhaisen hinnan takia. Leijupetikattilassa on myös paljon enemmän laitteita ja antureita muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Tämä saattaa

tarkoittaa sitä, että tehtaalle täytyy palkata lisää kunnossapito- ja käyttöhenkilökuntaa. Leijupetikattila todennäköisesti tarvitsee myös SNCR:n tai vastaavan järjestelmän, joka saattaa lisätä yhdessä henkilöstön lisäämisen kanssa muuttuvien kustannusten määrää. Lisäksi kattilavaihtoehdoista huomattavasti suurimmat investointikustannukset saattavat hidastaa investointipäätöstä.

Kahdella matalapainepellettikattilalla säädettävyys ja käyttövarmuus ovat erittäin hyviä. Yhden kattilan ajaminen minimikuormalla tuottaa vain muutaman kilon höyryä sekunnissa, joten höyryn tuotannon ja kulutuksen tasaaminen tehtaan höyryverkostossa onnistuu helposti. Pellettien säilöminen ja kuljetus onnistuvat huomattavasti helpommin hakkeeseen verrattuna. Polttoaineen säilöntää varten rakennetut siilot pitävät pelletit kuivina ja alueen siistinä. Rekkoja tarvitaan myös huomattavasti vähemmän.

Pellettikattilassa polttoainevaihtoehtoja on vain kaksi, joista toinen on maakaasu. Tämä saattaa luoda ongelmia, mikäli pellettejä ei ole saatavilla. Polttoaineen saatavuuteen liittyykin suurin epävarmuus pellettikattilaan sijoittamisessa. Tehtaalle tulevat kattilat ovat kokoluokaltaan hyvin suuria pellettikattiloiksi. Teoriassa pelletin riittävyys tehtaalle on mahdollista ja tuottamalla sitä Stora Enson omilla sahoilla saattaa vähentää polttoainekustannuksia. On kuitenkin epävarmaa miten paljon ja missä pellettejä voidaan valmistaa. Pelletit ovat melko uusi polttoaine voimalaitosympäristössä. Vaikka hinta on nykyään markkinapohjainen, tieto sen tulevaisuudesta on epävarmempi kuin metsätähdehakkeella. Kustannuksiltaan pellettikattila on kahden muun vaihtoehdon välissä. Investointikustannukset ovat suuret, mutta halvempi polttoaine maakaasuun nähden tasoittaa hintoja ajan kuluessa.

Matalapainemaakaasukattilat ovat vaihtoehdoista kokonaiskustannuksiltaan edullisimmat. Kaasukattila on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen muihin verrattuna, jonka takia investointi sekä muuttuvat kustannukset ovat huomattavasti pienempiä. Korkeasta polttoaineen hinnasta huolimatta matalat investointikustannukset helpottavat investointipäätöksen tekoa huomattavasti muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Tulevaisuuden kustannusten kannalta epävarmuutta lisäävät hiilidioksidipäästömaksujen hinnan kehitys sekä energiaintensiivisten yritysten veronpalautusten kohtalo. Säädettävyys ja käyttövarmuus ovat maakaasukattiloilla erinomaiset. Polttoaineen kuljetusten kanssa ei

tarvitse nähdä vaivaa, mutta käytettävänä polttoaineena on kuitenkin vain maakaasu. Mahdollisten maakaasun toimitusongelmien aikana kattila on käyttökelvoton. Suurin ongelma maakaasukattilalla on kuitenkin fossiilisesta polttoaineesta muodostuvat hiilidioksidipäästöt. Yksi Stora Enson tulevaisuuden tavoitteista on vähentää hiilidioksidipäästöjä, joten lopullisessa uuden kattilan valinnassa tullaan suosimaan uusiutuvia polttoaineita. Viimeisimmissä yhtiön suunnitelluissa kattilainvestoinneissa on suosittu vaihtoehtoja, joissa on mahdollista polttaa monipuolisesti eri polttoaineita. On erittäin epätodennäköistä, että pelkkää maakaasua polttavaa laitosta rakennettaisiin nykypäivänä (Ukkonen, 2018). Maakaasukattilaa on kuitenkin esimerkiksi mahdollista käyttää muutaman vuosi, jonka jälkeen investoitaisiin biokaasuttimeen, jolla korvattaisiin maakaasun käyttö. Tällä tavalla suhteellisen pienillä investointikustannuksilla voitaisiin tulevaisuudessa muuttaa maakaasukattilan käyttö hiilineutraaliksi.

Kattilavaihtoehtojen vertailun helpottamiseksi luotiin kattiloiden ominaisuuksista taulukko 7, jossa annetaan numeroidut painoarvot kattiloiden tärkeimmille ominaisuuksille asteikolla yhdestä viiteen. Mitä pienemmän numeron kattila ominaisuuteen saa, sitä parempi se on muihin verrattuna. Vähiten yhteispisteitä saava kattilavaihtoehto on Imatran tehtaille parhaiten sopiva kattila.

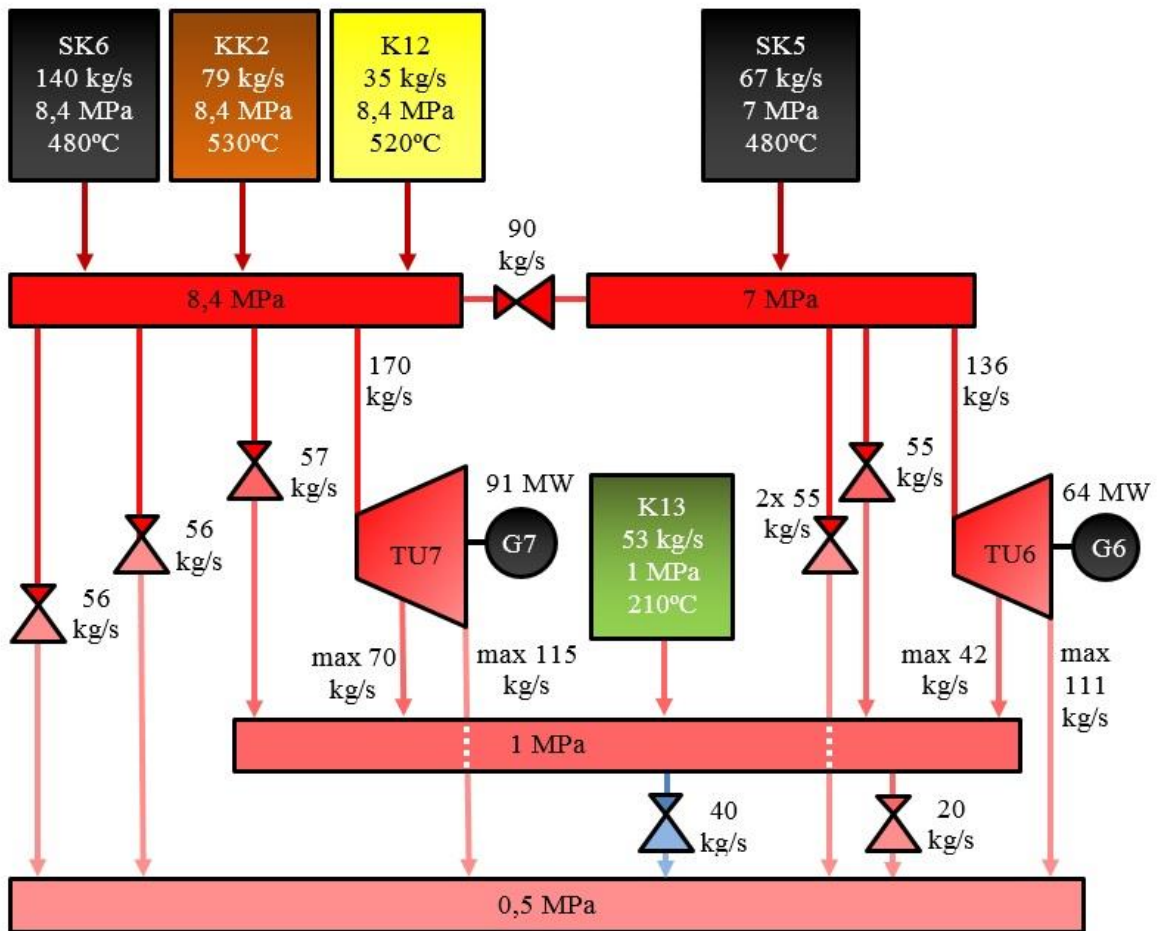
Taulukko 7. Kattilavaihtoehtojen ominaisuuksien vertailu.

Kattila	Käyttövarmuus	Säädettävyyys	Kustannukset	Merkittävät päästöt	Polttoainetilanne	Yhteensä
Leijupetikattila	2	2	2	2	1	9
2 kpl Pellettikattila	1,5	1	1,5	2	4	9,5
2 kpl Maakaasukattila	1	1	1	5	2	10

Käyttövarmuus arvioidaan maakaasukattilalla parhaaksi, kun taas pellettikattiloilla ja leijupetikattilalla polttoaineen, tuhkan ja savukaasujen käsittelyjärjestelmän takia käyttövarmuus on hieman heikompi. Leijupetikattilan käyttövarmuus on heikoin, sillä kattiloita on vain yksi. Säädettävyyys on erinomainen kahdella kattilalla, joilla myös säätövara on parempi leijupetikattilaan verrattuna. Kustannuksissa on selkeä järjestys, mutta

erot kattiloiden välillä ovat kuitenkin suhteellisen pieniä. Merkittäviä päästöjä kattiloilla ovat typenoksidipäästöjen lisäksi maakaasukattilalla hiilidioksidipäästöt. Painoarvoa hiilidioksidipäästöille on vaikea arvioida, mutta yhtiön tulevaisuuden tavoitteiden takia luku on suuri. Polttoainetilanteella tarkoitetaan yleisesti uuden kattilan polttoaineiden saatavuuden, varmuuden ja vaihtoehtojen määrää. Usealla polttoainevaihtoehdolla on selvät hyödyt yksittäiseen polttoaineeseen verrattuna. Tilanne polttoaineiden kanssa on leijupetikattilalla erinomainen monien polttoainevaihtoehtojen ja saatavuuden kannalta. Maakaasukattiloilla tilanne on myös hyvä, mutta polttoainevaihtoehtoja on vain yksi. Pellettikattiloilla epävarmuus pelletin saatavuudella ja tulevaisuuden hinnalla nostavat lukua suuremmaksi muihin kattiloihin verrattuna.

Tarkasteltavista kolmesta kattilasta ovat kaikki vaihtoehdot hyviä ja jokaisella on omat vahvuutensa. Yhteispisteiden mukaan matalapaineleijupetikattila on vaihtoehdoista paras ja pellettikattilat toisella sijalla hyvin lähellä petikattilaa. Mikäli hiilidioksidipäästöjä ei otettaisi huomioon, olisivat maakaasukattilat ylivoimaisesti paras vaihtoehto tehtaan kannalta. Kun hiilineutraalilla polttoaineella korvataan K9 – 11 kattiloiden lisäksi suuri osa K12 kattilan tuotannosta, saadaan tehtaan vuosittaisia hiilidioksidipäästöjä laskettua noin 50 000 tonnia vuosittain. Kaikista uuden kattilan tutkituista vaihtoehdoista sopivimmaksi Imatran tehtaiden voimalaitokselle todetaan matalapaineleijupetikattila. Leijupetikattila on vaihtoehdoista kaikista varmin tulevaisuuden kannalta useiden eri käytettävien polttoaineiden, niiden saatavuuden sekä tulevaisuuden hinnan kehityksen takia. Vaikka kattila on vaihtoehdoista kallein, kokonaiskustannusten erot ovat kuitenkin halvimman ja kalliimman vaihtoehdon välillä vain noin kymmenen prosenttia. Säädettävyys ja käyttövarmuus ovat hyviä ja hyväksyttävällä tasolla, vaikka pelletti- ja maakaasuvaihtoehdoilla ne olisivat hieman parempia. Kuvassa 14 esitellään uuden leijupetikattilan sijainti tehtaan voimalaitoksen kartalla ja mahdollinen polttoaineen säilöntä- sekä käsittelyalue sinisellä värillä.



Kuva 15. Stora Enson Imatran tehtaiden uusi höyryverkosto ja sähkön tuotanto.

Höyryverkoston 7 MPa korkeapainetukista ovat poistuneet kattilat K9 – 11 ja uusi K13 on liitetty 1 MPa välipainehöyrytুকীiin. Nykyisessä höyryverkostossa TU6:n läpi menevät korkeapainehöyryt jakautuivat turbiinin avulla HVP- ja HMP-tukeille. Uudessa höyryverkostossa uudella kattilalla kaikki tuotettu höyry on välipainehöyryä. Jotta tehtaalle riittää tulevaisuudessa myös HMP-höyryä, täytyy verkostoon lisätä uusi reduktioventtiili välipaine- ja matalapainetukin välille. Reduktioventtiili on kuvassa 15 merkattuna sinisellä, jonka virtauksen maksimiarvoksi arvioidaan uuden kattilan tuotannon ja turbiinista lähtevien höyryjen suhteiden perusteella noin 40 kg/s. Uudelle reduktioventtiilille kohdistuu kustannuksia, mutta ne ovat kattilainvestointiin verrattuna hyvin pieniä. Reduktioventtiiliä varten rakennettava putkisto on myös suhteellisen edullinen, sillä väli- ja matalapainetukit sijaitsevat samassa rakennuksessa vierekkäin.

9 YHTEENVETO

Kattiloiden K9 – 11 elinikäselvitys suoritettiin Kiwa Inspectan toimesta. Tarkoituksena oli selvittää miten pitkään kattiloita pystytään käyttämään turvallisesti ja ennen kuin korjauskustannukset nousevat liian suuriksi tai käyttövarmuus osoittautuu liian epävarmaksi. Kuntokartoituksen tulosten mukaan suurin vaikuttava tekijä kattiloiden elinikään on II-tulistimen ja kokoojatukin viruminen. Kuntokartoituksen, käyttökokemusten, useiden vuototapausten ja monien muiden ongelmien takia kattiloiden kunto todettiin erittäin heikoksi, eikä yksittäisillä suurkorjauksilla saada kaikkia ongelmia poistettua. Näistä syistä uuden kattilan investointiprosessi suositellaan aloitettavaksi mahdollisimman pian.

Uuden kattilan vaihtoehtoja pohdittiin eri polttoaineita tutkimalla, joista sopiviksi todettiin metsätähdehake, pelletit ja maakaasu. Näiden polttoaineiden perusteella valittiin leijupeti-, pelletti- ja maakaasukattilavaihtoehdot lähempään tarkasteluun. Lisäksi tutkittiin matalapaineekattilavaihtoehdot sekä pelletti- ja maakaasukattiloista versiot, joissa kattiloita on kaksi yhden sijasta. Kaikille kattilavaihtoehdoille laskettiin kokonaiskustannukset, joissa huomioitiin investointi- ja lisäkustannusten lisäksi muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset 20 vuoden käyttöajalta. Muuttuvat kustannukset ja polttoainekustannukset muutettiin nykyarvoon diskonttaamalla ja yhteen laskemalla kaikki nämä kustannukset saatiin vertailukelpoisia tuloksia kattilavaihtoehtojen kesken. Kustannusten perusteella kattilavaihtoehdoiksi jäivät kolme matalapainevaihtoehtoa: leijupetikattila, kaksi pellettikattilaa sekä kaksi maakaasukattilaa.

Parhaaksi uuden kattilan vaihtoehdoksi todettiin matalapaineleijupetikattila. Leijupetikattila on useiden polttoainevaihtojen ja tulevaisuuden hintojen kehityksen kannalta varmin vaihtoehto. Pelletti- ja maakaasukattila ovat myös hyviä vaihtoehtoja, mutta suurin ongelma pellettikattilassa on epävarmuus polttoaineen saatavuudessa ja maakaasukattilan suurin haaste on hiilidioksidipäästöt.

LÄHTEET

Ahlström. 1976. Leikkauspiirustus, Warko C-105 vasenkätinen. Imatran tehtaiden tietokanta. [Viitattu 7.11.2018]

Alakangas, E, Hurskainen, M, Laatikainen-Luntama, J, Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ISBN 978-951-38-8419-2. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf> [Viitattu 10.12.2019]

Alakangas, E, Impola, R. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje (VTT-M-07608-13). VTT. ISBN 978-952-9-3223-6. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-M-07608-13_2014_%20update.pdf [Viitattu 15.1.2019]

Ansaharju, T, Ilomäki, O, Katainen, H, Maaranen, K, Mäkinen, A. 1994. Materiaalitekniikka. Neljäs painos. Porvoo WSOY. 213 s. ISBN 951-0-15699-X. [Viitattu 5.2.2019]

Baltic Connector. 2019. Baltic Connector -kaasuputkihankkeen projektisivut. Saatavissa: <http://balticconnector.fi/fi/projekti/> [Viitattu 26.2.2019]

Döring, S. 2012. Using wood pellets as an energy source. In: Power from pellets. Springer, Berlin, Heidelberg. 223 s. ISBN 978-3-642-19962-2. Saatavissa: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-19962-2> [Viitattu 20.12.2018]

Energiauutiset. 2015. Pelletin voimalaitoskäyttö kasvussa. Energiateollisuus ry. Adato Energia Oy. ISSN: 2342-9143. Saatavissa: <https://www.energiuutiset.fi/uutiset/pelletin-voimalaitoskaytto-kasvussa.html> [Viitattu 19.12.2018]

EU 2017/1442. 17.8.2017. Komission täytäntöönpanopäätös (EU) 2017/1442, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU mukaisten parhaita käytettävissä olevia tekniikoita (BAT) koskevien päätelmien vahvistamisesta suuria polttolaitoksia varten. Euroopan unionin virallinen lehti, L212. Lainsäädäntö. ISSN 1977 – 0812. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2017%3A212%3ATOC#TNI> [Viitattu 25.3.2019]

Finlex. 13.11.2014. Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamiseksi. 936/2014. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140936> [Viitattu 25.3.2019]

Frank, S. 2001. Käännös Packalén, T. Kannettavat kovuusmittarit. Sovellusohje, kovuus 03/01. Krautkramer. Sonar Oy. 21 s. Saatavissa: https://www.sonar.fi/wp-content/themes/sonarfithe/ohjeet/kovuus_sovellusohje.pdf [Viitattu 6.2.2019]

Gasum. 2018. Gasum Oy online palvelusivusto asiakkaille (vaatii tunnukset). Saatavissa: <https://online.gasum.fi/#/home/> [Viitattu 23.11.2018]

Gasum. 2018. Maakaasun siirtoverkosto Suomessa. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/suomen-kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/> [Viitattu: 23.11.2018]

Huhtinen, M, Kettunen, A, Nurminen, P, Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab. 379 s. ISBN 951-37-360-2. [Viitattu 6.11.2018]

Huhtinen, M, Korhonen, R, Pimiä, T, Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy. 342 s. ISBN 978-952-13-3476-4. [Viitattu 6.11.2018]

Juutinen, R. 2019. KPA Unicon. Puhelinhaastattelu 25.2.2019.

Kaukoaho, J. 2018. Metsätalousinsinööri; metsäenergiapäällikkö, Stora Enso. Haastattelu 15.1.2019.

KnowPulp. 2018. Kemikaalikierto: Soodakattila – Tiivistelmä. Saatavissa: http://www.knowpulp.com/www/suomi/pulping/recovery_boiler/1_general/frame.htm [Viitattu 6.11.2018]

KPA Unicon. N.d. Unicon pelletti. Pelletikattilan esittely. Saatavissa: http://kpaunicongroup.fi/fi/unicon_pelletti [Viitattu 3.1.2019]

Matikainen, O. 2019. Diplomi-insinööri; käyttöinsinööri, Stora Enso Oy, Imatran tehtaat, voimalaitos. Haastattelu 14.3.2019.

Metsälehti. 2019. Metsäenergian käyttöpaikkahinnat. PIX Pellet Nordic Index. Pohjoismaisen teollisen pelletin arvo. Saatavissa: <https://www.metsalehti.fi/puunhinta/metsaenergian-kayttopaikkahinnat/> [Viitattu 4.1.2019]

Nuutinen, J. 2019. Advisor, Energy & Automation. Stora Enso Oy, Anjalankosken voimalaitos. Haastattelu 14.2.2019.

Oksanen, J. 2018. Paksuusmittauspöytäkirja. K9 Kattila, Stora Enso Kaukopää. Dekra Industrial Oy. [Viitattu 7.2.2019]

Puttonen, P, Latvala, K, Kähkönen, A. 2019. Kuntokartoitus Kattila K9. Kiwa Inspecta. 21 s. [Viitattu 21.1.2019]

Raiko, R, Saastamoinen, J, Hupa, M, Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Teknistieteelliset akatemit 750 s. ISBN 951-666-604-3. [Viitattu 19.12.2018]

Saarinen, M. 2018. Diplomi-insinööri; luotettavuusinsinööri, Efora Oy Imatran tehtaat. Sähköpostiviesti 12.12.2018.

Stora Enso. 2014. K9 – 11 Kattilalaitoksen päämitoitus ja rakenne. Imatran tehtaiden liiketoimintajärjestelmä. [Viitattu 8.11.2018]

Stora Enso. 2016. Stora Enson höyryvoimalaitoksen esittelymateriaali. Imatran tehtaiden tietokanta. [Viitattu 8.11.2018]

Stora Enso. 2017. Imatran tehtaiden taselaskennat 2017. Imatran tehtaiden tietokanta. [Viitattu 6.11.2018]

Stora Enso. 2018. Imatran tehtaiden esitysaineisto. Imatran tehtaiden tietokanta. [Viitattu 9.11.2018]

Tuiremo, J. 2017. Voimalaitoksen korkean lämpötilan komponenttien virumisen hallinta. Hitsaustekniikka, 5/2017. [Viitattu 6.2.2019]

Tuiremo, J. 2019. Stora Enso Kaukopää, Kaasukattilan K9 näyteputken tutkimus 2018. Kiwa Inspecta. Kuntokartoitus kattila K9 liite 5. 6 s. [Viitattu 21.1.2019]

Tuiremo, J, Winqvist, T. 2017. Jäljennetarkastukset voimalaitosten huoltoseisokeissa. Hitsaustekniikka, 5/2017. [Viitattu 6.2.2019]

Ukkonen, E. 2018. Diplomi-insinööri; energiajohtaja, Stora Enso. Imatra. Haastattelu 11.1.2019.

Vakkilainen, E. 2005. Kraft recovery boilers – Principles and practice. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/279871546_Kraft_recovery_boilers_-_Principles_and_practice [Viitattu 14.12.2018]

Valmet. 2016. Valmet toimittaa puupellettilämpölaitoksen Helenin Salmisaaren voimalaitokselle Helsinkiin. Valmet lehdistötiedotteet 2016. Saatavissa: <https://www.valmet.com/fi/media/uutiset/lehdistotiedotteet/2016/valmet-toimittaa-puupellettilampolaitoksen-helenin-salmisaaren-voimalaitokselle-helsinkiin/> [Viitattu 25.2.2019]

Varis, M. Diplomi-insinööri; Käyttöpäällikkö, Stora Enson Imatran tehtaas voimalaitos. Haastattelu 15.3.2019.

Vesanto, P, Hiltunen, M, Moilanen, A, Kaartinen, T, Laine-Ylijoki, J, Sipilä, K, Wilén, C. 2007. Kierrätyspolttoaineiden ominaisuudet ja käyttö. Selvitys kierrätyspolttoaineiden laatuominaisuuksista ja soveltuvuudesta leijupolttoon. VTT tiedotteita – research notes 2416. ISBN 978-951-38-6973-1. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2416.pdf> [Viitattu 22.2.2019]

Väyrynen, M. 2018. Pellet production and sales manager, Stora Enso. Puhelinhaastattelu 14.1.2018.

Zevehoven, R, Kilpinen, P. 2004. Control of pollutants in flue gases and fuel gases. Chapter 4: Nitrogen. Helsinki University of Technology. ISBN 951-22-5527-8. Saatavissa: <http://users.abo.fi/rzevenho/gasbook.html> [Viitattu 14.3.2019]