

LUT-yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Suuret biomassakäyttöiset höyryvoimalaitokset

Large biomass-fired steam power plants

Työn tarkastaja: Juha Kaikko

Työn ohjaaja: Juha Kaikko

Lappeenranta 19.04.2019

Sami Hiltunen

## **TIIVISTELMÄ**

Opiskelijan nimi: Sami Hiltunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Juha Kaikko

Kandidaatintyö 2019

35 sivua, 13 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: kandidaatintyö, biomassa, höyryvoimalaitos

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on käydä läpi suurien biomassakäyttöisten höyryvoimalaitosten käytännön toteutustapoja, haasteita ja tulevaisuuden näkymiä. Lisäksi työssä esitetään suurien ja aktiivisessa käytössä olevien voimalaitosten suorituskyky- ja rakennetietoja sekä investointikustannuksia. Työtä varten toteutettu tutkimus on tehty perehtymällä kirjallisuuteen sekä verkkolähteisiin.

Työssä käy ilmi, että suurimmat voimalaitokset ovat sähköteholtaan hieman alle 300 MW. Tämän lisäksi huomataan, että kiertoleijukattila on yleisin suuren kokoluokan voimalaitoksissa, johtuen sen soveltuvuudesta biomassalle.

Biomassan voidaan olettaa yleistyvän höyryvoimalaitosten polttoaineena fossiilisten polttoaineiden käytön vähennyksistä johtuen. Suuremman kokoluokan biomassavoimalaitokset soveltuvat hyvin korvaamaan fossiilisia polttoaineita käyttäviä voimalaitoksia. Biomassan jalostusmenetelmien kehittyessä ja sitä kautta energiatiheämmän biomassan avulla mahdollistetaan voimalaitosten kapasiteetin kasvu. Suuressa roolissa biomassan käytössä fossiilisten polttoaineiden korvaajana on myös valtioiden maksamat tuet uusiutuvalle energialle sekä fossiilisten polttoaineiden päästöoikeuksien hinnat. Päästöoikeuksien hintojen kasvu sekä biomassalle kohdistetut tuet tekisivät biomassasta kilpailukyysisemmän voimalaitosten polttoaineena ja sitä kautta lisääisivät sen käyttöä huomattavasti.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Teoreettinen tausta</b>	<b>5</b>
<b>3 Käytännön toteutustavat ja haasteet</b>	<b>9</b>
3.1 Polttoaine.....	9
3.2 Lauhdevoimalaitos .....	12
3.3 Vastapainevoimalaitos.....	13
3.4 Vesihöyryjärjestelmä.....	14
3.5 Polttotekniikka.....	16
3.5.1 Arinapoltto .....	16
3.5.2 Leijukerrospoltto .....	18
3.5.3 Soodakattila.....	21
3.6 Käytännön toteutustavat hyötysuhteen parantamiseksi.....	22
3.6.1 Syöttöveden väliottoesilämmitin.....	22
3.6.2 Höyryn välitulistus .....	24
3.7 Haasteita .....	25
<b>4 Kaupallinen tarjonta</b>	<b>25</b>
4.1 Alholmens Kraftin biovoimalaitos .....	25
4.2 Kaukaan Voiman biovoimalaitos .....	27
4.3 Polaniec Power Station.....	29
4.4 Gainesville Renewable Energy Center.....	29
4.5 Tees Renewable Energy Plant.....	30
4.6 Yhteenvetotaulukko.....	31
<b>5 Tulevaisuuden näkymät</b>	<b>32</b>
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>34</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>36</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$h$	ominaisentalpia	kJ/kg
$p$	paine	bar, Pa
$P$	teho	W
$q$	lämpöarvo	MJ/kg
$s$	ominaisentrofia	J/kgK
$T$	lämpötila	°C, K
$v$	ominaistilavuus	m <sup>3</sup> /kg

### Kreikkalaiset aakkoset

$\eta$	hyötysuhde	
$\Phi$	lämpövirta	W

### Dimensiottomat luvut

$r$	rakennusuhde
-----	--------------

### Alaindeksit

e	sähkö
syve	syöttövesipumppu
t	terminen
th	lämpö
turb	turbiini

### Lyhenteet

BFB	kerrosleijukattila
CFB	kiertoleijukattila
NO <sub>x</sub>	typenoksidi
SO <sub>x</sub>	rikinoksidi

## 1 JOHDANTO

Tulevaisuuden energia-alan haasteita ovat energiankulutuksen kasvun hillitseminen, ympäristövaikutusten väheneminen sekä energiamarkkinoiden vapautuminen. Kasvava energiantarve johtaa kasvaviin ympäristöpaineisiin ilmastonmuutoksen osalta. Ilmastonmuutoksen kehittymistä voidaan hillitä useilla eri keinoilla, kuten energiansäästämisellä ja uusiutuvilla energianlähteillä, esimerkiksi biomassalla. Tulevaisuudessa energiantuotantoon käytettävä kehitys- ja tutkimuspanos tulisi etenkin Suomessa suunnata muun muassa biomassan leijukerrosteknologiaan ja uusiin vastapainevoimalaitos ratkaisuihin. (VTT 2015 a, 11.)

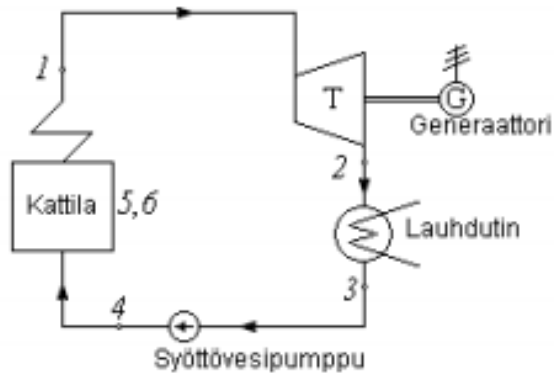
Tässä kandidaatin työssä keskitytään suuren kokoluokan biomassakäyttöisiin höyryvoimalaitoksiin. Aluksi käydään läpi yleisimpiä voimalaitosten rakenteita, toteutustapoja sekä haasteita. Tämän jälkeen esitetään suuria, aktiivisessa käytössä olevia voimalaitoksia sekä niiden rakenteita, suorituskykytietoja ja investointikustannuksia. Lopuksi työssä käsitellään tulevaisuuden energiantuotannon kehittymistä, uusia biomassaa koskevia vaatimuksia ja mahdollisia skenaarioita biomassan tulevaisuudesta höyryvoimalaitosten polttoaineena.

Työn tavoitteena on esitellä biomassan käyttöä höyryvoimalaitoksissa sekä antaa kuva kuinka suuren kapasiteetin biomassakäyttöisiä höyryvoimalaitoksia on käytössä. Lisäksi tavoitteena on pohtia kuinka biomassan käyttö tulee muuttumaan ja lisääntyvätkö biomassakäyttöiset höyryvoimalaitokset tulevaisuudessa. Työn toteuttamiseen on käytetty kirjallisuus- ja verkkolähteitä.

## 2 TEOREETTINEN TAUSTA

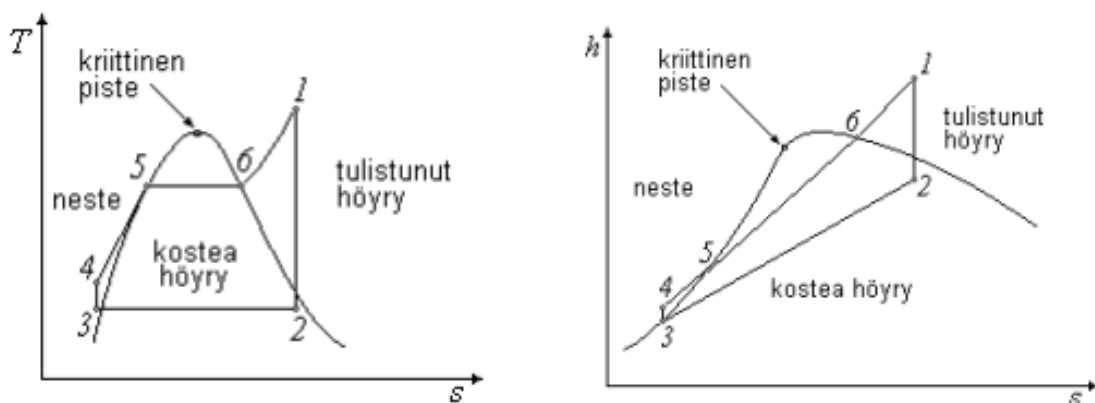
Höyryvoimalaitoksen toiminta perustuu prosessiin, jossa kattilaan syötetty syöttövesipumpulla paineistettu vesi höyrystetään ja siirretään tulistimelle. Tulistimella höyryyn tuodaan lisää lämpöä, jolloin höyry tulistuu. Tämän jälkeen tulistettu höyry johdetaan höyryturbiinille, jossa höyry paisuu ja sen seurauksena höyryyn paine  $p$  ja lämpötila  $T$  laskevat ja osa höyryyn sisältämästä energiasta saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi eli turbiinin akselin pyörimisenergiaksi. Turbiinin akselin

pyörimisenergia saadaan muutettua sähköenergiaksi generaattorin avulla, jota turbiinin akseli pyörittää. Turbiinin jälkeen höyry siirtyy lauhduttimelle, jossa se lauhtuu takaisin nesteeksi. Yksinkertaistetun höyryvoimalaitoksen rakenne on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Yksinkertaistettu höyryvoimalaitoksen rakenne (Tynjälä 2010, 46).

Höyryvoimalaitosprosessille hyvä teoreettinen vertailuprosessi on Clausius-Rankine -prosessi, joka on esitetty kuvassa 2. Ideaalisessa Clausius-Rankine prosessissa ei oteta huomioon häviöitä ja pumpun paineennousu sekä turbiinin paisunta oletetaan isentrooppiseksi, jolloin systeemin ominaisentropia  $s$  pysyy vakiona.



**Kuva 2.** Clausius-Rankine -prosessi  $T,s$ -tasossa ja  $h,s$ -tasossa (Tynjälä 2010, 46).

Kuvassa 2 esitetyn kiertoprosessin ensimmäisessä vaiheessa tulistimelta tullut tulistettu höyry paisuu isentrooppisesti turbiinissa, jolloin höyryn ominaisentalpia ja lämpötila laskevat. Tämän jälkeen höyry lauhtuu nesteeksi lauhduttimessa lämpötilan ollessa vakio ja entalpien laskiessa. Kolmannessa vaiheessa syöttövesipumppu nostaa veden paineen isentrooppisesti, jolloin entalpia ja lämpötila muuttuvat vain vähän. Neljännessä vaiheessa vesi kuumenee kattilassa vakioaineessa kiehumispisteeseen, jolloin veden lämpötila ja entalpia kasvavat. Viidennessä vaiheessa vesi höyrystyy, jolloin lämpötila ja paine eivät muutu, mutta entalpia kasvaa. Viimeisessä vaiheessa höyry tulistetaan vakioaineessa, jolloin sen lämpötila ja entalpia kasvavat. (Tynjälä 2010, 46.)

Höyryvoimalaitoksen prosessihyötysuhde eli terminen hyötysuhde määritetään turbiinin ja syöttövesipumpun termisten tehojen erotuksen ja kiertoaineeseen tuodun lämpövirran avulla, yhtälöllä 1.

$$\eta_t = \frac{P_{\text{turb}} - P_{\text{syve}}}{\Phi_{\text{sisään}}} \quad (1)$$

missä	$P_{\text{turb}}$	turbiinin terminen teho [W]
	$P_{\text{syve}}$	syöttövesipumpun terminen teho [W]
	$\Phi_{\text{sisään}}$	kiertoaineeseen tuotu lämpövirta [W]

Hyötysuhdetta voidaan parantaa kasvattamalla turbiinin termisen tehon ja syöttövesipumpun termisen tehon erotusta. Tämä onnistuu kasvattamalla turbiinille tulevan höyryn lämpötilaa ja laskemalla lämmönpoistolämpötilaa alentamalla lauhduttimen painetta. Kattilan paineen kasvattaminen parantaa myös hyötysuhdetta, kun lämmöntuontilämpötila sekä turbiinin terminen teho kasvaa. Yleisiä käytännön tapoja hyötysuhteen parantamiseksi ovat esimerkiksi välitulistus ja syöttöveden esilämmitys. (Tynjälä 2010, 92.)

Höyryvoimalaitoksen sähköntuottohyötysuhde voidaan esittää yhtälön 2 avulla.

$$\eta_e = \frac{P_e}{\Phi_{pa}} = \eta_k \eta_p \eta_{th} \eta_{mg} \eta_u \eta_\varepsilon \quad (2)$$

missä	$\eta_e$	sähköntuottohyötysuhde
	$P_e$	voimalaitoksen nettosähköteho [W]
	$\Phi_{pa}$	polttoaineteho [W]
	$\eta_k$	kattilahyötysuhde
	$\eta_p$	putkistohyötysuhde
	$\eta_t$	prosessihyötysuhde
	$\eta_{mg}$	turbogeneraattorin hyötysuhde
	$\eta_u$	muuntajahyötysuhde
	$\eta_\varepsilon$	voimalaitoksen omakäyttöhyötysuhde

Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa vastapaine- ja lauhdevoimalaitoksiin. Vastapainevoimalaitoksessa turbiinin jälkeinen höyrynpaine ja lauhtumislämpötila ovat korkeat, jonka vuoksi höyryä voidaan käyttää myös lämmitystarkoitukseen. Lauhdevoimalaitoksissa taas kyseinen paine ja lauhtumislämpötila ovat niin alhaiset, ettei lämpöä voida hyödyntää lämmitykseen. Tästä syystä lauhdutusvoimalaitoksia käytetään pääasiallisesti pelkästään sähköntuotantoon, kun taas vastapainevoimalaitoksista saadaan myös kaukolämpöä tai vastapainehöyryä teollisuuteen sähkön lisäksi. (Huhtinen ym. 2013, 12.) Kuitenkin myös lauhdevoimalaitoksia voidaan käyttää kaukolämmön tai prosessihöyryn tuottamiseen lisäämällä väliottoja. Tällöin tarvittava höyry otetaan halutussa paineessa ja lämpötilassa, joko yhden tai useamman välioton kautta ja loppuosa höyrystä paisuu turbiinissa lauhduttimen paineeseen.



Höyryvoimalaitoksen kokonaishyötysuhde, joka ottaa huomioon myös voimalaitoksen lämpötehon, voidaan esittää yhtälön 3 avulla.

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_e + \Phi_{\text{th}}}{\Phi_{\text{pa}}} \quad (3)$$

missä	$\eta_{\text{tot}}$	kokonaishyötysuhde
	$P_e$	voimalaitoksen sähköteho [W]
	$\Phi_{\text{th}}$	voimalaitoksen lämpöteho [W]

### 3 KÄYTÄNNÖN TOTEUTUSTAVAT JA HAASTEET

Tässä kappaleessa käsitellään biomassakäyttöisten lauhde- ja vastapainevoimalaitosten käytännön toteutustapoja kuten vesikiertoa, polttotekniikkaa ja hyötysuhdetta parantavia rakennemuutoksia. Lisäksi käsitellään biomassaa polttoaineena ja höyryvoimalaitosten tyypillisimpiä haasteita.

#### 3.1 Polttoaine

Biomassan käytöllä energiantuotannossa voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden eli esimerkiksi hiilen käyttöä ja näin vähentää niiden aiheuttamia päästöjä. Biomassan hyötyjä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin ovat esimerkiksi alhaisemmat päästöt, paikallisen talouden kehittyminen ja energiantuotannon omavaraisuusasteen kasvu. Biopolttoaineita, joita voidaan hyödyntää energiantuotannossa ovat esimerkiksi puuperäiset polttoaineet, peltobiomassapolttoaineet, orgaaninen jäte, turve ja mustalipeä. Yleisimpiä höyryvoimalaitoksissa käytettäviä biomassapolttoaineita ovat puuperäiset polttoaineet, turve ja mustalipeä. Puuperäisestä polttoaineesta suuri osa saadaan metsäteollisuudesta ja sen sivutuotteista, mistä johtuen useat puuperäisiä polttoaineita käyttävistä höyryvoimalaitoksista on sijoitettu esimerkiksi sellutehtaiden läheisyyteen.

Biomassapohjaisten polttoaineiden kosteuspitoisuus voi olla polttoaineesta riippuen korkea. Kuivaamalla polttoainetta esimerkiksi polttoaineen syöttöjärjestelmässä, voidaan

laitoksen hyötysuhdetta parantaa. Tämä kuitenkin aiheuttaa laitokselle lisäkustannuksia, jonka takia esimerkiksi puupolttoaineita ja turvetta poltetaan usein ilman esikuivausta, sillä leijukerroskattilat mahdollistavat tämän hyvin. (JRC 2017, 449.)

Biomassan käytöllä fossiilisten polttoaineiden korvaajana, pystytään vähentämään fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia päästöjä, sillä biopolttoaineiden päästöt ovat alhaisempia. Kuitenkin myös biomassaa polttaessa syntyy päästöjä. Päästöt riippuvat polttoaineesta ja polttotavasta, mutta esimerkiksi puupolttoaineella ne ovat pääasiassa typenoksideja  $\text{NO}_x$ , rikkipäästöjä  $\text{SO}_x$ , ja pölypäästöjä. Typpipäästöjä voidaan vähentää ilman- ja polttoaineensyötön optimoimisella sekä katalyyttisellä typenoksidien poistomenetelmällä (SCR) ja katalyyttömällä menetelmällä (SNCR). Poltosta syntyviä rikkipäästöjä voidaan vähentää syöttämällä kalsiumoksidia, kalkkikiveä tai kalsiummagnesiumkarbonaattia polton aikana tulipesään. Polton jälkeen rikkipäästöjä voidaan vähentää savukaasupesureilla. Pölypäästöjä voidaan vähentää esimerkiksi sähkö- tai pussisuodattimella. (Vakkilainen 2017, 212.)

Puuperäiset polttoaineita ovat esimerkiksi hake, hakkuutähteet, kannot, puupelletit ja sahateollisuuden sivutuotteet. Tuoreen puun kosteus on tavallisesti noin 40-60 %. Siihen vaikuttavat puun laji, kasvupaikka, sekä ikä. Haihtuvien osuus puusta on korkea noin 80-90 %. Tämän takia puu on pitkäliekkinen ja tarvitsee suuren palotilan. Puupolttoaineen tuhkapitoisuuden ovat yleisesti alhaiset, mikä helpottaa tuhkan käsittelyä. Puun tuhkan sintraantuminen alkaa noin 900-1000 °C. Puun alkuainekoostumus koostuu pääasiallisesti hiilestä, vedystä ja hapesta. Suomessa kasvavien puiden kuiva-aineen typpipitoisuudet ovat alle 0,2 % ja rikkipitoisuudet ovat alle 0,05 %. Puun lämpöarvo  $q$  on muihin kiinteisiin polttoaineisiin verrattuna suhteellisen pieni. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on noin 18,3-20MJ/kg. (Alakangas 2000, 37-39.)

Mustalipeä luokitellaan puuperäisiin polttoaineisiin ja se on sellunkeitossa liuenneen ligniinin ja keittokemikaalien seos. Mustalipeän valmistuksessa puusta poistetaan epäorgaanisten keittokemikaalien avulla suurin osa ligniinistä alkalisisissa olosuhteissa. Samalla osasta selluloosaa ja puun muista hiilihydraattikomponenteista muodostuu

karboksyylihappoa. Mustalipeän kuiva aine sisältää siten pilkkoutunutta ligniiniä, karboksyylihappoja, epäorgaanista ainesta sekä pieniä määriä uuteainefraktioita. Mustalipeän kemiallinen koostumus vaihtelee paljon riippuen lipeän kuiva-aineesta, raaka-aineena käytetyn puun laadusta, keittokemikaaleista ja tehtaan prosessivesien kierrätysasteesta. Erona muihin polttoaineisiin on mustalipeän sisältämän epäorgaanisen aineen ja veden suuri määrä. Mustalipeän kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo on noin 13-15MJ/kg. Lipeän kuiva-ainetasoa voidaan nostaa lämpökäsittelmällä sitä. Korkeampi kuiva-ainepitoisuus nostaa soodakattilan hyötysuhdetta, mutta kuiva-ainetason nostamista rajoittavat haihduttamon likaantuminen ja lipeän käsittelyn hankaloituminen. Mustalipeän tuhkan ominaisuuksiin kuuluu sen alhainen sulamislämpötila, jota onkin soodakattilan likaantumisongelmien aiheuttaja. (Alakangas 2000, 79-82.)

Turve muodostuu kuolleista kasvin osista maatumalla kosteissa olosuhteissa ja se uusiutuu hyvin hitaasti. Kosteuden ja hapen puutteen takia kasvit eivät hajoa kunnolla, jolloin syntyy turvekerrostumaa. Turpeen kuiva-aine sisältää vetyä 5-6,5 %, happea 30-40 %, rikkiä alle 0,3 % ja typpeä 0,2-3,1 %. Suuren hiilipitoisuuden takia turve palaa hitaammin kuin puupolttoaineet. Haihtuvien osuus turpeessa on pienempi kuin puupolttoaineilla, noin 56-74 %. Näiden syiden takia turpeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on suurempi kuin puun, noin 19-22,6 MJ/kg. Lämpöarvoon vaikuttaa maatumisaste, turvelaji, hiilipitoisuus sekä tuhkapitoisuus. (Alakangas 2000, 88-90.)

Turvetta käytetään polttoaineena höyryvoimalaitoksissa, varsinkin pohjoismaissa. Turve helpottaa muiden, vaikeampien polttoaineiden polttoa ja sitä käytetäänkin useasti esimerkiksi puuperäisten polttoaineiden kanssa samanaikaisesti. (VTT 2010 b, 17.)

Peltobiomassasta voidaan tuottaa nestemäisiä polttoaineita ja sitä voidaan polttaa kiinteässä muodossa. Kiinteinä polttoaineina polttamiseen soveltuvat Suomessa kasvavista kasveista esimerkiksi olki, jyvät ja energiaheinä. Oljen ja jyvän polttaminen samanaikaisesti ei ole mahdollista, niiden erilaisten palamisominaisuuksien takia. Oljen käytössä energiantuotannon polttoaineena aiheuttaa ongelmia sen tiheys, mikä tekee sen kuljetuksesta kallista ja hankaloittaa varastointia. Myös pieni energiatiheys, suuri

tuhkapitoisuus ja tuhkan alhainen sulamislämpötila tekevät oljesta muita kiinteitä polttoaineita hankalamman käyttää. Oljen polttokosteus on noin 20 % ja tehollinen lämpöarvo kyseissä kosteudessa noin 13,5 MJ/kg. Jyvän teholliset lämpöarvot ovat samaa luokkaa kuin oljella. Ruokohelpi on suomessa luonnonvaraisena kasvava energiaheinä ja sen polttoaineominaisuudet vaihtelevat lajikkeen, kasvupaikan, lannoituksen ja korjuu ajankohdan mukaan. (Alakangas 2000, 98-103.)

Fossiilisiin polttoaineisiin eli esimerkiksi kivihiileen verrattuna biomassapolttoaineilla on huomattavasti alhaisempi tehollinen lämpöarvo ja korkeampi kosteuspitoisuus, mikä tekee niiden poltosta haastavampaa. Myös energiatiheys on biomassalla todella alhainen, mikä rajoittaa biomassakäyttöisten voimalaitosten kapasiteettiä. Kuitenkin esimerkiksi tuhkapitoisuus on biomassalla taas alhaisempi. Kemialliselta koostumukseltaan kivihiili eroaa biomassasta korkeammalla hiili-, typpi- ja rikkiosuudella sen alkuainejakaumassa. (Alakangas 2000, 205-206.)

### **3.2 Lauhdevoimalaitos**

Lauhdevoimalaitokset ovat höyryvoimalaitoksia, joissa tuotetaan pelkästään sähköä. Turbiinissa höyry paisuu ja pyörittää turbiinin akselia. Pyörimisenergia muutetaan generaattorilla sähköksi. Turbiinissa paisunut höyry johdetaan matalassa paineessa lauhduttimelle, jossa höyry lauhtuu vedeksi ja vapautuva lämpö siirtyy lauhduttimen jäähdytysveteen. (Huhtinen ym. 2013, 89-90.) Biomassan poltossa lauhdevoimalaitokset ovat huonomman kokonaishyötysuhteen takia harvinaisempia kuin vastapainevoimalaitokset. Lauhdevoimalaitosten hyötysuhteen parantamiseksi tulee hyödyntää välitulitusta ja monivaiheista syöttöveden esilämmitystä sekä suunnitella prosessi siten, että tuorehöyryn paine ja lämpötila ovat mahdollisimman korkeita ja lauhduttimen paine mahdollisimman alhainen. Monet lauhdevoimalaitokset on jälkepäin muutettu myös lämpöä tuottavaksi voimalaitokseksi. (Huhtinen ym. 2013, 89-90).

### 3.3 Vastapainevoimalaitos

Vastapainevoimalaitokset toimivat samalla periaatteella kuin lauhdevoimalaitokset, mutta vastapainevoimalaitoksessa turbiinilta poistuvan höyryn paineen ja lämpötilan ollessa riittävän korkea voidaan se hyödyntää lämmönsiirtimen avulla kaukolämpönä tai teollisuuden prosessilämpönä. Teollisuuden käyttöön menevä prosessihöyry on tavallisesti lämpötilaltaan noin 150-200 °C ja kaukolämpöverkkoon syötettävä höyryn lämpötila on tavallisesti 110-130 °C. Teollisuudessa tarvitaan usein höyryä eri paineilla, joten höyryä voidaan ottaa myös turbiinin välitoista. Höyryn paisuntaa vastapainevoimalaitoksen turbiinissa ei toteuteta yhtä pitkälle kuin lauhdevoimalaitoksissa, joten höyryn paine ja lämpötila jäävät korkeammaksi turbiinin jälkeen. Paineen korkeuden takia vastapainevoimalaitoksen sähköntuotantohyötysuhde on alhaisempi kuin lauhdevoimalaitoksessa, mutta kokonaishyötysuhde parempi. (Tynjälä 2010, 97.)

Vastapainevoimalaitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon suhdetta kuvataan rakennussuhteella  $r$ , joka saadaan yhtälöllä 4.

$$r = \frac{P_e}{\Phi_{th}} \quad (4)$$

missä  $P_e$  voimalaitoksen tuottama nettosähköteho

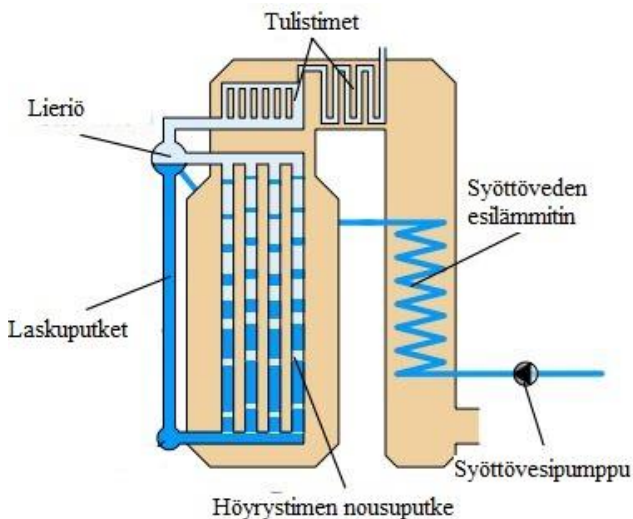
$\Phi_{th}$  voimalaitoksen tuottama lämpöteho

Höyryvoimalaitoksen rakennussuhde voi vaihdella 0,3-0,6, prosessin kytkennöistä riippuen. Rakennussuhdetta parantavia kytkentöjä ovat esimerkiksi välitulistus, syöttöveden esilämmitys ja kaukolämpövoimalaitoksissa monivaiheinen kaukolämpöveden lämmitys. (Huhtinen ym. 2013, 47.)

### 3.4 Vesihöyryjärjestelmä

Voimalaitoskattilat voidaan jakaa vesihöyryjärjestelmän perusteella luonnonkiertokattiloihin, läpivirtauskattiloihin ja pakkokiertokattiloihin. Biomassan poltossa käytetään pääasiallisesti luonnonkiertokattiloita.

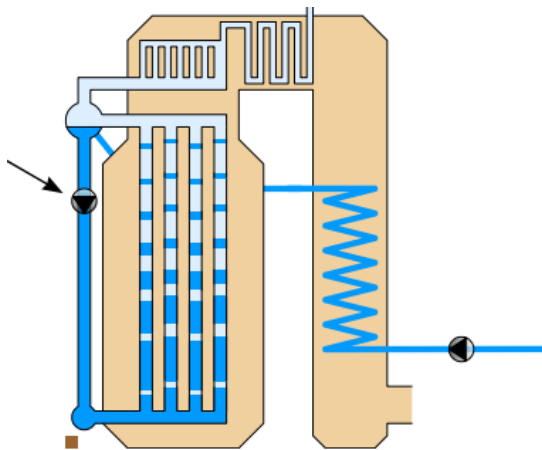
Luonnonkiertokattiloissa vesi tuodaan syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpun avulla mahdollisesti syöttöveden esilämmittimen ja savukaasuvirrassa olevan ekonomaiserin kautta lieriöön. Lieriöstä vesi johdetaan laskuputkien kautta höyrystinputkiin, jotka ympäröivät tulipesää. Tulipesän lämmittäessä putkia osa vedestä höyrystyy, jonka jälkeen kylläisen veden ja vesihöyryn seos palautetaan lieriöön. Lieriössä seos erotetaan toisistaan ja höyry nousee lieriön yläosaan. Tämän jälkeen höyry johdetaan tulistimille ja kylläinen vesi sekoittuu muun lieriössä olevan syöttöveden kanssa ja palaa takaisin höyrystinputkiin laskuputkia pitkin. Luonnonkiertokattiloissa laskuputket ja höyrystinputket ovat yhtenäistä putkistoa. Vesi höyrystyy höyrystinputkissa ja nousee ylöspäin kevyempänä, jolloin laskuputkista virtaa tiheämpää vettä tilalle höyrystinputkiin. Tämän takia luonnonkiertokattiloissa ei tarvita pumpppua kierrättämään vettä höyrystimessä. (Huhtinen ym. 2000, 113.) Luonnonkierron periaate on esitetty kuvassa 3.



**Kuva 3.** Luonnonkierron toimintaperiaate. Muokattu lähteestä (Teir 2003, 54).

Pakkokierto-kattilassa vesi siirtyy syöttövesipumpun avulla lieriöön kuten myös luonnonkierto-kattilassa. Kuvasta 4 huomataan, että ainoa ero verrattuna luonnonkierto-kattilaan on pumppu, jonka avulla vesi kiertää höyrystimessä. Lieriöstä vesi johdetaan höyrystimeen pakkokierto-pumppujen avulla, josta höyry ja kylläinen vesi virtaa takaisin lieriöön pumppujen aiheuttaman paineen avulla.

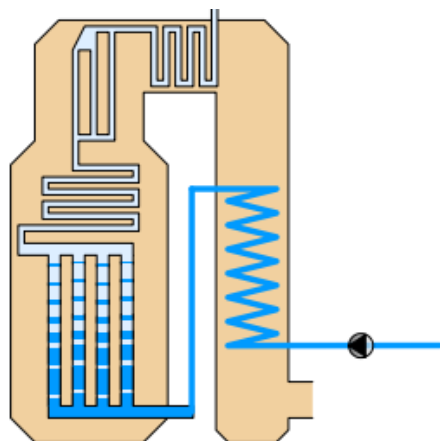
Pakkokierron ansioista pakkokierto-kattilat soveltuvat korkeammille paineille kuin luonnonkierto-kattilat. Myös luonnonkierto-kattilassa veden ja höyryn erottuminen lieriössä perustuu tiheyseroihin, joten pakkokierto-kattilakaan ei sovellu ylikriittisiin paineisiin. (Huhtinen ym. 2000, 118.)



**Kuva 4.** Pakkokierto-kattilan toimintaperiaate (Teir 2003, 62).

Läpivirtauskattilat eroavat luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloista siten, että niissä ei ole lieriötä. Tämän takia läpivirtauskattiloissa ei myöskään ole lieriön ja höyrystimen välistä kattilan sisäistä kiertoa vaan ne voidaan ajatella putkistoksi, johon vesi syötetään sisään ja toisesta päästä se poistuu tulistuneena höyrynä. Läpivirtauskattiloissa kaikki vesi höyrystyy, eikä vettä ja höyryä jouduta erottamaan, joten ne soveltuvat myös ylikriittisille paineille. Suuren tuorehöyrynpaineen saamiseksi käytetään usein läpivirtauskattiloita.

(Huhtinen ym. 2000, 120.) Kuvassa 5 on esitetty yhden läpivirtauskattilatyypin, Benson-kattilan periaate.



**Kuva 5.** Bensonin läpivirtaus kattila (Teir 2003, 65).

### 3.5 Polttotekniikka

Biomassaa voidaan polttaa erilaisilla polttotekniikoilla. Näitä ovat arinapoltto, kerrosleijupoltto ja kiertoleijupoltto. Polttoaineen ominaisuudet ja laitoksen koko vaikuttavat siihen mikä kyseisistä polttotekniikoista soveltuu parhaiten. Suuremmissa höyryvoimalaitoksissa käytetään pääasiallisesti leijukerroskattiloita, mikä johtuu niiden soveltuvuudesta vaikeasti poltettaville polttoaineille, kuten biomassalle. Höyryn tuottamiseen voidaan käyttää myös soodakattiloita, joissa poltetaan sellun käsittelyssä syntyvää mustalipeää.

#### 3.5.1 Arinapoltto

Arinapoltto on yleinen polttotekniikka kiinteän polttoaineen poltossa, mutta sitä käytetään lähinnä pienissä kokoluokissa. Arina on kattilan pohjalla oleva laite, jonka päällä polttoaine palaa. Arinan rakenteita on paljon ja ne vaihtelevat riippuen esimerkiksi poltettavan polttoaineen kosteudesta ja palakoosta. Ne voidaan jakaa kiinteisiin ja mekaanisiin arinoihin. Myös polttoaineen syöttötapa vaihtelee riippuen arinasta.



Kiinteät arinat ovat yksinkertaisia rakenteeltaan ja niissä ei ole liikkuvia osia vaan polttoaine liikkuu painovoiman ansiosta. Kiinteät viistoarinat vaativat noin 30-50 asteen kulman kiinteitä biomassapolttoaineita polttaessa. Arinan vaatima kulma riippuu polttoaineesta ja sen kyvystä liikkua palamisen aikana. Täydellisen palamisen saavuttamiseksi monissa viistoarinoissa on pienempi vaakatasoinen arina viisto-osuuden jälkeen. (Vakkilainen 2017, 205.)

Höyryn tuottamiseen käytetyistä arinoista mekaaninen viistoarina on yleisin. Suuret mekaaniset viistoarinat ovat varustettu automaattisella polttoaineen syötöllä ja tuhkan poistolla. Mekaanisissa viistoarinoissa on osia, joita liikuttamalla saadaan biomassakerros liikkumaan. Tästä syystä mekaaninen arina ei tarvitse kuin 15 asteen kulman biomassaa polttaessa. Painovoiman sijaan polttoainetta voidaan liikuttaa myös ketjunarinan tapaan ketjulla. Ketjuarinassa kiinteät kappaleet ovat kiinnitetty ketjurunkoon, joka liikuttaa polttoainetta vaakatasossa. Myös porrasarina on yksi esimerkki mekaanisesta arinasta. Porrasarina koostuu useista niin sanotuista portaista, joita liikuttamalla polttoainekerros liikkuu. (Vakkilainen 2017, 206-207.)

Arinat voivat olla myös pyöriviä kekoarinoita tai värähteleviä arinoita. Pyörivissä kekoarinoissa polttoaineen syöttö tapahtuu arinan alapuolelta muodostaen polttoaineesta keon. Niissä edestakainen vaakatasoinen pyöriväliike aiheuttaa polttoaineen valumisen alaspäin. Pyörivän kekoarinan rakenne on esitetty kuvassa 6. Värähtelevissä arinoissa taas polttoaine saadaan liikkumaan arinan värähtelyn avulla. (Vakkilainen 2017, 207.)



**Kuva 6.** Pyörivä kekoarina (Kpa Unicon 2018).

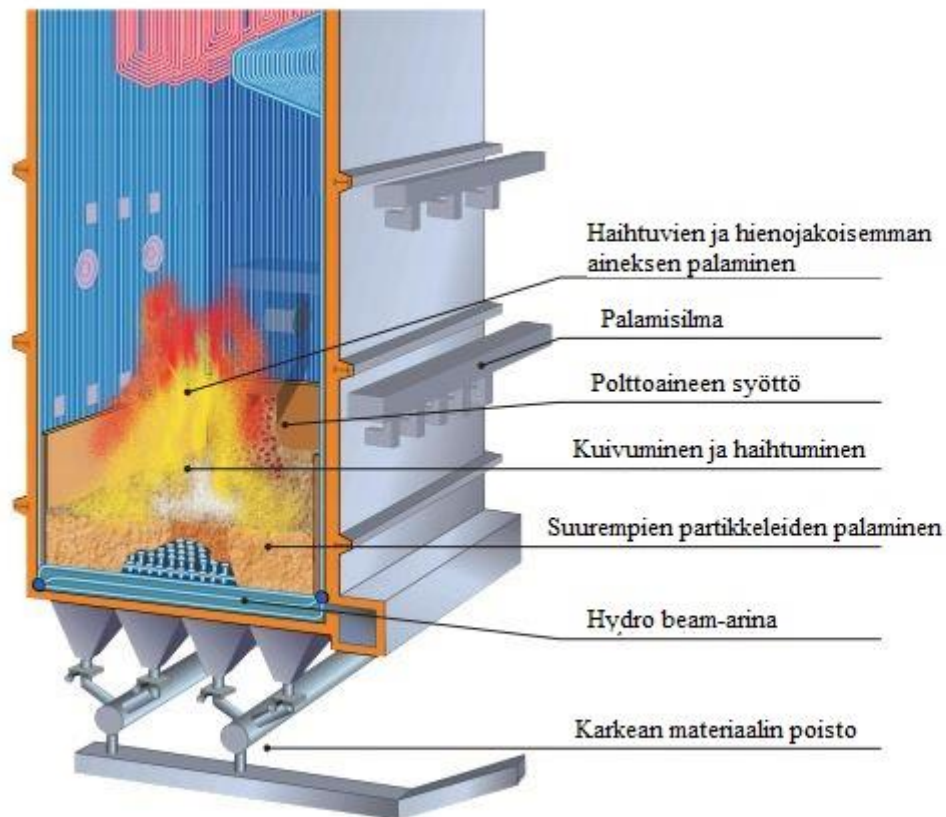
### 3.5.2 Leijukerros poltto

Leijukerros poltto on nykyään syrjäyttänyt lähes kokonaan arinapolton suuremman kokoluokan voimalaitoksissa. Leijukerros poltossa leijutetaan hiekkaa, jonka seassa on palavaa polttoainetta. Hiekan ja polttoaineen muodostamaa petiä leijutetaan alhaaltapäin puhallettavalla primääri-ilmalla. Leijukerros poltto voidaan jakaa kahteen eri tekniikkaan, kerrosleijupolttoon ja kierto leijupolttoon. (Huhtinen ym. 2013, 36.)

Etuna leijukerros poltossa on sen soveltuvuus huonolaatuisille polttoaineille, jotka ovat kosteita ja omaavat suuren tuhkapitoisuuden. Tällaiset polttoaineet ovat usein haastavia polttaa muilla polttotekniikoilla. Myös useiden polttoaineiden samanaikainen poltto onnistuu leijukerros poltossa. Lisäksi etuna voidaan pitää yksinkertaista ja halpaa rikinpoistoa, tehokasta palamista ja alhaisia typpioksidin päästöjä. (Vakkilainen 2017, 212.) Kerrosleiju- eli kuplapetikattilat ovat yleisimpiä pienemmissä kokoluokissa, kun taas kierto leijukattilat suuremmissa.

Kuplapetikattiloissa (BFB) leijutusilman nopeutta lisätään niin, että petimateriaali alkaa kuplia. Kuplapetipoltossa leijupetillä on selkeä raja mihin se loppuu ja mistä yläpuolinen kaasutila alkaa. Tästä syystä kuplapetikattiloita kutsutaan myös kerrosleijukattiloiksi. Kuplapetikattilan leijutushiekan koko on noin 1-3 mm ja leijutusnopeus noin 0,7-2 m/s. Petin korkeus on noin 0,4-0,8 m. (Huhtinen ym. 2000, 153.)

Kuplapetikattilaan polttoaine syötetään petiin petin yläpuolelta. Polttoainetta syötetään yleensä useammalla syöttötorvella, jotta se levittyy petiin tasaisesti. Ennen pääpolttoaineen, esimerkiksi biomassan syöttöä on peti lämmitettävä noin 500-600 °C lämpötilaan öljy- tai kaasupolttimilla. Tuhkan poisto kattilasta tapahtuu pohjan arinan kautta päästämällä tietty määrä hiekkaa ulos tulipesästä. Tämän jälkeen hiekka puhdistetaan seulomalla ja osa palautetaan takaisin kattilaan. Hienojakoisempi tuhka sekä vähitellen jauhautuva leijutushiekka poistuu kattilasta savukaasujen mukana. Polttoaineen tuhkan sulamisen estämiseksi on petin lämpötila pidettävä riittävän alhaisena. Polttoaineen tuhkan sulaessa hiekka sintraantuisi ja sen poistaminen olisi hankalaa ja vaatisi kattilan alasajoa. Lämpötila, jossa peti on pidettävä, riippuu siis poltettavan aineen tuhkan sulamislämpötilasta. Palamisilma kattilaan tuodaan osittain leijutusilmana ja petin päälle tuotavana sekundääri-ilmana. (Huhtinen ym. 2000, 157-158.) Kuvassa 7 on Valmetin Hypex-kuplapetikattilan tulipesän alaosa.



**Kuva 7.** kuplapetikattilan tulipesän alaosa (Valmet 2018a).

Kiertoleijukattiloissa (CFB) on käytössä suuremmat leijutusnopeudet ja hienojakoisempi petimateriaali kuin kuplapetikattiloissa. Leijutusnopeus kiertoleijukattiloissa on noin 3-10 m/s ja hiekan koko 0,1-0,5 mm. Kiertopetissä ei ole selvää rajaa niin kuin kuplapetissä vaan sen tiheys pienenee korkeuden funktiona, kun osa hiekasta liikkuu savukaasujen mukana. Tulipesästä savukaasujen mukana poistuva petimateriaali ja palamattomat hiukkaset erotetaan savukaasuerottimilla ja palautetaan takaisin tulipesään. (Huhtinen ym. 2000, 159.)

Polttoaineen syöttö kiertoleijukattiloihin tapahtuu etuseinän kautta tai sekoittamalla se savukaasuerottimelta palaavan petimateriaalin sekaan. Hienojakoinen tuhka poistuu kattilasta savukaasujen mukana, kun tuhka on niin hienojakoista, ettei se enää erotu

savukaasuerottimella. Myös kiertoleijukattila joudutaan lämmittämään riittävään lämpötilaan ennen polttoaineen syöttöä kuten kuplapetikattilakin. Palamisilma tuodaan kattilaan leijutusilmana pohjasuuttimien kautta ja sekundääri-ilmana muutaman metrin arinan yläpuolelle. (Huhtinen ym. 2000, 160.) Kuvassa 8 on esitetty kiertopetikattilan palaminen, jossa näkyy hyvin petimateriaalin kiertäminen kattilassa.



**Kuva 8.** Kiertoleijukattila (Valmet 2018, b).

### 3.5.3 Soodakattila

Soodakattilassa poltetaan sellun keitosta saatavaa mustalipeää, joka johdetaan kattilaan haihduttamolta. Haihduttamalla mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta nostetaan polttamista varten. Soodakattilalla voidaan tuottaa höyryä ja sähköä pääasiassa tehtaan omiin tarpeisiin samalla periaatteella kuin tavallisessa vastapainevoimalaitoksessa. Sähkön- ja

lämmöntuotannon lisäksi soodakattilassa kerätään mustalipeän polton aikana vapautunut rikki ja natrium uudelleen käyttöä varten. (Vakkilainen 2017, 239-240.)

Nykyiset soodakattilat ovat tavallisesti varustettu yhdellä lieriöllä, pystysuuntaisella höyrystimellä ja laajoilla tulistimilla. Nykyään lipeää voidaan käyttää korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla, mikä kasvattaa tuorehöyryn määrää. Myös savukaasuhäviöt pienenevät samalla kun savukaasuvirta vähenee, mikä mahdollistaa soodakattiloiden kapasiteetin kasvun. Savukaasuvirran suuruus on yleensä rajoittava tekijä soodakattiloiden kapasiteetin kasvattamisessa. (Vakkilainen 2017, 250-251.)

Muista kattiloista poiketen soodakattilat aiheuttavat erityisen turvallisuusriskin. Riski aiheutuu veden sekoittumisesta tulipesän palavaan ainekseen. Veden osuessa palavaan ainekseen se haihtuu nopeasti, mikä aiheuttaa paineen nousua. Paineen noustessa tulipesän rakenteet eivät kestä ja tulipesä voi räjähtää. Tästä syystä, mahdollisen vuodon ilmetessä tulee kattila ajaa alas välittömästi. (Vakkilainen 2017, 242.)

### **3.6 Käytännön toteutustavat hyötysuhteen parantamiseksi**

Voimalaitosprosessit suunnitellaan niin, että energiaa saadaan tuotettua mahdollisimman edullisesti ottaen huomioon käyttö- ja investointikustannukset. Voimalaitoksen sähköntuottohyötysuhdetta voidaan parantaa syöttöveden väliottoesilämmityksellä ja välitulistuksella ja näitä menetelmiä käytetään varsinkin suuremman kokoluokan voimalaitoksissa. Pienemmissä voimalaitoksissa voi olla kannattavampaa pyrkiä mahdollisimman yksinkertaiseen rakenteeseen, johtuen lisäkytkentöjen investointien suuruudesta verrattuna saatavaan hyötyyn. (Huhtinen ym. 2013, 48.)

#### **3.6.1 Syöttöveden väliottoesilämmitin**

Kattilaan menevää syöttövettä voidaan lämmittää turbiinin väliottohöyryllä, jolloin sen lämpötila on lähempänä kiehumispistettä jo ennen kattilaa. Syöttöveden esilämmitimet voidaan jakaa matalapaine-esilämmittimiin, korkeapaine-esilämmittimiin ja syöttövesisäiliöihin. Esilämmittimissä on hyvä lämmönsiirto ja ne toimivat pienillä

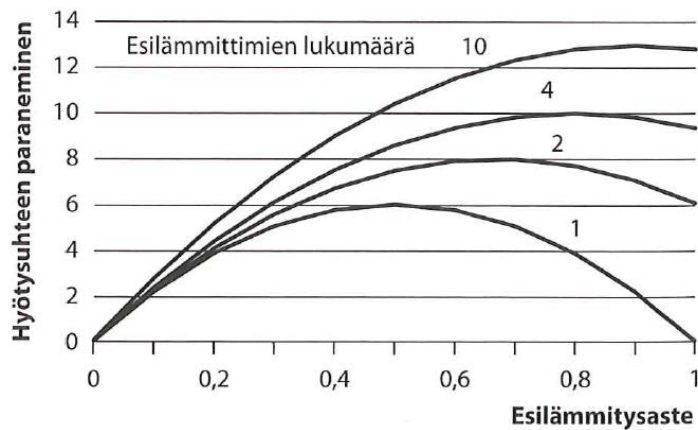
lämpötilaeroilla lauhtumislämpötilan ja syöttöveden loppulämpötilan välillä. Tätä erotusta kutsutaan asteisuudeksi. (Huhtinen ym. 2013, 48.)

Matalapaine-esilämmittimessä lämmitettävä lauhde virtaa lämmittimen putkissa, joiden pinnalle matalapaineinen väliottohöyry lauhtuu. Lauhtuessaan väliottohöyry luovuttaa lämpöä putkien läpi virtaavaan lauhteeseen. Matalapaine-esilämmittimeen asteisuus on noin kaksi astetta. (Huhtinen ym. 2013, 48-49.)

Korkeapaine-esilämmittimessä on kolme erityyppistä lämmönsiirintä, jotka ovat väliottohöyryn tulistuksen poistin, väliottohöyryn lauhdutin ja lauhteen jäähdytin. Väliottohöyry tulee korkeapaine-esilämmittimelle nimensä mukaisesti korkeassa paineessa ja tulistuneena. Aluksi höyry jäähdytetään kylmäiseksi höyryksi, jonka jälkeen höyry lauhtuu esilämmittimen putkien pintaan ja valuu lämmönsiirtimen pohjalle. Pohjalta lauhtunut höyry nousee höyrynpaineen vaikutuksesta lauhteen jäähdyttimelle. Lämmönsiirto lämmönsiirtimen putkissa virtaavaan syöttövedeen tapahtuu putkien pintojen läpi. Korkeapaine-esilämmittimen asteisuus on nollan luokkaa. (Huhtinen ym. 2013, 49-50.)

Syöttövesisäiliö toimii kattilaan syötettävän veden varaajana ja sen avulla voidaan myös käsitellä vettä eli esimerkiksi poistaa korroosiota aiheuttavaa kaasua syöttövedestä. Tämän lisäksi syöttövesisäiliö toimii sekoituslämmönsiirtimenä, jossa väliottohöyry on suoraan kosketuksissa syöttöveden kanssa. (Huhtinen ym. 2013, 49.)

Kuvassa 9 on esitetty syöttöveden esilämmityksen vaikutus voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen. Vaaka-akselilla nähdään syöttöveden esilämmitysaste, joka kuvaa kuinka lähelle höyrystymislämpötilaa syöttövesi lämmitetään. Kuvan käyrät kuvaavat kuinka esilämmittimien lukumäärä vaikuttaa pystyakselilla sijaitsevaan hyötysuhteen paranemiseen.

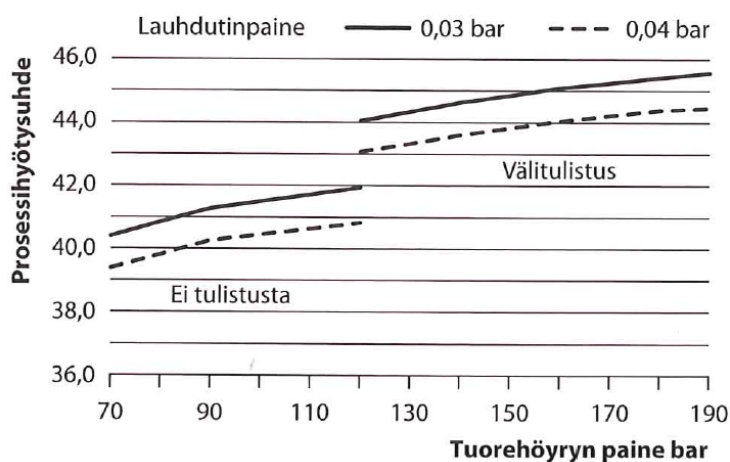


**Kuva 9.** Esilämmityksen vaikutus prosessihyötysuhteeseen (Huhtinen ym. 2008).

### 3.6.2 Höyryn välitulistus

Höyryn välitulistuksella tarkoitetaan sitä, kun korkeapaineturbiinin läpi virrannut höyry viedään takaisin kattilaan ja lämmitetään samaan lämpötilaan kuin tulistimessa. Korkeapaineturbiinin ulostulo höyrystä osa viedään kattilaan välitulistimille ja osa korkeapaine-esilämmittimille, jonka takia välitulistuspaine ja syöttöveden loppulämpötila ovat riippuvia toisistaan. (Huhtinen ym. 2013, 53)

Kuvassa 10 on esitetty tuorehöyrynpaineen, lauhdutinpaineen ja välitulistuksen vaikutus voimalaitoksen prosessihyötysuhteeseen. Kuvasta huomataan, että korkeammalla tuorehöyrynpaineella ja matalammalla lauhdutinpaineella saavutetaan korkeampi prosessihyötysuhde, johtuen turbiinin tehon noususta. Kuvasta nähdään myös, että välitulistuksella voidaan parantaa prosessihyötysuhdetta, kun höyryyn tuodaan lisää lämpöä korkeapaineturbiinin jälkeen.



**Kuva 10.** Tuorehöyryn paineen ja välitulistuksen vaikutus prosessihyötysuhteeseen (Huhtinen ym. 2008).



### **3.7 Haasteita**

Kuten aiemmin on mainittu, tuorehöyryn paineen ja lämpötilan ollessa mahdollisimman suuria, voimalaitoksen lämmöntuontilämpötila sekä sitä kautta myös hyötysuhde kasvaa. Höyryn painetta ja lämpötilaa on kuitenkin mahdotonta nostaa loputtomasti. Rajoittavana tekijänä on kattilan, putkiston ja korkeapaineturbiinin siivistön materiaalien kestävyys. Nykymateriaalit sallivat noin 620 °C lämpötilan. (Tynjälä 2010, 91.)

Voimalaitoksen turbiinilaitos koostuu yleisesti korkea-, keski- ja matalapaineturbiinista. Höyryvoimalaitoksen turbiinia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon höyryn ominaistilavuudenkasvu. Höyryn ominaistilavuus  $v$  kasvaa paisunnan lopussa suureksi, joten höyry joudutaan jakamaan yleensä useisiin matalapaineturbiineihin. Näin vältetään yksittäisen turbiinin koon kasvaminen liian suureksi. (Tynjälä 2010, 85.)

Biomassa voimalaitokset ovat pääasiassa paljon pienempiä kuin esimerkiksi hiiltä käyttävät voimalaitokset. Voimalaitosten tehoa rajoittaa biomassan alhainen lämpöarvo ja energiatiheys verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, mikä aiheuttaa sen, että biomassaa joudutaan polttamaan todella suuria määriä. Tämä aiheuttaa vaikeuksia biomassan hankinnassa. Voimalaitokset ovatkin usein sijoitettu siten, että biomassan hankinta ja kuljetus kustannukset saataisiin minimoitua. (IEA 2007 a, 2.)

## **4 KAUPALLINEN TARJONTA**

Tässä kappaleessa esitellään suurimpien aktiivisessa käytössä olevien biomassaa käyttävien höyryvoimalaitosten rakenneratkaisuja, suorituskkytietoja ja investointikustannuksia. Tämän lisäksi käsitellään rakenteilla olevaa Tees Renewable Energy Plant -voimalaitosta, joka tulee valmistuttuaan olemaan sähköteholtaan suurin biomassaa hyödyntävä voimalaitos.

### **4.1 Alholmens Kraftin biovoimalaitos**

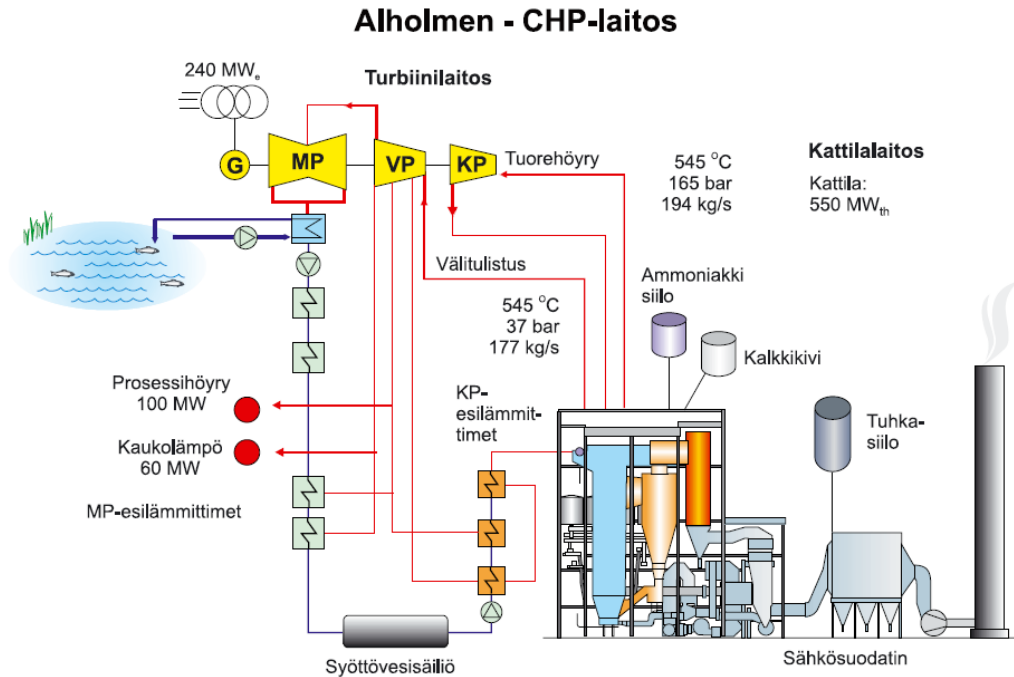
Alholmens Kraftin CHP-voimalaitos Pietarsaareissa on yksi maailman suurimmista biomassaa hyödyntävistä höyryvoimalaitoksista. Voimalaitos on rakennettu UPM Kymmenen paperi- ja sellutehtaan läheisyyteen, minkä käyttöön voimalaitos tuottaa

myös prosessihöyryä. Paperi- ja sellutehtaan sivutuotteista saadaan myös helposti poltettavaa polttoainetta biomassavoimalaitokseen. Laitoksen investointikustannus oli 170miljoonaa euroa. (Opet Finland 2001.)

Alholmens Kraftin kattila on maailman suurin biopolttoaineella käytävä kiertoleijukattila (CFB) ja sen kokonaislämpöteho on 550 MW<sub>th</sub> ja kattilahiötysuhde noin 92 %. Kattilan on toimittanut Kvaerner Pulping Oy. Laitoksen tuottaman tuorehöyryn paine on 165 bar ja lämpötila 545 °C. Kattila mahdollistaa myös useamman polttoaineen sekoituksen polttamisen, mutta se on suunniteltu pääasiallisesti biomassalle. (Opet Finland 2001.)

Voimalaitoksen hyvän hiötysuhteen takaamiseksi käytetään höyryn välitulistusta sekä ilman esilämmitintä sekä lauhteen ja syöttöveden esilämmitystä. Pyörivällä ilman esilämmittimellä saadaan korkeampi kattilahiötysuhde. Voimalaitoksen Turbiinilaitos koostuu korkeapaine-, välipaine-, ja matalapaineturbiinista. Turbiinilaitoksen sähköteho on 240 MW, prosessihöyrykapasiteetti 100 MW ja kaukolämpökapasiteetti 60 MW. Polttoaineena voimalaitoksella käytetään pääsääntöisesti puuperäisiä polttoaineita (45 %) kuten puunkuorta ja hakkuutähteitä. Lisäksi käytetään turvetta 45 % ja lisäpolttoaineena voimalaitos käyttää kivihiiltä 10 %. (Alholmens Kraft 2019.)

Kuvassa 11 on esitetty Alholmens Kraftin biovoimalaitoksen prosessikaavio.

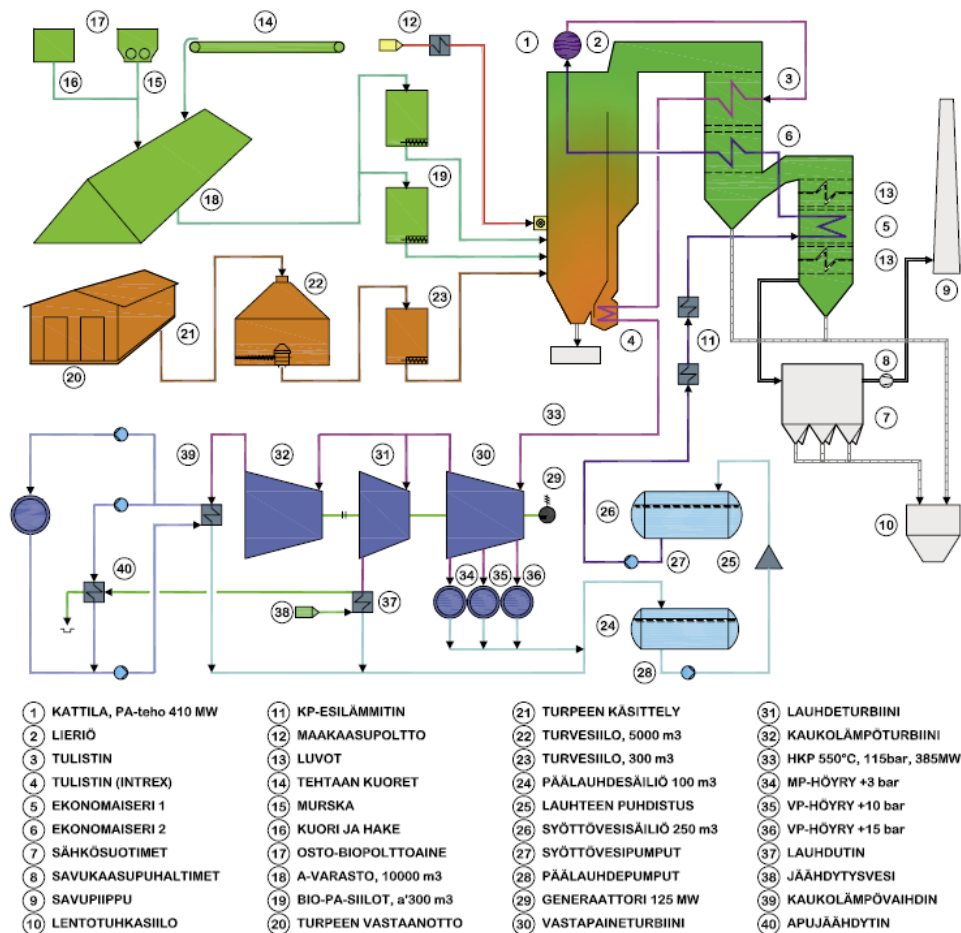


**Kuva 11.** Alholmens Kraftin biovoimalaitoksen prosessikaavio (Kara ym. 2004, 215).

## 4.2 Kaukaan Voiman biovoimalaitos

Kaukaan Voiman biovoimalaitos on Lappeenrannassa sijaitseva sähköä, prosessihöyryä ja kaukolämpöä tuottava voimalaitos. Voimalaitos sijaitsee UPM Kaukaan läheisyydessä ja tuottaa prosessihöyryä sekä sähköä paperi- ja sellutehtaan tarpeisiin. Kaukolämpöä laitos tuottaa Lappeenrannan kaupungille noin 85 % koko kaukolämmön tarpeesta. Voimalaitos käyttää polttoaineena puupolttoaineita, turvetta, biolietettä, maakaasua ja polttoöljyä. Biopolttoaineiden osuus kokonaismäärästä on noin 80 % ja vuotuinen polttoainetarve noin 2000 GWh. (Pohjolan Voima Oy 2010.) Kuvassa 12 on esitetty Kaukaan Voiman biovoimalaitoksen prosessikaavio. Kuvasta huomataan, että syöttövesi lämmitetään väliottohöyryllä kahdessa korkeapaine-esilämmittimessä ennen kattilaan

johtamista. Lisäksi palamisilmaa esilämmitetään savukaasuilla putkityyppisessä ilmanesilämmittimessä (luvo).



**Kuva 12.** Kaukaan biovoimalaitoksen prosessikaavio (Pohjolan voima Oy 2010).

Kaukaan voimalaitoksen kattila on Foster Wheeler Energia Oy:n toimittama kiertoleijukattila (CFB). Kattila on luonnonkiertokattila, jonka kokonaislämpöteho on 385 MW<sub>th</sub> ja se on suunniteltu tuottamaan 149 kg/s tulistettua höyryä 115 bar paineessa ja 550 °C lämpötilassa. Kattilalaitoksessa on käytetty Foster Wheelerin Advanced Bio CFB (ABC) teknologiaa. Kyseiselle teknologialle ominaista on integroidut vesijäähdytteiset savukaasuerottimet, jossa polttoon käytettävä hiekka erotetaan savukaasuista. Savukaasuerottimet ovat valmistettu jäähdytetystä suorasta

membraaniseinästä, joka mahdollistaa erottimen sijoittamisen tulipesän yhteyteen ilman metallipalkeita. Lisäksi teknologiaan kuuluu INTREX-tulistin, joka käyttää savukaasuerottimelta palaavaa materiaalia höyryn tulistamiseen. Kaukaan höyryturbiinilaitos on Siemens AG:n toimittama ja siihen kuuluu vastapaineturbiini, lauhdeturbiini ja kaukolämpöturbiini. Sen sähköteho on 125 MW, prosessihöyrykapasiteetti 152 MW ja kaukolämpökapasiteetti 110 MW. (Foster Wheeler 2011.) Kaukaan Voiman biovoimalaitoksen investointikustannus oli 244 miljoonaa euroa (Modern Power Systems 2018 a).

### **4.3 Polaniec Power Station**

Puolassa sijaitseva lauhdevoimalaitos koostuu kahdeksasta yksiköstä, joista kahdeksas yksikkö käyttää polttoaineena pelkkää biomassaa. Se käyttää polttoaineena puuta 80 % ja maatalouden sivutuotteita 20 %. Myös Polaniecin kattila on Sumitomo SHI FW:n eli entisen Foster Wheelerin toimittama Advanced Bio CFB-kattila ja sen tuottaman tuorehöyryn paine 127,2 bar ja lämpötila 565 °C. Biomassaa polttoaineena käyttävän yksikön rakentaminen aloitettiin 2012 ja sen investointi oli noin 255 miljoonaa euroa. Biomassavoimalaitoksen avulla Puolan uusiutuvan energian käyttö energiantuotannossa nousi 2,5 %-yksikköä. Biomassaa polttoaineena käyttävän kahdeksannen yksikön sähköteho on 205 MW. (Renewable technology 2018.)

### **4.4 Gainesville Renewable Energy Center**

Gainesville Renewable Energy Centerin biomassaa käyttävä lauhdevoimalaitos sijaitsee Yhdysvaltojen Floridassa. Voimalaitos on Yhdysvaltojen suurin biomassavoimalaitos. Voimalaitos käyttää polttoaineena pelkkää biomassaa, pääasiassa puuperäistä. Voimalaitoksen kattila on Metson eli nykyisen Valmetin toimittama HYPEX BFB-kattila. Kattilan tuottaman tuorehöyryn paine on 112 bar ja lämpötila 540 °C. Laitoksessa on Siemensin turbiini, jossa on korkeapaine- ja matalapaineosat ja sen sähköteho on 102,5 MW. Voimalaitoksessa on käytössä katalyyttinen typenoksidien poistojärjestelmä (SCR), jonka takia joudutaan käyttämään ilman esilämmittimiä kattilaan tulevan ilman sisääntulolämpötilan kasvattamiseksi. Voimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseksi

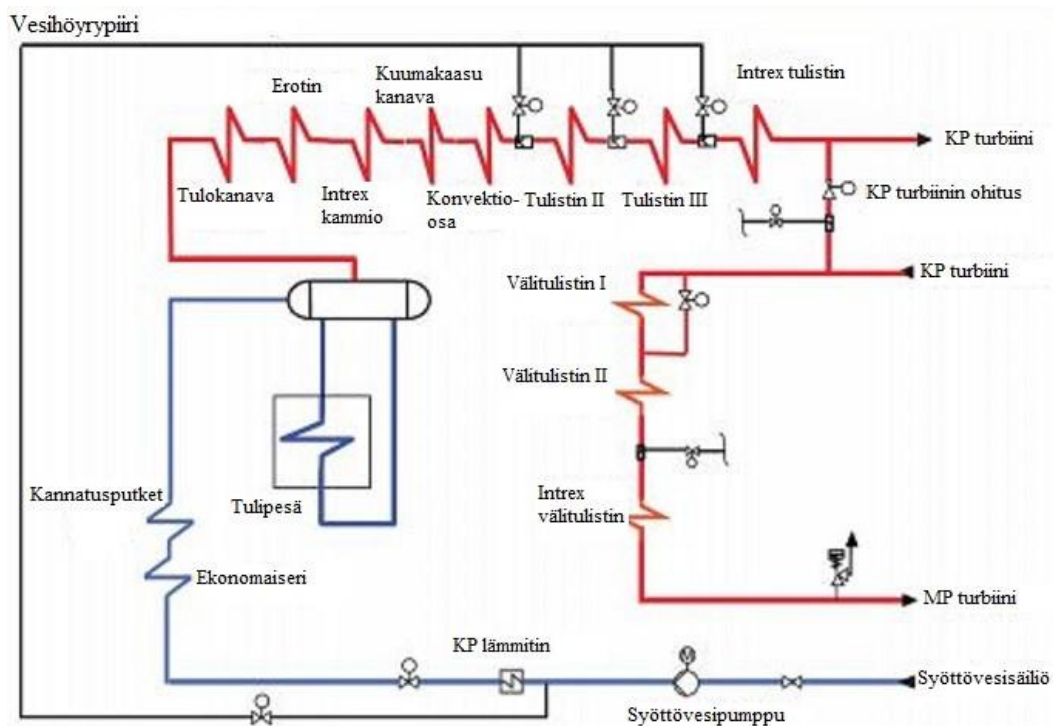
käytetään myös syöttöveden esilämmitysjärjestelmää, joka koostuu yhdestä mp-esilämmittimestä, syöttövesisäiliöstä ja kahdesta kp-esilämmittimestä. (GREC 2017.)

HYPEX-kattiloiden ominaisuuksiin kuuluu patentoitu kuvassa 7 näkyvä Hydro Beam-vesijäähdytteinen palkkiarina. Arina mahdollistaa epäpuhtauksien ja karkean materiaalin poiston tulipesästä tehokkaasti. Arinan pohjasta 30 % on avoinna tuhkan poiston helpottamiseksi. Voimalaitoksen investointikustannus oli noin 440 miljoonaa euroa. (Valmet 2018 c.) Voimalaitoksen Savukaasupäästöjä vähennetään palamisilmajärjestelmällä, SCR-järjestelmällä, kuivan sidonta-aineen lisäämisellä sekä letkusuodattimella. (GREC 2017.)

#### **4.5 Tees Renewable Energy Plant**

Tees Renewable Energy Plant on rakenteilla oleva biomassaa hyödyntävä CHP-voimalaitos Iso-Britanniassa. Arvioitu voimalaitoksen käyttöönotto vuosi tulee olemaan 2020 ja silloin voimalaitos tulee olemaan maailman suurin biomassaa hyödyntävä höyryvoimalaitos. Voimalaitoksen sähköteho tulee olemaan 299 MW ja siten se tuleekin olemaan ensimmäinen 300 MW luokassa oleva 100 % biomassaa polttava laitos. Voimalaitos tulee käyttämään polttoaineena puupellettejä 70-100 % ja jäljelle jäävän osan verran haketta. (Modern Power Systems 2018 b.)

Voimalaitoksen kattilalaitos on Sumitomo SHI FW:n toimittama ja se perustuu Sumitomon Advanced Bio CFB (ABC) -teknologiaan, kuten myös Kaukaan Voiman ja Polaniecin voimalaitosten kattilat. Voimalaitoksen tuottama tuorehöyry on paineeltaan 176 bar ja lämpötilaltaan 568 °C. Höyryn ja veden kierto on esitetty kuvassa 13. Voimalaitoksen on tarkoitus tuottaa matalapaineista höyryä 6 MW<sub>th</sub>, hakkeen kuivausrummulle, mistä johtuu voimalaitoksen CHP-status. (Modern Power Systems 2018 b.) Voimalaitoksen rakentamiseen on arvioitu kuluvan noin 650 miljoonaa puntaa eli 730 miljoonaa euroa (MGT Teesside 2018).



**Kuva 13.** Höyryn ja veden kierto. Muokattu lähteestä (Modern Power Systems 2018 b).

#### 4.6 Yhteenvedotaulukko

Taulukkoon 1 on koottu kappaleissa 4.1-4.5 esitettyjen voimalaitosten tiedot. Tees Renewable Energy Plant-voimalaitoksen myötä huomataan, että suurimpien yksittäisten biomassakäyttöisten voimalaitosten sähkötehot ovat jo 300 MW luokkaa. Tutkimusta tehdessä kävi myös ilmi, että suurimpien voimalaitosten kattilat ovat yleensä kiertoileijueli CFB-kattiloita ja yhdistetyt lämmön- ja sähköntuotantolaitokset ovat huomattavasti yleisimpiä kuin lauhdevoimalaitokset.

**Taulukko 1.** Voimalaitosten yhteenvetotaulukko

	<b>Tyyppi</b>	<b>Kattila</b>	<b>Tuorehöyry [bar/°C]</b>	<b>Sähköteho [MW]</b>	<b>Lämpöteho [MW]</b>	<b>Investointi [milj. €]</b>
Alholmens Kraftin Biovoimalaitos	CHP	CFB	165/545	240	160	170
Kaukaan Voiman biovoimalaitos	CHP	CFB	115/550	125	262	244
Polaniec Power Station	Lauhde	CFB	127/565	205	-	255
Gainesville Renewable Energy Center	Lauhde	BFB	112/540	102,5	-	440
Tees Renewable Energy Plant	CHP	CFB	176/568	299	-	730

## 5 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

IEA:n skenaarion mukaan energiantarve tulee kasvamaan 25 % vuoteen 2040 mennessä, johtuen väestön kasvusta ja tulojen noususta, etenkin kehittyvissä maissa. Skenaario pitää sisällään strategian, jolla varmistetaan YK:n kestävä kehityksen toimintasuunnitelman mukainen energiasaataavuus, ilman laadun paraneminen ja ilmastotavoitteet. Strategia on myös Pariisin sopimuksen tavoitteiden mukainen. Tavoitteiden saavuttamiseksi energiasektori tulee painottumaan matalapäästöisiin energiantuotantomuotoihin ja uusiutuvat energiamuodot tulevat olemaan tärkeässä roolissa energian saatavuuden takaamisessa. (IEA 2018 b.)

Bioenergian osuus maailman primäärienergian kokonaismäärästä on tällä hetkellä noin 9%. Yli puolet tästä käytetään kehitysmaissa biomassan polttoon esimerkiksi ruuanlaiton ja lämmityksen yhteydessä. Tällä tavalla käytettynä biomassalla aiheuttaa haitallisia päästöjä, jotka vaikuttavat terveyteen ja ympäristöön. Toisaalta modernilla käytöllä eli esimerkiksi voimalaitoksen polttoaineena tai liikennepolttoaineena biomassalla on tärkeä rooli uusiutuvan energian lähteenä. Vuonna 2015 bioenergiaa käytettiin noin 3600 TWh



lämmöntuotantoon, mikä vastaa noin 6 % kaikesta lämmönkulutuksesta. Pitkällä tähtäimellä katsottuna bioenergialla on keskeinen rooli vähähiilissä energiajärjestelmissä. IEA:n 2 °C skenaarion mukaan moderni bioenergian käyttö kasvaa nelikertaiseksi vuoteen 2060 mennessä. Skenaarion tavoitteena on hillitä ilmaston lämpeneminen kahteen asteeseen, jotta vältytään ilmastonmuutoksen pahimmilta vaikutuksilta. (IEA 2017 c.)

Euroopan komissio julkaisi vuoden 2016 lopussa ehdotuksen uusiutuvan energian RED II-direktiivistä ja sitä koskevat neuvottelut saatiin päätökseen vuonna 2018. Jäsenmaiden tulee asettaa direktiivin mukaiset säädökset voimaan 30.6.2021 mennessä. RED II-direktiivi sisältää EU:n kestävyyskriteerit biomassoille, joita käytetään energiantuotantoon. Kriteereillä halutaan varmistaa, että lisääntyvä bioenergian käyttö tuottaa riittäviä vähennyksiä kasvihuonekaasupäästöihin fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Tämän lisäksi kriteereissä määritellään biomassojen käytön kasvattamista koskevia vaatimuksia. Nykyisin voimassa olevat kestävyyskriteerit ovat koskeneet vain nestemäisiä biopolttoaineita, mutta RED II-direktiivin mukaan vuodesta 2021 lähtien kriteerit koskevat myös sähkön- ja lämmöntuotannossa käytettäviä kiinteitä biomassoja, kuten metsähaketta ja sahanpurua. Sähkön- ja lämmöntuotannossa käytettävien kiinteiden ja kaasumaisten biomassojen kasvihuonekaasupäästöjen tulee olla 70 % alemmat kuin fossiilisten polttoaineiden vertailuarvo. Vaatimusta sovelletaan vuoden 2021 alun jälkeen käynnistyville laitoksille. Päästövaatimus tulee kasvamaan vuoden 2021 tasosta ja esimerkiksi vuonna 2026 alusta lähtien sen tulee olla 80 %. Kestävyyskriteereiden täytyminen on ehto sille, että biopolttoaineilla tuotettu sähkö- ja lämpöenergia sekä liikenteen biopolttoaineet voivat saada kansallista tukea. (Maa- ja metsätalousministeriö 2018.)

Biomassan jalostusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti, koska tavoitteena on hyödyntää biomassaa mahdollisimman tehokkaasti. Biomassan jalostaminen energiatiheämpään muotoon helpottaa esimerkiksi sen kuljetusta ja varastointia sekä sitä kautta mahdollistaa suuremman kapasiteetin voimalaitoksia. Yksi esimerkki tällaisesta jalostuksesta on

kehitteillä oleva biopolttoaineiden lämpökäsittely, jonka avulla voitaisiin valmistaa energiatehokkaampia biomassaa pellettejä (Vattenfall 2014).

Biomassan käyttö höyryvoimalaitoksissa tulee oletettavasti kasvamaan, kun fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään vähentämään. NykYTEKNOLOGIAN avulla voidaan päästä jo suhteellisen suuren kokoluokan voimalaitoksiin, kuten kappaleissa 4.1-4.5 on esitetty. Näiden suuremman kokoluokan voimalaitosten avulla pystytään korvaamaan esimerkiksi kivihiilen polttoa tehokkaasti, jotta kansallisiin ilmastotavoitteisiin päästäisiin. Myös valtioiden tukipolitiikka sekä fossiilisten polttoaineiden päästöoikeuksien hinnat ovat suuressa roolissa uusiutuvan biomassan käytössä, jotta sen käyttö olisi kilpailukykyisempää verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

## **6 YHTEENVETO**

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena oli tutkia suurien biomassakäyttöisten höyryvoimalaitosten toteutustapoja, haasteita sekä tulevaisuuden näkymiä. Tavoitteen saavuttamiseksi käytettiin esimerkkeinä aktiivisessa käytössä olevia voimalaitoksia. Työssä olevat esimerkit ja niitä pohjustava teoretinen tieto antavat hyvän käsityksen voimalaitosten rakenteista, suorituskykytiedoista, investointien suuruudesta sekä haasteista. Työssä käy ilmi, että suurimmat biomassakäyttöisen höyryvoimalaitokset ovat sähköteholtaan hieman alle 300 MW. Lisäksi huomataan kiertoleijukattilan olevan yleisin suuren kokoluokan voimalaitoksissa, johtuen sen soveltuvuudesta biomassalle.

Työn lopussa käsitellään energiankulutuksen ja tuotannon tulevaisuutta sekä biomassan käyttöä koskevia säädöksiä ja voimaantuvia direktiivejä. Kaikki työssä mainitut asiat huomioitaessa, voidaan olettaa biomassan käytön suuren kokoluokan voimalaitoksissa lisääntyvän. Biomassan jalostus energiatiheämpään muotoon on suuressa merkityksessä suuren kokoluokan höyryvoimalaitosten tulevaisuudessa sillä se mahdollistaa vielä nykyistäkin suurempien voimalaitosten käyttöönoton.

Tässä kandidaatintyössä käsiteltyjen aiheiden lisäksi jatkotutkimuksia voisi kohdistaa biomassan jalostuksen yksityiskohtiin sekä mahdollisiin voimalaitosten uusiin teknisiin

ratkaisuihin, jotta voimalaitosten tulevaisuuden tilanteesta pystyisi tekemään tarkempia arvioita.

## LÄHDELUETTELO

Alakangas Eija, 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.12.2018]. Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Alholmens Kraft, 2019. Energiatuotanto. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.12.2018]. Saatavilla: <http://www2.alholmenskraft.com/fi/production>

Foster Wheeler, 2011. Advanced Bio CFB Technology – Kaukas 125 MWe CFB Design and Operation Experience. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.12.2018]. Saatavilla: <http://archive.amecfw.com/file.axd?pointerID=55a7ba4d8b0c1e0e04f11f98&sid=635726523660050000>

GREC, 2017. Independent Engineer's Report for the Gainesville Renewable Energy Center. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.12.2018]. Saatavilla: [https://www.gru.com/LinkClick.aspx?fileticket=4JrHhG7V\\_vY%3D&portalid=0](https://www.gru.com/LinkClick.aspx?fileticket=4JrHhG7V_vY%3D&portalid=0)

Huhtinen Markku ym., 2013. Voimalaitostekniikka. 2. painos. Tampere. Opetushallitus. 2013. 344s. ISBN 978-952-13-5426-7

Huhtinen Markku ym., 2008. Voimalaitostekniikka. 1. painos. Helsinki. Opetushallitus. 2008. 342s. ISBN 978-952-13-3476-4

Huhtinen Markku ym., 2000. Höyrykattilatekniikka. 5.painos. Helsinki. Oy Edita Ab. 2000. 379s. ISBN 951-37-3360-2

IEA, 2007 a. Biomass for Power Generation and CHP. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.12.2018]. Saatavilla: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/essentials3.pdf>

IEA, 2018 b. World Energy outlook 2018: Scenarios. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2018]. Saatavilla: <https://www.iea.org/weo2018/scenarios/>

IEA, 2017 c. Bioenergy and Biofuels. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2018]. Saatavilla: <https://www.iea.org/topics/renewables/bioenergy/>

JRC, 2017. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.12.2018]. Saatavilla: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP/JRC\\_107769\\_LCPBref\\_2017.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf)

Kara Mikko ym., 2004. Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutuksen. 3.painos. Helsinki. Edita. 2004. 396s. ISBN 951-37-4256-3

Kpa Unicon, 2018. Biograte. [Verkkosivu]. [Viitattu 26.12.2018]. Saatavilla: <https://www.kpaunicon.com/create/biomass/biograte/>

Maa- ja metsätalousministeriö, 2018. Biomassan kestävyyskriteerit. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2018]. Saatavilla: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/biomassojen-kestavyys>

MGT Teesside, 2018. Tees Renewable Energy Plant, Investing in Teesside. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.12.2018]. Saatavilla: <http://www.mgtteesside.co.uk/>

Modern Power Systems, 2018, a. UPM takes to its beds: F-W's biggest biomass CFB, Scottish BFB. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu:7.12.2018]. Saatavilla: <https://www.modernpowersystems.com/features/featureupm-takes-to-its-beds-f-w-s-biggest-biomass-cfb-scottish-bfb/>

Modern Power Systems, 2018, b. Tees Renewable Energy Plant. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 7.12.2018]. Saatavilla: <https://www.modernpowersystems.com/features/featuretees-renewable-energy-plant-6045384/>

Opet Finland, 2001. The World's largest biofuel CHP plant Alholmens Kraft, Pietarsaari. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.12.2018]. Saatavilla: [http://www.unece.lsu.edu/biofuels/documents/2003-2006/bf03\\_021.pdf](http://www.unece.lsu.edu/biofuels/documents/2003-2006/bf03_021.pdf)

Pohjolan Voima Oy, 2010. Kaukaan Voiman Voimalaitos. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.12.2018]. Saatavilla: [https://www.pohjolanvoima.fi/filebank/251-22563-Kaukaan\\_biovoimalaitos.pdf](https://www.pohjolanvoima.fi/filebank/251-22563-Kaukaan_biovoimalaitos.pdf)

Renewable technology, 2018. Polaniec Biomass Power Plant, Polaniec. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 30.12.2018]. Saatavilla: <https://www.renewable-technology.com/projects/polaniec-biomass-power-plant/>

Teir Sebastian, 2003. Steam Boiler Technology. 2.painos. Espoo. Helsinki University of Technology. 2003. 215s. ISBN 951-22-6759-4

Tynjälä Tero, 2010. Teknillinen termodynamiikka. [sähköinen Opetusmateriaali]. [Viitattu: 29.11.2018]. Saatavilla: [https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/283553/mod\\_resource/content/1/Osa2\\_1\\_v2.pdf](https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/283553/mod_resource/content/1/Osa2_1_v2.pdf)

Vakkilainen Esa, 2017. Steam generation from biomass. Construction and Design of Large Boilers. Elsevier. [Viitattu: 19.12.2018]. ISBN: 978-0-12-804389-9 (Sähköinen). Saatavilla: <https://www.dawsonera.com/abstract/9780128044070>

Valmet, 2018, a. HYBEX boilers - using BFB technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.12.2018]. Saatavilla: <https://www.valmet.com/energyproduction/bfb-boilers/>

Valmet, 2018, b. CYMIC boilers - using CFB technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.12.2018]. Saatavilla: <https://www.valmet.com/energyproduction/cfb-boilers/>

Valmet, 2018, c. The largest bio power plant in the US runs with Valmet's automation solutions. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 20.12.2018]. Saatavilla: <https://www.valmet.com/media/articles/all-articles/gainesville-renewable-energy-center/>

Vattenfall, 2014. Biomassan tulevaisuus. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2018]. Saatavilla: <https://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/sahkon-ja-lammontuotanto/biomassa/biomassan-tulevaisuus/>

VTT, 2015, a. Suomen energiavisio 2030: Suomenkielinen tiivistelmä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.12.2018]. Saatavilla: [https://www.vtt.fi/files/projects/energy\\_book\\_series/ev\\_2030\\_tiivistelma.pdf](https://www.vtt.fi/files/projects/energy_book_series/ev_2030_tiivistelma.pdf)

VTT, 2010, b. Turpeen tuotanto ja käyttö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.12.2018]. Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2550.pdf>