

Ishaan Bhuchar

SAVUKAASULAUHDUTTIMEN VAIKUTUS SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOON

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Yrjö Majanne
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Ishaan Bhuchar: Savukaasulauhduttimen vaikutus sähkön ja lämmön yhteistuotantoon
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Energiantuotanto on yksi suurimmista syistä maapallolla tapahtuvaan liikakulutukseen. Tämä johtaa siihen, että on löydettävä ratkaisuja tuottaa välttämättä tarvittava energia mahdollisimman vähillä resursseilla. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on tapa energiantuotannon hyötysuhteen parantamiseen, sillä yhteistuotannon avulla saavutetaan paljon suurempi hyötysuhde verrattuna erilliseen sähkön ja lämmön tuotantoon.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia sähkön ja lämmön yhteistuotantoa höyryvoimalaitoksessa. Erityisesti tutkimuskysymyksenä on tarkastella keinoja, joilla voidaan vaikuttaa sähkön ja lämmön tuotantosuhteeseen höyryvoimalaitoksessa, ja etenkin tarkastella savukaasulauhduttimen vaikutusta tuotantosuhteeseen. Työssä myös käsitellään eri tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkön ja lämmön tuotantoon tietyllä hetkellä. Tämä työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Työhön on löydetty sopivaa materiaalia sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokseen liittyen ja tehty johtopäätöksiä niiden perusteella.

Kandidaatintyön alussa perehdyttiin yhteistuotantovoimalaitoksen toimintaan ja sen eri osiin. Työssä myös tarkasteltiin höyryn termodynamiikkaa voimalaitosprosessissa. Tämän jälkeen menttiin itse tutkimuskysymykseen, jossa tarkasteltiin eri tapoja vaikuttaa yhteistuotantovoimalaitoksen tuotantosuhteeseen erityisesti savukaasulauhduttimen, reduktioajon sekä lauhdeperän avulla. Samassa luvussa tarkasteltiin myös tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkön ja lämmön kysyntään tietyllä hetkellä.

Avainsanat: CHP, tuotantosuhde, savukaasulauhdutin, yhteistuotanto

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PROSESSIN RAKENNE JA TOIMINTA	3
2.1 Kaukolämpöjärjestelmä	3
2.2 CHP-voimalaitos	4
2.3 Höyrykattila	5
2.4 Savukaasulauhdutin	6
2.5 Reduktioajo CHP-voimalaitoksessa	8
2.6 Höyryturbiini	9
3. HÖYRYN TERMODYNAMIIKKA	12
4. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO	15
4.1 Hyötysuhde CHP-voimalaitoksessa	15
4.2 Vastapainevoimalaitosprosessin hallinta	16
4.3 Sähkön ja lämmön tuotantosuhteen ohjaus	17
4.3.1 Savukaasulauhduttimen vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon ..	17
4.3.2 Reduktion vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon	18
4.3.3 Lauhdeperän vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon	19
4.4 Sähkön hinnan vaikutus tuotantoon	19
4.5 Polttoaineen laadun vaikutus tuotantoon	20
5. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined Heat and Power
Δh_l	entalpian muutos lauhduttimessa
Δh_k	entalpian muutos kattilassa ja tulistuksessa
Δh_p	entalpian muutos syöttövesipumpussa
Δh_t	entalpian muutos turbiinissa
P_{el}	sähköteho
P_l	lämpöteho
P_{pa}	polttoaineteho
P_{syve}	syöttövesipumpun häviötön tehontarve
P_t	turbiinin terminen teho
q_i	polttoaineen tehollinen lämpöarvo
q_{mpa}	polttoaineen massavirta
η_{tot}	kokonaishyötysuhde
Φ_{in}	höyryyn tuotu lämpövirta
ϕ_{pa}	kattilaan tuotu lämpöteho
Φ_{out}	työaineesta poistuva lämpövirta

1. JOHDANTO

Nykymaailmassa kulutetaan luonnonvaroja paljon enemmän kuin maapallon kantokyky sallii. Jos kaikki maailmassa kuluttaisivat kuin suomalaiset, olisi tarve yli kolmelle maapallolle. Tällä hetkellä maapallolla käytetään seitsemässä kuukaudessa luonnonvarat, jotka pitäisi riittää koko vuodeksi. Yksi suurimmista syistä kulutukseen on energiankulutus. Tämän takia on tärkeää tuottaa välttämättä tarvittava energia mahdollisimman vähillä resursseilla. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on yksi tapa energiatuotannon hyötysuhteen parantamiseen, sillä yhteistuotannolla saavutetaan paljon parempi hyötysuhde verrattuna erilliseen sähkön ja lämmön tuotantoon. Tässä työssä käsitellään sähkön ja lämmön yhteistuotantoa höyryvoimalaitoksessa eli CHP-voimalaitoksessa (Combined Heat and Power).

CHP-voimalaitoksessa tuotetaan sähköä ja lämpöä saman höyryprosessin avulla, jolloin tuotetun sähkön ja lämmön määrä riippuvat samasta prosessin höyryvirrasta. Sähkön ja lämmön kysynnässä on kuitenkin eroja. Voimalaitoksen taloudellisen toiminnan kannalta on oleellista, että voidaan vaikuttaa CHP-voimalaitoksen sähkön ja lämmön tuotantosuhteisiin. Tämän työn tutkimuskysymyksenä on tarkastella keinoja, joilla voidaan vaikuttaa sähkön ja lämmön tuotantosuhteeseen CHP-voimalaitoksessa, ja etenkin tarkastella savukaasulauhduttimen vaikutusta tuotantosuhteeseen. Työssä myös käsitellään niitä eri tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkön ja lämmön tuotantoon tietyllä hetkellä.

Fortumin mukaan sähkön ja lämmön yhteistuotanto on tehokkain polttoaineiden käyttöön perustuva energiantuotantomuoto. Yhteistuotannossa saadaan jopa 90 prosenttia polttoaineen energiasta käytettyä. [1] Tekninen joustavuus on välttämätön kyky CHP-laitoksille turvallisen ja taloudellisen yhteistuotantovoiman tuottamiselle. [2, s. 2] Savukaasulauhduttimen käyttö CHP-voimalaitoksissa johtaa muuten hukkaan menevän lämmön talteenoton ja samalla lisää vapausasteen sähkön ja lämmön tuotantosuhteissa. TSE:n mukaan savukaasulauhduttimen käyttö on tehostanut energiantuotantoa suuresti Naantalinvuonon voimalaitoksella. Laitoksen kaukolämmön tuotantoteho on noussut 30 % ilman lisä polttoaineiden kulutusta. [3] Myöskin Keravan Energia on ottanut vuonna 2021 biovoimalaitoksellaan savukaasulauhduttimen käyttöön. Lauhduttimen avulla on hukkaläm-

möstä saatu talteen jopa 23 % laitoksen huipputehosta. [4] Joensuun Kontiosuolla sijaitseva CHP-laitos on käyttänyt savukaasulauhdutinta vuodesta 2015 alkaen. Lauhdutin nostaa laitoksen lämpökapasiteettia noin 30 megawatilla ja johtaa noin 140 gigawattitunnin polttoainesäästöihin vuodessa. [5]

Tämän työn toinen luku käsittelee CHP-voimalaitoksen eri osien rakennetta ja niiden toimintaa. Kolmannessa luvussa käydään läpi voimalaitoksessa tapahtuva höyryn termodynamiikka ideaalisen Clausius-Rankine prosessin avulla. Neljäs luku esittelee CHP-voimalaitoksen hallintaa ja niitä eri tapoja, joilla vaikutetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon tuotantosuhteisiin. Luvussa neljä käsitellään myös tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkön ja lämmön kysyntään tietyllä hetkellä.

2. PROSESSIN RAKENNE JA TOIMINTA

Tässä luvussa perehdytään CHP-voimalaitosprosessiin tutkimalla laitoksen eri osien toimintaa. Luvussa tutkitaan eri osien muodostaman kokonaisuuden rakennetta ja samalla näytetään kuinka voimalaitosprosessi toteutetaan.

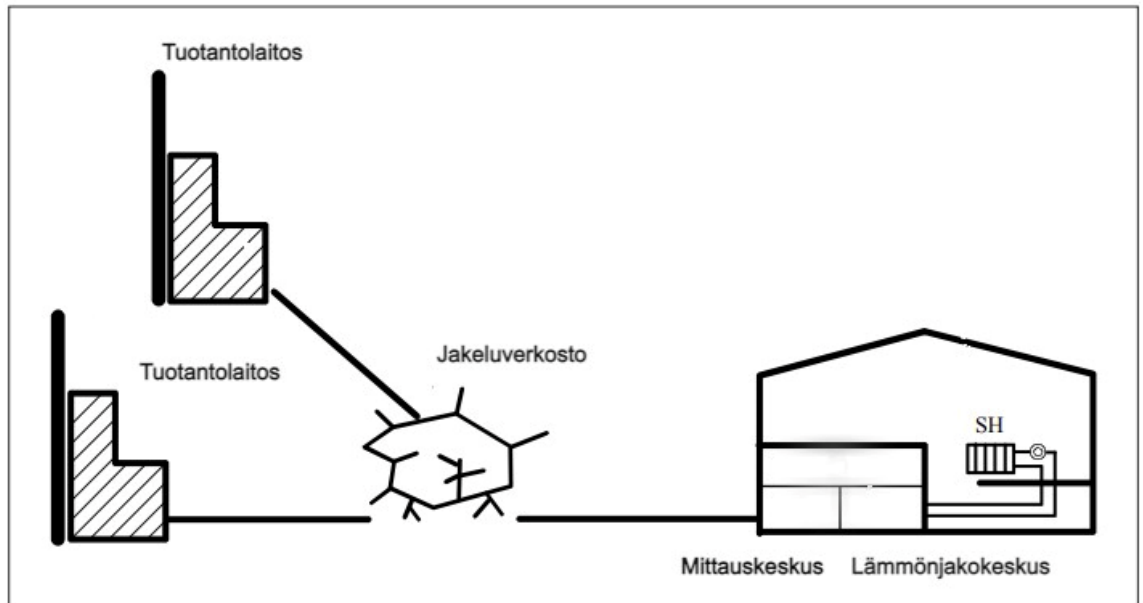
2.1 Kaukolämpöjärjestelmä

Kaukolämmitys on suurien alueiden, kuten rakennusten muodostaman ryhmän lämmön-
tuotanto ja -jakelujärjestelmä. Kaukolämmitykseen tarvittava lämpö tuotetaan lämmön-
tuotantolaitoksilla eli CHP-voimalaitoksissa, lämpöpumpuilla tai erillisten lämpökeskus-
ten kuumavesikattiloissa. Kaukolämmityksessä käytetään kuumaa vettä lämmön siirron
väliaineena. [6, s. 11]

CHP-voimalaitoksilla tuotetaan sekä sähköä että lämpöä, joka mahdollistaa parhaimman
energiatehokkuuden kaukolämmön tuotantoon. Lämpökeskukset tuottavat kuumaa vettä
kaukolämpöverkkoon. Toisin kuin yhteistuotantovoimalaitokset, jotka tuottavat lämpöä ja
sähköä, lämpökeskusten tehtävä on vain lämmön tuotanto. [6, s. 25]

Lämmöntuotantolaitoksissa lämmitetään kaukolämmön kiertovesi, joka viedään kauko-
lämpöverkkoon. Kiertoveden lämpötila on välillä 70°–120°C ja lämpötila riippuu tehon
tarpeesta sekä vuodenajasta. [6, s. 17] Kaukolämpöverkon avulla saadaan lämmintä
kaukolämpövettä hyödynnettäväksi rakennusten sekä kodin käyttöveden lämmittämi-
sessä. Käyttövesi lämmitetään lämmönsiirtimessä, jossa lämmin kaukolämpövesi siirtää
lämpönsä vesijohdoista tulevaan veteen. Kun kaukolämpöveden lämpö on siirretty kodin
lämmitykseen, palautetaan jäähtynyt kaukolämpövesi lämmöntuotantolaitokseen. Pa-
luuvettä hyödynnetään uudestaan ja näin kaukolämpöveden käyttö on jatkuvaa. [7]

Kuva 1 esittää kaukolämpöjärjestelmän pääosat. Lämmön tuotantolaitoksissa tuotet-
tava kaukolämpö viedään jakeluverkoston kautta asiakkaille. Asiakaslaitteisiin kuuluvat
mittauskeskus ja lämmönjakokeskus. Mittauskeskuksessa tapahtuu meno- ja paluuve-
den lämpötilan mittaaminen lämpötila-antureilla. Lämmönjakokeskus sisältää muun mu-
assa lämmönsiirtimet ja säätöautomaatiikan. Lämmönsiirtimissä tapahtuu lämmön luovu-
tus asiakkaan lämmitysjärjestelmiin. [6, s. 17–18]

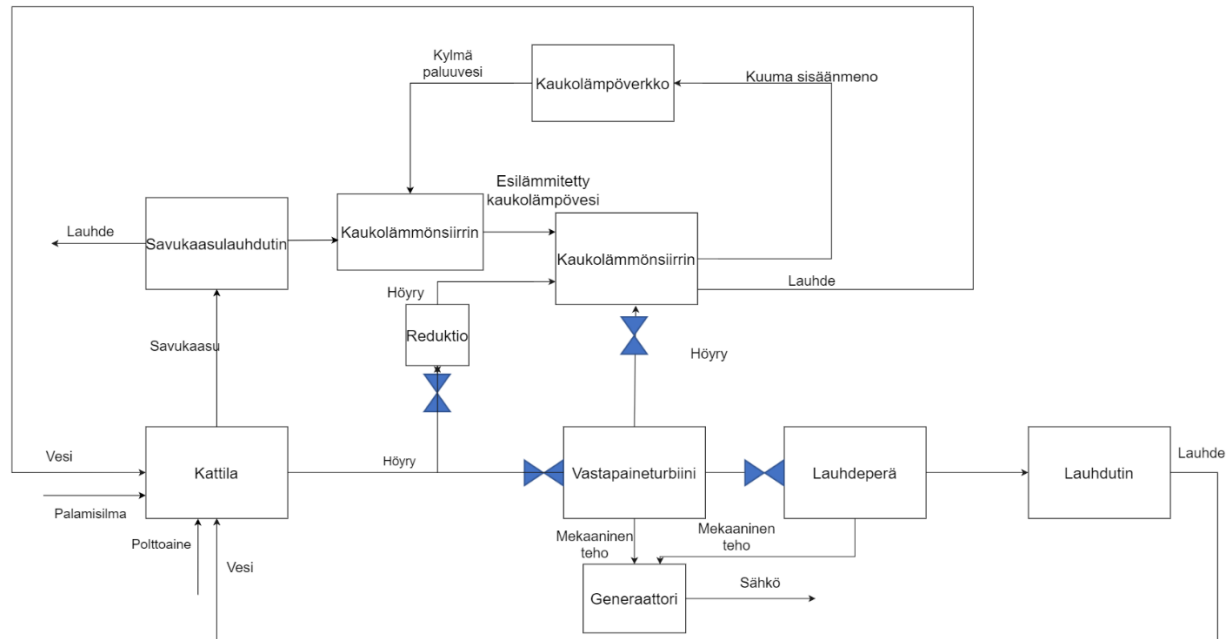


Kuva 1. Kaukolämpöjärjestelmän osat [6, s. 17]

2.2 CHP-voimalaitos

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on kyse samanaikaisesta sähkön ja lämmön tuottamisesta samalla energialähteellä. CHP-voimalaitoksissa voidaan käyttää monia eri energialähteitä, jotka ovat sekä fossiilisia- että uusiutuvia energialähteitä. [8] Lähes kolmannes Suomessa tuotetusta sähköstä tuotetaan CHP-voimalaitoksissa [9]. CHP-voimalaitostyyppinä on erilaisia kuten kaasuturbiinilaitokset, moottorivoimalaitokset ja höyryvoimalaitokset [10]. Tässä työssä tarkastelun kohteena on höyryvoimalaitoksessa tapahtuva sähkön ja lämmön yhteistuotanto.

CHP-voimalaitos koostuu monista eri prosesseista ja toiminnoista. Kuva 2 esittää lohko-kaavion voimalaitoksen rakenteesta. Kuvasta 2 nähdään, miten sähkön ja lämmön tuotanto tapahtuu. Kuva 2 esittelee myös eri tapoja vaikuttaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Tässä työssä esitellään voimalaitosprosessi kuvan 2 pohjalta ja keskitytään erityisesti savukaasulauhduttimen toimintaan ja siitä saatavaan lämmön hyödyntämiseen.



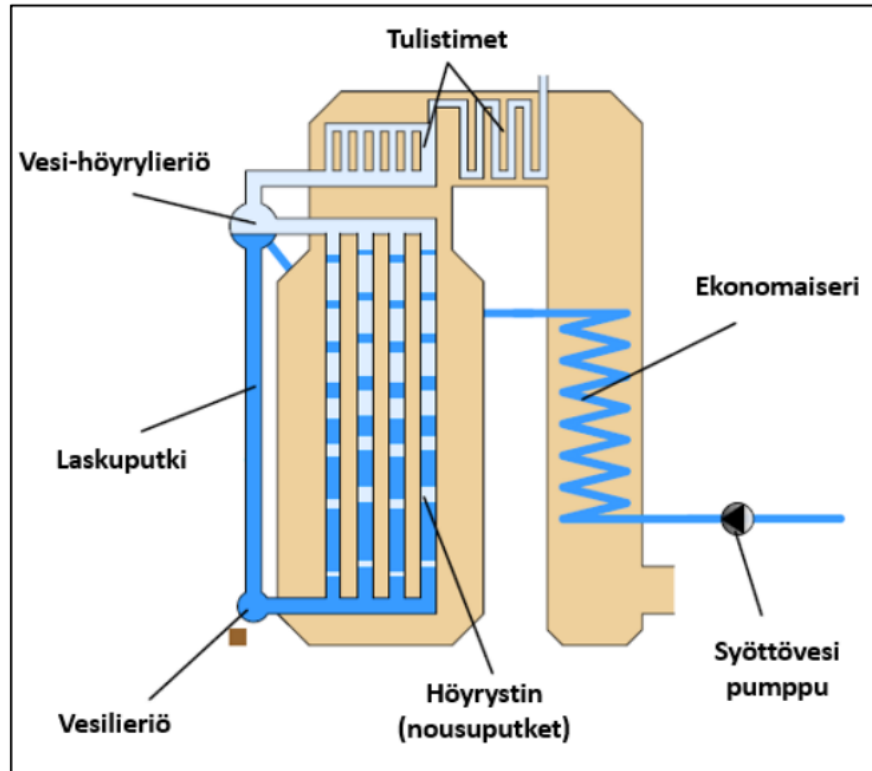
Kuva 2. Lohkokaavio prosessin toiminnasta

2.3 Höyrykattila

Höyrykattilassa tuotetaan vesihöyryä kuumentamalla vettä. Energia kyseiseen prosessiin saadaan polttamalla polttoainetta. [11, s. 2] Höyrykattilaa voidaan ajatella lämmönsiirtimenä, jossa lämmön luovuttaa polttoaineen palamisesta syntyvä lämpösäteily ja savukaasu ja lämmön vastaanottaa kattilassa höyrystyvä vesi [12 s. 113]. Kuva 3 esittää höyrykattilan eri osat.

Kattilaan tuodaan syöttövettä, ja sen paine nostetaan kattilassa olevaan paineeseen syöttövesipumpulla. Tämän jälkeen vesi lämmitetään lähelle kiehumispistettä syöttöveden esilämmittimessä eli ekonomaiserissa. [13, s. 10] Ekonomaiserissa tarvittava lämpö saadaan kattilassa syntyvien savukaasujen jäähtymisestä [14, s. 2]. Esilämmitetty vesi ohjataan vesi-höyrylieriöön, joka erottelee veden ja höyryn niiden tiheyserojen avulla. Vesi-höyrylieriöstä vesi virtaa laskuputkia pitkin vesilieriöön, jossa kerätään veden epäpuhtaudet. Vesilieriöstä ohjataan vesi nousuputkiin, joissa vesi höyrystyy. Höyrystymisessä tarvittava lämpö saadaan tulipesästä, joka on nousuputkien ympäröimänä. [13, s. 10] Tulipesään syötetään käytettävä polttoaine sekä palamisilma, ja siellä poltetaan polttoaine. Tulipesässä syntyneet savukaasut johdetaan tulistimeen höyryn tulistusta varten. [15, s. 10] Höyrystimessä kiehuva vesi nousee takaisin vesi-höyrylieriöön, jossa jälleen

erotellaan höyry vedestä. Höyry johdetaan tulistimelle ja vesi kiertää takaisin höyrystimille. Tulistimissa kylläinen höyry lämmitetään höyrystymispisteensä yläpuolelle. Tämän jälkeen höyry viedään pois höyrykattilasta. [13, s. 11]



Kuva 3. Höyrykattilan vesikierron osat [13, s. 9]

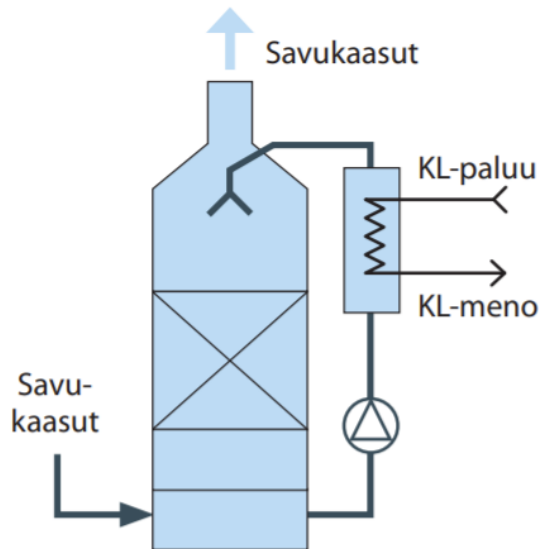
2.4 Savukaasulauhdutin

Savukaasulauhdutuksessa otetaan muutoin hukkaan menevä lämpö talteen. Lämmitysvoimalaitos kannettavasti jopa 20 % halutusta lämmöntuotannosta savukaasulauhdutuksella [16]. Wenn die Wärmeenergie der Abgasen nicht abgefangen wird, geht sie als Abwärmeverlust verloren. Die abgefangene Energie wird in die Feuchte der Brennstoffe überführt. [16] Je höher die Feuchte des Brennstoffs ist, desto höher ist die Feuchte der entstehenden Abgasen. Wenn die Feuchte der Abgasen steigt, steigt auch die Taupunkttemperatur der Abgasen. Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der sich der Dampf zu Wasser kondensiert. In diesem Prozess wird Wärme aus den heißen Abgasen in Form von Wasser abgeführt. Dies bedeutet, dass je höher die Feuchte des Brennstoffs ist, desto mehr Wärme wird durch die Kondensation des Wasserdampfes gewonnen. Abhängig von den Eigenschaften des Brennstoffs kann die Abgasenfeuchte 15–40 % der Brennstoffenergie betragen. In diesem Fall ist die Abgasenfeuchte eine gute Möglichkeit, die Wärme der Abgasen zu gewinnen. [17, s. 26] Je höher die Feuchte des Brennstoffs ist, desto höher ist die Feuchte der entstehenden Abgasen.

vaikutus kattilassa tapahtuvaan höyryntuotantoon. Osa polttoaineen lämpösisällöstä menee polttoaineessa olevan veden höyrystämiseen. Tämä energia on pois kattilan varsinaisesta höyryntuotannosta, eli tietyn höyrymäärän tuottamiseen tarvitaan suurempi määrä kosteaa polttoainetta verrattuna kuivaan polttoaineeseen. [8]

Savukaasujen lauhduttaminen tapahtuu savukaasulauhduttimessa. Savukaasulauhduttimen alkuperäinen tarkoitus oli savukaasujen sisältämien hiukkaspäästöjen pienentäminen. Nykyään savukaasulauhduttimia käytetään aikaisempaa enemmän hukkaan menevän energian talteenottoon. Savukaasulauhduttimen yläosassa ruiskutetaan vastavirtaan vettä, joka pesee kiintoaineen pois ja samalla jäähdyttää savukaasuja noin 60°–70° asteeseen, jolloin savukaasuissa oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi. Lauhtumisessa syntynyt kiertovesi viedään ensimmäiselle kaukolämmönsiirtimelle. Kyseiselle kaukolämmönsiirtimelle tuodaan jäähtynyttä kaukolämpövettä kaukolämpöverkosta, jota lämmitetään lauhteen lämpöenergialla. [18]

Lauhdutin on lämmönsiirrin, jossa höyry lauhdutetaan nesteeksi siirtämällä lämpöenergiaa höyrystä nesteeseen. Lauhdutusvaiheessa on tärkeätä, että savukaasujen lämpötila alenee. Kun alennetaan lämpötilaa kastepistettä pienemmäksi, alkaa savukaasun vesihöyry lauhtumaan vedeksi. Vesihöyryn lauhdutuksessa vapautuu energiaa 2 350 kJ/kg. [19, s. 8] Jotta saadaan savukaasuista lämpöä talteen, on kriittistä, että kastepistelämpötila alittuu. Mikäli lauhduttimen lämpötila on kastepistettä korkeampi, lauhduttimesta tulee haihdutin eli lauhduttimeen ruiskutettava vesi alkaa höyrystymään sen sijaan että savukaasuissa oleva höyry alkaisi lauhtua. [14, 13] Kuva 4 esittää savukaasulauhduttimen toiminnan, jossa tuodaan savukaasua sisään ja ulostuloksi saadaan lämpöä kaukolämpöveteen.



Kuva 4. Savukaasulauhduttimen toiminta [18]

2.5 Reduktioajo CHP-voimalaitoksessa

Reduktioajossa ohitetaan turbiini, jolloin osa kattilasta tulevasta höyrystä viedään suoraan kaukolämmönsiirtimelle. Reduktioventtiilissä tapahtuu höyryn paineen ja lämpötilan alentaminen kaukolämmönsiirtimelle sopivaksi kuristamalla virtausta ja ruiskuttamalla höyryn sekaan vettä. Reduktio kasvattaa höyryn massavirtaa ruiskutettavan veden määrällä.

Kuvassa 2 on esitetty reductioventtiilin rakenne. Reduktioventtiili on venttiili, joka alentaa höyryn painetta johtaen höyryn paisuntaan suurempaan putkeen. Tämän höyryn lämpötila alenee ruiskuttamalla vettä höyryyn. Sopiva paineen ja lämpötilan arvo asettuu kaukolämpöveden lämpötilan perusteella. Kuva 5 esittää reductioventtiilin ja sen osat. [20, s. 7; 21, s. 18-19]

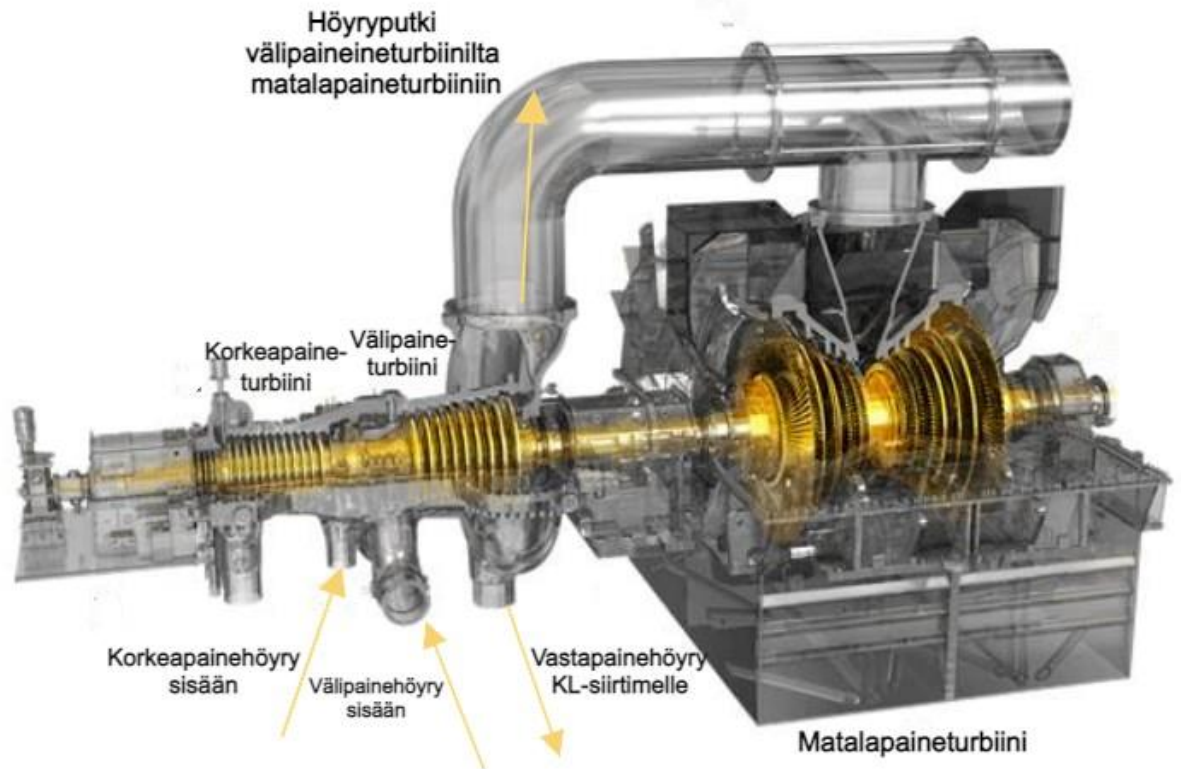


Kuva 5. Reduktioventtiilin rakenne [22]

2.6 Höyryturbiini

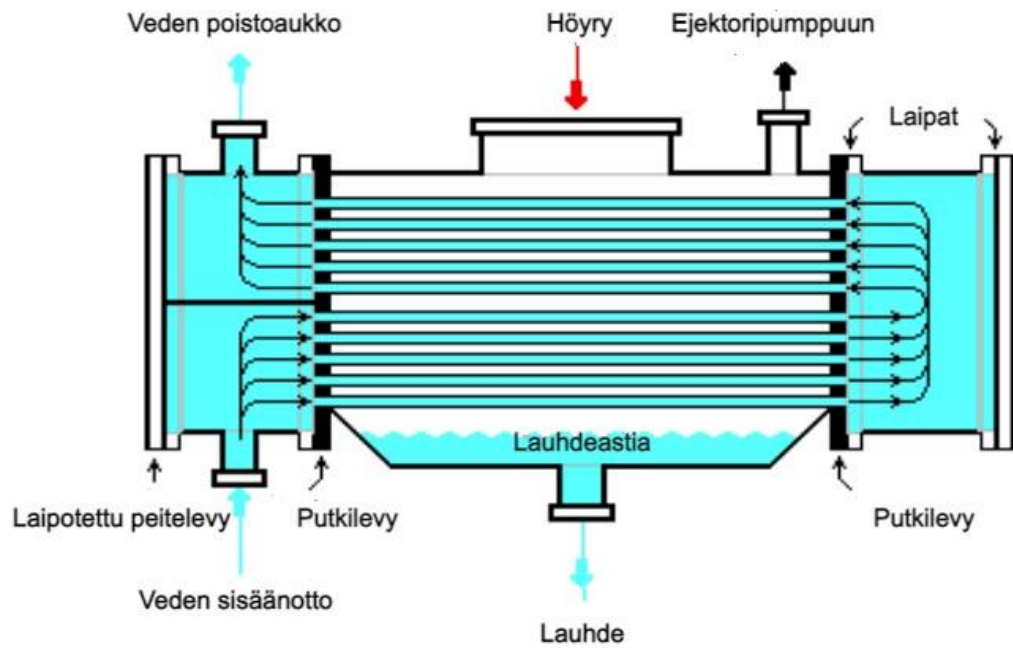
Höyryturbiini on lämpövoimakone, joka ottaa energiaa korkealämpöisestä ja korkeapaineisesta höyrystä ja muuttaa sen mekaaniseksi pyörimisenergiaksi, joka pyörittää akselia. Akseli on kiinnitetty generaattoriin, joka muuttaa akselin pyörimisenergian sähköenergiaksi. Höyryturbiini voidaan rakenteen perusteella jakaa korkeapaine-, välipaine- ja matalapaineisiin. Kuva 6 esittää höyryturbiinin rakenteen mainittujen rakenneosien kera. Vastapaineturbiini on turbiini, joka koostuu korkeapaine- ja välipaineosasta. Vastapaineturbiinista puuttuu matalapaineosa, jolloin höyryn paisumista ei viedä loppuun asti, vaan höyry otetaan koneesta ulos niin, että höyryssä on käyttökelpoista lämpöenergiaa jäljellä. Lauhdeturbiini on turbiini, jonka rakenne koostuu matalapaineosasta. Höyryn käytyä lauhdeturbiinissa, höyryä ei pystytä hyödyntämään lämmöntuotantoon. On olemassa myös väliottoturbiineja, joissa on useampi höyryn ulosotto eri painetasoilta.

Väliottoturbiinit koostuvat myös turbiinin perusosista, eli korkeapaine-, välipaine- ja matalapaineosista. [23, s. 41].

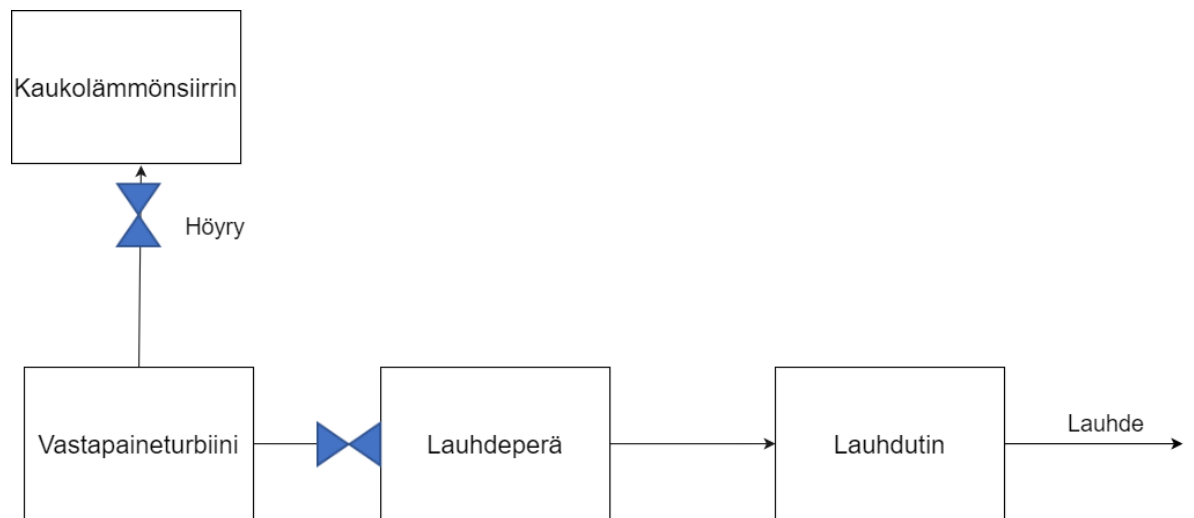


Kuva 6. Höyryturbiinin rakenne, muokattu lähteestä [24, s. 7]

CHP-voimalaitoksessa ajetaan höyry höyrykattilasta vastapaineturbiinin, koska voimalaitoksessa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä. Vastapaineturbiinin jälkeen höyryä voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa eli höyryn sisältämä lämpöenergia siirretään kaukolämmönsiirtimeen ja sieltä kaukolämpöverkkoon. On myöskin mahdollista ohjata vastapaineturbiinin jälkeen höyry lauhdeperään eli lauhdeturbiiniin, jolloin voidaan tuottaa enemmän sähköä. Lauhdeperän jälkeen höyry ohjataan lauhduttimeen. [25, s. 5–6] Lauhduttimessa höyry muuttuu vedeksi. Lauhduttimen toiminta esitetään kuvassa 7. Lauhduttimeen tuodaan jäähdytysvettä, joka jäähdyttää höyryn lauhteeksi. Lauhde palautetaan höyrykattilaan syöttövedeksi. Kuvassa 8 esitetään turbiinikytkentä, joka sisältää turbiinin vastapaineturbiinin, lauhdeperän, lauhduttimen sekä kaukolämmönsiirtimen.



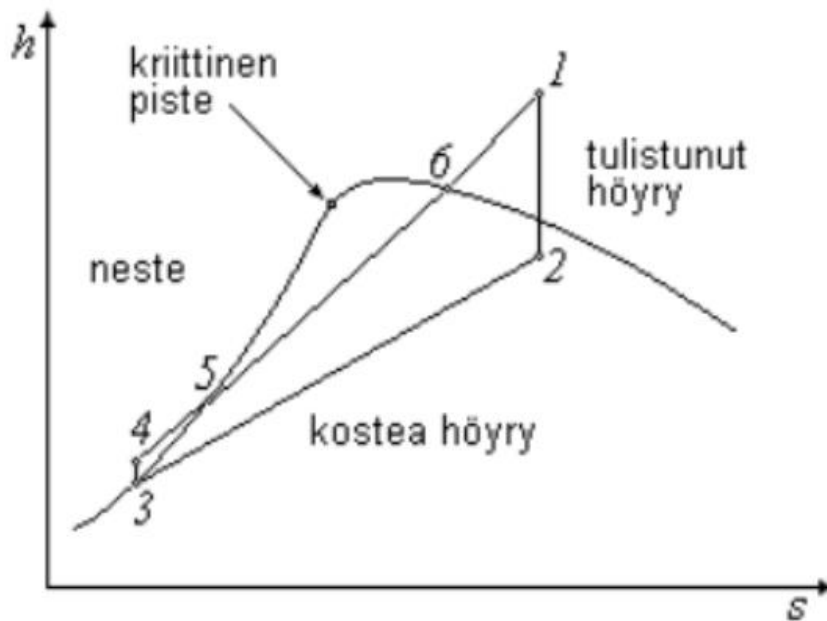
Kuva 7. Lauhduttimen toiminta, muokattu lähteestä [26, s. 23]



Kuva 8. Turbiinikytkentä

3. HÖYRYN TERMODYNAMIKKA

Clausius—Rankine-prosessi on höyryvoimalaitosten toiminnan kuvaamisessa käytettävä ideaalinen prosessi, joka ei ota huomioon voimalaitosprosessissa tapahtuvia häviöitä. Todelliset höyryprosessit ovat monimutkaisempia ja sisältävät eri tekniikoita voimalaitoksen hyötysuhteen parantamiseksi. [27, s. 7] Clausius—Rankine-prosessin vaiheet esitetään kuvassa 9.



Kuva 9. Clausius-Rankine prosessi h,s -tasossa [27, s. 7]

Kuvan 9 vaiheessa 1–2 tapahtuu höyryn paisutus isentrooppisesti, joka tarkoittaa sitä, että höyryn entropia ei muutu. Paisutuksessa höyryn energiasisältö/kg eli entalpia ja lämpötila pienenevät merkittävästi. [27, s. 7] Höyryn paisuntaprosessi tapahtuu höyryturbiinissa. CHP-voimalaitoksessa turbiinille ohjattavan höyryn lämpötila on välillä 500–550 °C ja paine vaihtelee välillä 100–150 bar. Ensimmäiseksi höyryn entalpia muuttuu liikeenergiaksi turbiinin johtosiivissä, minkä johdosta höyryn nopeus kasvaa. Tämän jälkeen höyry ohjataan juoksusiipiin, jossa liike-energia muutetaan turbiiniakselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiinista saatava teho voidaan määrittää höyryn entalpian muutoksella turbiinin läpivirtauksessa sekä höyryn massavirralla. Turbiinista saatava teho on esitetty kaavassa 1. Turbiinista saatava mekaaninen teho perustuu paisuntaprosessiin. Turbiinissa tapahtuvan paisunnan takia höyryn paine laskee ja tilavuus kasvaa. [24, s. 17–19]. Paisunnan alku- ja lopputilan välinen entalpiaero muutetaan turbiinissa työksi seuraavasti:

$$P_t = q_m \Delta h_t, \quad (1)$$

jossa P_t on turbiinin termien teho, q_m on höyryn massavirta ja Δh_t on entalpien muutos turbiinissa. [27, s.7]

Kuvan 9 vaiheessa 2–3 tapahtuu höyryn lauhdutus takaisin vedeksi. Lauhdutuksen aikana höyryn entalpia laskee suuresti. Lauhdutuksessa höyryn paine on alhainen, yleensä alle ilmanpaineen. Lauhduttimessa höyry menettää suuren osan lämmöstä jäähdytysvedelle ja lauhtuu vedeksi. [27, s.7] Kun höyry lauhtuu nesteeksi, poistuu höyrystä erittäin paljon lämpöä ja tämä poistuva lämpövirta voidaan esittää kaavassa 2:

$$\Phi_{out} = q_m \Delta h_l, \quad (2)$$

jossa Φ_{out} on työaineesta poistuva lämpövirta ja Δh_l on entalpien muutos lauhduttimessa. [27, s.8]

Kuvan 9 vaihe 3-4 esittää lauhduttimesta tulevan lauhteen paineen nostoa isentrooppisesti syöttövesipumpulla. Tämä vaihe johtaa vain pieneen nousun veden lämpötilassa ja entalpiassa. [27, s. 7]. Kaava 3 esittää nesteen paineen nostossa tarvittavan tehontarpeen:

$$P_{syve} = q_m \Delta h_p, \quad (3)$$

jossa P_{syve} syöttövesipumpun häviötön tehontarve ja Δh_p on entalpien muutos syöttövesipumpussa. [27, s. 8]

Höyryä tuotetaan lämmittämällä vettä höyrykattilassa tietyssä paineessa [27, s. 7]. Kaava 4 esittää kattilaan tuodun lämpötehon höyryn muodostusta varten:

$$\phi_{pa} = q_{mpa} q_i, \quad (4)$$

jossa ϕ_{pa} on kattilaan tuotu lämpöteho, q_{mpa} on polttoaineen massavirta ja q_i on polttoaineen tehollinen lämpöarvo [28, s. 19]. Tämä lämpöteho saadaan polttamalla polttoainetta. Kuvan 9 vaiheet 4–1 esittävät kattilassa tapahtuvan höyryn muodostus- ja tulistusprosessin. Vaiheessa 4–5 tapahtuu veden lämmitys sen kiehumispisteeseensä saakka. Tämän vaiheen aikana lämpötila ja entalpia kasvavat. Vaihe 5–6 kuvastaa veden höyrystymistä vakioaineessa. Tässä vaiheessa entalpia kasvaa suuresti mutta vaihe on isoterminen eli prosessin aikana lämpötila pysyy vakiona. Vaiheessa 6–1 tapahtuu höyryn tulistus vakioaineessa, jonka johdosta entalpia ja lämpötila nousevat. [27, s. 7] Kaava 5 esittää höyryn saamaa lämpövirtaa, joka perustuu entalpien muutokseen höyrystymisessä ja tulistuksessa:

$$\Phi_{in} = q_m \Delta h_k, \quad (5)$$

jossa Φ_{in} on höyryyn tuotu lämpövirta ja Δh_k on entalpian muutos kattilassa ja tulistuksessa [27, s. 8]. Höyryä käytetään suuren lämpöenergian määrän kuljettamiseen ja se onkin kaikkein yleisin lämmityksen väliaine teollisuuslaitoksissa. Tämä johtuu siitä, että höyry ei ole myrkyllistä, se on helposti kuljetettavissa, sitä voidaan tuottaa tehokkaasti ja sen tuotanto ei ole kovin kallista. [29, s. 47]

Kun vesi lämmitetään kiehumispisteeseen tai kyllästymislämpötilaan, se on kylläinen lämpöenergialla. Jos tähän tilanteeseen lisätään lämpöä vakiopaineessa, veden lämpötila ei nouse mutta vedestä syntyy kylläistä höyryä. Sekä kieuvan veden että kylläisen höyryn lämpötila on sama, mutta höyryn lämpöenergia on paljon isompi kuin kieuvan veden. Ilmanpaineessa veden kiehumispiste tai kyllästyslämpötila saavutetaan 100 °C:ssa. Jos painetta kasvatetaan, veden lämpötilaa pitää kasvattaa, jotta kieuminen tapahtuisi. Toisaalta, jos painetta vähennetään alle ilmanpaineen, vesi kiehuu 100 °C:n lämpötilan alapuolella. Höyryn muodostamisprosessissa kaikki vesi muutetaan höyryksi höyrykattilan paineen mukaisessa kiehumispisteessä. [29, s. 48]

Prosessia, jossa lämmön lisäys johtaa lämpötilan nousuun kutsutaan tuntuva lämmön prosessiksi, ja jossa lisätty lämpö on tuntuva lämpö. Ominaislämpökapasiteetti on se lämpöenergian määrä, jota tarvitaan lämmittämään 1kg ainetta yhden °C:n. Vedelle tämä ominaislämpökapasiteetti ilmanpaineessa on 4.19 kJ/1 kg* K. [29, s. 51]

Lämmitystä, joka ei johda lämpötilan nousuun ja johtaa vain olomuodon muutokseen, kutsutaan latenttilämmöksi. Latenttilämpö on lämpöä, joka sitoutuu aineeseen höyrystymisessä tai joka vapautuu höyryn lauhtuksen aikana. Latenttilämpö ilmaistaan SI-yksiköissä joule per massayksikkö grammoina sille aineelle, jonka olomuoto tulee muuttumaan. Veden höyrystymislämpö ilmanpaineessa eli se lämpömäärä, jota tarvitaan 1 kg veden höyrystämiseen kiehumispisteessä on 2 257 kJ/kg. [29, s. 51]

Kun kylläistä höyryä lämmitetään siten, että höyryn lämpötila ylittää kyllästymislämpötilan vakiopaineessa, höyry muuttuu tulistetuksi höyryksi. Höyryn tulistaminen tuottaa höyryä, joka on korkeammassa lämpötilassa. Höyryn tulistus kasvattaa höyryn energiasisältöä, minkä johdosta höyrystä saadaan enemmän lämpö- ja sähköenergiaa. [29, s. 53]

4. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO

Tässä luvussa tarkastellaan CHP-voimalaitoksen hallintaa ja esitellään niitä tapoja, joilla sähkön ja lämmön tuotantosuhteisiin vaikutetaan CHP-laitoksessa. Luvussa käsitellään myös tekijöitä, jotka vaikuttavat voimalaitoksen tuotantomääriin.

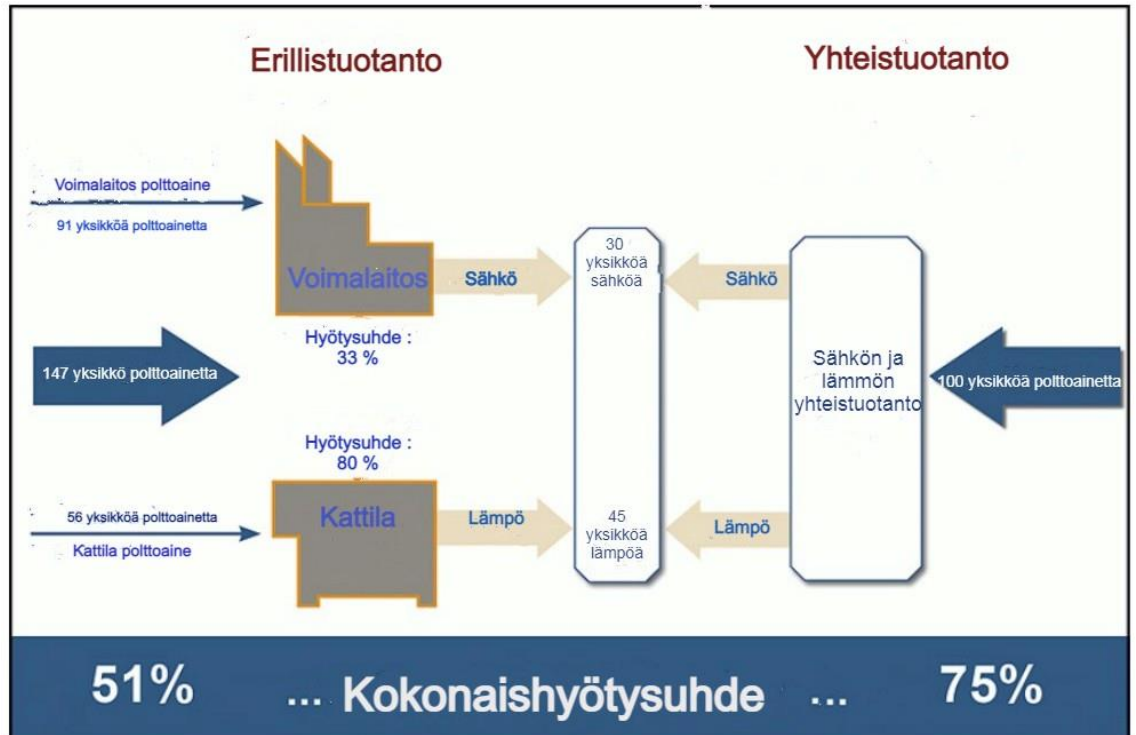
4.1 Hyötysuhde CHP-voimalaitoksessa

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on kyse samanaikaisesta sähkön ja lämmön tuottamisesta samalla energialähteellä. Kyseisessä tuotantomuodossa on luonteista, että hyötysuhde on korkeampi verrattuna erilliseen sähkön tuotantoon. Sähkön erillisessä tuotannossa jää käyttämättä lauhdeturbiinista ulostulevan höyryn lämpöenergia, ja kyseinen lämpö vapautetaan ympäristöön, kun taas yhteistuotannossa lämpöenergia voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpönä. [25, s. 3] Yhteistuotannon käytön edellytyksenä on se, että lämmölle on voimalaitoksen läheisyydessä taloudellisesti järkevää käyttöä.

Kuva 10 esittää yhteistuotannon ja erillistuotannon tehokkuuksien eron. Kuvan CHP-voimalaitos tuottaa 100 yksikön polttoaineella 30 yksikköä sähköenergiaa ja 45 yksikköä lämpöenergiaa. Erillisessä sähkön tuotannossa tarvitaan 91 yksikköä polttoainetta saman sähkömäärän tuottamiseen sekä 56 yksikköä polttoainetta yhteistuotannosta saatavan lämpömäärän tuottamiseen. Tästä huomataan, että erillistuotannossa käytetään 47 yksikköä enemmän polttoainetta kuin yhteistuotannossa. [25, s. 4] CHP-laitoksen hyötysuhde voidaan kirjoittaa kaavan 6 mukaan:

$$\eta_{tot} = \frac{P_{el} + P_l}{P_{pa}}, \quad (6)$$

jossa P_{el} on sähköteho, P_l on lämpöteho ja P_{pa} on polttoaineteho [30, s. 17].



Kuva 10. Ero yhteistuotannon ja erillistuotannon hyötysuhteissa, muokattu lähteestä [25, s. 5]

4.2 Vastapainevoimalaitosprosessin hallinta

CHP-voimalaitosten toimintastrategia jaetaan kahteen luokkaan: lämpöjohdettuun ja sähköjohdettuun. Lämpöjohdetussa strategiassa, voimalaitosprosessin toimintapiste eli tavoiteteho määritetään halutun lämpötehon perusteella. Sähköjohdetussa strategiassa, voimalaitosprosessin toimintapiste määritetään halutun sähkötehon perusteella. [31, s. 1] Tässä työssä käsitellään voimalaitosta, jonka ensisijainen lopputuote on lämpö ja toissijainen on sähkö. Tällöin kattilaan syötettävä polttoainemäärä määritetään halutun lämpötehon perusteella [32, s. 50].

Voimalaitosprosessi edellyttää kokoaikaista säätöä. Jos säätöä ei tapahtuisi, kattilan tuotanto muuttuisi jatkuvasti muun muassa polttoaineen laadun ja määrän mukaan. [30, s. 22] CHP-voimalaitosta voi säätää kahdella tavalla: kattila seuraa -säätörakenteella tai turbiini seuraa -säätörakenteella. CHP-laitoksissa käytetään enimmäkseen kattila seuraa -säätörakennetta.

Kattila seuraa -säätörakenteessa sähkö- ja lämpötehoa ohjataan turbiinin säätöventtiilillä, ja höyrynpainetta polttoteholla. Kun laitoksen tehon tarve kasvaa, turbiinin säätöventtiilit avautuvat. Tällöin hyödynnetään kattilaan varastoitunutta energiaa, jonka avulla voidaan hetkellisesti purkaa polttotehoa vastaavaa tuotantoa suurempi määrä höyryä. Tämän johdosta kattilaan varastoitunut energia vähenee ja samalla kattilan höyrynpaine laskee. Tällöin polttotehoa lisätään, jotta kattilan paine palaa asetusarvoonsa. Kun laitoksen tehon tarve laskee, kattilan paine nousee ja kattilan energiavarasto kasvaa, ja samalla kattilan höyrynpaineen säätö pienentää polttoaineen syöttöä palauttaen paineen asetusarvoonsa. Kattila seuraa -säätötapa mahdollistaa nopeat sähkö- ja lämpötehon muutokset. [32, s. 50]

Turbiini seuraa- rakenteessa CHP-laitosta säädetään siten, että kattilan paine, tai turbiinille menevän höyryn paine pidetään vakiona turbiinin säätöventtiilien avulla. Kattilaan syötetyn polttoainemäärän avulla ohjataan sähkö- ja lämpötehoa. Tehon tarpeen laskeessa voimalaitosautomaatio vähentää syötetyn polttoaineen määrää kattilaan ja tehon tarpeen noustessa syötetty polttoainemäärä kasvaa. Turbiinin säätöventtiili reagoi muuttuneeseen höyryn määrään muuttamalla höyryvirtausta turbiinille, jolloin höyryn paine pysyy asetusarvossaan. Tätä säätötapaa ei yleensä käytetä, koska sen tehonmuutosnopeus on hidas. [30, s. 22]

4.3 Sähkön ja lämmön tuotantosuhteen ohjaus

Tässä työssä käsitellään kuvan 2 mukaista CHP-voimalaitosta, jonka sähkön ja lämmön tuotannon suhteeseen vaikutetaan kolmella eri tavalla; savukaasulauhduttimen käyttö, höyryturbiinin ohitus ja vastapaineturbiinin jälkeisen lauhdeperän käyttö.

4.3.1 Savukaasulauhduttimen vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon

Kun kaukolämpövesi palaa kaukolämpöverkosta, ja voimalaitoksessa käytetään savukaasulauhdutinta, menee kaukolämpövesi ensimmäiselle kaukolämmönsiirtimelle, jossa tapahtuu kaukolämpöveden esilämmitys savukaasulauhduttimesta saatavasta lämmöstä. Nyt kaukolämpövesi on vähän kuumennettua vettä sen mennessä toiselle kaukolämmönsiirtimelle. Koska toiselle kaukolämmönsiirtimelle menevä vesi on korkeam-

massa lämpötilassa, johtaa se siihen, että höyryn pitää lauhtua korkeammassa lämpötilassa. Turbiinilta tai reduktiolinjalta tuleva höyry toiselle kaukolämmönsiirtimelle on tällöin korkeammassa lämpötilassa ja paineessa. Korkeampi höyryn paine ja -lämpötila tarkoittaa sitä, että höyryturbiinissa tapahtuva paisunta ei voi mennä yhtä pitkälle kuin jos savukaasulauhdutinta ei käytettäisi. Näin ollen savukaasulauhduttimen käyttö johtaa siihen, että sähkön tuotanto laskee. [33, s. 64]

Savukaasulauhdutinta käytettäessä tuotetaan lämpöä savukaasuihin sitoutuneesta lämpöenergiasta, joka menisi muussa tapauksessa hukkaan. Tämä tarkoittaa sitä, että osa CHP-laitoksen toimintapisteestä eli tavoitelämpö määrästä saavutetaan savukaasulauhduttimella tuotetun lämmön avulla. Tämän takia voimalaitos tarvitsee pienemmän polttoainemäärän tietyn lämpötehon tuottamiseen.

Koska savukaasulauhdutinta käytettäessä, virtaavan höyryn määrä vastapaineturbiinin on pienempi, tuotetun sähkön määrä vähenee. Joten teoriassa savukaasulauhduttimen käytöllä suoraan vähennetään sähkön tuotannon määrää CHP-voimalaitoksessa.

4.3.2 Reduktion vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon

Reduktioajossa viedään kattilasta tuleva höyry vastapaineturbiinin ohi suoraan kaukolämmönsiirtimille. Turbiinin ohittaminen johtaa sähkön tuotannon alenemiseen. Toisaalta saadaan tuotettua paljon enemmän lämpöä. Reduktiota hyödynnetään tilanteissa, joissa sähkön tarve tai -hintat ovat alhaisia, tai lämmön tarve on erittäin korkea. CHP-voimalaitoksen reduktioajo mahdollistaa sen, että voimalaitoksen lämmöntuotanto maksimoidaan.

Tornbergin mukaan reduktiota voidaan hyödyntää myös, kun voimalaitoksen ajama kuorma on erittäin pieni. Pienellä kuormalla ajettaessa prosessihöyry ei saavuta haluttuja tuotantoarvoja turbiinin jälkeen, joten voi olla järkevämpää viedä höyry turbiinin ohi suoraan reduktiolinjalle. [30, s. 23]. Reduktioajoa toteutetaan myös tilanteissa, joissa turbiini ei ole käytössä. Esimerkiksi Kantvikin sokeritehtaan yhteydessä olevassa vastapainovoimalaitoksessa tuotetaan prosessihöyryä reduktion kautta, kun turbiini ei ole käytössä [34, s. 2-4].

4.3.3 Lauhdeperän vaikutus sähkön ja lämmön tuotantoon

Vastapaineturbiinin jälkeen on mahdollista hyödyntää höyryä sekä lämmön tuotantoon siirtämällä höyry kaukolämmönsiirtimeen, että sähkön tuotantoon lauhdeperällä. Vastapaineturbiinin jälkeen höyry on vielä paineistettua, jolloin sitä voidaan hyödyntää energiälähteenä. Mikäli sähkön tarve on suurempi kuin lämmön tarve, voidaan sähköntuotantoa lisätä lauhdeperän avulla. Kun voimalaitos on lauhdutustilassa, suuri määrä vastapaineturbiinista tulevasta höyrystä ohjataan lauhdeperään maksimaalista sähkön tuotantoa varten. Lauhdeperän höyryn lämpötila on liian matala lämmön tuottamiseen ja se viedään lauhduttimeen. Täydessä yhteistuotantotilassa lauhdeperä on poistettu käytöstä, ja kaikki vastapaineturbiinista tulevasta höyrystä viedään kaukolämmönsiirtimelle. Voimalaitoksessa on myöskin mahdollista ohjata sähkön ja lämmön tuotantoa siten, että ollaan lauhdutustilan ja täyden yhteistuotantotilan välillä. Tällöin tietty määrä höyryä menee lauhdeperään ja tietty määrä höyryä menee kaukolämmönsiirtimeen. [25, s. 5–6]

Kun suuri osa höyrystä menee lauhdeperälle, lauhdutushäviöt kasvavat, ja voimalaitoksen kokonaishyötysuhde laskee. Lauhdeperä mahdollistaa suuremman sähkömäärän tuoton mutta johtaa siihen, että voimalaitoksen kokonaishyötysuhde laskee. Voimalaitoksen ollessa lauhdutustilassa, se käyttäytyy kuin lauhdevoimalaitokset, joissa tuotetaan vain sähköä ja joiden hyötysuhteet ovat paljoin alhaisempia CHP-laitoksiin verrattuna. [25, s. 6].

4.4 Sähkön hinnan vaikutus tuotantoon

Sähkön hinnalla on suora vaikutus yhteistuotantolaitoksen ajotapaan. Kun sähkön hinta on alhainen, ei ole taloudellisesti järkevä tuottaa sähköä tai ainakaan suurta määrää sähköä. Kun sähkön hinta on korkea, on taloudellisesti järkevää nostaa tuotetun sähkön määrää voimalaitoksessa.

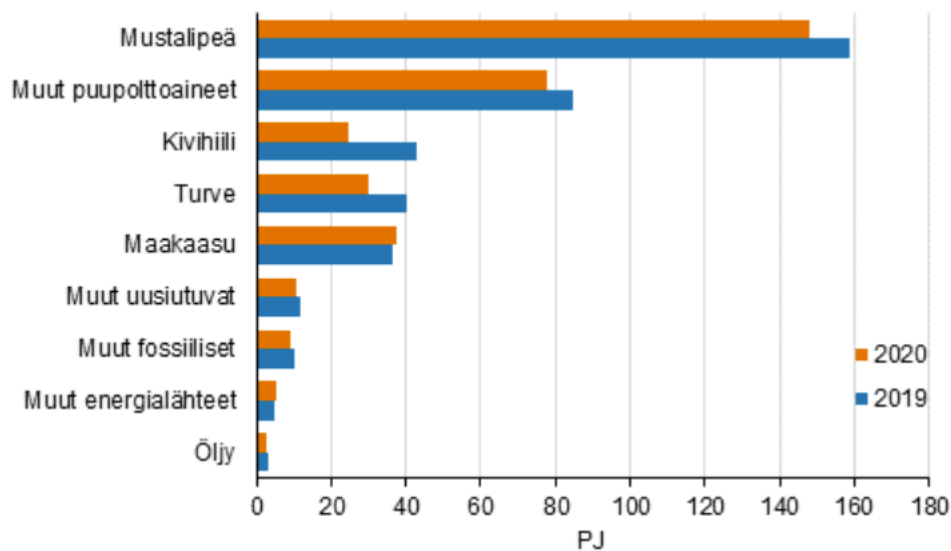
Sähkön hinnan ollessa korkea ja laitosta ajettaessa lämpöjohteisesti, voi olla taloudellisesti kannattavaa poistaa savukaasulauhduksen käyttö. Käytettäessä savukaasulauhduksinta laitoksen toimintapiste saavutetaan pienemmällä höyryteholla, jolloin turbiinin menevä höyrymäärä on pienempi, ja paisunnasta saatava sähkön määrä on pienempi. Lauhdeperän käyttö on myös erittäin suotavaa, kun sähkön hinta on korkea. Vastapaineturbiinin jälkeinen höyry viedään lauhdeperään, jolloin saavutetaan maksimaalinen sähkön tuotanto. Maksimaalisessa sähkön tuotannossa, voimalaitoksen hyötysuhde on

paljon alhaisempi verrattuna sähkön- ja lämmön yhteistuotantoon. Hyötysuhteen alaisuus kompensoidaan korkealla sähkön hinnalla.

Kun sähkön hinta on erittäin alhainen, on perusteltua ohittaa vastapaineturbiini täysin, ja ohjata kattilasta höyry suoraan kaukolämmönsiirtimelle kaukolämmöntuotantoa varten. Vastapaineturbiinin ohitus johtaa siihen, että CHP-laitos ei tuota yhtään sähköä. Jos halutaan tuottaa sähköä, vaikka sähkön hinta on alhainen, on mahdollista tuottaa sähköä vastapaineturbiinin avulla ja turbiinin jälkeen ohjata höyry kaukolämmönsiirtimelle eikä lauhdeturbiinille.

4.5 Polttoaineen laadun vaikutus tuotantoon

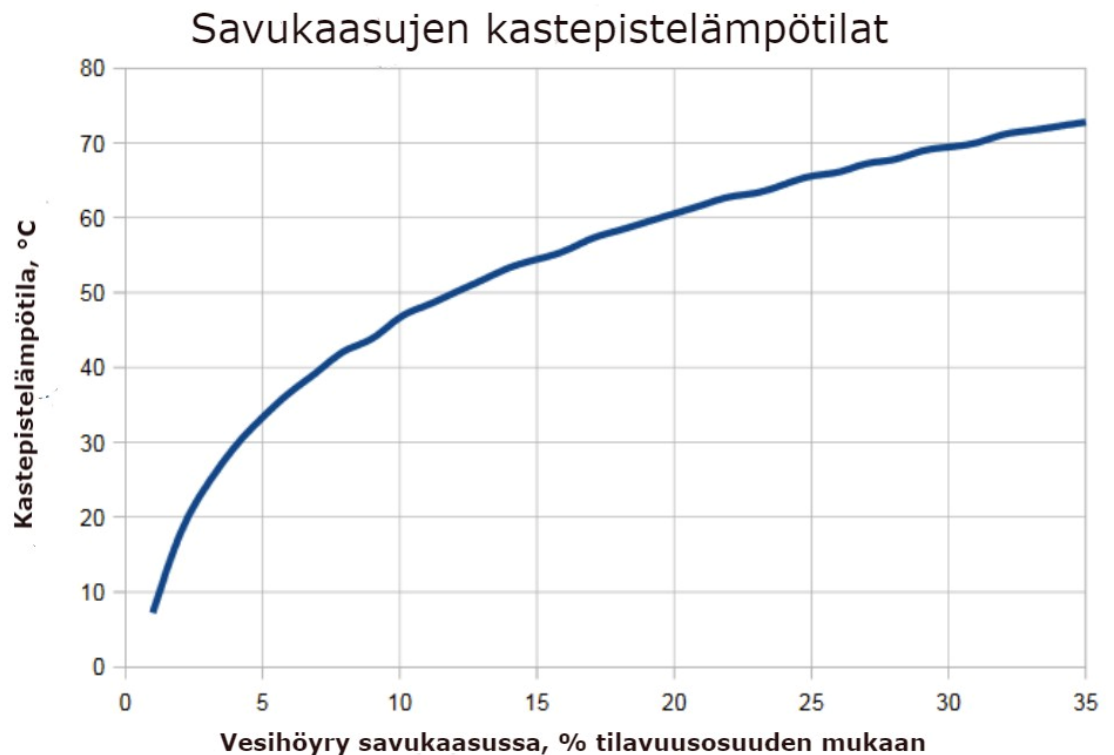
Kuva 11 esittää vuonna 2019–2020 käytetyt polttoaineet sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Kuvasta nähdään, että biopolttoaineiden osuus on erittäin suuri. Puuperäiset biopolttoaineet muodostavat suurimman osan käytetyistä polttoaineista, ja etenkin mustalipeä, jota käytetään suuresti. [35] Mustalipeä on sellunkeitossa syntyvä tuote, joka poltetaan sellutehtaan soodakattilassa [36, s. 7–8]. Turvetta käytetään myös, joka taas on hitaasti uusiutuva biomassapolttoaine [35].



Kuva 11. Polttoaineiden käyttö sähkön ja lämmön yhteistuotannossa 2019–2020 [35]

Biomassa sisältää korkean kosteuspitoisuuden ja se onkin voimalaitoksessa usein käytetty polttoaine. Biomassan energiatiheys verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin on pienempi ja kosteuspitoisuus on korkeampi. Sitä poltettaessa syntyvän savukaasun kosteuspitoisuus on suuri. Kun polttoaineen kosteuspitoisuus kasvaa, sen energiasisältö laskee, mutta poltossa syntyvän savukaasun latenttilämmön määrä kasvaa. Kuva 12

esittää yhteyden kastepistelämpötilan ja savukaasun kosteuspitoisuuden välillä. Kuvasta nähdään, että savukaasun kastepistelämpötila nousee savukaasun kosteuspitoisuuden kasvaessa. Savukaasuista saadaan siis enemmän lämpöä isommalla polttoaineen kosteuspitoisuudella. Näin ollen biomassan käyttö polttoaineena lämmöntuotannossa on erittäin järkevää, kun voidaan ottaa savukaasun sisältämä lämpö talteen. [17, s. 26—27]



Kuva 12. Kastepistelämpötilan yhteys savukaasun kosteuspitoisuuksiin, muokattu lähteestä [17, s. 27]

Kun biomassaa käytetään polttoaineena, syntyvän savukaasun kosteuspitoisuus on suurempi, jonka takia saadaan savukaasulauhduttimella suurempi määrä lämpöä talteen kuin esimerkiksi fossiilisia polttoaineita poltettaessa. Biomassan käytöllä voidaan näin suoraan vaikuttaa sähkön- ja lämmön tuotannon suhteeseen, koska savukaasulauhduttimella voidaan tuottaa osa halutusta lämmöstä

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tarkastella eri tapoja, joiden avulla sähkön ja lämmön tuotantosuhteisiin pystytään vaikuttamaan. Erityisesti työssä haluttiin tarkastella, miten savukaasulauhduttimen käytöllä pystytään vaikuttamaan tuotantosuhteisiin. Ennen varsinaisten ratkaisujen esittämistä, työssä käytiin läpi CHP-voimalaitoksen eri osia ja miten ne yhdessä muodostivat yhteistuotantojärjestelmän. Lisäksi työssä tarkasteltiin höyryn termodynamiikkaa voimalaitosprosessissa. Nämä luvut antoivat hyvän taustoituksen CHP-voimalaitoksen toimintaan ja sen termodynamiikkaan.

Johdannossa esitetty tavoite saavutettiin melko hyvin. Savukaasulauhduttimen toiminnan vaikutuksesta sähkön ja lämmön yhteistuotantoon ei löytynyt niin paljon materiaalia mutta löytyi sen verran, että pystyi itse tekemään tarvittavia johtopäätöksiä, ja sen perusteella tulla tarvittaviin tuloksiin. Työssä päästiin siihen tulokseen, että savukaasulauhduttimen käyttö CHP-voimalaitoksissa parantaa lämmöntuotannon hyötysuhdetta, mutta vähentää sähkön tuotannon osuutta. Savukaasulauhduttimen lisäksi tarkasteltiin myös reduktioajon sekä lauhdeperän vaikutusta tuotantosuhteisiin. Reduktioajossa osa höyrystä vietiin vastapaineturbiinin ohi, jolloin pystyttiin tuottamaan lämpöä pienemmällä polttoainemäärällä. Toisaalta taas lauhdeperä mahdollisti sen, että vastapaineturbiinin jälkeen oleva paineistettu höyry vietiin lauhdeturbiinin, jolloin sähkön tuotannon osuus kasvoi voimalaitoksessa lämmöntuotannon ja kokonaishyötysuhteen kustannuksella.

Työssä myös tarkasteltiin tekijöitä, jotka vaikuttavat haluttuun sähkön ja lämmön tuotantomääriin. Erityisesti työssä keskityttiin sähkön hinnan vaikutukseen ja polttoaineen ominaisuuksien vaikutukseen tuotantoon. Tultiin siihen tulokseen, että sähkön hinnan ollessa alhainen, ei ole järkevää maksimoida sähkön tuotantoa, ja toisaalta sähkön hinnan ollessa korkea, sähkön tuotantoa pitäisi maksimoida. Polttoaineita tarkasteltaessa todettiin, että savukaasuista saadaan enemmän lämpöä talteen polttoaineen suuremmalla kosteuspitoisuudella. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä kosteampi polttoaine, sitä enemmän hyötyä savukaasulauhduttimesta on. Savukaasulauhdutin parantaa huonolaatuisten polttoaineiden käytön taloudellisuutta lämmöntuotannossa, kun suuri osa poltossa syntyneistä savukaasuhäviöistä saadaan otettua talteen.

Savukaasulauhdutus teknologia on melko uusi tapa vaikuttaa sähkön ja lämmön tuotantosuhteisiin, joten tähän aiheeseen liittyen on mahdollista tehdä monenlaisia lisätutkimuksia, jotka voivat vielä lisätä tietoisuutta aiheesta.

LÄHTEET

- [1] Fortum, Sähkön ja lämmön yhteistuotanto, 2022. Saatavissa (viitattu 1.8.2022): <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto-tehokkaampaa-sahkontuotantoa>
- [2] J. Wang, S. You, Y. Zong, C. Traeholt, Z.Y. Yang, Y. Zhou, Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies, Science Direct, 2019. Saatavissa (viitattu 1.9.2022): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919311195>
- [3] TSE, Savukaasulauhdutin tehostaa energiantuotantoa Naantalissa. Saatavissa (viitattu 18.8.2022): <https://www.tset.fi/savukaasulauhdutin-tehostaa-energiantuotantoa-naantalissa/>
- [4] Keravan energia, Keravan Energian biovoimalaitoksella on otettu CO₂-päästöjä vähentävä savukaasulauhdutin käyttöön, 2021. Saatavissa (viitattu 1.9.2022): <https://www.keravanenergia.fi/blog/artikkeli/keravan-energian-biovoimalaitoksella-on-otettu-co2-paastoja-vahentava-savukaasulauhdutin-kayttoon/>
- [5] Fortum, Energiatehokkuutta lauhdutinteknologialla. Saatavissa (viitattu 1.9.2022): <https://www.fortum.fi/media/2016/02/energiatehokkuutta-lauhdutinteknologialla>
- [6] V. Mäkelä, J. Tuunanen, Suomalainen Kaukolämmitys, Mikkelin Ammattikorkeakoulu, 2015. Saatavissa (viitattu 5.4.2022): <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf>
- [7] Danfoss, Miten kaukolämpö toimii. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/heating/knowledge-center/heating-school/how-does-district-heating-work/>
- [8] Energy.gov, Combined heat and power basics. Saatavissa (viitattu 14.4.): <https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics>
- [9] Pohjolan voima, Lämpövoima on tehokasta lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Saatavissa (viitattu 20.4.): <https://www.pohjolanvoima.fi/tuotamme-sahkoa-ja-lampoalampo-voima/>
- [10] Elprocus, Cogeneration definition – Types of cogeneration power plants, 2022. Saatavissa (viitattu 1.8.2022): <https://www.elprocus.com/cogeneration-chp-definition-types-of-cogeneration-power-plants/>
- [11] M. Parvez, Steam boiler, Researchgate, 2017. Saatavissa (viitattu 1.2.2022): https://www.researchgate.net/publication/320057473_Steam_Boiler
- [12] R. Raiko, K. Kirvelä, H. Tolvanen, A. Pääkkönen, Voimalaitos- ja polttotekniikka, Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://tuppu.fi/wp-content/uploads/2017/02/Energiatekniikan-perusteet.pdf>
- [13] T. Saarinen, Mikro-CHP-laitoksen kattilan mitoitus, Oulun ammattikorkeakoulu, Opinnäytetyö, 2018. Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/130911/Saarinen_Tapio.pdf?sequence=1

[14] V. Rahkola, Ekonomaiserin suunnittelu ja mitoitus, Centria ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2014. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75294/rahkola_ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[15] P. Anttila, M. Rönkkönen, Voimalaitoksen polttoaineen syötön optimointi, Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu, Opinnäytetyö, 2017. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/133337/Anttila_Petri%20Ronkkonen_Mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[16] Valmet, Wet flue gas cleaning and heat recovery, 2022. Saatavissa (viitattu 1.2.2022) <https://www.valmet.com/pulp/air-emission-control/wet-flue-gas-cleaning-and-heat-recovery/>

[17] N. Khadka, Heat recovery from flue gas condensing and overall impact on CHP efficiency, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö, 2019. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159195/Mter's_thesis_Nishan_Khadka.pdf?isAllowed=y&sequence=2

[18] J. Järvenreuna, M. Nummilla, Nykyaikainen savukaasupesuri, Caligo. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

[19] S. Javarus, Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2016. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114037/Javarus_Soile.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[20] E. Vuorela, Reduktioaseman automaatiomuutos, Lahden ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2019. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/227219/Vuorela_Eetu.pdf?sequence=3&isAllowed=y

[21] V. Tapalinen, Sellutehtaan höyrytase ja vastapaineturbiini tuotannon kasvaessa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Diplomityö, 2017. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143974/Tapalinen_Ville_Diplomity%C3%B6.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20%20%20%20%20%20%5b4

[22] Säättö, Höyrymuuntoventtiili, 2022. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://saato.fi/tuotteet/hoyrymuuntoventtiili/>

[23] P. Breeze, Combined heat and power, ScienceDirect, 2018, pp. 41–49.

[24] H. Justander, Höyryturbiinien rakenteelliset ratkaisut ja suunnitteluperusteet, Karlia ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2016. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107180/Justander_Harri.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[25] A. Sandberg, Sähkön ja lämmön tehokkaan yhteistuotannon sekä kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen raportoinnin suunnittelu, Aalto-yliopisto, Diplomityö, 2017. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29384/master_Sandberg_Aleksi_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [26] M. Kivelä, Turbiinilaitoksen käynnistyksen nopeuttaminen, Satakunnan ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2014. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/78235/Opinnaytetyo%20Matias%20Kivela%20ME09P%20Fortum-2.pdf?sequence=1>
- [27] T. Katajalaakso, Pienet höyryvoimalaitokset, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, kandidaatintyö, 2021. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163067/Topi_Katajalaakso_Kandidaatinty%C3%B6.pdf?sequence=1
- [28] E. Kokkonen, Sähkön omatuotannon kannattavuustarkastelu, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, diplomityö, 2005. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/30353/TMP.objres.75.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [29] J.K. Abdul Halim, L.Jayanmaha, Reference manual for combined heat and power systems, LJ Energy Pte Ltd, 2019. Saatavissa: <https://www.nea.gov.sg/our-services/climate-change-energy-efficiency/energy-efficiency>
- [30] A. Tornberg, Leijukattilan savukaasujen loppulämpötilan hallinta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, diplomityö, 2015. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104733/Diplomity%C3%B6_Tornberg_muutokset%20tehty.pdf?sequence=2
- [31] C. Gu, D. Xie, J. Sun, X. Wang, Q. Ai, Optimal operation of combined heat and power system based on forecasted energy prices in real-time markets, MDPI, 2015. Saatavissa (viitattu 3.2.2022): <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/12/12427>
- [32] T. Joronen, J. Kovacs, Y. Majanne, Voimalaitosautomaatio. Helsinki: Suomen automaatioseura, 2007, 276 s.
- [33] J. Uotila, Heat recovery and environmental impacts of flue gas condensing, Aalto-yliopisto, diplomityö, 2015. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/19124/master_Uotila_Juuso_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [34] P. Harju, Voimalaitoksen lauhdejärjestelmän kartoittaminen ja kehittäminen, Metropolia ammattikorkeakoulu, insinöörityö, 2016. Saatavissa <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107684/Insinoorityo.pdf?sequence=1>
- [35] Tilastokeskus, Sähkön ja lämmön tuotanto. Saatavissa (viitattu 25.2): https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_kuv_008_fi.html
- [36] A. Rissanen, Sellutehtaasta biojalostamoksi: mustalipeän käyttömahdollisuudet, Oulun yliopisto, kandidaatintyö, 2020. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202104207568.pdf>