

lita-Maria Santamäki

JOUSTAVUUS SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANNOSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Yrjö Majanne
Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Iita-Maria Santamäki: Joustavuus sähkön ja lämmön yhteistuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2021

Sähkön ja lämmön yhteistuotantovoimalaitoksissa tuotettu sähkö- ja lämpöteho riippuvat samasta energiavirrasta. Useimmissa yhteistuotantovoimalaitoksissa lämpö on primäärituote eli tuotanto on mitoitettu lämpökuorman eli prosessin tai kaukolämpöverkon vaatiman lämmön mukaan. Sähkön ja lämmön kysyntä eivät kuitenkaan ole toisistaan täysin riippuvaisia, minkä takia tulisi löytää ratkaisuja, joiden avulla voimalaitoksen hetkellisesti tuottama sähköteho voidaan kytkeä irti hetkellisesti tuotetusta lämpötehosta. Tarve tällaisille keinoille tulee tulevaisuudessa kasvamaan entisestään vaihtelevien uusiutuvien energialähteiden lisääntyvän käytön myötä. Tämän kandidaatintyön tarkoitus oli tutustua näihin keinoihin eli ratkaisuihin, joiden avulla voidaan lisätä yhteistuotannon joustavuutta.

Kandidaatintyö toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tarkoitus oli perehtyä yhteistuotannon joustavuutta käsittelevään kirjallisuuteen. Työn alussa tutustuttiin erilaisiin yhteistuotantovoimalaitoksiin, sähkö- ja kaukolämpöverkkojen toimintaan sekä energiamarkkinoihin. Tämän jälkeen käsiteltiin joustavuuden määritelmää ja yhteistuotantovoimalaitosten tuotannon ohjaamisen perusteita. Lopussa esiteltiin löydetyt yhteistuotantovoimalaitosten joustavuutta lisäävät ratkaisut ja annettiin esimerkkejä niiden hyödyntämisestä todellisilla voimalaitoksilla.

Avainsanat: yhteistuotanto, CHP, joustavuus,

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO	3
2.1 CHP-voimalaitokset.....	3
2.1.1 Erilaisia CHP-voimalaitoksia	3
2.1.2 Tunnusluvut	6
2.1.3 CHP teollisuudessa.....	7
2.2 Kaukolämpöverkko	7
2.3 Sähköverkko	9
2.4 Energiamarkkinat	11
3. JOUSTAVUUS JA TUOTANNON OHJAUS	14
3.1 Joustavuuden määrittely	14
3.2 CHP-voimalaitosten tuotannon ohjaaminen	16
4. RATKAISUJA JOUSTAVAMPAAN YHTEISTUOTANTOON	18
4.1 Lauhdutusturbiinit.....	18
4.2 Reduktioventtiilit.....	19
4.3 Lämmön varastointi.....	21
4.4 Apujäähdyttimet ja absorptiojäähdytys	23
5. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATD	Aggregated Thermal Demand
CCHP	Combined Cool, Heat and Power
CHP	Combined Heat and Power
IRENA	International Renewable Energy Agency
LTO	Lämmön talteenotto

P	tuotettu sähköteho
P_n	nettosähköteho
q	kulutussuhde
Q_l	lämpövarastoon ladattu lämpö
Q_o	lämpövarastosta purettu lämpö
Q_t	voimalaitoksen tuottama lämpö
Q_{TES}	lämpövaraston kapasiteetti
r	rakennussuhde
T_{max}	lämpövaraston suurin sallittu lämpötila
T_{min}	lämpövaraston pienin sallittu lämpötila
T_{TES}	lämpövaraston lämpötila
ε_{TES}	lämpövaraston latauksen hyötysuhde
δ	tehomuutoksen kesto
ϵ	energian kapasiteetti
η	kokonaishyötysuhde
π	tehokapasiteetti
ρ	tehon muutosnopeus
ϕ	kaukolämpöteho
ϕ_{kl}	tuotettu kauko- tai prosessilämpöteho
ϕ_{pa}	polttoaineteho

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja uusiutumattomien luonnonvarojen ehtyminen ovat lisänneet kiinnostusta löytää uusia keinoja tehokkaampaan energian hyödyntämiseen ja monipuolisempaan energialähteiden käyttöön. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on yksi erityisesti Suomessa jo paljon hyödynnetty keino, sillä yhteistuotannolla voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde verrattuna sähkön ja lämmön erillistuotantoon. Höyryvoimalaitoksiin perustuvissa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa eli CHP-laitoksissa (Combined Heat and Power) sähköä ja lämpöä tuotetaan samassa voimalaitoksessa siten, että turbiinia pyörittävä höyry johdetaan edelleen lämmöksi joko teollisuuden prosesseihin tai kaukolämpöverkkoon.

Ongelmana sähkön ja lämmön yhteistuotannossa on se, että tuotetun sähkön ja lämmön määrä riippuu samasta energiavirrasta. Lämpö on usein CHP-voimalaitoksissa primäärituote, jolloin laitoksen tuotantoteho mitoitetaan lämpökuorman eli tarvittavan lämpötehon mukaan. Lämmön ja sähkön kysynnässä on kuitenkin eroja, minkä takia yhteistuotannon tulisi olla joustavaa eli sellaista, että sähköä ja lämpöä voitaisiin tuottaa hetkellisesti toisistaan riippumatta. Joustavuutta tullaan tulevaisuudessa vaatimaan entistä enemmän, kun vaihtelevien uusiutuvien energialähteiden käyttöä lisätään. Tämän työn tavoitteena on tutkia ratkaisuja tähän ongelmaan eli keinoja, joilla sähkön tuotannon riippuvuutta lämmön tuotannosta voidaan yhteistuotannossa pienentää siten, että voimalaitoksen tuottaman hetkellisen tehon ei tarvitse seurata tarkasti hetkellistä lämpökuormaa. Tavoitteena on löytää esimerkkejä olemassa olevista ratkaisuista.

Energiajärjestelmän joustavuuteen liittyvää tutkimusta on aiheen ajankohtaisuuden vuoksi tehty paljon. Esimerkiksi Euroopan Unionin rahoittama tutkimussarja Heat Roadmap Europe on tutkinut lämmön kulutuksen hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Yhdessä tutkimussarjan artikkelissa Vad Mathiesen et al. [1] tutkivat mahdollisuuksia hyödyntää älykkäitä kaukolämpöverkkoja, joihin olisi liitettynä esimerkiksi CHP-voimalaitoksia, tuuli- ja aurinkovoimaloita, lämpöpumppuja ja energiavarastoja. Rinne ja Syri [2] tutkivat mahdollisuuksia tasapainottaa suurta tuulivoiman käyttöä sähkön ja lämmön yhteistuotannolla Suomen olosuhteissa, ja Levihn [3] tutki CHP-voimalaitosten ja lämpöpumppujen hyödyntämistä tasapainottamaan uusiutuvien energialähteiden käyttöä Tukholman kaukolämpöverkossa.

Ennen yhteistuotannon joustavuutta lisäävien ratkaisujen esittelyä työssä perehdytään tarkemmin tutkimusaiheeseen. Toisessa luvussa käydään läpi sähkön ja lämmön yhteistuotannon perusteita, sähkö- ja kaukolämpöverkon toimintaa sekä energiamarkkinoita. Kolmas luku keskittyy kuvaamaan tarkemmin energiantuotannon joustavuutta sekä yhteistuotannon ohjaamista.

2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO

Tämän luvun tarkoitus on toimia johdatuksena työn aiheeseen eli sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Luvussa perehdytään erilaisiin CHP-voimalaitoksiin, sähkö- ja kaukolämpöverkon toimintaan sekä Suomen energiamarkkinoihin.

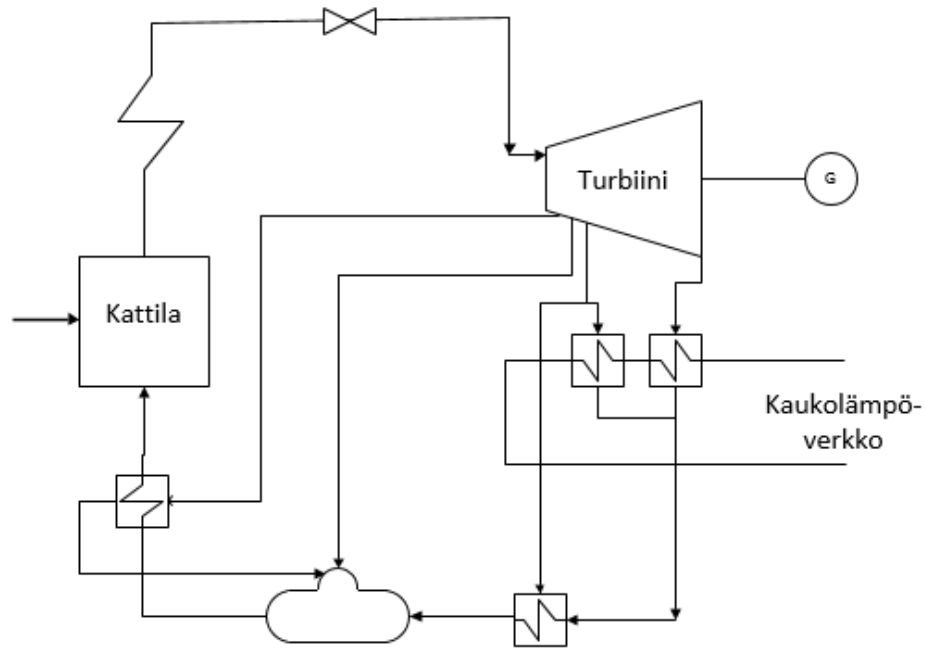
2.1 CHP-voimalaitokset

Sähköä ja lämpöä voidaan tuottaa samanaikaisesti erilaisissa voimalaitoksissa. Tämän luvun tarkoituksena on tutustua erilaisiin voimalaitoksiin sekä tunnuslukuihin, joiden avulla CHP-voimalaitoksia voidaan kuvata.

2.1.1 Erilaisia CHP-voimalaitoksia

Sähköä ja lämpöä voidaan tuottaa yhtä aikaa erilaisissa voimalaitoksissa. Näitä ovat vastapaine- ja väliottolauhdutuslaitos, kaasuturbiinilaitos, kombivoimalaitos sekä moottorivoimalaitos [4, s. 293–304]. Myös ydinvoimaa voidaan käyttää yhteistuotannossa [5].

Vastapainevoimalaitoksissa syöttövesi syötetään kattilaan, jossa polttoaineesta saatavalla lämpöenergialla vesi höyrystetään ja johdetaan edelleen tulistimeen. Tulistimessa höyryn lämpötila nousee ennen sen johtamista turbiiniin, jossa paine ja lämpötila laskevat vastaamaan turbiinissa olevaa painetta höyryn samalla pyörittäessä turbiinia. Turbiinissa vesihöyryn lämpöenergia muuttuu osittain mekaaniseksi energiaksi, ja turbiinin pyörittäessä generaattoria mekaaninen energia muuttuu sähköenergiaksi. [6, s. 32] Kaukolämpöä tuottavissa vastapainevoimalaitoksissa höyry johdetaan edelleen lämmönsiirtimiin, joissa vesihöyry lauhtuu ja luovuttaa lämpöenergiaansa siirtimen läpi kulkevaan veteen [4, s. 298]. Tätä prosessia kuvaa kuvassa 1 esitelty vastapainelaitoksen periaatekaavio.



Kuva 1. *Kaukolämpöä tuottavan vastapainevoimalaitoksen periaatekaavio, perustuu lähteeseen [7, s. 3].*

Jotta höyry voisi siirtää kaukolämpöverkon vaatiman lämpömäärän, höyryn tulee olla tarpeeksi kuumaa. Tämän takia turbiinin ulostulossa on korkeampi paine eli vastapaine kuin pelkkää sähköenergiaa tuottavissa lauhdutusvoimalaitoksissa. Tämä johtaa sähköntuotannon hyötysuhteen kärsimiseen, sillä se on vastapainelaitoksissa vain noin 30 % polttoaineentehosta verrattuna ainoastaan sähköä tuottavien voimalaitosten noin 40 %:n hyötysuhteeseen. Vastapainevoimalaitoksissa voidaan kuitenkin saavuttaa jopa 90 %:n kokonaishyötysuhde polttoainetehosta, sillä sähköhyötysuhteessa tapahtuvia häviöitä voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa. [6, s. 33–34] Teollisuudessa vastapainevoimalaitoksien höyry voidaan johtaa kaukolämpöverkon sijaan sellaisenaan tai kuumana vetenä edelleen teollisuuden prosesseihin.

Väliottolauhduksilaitoksissa kaukolämpövettä lämmitetään väliottohöyryllä, jolloin matalapaineista höyryä voidaan käyttää pelkästään sähköntuotantoon. Väliottohöyryä voidaan ottaa joko turbiinista, jossa on selkeästi matala- ja korkeapaineosa, tai sitä voidaan ottaa reductioventtiilin avulla jo ennen turbiinia. Tällä tavalla sähkön- ja lämmöntuotantoa voidaan säätää tietyin rajoituksin myös erikseen, mutta sähkön ja lämmön yhteistuotantoon liittyviä hyötyjä saadaan ainoastaan ennen väliottoa olevista prosessin osista. [4, s. 298–299]

Kaasuturbiinilaitoksessa kaasuturbiini on yhdistetty LTO-kattilaan (lämmön talteenotto), jolloin voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä samanaikaisesti. LTO-kattiloissa tuotetaan

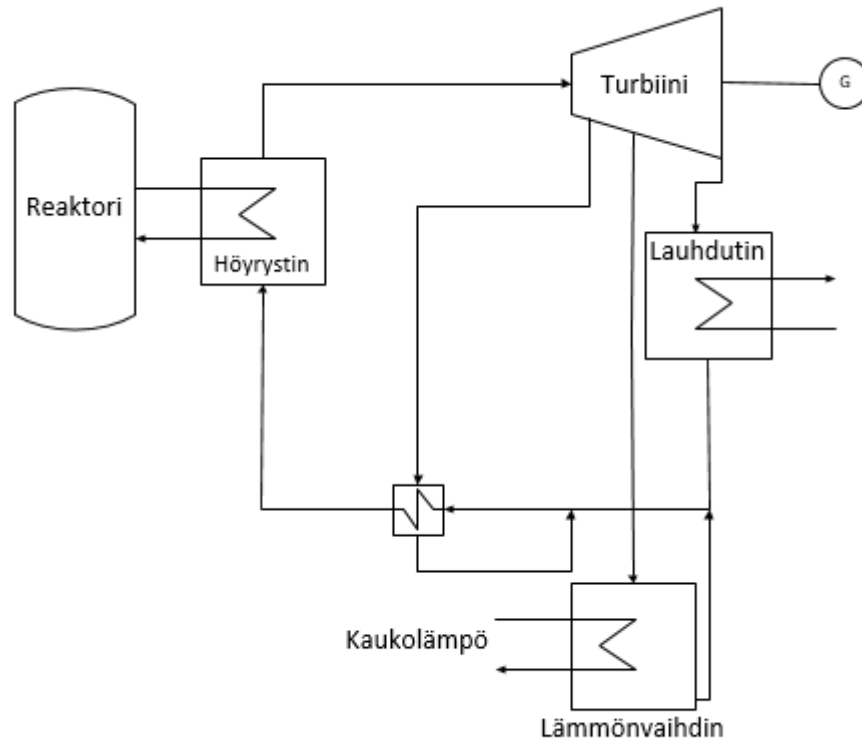
lämpöä kaukolämpöverkkoon, höyryä teollisuuden prosesseihin tai näitä molempia. Kaasuturbiinilaitos toimii siten, että kompressori ottaa ilman ulkoa ja puristaa sen polttopaineeseen, jolloin ilman lämpötila nousee. Kuuma, korkeapaineinen ilma reagoi polttokammiossa sinne syötetyn polttoaineen kanssa. Syntynyt ilman ja savukaasun seos johdetaan edelleen turbiiniin, jossa seos paisuu pyörittäen turbiinia, joka edelleen pyörittää generaattoria. Tämän jälkeen ilman ja savukaasun seos johdetaan LTO-kattilaan. [4, s. 300–301]

Moottorivoimalaitokset voivat toimia joko diesel- tai kaasumoottoreilla. Niitä voidaan hyödyntää yhteistuotannossa hyvin samalla tavalla kuin kaasuturbiineita, eli moottorin toiminnasta syntyvät savukaasut johdetaan lämmön talteenottoon ja sähköä tuotetaan generaattorilla, joka on kiinnitetty moottorin kampiakseliin [8, s. 52]. Savukaasujen lisäksi moottorivoimalaitoksen voiteluöljyn, ahtoilman ja sylinteriryhmän jäähdyttimet voidaan kytkeä lämmönsiirtimillä kaukolämpökiertoon [4, s. 307]. Moottori- ja kaasuturbiinivoimalaitosten korkeiden käyttökustannusten vuoksi niitä hyödynnetään Suomessa lähinnä kulutushuippujen tasoittamisessa ja varavoimana. Tällaiseen käyttöön tarkoitettuja moottori- ja kaasuturbiinivoimalaitoksia ei kuitenkaan käytetä yhteistuotantolaitoksina, sillä niiden toiminnan kannalta voimalaitoksen nopea käynnistyminen on tärkeämpää kuin korkea hyötysuhde. [9, s. 254] [10]

Kombivoimalaitoksessa kaasu- ja höyrypiiri yhdistyvät siten, että kaasuturbiinista LTO-kattilaan siirtyvän kaasun korkea lämpötila hyödynnetään talteenottokattilassa höyryn tuotannossa. Näin syntynyt höyry johdetaan höyryturbiiniin, jonka avulla tuotetaan sähköä samoin kuin höyryvoimalaitoksissa. Kombivoimalaitoksissa siis tuotetaan sähköä sekä kaasu- että höyryturbiinilla. Höyryturbiini voi olla joko lauhdeturbiini, jolloin höyry lauhdutetaan turbiinin jälkeen, tai vastapaineturbiini, jolloin turbiinin jälkeen höyryä voidaan hyödyntää vielä kauko- tai prosessilämmön tuotannossa. Myös moottorivoimalaitoksen perään on mahdollista kytkeä höyryturbiini. [4, s. 303–307]

Ydinvoimaa on hyödynnetty sähkön ja lämmön yhteistuotannossa jo melko pitkään esimerkiksi Unkarissa, Sveitsissä, Venäjällä ja Ruotsissa. Haasteena on kuitenkin ydinvoimalaitosten etäisyys alueista, joilla kaukolämpöä on järkevä hyödyntää. [5, s. 5] Myös Suomessa on tutkittu ydinvoiman mahdollisuuksia yhteistuotannossa: 2000-luvun lopussa Fortum tutki mahdollisuuksia rakentaa Loviisaan kolmas reaktori, jota voitaisiin hyödyntää pääkaupunkiseudun lämmöntuotannossa, mutta lupahakemus hylättiin [11]. Ydinvoimapohjaista yhteistuotantoa voidaan tulla kuitenkin hyödyntämään Suomessa vielä tulevaisuudessa, sillä hiilineutraalina vaihtoehtona se edistäisi Suomen ilmastotavoitteita.

Kuva 2 havainnollistaa yhtä vaihtoehtoa, jota Fortum tutki mahdollisuutena Loviisa 3 -reaktorin toteutuksessa. Kuvassa on esitetty, miten ydinvoimalaitos on yhdistetty kaukolämpöverkkoon. Ydinvoimalaitoksissa turbiinin liike saadaan aikaan höyryllä samoin kuin esimerkiksi vastapainevoimalaitoksessa. Höyrystyminen perustuu kuitenkin polttamisesta saadun energian sijaan ytimen halkeamisesta eli fissiosta syntyvään lämpöön.



Kuva 2. Yksi Fortumin ehdottamista ratkaisuista Loviisa 3 -reaktorin toteutukseksi, perustuu lähteeseen [12, s. 11].

2.1.2 Tunnusluvut

CHP-voimalaitosprosesseihin liittyvät tärkeimmät tunnusluvut ovat kulutussuhde, kokonaishyötysuhde sekä rakennussuhde. Kulutussuhteella tarkoitetaan polttoainetehon ja nettotuotannon suhdetta q , joka lasketaan kaavalla

$$q = \frac{\phi_{pa}}{P_n + \phi} \quad (1)$$

jossa ϕ_{pa} on polttoaineteho, P_n verkkoon syötetty nettosähköteho ja ϕ kaukolämpöteho. Voimalaitosprosessin kokonaishyötysuhde η on kulutussuhteen käänteisluku, joka lasketaan siis kaavalla

$$\eta = \frac{1}{q}. \quad (2)$$

Kulutus- ja kokonaishyötysuhteella voidaan kuvata myös muita voimalaitosprosesseja. Koska CHP-voimalaitoksissa lopputuotteita on kaksi, sähkö ja lämpö, tarvitaan edellisten suureiden lisäksi suure kuvaamaan näiden välistä suhdetta. Tällainen suure on rakennussuhde r , joka lasketaan kaavalla

$$r = \frac{P}{\phi_{kl}}, \quad (3)$$

jossa P on tuotettu sähköteho ja ϕ_{kl} kauko- tai prosessilämpöteho. [4, s. 293–295] Näiden suureiden avulla yhteistuotantolaitoksia voidaan vertailla. Lisäksi voimalaitoksen investointi- ja käyttökustannuksilla sekä hiilidioksidipäästöillä on merkitys uutta voimalaitosyksikköä suunniteltaessa.

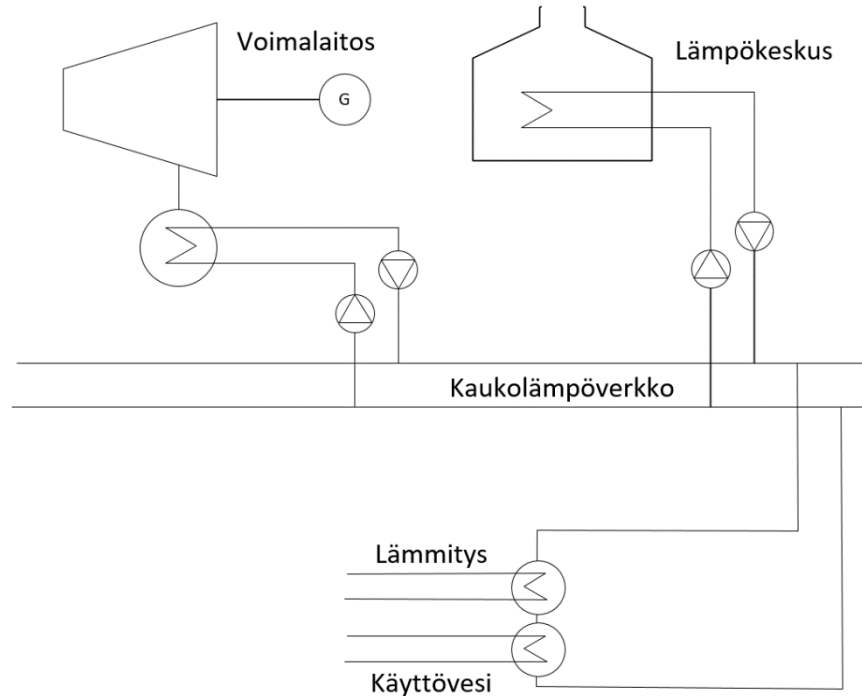
2.1.3 CHP teollisuudessa

Suomessa yhteistuotannon merkitys teollisuudelle on huomattava. Sen lisäksi, että teollisuus kuluttaa lähes puolet koko Suomen energiantuotannosta, teollisuuden vastapainetuotannon osuus koko Suomen sähköntuotannosta on maailman suurin [6, s. 5]. Sähkön ja lämmön yhteistuotantoa hyödynnetään erityisesti sellaisilla teollisuudenaloilla, joissa lämpöenergian tarve on suuri, kuten esimerkiksi selluteollisuudessa, jossa suurin osa tuotannon vaatimasta lämmöstä ja sähköstä voidaan saada soodakattilasta sekä siihen kytketystä höyryturbiinista. Sähkön ja lämmön yhteistuotantovoimalaitoksia rakennetaan puunjalostusteollisuuden lisäksi myös esimerkiksi metalli- ja kemianteollisuuden yhteyteen. [9, s. 46–59]

2.2 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkon tarkoitus on siirtää keskitetysti tuotettua lämpöä joko höyrynä tai lämpimänä vetenä asiakkaiden käyttöön. Euroopassa käytetään lämpimään veteen perustuvaa kaukolämpöä, jossa sama vesi kiertää kaukolämpöverkossa yhä uudelleen lämmön kuljettajana lämmöntuottajien ja asiakkaiden välillä. Kaukolämpöverkko koostuu yleisimmin yhdestä meno- ja yhdestä paluuputkesta, jotka yhdessä muodostavat kaukolämpöjohdon, jossa vesi pysyy liikkeessä lämmityslaitosten pumppujen avulla. Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa lämpö tuotetaan kaukolämpöverkkoon lämmönsiirtimissä, joissa turbiinilta tuleva höyry lauhtuu luovuttaen lämpönsä siirtimen läpi kulkevaan veteen. Vastaavasti lämpö siirtyy lämmönsiirtimien avulla verkosta

asiakkaiden käyttöön. Usein kaukolämpöverkossa on kiinni myös muita lämmönlähteitä, kuten lämpökeskuksia. [4, s. 43] Tällaista Suomessa käytössä olevaa kaksiputkijärjestelmää kuvaa alla oleva periaatekuva (Kuva 3).



Kuva 3. Kaksiputkijärjestelmän periaatekuva, perustuu lähteeseen [4, s. 43].

Suomi on Euroopassa yksi eniten kaukolämpöä hyödyntävistä valtioista [13, s. 22] ja kaukolämmön osuus lämmitysenergian kulutuksesta on lähes 50 %. Kaukolämpö on siis selvästi merkittävin yksittäinen lämmitysmuoto Suomessa. Tästä lämpöenergiasta tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa 75–80 % ja loput erillistuotantona esimerkiksi lämpökeskuksissa. Tuotanto perustuu huonetilojen, ilmanvaihdon ja käyttöveden lämmitykseen vaadittavan lämpöenergian tarpeeseen, joka vaihtelee paljon vuorokauden- ja vuodenajan mukaan. [4, s. 5–47]

Asiakkaiden lämmön tarve sekä kaukolämpöverkon toimintalämpötila asettavat rajat lämmön tuotannolle. Yleensä kaukolämpöverkon maksimilämpötila on 120 °C [14, s. 12], mutta erityisesti silloin, kun suuri osa kaukolämpöverkon energiasta tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannossa, pyritään mahdollisimman alhaisiin lämpötiloihin. Alhaisemmat lämpötilat mahdollistavat voimalaitoksessa alhaisemman lauhutumispaineen, joka edelleen vaikuttaa turbiinissa vallitsevaan entalpiaeroon ja siten kasvattaa sähköntuotantoa ja rakennussuhdetta. [4, s. 493–495] Tällä hetkellä Suomen kaukolämpöverkossa menoputkessa veden lämpötila vaihtelee sään mukaan 65:n ja 115 °C:n ja paluuputkessa 40:n ja 60 °C:n välillä [15]. Tavoitteena on kuitenkin siirtyä niin

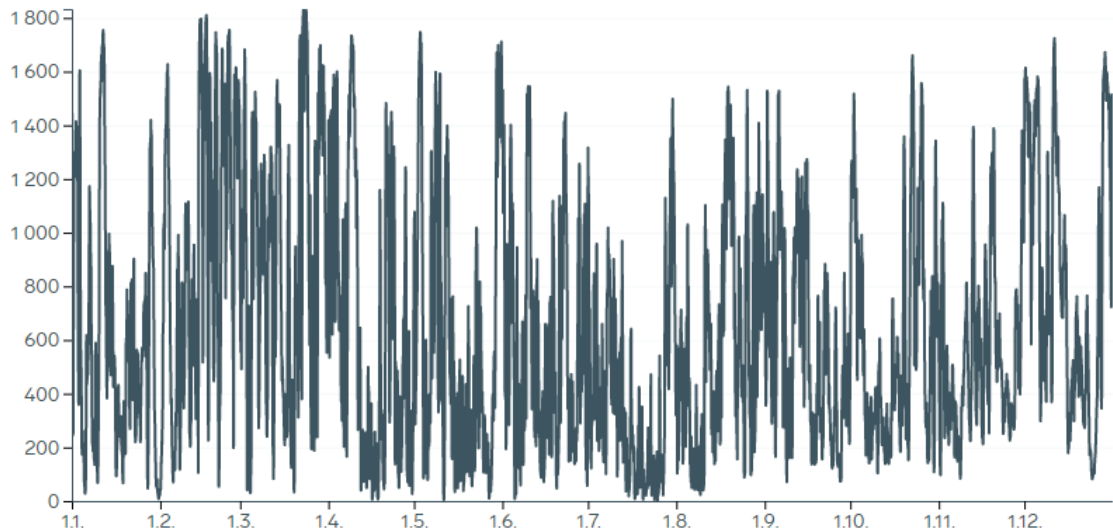
kutsuttuun neljännen sukupolven kaukolämpöverkkoon, mikä edellyttäisi jakelulämpötilojen laskemista alle 70 °C:n lämpötilaan. [16]

2.3 Sähköverkko

Suomen sähköverkko on ollut vuodesta 1959 lähtien osa pohjoismaista yhteiskäyttöverkkoa, jota kutsutaan myös Nordel-verkoksi. Yhteiskäyttöverkko muodostaa oman samalla taajuudella toimivan yhteen kytketyn saarekkeensa, jolloin tuotannonvaihtelut valtioittain tasoittavat toisiaan. Näin esimerkiksi lähinnä vesivoimasta sähkönsä saava Norja voi sateisena vuonna viedä sähköä muualle ja kuivempana vuonna hyödyntää enemmän tuontienergiaa. Suomessa kaikki kuluttajat ja voimalaitokset on kytketty tähän yhteiseen verkkoon. [17, s. 54–65] Kantaverkon käytöstä ja kehittämisestä vastaa Suomen alueella julkinen osakeyhtiö Fingrid Oyj. [18]

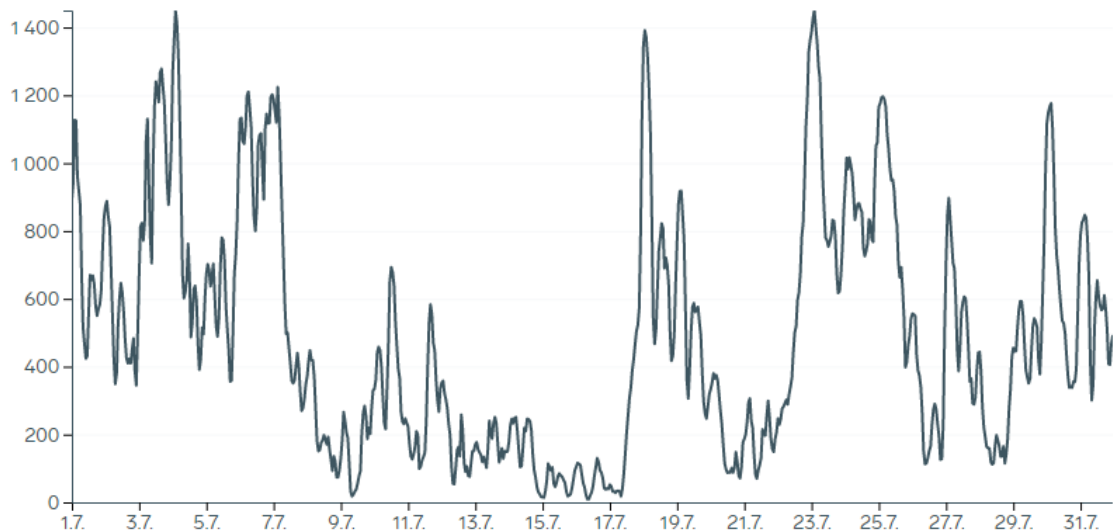
Kuten jo aiemmin luvussa 2.1.1 selitettiin, sähköä tuotetaan voimalaitoksissa generaattoreilla. Voimalaitosten tehtävä on syöttää sähköverkkoon tehoa tietyissä jännitteen, taajuuden ja aaltomuodon rajoissa. Kuten kaukolämpöverkossa, myös sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen tulee olla tasapainossa. Jos tuotettu teho ei vastaa kulutusta, verkon taajuus muuttuu, ja koska osa verkkoon kytkettyjen laitteiden kuluttamasta tehosta muuttuu verkon taajuuden funktiona, tasapainottaa verkko itse itsensä. Jos verkon taajuus laskee liian matalaksi eikä verkko pysty tasapainottamaan itseään, höyryturbiineissa voi syntyä värähtelyä, mikä voi pakottaa kytkemään turbiinin verkosta irti. Tällöin irti kytketystä voimalaitoksesta ei saada enää tehoa verkkoon, jolloin taajuus voi edelleen jatkaa laskuaan. [17, s. 347–365] Tämän takia on erityisen olennaista, että sähköverkossa on mukana voimalaitoksia, jotka pystyvät tasapainottamaan sähköverkkoa tarpeen vaatiessa, eli niin kutsuttuja energiareservejä ja säätötehoa.

Kuten jo johdannossa mainittiin, säätötehon tarve tulee tulevaisuudessa kasvamaan entisestään lisääntyvän aurinko- ja tuulivoiman käyttöönoton myötä. Tuulivoimatuotannon vaihtelevuutta havainnollistaa kuva 4, joka esittää vuoden 2019 tuulivoimatuotantoa.



Kuva 4. Tuulivoimantuotanto Suomessa vuonna 2019 [19].

Tuulivoiman tuotanto ei vaihtele ainoastaan vuodenajan mukaan vaan myös päivittäin. Esimerkiksi kesällä, jolloin CHP-voimalaitosten lämpökuorma ja siten myös sähköntuotantomäärät ovat pieniä, sähköä olisi hyvä tuottaa muilla keinoilla. Kuvassa 5 esitetystä vuoden 2020 heinäkuun tuulivoimatilastosta voidaan kuitenkin huomata, että tuulivoimantuotanto vaihtelee yksittäisen kuukaudenkin sisällä paljon ja voi varsinkin kesäkuukausina olla melko vähäistä useita päiviä peräkkäin.



Kuva 5. Tuulivoimantuotanto Suomessa heinäkuussa vuonna 2019 [19].

Vuonna 2018 tuulivoimaa tuotettiin Suomessa 5,8 TWh [20]. Vuonna 2030 aurinko- ja tuulivoiman tuotannon oletetaan olevan yhteensä ainakin 7 TWh, ehkä jopa 9 TWh [21, s. 117]. IRENA:n (International Renewable Energy Agency) [22, s. 11] toteuttaman

selvityksen mukaan vuonna 2050 tuulivoiman ja aurinkovoiman osuus koko maapallon energiantuotannosta tulisi olla 60 %, jotta saavutettaisiin asetetut ilmastotavoitteet. On siis selvää, että sähkömarkkinoilla tulee tulevaisuudessa olemaan tarvetta entistä joustavammalle yhteistuotannolle niin Suomessa kuin muuallakin maailmassa.

2.4 Energiamarkkinat

Energiamarkkinat koostuvat sekä lämmön että sähkön markkinoista. Kuten jo sähköverkkojen yhteydessä mainittiin, Suomi on osa yhteispohjoismaista sähköverkkoa ja siten käy myös kauppaa pohjoismaisessa sähköpörssissä Nord Poolissa [9, s. 186], jossa ovat mukana myös Saksa, Iso-Britannia ja Baltian maat [23]. Suomessa sähkömarkkinat ovat vapaat. Kantaverkkoyhtiö Fingridin tehtävä on tehdä ennuste seuraavan päivän energiantarpeesta perustuen aiempien vastaavanlaisten päivien tietoihin. Tämän jälkeen Nord Pool Spot julkaisee markkinaratkaisun seuraavalle päivälle, jolloin markkinoilla toimijat tietävät sähkön ostonsa ja myyntinsä, joiden pohjalta alustavat tuotantosuunnitelmat tehdään. Nämä tuotantosuunnitelmat toimitetaan Fingridille, jolla tässä vaiheessa on myös tietoa tuontienergian määrästä ja rajasiirroista. Näin Fingrid voi tarkistaa, että sähkön kulutus ja tuotanto tulevat olemaan seuraavana päivänä tasapainossa ja toimitusvarmuus säilyy. [17, s. 353]

Vaikka tuotanto suunnitellaan siten, että kulutuksen ja tuotannon pitäisi olla tasapainossa, tarvitaan energiareservejä käyttötunnin aikaisten poikkeamien tasapainottamiseen sekä odottamattomiin tilanteisiin esimerkiksi, jos jokin tuotantoyksikkö irtoaa verkosta. Reservit ovat siis voimalaitoksia ja kulutuskohteita, jotka voivat tarpeen vaatiessa laskea tai nostaa tehoaan, ja ne lajitellaan erilaisiin reservilajeihin perustuen niiden käyttötarkoitukseen, reagointinopeuteen sekä tehontuotantoon. Fingrid hankkii säätökapasiteettia energiamarkkinoiden toimijoilta, jotka haluavat tarjota sitä. [24] Osallistuminen reservimarkkinoille edellyttää, että voimalaitos, jonka tarkoitus on toimia säätökapasiteettina, täyttää jollekin reservilajille määritellyt ehdot.

Reservimarkkinoille osallistuminen on houkuttelevaa, koska se tarjoaa mahdollisuuden lisätuottoihin. Yhteistuotantovoimalaitosten kannalta mahdollisuudet osallistua reservimarkkinoille ovat kuitenkin rajatut. Koska yhteistuotantovoimalaitosten primäärituote on lämpö, sähköntuotantotehoa ei voida vaihdella ottamatta huomioon sen vaikutuksia voimalaitoksen tuottamaan lämpötehoon. Yhteistuotantovoimalaitokset, joihin on liitetty joustavuutta lisääviä rakenteita, voivat vapaammin muuttaa hetkellisesti tuotettua sähkötehoa, mutta pitkällä aikavälillä sähkön ja lämmön tuotanto ovat silti riippuvaisia toisistaan. Tämän sekä vuodenajan mukaan vaihtelevan käyttöasteen takia

yhteistuotantovoimalaitokset eivät sovellu hyvin vuosimarkkinoille. Tehonmuutosnopeus on yleensä höyryvoimalaitoksilla pienempi kuin muilla energiantuotantomuodoilla, ja siksi perinteiset yhteistuotantovoimalaitokset eivät sovellu hyvin myöskään taajuusohjatuiksi häiriöreserveiksi, joilta vaaditaan 1 MW tehomuutosta 30 sekunnin aikana. Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille osallistuminen sen sijaan voisi olla mahdollista myös yhteistuotantovoimalaitoksille. Ehtona osallistumiselle on voimalaitoksen kyky toteuttaa 10 MW tehonmuutos 15 minuutin kuluessa, mikä olisi mahdollista erityisesti yhteistuotantovoimalaitoksille, joiden tuotantokapasiteetti on melko suuri. Säätösähkö- ja säätökapasiteettitarjoukset tehdään tuntikohtaisina alassäättö- ja ylössäättötarjouksina. Yhteistuotantovoimalaitos voisi täyttää myös automaattisen taajuudenhallintareservin vaatimuksen, joka on 5 MW tehonmuutos 5 minuutin aikana. Automaattista taajuudenhallintareserviä hankitaan vain tietyille aamu- ja iltatunneille, jotka ilmoitetaan etukäteen. [24] Yhteistuotantovoimalaitosten mahdollisuudet osallistua reservimarkkinoille riippuvat siis voimalaitoksen joustavuudesta sekä tuotantokapasiteetista. Yhteistuotantovoimalaitosten osallistuminen reservimarkkinoille ilman joustavuutta lisääviä ratkaisuja on hyvin hankalaa, koska tuotantotehon muuttaminen sähkötehon mukaan vaikuttaa voimalaitoksen kykyyn tuottaa kauko- tai prosessilämpöä. Koska joustavuuden lisääminen vaatii investointeja, yhteistuotantovoimalaitoksen kannattavuus osallistua reservimarkkinoille tulisi arvioida tapauskohtaisesti ottaen huomioon vaadittavat investoinnit ja reservimarkkinoille osallistumisen hyödyt.

Toisin kuin sähkömarkkinat, kaukolämpömarkkinat eivät Suomessa perinteisesti ole olleet avoimet. Vaikka asiakkailta on mahdollisuus valita eri lämmitysmuotojen väliltä, kaukolämpöä on tuottanut tyypillisesti ainoastaan paikallinen energiayhtiö. [25] Vasta vuoden 2018 alussa Fortum uutisoi avaavansa ensimmäisenä Suomessa kaukolämpöverkkonsa kaikille puhtaan energian tuottajille [26], minkä jälkeen myös muun muassa Tampereen sähkölaitos, Helen Oy ja Vantaan Energia ovat avanneet kaukolämpöverkkonsa [27][28][29]. Energiayhtiöt siis ostavat ylijäämälämpöä sitä tarjoavilta eivätkä tuota kaikkea lämpöä itse. Markkinat eivät silti ole täysin avoimet, koska energiayhtiöt omistavat kaukolämpöverkot. Täysin avoimessa network access -mallissa kaukolämpöverkko toimisi samalla tavalla kuin sähköverkko eli lämmön tuottajista ja kuluttajista riippumattomana jakelutienä. [30]

Kuten jo johdannossa mainittiin, energiatehokkuutta tutkitaan ja siitä puhutaan paljon. Suomi EU:n jäsenmaana on sitoutunut unionin päästötavoitteisiin, ja siksi energiatilannetta käsitellessä on olennaista tutustua myös Euroopan Unionin

energiapolitiikkaan. Suomi on mukana myös kansainvälisissä ilmastopimeuksissa, jotka velvoittavat mm. päästövähennyksiin, joilla pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta.

EU julkaisi vuonna 2012 energiatehokkuusdirektiivin, joka velvoittaa jäsenmaita entistä tehokkaampaan energiantuotantoon ja -käyttöön. Vuonna 2012 aloitettiin myös tutkimussarja Heat Roadmap Europe, jossa esiteltiin keinoja, joilla jäsenmaat voivat parantaa energiatehokkuuttaan. [31] Tutkimuksessa korostettiin sähkön ja lämmön yhteistuotantoa sen paremman hyötysuhteen ansiosta ja painotettiin kaukolämpöverkon tärkeyttä osana kestävästä energiankulutuksesta. Energiantuotannossa tulisi hyödyntää uusiutuvia energialähteitä, teollisuuden hukkalämpöä ja suuria lämpöpumppuja. Joustava CHP tuotanto täydentäisi tuotantoa olosuhteista riippuvaisten tuotantomuotojen vaihdellessa. [1, s. 45]

Vaikka EU:n tavoitteena on lisätä kaukolämmön kulutusta, sitä hyödynnetään Heat Roadmap Europe -tutkimussarjaan kuuluvan raportin mukaan Suomessa jo lähes suurin tavoiteltava määrä [13, s. 22]. Se, mihin Suomen tulisi tutkimussarjaan kuuluvien raporttien mukaan pyrkiä, on siirtyminen älykkäämpiin energiankuljetusverkkoihin ja neljännen sukupolven kaukolämpöjärjestelmään, jossa kaukolämmön lämpötilat olisivat matalampia ja myös esimerkiksi hukka- ja maalämpöä hyödynnettäisiin lämmöntuotannossa [1][13].

3. JOUSTAVUUS JA TUOTANNON OHJAUS

Tämän luvun alussa perehdytään siihen, mitä joustavuudella tarkoitetaan, kun puhutaan yhteistuotannosta. Tämän jälkeen esitellään yhteistuotantolaitoksen tuotannon ohjauksen perusteet.

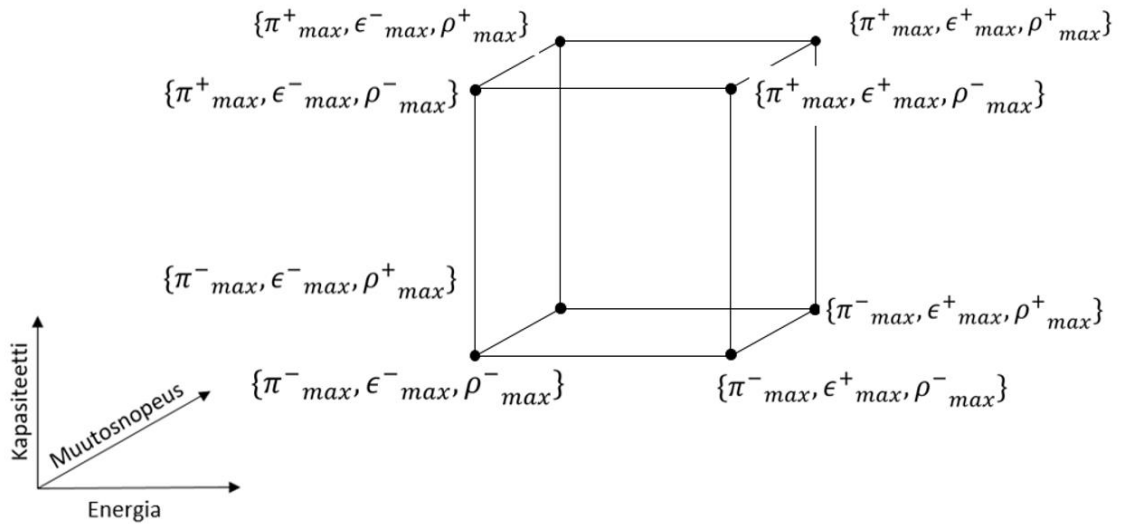
3.1 Joustavuuden määrittely

Työni aihe on joustavuus sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Joustavuutta voidaan kuitenkin käsitellä monesta näkökulmasta. Esimerkiksi Papaefthymiou ja Dragoon [32] määrittelivät artikkelissaan joustavuuden tarkoittavan järjestelmän ohjattavien komponenttien kykyä tuottaa tai absorboida tehoa eri nopeuksilla, eri aikataulussa ja erilaisissa olosuhteissa. Kondziellan ja Brucknerin [33] artikkelissa, jonka aihe oli joustavuusvaatimukset uusiutuviin energialähteisiin perustuvissa sähköjärjestelmissä, käsiteltiin vaihtelevien uusiutuvien energialähteiden aiheuttamia lyhytaikaisia joustavuusvaatimuksia. Lund et al. [34] mukaan joustavuus liittyy sähköjärjestelmän näkökulmasta vahvasti sähköverkon taajuuden ja jännitteen ohjaukseen, sähkön toimitusvarmuuteen ja tehon vaihteluun. Tuotannon joustavuus viittaa Zhaon et al. [35] mukaan mahdollisuuteen muuttaa ulostulotehoa nopeasti ja Wang et al. [36] mukaan kykyyn käynnistää ja ajaa tehdas alas säännöllisesti.

IRENA:n [22, s. 23] energiamurrosta ja energijärjestelmän joustavuutta käsittelevässä julkaisussa määriteltiin lämpövoimalaitoksen joustavuudeksi kyky selviytyä aurinko- ja tuulivoimatuotannon aiheuttamasta vaihtelusta ja epävarmuudesta siten, että energian kysyntä ja tarjonta kohtaavat ilman, että uusiutuvien energialähteiden tuotantoa joudutaan supistamaan. Tällaiseen joustavuuteen voidaan IRENA:n [37, s. 6] perinteisten lämpövoimalaitosten joustavuutta käsittelevän julkaisun mukaan pyrkiä keskittymällä voimalaitosten lyhyempiin käynnistysaikoihin, matalampiin käynnistyskustannuksiin, parempaan hyötysuhteeseen huippukuormaa pienemmällä kuormalla, pienempään minimikuormaan, tuotetun tehon nopeampaan laskuun tai nousuun tarvittaessa ja lyhyempiin aikoihin, jotka voimalaitosten tulisi olla käynnissä käynnistämisen jälkeen tai poissa käytöstä alasajon jälkeen.

Huolimatta joustavuuden tarkan määrittelyn puutteesta Ulbig ja Andersson [38] kehittivät artikkelissaan kehiksen, jonka avulla voidaan numeerisesti ja visuaalisesti arvioida yksittäisen voimajärjestelmäyksikön joustavuutta. Kehys perustui Makarov et al. [39] artikkelissaan käyttämiin mittareihin, joita olivat tehon muutosnopeus ρ , tehokapasiteetti

π , energian kapasiteetti ϵ ja muutoksen kesto δ . Koska muutoksen kesto riippuu tehokapasiteetista ja muutosnopeudesta kaavan $\delta = \pi/\rho$ mukaan, riittävät π , ρ ja ϵ kuvaamaan voimajärjestelmäyksikön joustavuutta. Visuaalisesti joustavuutta voidaan kuvailla määriteltyjen suureiden avulla alla olevan kuvan mukaisesti.

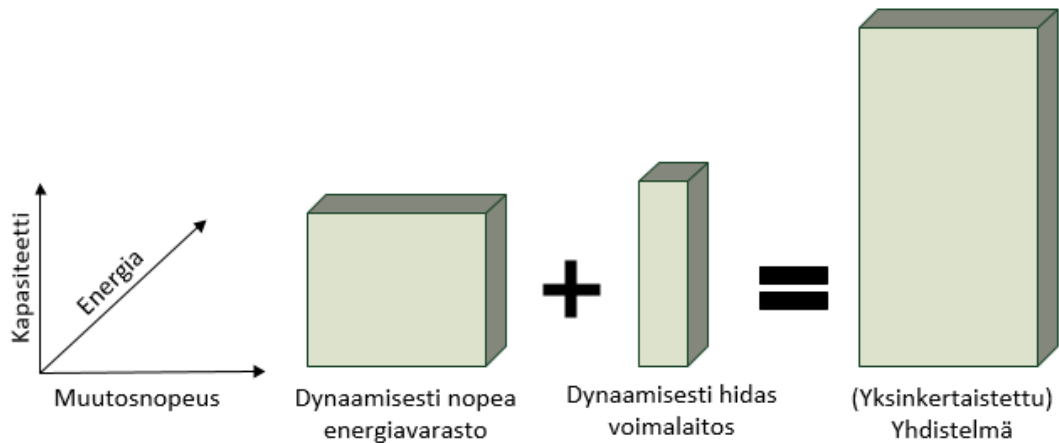


Kuva 6. Visuaalinen kuvaus voimajärjestelmäyksikön joustavuudesta, perustuu lähteeseen [38].

Tällaista visuaalista kuvaustapaa on helppo käyttää kuvaamaan myös kahden tai useamman voimajärjestelmäyksikön yhdistettyä joustavuutta. Tällöin yhdistetyn järjestelmän mitat ρ_{yhd}^+ , ρ_{yhd}^- , π_{yhd}^+ , π_{yhd}^- , ϵ_{yhd}^+ ja ϵ_{yhd}^- määrittyvät seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 \rho_{yhd}^+ &= \sum_i \rho_i^+ \\
 \rho_{yhd}^- &= \sum_i \rho_i^- \\
 \pi_{yhd}^+ &= \sum_i \pi_i^+ \\
 \pi_{yhd}^- &= \sum_i \pi_i^- \\
 \epsilon_{yhd}^+ &= \sum_i \epsilon_i^+ \\
 \epsilon_{yhd}^- &= \sum_i \epsilon_i^-
 \end{aligned} \tag{4}$$

Esimerkiksi yhdistettäessä dynaamisesti hidasta voimalaitosta, jolla on kuitenkin paljon tehoa ja energiakapasiteettia, dynaamisesti nopeaan mutta kapasiteetiltaan pieneen energiavarastoon muodostuu järjestelmän visuaalinen kuvaus kuvan 7 mukaisella tavalla. [38]



Kuva 7. Visuaalinen kuvaus kahden yhdistetyn voimajärjestelmäyksikön joustavuudesta, perustuu lähteeseen [38].

Kuten kuvasta voidaan huomata, yksittäisten voimajärjestelmien yhdistelmässä on summattu erillisten voimalaitosten mitat. Tämä havainnollistaakin hyvin, kuinka suuri merkitys erilaisilla joustavuutta lisäävillä komponenteilla on järjestelmän joustavuuteen kokonaisuutena.

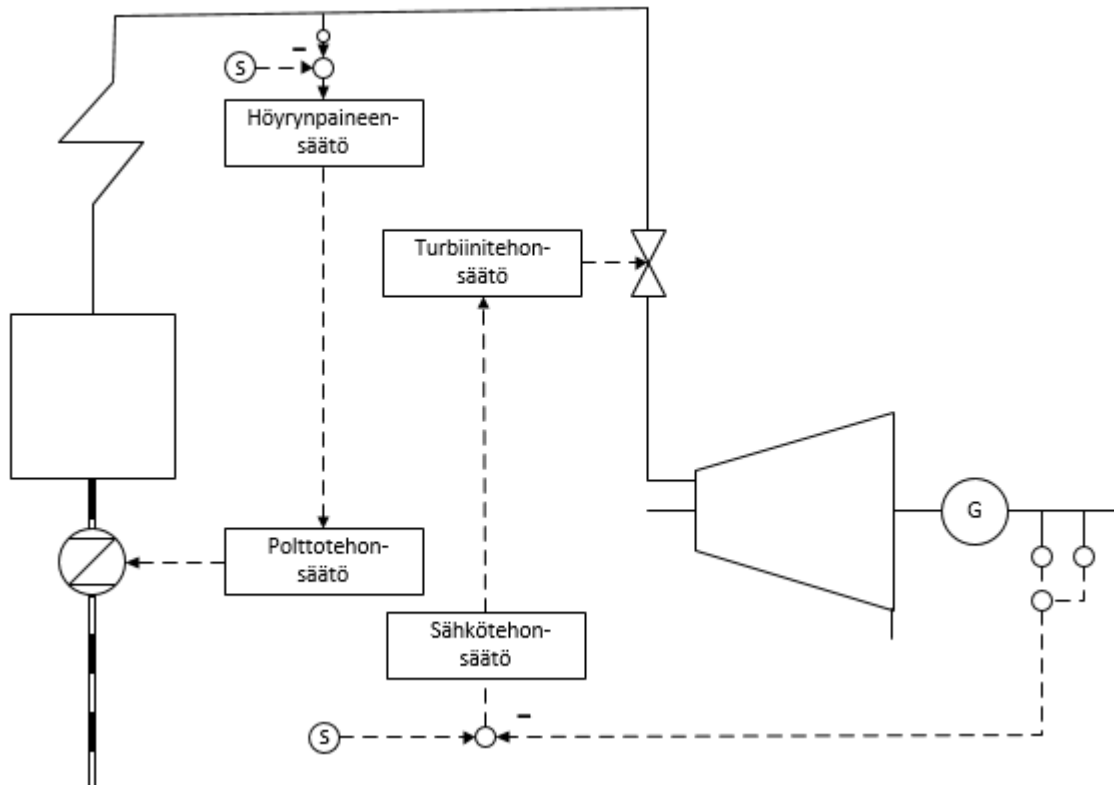
3.2 CHP-voimalaitosten tuotannon ohjaaminen

Tuotannon ohjaamisen tavoite on saada kattila ja turbiini toimimaan siten, että laitos tuottaa tarvittavan tehon ilman laitoksen eri komponenttien ylikuormittumista. Lisäksi tuotetun sähkön täytyy olla jännitteeltään ja taajuudeltaan oikeanlaista sekä tuotetun höyryn oikeassa paineessa ja lämpötilassa. Yksittäisen kattilalaitoksen ohjausta kutsutaan blokkisäädöksi. Yleensä blokkisäädöstä voidaan erottaa kaksi säätöpiiriä: polttotehon säätö ja turbiinitehon säätö. Säätöpiirien välisen hierarkian perusteella voidaan määrittellä, noudattaako voimalaitoksen ohjaus turbiini seuraa -rakennetta vai kattila seuraa -rakennetta. [6, s. 149]

Turbiini seuraa -rakenteessa säädetään sähkötehoa kattilan polttotehoa ohjaamalla. Ajettaessa kattilaa vakiohöyrynpaineella polttotehon muutokset vaikuttavat höyrynpaineeseen. Säätö pyrkii pitämään höyrynpaineen vakiona säätämällä turbiinille menevän höyryn määrää, joka vaikuttaa tuotettuun sähkötehoon. Liukuvalla paineella ajettaessa polttotehon muutos vaikuttaa suoraan höyrymäärään ja sitä kautta turbiinin tehoon. Tällä tavoin turbiini seuraa kattilassa tapahtuvia muutoksia. [6, s. 150]

Kattila seuraa -säätörakenteessa ohjataan turbiinin säätöventtiileitä. Tehon tarpeen kasvaessa säätöventtiileitä avataan, ja kattilaan varastoitunutta energiaa hyödynnetään

hetkellisesti purkamalla kattilasta polttotehoa vastaavaa tuotantoa suurempi määrä höyryä, jolloin höyrynpaine kattilassa laskee. Paineen säätö lisää polttotehoa, jolloin paine nousee takaisin asetusarvoonsa. Tehovaateen laskiessa säätöventtiilit sulkeutuvat, mikä johtaa paineen kasvuun kattilassa ja sen myötä polttotehon laskemiseen. Alla oleva kuva esittää tätä säätörakennetta. [6, s. 150–151]



Kuva 8. Kattila seuraa -säätörakenne, perustuu lähteeseen [6, s. 151].

Sähkötehon sijasta säätörakenteet voivat perustua myös vastapainekuorman, kuten kaukolämpötehon säätämiseen [40]. Molemmissa edellä esitellyissä säätörakenteissa turbiinin ja kattilan säädöt ovat erillisiä. Koordinoidusta säädöstä puhutaan, kun voimalaitoksen toimintaa parannetaan sovittamalla yhteen eri osaprosessien toimintaa [6, s. 151], ja sitä käytetään usein järjestelmissä, joissa on voimalaitoksen lisäksi energiavarasto [41]. Kuten jo johdannossa mainittiin, tarve ohjata yhä enemmän sähkön tuotantoa kuitenkin kasvaa uusiutuvien energialähteiden lisääntyvän käytön myötä. Jotta voimalaitos pystyisi toimimaan esimerkiksi automaattisena taajuudenhallintareservinä, täytyy esimerkiksi tehon nousu- ja laskunopeuksien olla melko hyviä [39], minkä takia koordinoituakin säätöä pyritään parantamaan kehittyneemmällä säätöalgoritmeilla [41].

4. RATKAISUJA JOUSTAVAMPAAN YHTEISTUOTANTOON

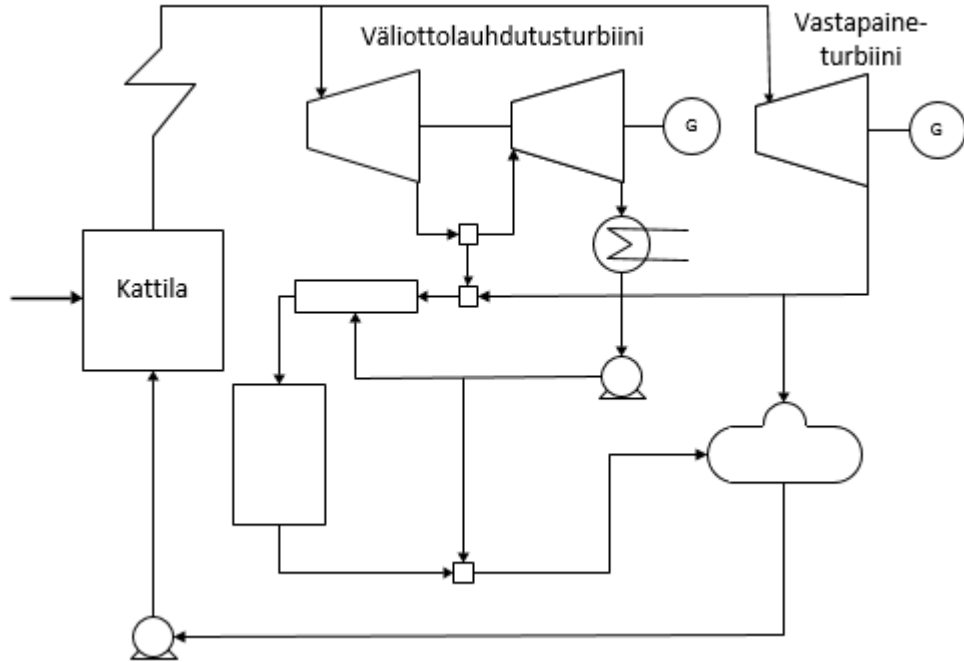
Tämän luvun tarkoitus on vastata tutkimuskysymykseen eli esitellä eri vaihtoehtoja ja antaa esimerkkejä niistä keinoista, joilla voidaan lisätä joustavuutta sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Luvussa keskitytään olemassa olevien järjestelmien ja niiden toimintaperiaatteiden esittelyyn.

4.1 Lauhdutusturbiinit

Lauhdutus- ja väliottolauhdutusturbiinit ovat yksi keino vähentää sähkön ja lämmön tuotannon riippuvuutta toisistaan. Niiden ongelmana on kuitenkin voimalaitoksen kokonaishyötysuhteen heikkeneminen.

Luvussa kaksi selostettiin jo vastapaine- ja väliottolauhdutusvoimalaitosten toimintaa. Kuten johdannossa mainittiin, näiden lisäksi on olemassa myös lauhdutusvoimalaitoksia, joissa tuotetaan ainoastaan sähköä. Lauhdutusturbiinissa höyryn paine ja lämpötila laskevat huomattavasti matalammiksi kuin vastapainevoimalaitoksella, jolloin turbiinista ulostulevaa höyryä ei voida enää käyttää kaukolämmön tai prosessilämmön tuotantoon. Yhdistämällä erilaisia turbiineita samaan voimalaitokseen voidaan yhdistää eri höyryvoimalaitostyyppien hyvät puolet: vastapainevoimalaitoksen parempi hyötysuhde ja lauhdutusvoimalaitosten lämpökuormasta riippumaton sähköntuotanto. Riippuen siis lämmön ja sähkön tarpeesta höyryä voidaan ohjata turbiineihin vaihtelevia määriä.

Esimerkkinä voimalaitoksesta, jossa vastapaineturbiinin lisäksi on myös muunlaisia turbiineita, on Sao Paulossa Brasiliassa sijaitseva sokeriteollisuuden voimalaitos. Llerena [42] käsitteli artikkelissaan kyseisen voimalaitoksen toimintaa energiatehokkuuden ja taloudellisen näkökulman kannalta. Kuva 9 esittää voimalaitoksen toimintaa. Kuten kuvasta voidaan nähdä, vastapaineturbiinin lisäksi voimalaitoksessa on väliottolauhdutusturbiini, jota voidaan käyttää silloin, kun sähköä halutaan tuottaa enemmän kuin vastapaineturbiinilla olisi mahdollista. Artikkelin mukaan tällaiset voimalaitokset ovat sokeriteollisuudessa yleisiä.



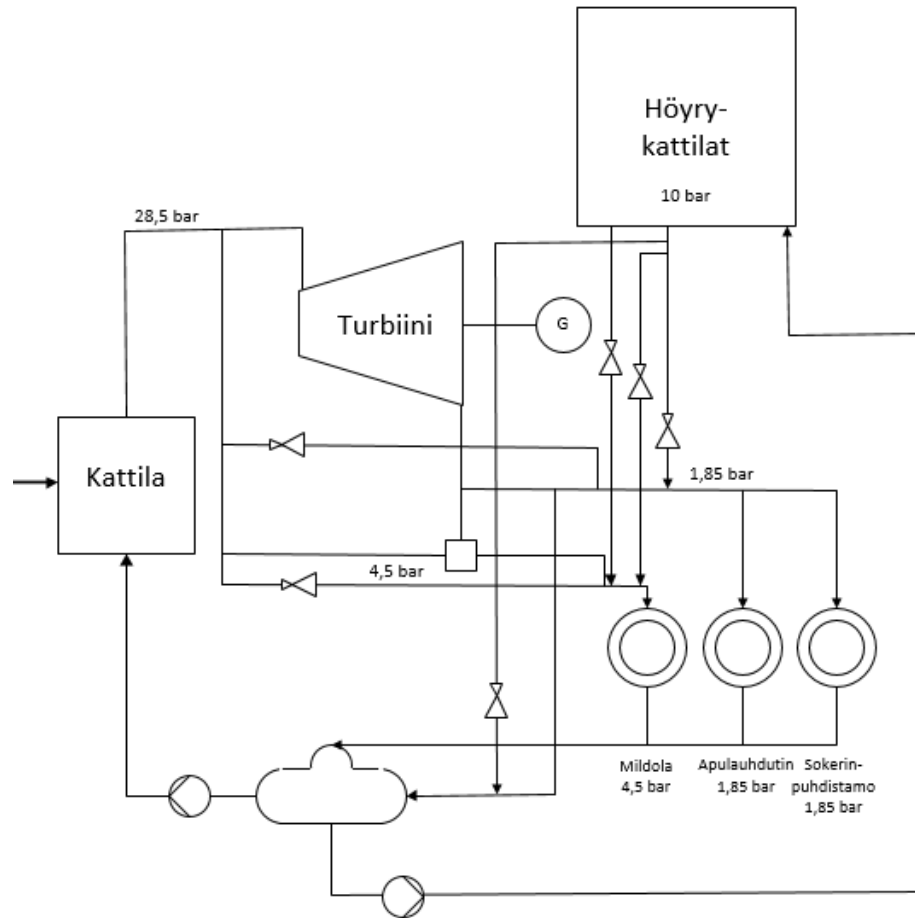
Kuva 9. Sao Paulossa sijaitsevan sokeriteollisuuden voimalaitoksen periaatekaavio, perustuu lähteeseen [42].

Tällaisissa menetelmissä hyötysuhde on kuitenkin aina matalampi silloin, kun lämpökuorma ei ole korkeimmillaan, koska silloin turbiineissa ei voida hyödyntää täysin lämpöenergiaa, vaan se joudutaan lauhduttamaan. Lisäksi vastaavanlaiset useita turbiineja ja generaattoreita sisältävät ratkaisut ovat kalliita toteuttaa. Tämän takia artikkelissa tutkittiinkin mahdollisuuksia hyödyntää tehtaalla kombivoimatekniikkaa, jotta voimalaitoksen sähköntuotantoa voitaisiin lisätä tuotetun höyrymäärän pienentymättä, eli toisin sanoen parantaa voimalaitoksen rakennussuhdetta. [42]

4.2 Reduktioventtiilit

Reduktioventtiilit ovat venttiileitä, joita käytetään höyryn paineen alentamiseen, joka tapahtuu yleensä jäähdyttämällä höyryä vesiruiskutuksella. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi höyryn johtamiseen turbiinin ohi silloin, kun lämpökuorma on suuri mutta sähköntuotantoa ei tarvita. [6, s. 42] Esimerkiksi tilanteissa, joissa sähkön hinta on matala, voidaan tarvittava lämpöenergia tuottaa kustannustehokkaammin ohjaamalla höyry reductioventtiilin avulla turbiinin ohi. Suomessa esimerkiksi Kantvikin sokerinpuhdistamon yhteydessä olevalla vastapainevoimalaitoksella käytetään reductioventtiileitä prosessihöyryn tuottamiseen silloin, kun turbiini ei ole käytössä. Sokerinpuhdistamon lisäksi vastapainevoimalaitoksella tuotetaan prosessihöyryä

Mildola Oy:lle. Alla oleva kuva, joka esittää tehtaan höyryjärjestelmän periaatekaaviota, perustuu P. Harjun [43] insinöörityöhön.



Kuva 10. Kantvikin sokerinpuhdistamon höyryntuotannon ja jakelun periaatekaavio, perustuu lähteeseen [43, s. 3].

Kattilan ja tulistuksen jälkeen höyry on 28,5 baarin paineessa. Normaalitilassa prosessihöyry johdettaisiin Mildola Oy:lle ja sokerinpuhdistamolle vastapaineturbiinilta, mutta tarvittaessa prosessihöyry voidaan johtaa turbiinin ohi, ja reduktioventtiileiden avulla höyryn paine voidaan laskea prosesseille sopivaksi. Toinen reduktioventtiili laskee prosessihöyryn paineen 1,85 baariin sokerinpuhdistamoa varten ja toinen 4,5 baariin Mildola Oy:tä varten. [43, s. 3] Mitä korkeampi paine ja lämpötila tuotetulla höyryllä on, sitä enemmän energiaa sen tuottaminen on vaatinut. Reduktioventtiileitä käytettäessä höyryn ajamiseen turbiinin ohi ei siis hyödynnetä energiaa parhaalla mahdollisella tavalla, sillä höyryn paine on nostettu prosessien kannalta tarpeettoman korkealle, ja sitä joudutaan laskemaan. Tilanteessa, jossa höyry ohjataan prosesseille vasta turbiinin jälkeen, korkeapaineista höyryä olisi hyödynnetty sähköntuotantoon. Voimalaitoksen

kokonaishyötysuhde siis huononee reductioventtiileitä käytettäessä. Voimalaitoksella on myös kolme höyrykattilaa, jotka voivat tuottaa 10 baarin paineessa olevaa höyryä. Myös höyrykattiloilta tuleva höyry joudutaan ohjaamaan reductioventtiileiden läpi ennen kuin höyryä voidaan hyödyntää prosessihöyryinä.

4.3 Lämmön varastointi

Yksi ratkaisu, jolla sähkön ja lämmön yhteistuotannon joustavuutta voidaan lisätä, on energian varastointi. Vaikka lämmöntarve olisi pienempi kuin tehdas pystyisi tuottamaan, voidaan sähkön tarpeen ollessa suuri tuottaa sähköntuotannon edellyttämä määrä lämpöä, joka voidaan säilöä lämpövarastoon. Varastoihin säilötyä lämpöenergiaa voidaan hyödyntää huippukulutuksen aikana korvaamaan esimerkiksi lämpökattiloilla tuotettua energiaa. [4, s. 383]

Lämpövarastot voidaan jakaa tuntuvan lämmön ja latenttilämmön varastoihin. Tuntuvan lämmön varastoissa ainoastaan varastoidun aineen lämpötila nousee tai laskee ilman olomuodon muutoksia. Latenttilämmön varastoissa suurin osa varastointikapasiteetista perustuu olomuodon muutoksiin. [44, s. 184–185]

Lämpövarastoa voidaan ladata silloin, kun lämpöä Q_t tuotetaan tarvetta ATD (aggregated thermal demand) enemmän ja lämpövaraston lämpötila T_{TES} on pienempi kuin lämpövaraston suurin sallittu lämpötila T_{max} , eli kun

$$Q_t > ATD \text{ ja } T_{TES} < T_{max}. \quad (5)$$

Lämpövarastoon ladattu lämpö Q_l voidaan laskea seuraavasti:

$$Q_l = \begin{cases} \varepsilon_{TES}(Q_t - ATD), & \text{jos } (T_{TES} < T_{max} \wedge ATD < Q_t) \\ Q_{TES}, & \text{jos } (T_{TES} = T_{max} \wedge ATD < Q_t) \end{cases}, \quad (6)$$

missä ε_{TES} on hyötysuhde, jolla varasto vastaanottaa lämpöä, ja Q_{TES} on lämpövaraston kapasiteetti. Lämpövarastoa vastaanavasti puretaan, kun lämpöä tuotetaan tarvetta vähemmän ja lämpövaraston lämpötila on varaston minimilämpötilaa T_{min} suurempi, eli kun

$$Q_t < ATD \text{ ja } T_{TES} > T_{min}. \quad (7)$$

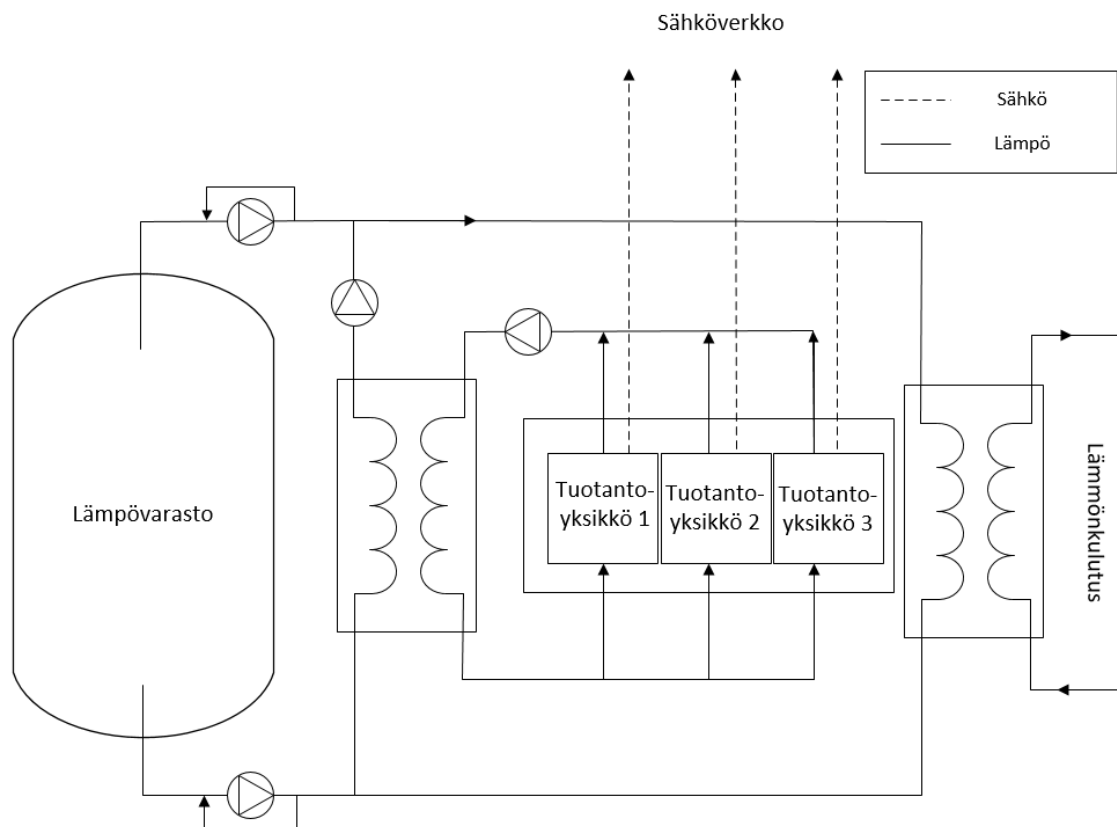
Varastosta otetun lämmön määrä Q_o voidaan laskea seuraavasti:

$$Q_o = \begin{cases} \varepsilon_{TES}Q_{TES} \Big|_{T_{min}}^{T_{TES}}, & \text{jos } (T_{TES} > T_{min} \wedge ATD > Q_t) \\ 0, & \text{jos } (T_{TES} = T_{min} \vee ATD < Q_t) \end{cases}, \quad (8)$$

Veteen perustuvan lämpövaraston toiminta perustuu veden tiheyteen eri lämpötiloissa. Mitä kuumempaa vesi on, sitä pienempi on sen tiheys, joten kuuma vesi pysyy säiliön

yläosassa ja kylmä vesi säiliön alaosassa. Kylmän ja kuumen veden välillä on alue, jossa on suuri lämpötilagradientti. Ladattaessa lämpövarastoa syötetään kuumaa vettä varaston yläosaan samalla poistaen tankin alaosasta sama määrä kylmää vettä. Vastaavasti lämpövarastoa purettaessa vettä otetaan säiliön yläosasta ja syötetään sama määrä kylmää vettä säiliön alaosaan. Näin voidaan säädellä lämpövarastoon varastoidun energian määrää veden määrän pysyessä vakiona. [45]

Esimerkiksi Kroatiaassa Zagrebin yhteistuotantolaitoksella on lämpövarasto voimalaitoksen yhteydessä. Yhteistuotantolaitoksella on kolme tuotantoyksikköä, jotka tuottavat sekä sähköä että lämpöä. Alla oleva kuva esittää voimalaitoksen toimintaa.



Kuva 11. Zagrebissa sijaitsevan yhteistuotantolaitoksen periaatekaavio, perustuu lähteeseen [46].

Kyseisen lämpövaraston toiminta perustuu veden lämmittämiseen eli kyseessä on tunnetun lämmön varastointimenetelmä. Lämpövarasto on suunniteltu siten, että sisällä oleva vesi ei saa kiehua, koska tämä kasvattaisi säiliössä olevaa painetta ja voisi siten vahingoittaa lämpövarastoa. Maksimilämpötilaksi on tästä syystä määritetty 98 °C. Koska kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötila tulisi kulutushuippujen aikana olla 130 °C, lämpövarasto ei sellaisenaan riitä tarjoamaan tarvittavaa lämpöä kulutushuippujen aikana vaan vaatii lisäksi tuotantoyksikköjen tuottamaa höyryä.

Vastaavanlaisia lämpövarastoja on myös paineistettuja, jolloin veden lämpötila voi ylittää 100 °C kiehumatta. [4, s. 386]

Lämpövaraston kokoon vaikuttavat kuluttajien tarpeet sekä lämpökuorma. Liian pieni lämpövarasto ei tarjoa tarpeeksi joustoa järjestelmään eikä se pysty kattamaan lämmön tarvetta kulutuksen ylittäessä voimalaitoksen tuotantokapasiteetin. Liian suureksi mitoitettu lämpövarasto ei ole taloudellisesti järkevä. Lämpövaraston rakentamista suunniteltaessa tulee ottaa huomioon oikeanlainen mitoitus. [44, s. 187]

Lämpöä voidaan varastoida tietyssä määrin myös kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkkoa voidaan käyttää energiavarastona siten, että jakelulämpötilaa hetkellisesti nostetaan, jolloin verkkoon voidaan siirtää tavallista suurempi määrä lämpöenergiaa. Lämpötilan muutoksen suuruutta kaukolämpöverkossa täytyy kuitenkin rajoittaa, sillä liian suuret muutokset voivat aiheuttaa lämpörasituksia kaukolämpöverkossa ja siten haitata sen toimintaa. [23]

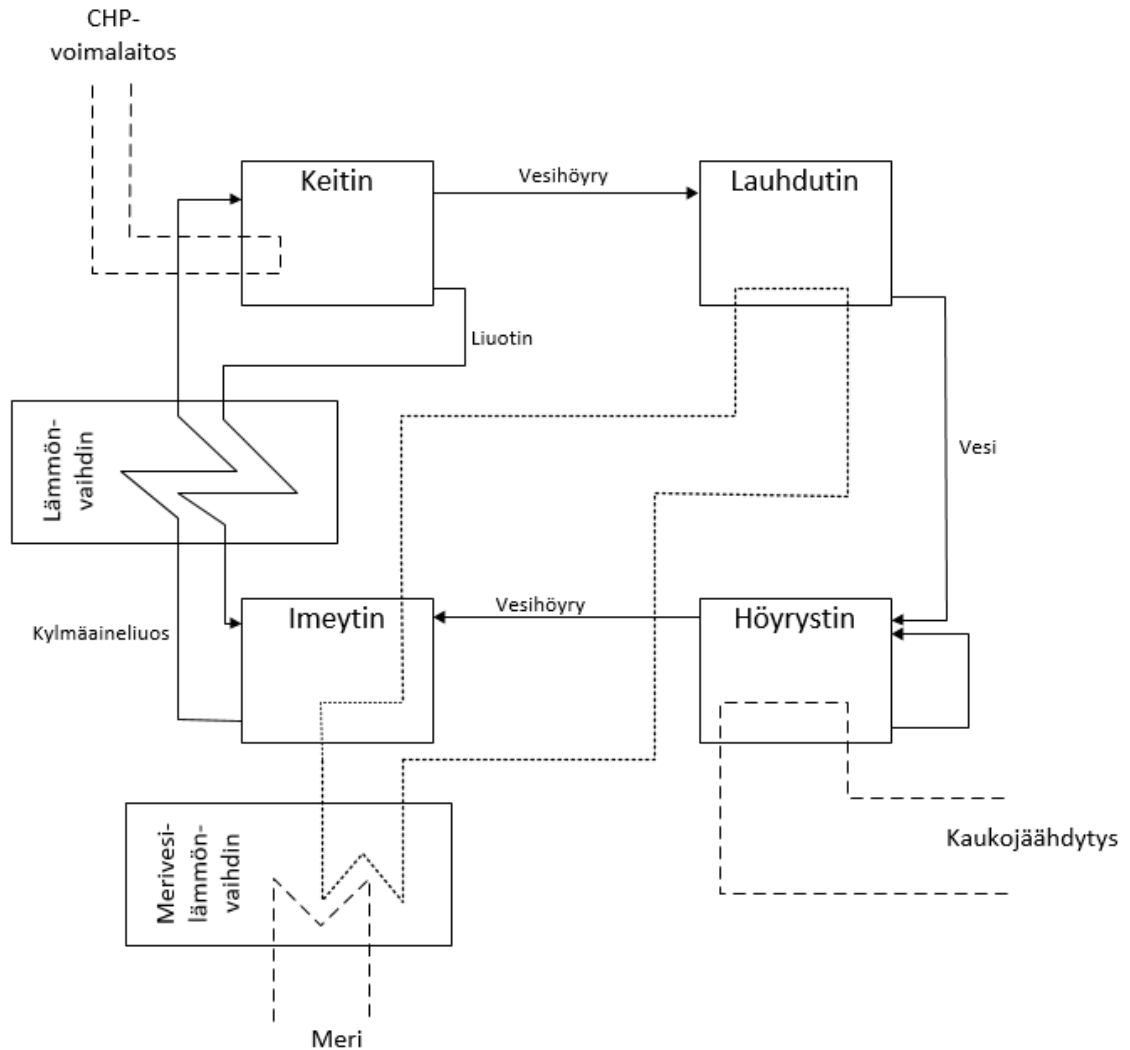
4.4 Apujäähdyttimet ja absorptiojäähdytys

Sähkön ja lämmön kysynnän hallinnalla tarkoitetaan keinoja, joilla pyritään tasapainottamaan energiankulutusta kysyntäjouston avulla. CHP-voimalaitosten kannalta tämä tarkoittaa esimerkiksi lämpökuorman kasvattamista silloin, kun sähköntuotantoa tulisi lisätä, tai sähkön kulutuksen lisäämistä silloin, kun laitoksen tulisi tuottaa paljon lämpöenergiaa. Apujäähdyttimien ja absorptiojäähdytyksen avulla voidaan lisätä lämpökuormaa silloin, kun sitä ei muuten olisi.

Kesäisin CHP-voimalaitosten sähkön tuotantoa rajoittaa pieni lämpökuorma. Yksi vaihtoehto lisätä joustavuutta tuotantoon onkin lisätä lämpökuormaa esimerkiksi apujäähdyttimien tai absorptiojäähdytyksen avulla. Apujäähdyttimen ainoa tehtävä on viilentää kaukolämpöverkkoon tuotettua lämpöä eli sitä käytettäessä lämpö menee hukkaan. Käyttö voi kuitenkin olla järkevää sähkön hinnan ollessa korkealla tai sellaisissa tilanteissa, joissa ilman apujäähdytintä lämpökuorma olisi niin pieni, että voimalaitoksen kattilan teho putoaisi alle mitoituksen ja se jouduttaisiin tästä syystä pysäyttämään. [10]

Myös absorptiojäähdyttimillä voidaan saada lisäkulutusta kaukolämpöverkkoon kesäaikana. CHP-voimalaitokseen yhdistetty absorptiojäähdytin käyttää voimalaitoksen tuottamaa lämpöä ja sähköä tuottaakseen jäähdytystä. Tällaisista voimalaitoksista, jotka tuottavat sekä lämpöä, sähköä että jäähdytystä, käytetään nimitystä kolmoistuotanto tai CCHP (Combined Cool, Heat and Power). Tällaisten jäähdyttimien toiminta perustuu tietyn liuenneen aineen eli absorbentin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen liuksena.

Olosuhteita eli painetta tai lämpötilaa muuttamalla voidaan saada kaasua höyrystymään liuoksesta tai lauhtumaan liuokseen. [4, s. 534] Esimerkiksi Helsingissä Salmisaaren voimalaitoksella tuotetaan sähkön ja lämmön lisäksi jäähdytystä. Kuva 12, joka esittää Salmisaaren absorptiojäähdytyksen toimintaperiaatetta, perustuu V. Itkosen insinööriyöhön.



Kuva 12. Salmisaaren absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [47, s. 9].

Absorptiojäähdytys perustuu Salmisaaren voimalaitoksen tapauksessa vesiliitiumbromidin toimintaan aineparina. Voimalaitoksen tuottama kaukolämpövesi tuodaan keittimelle, jossa lämpö saa veden höyrystymään alipaineistetusta kylmäaineliuoksesta.

Liutin siirtyy imeyttimelle lämmönsiirtimen ja paineenalennusventtiilin kautta, ja höyry johdetaan edelleen lauhduttimelle, jossa vesihöyry lauhtuu luovuttaen lämpöä merivesivaihtimilta tulevaan meriveteen. Lauhduttimen jälkeen lauhtunut vesi siirtyy paisuntaventtiilin läpi alhaiseen paineeseen höyrystimelle, jossa vesi höyrystyy ja jäädyttää kaukojäähdytysverkkoa. Höyrystimen jälkeen höyry johdetaan imeyttimelle, jossa höyry absorboidaan liuottimeen. Näin siis voidaan hyödyntää kaukolämpöä kaukojäähdytyksen tuotannossa. [4, s. 534–536]

5. YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli perehtyä sähkön ja lämmön yhteistuotannon joustavuuteen ja tutustua keinoihin, joilla hetkellinen sähköntuotanto voidaan irrottaa hetkellisestä prosessi- ja kaukolämmön tuotannosta. Työssä tavoiteltiin olemassa oleviin toteutuksiin keskittyvää näkökulmaa ja pyrittiin esittelemään olennaisimmat asiat ratkaisujen toiminnan kannalta. Ennen ratkaisuehdotusten esittelyä työssä tutustuttiin sähkö- ja kaukolämpöverkon toimintaan, energiamarkkinoihin, CHP-voimalaitoksiin ja niiden ohjaukseen sekä joustavuuden käsitteeseen.

Työn tavoite saavutettiin mielestäni melko hyvin. Joustavuutta lisääviä ratkaisuja oli melko helppo löytää, mutta olemassa olevien toteutuksien etsiminen osoittautui yllättävän hankalaksi. Hankaluus erottaa yhteistuotannon joustavuus koko energiajärjestelmän joustavuudesta sekä aiheeseen liittyvän tiedon runsaus tuottivat hieman ongelmia työn rajaamisen kannalta. Energia-alan jatkuvan muuttumisen takia jouduin usein tarkastamaan, ettei löytämäni tieto ollut vanhentunutta. Hankaluuksista huolimatta koen työn onnistuneen hyvin ja olen lopputulokseen tyytyväinen.

Työssä perehdyttiin lauhdutusturbiinien, reduktioventtiilien, lämpövarastojen, apujäähdyttimien ja absorptiojäähdytyksen toimintaan CHP-voimalaitosten yhteydessä ja vertailtiin niiden vaikutusta voimalaitoksen tuotannon joustavuuteen. Reduktioventtiilit ja apujäähdyttimet olivat melko yksinkertaisia ratkaisuja joustavuuden lisäämiseksi, mutta reduktioventtiileitä käytettäessä kokonaishyötysuhde huononi ja apujäähdyttimiä hyödyntäessä tuotettu lämpö meni hukkaan. Lauhdutus- ja väliottolauhdutusturbiinit toivat joustavuutta järjestelmään, mutta useiden turbiinien ja generaattoreiden rakentaminen on melko kallista. Selkeästi toimivimpia ratkaisuja olivat lämpövarastot ja absorptiojäähdytys. Näistä jälkimmäinen liittyy jäähdytyksen, lämmön ja sähkön yhteistuotantoon eli kolmoistuotantoon, joten ilman kaukojäähdytysverkkoa sen hyödyntäminen yhteistuotantovoimalaitoksilla ei ole mahdollista.

Joissain yhteistuotantovoimalaitosten joustavuutta käsittelevissä artikkeleissa oli tutkittu myös lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden hyödyntämistä yhteistuotannon joustavuuden lisäämiseksi. Näiden vaikutusta yhteistuotannon joustavuuteen en käsitellyt työssäni siksi, että ne liittyvät enemmän koko energiajärjestelmän kuin yksittäisen yhteistuotantovoimalaitoksen joustavuuteen. Nämä sekä muut koko energiajärjestelmän joustavuuteen vaikuttavat ratkaisut jouduin jättämään jatkotutkimuksiin. Olisi ollut myös kiinnostavaa perehtyä tarkemmin työssäni käsiteltyjen

ratkaisujen käytön optimointiin ja ohjaukseen sekä koko yhteistuotantovoimalaitoksen tuotannon ohjaamiseen, koordinoituun säätöön ja kehittyneempiin säätöalgoritmeihin. Työstä olisi kuitenkin tullut liian laaja, joten myös nämä jätin myöhempisiin tutkimuksiin.

LÄHTEET

- [1] B. Van Mathiesen, N. Bertelsen, N. Schneider, L. Sanchez-Garcia, S. Paardekooper, J.Z. Thellufsen, S.R. Djorup, Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe. Department of Planning, Aalborg University, 2019, 96 p. Saatavissa (viitattu 3.10.2020): <https://heatroadmap.eu/decarbonised-hc-report/>
- [2] S. Rinne, S. Syri, The possibilities of combined heat and power production balancing large amounts of wind power in Finland, Energy (Oxford), 2015 Mar;82:1034–46.
- [3] F. Levihn, CHP and heat pumps to balance renewable power production: Lessons from the district heating network in Stockholm. Energy (Oxford), 2017 Oct;137:670–8.
- [4] L. Koskelainen, R. Saarela, K. Sipilä, Kaukolämmön käsikirja, Energiategollisuus ry, 2006, 566 s.
- [5] J. Leppänen, A review of district heating reactor technology. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report, No. VTT-R-06895-18 2019
- [6] T. Joronen, J. Kovacs, Y. Majanne, Voimalaitosautomaatio, Suomen Automaatioseura ry, 2007, 276 s.
- [7] Y. Majanne, L. Vazquez Seisdedos, Sliding back pressure control in industrial CHP plants, IFAC Proceedings Volumes, 2012;45(21):639–44.
- [8] A. Vuorinen, Energiankäyttäjän käsikirja 2013, Ekoenergo Oy. Saatavissa (viitattu 26.10.2020): <http://www.ekoenergo.fi/page38.php>
- [9] M. Kara, S. Helynen, L. Mattila, S. Viinikainen, M. Ohlström, M. Lahnalampi-Vesivalo, M. Hongisto, M. Ruska, I. Savolainen, S. Syri, S. Vuori, J. Hämäläinen, E. Kurkela, M. Kytö, J. Laurikko, T. Mäkinen, E. Peltola, R. Rosenberg, K. Sipilä, T. Vanttola, A. Lehtilä, Energia Suomessa : Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. täysin uudistettu painos. VTT Technical Research Centre of Finland, 2004, 396 s.
- [10] T. Pimiä, Voimalaitos prosessit, Kyamk, 2015. Saatavissa (viitattu 4.10.2020): <https://docplayer.fi/36052637-Voimalaitos-prosessit-kaukolampolaitokset-1-tuomo-pimia.html>
- [11] Eduskunta, Kirjallinen kysymys 789/2010 vp, Fortumin ydinvoimaluvat. Saatavissa (viitattu 30.9.2020): <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/sivut/trip.aspx?triptype=ValtiopaivaAsiakirjat&docid=k+789/2010>

- [12] H. Tuomisto, Nuclear District Heating Plans from Loviisa to Helsinki Metropolitan Area, Fortum, 2013. Saatavissa (viitattu 30.9.2020): https://www.oecd-nea.org/ndd/workshops/nucogen/presentations/3_Tuomisto_Nuclear-District-Heating-Plans.pdf
- [13] S. Paardekooper, R.S. Lund, B.V. Mathiesen, M. Chang, U.R. Petersen, L. Grundahl, A. David, J. Dahlbæk, I.A. Kapetanakis, H. Lund, N. Bertelsen, K. Hansen, D.W. Drysdale & U. Pers-son, Heat Roadmap Europe 4: Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps, Aalborg Universitetsforlag, 2018, 97 p.
- [14] Energiategollisuus Ry, Kaukolämmön ja -jäähdytyksen tekninen laatu, Raportti KK5/2015, 2015. Saatavissa: http://energia.fi/files/837/RaporttiKK5_2015_Kaukolammon_ja_-_jaahdytyksen_tekninen_laatu.pdf
- [15] Energiategollisuus Ry, Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km. Saatavissa (viitattu 5.10.2020): <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>
- [16] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B. Vad Mathiesen, 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. In 4DH-projektet (Vol. 68, p. 1–), 2014
- [17] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 1: Järjestelmätekniikka, Helsinki : GAUDEAMUS Helsinki University Press, 2011, 520 s.
- [18] Fingrid Oyj, Esittely. Saatavissa (viitattu 5.10.2020): <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/>.
- [19] Fingrid Oyj, Tuulivoiman tuotanto. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/tuulivoiman-tuotanto/>
- [20] Tilastokeskus julkaisu 1.11.2019, Fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella tuotetun sähkön määrä kasvoi 14% v. 2018 - Uusiutuvien energialähteiden osuus sähkön tuotannosta pieneni. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatu/2018/salatu_2018_2019-11-01_tie_001_fi.html
- [21] Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Energia 4/2017. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkko_julkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [22] IRENA, Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 1: Overview for policy makers, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2018. Saatavissa

(viitattu 5.12.2020): https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf

[23] T. Korpela, J. Kaivosoja, Y. Majanne, L. Laakkonen, M. Nurmoranta, M. Viikko, Utilization of district heating networks to provide flexibility in CHP production, Energy procedia, 2017 Jun;116:310–9.

[24] Fingrid, Reservimarkkinat. Saatavilla (viitattu 4.10.2020): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

[25] S. Paiho, H. Saastamoinen, E. Hakkarainen, L. Similä, R. Pasonen, J. Ikäheimo, M. Rämä, M. Tuovinen, S. Horsmanheimo, Increasing flexibility of Finnish energy systems—A review of potential technologies and means, Sustainable cities and society, 2018 Nov;43:509–23.

[26] Fortum lehdistötiedote 7.3.2018, Fortum avaa ensimmäisenä Suomessa kaukolämpöverkkonsa kaikille puhtaan energian tuottajille. Saatavissa (viitattu 2.10.2020): <https://www.fortum.fi/media/2018/03/fortum-avaa-ensimmaisena-suomessa-kaukolampoverkkonsa-kaikille-puhtaan-energian-tuottajille>

[27] Tampereen sähkölaitos, Avoin kaukolämpöverkko mahdollistaa hukkaenergian hyödyntämisen. Saatavissa (viitattu 2.10.2020): <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/omalampo/>

[28] Vantaan Energia, Myy hukkalämpö avoimeen kaukolämpöverkkoomme. Saatavissa (viitattu 2.10.2020): <https://www.vantaanenergia.fi/lampo/myy-hukkalampoteenpain-avoimeen-kaukolampoverkkoomme/>

[29] Helen Oy, Avoin kaukolämpö. Saatavissa (viitattu 2.10.2020): <https://www.helen.fi/yritykset/lampoa-yrityksille/avoin-kaukolampo>

[30] Energiauutiset 15.5.2018, Kaukolämpöverkot auki? Saatavissa (viitattu 5.10.2020): <https://www.energiauutiset.fi/uutiset/kaukolampoverkot-auki-2.html>

[31] Heat Roadmap Europe, Saatavissa (viitattu 2.10.2020): <https://heatroadmap.eu/>

[32] G. Papaefthymiou, K. Dragoon, Towards 100% renewable energy systems: Uncapping power system flexibility, Energy policy, 2016 May;92:69–82.

[33] H. Kondziella, T. Bruckner, Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies, Renewable & sustainable energy reviews, 2016 Jan;53:10–22.

- [34] P.D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, J. Salpakari, Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity, *Renewable & sustainable energy reviews*, 2015 May;45:785–807.
- [35] Y. Zhao, M. Liu, C. Wang, X. Li, D. Chong, J. Yan, Increasing operational flexibility of supercritical coal-fired power plants by regulating thermal system configuration during transient processes, *Applied energy*, 2018 Oct 15;228:2375–86.
- [36] C. Wang, Y. Zhao, M. Liu, Y. Qiao, D. Chong, J. Yan, Peak shaving operational optimization of supercritical coal-fired power plants by revising control strategy for water-fuel ratio, *Applied energy*, 2018 Apr;216:212–23.
- [37] IRENA, Innovation landscape brief: Flexibility in conventional power plants, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019. Saatavissa (viitattu 5.12.2020): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Flexibility_in_CPPs_2019.pdf?la=en&hash=AF60106EA083E492638D8FA9ADF7FD099259F5A1
- [38] A. Ulbig, G. Andersson, Analyzing operational flexibility of electric power systems, *International journal of electrical power & energy systems*. 2015 Nov;72:155–64.
- [39] Y.V. Makarov, C. Loutan, J. Ma and P. de Mello, Operational Impacts of Wind Generation on California Power Systems, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 1039-1050, May 2009
- [40] Y. Majanne, M. Välisuo, Voimalaitosprosessien ohjaus, *Energiatekniikan automaatio*, TKK, 2007. Saatavissa (viitattu 7.12.2020): <https://docplayer.fi/1295955-Voimalaitosprosessien-ohjaus.html>
- [41] W. Wang, Y. Sun, S. Jing, W. Zhang, C. Cui, Improved Boiler-Turbine Coordinated Control of CHP Units with Heat Accumulators by Introducing Heat Source Regulation, *Energies* 2018 10;11(10).
- [42] O. R. Llerena, Energetic, exergetic and economic analysis of a cogeneration system: sugarcane plant of Sao Paulo case, *Ingenius*, 2018 Jan(19):29-39
- [43] P. Harju, Voimalaitoksen lauhdejärjestelmän kartoittaminen ja kehittäminen, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Insinöörityö, 2016. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/107684/Insinoorityo.pdf?sequence=1>
- [44] M. Ebrahimi, A. Keshavarz, Combined cooling, heating and power : decision-making, design and optimization . First edition. Waltham, Mississippi: Elsevier; 2016.

[45] G.E. Phetteplace, District heating guide, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, 2013.

[46] Č. Katulić, A novel method for finding the optimal heat storage tank capacity for a cogeneration power plant. Applied thermal engineering. 2014 Apr;65(1-2):530–8.

[47] V. Itkonen, Salmisaaren hiililuolan kaukojäähdytyskompressorien toimintakuvaus ja säätösuunnittelu, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Insinöörityö, 2017. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/136343/Insinoorityoltkonen1.92.pdf?sequence=1>