

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pienen kokoluokan CHP -potentiaali teollisuudessa

Small CHP possibilities in industries

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri

Lappeenranta 27.5.2020

Vesa Hahto

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi:

Vesa Hahto 0507577

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja:

Ahti Jaatinen -Värri

Kandidaatintyö 2020

32 sivua, 2 taulukkoa, 7 kuvaa

Hakusanat: Pienet CHP laitokset, ORC, polttokennot, Rankine, Brayton, biomassa

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, kuinka hyödyllistä olisi valmistaa pienen kokoluokan CHP eli yhdistetyn lämmön ja sähköntuotannon voimaloita ja vertailla pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantoa muuhun pientuotantoon, missä sähkö ja lämpö tuotetaan erikseen. Työn tavoitteena on tutkia, onko pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotanto taloudellisesti ja teknisesti kannattavaa.

Tärkeimmiksi aihealueiksi nousi pienten CHP laitosten tekniikat, energiatehokkuuden ja kannattavuuden tarkastelu, kustannukset sekä lämmön ja sähköntuotannon sopivuus toistensa kanssa. Sen lisäksi työssä tarkasteltiin tulevaisuuden näkymiä pienten kokoluokan CHP tuotannossa ja hajautetun energiantuotannon yleistymisen seurauksia pienen kokoluokan tuotannolle.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Pienet CHP laitokset	7
2.1 Pienten CHP laitosten rakenne ja toimintaperiaate	7
2.2 Pienten CHP laitosten yleisimmät tekniikat	8
2.3 Kaasuturbiinit	10
2.4 ORC-teknologia	11
2.5 Polttokennot ja biomassan kaasutus	13
2.6 Sähkömarkkinat	16
2.7 Kustannukset teollisuudessa	17
2.8 Lämmön -ja sähköntuotannon yhteensopivuus	18
3 Vaihtoehtoiset teknologiat	19
3.1 Lämpösähköiset generaattorit	22
4 Pienten CHP laitosten kokonaispotentiaali	23
4.1 Pienten CHP laitosten optimointi	24
5 Yhteenveto	26
Lähdeluettelo	28

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Yksiköt

kW Kilowatti

MW Megawatti

kW_e Kilowatti (sähköteho)

MW_e Megawatti (sähköteho)

MW_{th} Megawatti (lämpöteho)

bar Baari (paineen yksikkö)

°C Celsiusaste

Lyhenteet

CHP Combined Heat and Power

ORC Organic Rankine Cycle

SOFC Solid Oxide Fuel Cell

PEMFC Proton-Exchange Membrane Fuel Cell

PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell

MCFC Molten Carbonate Fuel Cell

JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on käsitellä pieniä CHP laitoksia teknis-taloudellisesta näkökulmasta. Tässä työssä pienellä CHP laitoksella tarkoitetaan laitosta, jonka sähköteho on enintään 20 MW. Työssä vertaillaan vaihtoehtoisia pienen kokoluokan menetelmiä lämmön ja sähkön yhteistuotantoon ja tarkastellaan ylipäänsä sähkön ja lämmön tuotannon yhteensopivuutta toisiinsa nähden. Lisäksi työssä käydään läpi tuotannon tulevaisuuden näkymiä sekä kokonaispotentiaalia.

Yhdistetty lämmön -ja sähköntuotanto on yhtäaikaista käytettävän lämmön ja sähkön tuottoa samassa prosessissa. CHP tuotannossa lämpö käytetään aluksi höyryturbiinin jälkeen lämmitykseen esimerkiksi kaukolämmitykseen tai muuhun lämmitykseen. Lämpöä ei siksi haihduteta lauhdevesien mukana ympäristöön. Teollisissa CHP laitoksissa höyryn erottaminen tapahtuu korkeissa paineissa, jolloin sitä voidaan käyttää prosessilämpönä. Polttoaineen kulutusta voidaan vähentää 25-35% CHP tuotannolla, kun vertaa polttoaineen kulutusta erillisessä lämmön ja sähkön tuotannossa. (Sipilä 2005,11) Hiilidioksidipäästöt suhteessa tuotettuun lämpöön ja sähköön vähenevät polttoaineen kulutuksen laskiessa ja tuotannon tehokkuus kokonaisuudessa kasvaa. Kehitteillä on monia uusia teknologioita. Monet näistä teknologioista eivät kuitenkaan ole teknisesti riittävän kehittyneitä, eivätkä ole siksi kaupallisia. Useiden tekniikoiden sopivuutta on kuitenkin testattu.

CHP tuotantoon sopivat useat polttoaineet. Yleisimpiä ovat hiili, kiinteät ja kaasumaiset biopolttoaineet ja kevyet polttoöljyt, kuten dieselöljyt. Sen lisäksi kierrätyspolttoaineita voidaan käyttää CHP prosesseissa. Käytetyt prosessit CHP tuotannossa maakaasulla ovat kaasuturbiiniprosessi ja lämmöntalteenottokattilaprosessi, sisäinen polttomoottoriprosessi, jossa on lämmöntalteenotto ja kaasuturbiiniprosessi yhdistetyllä höyrykierrolla. Biopolttoaineita käyttävät CHP laitokset ovat usein höyryturbiiniprosesseja. Tulevaisuudessa on potentiaalia erityisesti sellaisille pienen mittakaavan CHP laitoksille, joissa sähköteho on tyypillisesti noin 500 kilowatin ja korkeintaan 20 megawatin välillä. Suomessa on potentiaalia kasvattaa tuotantoa pienimmissä CHP laitoksissa, jotka hyödyntävät biopolttoaineita, ja joiden sähköteho

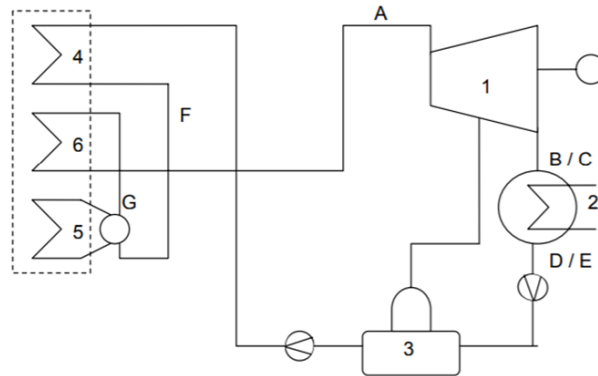
vaihtelee 1-20 MW_e välissä. Toisaalta pienen kokoluokan laitoksiin liittyy myös ongelmia esimerkiksi rakennusasteeseen liittyen, joka on usein suhteellisen matala ja pienenee laitoksen kokoluokan pienentyessä. (Sipilä 2005, 11-13)

PIENET CHP LAITOKSET

Muiden energiatuotannon muotojen lailla myös pienissä CHP laitoksissa joudutaan vastaamaan energia ja yhteiskuntapolitiikan haasteisiin, kuten energiantuotannon kilpailukykyyn, kestävyteen, hajautettuun energiantuotantoon ja parantuneeseen energiaturvallisuuteen. Pienen kokoluokan laitokset voivat myös vähentää energiansiirtohäviöitä. Muun muassa pienet ja keskitetyt biomassalla toimivat CHP laitokset voisivat sopia energiaa vaativiin teollisuussektoreihin, etenkin kun lämpöä ja sähköä tarvitaan samanaikaisesti. Sähkön ja lämmön toimittamista seuraavat korkeat kustannukset ovat myös pienempi haitta CHP laitoksissa. (Pantaleo 2015)

2.1 Pienten CHP laitosten rakenne ja toimintaperiaate

Yleisin tekniikka alle 20 MW_e laitoksissa on höyryturbiinikierto eli toiselta nimeltään Rankine-kierto. Lisäksi höyryturbiinikerrossa höyry tyypillisesti tulistetaan kattilan jälkeen. Kattilan jälkeen tulistettu höyry päätyy kyllästymislämpötilaa korkeampaan lämpötilaan. Höyryturbiinin jälkeinen lämmönvaihdin käyttää jäähdytysvettä lauhduttaakseen höyryn takaisin vedeksi. Höyryn laajentumista höyryturbiinissa rajoittaa muun muassa höyryn kosteuspitoisuus turbiinin matalapaineosissa. Yleensä maksimiarvo kosteudelle on noin 12% ja jäähdytysveden lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen on 20-30 °C. Jäähdytysveden matalan lämpötilan takia siihen siirtyvää lauhtumislämpöä ei voida yleensä hyödyntää. Vasta kun prosessissa lämmentyneen veden lämpötila saavuttaa 85-110 astetta voidaan Rankine-prosessia hyödyntää lämmön tuotantoon. Veden lämpötilaan vaikuttaa osittain myös ulkolämpötila. (Sipilä 2005,13-14)



Kuva 1. Yksinkertainen voimala, joka perustuu höyryn Rankine-kiertoon tulistuksella. 1=turbiini
2=lauhdutin/kaukolämmönlämmönvaihdin 3 =syöttövesisäiliö Kattilakomponentit:
4 =ekonomaiseri 5= höyrystin 6= tulistin (Sipilä 2005,15)

Useimmiten Rankine-kierrolla toimivissa laitoksissa on leijukerroskattila. Rankine-kiertoa on yleensä käytetty Suomessa ja Ruotsissa yli 3 MWe sähkötehon voimaloissa ja kokonaishyötysuhde kierrossa on useimmiten korkea eli yli 85 %, etenkin kun voimalassa halutaan tuottaa eniten lämpöä. Yleisimpiä biomassapolttoaineita ovat muun muassa puulastut, sahanpuru, metsäjätteet ja pelletit. (Salomón 2011)

2.2. Pienten CHP laitosten yleisimmät tekniikat

Höyryturbiiniprosessin lisäksi pienissä CHP laitoksissa käytettävät tekniikat voidaan pääasiassa jakaa polttomoottoreihin, kaasuturbiineihin, välittäjäaineisiin liittyviin tekniikoihin, polttokennoihin ja muihin höyryvoimalaitteisiin. Polttomoottorit ja kaasuturbiinit toimivat sisäisen palamisen ansiosta ja etenkin mäntäpolttomoottorit ovat hyvin yleisiä pienissä sähköä ja lämpöä tuottavissa laitoksissa. Mäntämoottoreissa lämmöntalteenotto tapahtuu pakokaasujen, öljyn tai jäähdytysveden kautta. Tekniikka on kestäväksi todistettu, mutta se vaatii säännöllistä männän huoltamista. (Takalo 2013 Salomón 2011)

Mäntäpolttomoottorit voidaan jakaa stirlingmoottoreihin, ottomoottoreihin sekä dieselmootoreihin. Stirlingmoottorit toimivat ulkoisesti lämmitettävällä suljetulla kierrolla ja Ottomoottorit toimivat sisäisesti lämmitetyllä avoimella otto -kierrolla.

Stirlingmoottoreita käytetään tyypillisesti pyörittämään suhteellisen pieniä sähkögeneraattoreita yhdistetyissä lämmön -ja sähköntuotantolaitoksissa. Lisäksi stirlingmoottoreissa vetoakselinopeudet ovat yleensä alhaiset ja helposti sovitettavissa sähköntuottajien tarpeisiin ilman, että tarvitaan suuria vaihdelaatikoita. Stirlingmoottorit ovat myös ulkoisesti lämmitettäviä ja toimivat siksi monilla eri lämpötiloissa palavilla polttoaineilla, esimerkiksi heikkolaatuisilla uusiutuvilla polttoaineilla, kuten puulastuilla ja muilla kierrätyspolttoaineilla. Sisäisen lämmönlähteen moottoreille stirlingmoottorien polttoaineet olisivat epäkäytännöllisiä. Prosessin ollessa suljetussa kierrossa, sama käyttöneste kiertää moottorin kylmän ja kuumen puolen välillä. Molemmille puolille stirlingmoottoria tarvitaan siis lämmönsiirrin, toinen siirtämään lämpöä korkeammasta lämpötilasta moottorin käyttönesteeseen ja toinen siirtämään lämpöä käyttönesteestä jäähdyttävään väliaineeseen moottorin ulkopuolelle. Kaikissa suljetun kierron moottoreissa ylimääräinen lämmönsiirrin on esimerkiksi kustannuksien kannalta haittapuoli.

Avoimen kierron polttomoottoreissa, esimerkiksi dieselmoottorissa, termisen hyötysuhteen maksimiarvo on suurempi kuin suljetun kierron polttomoottoreissa samoissa lämpötiloissa ja samalla polttoaineella. Avoimen kierron moottorit eivät kuitenkaan pysty käyttämään polttoaineenaan muita kuin puhdistettuja polttoaineita, joita ovat esimerkiksi diesel, bensiini ja maakaasu. (Eames 2016)

2.3 Kaasuturbiinit

Tavallisesti pienissä kaasuturbiineissa generaattori on kytketty suoraan turbiinin akseliin, ja ne käyttävät tehoelektroniikkaa vaihdelaatikon ja tavanomaisen generaattorin sijaan. Kun biokaasua on saatavana ja keskimääräinen teho on noin sata kilowattia, pienet kaasuturbiinit ovat hyviä vaihtoehtoja. Pienet kaasuturbiinit ovat kaasuturbiineja, jotka koostuvat keskipakoiskompressorista, radiaaliturbiinista ja generaattorin roottorista, joka toimii kaasuturbiinikierron eli Brayton -kierron lailla. Pienillä turbiineilla on yleensä yksi akseli, koska yksiakselikokoonpano tulee halvemmaksi osien tuotantokustannukset huomioiden verrattuna kaksiakseliseen kokoonpanoon. Generaattori asennetaan vastapäätä kaasun pakokaasua. Tällöin

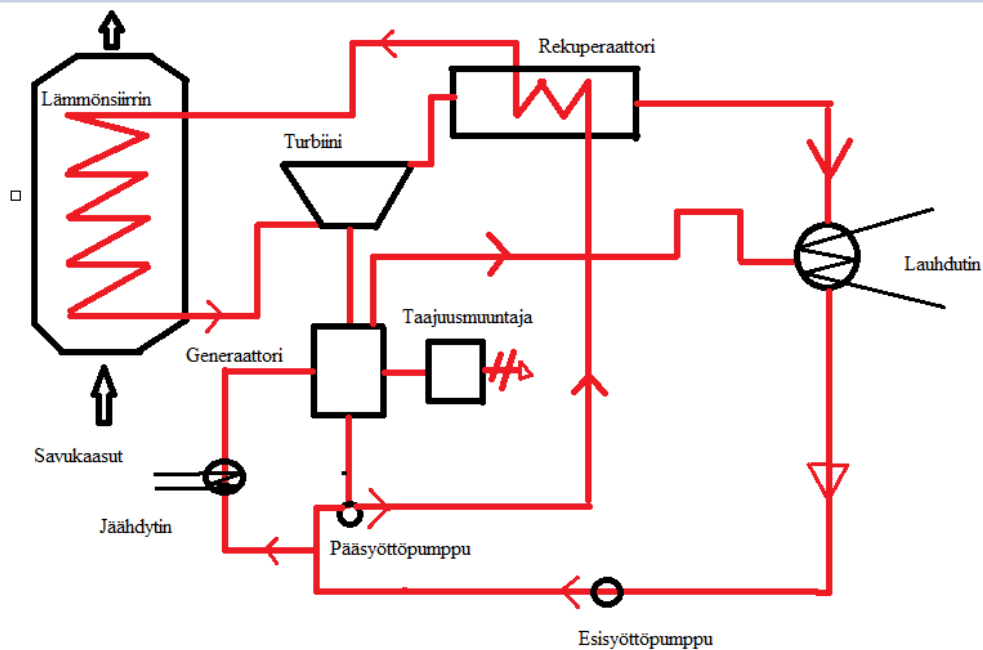
varmistetaan, että kaasut poistuvat turbiinista vähemmällä painehäviöillä. Pienemmät painehäviöt lisäävät nettotehoa ja vähentävät polttoaineen kulutusta. Toinen tapa vähentää polttoaineen kulutusta olisi käyttää regeneratiivisia lämmönsiirtimiä esilämmittämään sisään tulevaa ilmaa, josta seuraisi sähköhyötysuhteen huomattava parantuminen. Regeneratiivisten lämmönsiirtimien käyttäminen johtaisi kuitenkin myös pienentyneeseen hukkalämmön talteenottoon pakokaasuista. Hukkalämpö on hyödyksi, sillä sitä voidaan uudelleen kierrättää erilaisissa teollisuuden prosesseissa. Tämän vuoksi joissain pienissä turbiineissa regeneratiivinen lämmönsiirrin voidaan kokonaan jättää prosessista tai pyörittää sitä vain osakuormalla. Kaasuturbiinityypeistä radiaaliturbiinit käsittelevät pieniä tilavuusvirtoja hyvin ilman, että niiden komponentit hajoavat. Taloudelliset kustannukset ovat myös alemmat kuin aksiaaliturbiinin komponenteilla. Radiaalikompressorien ja turbiinien päähaittapuoli on se, että ne eivät ole yhtä tehokkaita kuin aksiaaliturbiinit. Tehon puutteen takia aksiaaliturbiinien käyttö on edullisempaa suuremman kapasiteetin kaasuturbiineissa. Verrattuna mäntäpolttomootoreihin kaasuturbiinit ovat kevytrakenteisia ja kompakteja sekä vähäpäästöisempiä kuin kilpailevat teknologiat. Kuitenkin esimerkiksi polttokennojen käytössä vapautuu vieläkin vähemmän pakokaasuja. Sen lisäksi suurempien kaasuturbiinien lailla myös pienissä turbiineissa lämmöntalteenottosysteemi ei ole yhtä monimutkainen kuin moottoreissa ja ne vaativat vähemmän huoltoa. Öljyttömät pienet turbiinit lähes vähiten, koska öljyjä ei tarvitse vaihtaa. (Bruno 2004)

CHP voimalaitoksen sähköntuoton parantamiseksi kaasuturbiinin integroiminen kaasumoottorin kanssa parantaisi koko laitoksen sähköntuottoa ja kasvattaisi myös laitoksen rakennusastetta. Kaasuturbiini kytketään suurempien CHP laitosten tapauksessa suoraan lämmöntalteenottokattilan kanssa. Toinen vaihtoehto on liittää turbiini kiinteää polttoainetta hyödyntävään kattilaan, joka hyödyntää syöttöveden esilämmittimeen kulkeutuvaa kaasuturbiinin pakokaasua tai hyödyntämällä kaasuturbiinin pakokaasua kattilan palamisilmana. Pienissä laitoksissa kaasuturbiinin tai kaasumoottorin integrointikustannukset voivat tulla kalliiksi, koska kustannukset tuotettua tehoa kohden kasvavat, kun turbiinin tai moottorin koko pienenee. (Savola 2006)

2.4 ORC-teknologia

ORC-prosessi eli ”Organic Rankine Cycle” on sopiva tekniikka pienille laitoksille muutamien kymmenien ja satojen kilowattien välillä. Veden sijasta ORC kierrossa käytetään orgaanisia kiertoaineita. Kiertoaineet voidaan luokitella kuiviin kiertoaineisiin, isentrooppisiin kiertoaineisiin ja märkiin kiertoaineisiin. ORC-teknologiasta on tehty paljon tutkimustyötä. Erityisesti kiertoaineen valitsemisesta hukkalämmön sovellutuksissa. Kiertoaineen valinta riippuu muun muassa termodynaamisesta suorituskyvystä, lämmönvaihtimien koosta, lauhdepaineesta ja haihtumispaineesta. Kiertoaineen valintaan liittyy myös runsaasti muita kriteerejä liittyen esimerkiksi kiertoaineen hintaan, ympäristövaikutuksiin sekä kiertoaineen sopivuuteen laitoksessa käytettävien materiaalien kanssa (Elsner 2017 Uusitalo 2017). Biomassakattiloita ja höyryturbiineja käytetään harvoin pienissä CHP laitoksissa. Yksi olennaisimmista eroista höyryturbiinin ja ORC teknologioiden välillä on saatavilla olevan lämmön ja kuorman tarpeen tasoittuminen keskenään, mikä on paljon maltillisempaa ORC:n tapauksessa. ORC:n vaikutusta on tutkittu pienten CHP voimaloiden suorituskyvyn parantumisessa, muun muassa laitoksen joustavuudessa ja energianmuunnon tehokkuudessa. (Elsner 2017)

Verrattuna höyryturbiinitekniikkaan ORC -teknologiaa käyttävä pieni yksivaiheinen turbiini on hyötysuhteeltaan parempi, koska orgaanista kiertoainetta tulistetaan jatkuvasti sen kulkiessa turbiinin lävitse ja pisaroita ei vuoda pois prosessista, toisin kuin höyryprosessissa. Prosessissa pyörimisnopeus voi parhaimmillaan olla jopa 20000-30000 kierrosta minuutissa. Hidastussäätöä ei käytetä, joten generaattori tuottaa prosessista ylitaajuuksista virtaa, joka pitää muuntaa verkkoon sopivaksi taajuusmuuntajalla. Orgaanisen kiertoaineen syöttöpumppu on liitetty suoraan turbogeneraattorin akseliin. Pumpun kavitaation estämiseksi prosessissa käytetään usein esisyöttöpumppua. (Sipilä 2005,18)



Kuva 2.”(Sipilä 2005,19) Suurnopeus ORC-voimalaa mukaillen”

Hidas ORC -prosessi toimii parhaiten 400-1100 kilowatin sähkötehoilla. ORC-prosessissa on yleensä kaksi erillistä kiertoa, toinen öljylle ja toinen orgaaniselle kiertoaineelle. Biomassan tai vastaavan polttoaineen poltosta siirtyvä lämpö johdetaan öljykierron lävitse 250-300 asteen lämpötilassa lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirrin höyrystää ja tulistaa orgaanisen nesteen tulistuneeksi höyryksi, joka siirtyy turbiinin kautta lauhduttimelle. Lauhdutin toimii myös kaukolämmönvaihtimena. Lauhtunut neste pumpataan takaisin kiertoon noin 12 baarin paineessa kulkien regeneraattorin kautta höyrystimeen. Kuvasta 2 nähdään, että suurnopeus ORC-kierrossa neste pumpataan rekuperäätorin kautta höyrystimeen. (Sipilä 2005,19)

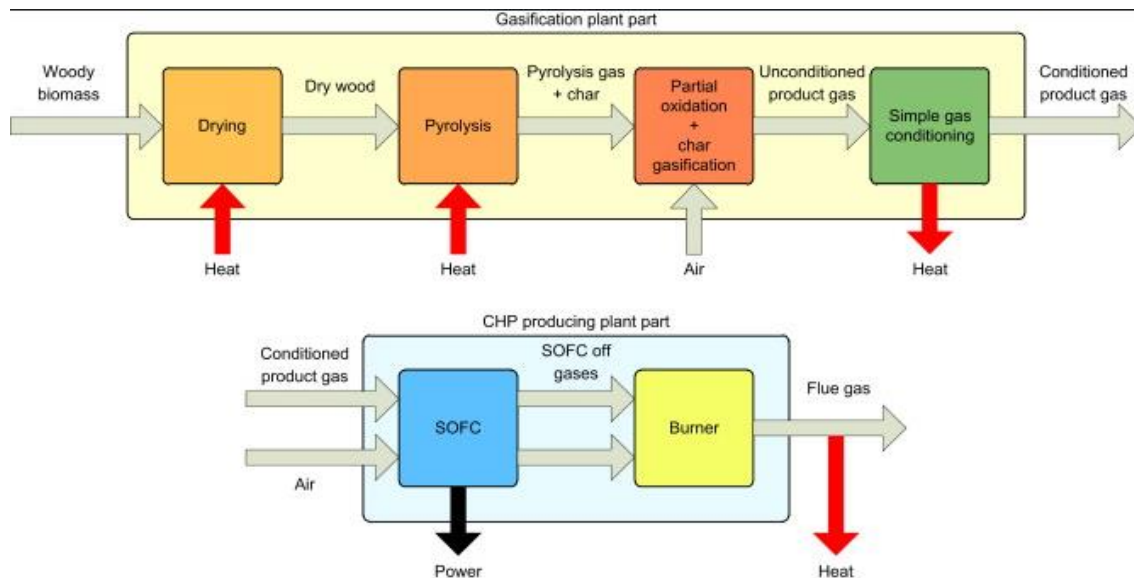
2.5. Polttokennot ja biomassan kaasutus

Sähköhyötysuhdetta saadaan kasvatettua hajautetussa CHP tuotannossa perinteisten teknologioiden sijaan toteuttamalla voimala, joka toimii biomassan kaasutuksella ja kiinteäoksidipolttokennolla (SOFC). (Bang-Moller 2013) Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, toimintaperiaatteeltaan samanlaisia kuin paristot. Paristot hyödyntävät kemiallista reaktiota tuottaakseen sähköä. Polttokennon sisällä ei ole kemiallista polttoainetta, toisin kuin pariston sisällä. Se koostuu vain reaktiokammioista, missä tapahtuu polttokennoreaktio. Reaktantit johdetaan polttokennoon ulkoisesti, jotta kennolla saadaan tuotettua sähköä. Reagoivat kaasut eli vety ja happi eivät saa sekoittua keskenään, joten vety johdetaan eri polttokennon elektrodille kuin happi. Molempia elektrodeja eli anodia ja katodia erottaa elektrolyytti. (Breeze 2017,11-14)

Muita polttokennotyyppejä SOFC yksiköiden lisäksi ovat muun muassa protoninvaihtokalvopolttokennot (PEMFC), sulan- karbonaatin polttokennot (MCFC) ja fosforihappopolttokennot (PAFC). Polttokennot suoriutuvat hyvin osakuormalla ja polttokennopinon tehokkuus paranee pienemmillä kuormilla. Kokonaishyötysuhde voi olla jopa 65-85 prosenttia. (Gibson 2016) SOFC on toimiva vaihtoehto yhteistuotantotarkoituksiin, sillä sen toimintalämpötila on tyypillisesti 950-1000 astetta. Pienimuotoisissa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa SOFC: t on suunniteltu tehoalueelle 5-10 kWe. Polttoaineena voidaan käyttää puhdasta vetyä tai vedyn ja hiilimonoksidin sekoitusta. SOFC yksiköiden yhdistäminen pieniin kaasuturbiineihin on arvioitu kasvattavan yhteistuotantolaitoksen sähköhyötysuhteen 60 prosenttiin ja kokonaishyötysuhteen 80 prosenttiin. Sulan -karbonaatin polttokennoa (MCFC) voidaan käyttää myös yhdistetyn tuotannon järjestelmässä. Sulan -karbonaatin polttokennon lämpöä käytetään höyryn tuottamiseen tavanomaisessa höyrykierrossa. Toimintalämpötila MCFC yksiköissä on tyypillisesti noin 600-700 astetta. (Salomón 2011)

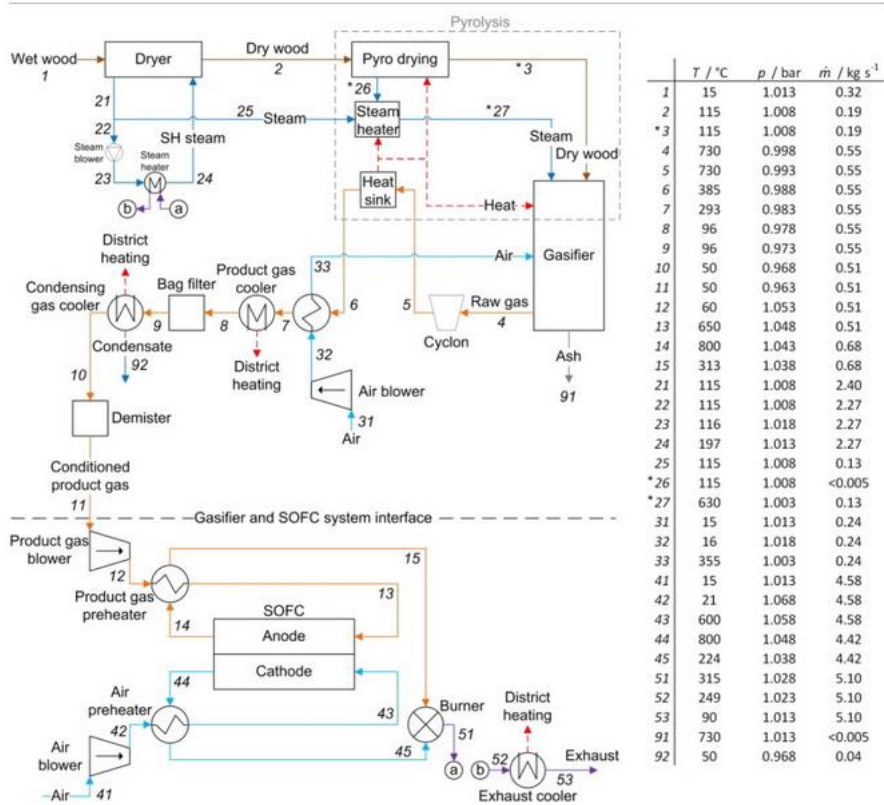
Biomassan kaasutukseen ja polttokennoihin perustuva voimala voidaan jakaa kaasutusosioon ja sähkön sekä lämmöntuotanto-osioon. Puubiomassa muunnetaan tuotekaasuksi ja tuotekaasun muuntamista jatketaan sähköksi ja lämmöksi SOFC - pinoilla eli kiinteiden oksidien polttokennoilla ja polttimella. Optimaalisessa laitoksessa kaasutus tapahtuu puhtaasti, jolloin tuotetaan mahdollisimman puhdasta tuotekaasua

korkealla hyötysuhteella, vältetään ylimääräinen kaasun ilmastointi sekä helpotetaan kaasun käyttöönottoa loppupään prosesseissa. (Bang-Moller 2013)



Kuva 3. Esimerkki biomassan kaasutukseen ja polttokennoihin perustuvan laitoksen toimintaperiaatteesta (Bang-Moller 2013)

Kaasun ilmastoinnilla voidaan parantaa entisestään laitoksen suorituskykyä. Yksinkertainen malli kaasun ilmastoinnista sisältää syklonin, pussisuodattimen, lauhdutettavan kaasun jäähdyttimen, lauhdutuskaasun jäähdyttimen ja puhdistusaineen. SOFC osio kasvattaa suorituskykyä tuntuvasti ja sen ansiosta sähköntuotanto tuotekaasusta paranee. Polttimella varmistetaan jäljelle jääneen polttoaineen täydellinen hapettuminen. Jäännöspolttoaine johdetaan pois pakokaasuina SOFC -yksiköstä. Laitoksen hyötysuhdetta voitaisiin myös parantaa entisestään kaksivaiheisella biomassan kaasutuksella ja lisäämällä polttokennojen määrää. Mallinnukset ovat ennustaneet kaksivaiheisen kaasutuksen ja polttokennojen yhdistelmän kasvattavan sähköhyötysuhdetta 45 prosenttiin verrattuna perinteisten hajautettujen biomassalla toimivien CHP laitosten hyötysuhteeseen, joka on tyypillisesti noin 30-34 prosenttia. Lämpöteholtaan ja sähköteholtaan uusi laitos olisi vain 3 MW_{th} / 1,4 MWe, kun taas perinteiset laitokset ovat kokoluokaltaan tyypillisesti 5-25 MWe. (Bang-Moller 2013)



Kuva 4. Mallinnettu laitos kaksivaiheisella biomassan kaasutuksella ja SOFC-pinoilla (Bang-Moller, 2013)

2.6. Sähkömarkkinat

Kaikille sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksille on tyypillisesti tarjottu kiinteitä sähkön hintoja, nykyään monissa maissa tällaiset hinnoitteluolosuhteet on korvattu spot-markkinoilla. Tämän vuoksi tarvitaan uusia menetelmiä pienten sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten optimointiin. Pienille CHP laitoksille on otettu käyttöön tiettyjä toiminnan suorituskyvyn vaatimuksia. Sähköä voidaan esimerkiksi myydä sopimuksenalaisesti kiinteällä hinnalla ja tuella, jonka hinta ei vaihtelee ajan mukaan. Nykyhetkessä sähköä myydään kolmoistariffin tai vastaavan mukaan, jossa hinta vaihtelee tyypillisten kysynnän vaihteluiden mukaisesti. Lisäksi sähköä myydään kansainvälisillä spot-markkinoilla, joissa hinta vaihtelee tunneittain riippuen kysynnän, vesivoiman vedentarpeen ja tuulivoiman tuotannon vaihteluista. Hinnoista neuvotellaan 24 tuntia ennakkoon. Tulevaisuudessa spot -markkinoilla vaihtelevista uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön osuus kasvaa, joka vaikuttaa merkittävästi hinnan asettumiseen. Pienten CHP laitosten optimointi kilpailuilla markkinoilla riippuu vahvasti sijoitussuunnittelusta sekä toiminnan suorituskyvystä. Laitosta operoitaessa, sähköä täytyy myydä, kun hinta on korkealla ja samanaikaisesti tuottaa riittävästi lämpöä asiakkaiden tarpeisiin. Vaihtelevia sähkönmyyntihintoja voidaan hyödyntää, jos joustetaan moottorien kapasiteeteissa ja lämmönvarastoinnissa sekä CHP laitosten käynnistämisessä, alasajossa ja osakuormalla ajamisessa. Toiminnan suorituskyky otetaan siis huomioon jo heti alussa suunniteltaessa laitosta, jolloin suunnitelmassa otetaan huomioon sekä CHP laitosten koko ja lukumäärä, että mahdolliset lämpövarastot. (Lund 2005)

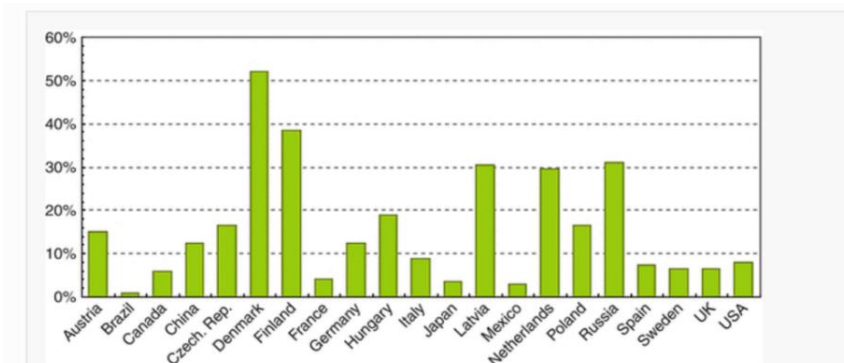
2.7. Kustannukset teollisuudessa

Pienten voimalaitosten pääomakustannusten alentaminen kasvattaa kysyntää CHP laitoksista ja laitoksia rakennetaan kasvaneen kysynnän johdosta myös enemmän kuin ennen. Yhdistetyillä lämmön ja sähkön tuotantolaitoksilla on tässä yhteydessä monia etuja. CHP on joustava, CHP laitoksissa on matalat päästöt, ja se vastaa energiantarpeisiin. Vapautetuilla sähkömarkkinoilla käy vapaa kilpailu sähköstä, joka kasvattaa kiinnostusta sähkömarkkinoita kohtaan. Vapaat sähkömarkkinat johtavat parempiin päätöksiin energiajärjestelmien toimintaan liittyen ja energialähteisiin investoimiseen. (Atanasoe 2018) CHP laitokset, jotka toimivat alueellisen lämmöntarpeen mukaan vaativat suuremman rakennusasteen. Suurempi rakennusaste lisää laitosten taloudellista kannattavuutta sekä vähentäisi laitosten polttoaineen kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä yhteistuotannossa. Kannattavuutta parantaisi lisäksi esimerkkinä uuden välitulistimen, syöttöveden esilämmittimen sekä kaksivaiheisen kaukolämmönvaihtimen lisääminen 1-20 MW sähkötehon laitoksissa. (Savola, Fogelholm 2006)

Tulevaisuudessa CHP laitosten potentiaalia voi kasvattaa päästökauppa, joka tulee kasvattamaan sähkön hintaa. Ilmastonmuutoksen myötä uusiutuvia energianlähteitä tuetaan yhä enemmän, mikä lisää myös CHP laitoksiin kohdistuvia tukia, sillä CHP laitokset pystyvät hyödyntämään uusiutuvia energianlähteitä. Lopulliset päätökset pieniin CHP laitoksiin sijoittamisesta vaativat usean eri muuttujan punnitsemista lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. (Sipilä 2005,122)

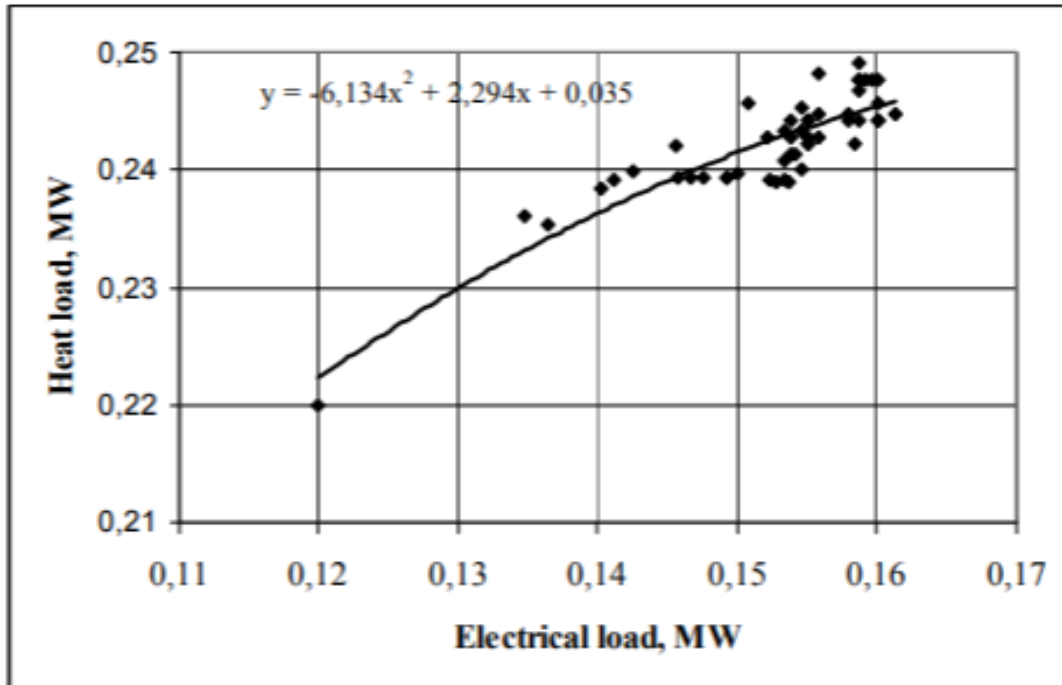
Suurten investointikustannusten lisäksi taloudellista toimintaa heikentävät tällä hetkellä vielä korkeat biomassapohjaisten järjestelmien huollosta ja ylläpidosta aiheutuvat kustannukset ja usein matalat sähköhyötysuhteet eli alle 20 prosentin hyötysuhteet. Matalien hyötysuhteiden vuoksi CHP laitoksissa on vaikea tuottaa saman verran sähköä ja lämpöä. Lämpöteho tai sähköteho on sen vuoksi usein toistaan suurempi tai pienempi. Esimerkiksi biomassalla toimivien pienten CHP laitosten lämpöteho on yleensä suurempi kuin sähköntuotto 3,5–10 kertoimella. (Büchner 2013, 432)

Taulukko 1. CHP:n osuus lueteltujen maitten kokonaisenergiatuotannosta (Büchner 2013,432)



2.8 Lämmön -ja sähköntuotannon yhteensopivuus

CHP laitoksessa tulee ottaa huomioon, kumpaa tuotetaan ensisijaisesti, sähköä vai lämpöä. Parhaita vaihtoehtoja tuotettaessa ensisijaisesti korkeatasoista teollista lämpöä ovat kattila ja höyryturbiini. Kattila mitoitetaan vastaamaan maksimaalista höyryntarvetta, kun taas höyryturbiini on käytettävissä ylimääräisen höyryn hyödyntämiseksi sähkön tuottoon. Jos sekä lämmölle että sähkölle on huomattavaa kysyntää, niin sopivin vaihtoehto voisi olla kaasuturbiinipohjaisen järjestelmän höyryturbiini, jolloin lämpöä kaasuturbiinista käytetään höyryn tuottamiseen ja höyryturbiinia ylimääräisen höyryn hyödyntämiseksi. Sähköntarpeen tulisi tässä tapauksessa vastata tavallisen kaasuturbiinigeneraattorin tehoa. (Breeze 2014,65) Sähkökuorman pienentäminen ei yleensä pienennä lämpökuormaa samassa suhteessa, vaan lämpökuorman lasku on epälineaarista. (Veidenbergs 2008)

Taulukko 2. Esimerkki lämpökuorman ja sähkökuorman vaihtelusta (Veidenbergs 2008)

3. VAIHTOEHTOISET TEKNOLOGIAT

Täysin uusiutuvan energiajärjestelmän kehityksessä on keskeistä CHP laitosten lisäksi myös muut uusiutuvat energiajärjestelmät. Yhteistuotantoyksiköiden investointikustannuksia on vähennettävä huomattavasti ja investointikustannuksia pitäisi vähentää huolimatta poliittisista toimenpiteistä. Toimenpiteet kasvattavat CHP voimalaitosten taloudellisia kustannuksia, mutta myös monella sektorilla kannattavuutta. Samanaikaisesti huoltovälejä on pidennettävä huomattavasti jatkuvien käyttökustannusten alentamiseksi. Erityisesti laitoksissa, joissa käytetään biomassaa, on edelleen korkeat erityiskustannukset ja lyhyet huoltovälit. Lyhyet huoltovälit ja korkeat kustannukset vaikeuttavat biomassapohjaisten markkinoiden kasvamista. Korkeat kustannukset ja niistä johtuvat pitkät huoltoajat ovat merkittävä este CHP laitoksille muihin menetelmiin verrattuna. (Büchner 2013, 432)

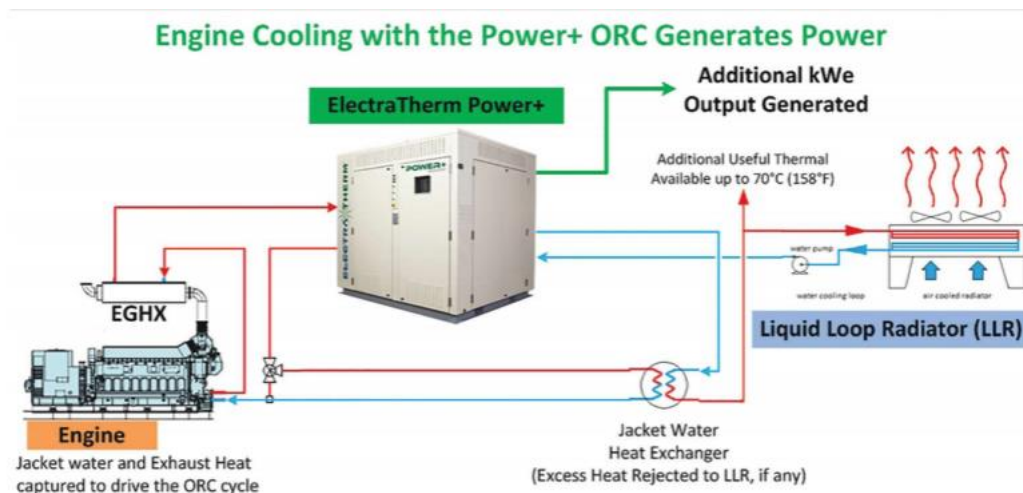
Kun vertaa pientä yhdistetyn lämmön ja sähköntuotantoa muihin suurempiin laitoksiin, muun muassa ydinvoimaloihin suunnittelun kannalta, huomataan että suuremmat yksiköt toimivat yleensä suuremmalla polttoainehyötysuhteella. Päägeneraattorit ovat maakaasukäyttöisiä turbiineja yhdistetyssä syklissä esimerkiksi juuri sähkön ja lämmön yhteistuotannossa tai pelkästään polttoturbiinina. Tämän seurauksena suuremmat yksiköt käyttävät siis vähemmän polttoainetta kuin pienet yksiköt tuotettua kilowattituntia kohti monessa laitoksen operointivaiheissa, mikä tekee laitoksesta joustavamman muutoksiin sekä kasvattaa myös laitoksen tehoa. (Goldsmith 2011)

Kehitystä on pienissä sähkön ja lämmöntuotantolaitoksissa tapahtunut, esimerkiksi kaasumoottorilla 5 megawatin kokoluokassa toimivan laitoksen hinta oli 1990 -luvulla noin 1000 dollaria kilowatilta. Nykyään saman kokoluokan laitos maksaisi asennettuna vain noin 700 dollaria kilowatilta. On siis syytä odottaa samanlaista kehityssuuntaa myös entistä pienemmissä kokoluokissa, varsinkin kun mikroturbiinit jatkavat kehittymistään. (Kolanowski 2011, 172) Pienen kokoluokan yhteistuotantolaitosten etuja ovat myös erilaiset sovellukset lämmöntalteenottoon liittyen. Esimerkiksi polttokennotekniikkaa käyttävien laitoksien hukkalämmöstä on hyödyllistä tuottaa höyryä. Kylläistä höyryä saadaan tuotettua enemmän pienemmissä höyrynpaineissa. Kun tuotetaan noin 1 baarin paineista höyryä lämmöntalteenotto vähenee puoleen 17

baarin paineessa tuotettuun höyryyn verrattuna. Pienempien laitoksien lämmöntarve on vähäisempi, joten on käytännöllisempää tuottaa höyryä pienemmässä paineessa. (Kolanowski 2011, 145)

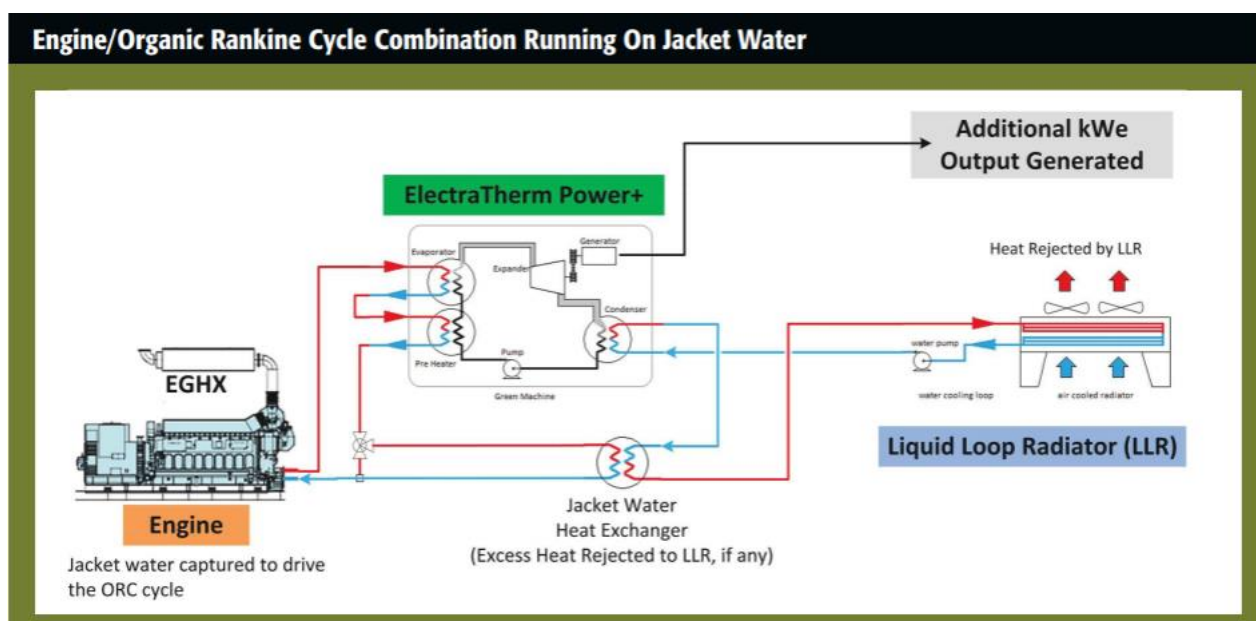
Polttokennojen hukkalämmöstä voidaan myös tuottaa jäähdytysvettä käyttämällä absorptiojäähdytintä, joka käyttää lämmönlähdettä nesteen, kuten litiumbromidin keittämiseen tyhjiössä. Neste toimii haihtumisen väliaineena jäähdytysveden tuottamiseksi. 300 kilowatin polttokennosta saadaan noin 25 tuhatta kiloa jäähdytysvettä täydellä teholla. (Kolanowski 2011, 146)

Myös ORC-teknologialla toimiva laitos voidaan valjastaa jäähdytystarpeisiin. ORC - tyyppinen generaattori, joka yhdistyy moottoriin sekä tuottaa lämmöstä sähköä, on monella tapaa hyödyllinen vaihtoehto tehokkaaksi moottorin jäähdytyslaitteeksi. Ensimmäinen ORC:n etu tulee sen hyödyntämästä ylimääräisestä sähköstä, jota muunnetaan hukkalämmön konversiossa sähköksi, ilman ylimääräistä polttoaineen kulutusta tai päästöjä. Toinen etu on loiskuorman vähentyminen tai kokonaan poistuminen moottorin tuulettimista. Loiskuorma eliminoiduu tuulettimista, koska generaattorin ja ORC-prosessin yhdistelmä toimii tuulettimien sijasta jäähdyttimenä, jolloin moottorin voimalla toimivia tuulettimia ei tarvita moottorissa. Ilman jäähdyttimen loiskuormaa, moottori tekee enemmän työtä sekä tuottaa enemmän sähköä. ORC-kierron ja generaattorin yhdistelmä voi kasvattaa polttoainehyötysuhdetta jopa 10 prosenttia alkuperäisestä ORC-kierrosta. Tämä riippuu moottorin koosta, laitoksen kokoonpanosta sekä ympäristön lämpötilasta laitoksella. (Fox 2016)



Kuva 5. Moottorin jäädytys ORC-kiertoa hyödyntämällä (Fox 2016)

Toinen vaihtoehto on jakaa ORC-kiertoon tulevat lämpövirrat kahtia, kuten kuvassa 6 nähdään. Kylmempi vesi esilämmittää kierron vettä ja kuumempi pakokaasujen lämpö hoitaa haihduttamisen. Tärkein hyöty on haihduttimeen tulevan lämpötilan kasvattaminen mahdollisimman suureksi, jolloin saadaan suurempi lämpötilaero kuuman ja kylmän puolen kiertojen välille. Mitä suurempi lämpötilaero kierrossa on, sitä suurempi on myös laitoksesta ulos saatava teho. (Fox 2016)



Kuva 6. Moottorin jäädytys ORC-kierrolla ja kahdella eri lämpövirralla (Fox 2016)

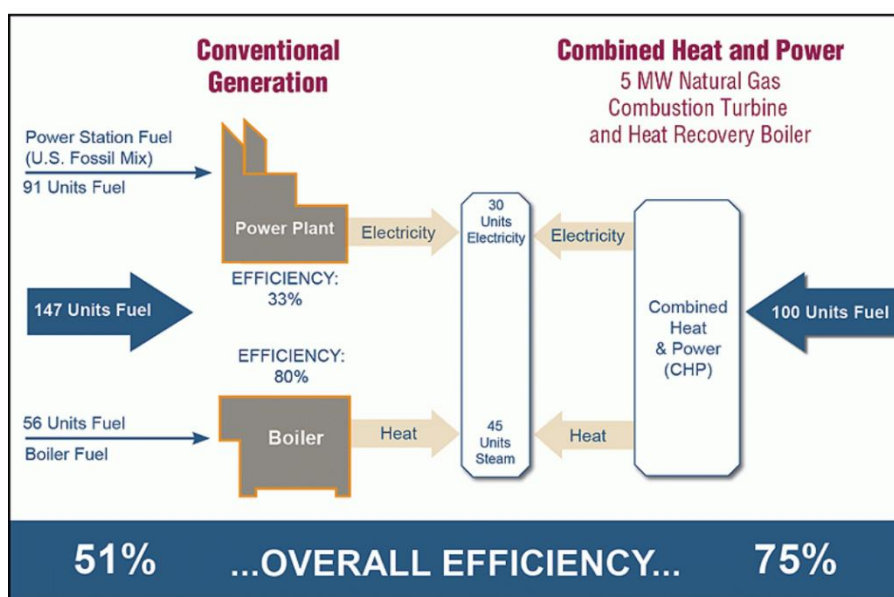
3.1. Lämpösähköiset generaattorit

Lämpösähköiset generaattorit ovat generaattoreja, jotka tuottavat sähköä lämpöenergiasta lämpösähköisen ilmiön eli Seebeck-ilmiön avulla. Suorituskyky ja hyötysuhde lämpösähköisissä generaattoreissa riippuu käytettyjen materiaalien ominaisuuksista, lämmönlähteen ja jäähdytyselementin lämpötilaerosta sekä jalkaparien lukumäärästä. Mitä suurempi lämpötilaero saadaan kylmän ja kuuman puolen välille, sitä korkeampi on hyötysuhde ja sähköteho. Materiaalien kestävyys takia kuumalle puolelle on arvioitu rajaksi lämpötilalle 250 astetta. Kylmällä puolella lämpötila määräytyy lämpökierron lämpötilan mukaan. Prosessin matalampien lämpötilojen takia sähköhyötysuhde laskee 5-6 prosenttia osakuormilla.

Lämpösähköisissä generaattoreissa ei ole liikkuvia osia, mikä vähentää huolto- ja käyttövaatimuksia ja johtaa meluttomaan toimintaan. Lämpösähköiset generaattorit ovat siksi sopivia käytettäväksi pellettikattiloissa, jotka on asennettu asuinalueille. Lisäksi sähköistä tukitehoa ei tarvita. Haittapuolena tekniikassa on sen homogeeniset ominaisuudet, joiden takia polttoaineena ei voida käyttää juuri muita polttoaineita kuin puupellettejä. Kiinteiden biopolttoaineiden käyttäminen pitäisi olla mahdollista, mutta mahdolliset epätasalaatuiset polttoaineet saattavat sisältää useita aineita, jotka palavat eri lämpötiloissa ja palamisen ollessa epätäydellistä palamistuotteena saattaa syntyä tuhkakäämiä. Lisäksi tekniikka toimii parhaiten matalissa teholuokissa eli noin 400 watin luokissa, jolloin hyötysuhde jää vain 2 prosenttiin. Tulevaisuudessa tavoitteena on kehittää tekniikkaa eteenpäin, siten että saataisiin kaksinkertaistettua sekä teho että hyötysuhde. (Büchner 2013)

4. PIENTEN CHP LAITOSTEN KOKONAISPOTENTIAALI

Pienissä CHP laitoksissa on paljon potentiaalia kasvattaa jo entisestään korkeaa hyötysuhdetta verrattuna erikseen tuotettuun lämpöön ja sähköön. Nykyään kuitenkin myös erillisen lämmön ja sähköntuotannon kilpailukyky on parantunut, koska sen osuus sähköntuotannosta on kasvanut. Tämä johtuu lisääntyneestä tarpeesta kasvattaa uusiutuvien energiamuotojen osuutta tuotannosta. Uusiutuvat energiamuodot ovat laskeneet keskimääräistä primäärienergian ja sekundäärienergian välistä suhdelukua. Lisäksi lämpöpumppujen suosio rakennusten lämmityksessä on osoittautunut erillisen tuotannon eduksi. Toisaalta myös CHP tuotanto hyötyy alemmasta primäärienergian kulutuksesta, sillä nyt sekä sähköä että lämpöä voidaan tuottaa käyttäen vähemmän energiaa ja yhä suurempi osuus energiasta saadaan uusiutuvista energialähteistä. CHP:n edut erilliseen tuotantoon verrattuna on tavallisesti arvioitu ottamalla huomioon kussakin sukupolven yksikössä tuotannon vuosittaiset tai nimellisarvot. Uusiutuvien energialähteiden tuotannon voimakkaat vaihtelut päivän ja vuoden aikana muuttavat kuitenkin jatkuvasti sähköverkosta saatavan sähkön primäärienergian ja sekundäärienergian suhdelukua. Tästä syystä nykyisissä olosuhteissa asianmukaisen vertailun on käsiteltävä näitä muuttuvia olosuhteita, koska vuotuiset analyysit eivät aina pidä täysin paikkaansa. (Noussan 2018)



Kuva 7. Esimerkki kokonaishyötysuhteesta yhdistetyllä 5MW:n laitoksella ja erillisellä tuotannolla (EPA 2019)

Esimerkkinä kuvassa 7 nähdään maakaasulla toimivan 5 megawatin tuotannollinen potentiaali verrattuna erillisesti tuotettuun sähköön ja lämpöön. 5 megawatin laitos tarvitsee selvästi vähemmän polttoainetta erilliseen tuotantoon nähden ja toimii korkeammalla hyötysuhteella.

4.1 pienten CHP laitosten optimointi

Biomassalla toimivien pienten CHP laitosten tulevaa leviämistä voidaan tukea edelleen lisäämällä aktiivisten järjestelmien käyttöä rakennusautomaatioissa. Yhdessä sopivien lämmön varastointilaitteiden kanssa aktiiviset rakennusautomaatiojärjestelmät sallivat sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen tehonsäädetyin toiminnan, samaan tapaan kuin sähkön varastointilaitteet mahdollistavat lämpöohjatun toiminnan. Molemmat lähestymistavat vähentävät sähkön määrää mahdollisimman paljon siitä sähkön määrästä, joka on syötettävä verkkoon tai poistettava siitä. (Büchner 2013)

Tulevaisuudessa pienen kokoluokan lämpöaktivoidut jäähdytysteknologiat tulevat yleistymään. Yhdistämällä jäähdytyslaitteet pieniin CHP laitoksiin voidaan parantaa polttoaineen hyötysuhdetta ja kasvattaa toiminta-aikaa. Kun kustannukset pienissä CHP laitoksissa sekä lämpöaktivoiduissa jäähdytysteknologioissa saadaan laskuun, voidaan teknologioita alkaa käyttää teollisiin sovelluksiin, joissa syntyy suuria jäähdytyskuormia. Yleensä lämpöaktivoidujen jäähdytyslaitteiden kapasiteetit kasvavat korkeammassa lämpötilassa. Kapasiteettien kasvu tapahtuu samanaikaisesti sillä aikaa, kun CHP laitoksen voimanlähteessä, kuten kaasumoottorissa, on suurempi kokonaishyötysuhde matalammalla lämmöntalteenottolämpötilalla. Tällöin laitoksesta maksimoidaan energian saanti pakokaasuista ja minimoidaan säteilyyn ja konvektioon liittyvät häviöt. (Beith 2011, 297)

Tulevaisuuden näkymät biomassan käytöstä pienissä yhteistuotantolaitoksissa riippuu siitä, kuinka paljon biomassan laatuun panostetaan. Järjestelmät, joissa on korkeat polttoaineen laatuvaatimukset, ovat tavallisesti kiinteän biomassan polttoon perustuvia järjestelmiä. Niitä tullaan perustamaan ensisijaisesti Keski-Eurooppaan ja mahdollisesti myös Pohjois-Amerikkaan. Tekniikat, joita voitaisiin käyttää paikallisesti saatavissa polttoaineissa ovat potentiaalisia maailmanlaajuisesti, etenkin hajautetussa

energiantuotannossa. Kaasun hyötykäyttö yhteistuotantoyksikössä näyttäisi parhaiten sopivan sellaisiin järjestelmiin, joissa tuotetaan polttoainekaasua ja jotka sisältävät energianmuuntovaiheen. Mikroanaerobisella pilkkomisella ja mikrokaasuilla voi olla tärkeä tehtävä polttoainekaasun tuotannossa. Raaka-aineina voidaan käyttää sekä paikallista biomassaa että orgaanista jätettä. Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto voisi silloin tapahtua loppupäässä eli kuluttajan pienessä CHP-yksikössä. (Büchner 2013)

CHP laitosten mallintamiseen vaikuttavat olennaisesti niiden suunniteltu kantokyky eli lämpökuorma sekä sähkökuorma. Suunniteltu kuorma on lämpökuorman ja sähkökuorman arvioitu summa ja kuorman avulla pystytään antamaan arvioita vuosittaiselle toiminta-ajalle laskemalla, kuinka pitkään laitoksen tulisi olla käynnissä laitokselle suunnittelulla teholla, jotta laitos tuottaisi vuosittaisen vaatimuksen verran lämpöä. Pienet CHP laitokset saattavat olla pitkiäkin aikoja osakuorma-ajolla. Tässä tapauksessa hyötysuhteen vaihtelut lisäävät epävarmuutta ja eivät houkuttele tekemään investointeja pieniin CHP laitoksiin. Parempi malli saataisiin erottamalla useamman ajokauden tulokset, jolloin jokainen ajokausi vastaa sen hetkisen prosessin olosuhteisiin tarvittavalla lämmön osakuormalla. Lisäksi mallissa voitaisiin ottaa muutamien kuormien vuosittainen kesto huomioon. Kaukolämpöverkkomallilla voidaan vielä entisestään optimoida CHP laitosten toimintaa. Kaukolämpöverkkomallin integroimisella voidaan arvioida paremmin prosessissa tapahtuvia muutoksia ja niiden vaikutuksia sekä tutkia kaukolämpöverkon kasvanutta tehoa verkkoon liitettyjen CHP laitosten toiminnan myötä. (Sipilä 2005,82)

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää pienten CHP laitosten mahdollisuuksia energiantuotannossa käyttäen apuna tieteellisiä kirjallisuuslähteitä ja tieteellistä tutkimusta. Työssä vertailtiin eri tekniikoiden vaikutusta laitosten energiantuotannon tehokkuuteen taloudellisesta ja teknisestä näkökulmasta.

Tulevaisuudessa uusiutuvien energiamuotojen yleistyessä CHP:n potentiaali kasvaa entisestään. Pienet laitokset ovat jo tällä hetkellä kannattavia ratkaisuja hajautetussa energiantuotannossa, koska niistä koituu vähemmän energiansiirtohäviöitä kuin keskitetyssä tuotannossa. Lisäksi nykyisistä tekniikoista, kuten höyryturbiinitekniikasta, kaasuturbiinitekniikasta ja orgaanisista kiertoaineista on paljon tutkimusta.

Hukkalämmön talteenotosta CHP laitoksissa on myös tehty paljon tutkimusta. Lupaava uusi tekniikka on polttokennotekniikka. Tulevaisuudessa polttokennolaitosten hyötysuhde tulee kasvamaan entisestään kaasutettaessa biomassaa yhdessä polttokennolaitoksen prosessissa tai kun yhdistetään polttokennolaitokseen esimerkiksi pieni kaasuturbiini.

Taloudellisesti pieniä CHP laitoksia tutkittiin sähkömarkkinoiden sekä muiden kustannuksien näkökulmasta. Sähkömarkkinat ovat nykyään kansainvälisiä spot-markkinoita, joissa vesivoiman ja tuulivoiman tuotannon tarve vaikuttaa tunneittain sähkön hinnan muodostumiseen. Laitoksen operoinnissa tärkeintä on myydä sähköä hinnan ollessa korkealla samanaikaisesti tuottaen riittävästi lämpöä asiakkaille. Muita kustannuksia tulee muun muassa laitosten ylläpidosta ja huollosta sekä epätasapainosta lämpötehon ja sähkötehon välillä. Pienissä CHP laitoksissa harvoin saavutetaan tasapainoa lämmön ja sähkön välille, sillä sähkökuorman laskeminen laskee lämpökuormaa epälineaarisesti.

Työssä selvitettiin lisäksi muita vaihtoehtoisia teknologioita pienissä CHP laitoksissa. Nämä teknologiat sisälsivät lämmön -ja sähköntuotannon lisäksi myös jäähdytysjärjestelmän. Muun muassa ORC-prosessia sekä polttokennoproessia voidaan hyödyntää voimalaitoksen jäähdytystarpeisiin. Lisäksi voimalaitoksissa voitaisiin käyttää lämpösähköisiä generaattoreita, mutta ne ovat vielä suorituskyvyltään paljon tavallisia generaattoreita huonompia sekä vaativat jatkokehitystä.

Pienten CHP laitosten optimoinnissa tulee ottaa huomioon laitosten toiminta-ajan oikeanlainen suunnittelu sekä hyödyntää kasvavia uusiutuvien energiamuotojen markkinoita. Uusiutuvien energiamuotojen tuotanto vaihtelee vuoden aikana voimakkaasti, joten tarvitaan uusia lähestymistapoja pienten CHP laitosten ja erillisen tuotannon väliseen arviointiin.

LÄHDELUETTELO

Atanasaoe, P., 2018. The Operating Strategies of Small-Scale Combined Heat and Power Plants in Liberalized Power Markets. *Energies*, **11**(11)

Bang-Moller, C., Rokni, M., Elmegaard, B., Ahrenfeldt, J. and Henriksen, U.B., 2013. Decentralized combined heat and power production by two-stage biomass gasification and solid oxide fuel cells.

Beith, Robert "Small and micro combined heat and power (CHP) systems; advanced design, performance, materials and applications", 2011, Reference and Research Book News, vol. 26, no. 5.

[https://books.google.fi/books?id=CHtwAgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Small+and+micro+combined+heat+and+power+\(CHP\)+systems;+advanced+design,+performance,+materials+and+applications%22,+2011&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwiKhcKyrсноAhUE7aYKHclwDooQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Small%20and%20micro%20combined%20heat%20and%20power%20\(CHP\)%20systems%3B%20advanced%20design%20C%20performance%2C%20materials%20and%20applications%22%2C%202011&f=false](https://books.google.fi/books?id=CHtwAgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Small+and+micro+combined+heat+and+power+(CHP)+systems;+advanced+design,+performance,+materials+and+applications%22,+2011&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwiKhcKyrсноAhUE7aYKHclwDooQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Small%20and%20micro%20combined%20heat%20and%20power%20(CHP)%20systems%3B%20advanced%20design%20C%20performance%2C%20materials%20and%20applications%22%2C%202011&f=false)

Breeze, P., 2017. *Fuel cells*. London: Academic Press, an imprint of Elsevier.

Bruno, J., 2004. Stand-alone and grid-connected performance analysis of a regenerative micro gas turbine cogeneration plant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **218**(1), s. 15-22.

Büchner D., Lenz V. (2013) Biomass Energy Small-Scale Combined Heat and Power Systems. In: Kaltschmitt M., Themelis N.J., Bronicki L.Y., Söder L., Vega

L.A. (eds) Renewable Energy Systems. Springer, New York, NY https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-1-4614-5820-3_249

Eames, I., 2016. A Comparative Study of Open and Closed Heat-Engines for Small-Scale CHP Applications. *Energies*, **9**(3), s. 130.

Elsner, W., 2017. Experimental and economic study of small-scale CHP installation equipped with downdraft gasifier and internal combustion engine. *Applied Energy*, **202**, s. 213-227.

Fox, J., 2016. Small-Scale Cogeneration. *Midstream Business*, **6**(2), s. 77.

Gibson, C.A., 2016. A methodology to compare the economic feasibility of fuel cell-, gas turbine- and microturbine-based combined heat and power systems. *International Journal of Energy Research*, **40**(7), s. 983-1008.

Goldsmith, M., 2011. Scale Matters. *Mechanical Engineering*, **133**(4), s. 45-47.

Kolanowski, Bernard.F "Small-scale cogeneration handbook, 4th ed", 2011, Reference and Research Book News, vol. 26, no. 6.

<https://books.google.fi/books?id=8Jedakxqh3AC&printsec=frontcover&dq=small+scale+cogeneration+handbook+2011&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjXubCAnMDpAhVR2aYKHfooBa4Q6AEIJzAA#v=onepage&q=small%20scale%20cogeneration%20handbook%202011&f=false>

Lund, H. and Andersen, A.N., 2005. Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices.

Noussan, M., 2018. Combined vs separate heat and power production – Primary energy comparison in high renewable share contexts. *Applied Energy*, **213**, s. 1-10.

Pantaleo, A.M., 2015. Small scale biomass CHP: Techno-economic performance of steam vs gas turbines with bottoming ORC. *Energy Procedia*, **82**, s. 825-832.

Paul Breeze, 2014. Chapter 6 - Combined Heat and Power.

Salomón, M., 2011. Small-scale biomass CHP plants in Sweden and Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(9), s. 4451-4465.

Savola, T. and Fogelholm, C., 2006. Increased power to heat ratio of small scale CHP plants using biomass fuels and natural gas.

Sipilä, K., 2005. Small-scale biomass CHP plant and district heating. VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, (2301),.[verkkojulkaisu]

Takalo, H.,2013. Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitekantaselvitys-sekä-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf [verkkojulkaisu]
http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf

Uusitalo, A., 2017. Evaluation of a small-scale waste heat recovery organic Rankine cycle. *Applied Energy*, **192**, s. 146-158.

United States Environmental Protection Agency (EPA). EnviroAtlas. CHP benefits (13.5.2019) [verkkojulkaisu] <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>

Veidenbergs, I., 2008. Small-Scale Cogeneration Plant Data Processing and Analysis.
Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, **45**(3), s. 25