

Liisa Jaakkola

# PIENITEHOISET SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOLAITOKSET

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
Elokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Liisa Jaakkola: Pienitehoiset sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset  
Micro combined heat and power systems  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Elokuu 2021

---

Ilmastonmuutoksen kannalta on tärkeää löytää energiantuotantomuotoja, joissa pystytään minimoimaan hukkaenergian muodostuminen ja hyödyntämään uusiutuvaa energiaa. Mikroteholuokan lämmön ja sähkön yhteistuotannossa (mCHP) yhdistyvät yhteistuotannon ja hajautetun energiantuotannon hyödyt, mikä tekee siitä potentiaalisen ja ilmastoystävällisemmän energiantuotantomuodon. Tässä työssä esitellään mCHP-laitosten etuja ja haittoja, käyttökohteita sekä uusiutuvien energianlähteiden tuotantoteknologioita ja soveltuvuutta mCHP-laitoksiin.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa hyötysuhde saadaan nostettua erillistuotantoon verrattuna korkealle, mikäli sekä lämmön- että sähköntuotannolle on tarvetta. Hajautettu tuotanto sen sijaan minimoi energiansiirrosta aiheutuvia häviöitä sekä lämmön- että sähkönsiirrossa. Mikro-CHP-laitoksissa saadaan siis polttoaineesta enemmän tehoa irti, eikä hukata energiaa siirrossa. Tämä säästää polttoainekustannuksia ja vähentää kasvihuonepäästöjä. Ongelmia mCHP-laitoksille tuottaa talvi- ja kesäkauden erilainen lämmön- ja sähköntarve. Tämä aiheuttaa haasteita laitoksen mitoittamiseen, ja laitos onkin mitoitettava kesäkauden tarpeiden mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että talvikaudella mCHP-laitos ei riitä tuottamaan riittävästi sähköä ja lämpöä, jolloin energiaa on lisäksi tuotettava muualta tai ostettava muualta, mikä heikentää mCHP-laitosten alkuperäistä ideaa omavaraisesta energiantuotannosta. Lisäksi mCHP-teknoLOGIAT ovat vielä kustannuksiltaan kalliita ja vain harvoissa olosuhteissa taloudellisesti kannattavia.

Mikro-CHP-laitokset soveltuvat hyvin käytettäväksi pienissä omakotitaloyhteisöissä tai pienissä kouluissa. Suomalaisiin omakotitaloihin mCHP-laitokset soveltuvat hyvin, sillä Suomen kylmät olosuhteet vaativat kotien lämmitystä ja pimeät olosuhteet lisäävät sähkön kulutusta. Lisäksi omakotitaloissa hyödynnetään lämmintä käyttövoimaa. Ilmastonmuutoksen kannalta tärkeää on hyödyntää uusiutuvia energianlähteitä. Mikro-CHP-laitoksiin parhaiten soveltuvat uusiutuvat energianlähteet ovat biomassa ja aurinkoenergia. Aurinkoenergia on haasteellinen Suomessa, sillä talvisin sitä on saatavilla hyvin vähän, eikä sitä näin ollen pysty käyttämään ainoana energianlähteenä. Siksi biomassa on Suomen olosuhteissa otollisin vaihtoehto. Se on myös ainoa uusiutuva energianlähde, jota on saatavilla silloin kun sitä tarvitaan. Biomassalle soveltuvia energiantuotantomuotoja ovat Stirling-moottori, orgaaninen Rankine -prosessi (ORC) ja höyryprosessi.

Työn tulokseksi saatiin, että biomassaa polttoaineenaan käyttäville mCHP-laitoksille sopivimmat energiantuotantotekniikat ovat Stirling-moottori ja orgaaninen Rankine -prosessi (ORC). Näistä Stirling-moottorin tekniikka on kehittyneempi, mutta ORC edullisempi. Jotta mCHP-laitokset tulisivat vielä taloudellisesti kannattavaksi, vaatisi se lainsäädännön tukea. Tämä tarkoittaa sitä, että fossiilisten polttoaineiden hinnat nousevat ja biomassaa käyttävien mCHP-laitosten rakentamista tuetaan.

Avainsanat: Avainsanat: Sähkön ja lämmön yhteistuotanto, mCHP

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANNON HISTORIA .....	2
3. PIENITEHOISTEN SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOLAITOSTEN OMINAISUUDET .....	4
3.1 Edut .....	4
3.2 Huonot puolet.....	5
4. UUSIUTUVIEN ENERGIANLÄHTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN MIKRO-CHP- LAITOKSISSA .....	8
4.1 Biomassa ja biopolttoaineet .....	8
4.2 Aurinkoenergia.....	10
5. MIKRO-CHP TEKNOLOGIAT .....	11
5.1 Höyryprosessi .....	11
5.2 Stirling-moottori.....	11
5.3 Orgaaninen Rankine -prosessi.....	13
5.4 Taloudellinen näkökulma .....	13
6. KÄYTTÖKOHTEET .....	14
7. YHTEENVETO.....	15
LÄHTEET .....	16

# 1. JOHDANTO

Energiaa on tuotettu jo vuosien ajan CHP-laitoksissa (combined heat and power) eli sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Kun sähköä tuotetaan polttamalla polttoainetta, lämpöä syntyy sivutuotteena. CHP-laitoksissa tämä niin sanottu hukkalämpö käytetään hyödyksi ja lämpöä jopa pyritään tuottamaan enemmän, jotta laitoksen kokonaishyötysuhdetta saadaan parannettua. (Beith 2011)

CHP-laitosten koko määritellään sen tuottaman sähkötehon mukaan. Pienet CHP-laitokset tuottavat alle 100 kW sähkötehoa ja mikro-CHP (mCHP) laitokset tuottavat alle 15 kW sähkötehoa. Mikro-CHP laitokset soveltuvat erityisen hyvin julkisten rakennusten, kuten sairaaloiden ja koulujen, tarpeisiin sekä pienten omakotitaloyhteisöjen yhteiskäyttöön. (Maghanki et al. 2013)

Tässä kandidaatintyössä keskitytään mikro-CHP-laitoksiin. Kasvavan energiantarpeen ja ympäristötietoisuuden lisääntyessä innovatiivisempia ja tehokkaampia teknologioita, kuten mikro-CHP-laitoksia on tutkittu paljon (Beith 2011). Tässä työssä tutkitaan millaisia mahdollisuuksia ja käyttökohteita mikro-CHP-laitoksilla on erityisesti Suomen olosuhteissa. Lisäksi selvitetään miten uusiutuvat energianlähteet soveltuvat mCHP-laitoksiin. Esimerkiksi biomassan on tutkittu soveltuvan hyvin mikro-CHP-laitosten polttoaineeksi (Dong et al. 2012). Tässä työssä tutkitaan erityisesti biomassan potentiaalia mikro-CHP-laitosten polttoaineeksi Suomessa.

Luvussa 2 käsitellään yleisesti sähkön- ja lämmöntuotannon historiaa. Tämän jälkeen luvussa 3 siirrytään käsittelemään mikrokokoluokan sähkön- ja lämmöntuotantolaitosten ominaisuuksia. Luvussa käydään läpi, mitä etuja ja huonoja puolia mCHP-laitoksissa on. Luvussa 4 käydään läpi uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämistä mCHP-laitoksissa. Luvussa 5 käydään läpi erilaisia mCHP-teknologioita. Luvussa 6 käsitellään mCHP-laitosten käyttökohteita. Lopuksi luvussa 7 on yhteenveto.

## 2. SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANNON HISTORIA

Teollisuuden vallankumouksen aikana 1800-luvulla poltettiin hiiltä, jotta saatiin aikaiseksi vesihöyryä. Vesihöyryn energiaa onnistuttiin muuntamaan mekaaniseksi energiaksi ja mekaanista energiaa hyödyntämään akselien ja väkipyörien avulla erilaisten laitteiden käyttöön. Insinöörit ymmärsivät, että prosessista syntyvää hukkalämpöä pystyttiin hyödyntämään talviaikana tehtaan lämmittämiseen. Sähkön tuotannossa mekaanista energiaa alettiin hyödyntämään 1900-luvun alussa, ja prosessissa syntyvää hukkalämpöä hyödynnettiin edelleen. Nämä laitokset olivat nykyisten CHP-laitosten varhaisia versioita. (Beith 2011)

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto säilytti paikkansa teollisuudessa koko 1900-luvun ajan, jolloin energian tuotanto paikan päällä oli kannattavaa prosessien kannalta sekä taloudellisista ja turvallisuussyistä (Beith 2011). Kaukolämpö kehitettiin 1900-luvulla, ja sen kiinnostavuus kasvoi sähköntuotannon yleistyttyä Euroopassa 1920- ja 1930-luvuilla. Tämän jälkeen meni kuitenkin vielä vuosia ennen kuin 1950-luvulla kaukolämpöverkostoja perustettiin muun muassa Skandinaviaan. Yhteistuotannon ja CHP-tekniikoiden kehittymisen kannalta kaukolämpöverkostojen rakentaminen oli positiivinen asia. (Breeze 2018)

Yhteistuotannon merkitys oli hiipua, kun suuren kokoluokan sähköntuotantolaitoksia alettiin rakentaa kauemmas käyttökohteistaan ja lähemmäs polttoaineiden lähteitä kuljetuskustannusten vähentämiseksi. Yhteistuotannossa seuraava merkittävä kehitys tapahtui kuitenkin 1970- ja 1980-luvuilla, kun maakaasun saatavuus laajeni ja monet paljon energiaa käyttävät teollisuuden alat palasivat yhteistuotannon hyödyntämiseen alentaakseen energiakustannuksia. Kaasuturbiineihin otettiin käyttöön integroidut ohjausjärjestelmät, jotka sisälsivät varhaisimpia ohjelmoitavia elektronisia laitteita. Kun näiden järjestelmien kustannukset ajan myötä laskivat, niitä tuli saataville myös pienemmillä generaattoreilla, ja siten CHP-tekniikkaa kyettiin hyödyntämään yhä enenevässä määrin erikokoisissa laitoksissa ja erilaisissa sovelluksissa. (Beith 2011)

Kehitys jatkui 1990-luvulla, kun uudet innovaatiot laajensivat entisestään CHP-laitosten ominaisuuksia ja soveltamisaloja. Esimerkiksi mikrokaasuturbiineissa alettiin käyttämään nykyaikaisia materiaaleja ja ilmalaakereita. Lisäksi kierron tehokkuutta kasvatettiin

hyödyntämällä savukaasun lämpöenergiaa palamisilman esilämmittämiseen. Vuositu-  
hannen vaihteessa alettiin tutkia mikroteholuokan CHP-laitoksia. (Beith 2011)

Nykyään sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten tarkoitus on tuottaa sähköä ja läm-  
pöä erilaisiin tarpeisiin ja käyttökohteisiin (Horak & Murugan 2006). Esimerkiksi omako-  
titalon energiatarve koostuu sähköstä, lämmityksestä sekä lämpimästä käyttövedestä  
(Brandon et al. 2013). Yhteistuotannolla on tärkeä merkitys myös tietyillä teollisuuden  
aloilla. Esimerkiksi paperi- ja kemianteollisuudessa tehtaat käyttävät paljon sekä sähköä  
että lämpöä, jolloin oman tehtaan yhteydessä olevalla CHP-laitoksella voidaan saavuttaa  
taloudellista hyötyä kontrolloimalla sähkön kustannuksia ja käyttämällä syntynyttä läm-  
pöä teollisuuden prosesseissa. (Breeze 2018)

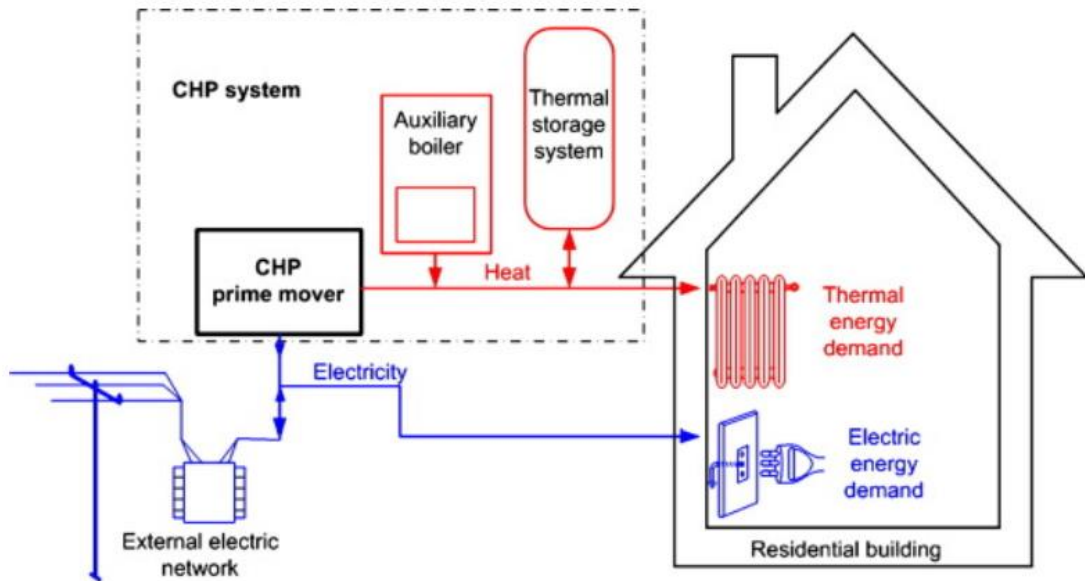
## 3. PIENITEHOISTEN SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTOLAITOSTEN OMINAISUUDET

Mikro-CHP-laitokset ovat kooltaan ja teholtaan pienimpiä CHP-laitoksia. Niiden sisältämä teknologia voidaan rakentaa pieniin rakennuksiin ja omakotitaloihin. (Beith 2011)

### 3.1 Edut

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on teknologia, joka mahdollistaa tuotetun energian paremman hyödyntämisen verrattuna erillistuotantoon. Siksi se myös vähentää hiilidioksidipäästöjä. (Horak & Murugan 2006) Pienitehoiset CHP laitokset ovat kasvava energiantuotantomuoto, jolla on potentiaalia kasvattaa energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä vähentämällä primäärienergian kulutusta. Se voi ratkaista monia energian tuotantoon liittyviä ongelmia esimerkiksi vähentämällä kasvihuonekaasuja, hajauttamalla energiantuotantoa, lisäämällä turvallisuutta sekä vähentämällä merkittävästi siirrosta aiheutuvia energiahäviöitä. Tietyissä olosuhteissa ja hyvin käyttötarkoitukseensa suunnitellulla mCHP laitoksella voi olla myös taloudellista hyötyä kuluttajalle. (Maghanki et al. 2013)

Erilliset mCHP-laitokset toimivat itsenäisesti, joten normaaleja sähkön jakeluverkkoja koskevat väliaikaiset ongelmat eivät vaikuta mCHP-laitoksen asiakkaiden sähkön saamiseen (Galogah et al. 2013). Tällaisia ongelmia on esimerkiksi myrskyjen aiheuttamat sähkökatkot, jotka johtuvat puiden kaatumisesta sähkölinjan päälle. Kuvasta 1 nähdään, miten CHP-laitos on kytköksissä omakotitaloon.



**Kuva 1.** Havainnekuva omakotitalon mCHP-laitoksesta (Bianchi et al. 2012)

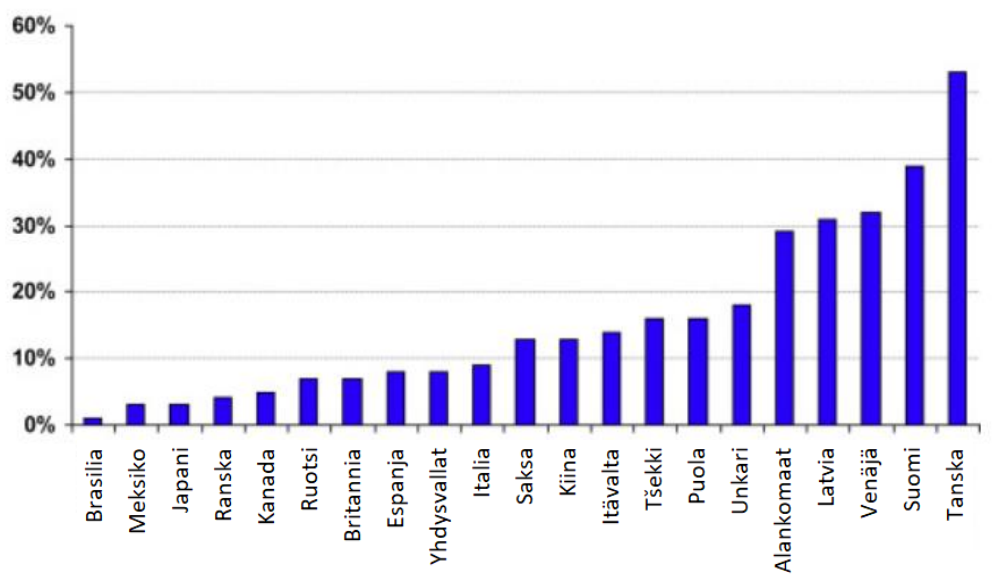
Merkittävin hyöty mCHP-laitoksen sijoittamisesta lähelle sähkön ja lämmön käyttökohdetta on energiahäviöiden minimointi. Erityisesti lämpöä siirrettäessä merkittävä osa lämmöstä menee hukkaan. Kun lämpöä ei tarvitse siirtää pitkiä matkoja, vähenee siirron aiheuttamat lämpöhäviöt. Myös sähkönsiirrossa voimalinjojen resistanssi kuluttaa sähkötehoa ja muuntaa sitä lämmöksi. (Beith 2011)

### 3.2 Huonot puolet

Jotta mCHP-laitoksia voidaan hyödyntää, vaatimuksena on sekä lämmön että sähkön tarve (Bianchi et al. 2012). Erityisesti Suomen kylmissä olosuhteissa tämä vaatimus täyttyy.

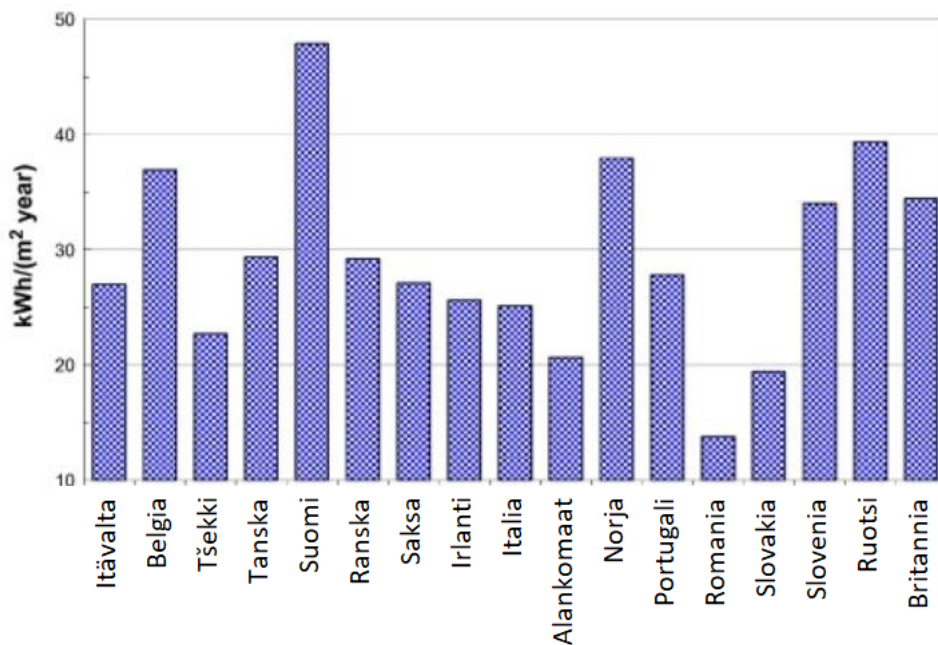
Kuvasta 2 nähdään, että Suomessa lähes 40 % tuotetusta sähkötehosta tuotetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa. Tästä voidaan päätellä, että Suomessa olisi kysyntää myös mCHP-laitoksille. Pienitehoiset mCHP-laitokset käyvät läpi nopeaa kehitystä ja niiden markkinat vaikuttavat lupaavilta (Galogah et al. 2013).





**Kuva 2.** CHP-laitosten tuottaman sähkötehon osuus kokonaistuotannosta (muokattu; Maghanki et al. 2013)

Ongelmana kuitenkin voidaan nähdä kesän ja talven erilaiset vaatimukset lämmön ja sähkön tuotannon suhteissa. Haasteena on, miten suunnitella laitos niin, että se pystyy vastaamaan mahdollisimman hyvin energian määrän ja muodon vaihteluun. Kuva 3 esittää sähkön kulutusta eri valtioissa. Siitä voidaan havaita, että Suomessa myös sähkönkulutus on muihin maihin verrattuna merkittävää.



**Kuva 3.** Valaistuksen ja laitteiden sähkönkulutus maittain (2006). (muokattu; Bianchi et al. 2012)

Jotta mCHP-laitoksen käyttö ja siten myös taloudellinen ja ympäristölle edullisin hyöty voidaan saavuttaa, on laitos mitoitettava kesäkauden tarpeiden mukaisesti. Kesällä energian tarve on lähinnä sähkön tuotannossa ja käyttöveden lämmittämisessä (Brandon et al. 2013). Tällöin talvikaudella mCHP-laitos ei riitä kattamaan riittävää energiantuotantoa, vaan sen rinnalla on käytettävä muuta teknologiaa lämmön- ja sähköntuotantoon tai ostettava sähkö- ja lämmitysenergia muualta.

## 4. UUSIUTUVIEN ENERGIANLÄHTEIDEN HYÖDYNTÄMINEN MIKRO-CHP-LAITOKSISSA

Kiihtyneen ilmastonmuutoksen vuoksi on tärkeää löytää ja hyödyntää ympäristöystävällisempiä, mutta halpoja uusiutuvia energialähteitä (Beith 2011). Monia uusiutuvia energialähteitä käytetään tällä hetkellä ainoastaan sähkön erillistuotantoon (Bouvier et al. 2012). Uusiutuvan energian teknologioita on kuitenkin mahdollista integroida CHP-teknologioihin (Beith 2011). Sähkön ja lämmön yhteistuotantoa ajatellen merkittävimpiä uusiutuvia energianlähteitä ovat aurinkovoima, biopolttoaineet ja biomassa (Bouvier et al. 2012).

### 4.1 Biomassa ja biopolttoaineet

Biomassaa on käytetty lämmitykseen ja valaistukseen aivan sivistyksen syntyajoista lähtien ja se on ollut tärkeä energialähde yhteiskunnassa. Teollisen vallankumouksen alkamisen jälkeen biomassan merkitys väheni, kun korkeamman energiatihedden omaavat hiili, maakaasu, öljy ja turve tulivat saataville. Ilmastonmuutoksen myötä biomassan merkitys on jälleen kasvamassa. Se on ainoa suuren mittakaavan uusiutuva energialähde, jolla on mahdollisuus vastata globaaliin energiantarpeeseen. (Dong et al. 2012)

Terminä biomassa kattaa suuren joukon erilaisia biologista alkuperää olevia materiaaleja, joita voidaan hyödyntää energianlähteenä tai joiden sisältämiä kemiallisia komponentteja voidaan hyödyntää jatkojalostamalla esimerkiksi biopolttoaineeksi. Bioenergialla tarkoitetaan energiaa, joka on lähtöisin biomassasta. Biopolttoaineella sen sijaan tarkoitetaan kiinteää tai kaasumaista polttoainetta, joka on tuotettu biomassasta. Biokaasulla tarkoitetaan kaasumaista polttoainetta, joka sisältää 40–80 tilavuus-% metaania ja joka on tuotettu biomassasta anaerobisen eli hapettoman käymisen kautta. (Beith 2011)

Biomassa on tällä hetkellä maailman neljänneksi suurin energialähde hiilen, öljyn ja maakaasun jälkeen. Maailman primäärienergiankulutuksesta biomassan arvioidaan kattavan noin 10 %. (Beith 2011) Energiantuotannossa biomassaa on harvoin käytetty suuressa mittakaavassa. Useimmiten biomassa on esimerkiksi sahausjätettä tai jonkin muun teollisen prosessin sivutuotetta, jota hyödynnetään energianlähteenä. Lähiaikoina biomassan käyttö on nostanut suosiotaan myös siksi, että se on ainoa merkittävä uusiutuva energialähde, jota on saatavilla juuri silloin, kun sitä tarvitaan. (Dong et al. 2012)

Kun otetaan huomioon kestävästi tuotetun biomassan koko elinkaari, on biomassa lähestulkoon hiilineutraali energianlähde (Dong et al. 2012). Kasvaessaan biomassa sitoo itseensä sen verran hiilidioksidia, kuin se poltettaessa vapauttaakin. Biomassan tuottamat nettopäästöt liittyvätkin sen tuotantoon, kuten kasvattamiseen, hakkuuseen ja prosessointiin, sekä biomassan siirtämiseen, mikäli näissä vaiheissa hyödynnetään polttoaineena fossiilisia polttoaineita. (Beith 2011)

Tällä hetkellä kustannustehokkain keino lisätä biomassan kapasiteettia on kuitenkin polttaa sitä yhdessä hiilen kanssa. Tämä on ongelmallista siinä suhteessa, että se ei poista fossiilisten polttoaineiden käytön ongelmaa. Näin fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan vähentää ja samalla hiilidioksidipäästöjä, mutta toisaalta se ei luo ratkaisuja sille, että fossiilisten polttoaineiden polttamisesta voitaisiin luopua kokonaan. Toiseksi kustannustehokkain tapa olisi muuttaa jo olemassa olevat hiilivoimalat polttamaan puhtaasti biomassaa. Kustannustehokkuudeltaan huonoin vaihtoehto on rakentaa uusia erillisiä biomassalla toimivia laitoksia, kuten mCHP-laitoksia. Huomioitavaa kuitenkin on, että vaikka ne eivät yleisesti ottaen olisikaan kustannustehokkaita, vaikuttaa esimerkiksi laitoksen sijainti vahvasti siten, että ne voivat olla taloudellisesti kannattavia rakentaa. (Dong et al. 2012)

Näillä kaikilla kolmella keinolla yhteistä on se, että ollakseen taloudellisesti kannattavia ne kaikki vaativat lainsäädännön tukea. Useimmissa Euroopan maissa pienen kokoluokan laitoksia suositaan lainsäädännössä, sillä paikallisille yhteisöille koituvat hyödyt katsotaan olevan niin merkittävät, että ne kompensoivat korkeammat kustannukset. (Dong et al. 2012)

Suomessa koko energiantuotannosta 18 % on bioenergiaa ja suunnitelmissa on nostaa se jopa 23 %:iin vuoteen 2025 mennessä (Dong et al. 2012). Biopolttoaineella käyville mikro-CHP-laitoksille olisi siis kysyntää erityisesti Suomessa.

Biomassa soveltuu parhaiten käytettäväksi juuri hajautetussa tuotannossa, kuten pienissä- ja mikrokokoluokan CHP-laitoksissa. Tämä siitä syystä, että biomassalla on pieni lämpöarvo esimerkiksi hiileen verrattuna. Hajautetussa tuotannossa kuljetusmatkat ovat lyhyet, joten kuljetuskustannukset pysyvät pieninä. (Beith 2011)

Polttoaineenaan biomassaa käyttäviä mikro-CHP-laitoksia on tutkittu viimeisten vuosikymmenien aikana runsaasti. Runsaasta tutkimuksesta huolimatta, nämä laitokset sisältävät vielä paljon ei-toivottuja kustannuksista ja teknistä epävarmuutta, jotka vaatisivat merkittävää teknistä kehittymistä tulevaisuudessa. Biomassaa polttoaineenaan käyttä-

vät mikro-CHP-laitokset saadaan taloudellisesti kannattavaksi ainoastaan, jos maakaasun ja sähkön hinnat nousevat odotetusti ja mikäli biomassan konversioteknologiat sekä biomassan toimituksen infrastruktuuria saadaan kehitettyä. (Beith 2011)

## 4.2 Aurinkoenergia

Aurinkoenergia on käytännössä loppumatonta. Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden varastojen arvioidaan riittävän nykykulutuksella alle 150 vuotta. Sen sijaan, mikäli kaikki maahan saapuva aurinkoenergia kyettäisiin hyödyntämään, riittäisi vuodessa auringosta saatu energiamäärä kattamaan vuosittaisen kokonaisenergiankulutuksen yli 6000 vuodeksi. (Bouvier et al. 2012)

Aurinkoenergian käytössä ongelmana on se, että sitä pystytään hyödyntämään vain silloin, kun aurinko paistaa. Siksi aurinkovoimaa on järkevää käyttää vain yhdessä esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden kanssa siten, että fossiilista polttoainetta käytetään peruskuormana, kun aurinkoenergiaa ei ole saatavilla eli aurinko ei paista. (Aoun et al. 2012)

Primäärienergiana aurinkovoimaa käyttäviä tekniikoita mCHP-järjestelmille on useita ja ne voidaan jakaa kahteen pääluokkaan. Aurinkosähköjärjestelmät (engl. Photovoltaic systems, PV) käyttävät auringonvaloa sähkön tuottamiseen. Aurinkolämpöjärjestelmät (engl. Solar Thermal Electricity systems) perustuvat siihen, että auringonsäteet lämmitävät välittäjäainetta ja lämpö muunnetaan mekaaniseksi energiaksi ja edelleen sähköksi esimerkiksi turbiinien avulla. Aurinkolämpöjärjestelmät vaativat korkean lämpötilan, mikä saadaan aikaiseksi keskittämällä auringon valoa. Keskittämisestä huolimatta aurinkolämpöjärjestelmät toimivat vain sellaisilla sijainneilla, joissa auringonsäteilyn määrä on korkea. (Bouvier et al. 2012)

Aurinkosähköjärjestelmät eivät itsessään ole yhteistuotantolaitoksia, mutta niitä voidaan käyttää hybridinä yhdessä aurinkolämpöjärjestelmän kanssa. Aurinkopaneelien sähköteho heikkenee paneelin kuumentuessa. Hybridisysteemissä aurinkolämpöjärjestelmällä poistetaan auringonsäteistä lämpöä, jolloin aurinkopaneelin lämpötila pysyy alhaisena ja näin ollen teho säilyy korkeampana. Aurinkolämpöjärjestelmän avulla saadaan tuotteeksi sähkön lisäksi lämpöä. (Bouvier et al. 2012)

Aurinkoenergiaa on mahdollista hyödyntää CHP-laitoksissa lisänä esimerkiksi jäähdytyksessä. Kun aurinko paistaa voimakkaimmin, on usein jäähdytyksellekin suurempi tarve. Tällöin aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää lisäämässä jäähdytyksen tehoa. (Beith 2011) Koska erityisesti Suomen olosuhteissa aurinkoenergiaa ei pystytä käyttämään yksinään mCHP-laitoksissa, ei tässä työssä käsitellä aurinkoenergiaa tämän enempää.

## 5. MIKRO-CHP TEKNOLOGIAT

Nykyään voidaan määritellä neljä jo olemassa tai kehitteillä olevaa mikro-CHP teknologiaa, joiden energianmuuntamisprosessit eroavat toisistaan. Nämä neljä teknologiaa ovat mäntämootorit, polttokennot, Stirling-mootorit sekä höyrykoneet. (Aoun et al. 2012) Luvussa 4 todettiin, että biomassa olisi Suomen olosuhteissa toimivin uusitutuva energianlähde mCHP-teknologioihin. Tässä luvussa esitellään eri teknologioiden soveltuvuutta laitoksiin, joissa polttoaineena käytetään biomassaa.

### 5.1 Höyryprosessi

Tyypillisesti biomassaa polttoaineenaan käyttävissä CHP-laitoksissa tuotetaan sähköä höyryprosessissa, jossa vesi höyrystetään kattilassa polttamalla biomassaa (Dong et al. 2012). Biomassan polttoon voidaan käyttää erilaisia tekniikoita. Arinapoltossa biomassa kulkee kattilan läpi arinalla, jossa se poltetaan ja jonka pohjalla olevista rei'istä puhalletaan kattilaan polttoilmaa. Toinen tekniikka on leijupoltto. Siinä biomassa sekoitetaan yleensä hiekan kanssa ja seos pidetään suspentoituneena sisään tulevan ilman avulla. Leijupetikattilassa vallitseva lämpötila mahdollistaa pienet polton NOx ja SOx päästöt. Pölypoltossa biomassa jauhetaan hienoksi pulveriksi, minkä jälkeen se poltetaan kattilassa polttimella yhdessä ilman kanssa (Bouvier et al. 2012) Nämä toimivat suurissa laitoksissa, mutta pienemmän kokoluokan laitoksissa niitä pidetään liian kalliina (Dong et al. 2012).

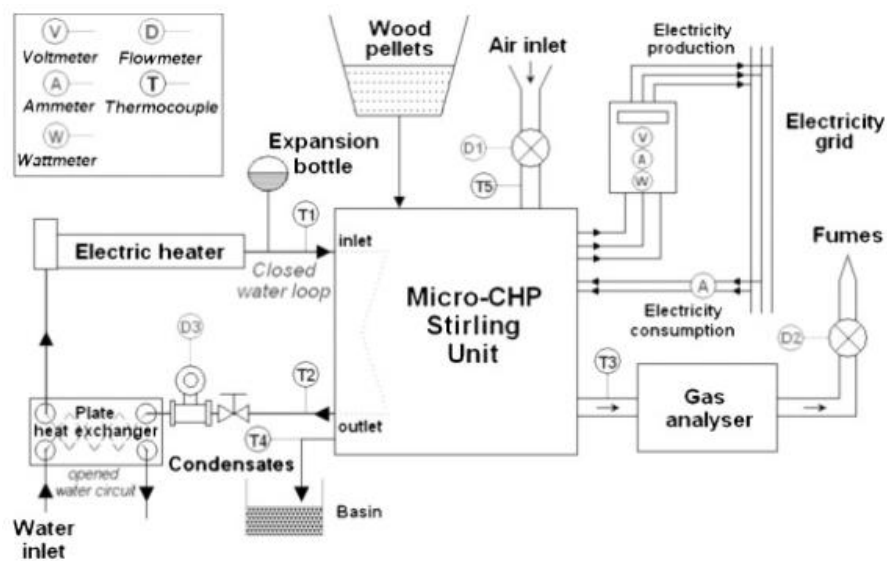
Biomassan kaasutus on terminen konversioteknologia, jossa kiinteä massa muunnetaan poltettavaksi kaasuksi. Kaasutukseen perustuvat CHP-teknologiat mahdollistavat paremman sähköhyötysuhteen verrattuna suoraan polttoon perustuviin CHP-teknologioihin. (Dong et al. 2012)

### 5.2 Stirling-moottori

Ulkoiset polttotekniikat (external combustion) näyttävät soveltuvan parhaiten biomassaa polttoaineenaan käyttäville mikro-CHP-laitoksille. (Bouvier et al. 2012) Yksi tällainen on Stirling-moottori. Yksinkertaisimmillaan Stirling-moottori sisältää kaksi mäntää, jotka liikkuvat eristetyssä sylinterissä. Sylinterin lämpimässä päässä ulkoinen lämmönlähde tuottaa lämpöä ja saa työaineen laajenemaan. Vastaavasti kylmässä päässä jäähdytysvesi poistaa työaineesta lämpöä ja saa työaineen supistumaan. Lämmönvaihtimien kautta prosessiin siirtyvä ja siitä poistuva lämpö pakottavat männät liikkumaan sisään ja ulos.

Voimansiirtolinjan avulla mäntien lineaarinen liike muutetaan pyöriväksi, mikä mahdollistaa sähköntuotannon. Prosessissa syntyvä lämpö saadaan käytettyä hyödyksi, kun lauhduttimessa lämmenneeseen ulostuloveteen siirretään lämmönvaihtimien kautta vielä lämpöä poltossa syntyvästä savukaasusta. (Beausoleil-Morrison et al. 2010)

Stirling moottorin polttoaineena voidaan käyttää uusiutuvia polttoaineita, kuten nestemäisiä biopolttoaineita, biokaasua tai puuta. (Aoun et al. 2012) Kuvassa 4 on esitetty kaavio Stirling-moottoria käyttävästä mCHP-yksiköstä, jossa polttoaineena käytetään puupellettiä.



**Kuva 4.** Esimerkkikaavio Stirling-moottoria käyttävästä mikro-CHP-yksiköstä (Aoun et al. 2012)

Tällä hetkellä Stirling-moottori vaikuttaa olevan kehittynein teknologia biomassaa polttoaineenaan käytäville mCHP-laitoksille. Asiaa on tutkittu monen tahon toimesta ja kokonaishyötysuhteeksi on saatu arviolta lähes 72 %. (Bouvier et al. 2012)

Taloudellisesti Stirling-moottorin kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi tuotetun sähkön ja lämmön suhde. Tutkimusten mukaan Stirling-moottoria käyttävän mCHP-laitoksen sähkön ja lämmön välisen suhteen ollessa 1:10 on tutkimuksissa saavutettu taloudellisesti ja hiilidioksidipäästöjen kannalta otollisimmat tulokset, mikäli lämmön tarve on korkea. Lisäksi taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa voimakkaasti voimassa oleva sähkön syöttötariffi. (Beausoleil-Morrison et al. 2010)

### 5.3 Orgaaninen Rankine -prosessi

Organic Rankine Cycle (ORC) eli orgaaninen Rankine -prosessi on höyryprosessin kaltainen prosessi, jossa veden sijasta työaineena käytetään orgaanista kemikaalia, jonka termodynaamiset ominaisuudet ovat prosessin kannalta otolliset. Orgaanisen käyttöaineen kiehuminen vaatii pienemmän lämpömäärän veteen verrattuna ja täten prosessi vaatii alhaisemman lämpötilan ja paineen kuin perinteinen höyryprosessi. (Dong et al. 2012)

ORC on edistyksellinen ja edullinen energiantuotantoteknologia, kun puhutaan matalalämpöisistä CHP-laitoksista, joiden sähköteho on kilowatista yli megawattiin. Alle 30 kW sähkötehon omaavissa perinteisissä höyryyn pohjautuvissa CHP-systeemeissä hyötysuhde sähkölle on arviolta vain 6-8 %, kun taas ORC:n perustuvalla CHP-systeemillä päästään 15 % sähkön hyötysuhteeseen ja 60-70 % lämmön hyötysuhteeseen. Siksi ORC soveltuu hyvin pieniin ja mikrokokoluokan CHP-järjestelmiin. (Dong et al. 2012)

Vaikka orgaaniseen Rankine -prosessiin pohjautuvaa sähköntuotantoa on sovellettu mikro-kokoluokan sähköntuotantolaitoksiin, ei biomassaa polttoaineenaan käyttäviä mikro-CHP-laitoksia ole juurikaan tutkittu. Syynä tähän on tutkimusrahoituksen puute ja vähäinen kiinnostus mCHP-tuotantojärjestelmiä kohtaan. (Dong et al. 2012)

### 5.4 Taloudellinen näkökulma

Verrattuna Stirling-moottoriin, ORC:n kustannukset ovat huomattavasti edullisemmat. Jotta mCHP-laitosten taloudellista toteutettavuutta saataisiin parannettua, tulisi prosessia kehittää siten, että saataisiin tuotettua enemmän sähköä lämpöyksikköä kohti. Lisääntyneen sähköntuotannon lisäksi tämä vähentäisi myös polttoainekustannuksia sekä tuotettua hiilidioksidia energiayksikköä kohden. Mikrokokoluokan CHP-laitoksissa rajoitaviksi tekijöiksi sähkön osuuden nostamisessa tulee materiaalien ominaisuudet sekä taloudelliset kysymykset. Sähköntuotannon parantaminen monimutkaistaa prosesseja ja prosessin monimutkaistuminen kasvattaa kustannuksia. Tärkeää onkin löytää oikea kompromissi sähköntuotannon maksimoinnin ja kustannusten minimoinnin välillä. (Dong et al. 2012)

Aiemmin mainittiin, että mCHP-laitokset mitoitetaan lämmöntarpeen mukaan. Taloudellista näkökulmaa mietittäessä sähköntuotantoa voidaan pitää mCHP-laitoksissa lämmöntuotannon sivutuotteena. Biomassaa polttoaineenaan käyttävien mCHP-laitosten sähkötehokkuuden on oltava hyväksyttävällä tasolla sekä nimelliskuormalla, että osakuormalla, jotta taloudelliset hyödyt ja ympäristöystävällisyys saadaan maksimoitua. (Dong et al. 2012)



## 6. KÄYTTÖKOHTEET

Aina, kun sähköä tuotetaan polttamalla, jätteenä syntyvä lämpö tulisi käyttää hyödyksi. Jotta kokonaisenergia saataisiin hyötykäytettyä mahdollisimman tehokkaasti, teknologian pitää soveltua käyttökohteeseensa. CHP-teknologiaa tullaan hyödyntämään pitkälle tulevaisuuteenkin aina, kun on tarvetta sekä sähkö- että lämpöenergialle. Tulevaisuuden polttoaineita käytettäessä CHP-laitokset säilyttävät asemansa, sillä niiden avulla hyötysuhde saadaan korkeaksi. Vaikka usein puhutaan CHP-laitosten korvaamisesta uusiutuvilla energianlähteillä, asiaa kannattaisi katsoa siltä kantilta, että CHP-laitokset luovat pohjan myös tulevaisuuden puhtaammalle energiantuotannolle. Miljoonissa kotitalouksissa kunnolla kehittyneet mikro-CHP-laitokset voivat auttaa muuttamaan tulevaisuutta ilmastoystävällisemmäksi. (Beith 2011)

Samankaltaisella mäntämootorilla, kuin jollainen on tavallisessa henkilöautossa, voidaan käyttää CHP-laitoksena pienissä rakennuksissa sekä julkisella että yksityisellä puolella. Tällaista mäntämootoria voidaan käyttää maakaasun lisäksi sekä kaasumaisilla että nestemäisillä biopolttoaineilla. Ongelmana tällaisissa hyvin pienissä mikro-CHP-laitoksissa on se, että harvalla omakotitalolla on tarvetta tämän kokoluokan jatkuvalle energiantuotannolle. Toisaalta esimerkiksi kerrostalot vaativat niin paljon energiaa, että energiantuotantoon vaadittaisiin ennemminkin pienen kuin mikro-kokoluokan CHP-laitos. (Beith 2011)

Sen sijaan Stirling-moottoria käyttävät mCHP-laitokset ovat löytäneet markkinarakonsa juuri yksityisellä puolella omakotitaloista. Ulkoisena polttomootorina Stirling-moottori on potentiaalinen ja luotettava, sillä liikkuvien osien kuluminen on vähäistä. Lisäksi se on hiljainen polttojärjestelmän muistuttaessa perinteistä kotitalouksien kattilajärjestelmää. Useat alan valmistajat ovat kehittäneet tuotteensa niin, että sillä voidaan suoraan korvata jo olemassa oleva kotitalouskattila. (Beith 2011) Lisäksi Stirling-moottoria käyttävillä mCHP-laitoksilla lämmöntalteenoton tehokkuus on korkea, 60–90 % ja sähköntuotannon hyötysuhde vaihtelee 10–25 %:n välillä. (Aoun et al. 2012)

Myös pieniä polttokennoja on kehitetty omakotitalouskäyttöön, mutta se on vielä turhan kallista asentaa. Kuitenkin ajan myötä teknologian kehittyessä ja kannattavuuden parantua, polttokennosta voisi tulla puhdas, tehokas ja hiljainen vaihtoehto käytettäväksi myös mCHP-laitoksissa. (Beith 2011)

## 7. YHTEENVETO

Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla on pitkä historia ja siksi CHP-laitoksia on tutkittu paljon ja niiden ominaisuuksia kehitetty. Ilmastonmuutoksen vuoksi perinteisten keskitettyjen CHP-laitosten rinnalle on kehitetty mikroteholuokan CHP-laitoksia.

Työn tarkoituksena oli selvittää mCHP-laitosten etuja ja haittoja, käyttökohteita ja mitkä uusiutuvat energianlähteet soveltuvat käytettäväksi mCHP-laitoksissa Suomessa ja minäkalaisia energiantuotantoteknologioita ne sisältävät. Työn perusteella mCHP-laitokset soveltuvat erinomaisesti Suomen olosuhteisiin, sillä Suomessa sekä sähkön ja lämmön tarve on suurta ja tälläkin hetkellä suuri osa energiasta tuotetaan CHP-laitoksissa. Lisäksi Suomessa on paljon haja-asutusta, jolloin keskitetyistä energiantuotantolaitoksista energiansiirtomatkat ovat pitkiä. Mikro-CHP-laitokset vähentävät merkittävästi siirrosta aiheutuvia häviöitä ja täten säästävät myös polttoaineen kulutusta. Lisäksi sähkön toimitusvarmuus paranee, sillä sähköverkon häiriöt eivät vaikuta sähkönsaatuuteen.

Haittana mCHP-laitoksissa on vähäinen säädettävyys ja se, että ne on mitoitettava kesäkauden mukaan. Tämä heikentää perusidea siitä, että mCHP-laitoksilla saadaan tuotettua tarvittava energia ja mahdollistavat riippumattomuuden valtakunnan sähköverkosta.

Uusiutuvista energianlähteistä Suomen olosuhteisiin biomassa soveltuu parhaiten. Sitä on Suomessa hyvin saatavilla ja lisäksi se on ainut uusiutuva energianlähde, jota on saatavilla silloin, kun sitä tarvitaan, toisin kuin esimerkiksi aurinkoenergiaa. Haittana biomassassa on kuitenkin sen pieni energiatiheys verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

Stirling-moottori vaikuttaa olevan soveltuvin teknologia mCHP-laitoksiin ja se soveltuu erityisen hyvin omakotitaloissa käytettäväksi, sillä se on hiljainen ja sisältää vain vähän liikkuvia osia, jolloin se on myös huoltovarma. Orgaaninen Rankine -prosessi on sen sijaan edullisempi, mutta vaatii vielä kehittämistä. Molemmissa tekniikoissa on kuitenkin potentiaalia.

Tällä hetkellä mCHP-laitokset eivät vielä ole taloudellisesti kannattavia, sillä niiden tekniikka on vielä kallista. Tullakseen taloudellisesti kannattaviksi mCHP-laitokset vaativat lainsäädännön tukea. Tulevaisuudessa mCHP-laitoksilla on potentiaalia tulla laajemmin osaksi Suomen energiantuotantoa, mikäli fossiilisten polttoaineiden ja sähkön hinnat nousevat merkittävästi ja mikäli mCHP-laitosten rakentamista tuetaan hallinnollisin ja taloudellisin keinoin.

# LÄHTEET

Aoun, B., Peuportier, B., Thiers, S. (2010). Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building. *Energy and Buildings*. Vol. 42, pp. 896–903.

Beausoleil-Morrison, I., Lombardi, K., Ugursal, V.I. (2010). Proposed improvements to a model for characterizing the electrical and thermal energy performance of Stirling engine micro-cogeneration devices based upon experimental observations. *Applied Energy*. Vol. 87, pp. 3271–3282.

Beith, R. (2011). *Small and micro combined heat and power (CHP) systems: Advanced Design, Performance, Materials and Applications*. Woodhead Publishing. Vol. 18.

Bianchi, M., De Pascale, A., Spina, P. R. (2012). Guidelines for residential micro-CHP systems design. *Applied Energy*. Vol. 97, pp. 673–685.

Bouvier, J-L., Martinez, S., Michaux, G., Salagnac, P. (2017). Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*. Vol. 154, pp. 262–285.

Brandon, N., Kær, S. K., Liso, V., Nielsen, M. P., Zhao, Y. (2011). Analysis of the impact of heat-to-power ratio for a SOFC-based mCHP system for residential application under different climate regions in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36, pp 13715–13726.

Breeze, P. (2018). *Combined heat and power*. Academic Press.

Dong, L., Liu, H., Riffat, S. (2009). Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 29, pp. 2119–2126.

Galogah, R. J., Ghobadian, B., Maghanki, M. M., Najafi, G. (2013). Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 28, pp. 510–524.

Horak, B. & Murugan, S. (2006). A review of micro combined heat and power systems for residential applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 64. pp.144–162.