

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Pien-CHP Pohjoismaissa

Small-scale CHP in the Nordic countries

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen

Työn ohjaaja: Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen

Lappeenranta 29.8.2021

Nikolas Petersen-Dyggve

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Nikolas Petersen-Dyggve

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Esa Vakkilainen, Kari Luostarinen

Kandidaatintyö 2021

35 sivua, 22 kuvaa

Hakusanat: Pien-CHP, biopolttoaineet, small-scale CHP, biofuels

I denna kandidatavhandling behandlas de nordiska ländernas småskaliga kraftvärmes nuvarande tillstånd, samt framtida potential. I avhandlingen forskas olika tekniker som används i de nordiska länderna, faktorer som påverkar lönsamhet och användbarhet.

Det nuvarande tillståndet i Finland, Sverige och Danmark behandlas i enskilda kapitel, medan Norge och Island behandlas i ett gemensamt kapitel.

Uppdelningen beror på rätt stora skillnader mellan hur länderna utnyttjar småskalig kraftvärme. Bland annat ång-, gas- samt mikroturbiner, ORC-processer, förbränningsmotorer, bränsleceller samt gasning av biomassa är lämpliga tekniker för småskalig kraftvärme. Teknikerna kan utnyttja både fasta och gasaktiga bränslen. I denna kandidatavhandling beaktas främst tekniker som utnyttjar biobränslen.

Småskalig kraftvärme lämpar sig väl för en decentraliserad energitillverkning och kan till exempel utnyttjas på lantgårdar, fältsjukhus samt avskilda bostadsområden, som inte befinner sig i närhet av värme- eller elektricitetsnätverk.

Priset på elektricitet, låg användarerfarenhet och driftskostnaderna påverkar mest lönsamheten av småskalig kraftvärme, som har mycket potential. För att utbreda användning av småskalig kraftvärme krävs mer erfarenhet.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 CHP	6
2.1 Höryturbiini.....	6
2.2 Kaasuturbiini ja mikroturbiini.....	8
2.2.1 Kaasuturbiini.....	8
2.2.2 Mikroturbiini.....	10
2.3 ORC-prosessi.....	11
2.4 Polttomoottorit.....	12
2.5 Polttokennot.....	13
2.6 Biomassan kaasutus.....	14
3 Suomi	16
4 Ruotsi	22
5 Tanska	27
6 Norja ja Islanti	31
7 Yhteenveto	34
Lähdeluettelo	36

LYHENNELUETTELO

CHP Combined heat and power - Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

HRSG Heat recovery steam generator

IEA International energy agency

ORC Organic rankine cycle

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen torjumiseksi mailta vaaditaan muutosta sähkön- ja lämmöntuotannossa. Fossiilisia polttoaineita on vähennettävä, ja uusiutuvia polttoaineita lisättävä. Muun muassa biopolttoaineiden, sekä tuuli-, vesi- ja aurinkovoiman avulla haitallisia kasvihuonepäästöjä voidaan hillitä. Pohjoismaat ovat maailman kärkeä uusiutuvien energiamuotojen käytössä. (Patronen et.al, 2017, 6-7)

Biopolttoaineita voidaan hyödyntää etenkin CHP-tuotannossa, eli sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Yhteistuotannossa samalla prosessilla tuotetaan sekä sähköä, että lämpöä. Yhteistuotannon avulla laitosten hyötysuhteet paranevat, sekä haitalliset kasvihuonepäästöt vähenevät. Yhteistuotantoa voidaan hyödyntää sekä suuressa että pienessä mittakaavassa. Pienen mittakaavan laitokset voidaan sijoittaa kuluttajan lähelle, jolloin ne voivat tuottaa energiaa pienemmille alueille ja kiinteistöille. (Pesola et.al, 2014, 7-11)

Biopolttoaineiden yleistyminen lisää varsinkin pienimuotoisen sähkön ja lämmön yhteistuotannon potentiaalia. Pien-CHP:lle ei ole olemassa yksiselitteistä määritelmää, joten tässä työssä keskitytään laitoksiin ja teknikoihin, joiden sähköteho on alle 20MW.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on arvioida pien-CHP tilannetta Pohjoismaissa, sekä tarkastella mahdollisia tulevaisuuden näkymiä. Pien-CHP laitokset voivat käyttää myös fossiilisia polttoaineita, kuten maakaasua, mutta tässä työssä keskitytään laitoksiin, jotka toimivat biopolttoaineilla. Työssä ei arvioida laitosten taloudellista kannattavuutta, mutta markkinoiden edellytyksiä pien-CHP-laitoksille tarkastellaan lyhyesti.

2 CHP

CHP (combined heat and power) tarkoittaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa hyötysuhde paranee huomattavasti verrattuna sähkön ja lämmön erilliseen tuotantoon. Nykyaikaiset voimalaitokset voivat parhaimmillaan tuottaa sähköä 60% hyötysuhteella, mutta prosessia 40% energiasta valuu hukkaan hukkalämpönä. Tätä hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi lämpimänä vetenä kaukolämpöverkoissa, tai prosessihöyrynä ja -lämpönä muissa voimalaitoksissa. CHP-tuotanto parantaa laitoksen hyötysuhdetta merkittävästi, sillä modernit CHP-laitokset voivat operoida 90% hyötysuhteella. (Breeze, 2019, 121-122)

CHP-tuotanto tuottaa myös vähemmän ilmastolle ja terveydelle haitallisia päästöjä, muun muassa CO₂, NO_x ja SO₂ päästöt vähenevät CHP tuotannossa. Muita hyötyjä ovat polttoainekustannusten väheneminen, sillä yhteistuotannossa samalla määrällä polttoaineella voidaan tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Myös laitoksen käyttökustannukset pienenevät. Käyttökustannuksiin kuuluvat polttoaine- sekä huoltokustannukset. (Sweetser et.al, 2015, 9-12)

Pien-CHP-tuotantoon soveltuvia tekniikoita ovat muun muassa höyryturbiini, kaasu- ja mikroturbiini, ORC-prosessi (Organic Rankine Cycle) ja polttokennot. (Karjalainen, 2012, 1-7)

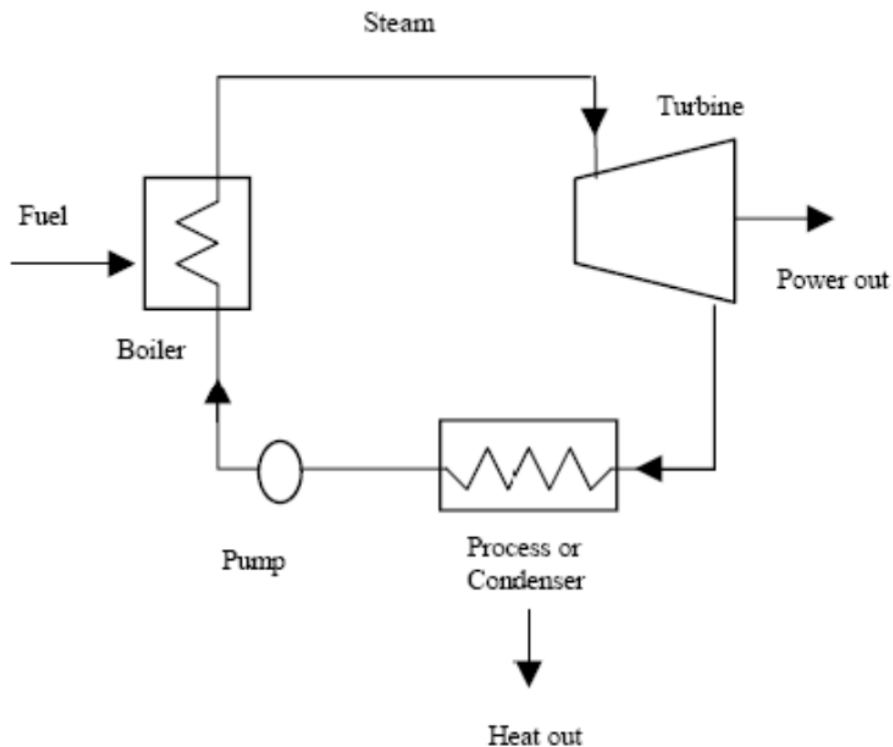
Prosessit voivat käyttää sekä kiinteitä että kaasumaisia polttoaineita, muun muassa biopolttoaineita, fossiilisia polttoaineita sekä maa- ja synteetisikaasua.

2.1 Höyryturbiini

Höyryturbiini-prosessissa polttoaineen vapauttamalla lämpöenergialla tuotetaan paineistettua höyryä. Höyry johdetaan putkistoa pitkiin turbiiniin, jossa höyryn liike-energia saa turbiinin pyörimään. Turbiini on kytketty generaattoriin, jonka avulla turbiinin mekaaninen energia saadaan muutettua sähköksi. Höyry lauhtuu turbiinissa,

jonka jälkeen höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuu lopuksi vedeksi. Jäähdytteenä käytetään vettä, joka voidaan ottaa viereisestä järvestä tai merestä. Vedeksi lauhtunut höyry pumpataan syöttövesisäiliön kautta takaisin kattilaan, jonka jälkeen kierto alkaa alusta. Jäähdytysvesi lasketaan takaisin järveen tai mereen (Breeze, 2019, 134-135)

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaisen höyryturbiiniprosessin prosessikaavio. Kuvassa käytetyistä termeistä *fuel* on polttoaine, *boiler* on kattila, *steam* on höyry, *turbine* on turbiini, *power out* on sähköteho, *condenser* on lauhdutin, *heat out* on lauhduttimesta saatu lämpöteho ja *pump* on pumppu.



Kuva 1. Höyryturbiiniprosessin prosessikaavio (Thomas, 2010, 192)

Höyryturbiini-prosessi soveltuu erittäin hyvin yhteistuotantoon, sillä sähköntuotantoprosessissa syntyy hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi prosessihöyrynä tai kaukolämpönä. Lämpöenergia voidaan poistaa kierrosta välitoilla,

eli poistamalla höyryä turbiinista tietyssä paineessa ja lämpötilassa. Höyryturbiinien koko vaihtelee alle 100 kW:sta yli 250 MW:iin. (Thomas, 2010, 189-194)

Toinen tapa tuottaa sekä lämpöä että sähköä on pitää lauhduttimen paine korkeammalla, jotta höyry ei pääse lauhtumaan vedeksi. Tätä kutsutaan vastapaineturbiiniksi. Höyryn lämpöenergian avulla lämmitetään kaukolämpövedettä, jonka lähtölämpötila on noin 70-110 astetta ja paluulämpötila 30-60 astetta. Höyry lauhtuu vedeksi lämmittäessään kaukolämpövedettä. (Thomas, 2010, 189-194)

Höyryturbiiniprosessissa voidaan käyttää useita eri polttoaineita. Prosessissa voidaan käyttää fossiilisia polttoaineita, kaasumaisissa polttoaineita, puupolttoaineita sekä jätteestä saatavaa polttoainetta. Höyryturbiiniprosessi on siis keskeisessä roolissa, kun päästöjä pyritään vähentämään, sillä uusiutuvat energialähteet (puu, biomassa, biokaasu) tuottavat energiaa laitoksilla. (Frangopoulos, 2017, 96)

2.2 Kaasuturbiini ja mikroturbiini

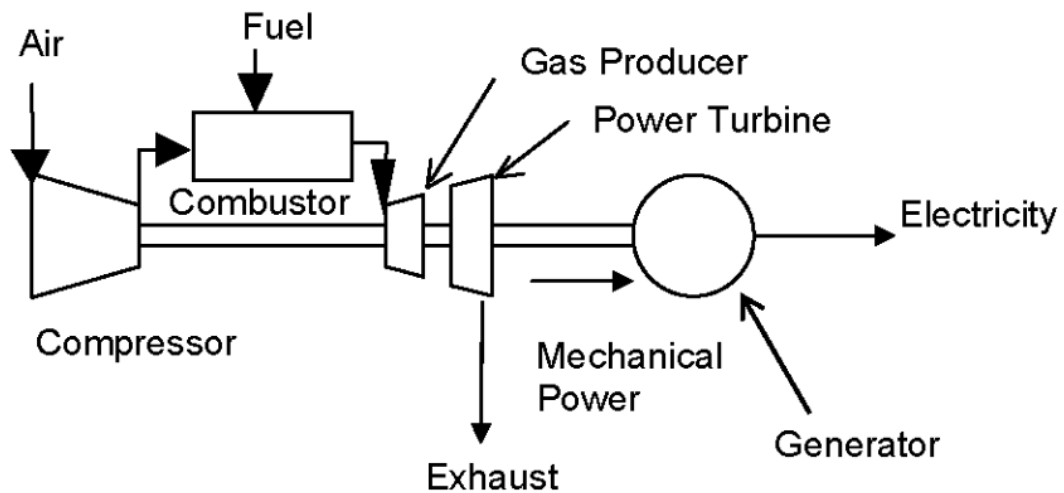
2.2.1 Kaasuturbiini

Kaasuturbiiniprosessia kutsutaan Brayton-prosessiksi. Yksinkertainen kaasuturbiiniprosessi koostuu kompressorista, polttokammioista sekä turbiinista. Kompressorin imetään ilmaa, joka paineistetaan. Samalla ilman lämpötila nousee hieman. Kompressorin jälkeen ilma syötetään polttokammioon polttoaineen kanssa, jossa polttoaine vapauttaa lämpöenergiaa. Polttokammion jälkeen savukaasut siirtyvät turbiiniin, joka pyöriessään tuottaa mekaanista energiaa, joka muunnetaan generaattorin avulla sähköksi. Savukaasut poistuvat prosessista ulkoilmaan piipun kautta. (Sweetser et.al, 2015, 125)

Prosessiin voidaan myös lisätä lämmönsiirrin, eli rekuperaattori, jonka tarkoituksena on lämmittää savukaasujen avulla kompressorilta tullutta ilmaa, ennen kuin se syötetään

polttokammioon. Rekuperaattorin avulla polttoaineen tarve vähenee, sillä ilman lämmitessä lämpöenergiaa ei tarvita yhtä paljon. (Sweetser et.al, 2015, 125)

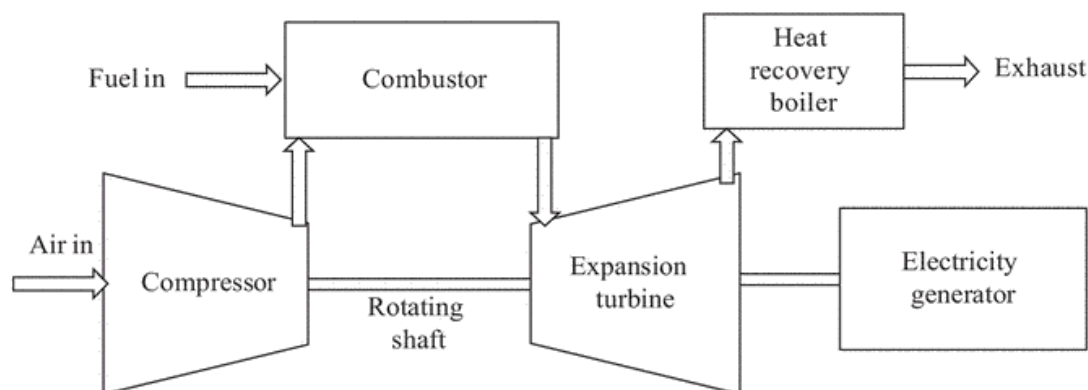
Kuvassa 2 on esitetty perinteisen kaasuturbiiniprosessin prosessikaavio. Kuvassa käytetyissä termeistä *air* on ilma, *fuel* on polttoaine, *combustor* on polttokammio, *compressor* on kompressor, *gas producer* ja *power turbine* ovat turbiineja, *exhaust* on poistuvat kaasut, *mechanical power* on mekaaninen energia, *generator* on generaattori ja *electricity* on sähkö.



Kuva 2. Yksinkertainen kaasuturbiiniprosessi (Thomas, 2010, 131)

Jos kaasuturbiinia käytetään pelkästään sähkön tuottamiseen, on prosessin hyötysuhde noin 40%. Kaasuturbiinia voidaan hyödyntää CHP-tuotannossa lisäämällä prosessiin höyryturbiini. Prosessissa savukaasut ohjataan HRSG (Heat Recovery Steam Generator) kattilaan, jossa savukaasujen lämpöenergialla lämmitetään ja höyrystetään vettä. Tätä prosessia kutsutaan kombiprosessiksi. Prosessissa syntyvää höyryä voidaan hyödyntää joko prosessihöyryinä tai kaukolämpöverkoissa. Prosessi sisältää myös höyryturbiinin, joten prosessi koostuu kahdesta turbiinista, jotka molemmat tuottavat sähköä. Yhteistuotannossa prosessin kokonaishyötysuhde nousee noin 80%:iin. (Thomas, 2010, 128-129)

Kuvassa 3 on esitetty yhdistetty kaasu- ja höyryturbiiniprosessi. Kuvassa käytetyistä termeistä *compressor* on kompressor, *combustor* on polttokammio, *expansion turbine* on turbiini, *heat recovery boiler* on HRSG kattila, *electricity generator* on generaattori.



Kuva 3, Kombiprosessin prosessikaavio (Frangopoulos, 2017, 18)

2.2.2 Mikroturbiini

Mikroturbiinit toimivat samalla periaatteella, kuin kaasuturbiinit, mutta ne ovat kooltaan pienempiä. Kaasuturbiinit ovat kooltaan 500 kW-250 MW, kun taas mikroturbiinit ovat kooltaan 30 kW-250 kW. Mikroturbiiniprosessi koostuu samoista komponenteista, kun kaasuturbiiniprosessi, eli kompressorista, polttokammioista sekä turbiinista. Yleensä mikroturbiiniprosessi sisältää myös rekuperaattorin, jonka avulla hyötysuhdetta voidaan parantaa. (Beith, 2011, 147)

Johtuen mikroturbiinin pienestä koosta, sen CHP potentiaalia voidaan hyödyntää parhaiten hajautetussa paikallisessa tuotannossa. Prosessissa syntyvien savukaasujen avulla lämmitetään vettä, jota voidaan hyödyntää rakennusten lämmityksessä, sekä prosessilämpönä muissa prosesseissa. Mikroturbiinien kokonaishyötysuhde on noin 75%-85%, riippuen käyttökohteesta. (Thomas, 2010, 149)

Lämmönlähteenä käytetään kattilaa, jossa polttoaineena voidaan käyttää joko kiinteää tai kaasumaista polttoainetta. Se voi olla esimerkiksi kiinteää tai kaasutettua biomassaa.

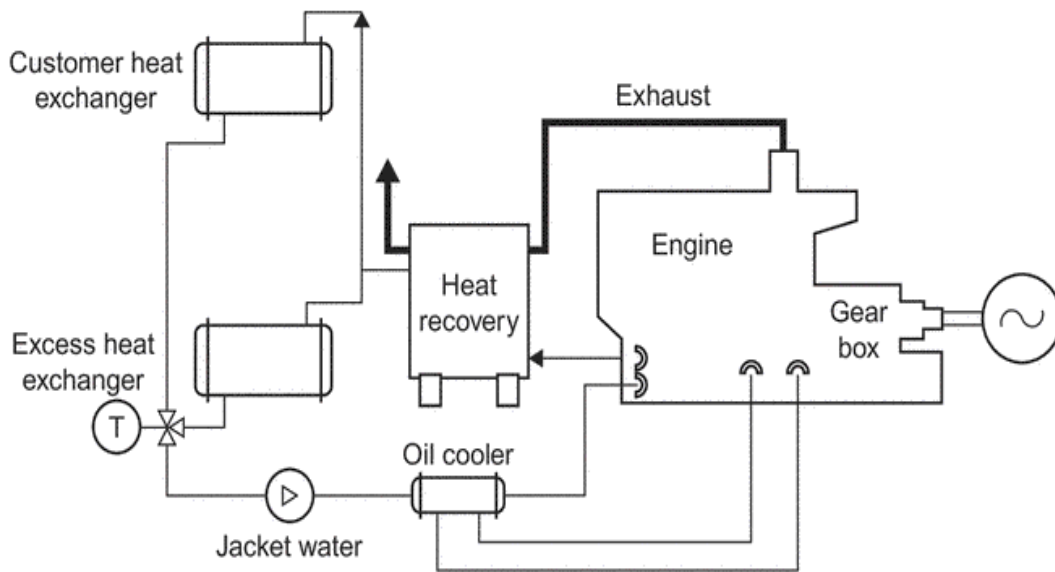
ORC-prosessia voidaan hyödyntää CHP tuotannossa biomassaa kattilan kanssa. Kattilassa syntyvien savukaasujen avulla lämmitetään orgaanista fluidia, joka voi olla esimerkiksi jonkinlaista öljyä. Öljy toimii prosessissa lämmönsiirtoaineena: Öljy pumpataan ORC-kiertoon, jossa se lämmittää vettä. Osa vedestä höyrystetään vesihöyryksi, jonka avulla tuotetaan sähköä. Osa vedestä voidaan käyttää kaukolämpöverkkoihin ja lämpöaltaisiin. (Macchi et al. 2016, 529-530)

2.4 Polttomoottorit

Polttomoottorit koostuvat kahdesta pääkomponentista: männästä ja sylinteristä. Polttomoottorit voidaan jakaa kahteen tyyppiin: Otto-kiertoon perustuviin moottoreihin, sekä Diesel-kiertoon perustuviin. Otto-kierrossa ilma-polttoaineseos lisätään sylinteriin, jonka jälkeen seos puristetaan männän avulla. Tämän jälkeen seos saadaan syttymään sytytystulpan avulla. Dieselmoottorissa ainoastaan ilma otetaan sylinteriin. Ilma paineistetaan, jolloin sen lämpötila nousee yli polttoaineen syttymispisteen. Tämän jälkeen polttoaine ruiskutetaan sylinteriin ja ilma-polttoaineseos syttyy itsestään. (Sweetser et.al. 2015, 100)

Moottorit, jotka käyttävät sytytystulppaa voivat saavuttaa noin 42% hyötysuhteen ja dieselmoottorit voivat saavuttaa korkeimmillaan 52% hyötysuhteen. Polttomoottoreita voidaan käyttää monella tapaa. Niitä löytyy tyypillisesti autoista, veneistä ja lentokoneista. Niitä hyödynnetään myös suuren mittakaavan energiatuotannossa. Yhteistuotannossa polttomoottoreita voidaan hyödyntää samalla periaatteella kuin kaasuturbiiniprosessia. Savukaasujen lämpöä voidaan hyödyntää joko prosessihöyrynä tai kaukolämpöveden lämmitykseen. Parhaimmillaan polttomoottorit ovat pienen mittakaavan yhteistuotannossa hyödynnettävissä, esimerkiksi kotitalouksien lämmityksessä. (Breeze, 2019, 133-134)).

Kuvassa 5 on esitetty polttomoottorin CHP-prosessikaavio. Kuten kuvasta nähdään, on prosessissa useampi lämmönlähde. Tämä eroaa esimerkiksi kaasuturbiiniprosessista, jossa lämmönlähteenä toimii ainoastaan savukaasut. Polttomoottoriprosessissa lämpöä saadaan myös moottorin jäähdytysnesteestä.



Kuva 5. Polttomoottorin CHP prosessikaavio (Breeze, 2019, 134)

2.5 Polttokennot

Polttokennon toiminta perustuu sähkön- ja lämmöntuottamiseen kemiallisen reaktion avulla. Polttokennon toimintaperiaate on hyvin lähellä pariston toimintaperiaatetta. Ne eroavat toisistaan siten, että paristossa sähkön tuottamiseen tarvittavat reaktantit ovat pariston sisällä, kun taas polttokennoon ne syötetään ulkopuolelta. Lähes kaikkien polttokennojen sähköntuotanto perustuu kemialliseen reaktion vedyn ja hapen välillä. Tästä reaktiosta lopputuotteina saadaan vettä sekä lämpöä. (Breeze, 2019, 145) Reaktiossa tarvittava happi voidaan ottaa suoraan ilmasta, mutta vety saadaan

reformoinnin avulla jostain muusta polttoaineesta, esimerkiksi maa- tai biokaasusta. (EPA, 2017)

Yhteistuotannossa polttokennoja voidaan hyödyntää kuluttajan läheisyydessä. Reaktiossa syntyvä lämpö voi olla joko vettä tai vesihöyryä, riippuen polttokennosta. Lämpöä voidaan parhaiten hyödyntää kuuman veden muodossa kotitalouksien lämmittämiseen. (EPA, 2017)

2.6 Biomassan kaasutus

Biomassan kaasutuksen tavoitteena on tuottaa synteetikaasua kiinteästä biomassasta. Kiinteä biomassa voi olla esimerkiksi puuta ja puun osia, sekä erilaista jätettä kuten maatalousjätettä tai teollisuusjätettä. Kaasutusprosessi koostuu seuraavista vaiheista: Raaka-aineiden esikäsittely (kuivuminen ja esilämmitys), pyrolyysi, sekä jäännöshiilen kaasutus ja palaminen. (Breeze, 2019, 351).

Kuivaaminen on olennaista etenkin erittäin kosteille polttoaineille, sillä mikäli biomassa on erittäin kostea, kuluu veden höyryttämiseen suuri määrä energiaa, joka on vaikea ottaa talteen. Yhden vesikilon höyryttämiseen kuluu 2260 kJ energiaa.

Pyrolyysin aikana polttoaineen suurimmat hiilivety molekyylit hajoavat pienemmiksi kaasumolekyyleiksi. Prosessin aikana syntyy myös niin sanottua puuhiiltä, joka sisältää vetyä, happea ja hiiltä. Myös helposti haihtuvat materiaalit haihtuvat tässä vaiheessa prosessia. Pyrolyysin tavoitteena on tuottaa haihtumattomia kaasuja, kuten metaania, hiilidioksidia ja vetyä. (Basu, 2018, 156-157)

Kaasutusvaiheen aikana kemiallisia reaktioita tapahtuu polttoaineen hiilivetyjen, höyryn, hiilidioksidin, hapen ja vedyn välillä. Kaasutuksen tehtävänä on rikkoa kiinteiden hiilivetyjen ja hiilen molekyylisidokset, jonka jälkeen ne järjestäytyvät uudelleen muodostaen kevyempiä kaasuja. (Basu, 2018, 215-217)

Palamisprosessin tärkein tarkoitus on tuottaa lämpöä muille reaktioille. Paras tapa lämmöntuottamiseen on puuhiilen palaminen. (Basu, 2018, 218)

Biomassan kaasuttamiseen käytetään lähtökohtaisesti kahta kaasutintyyppiä: Kiinteäkerros- ja leijukerroskaasuttimia. (Breeze, 2019, 366)

Kiinteäkerroskaasuttimet voidaan jakaa kahteen luokkaan: Vastavirtakaasuttimiin ja myötävirtakaasuttimiin. Vastavirtakaasuttimessa polttoaine syötetään kaasuttimen yläosasta, ja petimateriaali (ilma, höyry, hiekka) puhaltaa alhaalta ylöspäin. Tässä tyyppissä tuotekaasu sekä polttoaine virtaavat vastakkaisiin suuntiin. Myötävirtakaasuttimessa polttoaine ja tuotekaasu virtaavat samaan suuntaan. (Basu, 2018, 265-269)

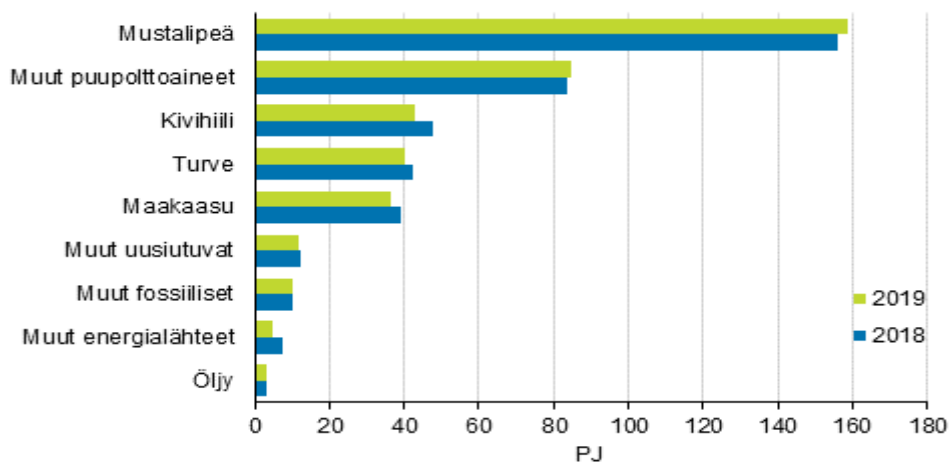
Leijukerroskaasuttimessa polttoainetta ”leijutetaan” petimateriaalin kanssa. Petimateriaalina voidaan käyttää esimerkiksi hiekkaa. Petimateriaali ja hiekka syötetään kaasutusreaktoriin sen alaosaan. Palamisilma syötetään puhaltimen avulla reaktoriin, joka luo ”pedin”, missä hiekka ja polttoaine leijailevat. (Molini et.al, 2016, 16-17)

Yhteistuotannossa biomassan kaasutusta voidaan käyttää yhdessä polttomoottorin kanssa. Tuotettu kaasu syötetään moottoriin, jossa se poltetaan. Tämä teknologia sopii parhaiten pienen mittakaavan laitoksiin, jossa sähköteho on alle 10 MW. Laitosten sähköntuotanto hyötysuhde on korkeahko, 35-40%, mikä on huomattavasti suurempi kuin isomman kokoluokan laitoksissa. Nämä laitokset voidaan sijoittaa kuluttajan lähelle, ja ne ovat käyttökelpoisia maissa, joissa kaukolämpöverkko on levittäytynyt. (Ahrendfeldt et.al, 2013,1407-1408)

3 SUOMI

Vuonna 2019 Suomessa tuotettiin yhteistuotannon avulla 21 576 GWh sähköä, 24 022 GWh kaukolämpöä sekä 43 397 GWh teollisuuslämpöä. Tämä vastasi noin 25% Suomessa tuotetusta sähköstä, 63% tuotetusta kaukolämmöstä ja 79% teollisuuslämmöstä. (SVT, 2019)

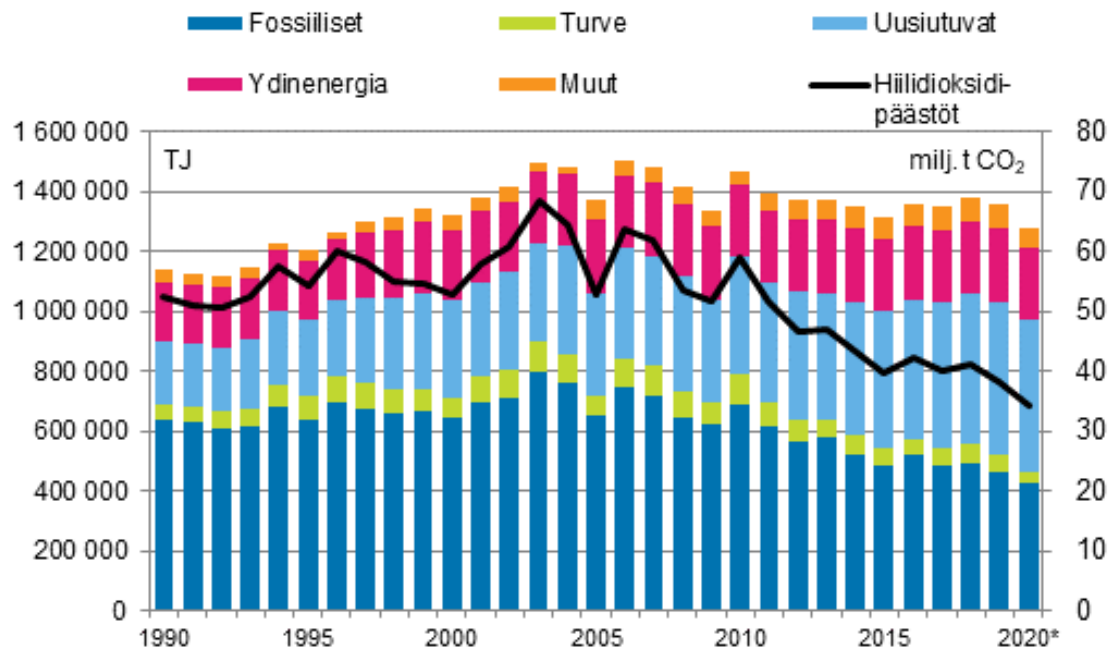
Kuvassa 6 on esitetty yhteistuotannossa käytetyt polttoaineet vuosina 2018 ja 2019.



Kuva 6. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa käytettävät polttoaineet (SVT, 2019)

Kuvasta 6 nähdään, että uusiutuvien polttoaineiden käyttö, etenkin mustalipeän ja puupolttoaineiden käyttö, on kasvussa, ja fossiilisten polttoaineiden käyttö on laskussa. Tähän vaikuttavat EU:n ilmastotavoitteet, sekä Suomen ilmastotavoitteet, joiden mukaan uusiutuvien energialähteiden osuus tulisi olla 55% energian kokonaistuotannosta. Tavoitteena on myös kieltää hiilen käyttö vuoden 2030 jälkeen. (Patronen et.al. 2017, 10)

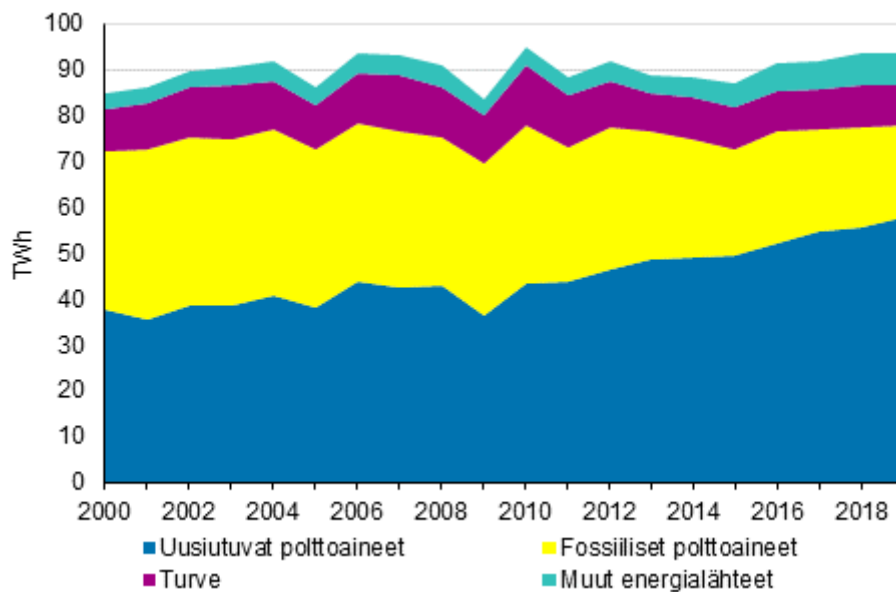
Kuvasta 7 nähdään myös, että uusiutuvien osuus on nousussa, ja fossiilisten ja turpeen osuus on laskussa. Ydinvoiman osuus on pysynyt lähes samana, sillä ydinvoiman avulla pystytään tuottamaan puhdasta päästötöntä sähköä.



Kuva 7. Energian kokonaiskulutus ja hiilidioksidipäästöt vuosina 1990-2020 (SVT, 2020)

Kuvasta nähdään, että hiilidioksidipäästöt ovat myös laskussa, sillä EU-direktiivin mukaan hiilidioksidipäästöjä on vähennettävä 55%:lla verrattuna vuoden 1990 tasoon. (Patronen et.al. 2017, 10)

Suomessa tuotettiin vuonna 2019 yhteensä 38 142 GWh kaukolämpöä ja 55 404 GWh teollisuuslämpöä. Yhteensä lämpöä tuotettiin siis 93 546 GWh. Kuvassa 8 on esitetty lämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet. (SVT, 2019)



Kuva 8. Lämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet vuosilta 2000-2019 (SVT,2019)

Kuva 8 esittää samaa mitä kuvat 6 ja 7 esittävät: uusiutuvien osuus on kasvussa ja fossiilisten osuus on laskussa.

Suomessa ollaan selvästi vähentämässä fossiilisten polttoaineiden osuutta energiantuotannossa ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi. Uusiutuvien polttoaineiden osuutta pyritään myös kasvattamaan. Suomi on myös pystynyt pitämään kiinni EU:n asettamista tavoitteista. Suomen tavoite uusiutuvien polttoaineiden osuudessa kokonaistuotannossa oli 38% vuoteen 2020 mennessä, mutta vuonna 2019 osuus oli jo noin 43%. (Eurostat, 2021)

Suomessa CHP-laitokset, joiden sähköteho on 5-20 MW, toimivat suurimmaksi osaksi höyryturbiiniprosessilla. Nämä laitokset käyttävät suurimmaksi osaksi biopolttoaineita. Polttotekniikoita ovat muun muassa ariinakattila, kierto- ja leijupetikattila sekä biomassan kaasutus, jonka jälkeen tuotekaasu syötetään polttomoottoriin. (Salomon et.al, 2011, 4457)

Esimerkkinä Suomessa toimivasta pien-CHP-laitoksesta voidaan käyttää Volter 40:tä, joka on konttiin sijoitettu pien-CHP-laitos. Laitos käyttää energialähteenä puuhaketta,

joka kaasutetaan kaasugeneraattorissa, jonka jälkeen kaasua käytetään polttoaineena moottorissa. Kuvassa 9 on esitetty laitos ulkopuolelta. (Energiaraitti, 2019)



Kuva 9. Volter 40 laitos kuvattuna ulkopuolelta (Energiaraitti 2019)

Laitos tuottaa sähköä generaattorin avulla, jota moottori pyörittää. Lämpöä saadaan kaasugeneraattorista ja moottorista, jonka avulla lämmitetään vettä. Laitoksen lämpöteho on korkeintaan 100 kW ja sähköteho 40kW. Laitosta voidaan myös siirtää paikasta toiseen, ja sitä voidaan käyttää myös itsenäisesti irrotettuna sähköverkosta. Laitosta ohjataan etänä ja se toimii myös täysin automaattisesti. (Energiaraitti 2019)

Suomessa pien-CHP:n avulla omasta kotitaloudesta voidaan saada lähestulkoon energiaomavarainen. Esimerkki tästä on Kuittilassa sijaitseva maitokarjatila. Tila on

käyttänyt pien-CHP:ta vuodesta 2012 lähtien, ja polttoaineena tila käyttää haketta. Tilan CHP-laitteisto koostuu hakereaktorista, ruuvikuljetinjärjestelmästä, polttoainesiilosta, tuhkanpoistoyksiköstä ja logistiikkakeskuksesta. Laitetta voidaan valvoa etänä internetin kautta. (Bioenergianeuvoja, 2021).

Hake täytyy kaasuttaa ennen kuin se voidaan syöttää dieselmoottoriin. Kaasutus suoritetaan noin 900-1200 °C lämpötilassa. Tuotekaasu sisältää metaania, häkää, sekä vetyä. Kaasutuksen jälkeen kaasu suodatetaan ja jäädytetään. Lopuksi kaasu syötetään Sisu-dieselmoottoriin. Dieselmoottori toimii laitoksen sähkögeneraattorina, ja lämpöä voidaan ottaa talteen polttoaineen jäähdystynesteestä, pakokaasuista, sekä muusta hukkalämmöstä. (Bioenergianeuvoja, 2021).

CHP-laitteiston avulla tila pystyy kattamaan kokonaan oman lämmöntarpeensa sekä suurimman osan sähkötarpeestaan. Talvella ostettavan sähkön osuus on noin kolmasosa ja kesällä noin puolet. Laitoksen hyötysuhde on korkeimmillaan talvella (yli 90%), sillä lämmöntarve on silloin korkeimmillaan. Kesällä lämmölle ei ole niin suurta tarvetta, joten hyötysuhde laskee hukkalämmön takia. (Bioenergianeuvoja, 2021)

Suomessa käytetyin polttoaine pien-CHP-tekniikassa on maakaasu. (SWECO, 2019, 45) Maakaasua hyödyntäviä laitoksia käytetään etenkin kaasuverkon alueella, muualla maassa voidaan hyödyntää biopolttoaineita. Käytetyimmät pien-CHP-tekniikat ovat kaasumoottorit sekä pienet höyryturbiinit. Johtuen ilmastotavoitteista sekä uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymisestä, on puupolttoaineella sekä biokaasulla toimiva pien-CHP mahdollista. Pien-CHP:sta ei kuitenkaan toistaiseksi ole laajaa käyttökokemusta, jotta kustannuksista voisi muodostaa luotettavaa kuvaa. Pien-CHP:n kustannusten on kuitenkin arvioitu olevan huomattavasti suuremmat kuin suuren koko luokan yhteistuotannossa. (Pesola et.al, 2014)

Pien-CHP:n kannattavuuteen vaikuttaa myös sähkön hinta. Alhaisilla sähkön ostohinnoilla pien-CHP ei ole kannattavaa. Polttoaineen hinnoilla on myös suuri vaikutus laitosten kannattavuuteen. Polttoainekustannukset voivat olla noin puolet laitosten käyttökustannuksista. Kannattavuuteen vaikuttaa myös lämmön ja sähkön käyttö

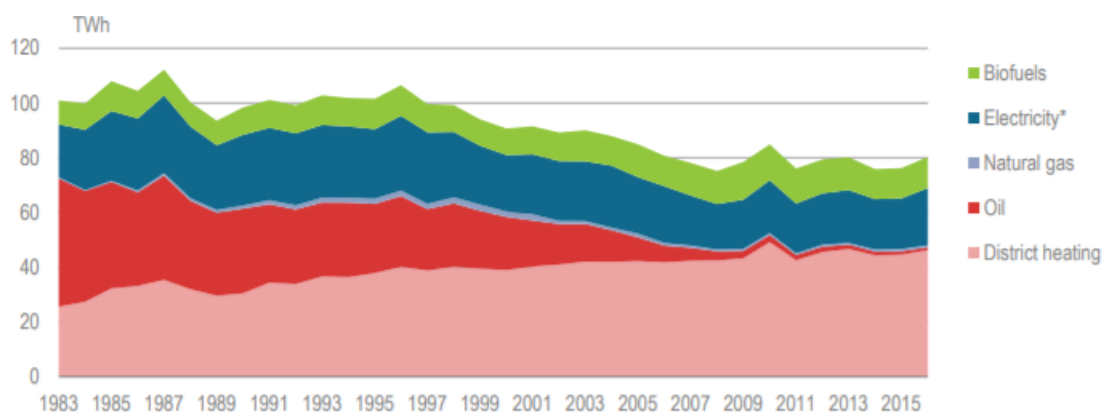
kohteella: Mikäli kaikkea lämpöä ei saada käytettyä kohteella tai siirrettyä kaukolämpöverkkoihin, ei pien-CHP ole kannattava ratkaisu. Ylijäämänsähkön myyminen verkkoon alhaisilla sähkön hinnoilla ei myöskään ole kannattavaa. (Pesola et.al, 2014)

Pien-CHP-laitokset voivat tuottaa energiaa esimerkiksi maataloille, kylpylöille ja suurille kiinteistöille. Jotta pien CHP-laitokset yleistyisivät, olisi niiden hyötyjä sekä mahdollisuuksia markkinoida laajalla mittakaavalla. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen sekä verotuksen korottaminen antaisi enemmän jalansijaa pien-CHP-laitoksille. Suomessa on suuri merkittävä pien-CHP-potentiaali, etenkin biokaasun ja puupolttoaineiden suhteen. (Pesola et.al, 2014)

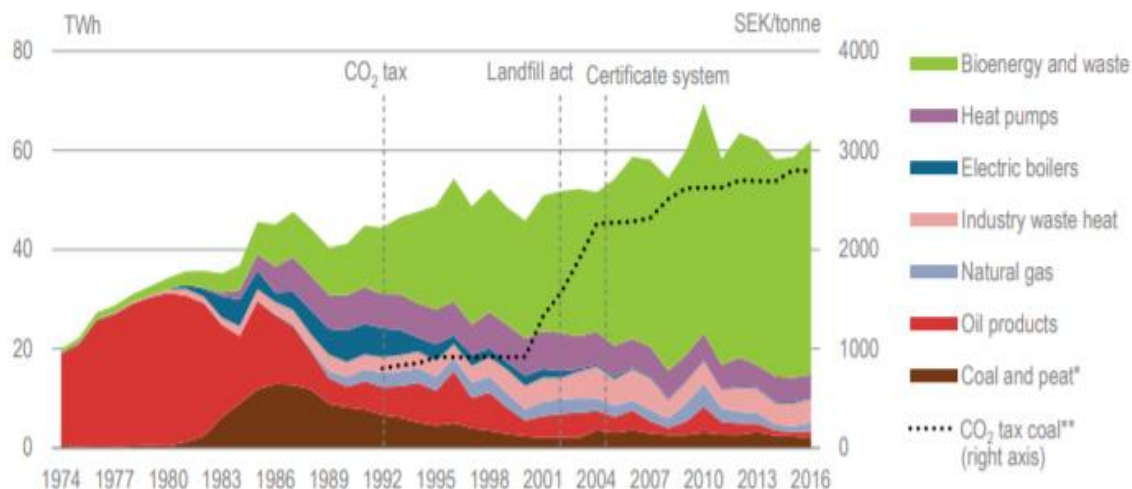
4 RUOTSI

Ruotsissa kaukolämpö tuotetaan suurimmaksi osaksi yhteistuotannolla, sen osuus on noin 73%. 60% kotitalouksien lämmöstä tulee kaukolämmön kautta. Kaukolämpö tuotettiin suureksi osaksi öljyllä, mutta vuosien mittaan biopolttoaineet sekä jäte ovat yleistyneet. Vuonna 2016 kaukolämmöstä 76% tuotettiin joko biopolttoaineella tai jätteellä. (IEA Sweden, 2019).

Kuvassa 10 on esitetty kotitalouksien lämmönlähteet vuosilta 1983-2016. Kuvasta 11 nähdään kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet vuosilta 1974-2016. Kuvassa 12 on esitetty yhteistuotannon osuus kaukolämmöntuotannossa sekä sähköntuotannossa vuosilta 1980-2017.

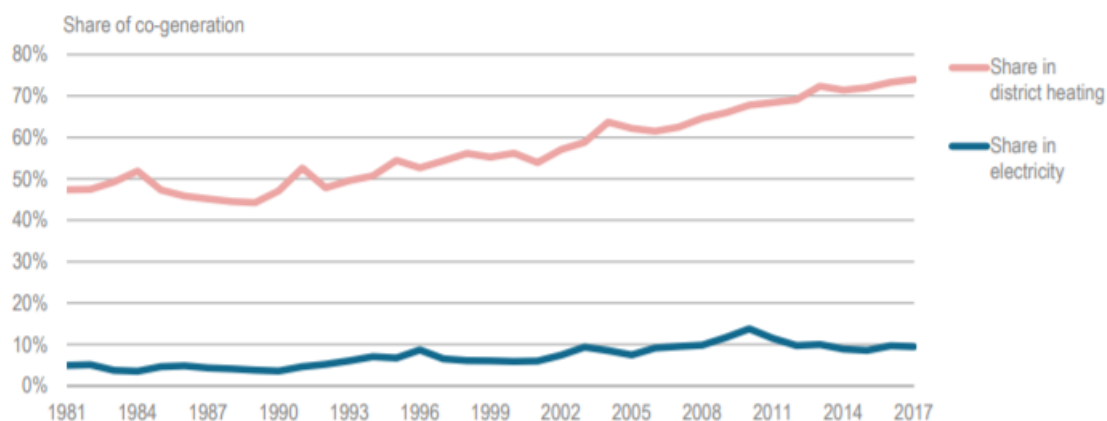


Kuva 10. Kotitalouksien lämmönlähde vuosina 1983-2016 (IEA, Sweden 2019)



Kuva 11. Kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet (IEA Sweden, 2019)

Kuvista 10 ja 11 voidaan päätellä, että fossiilisia polttoaineita pyritään vähentämään, ja uusiutuvien osuutta lämmöntuotannossa pyritään kasvattamaan. Tähän syynä on aiemmin mainittu EU-direktiivi, jonka mukaan tavoitteena on tuottaa 32% kaikesta energiasta uusiutuvilla energialähteillä. Ruotsi on kuitenkin saavuttanut nämä tavoitteet, ja Ruotsin pyrkii tuottamaan vuoteen 2040 mennessä kaiken sähkön uusiutuvilla energialähteillä. (IEA, Sweden 2019)



Kuva 12. Yhteistuotannon osuus kaukolämmön- ja sähköntuotannossa (IEA, Sweden, 2017)

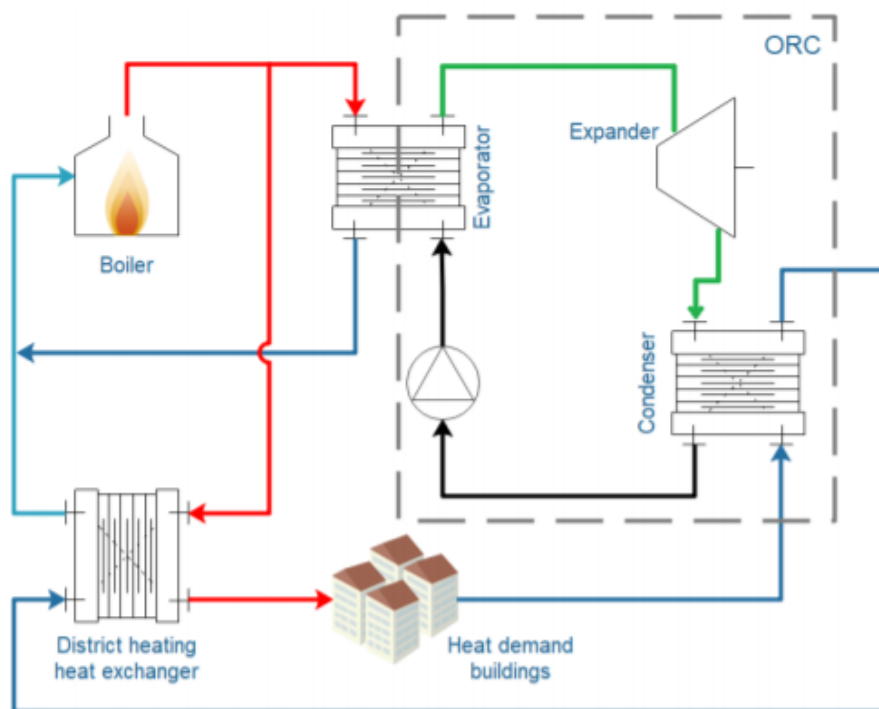
Ruotsissa kehitteillä oleva pien-CHP-yksikkö on Metacon yrityksen kehittämä H2PS-5 (kuva 13). Tämän pien-CHP-yksikön sähköteho on 5 kW ja lämpöteho noin 7 kW. Yksikkö voi toimia usealla polttoaineella: muun muassa biokaasulla, maakaasulla tai bensalla. Yksikön vuotuinen sähköntuotanto on noin 42 500 kWh ja lämmöntuotanto noin 60 000 kWh. (Metacon, 2021)



Kuva 13. H2PS-5 pien-CHP yksikkö (Metacon 2021)

Ronnebyn voimalaitos käyttää ORC-prosessia CHP:n tuotannossa. Laitos on kytketty paikalliseen kaukolämpöverkkoon. Laitoksen sähköteho on 49,9 kW ja kaukolämpöteho 5 MW. Laitoksen lämmönlähteenä toimii kattila, joka käyttää polttoaineena puuhaketta. Laitos toimii siis kokonaan biopolttoaineella. (Wren, et.al, 2020, 23)

Kuvassa 14 on esitetty laitoksen prosessikaavio. Kuvassa käytetyistä termeistä *Evaporator* on höyrystin, *Expander* on turbiini, *Condenser* on lauhdutin, *Boiler* on kattila lähde ja *District heating heat exchanger* on kaukolämmön lämmönsiirrin ja *Heat demand buildings* on lämmöntarve.



Kuva 14. Ronnebyn CHP-laitoksen prosessikaavio (Wren et.al. 2020, 23)

Ruotsissa pien-CHP:n mahdollisuudet ovat pitkälti samat kuin Suomessa. Bioenergian laaja käyttö sekä ydinvoiman alasajo kasvattavat pien-CHP:n potentiaalia merkittävästi. Samat syyt rajaavat pien-CHP:n käyttöä kuin Suomessa. Sähkön alhaisten hintojen takia suuria investointeja pien-CHP-tekniikoihin ei ole tehty. (Oscarsson, 2017)

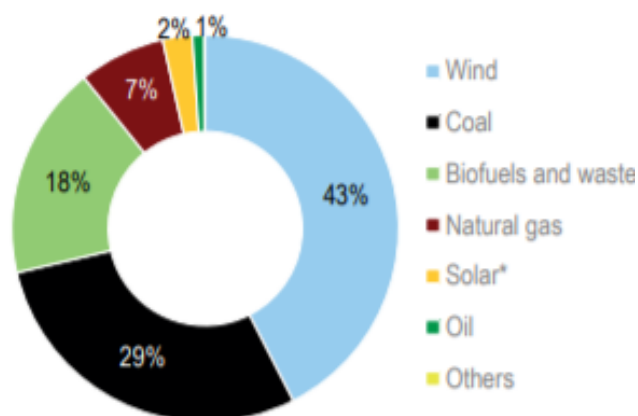
Ruotsissa on useita lämpövoimaloita, jotka toimivat alle 10 MW:n teholla. Aiemmin voimalat eivät soveltuneet yhteistuotantoon, sillä höyryturbiinin lisääminen prosessiin ei olisi ollut taloudellisesti kannattavaa. Tekniikan kehittyessä nämä voimalat voitaisiin investointien ja tutkimuksien kautta muuttaa CHP-voimaloiksi. (SWECO, 2019) Sähkön

alhaisten hintojen takia suurin osa tuloista on saatava lämmön myynnistä lämpöverkkoon, sillä nykyisten hintojen takia sähkönmyynti ei pysty kattamaan kaikkia kustannuksia. (Oscarsson, 2017)

Tällä hetkellä käytetyin pien-CHP-tekniikka on ORC-prosessi. Biomassan kaasutuksen on kuitenkin arvioitu olevan tulevaisuudessa hyvin potentiaalinen lisä ja vaihtoehto pien-CHP markkinoilla. Ruotsissa pohditaan myös sahojen käyttöä energiantuotannossa. Sahat tuottavat yhtä paljon lämpöä kuin lämpövoimalat, mutta niiden vuosittainen käyttöaika on huomattavasti suurempi. Sahojen käyttö energiantuotannossa vaatisi kuitenkin sähkön hinnan nousua, jotta tuotantokustannukset saataisiin nolattua. (Oscarsson, 2017)

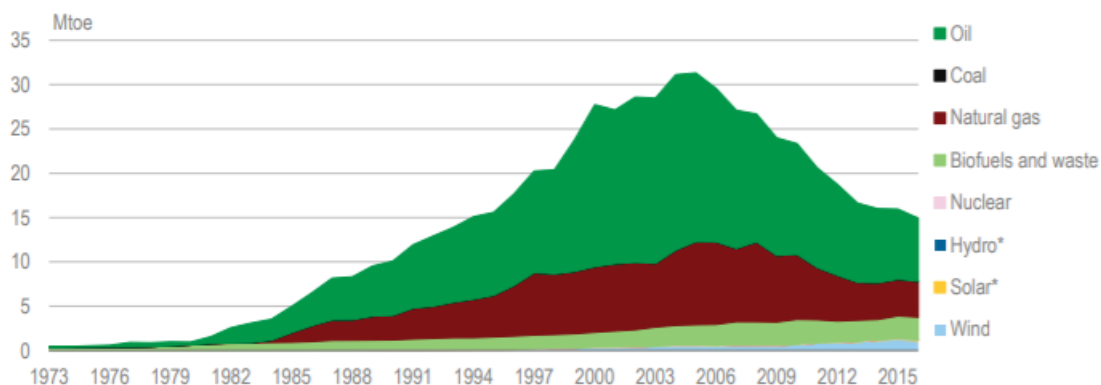
5 TANSKA

Tanska on yksi maailman johtavia maita CHP:n käytössä. Vuonna 2016 yhteistuotannon osuus maan sähköntuotannossa oli 50% ja lämmöntuotannossa lähes 66%. Tanska on myös maailman johtavia maita tuulivoiman käytössä. Vuosina 2015-2016 tuulivoiman osuus sähköntuotannossa oli 42.5%. Kuvasta 15 nähdään Tanskan sähköntuotannossa käytettävät polttoaineet. (IEA, Denmark 2017)



Kuva 15. Polttoaineet sähköntuotannossa vuosina 2016 (IEA, Denmark 2017)

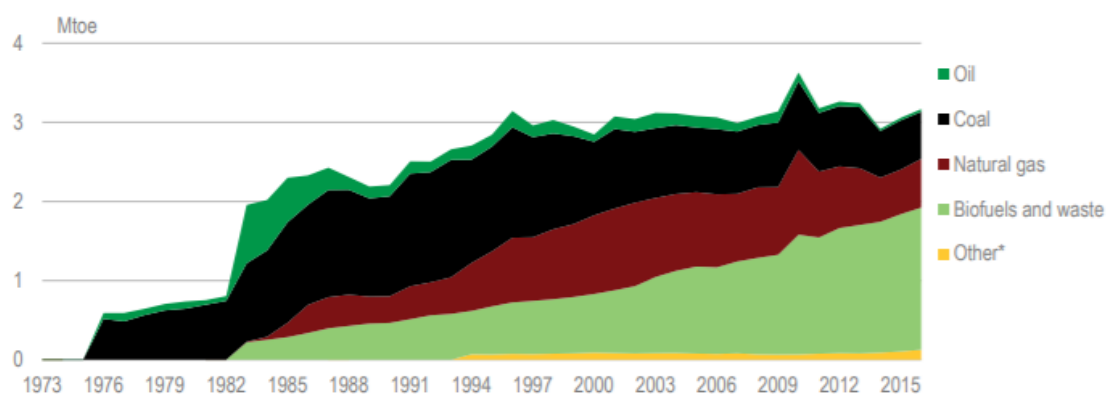
Kuvasta 15 nähdään että tuulivoimalla on suuri osuus Tanskan sähköntuotannossa. Myös biopolttoaineilla on kohtalaisen iso osuus. Tämäkin viittaa siihen, että Tanska pyrkii tuottamaan mahdollisemman puhdasta energiaa. Tanskaa koskevat myös samat ilmastovelvoitteet, kuin Suomea. Kuvassa 16 on esitetty vuosina 1973-2016 käytetyt polttoaineet energiantuotannossa.



Kuva 16. Polttoaineet energiantuotannossa vuosilta 1973-2016 (IEA, Denmark 2017)

Kuvasta 16 nähdään, että fossiilisten polttoaineiden osuus on pienentynyt, ja uusiutuvien (tuulivoima sekä biopolttoaineet) osuus on kasvanut. Tämä perustuu myös EU:n asettamiin tavoitteisiin, jonka mukaan 50% energiasta on tuotettava uusiutuvilla energialähteillä. (Patronen et.al. 2017, 10)

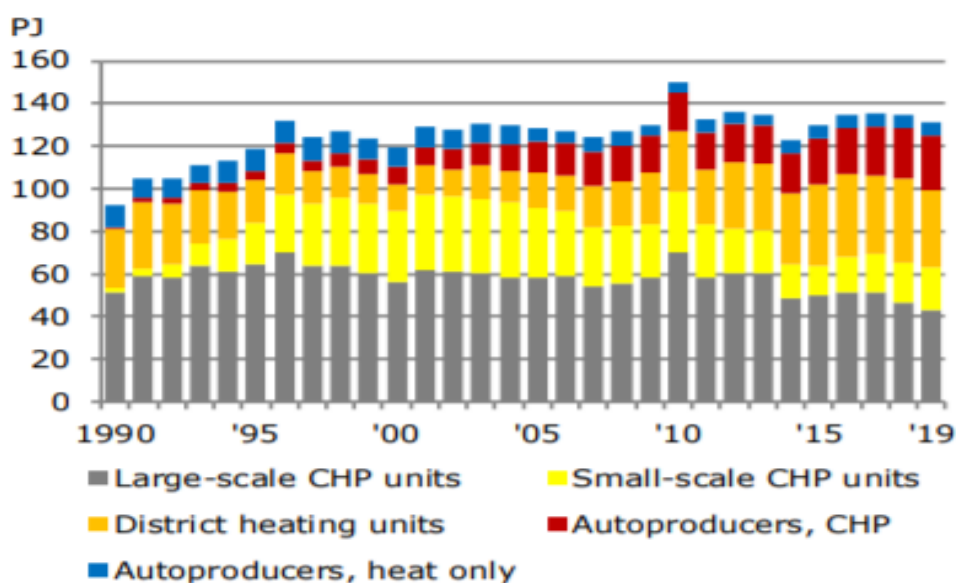
Tanskassa noin 60% kotitalouksista on kytkettyä kaukolämpöverkkoon. CHP:n osuus kaukolämmöntuotannosta on noin 66%. Kaukolämmöntuotannossa biopolttoaineilla on todella suuri osuus, sillä lähes 57% kaukolämmöstä tuotettiin biopolttoaineilla ja jätteillä. Kuvassa 17 on esitetty kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet vuosina 1973-2016. (IEA, Denmark 2017).



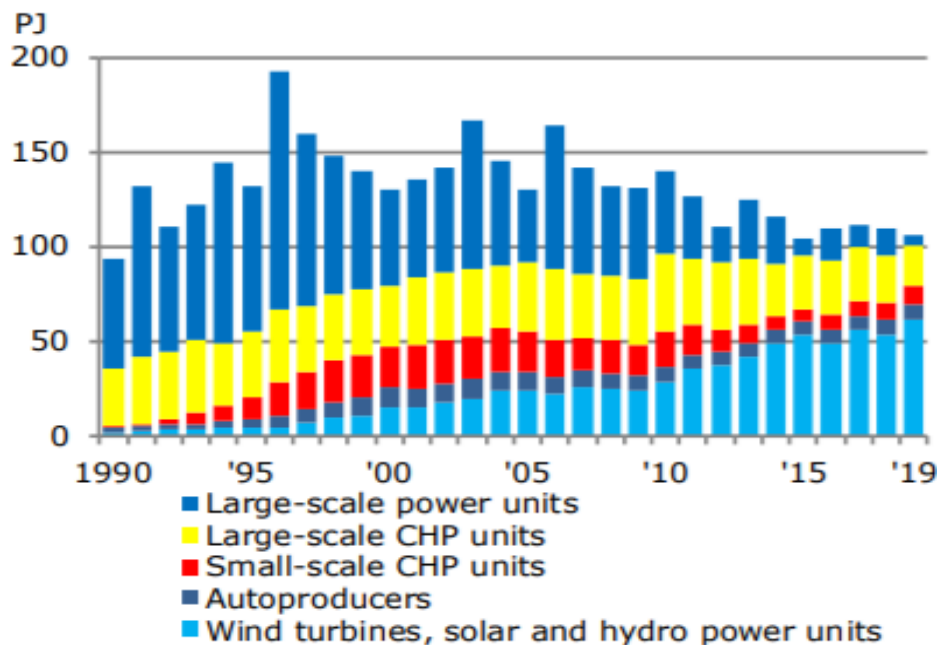
Kuva 17. Kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet 1973-2016 (IEA, Denmark 2017).

Kuvasta 17 nähdään samaa tilanne kun kuvassa 16: Uusiutuvien osuus on nousussa, ja fossiilisten osuus on laskussa. Tavoitteena on pyrkiä eroon fossiilisista polttoaineista, ja korvata ne uusiutuvilla polttoaineilla. (Patronen et al. 2017, 10)

Kuvassa 18 on esitetty kaukolämmöntuotannossa käytetyt laitostyypit, ja kuvassa 19 on esitetty sähköntuotannossa käytetyt laitostyypit.



Kuva 18. Kaukolämmöntuotannossa käytetyt laitostyypit vuosina 1990-2019 (Danish Energy Agency, 2019)



Kuva 19. Sähköntuotannossa käytetyt laitoistyyppit vuosilta 1990-2019. (Danish Energy Agency, 2019)

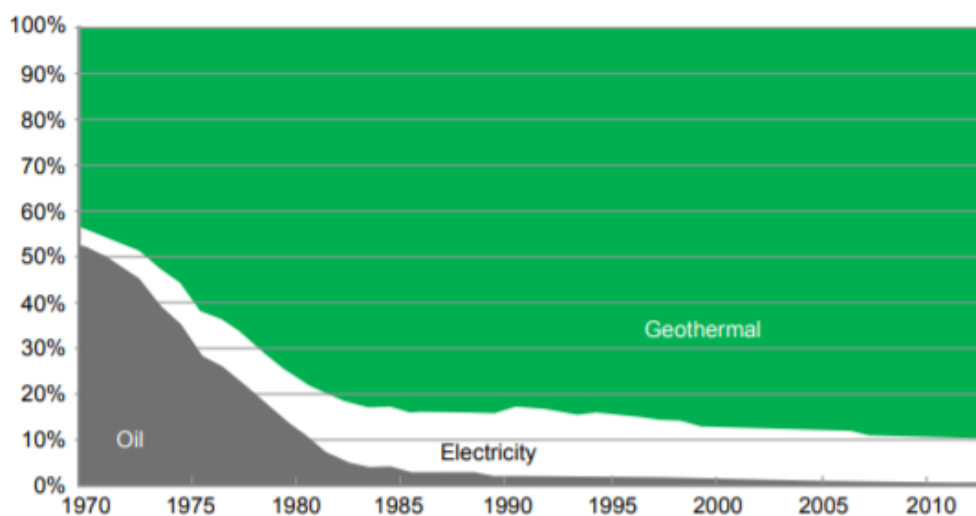
Kuvista 18 ja 19 huomataan, että pien-CHP:n osuus kaukolämmöntuotannossa sekä sähköntuotannossa on laskenut. Pien-CHP:n osuus kaukolämmön- ja sähköntuotannossa on ollut laskussa jo useamman vuoden, etenkin sähköntuotannossa muutos on ollut merkittävä. 1990 vuoteen 2005 kasvu on ollut merkittävää, mutta vuodesta 2005 lähtien pien-CHP:n osuus energiantuotannossa on pienentynyt merkittävästi. Tämän on arvioitu johtuvan sähkön hinnan alentumisesta, jonka vuoksi pien-CHP: tuotanto ei ollut enää taloudellisesti kannattavaa. (Danish Energy Agency, 2019).

Uusiutuvien energialähteiden (etenkin tuuli-, vesi- sekä aurinkovoiman) lisäämisellä on ollut suuri vaikutus pien-CHP:n kilpailukykyyn, sillä kyseiset tuotantomuodot alentavat sähkön hintoja. Tämä johtuu niiden matalimmista tuotantokustannuksista. Tämä näkyy myös pien-CHP:n vähentymisenä kaukolämmöntuotannossa (kuva 18). (Lund et.al, 2016, 129)

6 NORJA JA ISLANTI

Islannissa suuri osa energiasta tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä: 80% energiasta tuotettiin geotermisellä energialla ja 20% tuotettiin vesivoimalla. Noin 99% maan talouksista on lämmitetty geotermisellä energialla. Taloudet lämmitetään joko suoraan geotermisellä energialla tai kaukolämmöllä, joka on tuotettu geotermisellä energialla. 71% Islannin sähköstä tuotettiin vesivoimalla ja loput 29% tuotettiin geotermisellä energialla.

1970-luvulla öljyllä oli merkittävä rooli Islannin energiankulutuksessa: noin 50% talouksista lämmitettiin öljyn avulla. Vuoden 1973 öljykriisin jälkeen Islanti on korvannut öljylämmitystä geotermisellä, sekä uusiutuvilla energialähteillä tuotetulla sähköllä. Kuvassa 20 on esitetty lämmityksessä käytetyt energialähteet vuosilta 1970-2014. (Patronen et.al. 2017)

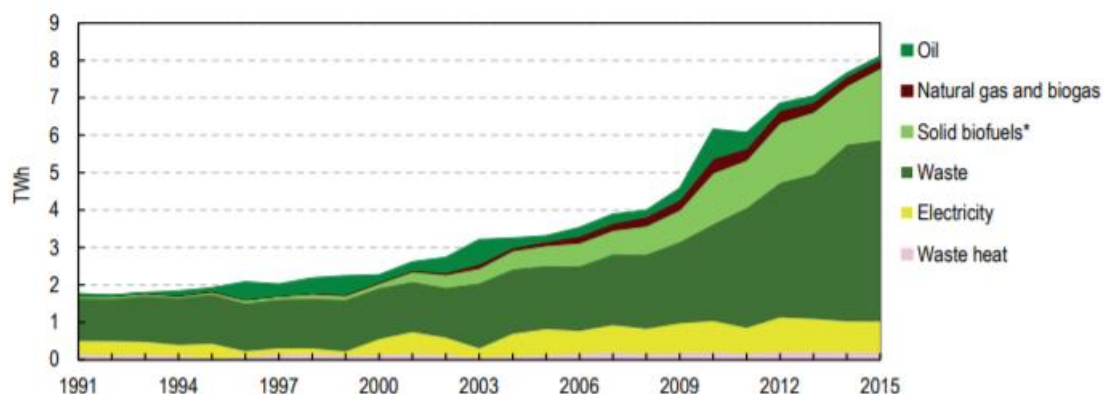


Kuva 20. Lämmityksessä käytetyt energialähteet vuosilta 1970-2014. (Petronen et.al. 2017)

Islannissa saatavilla olevien energialähteiden ansiosta ei ole tarvetta laajalle CHP:n käytölle. Pien-CHP voitaisiin kuitenkin hyödyntää pienillä asuinalueilla, jotka sijaitsevat sähkö- ja kaukolämpöverkon ulkopuolella. Ratkaisuna tähän voisi toimia biomassan ja

etenkin jätteen kaasutus. Polttoaineena voitaisiin käyttää puutarhajätettä, paperijätettä sekä erilaisia puupolttoaineita. (Safarian et.al, 2020)

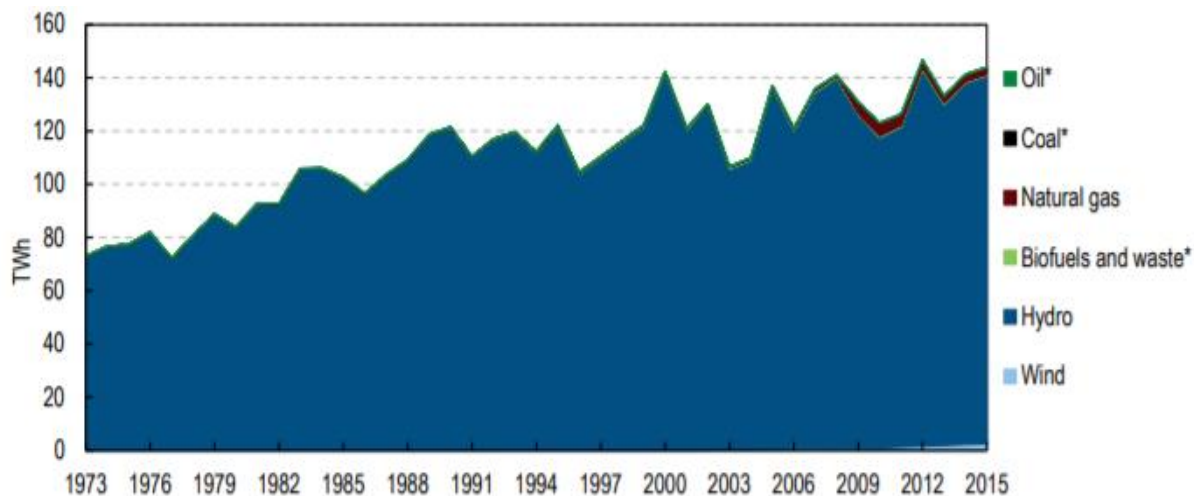
Vuonna 2015 Norjassa tuotettiin 8.1 TWh kaukolämpöä. Suurin osa, 60%, tuotettiin jätteestä. Biopolttoaineilla tuotettiin 24% kaukolämmöstä. Muita kaukolämmön energialähteitä ovat sähkö (10%) ja fossiiliset polttoaineet (öljy ja maakaasu). Kaukolämmön tuotanto on kasvanut huomattavasti viimeisen vuosikymmenen aikana. Noin kolmasosa kaukolämmöstä tuotettiin sähkön ja lämmön yhteistuotannolla. Kuvassa 21 on esitetty kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet, sekä kaukolämmön kokonaistuotanto vuosilta 1991-2015. (IEA Norway, 2017)



Kuva 21. Kaukolämmöntuotannossa käytetyt lähteet vuosilta 1991-2015 (IEA Norway, 2017)

Kuvasta nähdään, että biopolttoaineiden sekä jätteen osuus kaukolämmöntuotannossa on ollut merkittävässä kasvussa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö ei ole merkittävästi vähentynyt, mutta kaukolämmön kapasiteetti on kasvanut merkittävästi, ja kapasiteettia on kasvatettu uusiutuvilla polttoaineilla.

Vuonna 2016 Norja tuotti 96% sähköstään vesivoimalla. Loput 4 % tuotettiin biopolttoaineilla, tuulivoimalla sekä fossiilisilla polttoaineilla. Kuvassa 22 on esitetty sähköntuotannossa käytetyt polttoaineet vuosilta 1973-2015. (IEA Norway, 2017)



Kuva 22. Sähköntuotannossa käytetyt polttoaineet vuosilta 1973-2015 (IEA, Norway)

Norjassa CHP:lla ei ole merkittävää roolia. Kolmasosa maan kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksilla, mutta muuten Norja käyttää muita tuotantotapoja. Biopolttoaineita hyödynnetään jonkin verran kaukolämmöntuotannossa, mutta sähköntuotannossa niitä ei hyödynnetä juuri ollenkaan, sillä Norja kykenee hyödyntämään vesivoimaa vuonojensa ansiosta. (IEA Norway, 2017)

Pien-CHP:lla on kuitenkin jonkin verran potentiaalia Norjassa. Norja pyrkii kasvattamaan biopolttoaineiden osuutta, sillä maalla on kuitenkin huomattavia metsäreservejä. Kannattavimpia pien-CHP tekniikoita olisivat höyryturbiini sekä biomassan kaasutus. Tällä hetkellä pien-CHP-yksiköt eivät ole Norjassa ole kilpailukykyisiä. Tämä johtuu pitkälti investointi- sekä polttoainekustannuksista. Mikäli pien-CHP-laitoksiin määrättäisiin taloudellista tukea, olisi pien-CHP-tuotanto mahdollista myös Norjassa. (Kemegowda et.al, 2012, 1-9)

7 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin Pohjoismaiden pien-CHP tilannetta, sekä käytössä olevia pien-CHP-tekniikoita. Maiden pien-CHP-potentiaalia arvioitiin myös lyhyesti. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon etuja verrattuna erilliseen tuotantoon olivat muun muassa terveydelle, sekä ilmastolle haitallisten päästöjen vähentyminen, käyttö- ja kunnossapitokustannuksien vähentyminen, sekä laitosten hyötysuhteiden parantuminen. Työssä tarkasteltiin höyryturbiinia, ORC-prosessia, kaasua- ja mikroturbiinia, polttomoottoreita, polttokennoja ja biomassan kaasutusta, sillä kyseiset menetelmät soveltuvat hyvin pienen mittakaavan yhteistuotantoon.

Suomessa yhteistuotannon avulla tuotettiin merkittäviä määriä sähköä, lämpöä ja teollisuuslämpöä muita prosesseja varten. Yleisimmät käytössä olevat pien-CHP-tekniikat ovat höyryturbiini sekä kaasutus-kaasumoottori yhdistelmä. Pien-CHP-potentiaali, etenkin laitoksissa, joissa käytetään puupolttoaineita. Suuresta potentiaalista huolimatta, eivät pien-CHP ole yleistyneet merkittävässä määrin. Tähän vaikuttaa etenkin sähkön hinta: Alhaisilla hinnoilla pien-CHP ei ole taloudellisesti kannattavaa. Jotta pien-CHP-laitokset yleistyisivät, on niiden tutkimukseen ja markkinointiin panostettava. Lisäksi fossiilisia polttoaineita on vähennettävä, ja niiden verotusta kiristettävä.

Ruotsissa noin 73% kaukolämmöstä tuotettiin yhteistuotannolla. Biopolttoaineet olivat käytetyin polttoaine lämmöntuotannossa, ja noin 70% kaukolämmöstä tuotettiin biopolttoaineilla. Ruotsissa käytetyin pien-CHP tekniikka on ORC-prosessi. Pien-CHP potentiaali on pitkälti sama kuin suomessa, johtuen biopolttoaineiden käytön kasvusta sekä ydinvoiman alasajosta. Ruotsissakaan pien-CHP-laitoksiin ei ole tehty merkittäviä investointeja, sillä huolta herättävät suuret kustannukset sekä vähäiset käyttökokemukset. Tulevaisuudessa pienen kokoluokan lämpölaitoksia voidaan mahdollisesti tehdä CHP-laitoksia. Lisäksi kaasumoottorin ja sahoja pidetään potentiaalisina, mikäli markkinat ovat suotuisat.

Tanskassa CHP on ollut isossa roolissa: maa on yksi maailman johtavia CHP-käyttäjiä. Kaukolämmöntuotannossa biopolttoaineiden osuus on ollut kasvussa useamman vuoden. Pien-CHP:n käyttö kaukolämmön- ja sähköntuotannossa on viime vuosina vähentynyt, sillä alhaiset sähköhinnat ovat tehneet sitä taloudellisesti epäkannattavaa. Lisäksi muiden energiamuotojen suuren mittakaavan sähköntuotanto (tuuli-, vesi- ja aurinkovoima) kattaa sähkötarpeen lähes kokonaan, jolloin pien-CHP:n osuus lämmöntuotannossa pienenee

Islannissa CHP:lle ei ole merkittävää tarvetta, sillä maa hyödyntää geotermistä energiaa sekä vesivoimaa lämmön- ja sähköntuotantoon. Tulevaisuudessa Islannissa voitaisiin kuitenkin hyödyntää pien-CHP:ta asuinalueilla, jotka ovat sähkö- ja lämpöverkon ulkopuolella. Tämä tekniikka perustuisi lähinnä jätteen ja puubiomassan kaasuttamiseen.

Norja tuotti lähes kaiken (96%) sähköstään vesivoimalla. CHP:lla tuotettiin noin kolmasosa maan kaukolämmöstä vuonna 2016. Norjassa pien-CHP:lla on mahdollisuus, sillä Norjalla on huomattavat metsäreservit, jota se pyrkii hyödyntämään energiantuotannossa. Pien-CHP:n yleistyminen vaatii kuitenkin markkinatilanteen muuttumista. Tulevaisuudessa mahdolliset pien-CHP-yksiköt toimisivat lähinnä höyryturbiinilla tai kaasumoottorilla.

Pien-CHP-tekniikoilla on paljon potentiaalia. Niiden yleistyminen vaatii kuitenkin lisää käyttökokemuksia, kustannusten pienentymistä sekä markkinatilanteen muuttumista. Biopolttoaineiden lisääminen laajentaa pien-CHP:n käyttömahdollisuuksia, ja niiden käyttö vähentäisi huomattavasti haitallisia kasvihuonepäästöjä. Pien-CHP:n avulla energiajärjestelmä ei tarvitsisi olla niin keskittynyt, vaan energia tuotettaisiin kuluttajan läheisyydessä.

LÄHDELUETTELO

Ahrenfeldt Jesper et.al. 2013. Biomass gasification cogeneration – A review of state of the art technology and near future perspectives. Applied thermal Engineering. Vol 50. S. 1407-1417. Elsevier

Basu Prabir. 2018. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press 584 s. ISBN 978-0-12-812992-0

Beith Robert. 2011. Small and micro combined heat and power (CHP) systems: advanced design, performance, and applications. Cambridge: Woodhead Publishing 528 s. ISBN 978-1-84569-795-2.

Bioenergianeuvoja. 2021. *Pien CHP: Kuittilan maitokarjatila- Pien CHP (Combined heat and power)*. [Verkkosivu] [Viitattu 15.7.2021] Saatavilla: <https://www.bioenergianeuvoja.fi/biolampolaitos/kayttajakokemuksia/pien-chp/>

Breeze Paul A. 2019. Power generation technologies. Newnes 463 s. ISBN 978-0-12-818255-0

Danish Energy Agency. 2019. *Data, tables, statistics og maps*.

Danish Energy Agency. 2015. *Regulation and planning of district heating in Denmark*.

Energiairaitti. 2019. *Volter 40-hakkeella toimiva pien CHP*. [Verkkosivu] [Viitattu 10.7.2021] Saatavilla: <https://energiaraitti.karelia.fi/esittelykohteet-sirkkalan-energiapuisto-volter-40-hakkeella-toimiva-pien-chp/>

EPA-U.S. Environmental Protection Agency. 2017. Catalog of CHP Technologies. 150 s.

Eurostat. 2021. [www-sivu]. Share of renewable energy in gross final energy consumption. [Viitattu 23.7.2021]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/t2020_31/default/table?lang=en

Frangopoulos Christos. A. 2017. Cogeneration: Technologies, optimization and implementation. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology 360 s. ISBN 978-1-78561-056-1.

IEA-International Energy Agency. 2017. Energy Policies of IEA Countries: Denmark 2017 Review.

IEA-International Energy Agency.2018. Energy Policies of IEA Countries: Finland 2018 Review.

IEA-International Energy Agency.2018. Energy Policies of IEA Countries: Norway 2017 Review.

IEA-International Energy Agency. 2019. Energy Policies of IEA Countries: Sweden 2019 Review.

Karjalainen Timo. 2012. Pienmuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus-laitteet ja niiden käyttöönotto. Motiva 30 s.

Kemegowda Rajesh S et.al. 2012. Techno-economic Evaluations of Various Biomass CHP Technologies and Policy Measures Under Norwegian Conditions. Energy Procedia. Vol 20. S. 1-10. Elsevier

Lund Rasmus, Urban Persson. 2016. Mapping of potential heat sources for heat pumps for district heating in Denmark. Energy. S 129-138. Elsevier.

Macchi Ennio, Astolfi Marco. 2016. Organic rankine cycle (ORC) power systems: technologies and applications. Woodhead Publishing 698 s. ISBN 978-0-08-100511-8

Metacon AB.2021. *Small CHP Systems H2PS-5*. [Verkkosivu] [Viitattu 31.7.2021] Saatavilla: <https://metacon.se/small-chp-systems/>

Molini Antonio et.al. 2016. Biomass gasification technology: The state of the art overview. Journal of Energy Chemistry. S. 10-25. Elsevier.

Oscarsson Pär. 2017. Konkurenskräftig småskalig kraftvärme? En studie av marknaden och tekniker. Svebio 32 s.

Patronen Jenni, Kuara Eeva, Torvestad Cathrine. 2017. Nordic heating and cooling: Nordic approach to EU's Heating and Cooling strategy. Nordic Council of Ministers 113 s. ISBN 978-92-893-4992-5.

Pesola Aki et al. 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Gaia Consulting Oy 73 s.

Safarian Sahar et al. 2020. Performance analysis and environmental assessment of small-scale waste biomass gasification integrated CHP in Iceland. Energy. Elsevier

Salomón Marianne et al. 2011. Small-scale biomass CHP plants in Sweden and Finland. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 15. S. 4451-4465. Elsevier.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. 4. Vuosineljännes 2020. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 8.6.2021]. Saatavilla: http://www.stat.fi/til/ehk/2020/04/ehk_2020_04_2021-04-16_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-5072. 2019, Liitekuvio 8. Polttoaineiden käyttö sähkön ja lämmön yhteistuotannossa 2018-2019. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.6.2021] Saatavilla: http://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_kuv_008_fi.html

Sweetser Richard et al. 2015. Combined Heat and Power Design Guide. ASHARE 370 s. ISBN 978-1-936504-87-9

SWECO. 2019. Distributed electricity production and self-consumption in the Nordics: A report to the Nordic council of ministers. Sweco Energuide AB 94 s.

Thomas David. h. 2010. Energy efficiency through combined heat and power or cogeneration. Nova Science Publishers 389 s. ISBN 1-61122-456-X.

Wren Joakim et al.2020. Performance and potential of small-scale orc systems. Energiforsk AB 80 s. ISBN 978-91-7673-717-0.