

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Polttokennoihin perustuva mikro-CHP-järjestelmä

Micro-CHP energy system based on fuel cells

Työn tarkastaja: Markku Nikku

Työn ohjaaja: Markku Nikku

Lappeenranta 22.2.2019

Annamaria Tiainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Annamaria Tielinen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Markku Nikku

Kandidaatintyö 2019

25 sivua, 6 kuvaa ja 4 taulukkoa

Hakusanat: polttokenno, CHP, mikro-CHP

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, onko polttokennojärjestelmän käyttäminen sähkön ja lämmön tuottamiseen mikrokokoluokassa teknisesti ja taloudellisesti järkevää. Työssä perehdytään polttokennojen rakenteeseen ja toimintaan sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantoon kirjallisuuden avulla. Esimerkkinä käytännön sovelluskohteesta työssä tarkastellaan lappeenrantalaista kerrostaloa.

Esimerkkikohteen tarkastelussa selvisi, että kerrostalossa lämmöntarve on jopa kymmenkertainen sähköntarpeeseen verrattuna. Polttokennojen lämpöteho on suurimmillaan suunnilleen yhtä suuri kuin sähköteho. Polttokennojärjestelmä kannattaa kuitenkin mitoittaa sähköntarpeen mukaan, jottei kalliisti tuotettua sähköä jouduta myymään halvalla verkkoon. Näin ollen lisälämmön tarve on suuri.

Taloudellisessa tarkastelussa huomattiin, että esimerkkikohteen sähkön- ja lämmöntarpeen kattaminen polttokennoihin perustuvalla CHP-järjestelmällä ja kaukolämmöllä tulisi kalliimmaksi kuin taloyhtiön nykyinen ratkaisu. Suurimmat ongelmat ovat polttokennojen lyhyt käyttöikä ja korkea hankintahinta, maakaasun hinta suhteessa sähkön hintaan sekä suuri lisälämmön tarve.

Polttokennojen tekniset ominaisuudet ovat varsin hyvät. Sähköhyötysuhde vaihtelee välillä 30–60 % ja CHP-tuotannossa kokonaishyötysuhde voi olla jopa 85 %. Mikäli polttokennoihin vielä löydetään halvempia ja paremmin kuumuutta kestäviä materiaaleja, tulevaisuudessa ne voisivat olla kilpailukykyinen vaihtoehto.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Polttokenno	7
2.1 Polttokennon rakenne ja toimintaperiaate	7
2.2 Polttokennotyypit elektrolyytin mukaan	9
3 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto	13
3.1 Mikro-CHP	13
3.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto polttokennolla	13
3.2.1 Polttokennojärjestelmän lisälaitteet	13
3.2.2 Polttokennojärjestelmän kustannukset	15
4 Esimerkki käytännön sovelluksesta	17
4.1 Esimerkkikohteen tarpeiden määrittely	17
4.2 Taloudellinen tarkastelu	19
5 Tulosten tarkastelu	24
6 Yhteenveto	25
Lähdeluettelo	26

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c	annuiteettitekijä	
E	energia	[kWh]
I	investointi	[€]
i	korko	
K	kustannus	[€]
k	kustannus	[€/kWh]
n	taloudellinen pitoaika	[a]
Q	lämpöenergia	[kWh]

Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde
--------	------------

Alaindeksit

CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (engl. Combined Heat and Power)
e	sähkö
h	lämpö
kk	käyttö- ja kunnossapito
max	suurin
min	pienin
po	pääoma
tot	kokonais-, sekä sähkö että lämpö

Lyhenteet

AFC	alkalipolttokenno (engl. Alkaline Fuel Cell)
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (engl. Combined Heat and Power)
MCFC	sulakarbonaattipolttokenno (engl. Molten Carbonate Fuel Cell)
PAFC	fosforihappopolttokenno (engl. Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEFC	polymeerielektrolyyttipolttokenno (engl. Polymer Electrolyte Fuel Cell)
SOFC	kiinteäoksidipolttokenno (engl. Solid Oxide Fuel Cell)

1 JOHDANTO

Maapallolla ilmasto lämpenee ja ympäristöolot muuttuvat. Ilmaston lämpenemisen seurauksena jäätiköt sulavat, merenpinta nousee ja eläin- ja kasvilajit menettävät elinympäristönsä. Jo pitkään on tiedostettu, että vaikka muutokset ilmastossa ovat luonnollisia, on ihmisten toiminnalla ja esimerkiksi siitä aiheutuvilla kasvihuonekaasuilla suuri muutoksia kiihdyttävä vaikutus. Yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttajista on energian tuotanto. Ilmasto-opas-sivuston mukaan esimerkiksi vuonna 2008 Suomen kasvihuonekaasupäästöistä 44 % aiheutui pelkästään energiantuotannosta, energiasektori kokonaisuudessaan kattoi päästöistä yli kolme neljäsosaa (Ilmasto-opas 2010). Energia-alalla etsitään ja kehitetään jatkuvasti uusia ratkaisuja päästöjen pienentämiseksi. Yksi ratkaisusta on tuottaa lämpö ja sähköä lähellä kuluttajia. Tällöin voitaisiin hyödyntää helpommin myös uusiutuvia energialähteitä. Järkevää on myös yhdistää sähkön ja lämmöntuotanto, jolloin hukkaenergia voidaan minimoida.

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, jolla polttoaineen kemiallinen energia voidaan muuntaa suoraan sähköenergiaksi. Polttoaineena käytetään yleensä vetyä tai sen yhdisteitä. Polttokennot voidaan luokitella esimerkiksi elektrolyytin perusteella.

Polttokennot eivät ole mikään uusi keksintö, vaan niiden kehitys on aloitettu jo 1800-luvun alkupuoliskolla. Ensimmäiset polttokennosovellukset nähtiin yli sata vuotta myöhemmin 1950-luvun lopussa avaruussukkulassa. (Halinen 2007a, 3–4.) Vuosikymmenten saatossa polttokennoja on suunniteltu käytettäväksi monissa sovelluskohteissa ja niiden lopullista läpimurtoa on odotettu. Esimerkiksi vielä vuonna 2005 VTT:n raportissa arveltiin, että polttokennoautot mullistavat liikenteen ja kattavat 2050-luvulla jo lähes koko ajoneuvokannan (Forsström & Lehtilä 2005, 34).

Nykypäivänä polttokennojen kehitys on jäänyt hieman jälkeen muista teknologioista. Esimerkiksi ajoneuvoissa akkuteknologia on kehittynyt niin paljon, että VTT:n skenaario tuskin toteutuu. Polttokennoja kuitenkin kehitetään koko ajan, joten niiden tarjoamia mahdollisuuksia kannattaa tutkia. Yksi mielenkiintoinen sovelluskohde on lähelle kuluttajia hajautettu sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Polttokennossa vapautuu sähkön

ohella lämpöä, joka on joka tapauksessa poistettava kennosta toimivuuden takaamiseksi. Hukkalämpö kannattaa käyttää hyödyksi.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan polttokennojen soveltuvuutta yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon. Työn tavoitteena on selvittää, onko teknisesti ja taloudellisesti järkevää käyttää polttokennojärjestelmää yhdistettynä esimerkiksi maa- tai biokaasuun kerrostalossa sähkön tuottamiseen sekä käyttö- ja lämmitysveden lämmittämiseen. Työssä selvitetään kerrostalon vuotuinen sähkön- ja lämmöntarve sekä se, millainen kenno näihin tarpeisiin vaaditaan ja millaiset kustannukset siitä syntyisi.

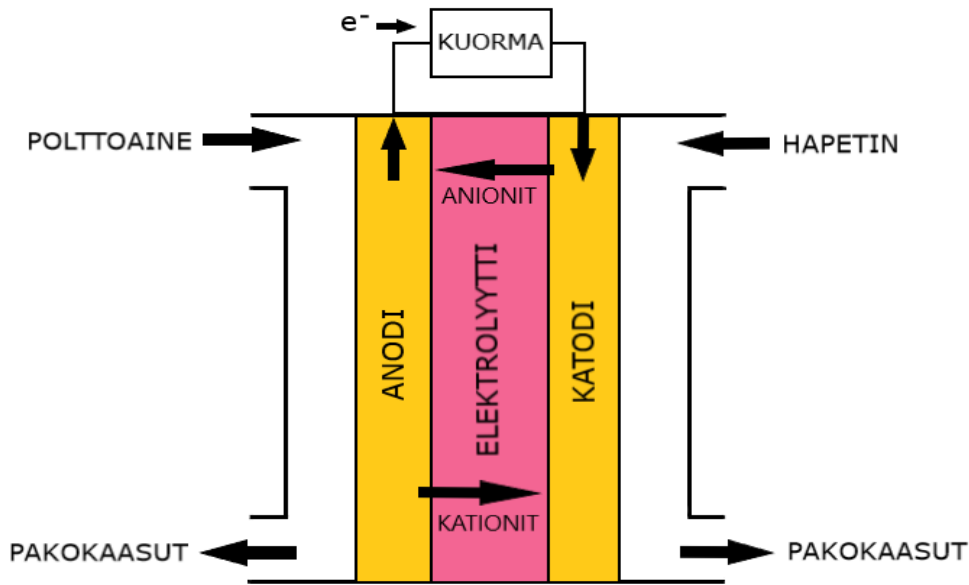
2 POLTTOKENNO

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, jossa käytettävän polttoaineen sisältämä kemiallinen energia saadaan muunnettua suoraan sähköenergiaksi. Kun puhdas happi hapettaa puhtaan vedyn, on lopputuote pelkkää vettä. Hapettumis-pelkistymisreaktiossa vapautuva kemiallinen energia muuntuu polttokennossa tasavirtasähköksi ja lämmöksi. Yhdestä kennosta saatava tasavirta on matalajännitteistä ja teho alhainen. Suuremman jännitteen ja tehon saavuttamiseksi polttokennoja voidaan kytkeä yhteen suuremmaksi moduuliksi (Hepola & Kurkela 2002, 40).

2.1 Polttokennon rakenne ja toimintaperiaate

Polttokennon rakenne koostuu positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista, katodista ja anodista, joiden välissä on ioneja kuljettava elektrolyytti. Polttoaine syötetään yleensä anodille, missä se hapettuu ja elektroni irtoaa. Anodilta elektroni kulkee ulkoista virtapiiriä pitkin katodille, missä se reagoi hapettimen kanssa. Elektrodien välissä oleva elektrolyytti kuljettaa joko positiiviset ionit, eli kationit, anodilta katodille tai negatiiviset ionit, eli anionit, katodilta anodille, riippuen elektrolyytin tyypistä. (Hepola & Kurkela 2002, 40.) Ionien liikkeen suunnasta riippuu, kummalla elektrodilla reaktiotuotteet syntyvät.

Polttokennot voidaan jakaa eri tyypeihin esimerkiksi elektrolyytin tai toimintalämpötilan perusteella. Korkealämpötilapolttokennoissa ioninjohtokyky on korkean lämpötilan ansiosta hyvä ja niissä voidaan käyttää elektrodeilla edullisempia katalyyttimateriaaleja (Pihlatie 2003, 14). Sen sijaan alhaisemmissa lämpötiloissa toimivissa kennoissa riittävä ionien reaktionopeus on varmistettava jalometallikatalyyteillä. Polttokennon rakenne esitetään yksinkertaistetusti kuvassa 1.



Kuva 1. Polttokennon rakenne ja toimintaperiaate.

Polttokennon toiminta perustuu sähkökemiallisiin reaktioihin. Anodilla ja katodilla tapahtuu erilliset reaktiot, joita voidaan tarkastella yhdistettynä kennoreaktiona. Yksinkertaisimmillaan reaktiot ovat, kun polttoaineena on puhdasta vetyä ja hapettimena happea. Tällaista tilannetta tarkastellaan seuraavissa yhtälöissä.

Yhtälössä (1) on esitetty anodireaktio.



Yhtälössä (2) nähdään katodireaktio.



Kun anodi- ja katodireaktiot yhdistetään, saadaan yhtälön (3) mukainen kennoreaktio.



2.2 Polttokennotyytit elektrolyytin mukaan

Kiinteäoksidipolttokennoissa (engl. Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) on elektrolyytinä kiinteää metallioksidia, yleisimmin yttriumoksidilla seostettua zirkoniumoksidia, joka ei välttämättä ole ioninjohtavuusominaisuuksiltaan paras vaihtoehto, mutta tällä hetkellä taloudellisestiärkevin valinta. SOFC-tyyppien kennojen toimintalämpötila on 600–1000 °C, mikä aiheuttaa haasteita materiaalikestävyyteen. (Breeze 2017, 63–67.) Tarpeeksi kuumuutta kestävien materiaalien valmistus on toistaiseksi vielä melko kallista. Kiinteä elektrolyytti mahdollistaa monenlaisia kennorakenteita. Pääasiassa SOFC-kennojen kehityksessä on keskitytty kahteen rakenteeseen, putkimaiseen ja levyäiseen malliin (Breeze 2017, 68).

Kiinteäoksidipolttokennoissa voidaan käyttää kennoista monipuolisimmin eri polttoaineita. SOFC-tyyppien kennot sietävät epäpuhtauksia muita kennoja paremmin ja polttoaineen hiilivedyt voidaan reformoida vedyksi kennosta saatavalla lämmöllä. (Pihlatie 2003, 17.) Kiinteäoksidipolttokennot soveltuisivat yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon hyvin, sillä korkean toimintalämpötilan ansiosta niistä saadaan hyvin lämpöä talteen ja lisäksi polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi maa- ja biokaasua. Kiinteäoksidipolttokennojen sähköntuottohyötysuhde on noin 60 % ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa voidaan saavuttaa jopa 85 % hyötysuhde (Ojapalo 2010, 22). Vuonna 2003 SOFC-kennot sopivat parhaiten tehoalueen 100 kW–10 MW sovelluksiin (Laaninen 2003, 5). Tänä päivänä esimerkiksi suomalainen Convion Oy valmistaa SOFC-tyyppien kennoja, joiden sähköteho on 50–300 kW (Convion Oy, 2019). Pilottimittakaavassa SOFC-kennoilla on saavutettavissa jopa 20 vuoden käyttöikä (Breeze 2017, 68).

Korkean toimintalämpötilan vuoksi kiinteäoksidipolttokennoihin liittyy kaksi tärkeää kehityssuuntaa. Toisaalta etsitään ja kehitetään uusia materiaaleja, jotka kestäisivät paremmin korkean lämpötilan korroosiota ja olisivat mahdollisesti myös halvempia. Samaan aikaan SOFC-kennojen toimintalämpötila yritetään saada laskettua alueelle 600–800 °C, jolloin komponenttien elinikä pitenisi. Lämpötilan aleneminen tosin tarkoittaisi myös esimerkiksi uusien elektrolyyttiratkaisuiden kehittämistä. (Pihlatie 2003, 15.)

Sulakarbonaattipolttokennot (engl. Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) kuuluvat kiinteäoksidipolttokennojen kanssa korkealämpötilapolttokennoihin. Sulakarbonaattipolttokennojen toimintalämpötila on noin 650 °C (Breeze 2017, 53). Elektrolyytinä MCFC-kennoissa käytetään sulaa karbonaattiseosta, useimmiten litium-kalium-karbonaattia (Pihlatie 2003, 13). Korkean toimintalämpötilan ansiosta sulakarbonaattipolttokennoissa ioninjohtokyky on hyvä ja katalyyttinä voidaan käyttää anodilla nikkeliä ja katodilla nikkelioksidia (Pihlatie 2003, 13), jotka ovat jalometalleihin verrattuina edullisia.

MCFC-tyypin kennoissa on joitakin rajoitteita polttoaineen valinnalle. Jotta sulakarbonaattikennon kennoreaktiot olisivat mahdollisia, täytyy polttoaineen sisältää hiiltä. Esimerkiksi maakaasu olisi MCFC-kennolle sopiva polttoaine. Sen sijaan rikkiä sulakarbonaattipolttokennoon ei saa päästä lainkaan. Kennossa rikki hapettuu ensin rikkioksideiksi, jotka myöhemmin muodostavat sulfaatteja elektrolyytissä. Vetysulfaatit pelkistyvät vetysulfidiksi, joka on haitallista MCFC-kennolle. (Pihlatie 2003, 4–13.)

MCFC-kennosovelluksille taloudellisesti järkevä tehoalue on 100 kilowatista ylöspäin (Breeze 2017, 62). Korkean toimintalämpötilan ansiosta MCFC soveltuu hyvin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Sulakarbonaattipolttokennojen sähköntuottohyötysuhde vaihtelee välillä 45–60 %, ja yhteistuotannossa saavutetaan jopa 85 % kokonaishyötysuhde (Ojapalo 2010, 21).

Polymeerielektrolyttipolttokennoissa (engl. Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) elektrolyytinä on ioninvaihtomembraani eli polymeerikalvo. Jotta ioninvaihtomembraani olisi protonijohtava, se täytyy kostuttaa vedellä. Tästä syystä lämpötila polttokennossa ei voi nousta veden kiehumispisteen yli. (Pihlatie 2003, 8–9.) PEFC-tyypin kennot toimivatkin tavallisesti noin 80 celsiusasteen lämpötilassa. Koska polymeerielektrolyttikennon toimintalämpötila on alhainen, siinä on käytettävä runsaasti kallista platinakatalyyttiä. PEFC-tyypin kennojen sähköntuottohyötysuhde on lähteestä riippuen 30–60 % (Battelle Memorial Institute 2017, 133, Ojapalo 2010, 15). Lämmöntalteenotolla kokonaishyötysuhde on 80 % (Battelle Memorial Institute 2017, 133). Polymeerielektrolyttikennon käyttöikä on noin 10 000 h (Breeze 2017, 37).

Valmistuskustannusten nousun lisäksi platinan käyttö aiheuttaa ongelmia polttoaineen valinnassa. Platinakatalyytin vuoksi kennoon ei saa päästä hiilimonoksidia, sillä se tarttuu platinan pintaan ja estää kennon sähkökemialliset reaktiot. Näin ollen polttoaineista ainoastaan puhdas vety on polymeerielektrodipolttokennoille täysin ongelmaton. Yksi tärkeimpiä kehitystehtäviä PEFC-tyypin kennoissa on keksiä keinoja platinan vähentämiseksi. (Breeze 2017, 39.)

Polymeerielektrolyyttikennoissa täytyy huolehtia vesitasapainosta. Koska elektrolyytti ei toimi ilman vedellä kostuttamista, on tärkeää, ettei se pääse kuivumaan. Toisaalta katodilla muodostuu vettä ja täytyy pitää huoli, että ylimääräinen vesi poistuu eikä kenno tulvi, sillä liika vesi estää kaasun kulkemisen kennossa ja näin ollen myös sähkökemialliset reaktiot. (Pihlatie 2003, 10.) PEFC-tyypin kennon käyttöikä on noin 10 000 tuntia ja yksittäisestä kennosta saatava jännite on korkeimmillaan 0,7–0,8 V. (Breeze 2017, 33–43.)

Alkalipolttokennoissa (engl. Alkaline Fuel Cell, AFC) käytetään elektrolyytinä yleisimmin kaliumhydroksidia. AFC:n toimintalämpötila voi olla alimmillaan alle 120 °C ja ylimmillään noin 260 °C. Alkalipolttokennojen suurin ongelma on, että ne ovat hyvin herkkiä polttoaineen ja hapettimen epäpuhtauksille. AFC-kennoja on käytetty muun muassa astronauttien juomaveden tuottamiseen, mutta yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon niitä ei ole sovellettu. (Pihlatie 2003, 11.) Toinen AFC-kennojen ongelma on niiden lyhyt käyttöikä, joka on vain noin 4 000–5 000 tuntia (Breeze 2017, 27). Alkalipolttokennolla voidaan tuottaa sähköä 45–60 % hyötysuhteella (Ojapalo 2010, 16).

Fosforihappopolttokenno (engl. Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC) käyttää elektrolyytinä nimensä mukaisesti fosforihappoa. Fosforihappo on stabiilia noin 200 °C lämpötilassa, joten PAFC:n toimintalämpötila pyritään pitämään kyseisellä alueella, yleensä noin 190–210 celsiusasteessa. (Breeze 2017, 47.) Katalyyttinä PAFC-kennoissa käytetään kallista platinaa, mutta huokoisesta polytetrafluorietyleenistä valmistetut elektrodit, joihin platina-atomit kiinnittyvät, pienentävät tarvittavan platinan määrää. (Pihlatie 2003, 12.)

Fosforihappopolttokennojen kehitys on ollut jo 2000-luvun alussa niin pitkällä, että valmiita kaupallisia tuotteita kokoluokassa 50 kW–5 MW on ollut markkinoilla jo tuolloin. (Pihlatie 2003, 12–13.) Parhaiten PAFC sopii tehoalueen 200 kW–2 MW sovelluksiin (Laaninen 2003, 4). Vuonna 2017 fosforihappopolttokennoilla on päästy 40 000 tunnin käyttöikään ja tähän on odotettu vielä parannusta (Breeze 2017, 49).

Korkean toimintalämpötilansa ansiosta fosforihappopolttokennot sopivat sähkön ja lämmön yhteistuotantoon hyvin ja sietävät polttoaineen epäpuhtauksia (Pihlatie 2003, 12). Polttoaineena voidaankin käyttää esimerkiksi maakaasua tai kaatopaikkakaasuja. Hyötysuhteita vertailtaessa kuitenkin esimerkiksi sulakarbonaattipolttokenno on PAFC-kennoa parempi, sillä saman kokoisella MCFC-kennolla saavutetaan suurempi teho paremmalla hyötysuhteella ja lisäksi MCFC-kenno toimii korkeammassa lämpötilassa. (Laaninen 2003, 3–4.) PAFC-tyypin kennojen sähköntuottohyötysuhde on 40–50 % ja kokonaisyötysuhde jopa 85 % (Ojapalo 2010, 13).

Polttokennotyyppien ominaisuuksia on koottu taulukkoon 1. Nykypäivänä kaupallisia sovelluksia on tehty erityisesti kiinteäoksid- ja polymeerielektrolyyttipolttokennoista.

Taulukko 1. Polttokennotyyppien ominaisuuksia.

Kennotyyppi	SOFC	MCFC	PEFC	AFC	PAFC
Elektrolyytti	kiinteä metallioksidi	sula karbonaattiseos	polymeerikalvo	kaliumhydroksidiseos	fosforihappo
Toimintalämpötila [°C]	600–1 000	600–700	noin 80	< 120–260	190–210
Sähköhyötysuhde [%]	60	45–60	30–60	45–60	40–50
Kokonaisyötysuhde [%]	85	85	80	-	85
Katalyytti	perovskiitti	nikkeli	platina	platina	platina
Onko sovellettu CHP-käyttöön?	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä

3 SÄHKÖN JA LÄMMÖN YHTEISTUOTANTO

Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla (engl. Combined Heat and Power, CHP) tarkoitetaan energiantuotantoa, jossa sähköntuotannossa syntynyt hukkalämpö käytetään hyödyksi esimerkiksi teollisuusprosessissa tai pienemmässä mittakaavassa paikallisesti kiinteistön käyttö- tai lämmitysveden lämmittämiseen. Kun sähköntuotannossa syntynyt lämpö käytetään hyödyksi, saavutetaan parempi hyötysuhde kuin sähkön ja lämmön erillistuotannossa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa polttoaineen sisältämästä energiasta hyödynnetään suurempi osa.

3.1 Mikro-CHP

Kun yhteistuotantolaitoksen sähköteho on alle 50 kW, puhutaan mikro-CHP:stä (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2012). Nykypäivänä käytössä olevia mikro-CHP-tekniikoita ovat mikroturbiinit ja Stirling-moottorit. CHP-tuotannossa mikroturbiinilla voidaan päästä 85 % hyötysuhteeseen, kun järjestelmään lisätään lämmöntalteenotto. Stirling-moottorilla yhteistuotannon kokonaishyötysuhde on välillä 75–90 %. Molemmilla tekniikoilla huollon tarve on vähäinen ja tyypillinen käyttöikä on noin 15 vuotta. Kumpikaan tekniikoista ei ole vielä laajasti käytössä. (Saksio & Takalo 2013, 11.)

3.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto polttokennolla

Sähkön ja lämmön yhteistuotantoon lupaavimpia polttokennotyyppejä ovat polymeerielektrolyytti- ja kiinteäoksidikennot. Jotta polttokennoja voidaan käyttää CHP-tuotannossa, tarvitaan pelkkien kennojen lisäksi paljon muutakin. Polttokennojen hankintahinnat ovat melko korkeita, mutta käytönaikaiset kustannukset ovat varsin kilpailukykyisiä.

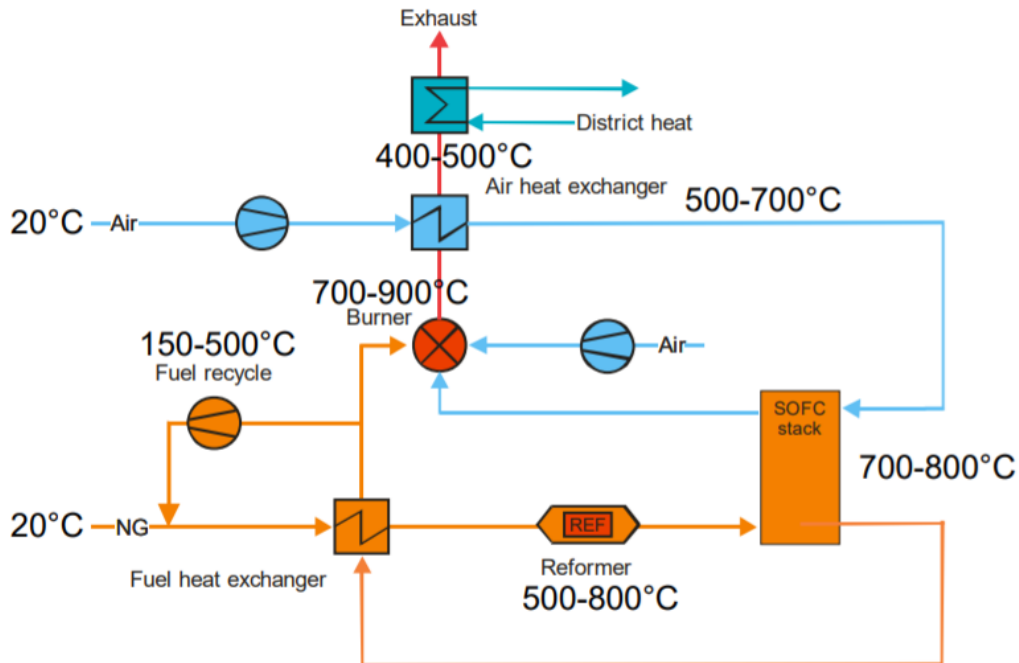
3.2.1 Polttokennojärjestelmän lisälaitteet

Koska vetyä ei esiinny luonnossa sellaisenaan lähes lainkaan, täytyy se ottaa hiilivetyperusteisista polttoaineista, kuten maakaasusta. Niinpä polttokennojärjestelmässä täytyy olla reformeri, joka muuttaa polttoaineen kennotyypille sopiviksi yhdisteiksi, esimerkiksi maakaasun hapen avulla vedyksi ja hiilidioksidiksi. (Green & Staffell 2012.) Korkealämpötilapolttokennoissa reformointi voidaan toteuttaa kennon sisäisesti (Pihlatie 2003, 4).

Reformointi voidaan toteuttaa höyryreformointina, katalyyttisenä osittaishapetuksena tai näiden yhdistelmänä, autotermisenä reformointina. Höyryreformoinnin teoreettinen hyötysuhde on yli 100 %, sillä vesihöyrystä saadaan lisää vetyä reformaattiin eli reformoinnin tuotekaasuun. Menetelmä on paras lyhytketjuisille hiilivedyille, kuten metaanille. Höyryreformointi on järkevää toteuttaa kennonsisäisesti korkealämpötilapolttokennossa, sillä prosessi on endoterminen. Osittaishapetus soveltuu pitkäketjuisille hiilivedyille ja sen teoreettinen hyötysuhde on 75–100 %. Osittaishapetuksessa syntyy polttoainehäviöitä, kun osa polttoaineesta palaa reaktorissa. Menetelmä on eksoterminen ja reformaatti kuumaa. Autotermisessä reformoinnissa yhdistetään höyryreformointi ja osittaishapetus niin, että saadaan halutunlainen reformaatti halutussa lämpötilassa. (Halinen 2007b, 9–1.)

Polttokennosta saadaan tasavirtaa, joka täytyy ennen verkkoon syöttämistä muuntaa invertterillä eli vaihtosuuntaajalla vaihtovirraksi (Green & Staffell 2012). Virran muuntaminen tapahtuu vaiheittain. Ensin kennoston jännite täytyy nostaa niin, että invertterille menee jännitteeltään 600 V tasavirtaa. Tämän jälkeen tasavirta muunnetaan vaihtovirraksi. Lopuksi vaihtovirta tahdistetaan verkon taajuuteen. (Halinen 2007b, 17.)

Jotta polttokennojärjestelmästä saatava lämpö voidaan hyödyntää, tarvitaan lämmöntalteenottojärjestelmä. Kuvassa 2 on esimerkki SOFC-tyypin kennoihin perustuvasta CHP-järjestelmästä. Kuvan järjestelmässä SOFC-tyypin kennoon on yhdistetty polttoaineen esilämmitys kennon pakokaasuilla, pakokaasujen jälkipolttot, syöttöilman esilämmitys jälkipolton palamiskaasuilla ja viimeisenä lämmönvaihdin, jossa palamiskaasujen lämpö hyödynnetään kaukolämmöksi. Lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa myös ilman pakokaasujen jälkipolttot, jolloin lämmitysvesi lämmitetään polttokennon pakokaasuilla.



Kuva 2. Esimerkki kiinteäoksidipoltokennoon perustuvasta CHP-järjestelmästä (Halinen 2007b, 14).

3.2.2 Polttokennojärjestelmän kustannukset

Yhdysvaltalainen Battelle Memorial Institute (2017) on tehnyt Yhdysvaltain energiaministeriölle selvityksen CHP-tuotantoon tarkoitettujen 1, 5, 10 ja 25 kilowatin polttokennojen valmistuskustannuksista. Raportista selviää, että kilowatin PEFC-tyypin kennojen myyntihinnat ovat tuotantomäärästä riippuen noin 11 600–25 600 €/kW_e. Kokoluokassa 5 kW hinnat vaihtelevat välillä 4 200–8 300 €/kW_e. SOFC-tyypin kennojen hinnat ovat 11 000–27 700 €/kW_e, kun nettosähköteho on 1 kW, ja 3 300–7 100 €/kW_e, kun nettosähköteho on 5 kW. (Battelle Memorial Institute 2017, 89–95.) Kerrostalokokoluokassa tarvittavat polttokennot ovat sähköteholtaan lähellä 5 kilowattia.

CHP-tuotantokustannukset polttokennoilla ovat 8–14 senttiä/kWh_{tot}. Polttokennojen käyttö- ja kunnossapitokustannukset vaihtelevat välillä 0,3–1,5 senttiä/kWh_e. Polttokennon tyypillinen käyttöikä vaihtelee vuodesta viiteen vuoteen. Vertailun vuoksi mikroturbiinin pääomakustannukset ovat 500–800 €/kW_e ilman lämmöntalteenottoa ja 50–250 €/kW_e enemmän, kun lämmöntalteenotto lasketaan mukaan. CHP-tuotantokustannukset mikroturbiinilla ovat 7,5–11 senttiä/kWh_{tot} ja käyttö- ja kunnossapitokustannukset 0,3–1,2 senttiä/kWh_e. Stirling-moottorin pääomakustannukset

puolestaan ovat 1 400–3 000 €/kW_e sisältäen lämmöntalteenoton. CHP-tuotantokustannukset 9,5–15,5 senttiä/kWh_{tot} ja käyttö- ja kunnossapitokustannukset 1–2,5 senttiä/kWh_e. (Saksio & Takalo 2013, 11.) Polttokennojen keskimääräiset kustannukset on esitetty kustannuslajeittain taulukossa 2.

Taulukko 2. Polttokennon kustannukset kustannuslajeittain, kun sähköteho on noin 5 kW (Battelle 2017, 105–112, Saksio & Takalo 2013, 11).

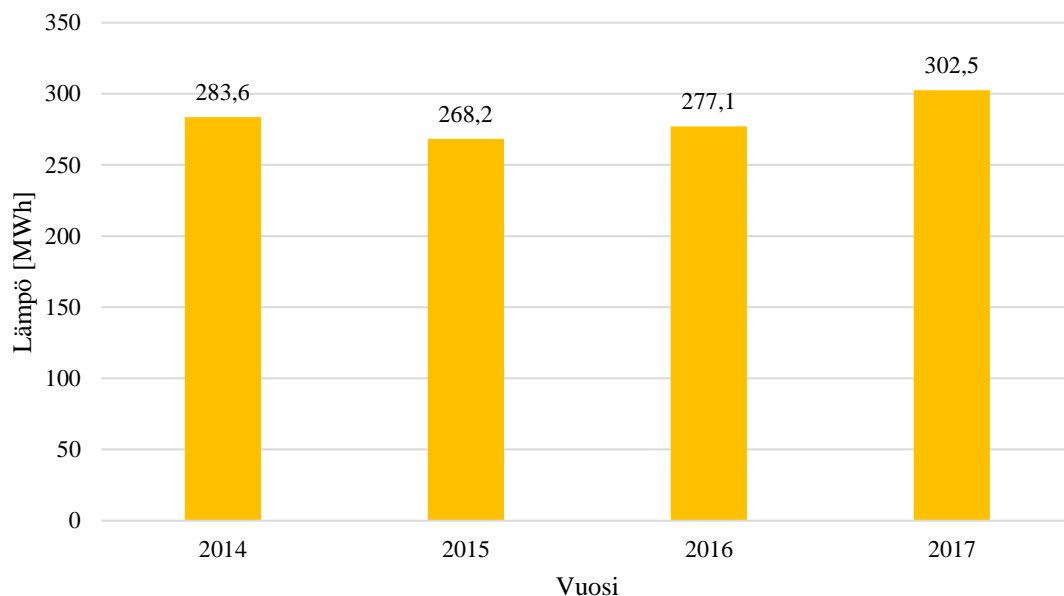
Kustannuslaji	
Pääomakustannus [€/kW _e]	3 300–8 300
CHP-tuotantokustannus [senttiä/kWh _{tot}]	8–14
Käyttö- ja kunnossapitokulut [senttiä/kWh _e]	0,3–1,5

4 ESIMERKKI KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSESTA

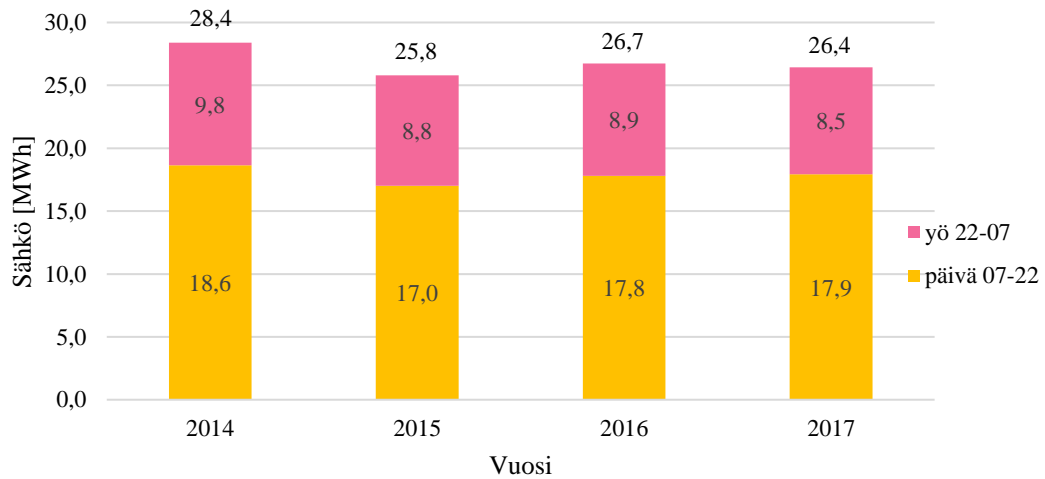
Tässä kappaleessa tarkastellaan polttokennojen käyttöä mikro-CHP-tuotannossa käytännön esimerkin avulla. Tarkoituksena on selvittää, voisiko vuonna 1979 rakennetun kerrostalon sähkön- ja lämmöntarpeen kattaa polttokennoilla. Talossa on kaksi rappua, 30 asuntoa ja yhteensä 1 825 m² asuinpinta-alaa. Lisäksi talosta löytyy lämpimät varastotilat, kylmiö, pesutupa ja sauna. Aukkaita on vuoden 2017 lopussa ollut 50. Tällä hetkellä kiinteistön käyttö- ja lämmitysvesi lämmitetään kaukolämmöllä.

4.1 Esimerkkikohteen tarpeiden määrittely

Esimerkkikiinteistön energiankulutustiedot saatiin Lappeenrannan Energian MinunEnergia-palvelusta. Vuosittainen lämmitysenergian kulutus on noin 300 MWh ja sähkön kulutus välillä 25–30 MWh. Vuosien 2014–2017 lämmön ja sähkön kulutukset esitetään tarkemmin kuvissa 3 ja 4.



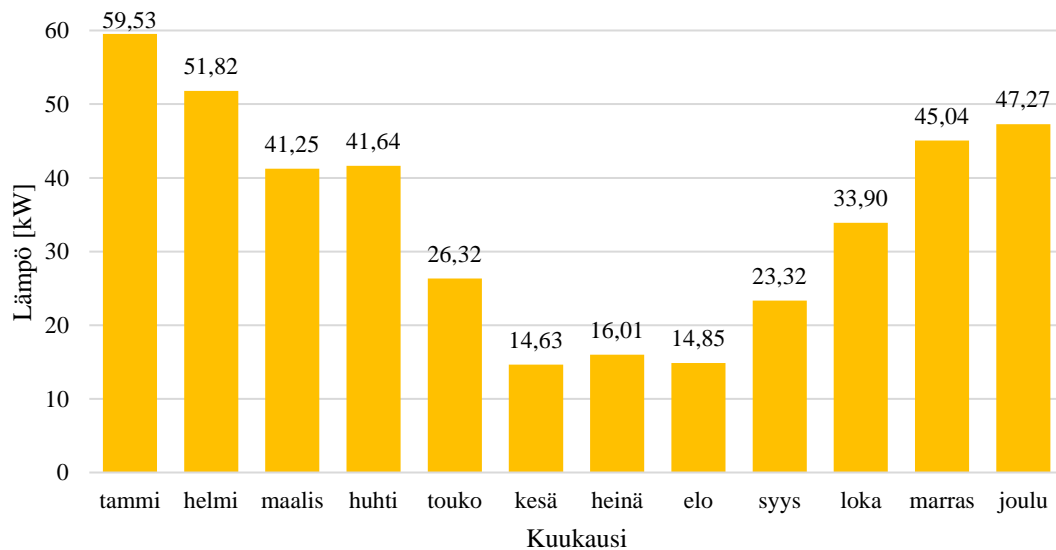
Kuva 3. Esimerkkikiinteistön lämpöenergian vuosikulutus.



Kuva 4. Esimerkkikiinteistön sähkön vuotuinen kulutus.

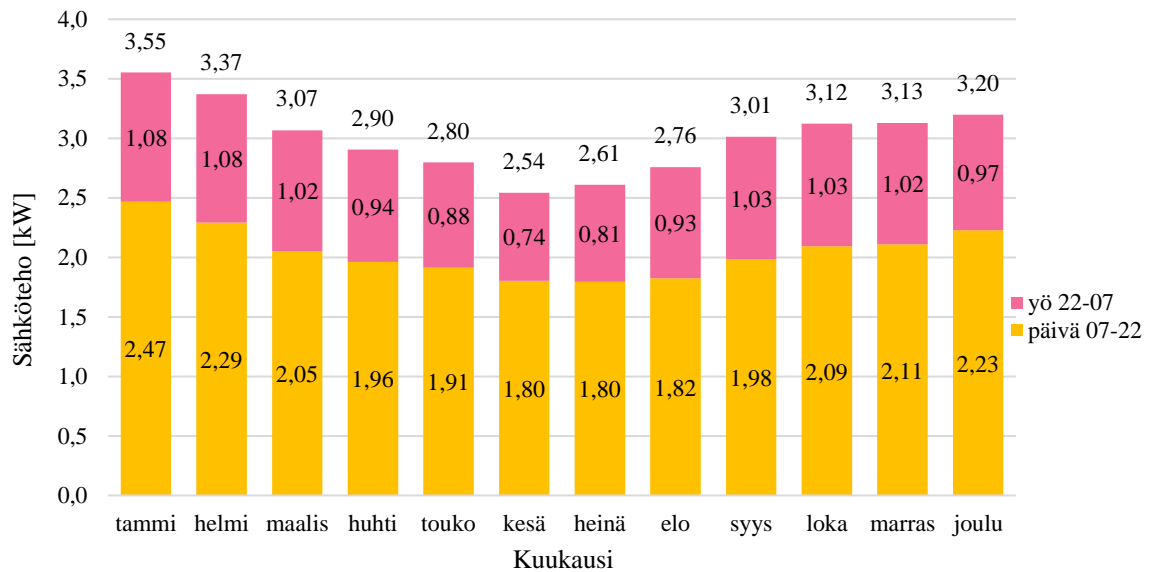
Määritellään esimerkkikiinteistön tarpeet tarkemmin vuoden 2017 kulutuksen mukaan.

Kiinteistön kuukausikohtainen lämpötehtotarve vuonna 2017 esitetään kuvassa 5.



Kuva 5. Kiinteistön lämpötehon kuukausikohtainen tarve.

Kuvassa 6 puolestaan esitetään kuukausikohtainen sähkötehtotarve samana vuonna.



Kuva 6. Kiinteistön kuukausikohtainen sähkötehontarve.

Vuonna 2017 taloyhtiön sähkönkulutushuippu on ollut lauantaina 11.2., jolloin vuorokauden aikana sähköä on kulunut 118,66 kWh. Pienimmillään sähkönkulutus on ollut juhannuksen jälkeisenä sunnuntaina 25.6., jolloin vuorokaudessa on kulutettu sähköä 47,36 kWh. Taloyhtiön tilinpäätöksestä selviää, että vuonna 2017 taloyhtiön lämmityskustannukset ovat olleet 25 901 euroa ja sähköön on kulunut 3 466 euroa.

4.2 Taloudellinen tarkastelu

Mikäli taloyhtiö siirtyisi käyttämään polttokeinoihin perustuvaa CHP-järjestelmää, polttoaineena kannattaisi käyttää maakaasua. Tarvittava alkuinvestointi koostuisi järjestelmän hankinnan lisäksi maakaasuverkkoon liittymisestä ja mahdollisista tarvittavista muutostöistä kiinteistön teknisissä tiloissa. Käytönaikaiset kustannukset koostuvat polttoaine- ja huoltokustannuksista.

Valittavan järjestelmän mitoittamiseksi on useita vaihtoehtoja. Kennoston koko voidaan valita joko sähkön- tai lämmöntarpeen mukaan. Sähköä voidaan tarvittaessa ostaa verkosta ja ylimääräsähkön voi vastaavasti myydä verkkoon. Lisälämpöä voidaan tehdä esimerkiksi maakaasupolttimella tai kiinteistöön nykyisinkin tulevalla kaukolämmöllä.

Kerrostalokokoluokassa, jossa lämpötehtäjä on huomattavasti sähkötehtäjästä suurempi, kennosto kannattaa valita sähkötehtäjän mukaan. Tällöin ei jouduta myymään

kalliisti tuotettua sähkö alhaisella hinnalla verkkoon. Polttokennosto kannattaa mitoittaa niin, että sitä voidaan ajaa osakuormalla, sillä silloin sähköntuottohyötysuhde on parempi (Halinen 2007b, 19).

Otetaan tarkasteluun tilanne, jossa esimerkkikohteeseen valitaan polttokennosto, jonka sähköteho on 4 kW, eli hieman suurempi kuin huipputehontarve. Oletetaan kennoston sähköhyötysuhteeksi 50 % ja kokonaishyötysuhteeksi 85 %. Tällöin kennoston lämpöteho on 2,8 kW. Valittu polttokenno on hieman pienempi kuin taulukossa 2 tarkasteltu 5 kilowatin kenno, mutta kustannusten voidaan olettaa noudattavan samoja arvoja. Laskennassa käytetään kohteen vuoden 2017 energiankulutustietoja. Polttokennojen arvioitu käyttöikä on 1–5 vuotta, joten valitaan taloudelliseksi pitoajaksi 2 vuotta. Valitaan laskentakoroksi 3 %, sillä se vastaa taloyhtiön todellista rahoituskustannusta ja investoinnin oletettua riskitasoa. Polttokennoston alkuinvestoinnissa huomioidaan vain polttokennoston hankintahinta. Maakaasuverkkoon liittyminen, kiinteistössä tehtävät muutostyöt, CHP-järjestelmän asennus ja mahdolliset muut kustannukset jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

Lasketaan polttokennoinvestoinnin vuotuinen tasapoisto. 4 kilowatin polttokennoston pääomakustannus on 13 200–33 200 €. Tasapoiston laskemiseksi tarvitaan annuiteettitekijä, joka lasketaan seuraavasti:

$$c_{n,i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

missä c on annuiteettitekijä
 n on taloudellinen pitoaika [a]
 i on korko

Vuotuinen tasapoisto saadaan kertomalla investointi annuiteettitekijällä.

$$K_{po} = c_{n,i} \cdot I \quad (5)$$

missä K_{po} on vuotuinen pääomakustannus eli tasapoisto [€]

I on investointi [€]

Kun yhdistetään yhtälöt (4) ja (5), saadaan pienimmäksi mahdolliseksi vuotuiseksi tasapoistoksi 6 900 €. Suurimmillaan vuotuinen tasapoisto on 17 400 €. Lasketaan seuraavaksi käytön mukaan määräytyvät kustannukset. Kun tiedetään kennoston hyötysuhteet ja tuotettu sähköenergia, lämpöenergia saadaan seuraavasti:

$$Q = \eta_h \cdot E_{tot} = (\eta_{tot} - \eta_e) \frac{E_e}{\eta_e} \quad (6)$$

missä Q on tuotettu lämpö [kWh]
 η_h on lämpöhyötysuhde
 E_{tot} on tuotettu kokonaisenergia [kWh]
 η_{tot} on kokonaishyötysuhde
 η_e on sähköhyötysuhde
 E_e on tuotettu sähkö [kWh]

Kun polttokennostolla tuotetaan sähköä vuoden 2017 kulutuksen mukaisesti 26 309,8 kWh, saadaan lämpöä vastaavasti noin 23 000 kWh. Näin ollen polttokennoston vuoden aikana tuottama kokonaisenergiamäärä on 49 331 kWh. Kennoston käyttö- ja kunnossapitokustannukset lasketaan seuraavasti:

$$K_{kk} = k_{kk} \cdot E_e \quad (7)$$

missä K_{kk} on käyttö- ja kunnossapitokustannus [€]
 k_{kk} on käyttö- ja kunnossapitokustannukset [€/kWh_e]

Pienimmällä taulukossa 2 esitetyllä käytön kustannuksella 0,3 senttiä/kWh_e vuotuiseksi käyttö- ja kunnossapitokustannukseksi saadaan 79 €. Suurimmalla esitetyllä kustannuksella 1,5 senttiä/kWh_e vuotuiset käyttö- ja kunnossapitokustannukset olisivat puolestaan 390 €.

CHP-tuotantokustannukset voidaan laskea seuraavasti:

$$K_{CHP} = k_{CHP} \cdot E_{tot} \quad (8)$$

missä K_{CHP} on CHP-tuotantokustannus [€]
 k_{CHP} on CHP-tuotantokustannukset [€/kWh_{tot}]

Taulukossa 2 esitetty pienin CHP-tuotantokustannus on 8 senttiä/kWh_{tot}. Vuoden 2017 mukaisella kulutuksella se tarkoittaisi vuodessa 3 900 €. Suurimmalla arvolla, eli 14 senttiä/kWh_{tot}, CHP-tuotantokustannukset olisivat 6 900 € vuodessa. Pienimmillään polttokennoston vuotuiset kustannukset olisivat siis 10 900 € ja suurimmillaan 24 700 €. Taulukkoon 3 on koottu polttokennoston pienimmät ja suurimmat mahdolliset vuotuiset kustannukset.

Taulukko 3. Polttokennoston vuotuiset kustannukset.

Kustannuslaji	[€]
Pääomakustannus	6 900–17 400
Käyttö- ja kunnossapitokustannus	79–390
CHP-tuotantokustannus	3 900–6 900
Kokonaiskustannus	10 900–24 700

Kun polttokennosto mitoitetaan sähköntarpeen mukaan, kattaa siitä saatava lämpö vain hyvin pienen osan lämmöntarpeesta. Yhtälöllä (6) laskettu lämmöntuotto olisi vuodessa 23 021 kWh, kun taas lämmöntarve on 302,46 MWh. Polttokennostosta saatava lämpö on siis alle 10 % tarpeesta. Mikäli loput lämmöntarpeesta katetaan nykyisinkin käytössä olevalla kaukolämmöllä, on lisälämmityksen kustannukset 23 900 € vuodessa. Vuonna 2017 taloyhtiön sähkö- ja lämmityskustannukset olivat yhteensä 29 367 €. Mikäli käytössä olisi ollut polttokennosto ja kaukolämpö, kustannukset olisivat olleet 34 900–48 600 €.

Taulukkoon 4 on laskettu vaihtoehtoiset kustannukset, jos taloudelliseksi pitoajaksi valittaisiinkin 5 vuotta, sekä kustannukset ajalta, kun hankinta on maksettu kokonaan takaisin. Kustannuksiin on lisätty kaukolämmön osuus.

Taulukko 4. Vaihtoehtoisia vuosikustannuksia.

Vuoden 2017 sähkö- ja lämmityskustannukset	29 367 €
Vuosikustannus, kun pitoaika on 2 vuotta	34 900–48 600 €
Vuosikustannus, kun pitoaika on 5 vuotta	30 800–38 500 €
Pelkistä muuttuvista kustannuksista koostuva vuosikustannus	28 000–31 200 €

Taulukosta 4 nähdään, ettei polttokennoihin perustuva CHP-järjestelmä ole taloudellisesti kannattava kerrostalokokoluokassa. Mikäli huomioidaan kaikki todelliset järjestelmän vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset, pääomakustannus nousee entisestään.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Tarkastellun esimerkkikiinteistön vuotuinen sähkönkulutus on hieman alle 30 MWh ja lämmönkulutus noin 300 MWh, eli lämpöä tarvitaan huomattavasti sähköä enemmän. Polttokennojen rakennusaste on kuitenkin lähellä yhtä tai jopa yli, eli sähköä saadaan yhtä paljon tai enemmän kuin lämpöä. Tämä tarkoittaa, että kerrostalossa lähes kaikki lämpö täytyisi edelleen hankkia muulla tavalla. Työssä tarkasteltiin tilannetta, jossa lisälämmönlähteeksi valittiin esimerkkikiinteistössä nykyisin käytössä oleva kaukolämpö. Kokonaiskustannukset osoittautuivat korkeammiksi tai vähintään lähes yhtä korkeiksi kuin taloyhtiön nykyiset sähkö- ja lämmityskustannukset. Lisäksi kennosto pitäisi uusida muutaman vuoden välein. Voidaan siis todeta, että polttokennoihin perustuva CHP-järjestelmä ei ainakaan vielä tänä päivänä ole kerrostalokohteessa taloudellisesti järkevä.

Suurin osa polttokennojen korkeista kustannuksista aiheutuu kalliista hankintahinnasta. Mikäli kennoihin löydetään halvempia ja paremmin kuumuutta kestäviä materiaaleja, joidenkin vuosien päästä polttokennot voisivat olla taloudellisesti järkeviä myös mikrokokoluokassa. Tässä työssä tarkastellussa skenaariossa ongelmia aiheutuu myös siitä, että polttoaineena käytetty maakaasu on lähes yhtä kallista kuin sähkö. Jos polttokennostoon perustuvan CHP-laitoksen yksikkökoko olisi suurempi ja polttoaineena käytettäisiin esimerkiksi teollisuuden hukkavetyä, voisi polttokenno olla jo tänä päivänä järkevä vaihtoehto kohteeseen, jossa sähkön- ja lämmöntarve ovat suunnilleen yhtä suuret.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää, voiko kerrostalon sähkön- ja lämmöntarpeen kattaa polttokennoon perustuvalla CHP-järjestelmällä teknisesti ja taloudellisesti järkevästi, jos polttoaineena käytettäisiin esimerkiksi maakaasua. Polttokennojen rakennetta ja toimintaa sekä eri polttokennotyyppejä tutkittiin kirjallisuuslähteiden avulla. Työssä tarkasteltiin viittä eri polttokennotyppiä, joista neljää on sovellettu CHP-tuotantoon. Erityisesti SOFC- ja PEFC-tyypin kennoja on käytetty kaupallisissa sovelluksissa. Polttokennojen sähköntuottohyötysuhde on 30–60 % ja CHP-tuotannossa kokonaishyötysuhde jopa 85 %, joten teknisesti polttokennot soveltuvat sähkön ja lämmön yhteistuotantoon hyvin. Polttokennojen materiaalikehitys on kuitenkin vielä pahasti kesken. Tästä syystä kennostojen käyttöikä on lyhyt ja hankintahinta korkea. Polttokennoihin perustuvien CHP-järjestelmien käytönaikaiset kustannukset ovat sen sijaan melko samansuuruiset kuin muillakin mikro-CHP-käyttöön soveltuvilla tekniikoilla.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantoa tarkasteltiin erityisesti mikro- eli alle 50 kilowatin kokoluokassa. Polttokennoihin perustuvaan CHP-järjestelmään tarvitaan pelkän kennoston lisäksi polttoaineen reformeri, invertteri ja lämmöntalteenotto. Reformeri ja varsinkin invertteri ovat usein asennettuna valmiiksi polttokennoon.

Työssä tarkasteltiin olemassa olevaa esimerkikiinteistöä ja sen sähkön- ja lämmöntarvetta. Tarkasteltu taloyhtiö kuluttaa vuodessa sähköä vajaat 30 MWh ja lämpöä noin 300 MWh. Sähkö- ja lämmityskustannukset ovat vuodessa noin 30 000 €. Kun laskennassa huomioitiin alkuinvestoinnissa vain polttokennojärjestelmä ja käytettiin energiankulutustietoina vuoden 2017 lukuja, nousivat vuotuiset kustannukset kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa vähintään lähes yhtä korkeiksi kuin nykyiset. Mikäli huomioitaisiin kaikki todelliset alkuinvestoinnit, kuten maakaasuverkkoon liittyminen ja tarvittavat remontit, nousisivat kustannukset kaikissa tapauksissa nykyisiä korkeammiksi. Polttokennoihin perustuva CHP-järjestelmä ei siis ainakaan vielä ole taloudellisesti kannattava.

LÄHDELUETTELO

2012/27/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 25.10.2012 energiatehokkuudesta. EUVL N:o 315, 25.10.2012.

Battelle Memorial Institute. 2017. Manufacturing Cost Analysis of 1, 5, 10 and 25 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications. Yhdysvaltain energiaministeriö. 277 s. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/02/f49/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_1%20to_25kw_pp_chp_fc_systems_jan2017_0.pdf

Breeze Paul. 2017. Fuel cells. Lontoo: Academic Press, an imprint of Elsevier. 93 s. ISBN 978-0-08-101039-6.

Convion Oy. 2019. Products. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.1.2019]. Saatavissa: <http://convion.fi/products/>

Forsström Juha & Lehtilä Antti. 2005. Skenaarioita ilmastopoliitiikan vaikutuksista energiatalouteen. Espoo: VTT Tietopalvelu. 71 s. ISBN 951-38-6586-X.

Green Richard & Staffell Iain. 2012. The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems. International Journal of Hydrogen Energy, 38: 2. 1088-1102. ISSN 0360-3199.

Halinen Matias. 2007a. Polttokennot. AS.84-3134 Energiatekniikan automaatio -kurssin luentokalvot. VTT.

Halinen Matias. 2007b. Polttokennojärjestelmät. AS.84-3134 Energiatekniikan automaatio -kurssin luentokalvot. VTT.

Hepola Jouko & Kurkela Esa. 2002. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. Espoo: VTT Prosessit. 65 s. ISBN 951-38-6070-1.

Ilmasto-opas. 2010. Suomen päästöt. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.3.2018]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/0be63fa0-533f-4986-b674-859b6577c8b5/suomen-paastot.html>

Laaninen Vuokko. 2003. Stationaariset voimalaitokset. Teoksessa: Himanen Olli (toim.) Vetyteknologiat. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto. 139 s. ISBN 951-22-6528-1.

Ojapalo Matleena. 2010. Tutkimuksellinen lähestymistapa polttokennojen kemian opetukseen. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Kemian laitos, Kemian opettajankoulutusyksikkö. Helsinki. 155 s.

Pihlatie Mikko. 2003. Polttokennot. Teoksessa: Himanen Olli (toim.) Vetyteknologiat. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto. 139 s. ISBN 951-22-6528-1.

Saksio Anna & Takalo Heidi. 2013. Mikro- ja pien-CHP: Teknologia- ja laitekantaselvitys sekä kannattavuuden tarkastelu tapausesimerkin avulla. Iin Micropolis Oy. 32 s. Saatavissa PDF-muodossa: http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitetekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf