

Mikko Tahkola

**KIINTEÄÄ BIOPOLTTOAINETTA KÄYTTÄVÄ MIKRO-CHP-LAITOS PIENTALON
ENERGIANTUOTANNOSSA**

KIINTEÄÄ BIOPOLTTOAINETTA KÄYTTÄVÄ MIKRO-CHP-LAITOS PIENTALON ENERGIANTUOTANNOSSA

Mikko Tahkola
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Energiatekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan koulutusohjelma

Tekijä: Mikko Tahkola

Opinnäytetyön nimi: Kiinteää biopolttoainetta käyttävä mikro-CHP-laitos pientalon energiantuotannossa

Työn ohjaajat: Kari Mäntyjärvi, Jukka Ylikunnari

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2017

Sivumäärä: 58

Kiinteistökohtaisella hajautetulla energiantuotannolla voidaan pyrkiä kohti energiaomavaraisuutta, vähentää energian siirrossa aiheutuvia häviöitä ja polttoaineen kuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia. Ennusteiden mukaan sähkön hinta tulee nousemaan tulevaisuudessa, jolloin pientalokohtaiset energiantuotantoratkaisut voivat tulla kannattavammaksi.

Opinnäytetyön tilaaja oli Tulevaisuuden tuotantoteknologiat FMT -tutkimusryhmä, joka kuuluu Oulun yliopiston alaisuudessa toimivaan Kerttu Saalasti Instituuttiin. Työ on tehty osana H-CHP-projektia, jonka tarkoituksena on suunnitella ja rakentaa prototyyppi kiinteitä biopolttoaineita käyttävistä mikro-CHP-laitoksesta syrjäisillä seuduilla sijaitsevien kiinteistöjen energiantuotantoon. Opinnäytetyössä käytiin läpi lyhyesti erilaisia mikro-CHP-teknologioita ja perehdyttiin mäntähöyrykonetta käyttävän mikro-CHP-laitoksen komponenttien mitoittamiseen ja valintaan. Tämän lisäksi työhön sisältyi laskennallinen osuus, jonka tavoitteena oli selvittää mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannukset ja kuinka paljon niitä voidaan vähentää lisäämällä laitoksen rinnalle aurinkosähköjärjestelmä. Polttoainekustannuksia verrattiin myös ostosähkön kustannuksiin. Opinnäytetyö tehtiin laskennallista osuutta lukuun ottamatta kirjallisuusselvityksenä käyttäen ulkomaista ja kotimaista kirjallisuutta ja internet-lähteitä ja -artikkeleita.

Selvityksen perusteella tulitorvi-tuliputkikattila voi olla paras valinta mikro-CHP-laitoksen höyrykattilatyypiksi ja sen suunnittelu tulee pohjautua standardiin SFS-EN 12953. Tämän lisäksi Valtioneuvoston painelaitteasetus 1549/2016 asettaa ylärajan kattilan paineelle ja vesitilavuudelle mikäli kattila halutaan pitää vapaana painelaitteeksi rekisteröinnistä. Työssä selvisi, että vesijohtovettä ei nähtävästi voi käyttää suoraan järjestelmän kiertovetenä. Kirjallisuuden perusteella saatiin selvitettyä laitoksen muiden komponenttien mitoittamiseen ja valintaan liittyviä asioita. Mäntähöyrykoneella varustetun mikro-CHP-laitoksen yksi haaste on matala sähköntuotannon hyötysuhde, jolloin varsinkin kesällä tulee ylimäärin lämpöä verrattuna sähköön. Työn laskennallisen osuuden tuloksena kuitenkin selvisi, että mikro-CHP-laitos voi olla noin 40–60 % halvempi suoraan sähkölämmitykseen verrattuna muina aikoina kuin kesällä. Kesällä suora sähkölämmitys tulee noin 30–45 % halvemmaksi. Laskennassa huomattiin myös, että aurinkosähköjärjestelmällä voidaan vuositasolla vähentää mikro-CHP-laitoksen käyttötunteja esimerkkitapauksessa yli 500:lla, mikä voi tarkoittaa 400 € säästöä. Diesel-generaattori voi kuitenkin olla parempi ratkaisu energiantuottamiseen lämpimään aikaan, koska se toimii samalla varavoimalana.

Asiasanat: mikro-CHP, hybridijärjestelmä, aurinkosähköjärjestelmä, energiaomavaraisuus, höyrykattila, energia

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Energy Technology

Author: Mikko Tahkola

Title of thesis: Biomass based micro-CHP system in household-specific energy production

Supervisors: Kari Mäntyjärvi, Jukka Ylikunnari

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2017 Number of pages: 58

Higher energy self-sufficiency can be obtained by decentralized household-specific energy production, at the same time reducing energy losses in the energy network and costs caused by long distance transportation of fuels. Household-specific energy production may become more attractive in the future as the electricity price is predicted to raise.

The thesis has been made as a part of H-CHP-project in which the aim is to design and build a prototype of a micro-CHP-plant that produce about 20 kW heat and 3–6 kW electricity. The plant is designed to be used in sparsely populated areas where is not necessarily a power network nearby. The plant will be using renewable solid biofuels such as woodchips or pellets. The thesis was assigned by Future Manufacturing Technologies FMT research group that is a part of Kerttu Saalasti Institute in University of Oulu.

The aim of this thesis was to do research on the operating principle of a micro-CHP-plant with steam engine and to define the components it contains. Also things that effect the design of the components are accounted for. The thesis was done mostly as a literature research but also a computational part was included in which the fuel costs and operating time was estimated on yearly and weekly basis and compared to the costs of direct electrical heating. Also the effect of a photovoltaic system on the fuel costs was estimated when used as a hybrid system with the micro-CHP-plant.

It was found out that a firetube boiler could be the best steam boiler type to be used in a micro-CHP-plant to produce steam. The design of firetube boilers is based on the standard SFS-12953. Also the government regulation 1549/2016 set an upper limit for the pressure and water capacity in the boiler and if that is exceeded the boiler has to be registered which raise the costs. According to standards and regulations tap water can't be used as circulation water in the plant without proper treatment. A challenge in micro-CHP-plant using steam engine is the low efficiency of electricity production which cause that the rate of production and use of energy does not match well. In the computational part it was found out that the fuel costs of micro-CHP-plant could be 40–60 % lower compared to direct electricity heating on winter, spring and autumn. In summer the direct electricity heating could have 30–45 % lower costs. It was also found out that by using a photovoltaic system the operating time of micro-CHP-plant could be decreased by over 500 hours on yearly basis which could mean 400 € decrease on fuel costs. However a diesel generator could be better option for electricity production during warm periods because it can be also used as a backup system.

Keywords: micro-CHP, H-CHP, hybrid, photovoltaic, self-sufficiency, energy

SISÄLLYS

	TIIVISTELMÄ.....	3
	ABSTRACT	4
	SISÄLLYS.....	5
1	JOHDANTO.....	6
2	MIKRO-CHP-TEKNOLOGIAT.....	8
	2.1 Avoimet CHP-kiertoprosessit.....	8
	2.2 Suljetut CHP-kiertoprosessit.....	9
	2.3 Polttokennot	11
3	MÄNTÄHÖYRYKONEELLA VARUSTETTU MIKRO-CHP-LAITOS	13
	3.1 Höyrykattilatekniikka.....	15
	3.1.1 Suurvesitilakattilat.....	15
	3.1.2 Luonnonkiertokattilat.....	16
	3.1.3 Pakkokiertokattilat.....	19
	3.1.4 Läpivirtauskattilat	20
	3.1.5 Kriittisen lämpövuon muodostuminen kattilassa	21
	3.1.6 Vesiputkikattiloiden suunnittelu	23
	3.2 Laitoksen vesi-höyrykierron veden laatuvaatimukset	25
	3.3 Polttotekniikka kiinteillä biopolttoaineilla	27
	3.4 Mäntähöyrykone.....	28
	3.5 Sähkögeneraattori ja tehoelektroniikka.....	30
	3.6 Lauhdutin ja lämmönvarastointi.....	30
	3.7 Syöttövesisäiliö ja -pumppu.....	33
	3.8 Putkisto ja putkivarusteet.....	36
	3.9 Sääto ja ohjaus.....	37
	3.10 Laitoksen suunnittelu.....	39
	3.11 Hybridijärjestelmä - aurinkopaneelit mikro-CHP-laitoksen rinnalla	40
4	MIKRO-CHP-LAITOKSEN LASKENNALLINEN TARKASTELU JA TULOKSET	42
5	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET.....	54

1 JOHDANTO

Energiankulutus kasvaa maailmassa ja Suomessa koko ajan. Saavuttaaksemme tavoitteet ehkäistä ilmaston lämpenemistä tarvitaan entistä tehokkaampia tapoja tuottaa energiaa. Sähkön ja lämmön pientuotanto on hajautettu energiantuotantomuoto, jolla voidaan kasvattaa uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossa. Suomessa on pitkällä aikavälillä tavoitteena tulla hiilineutraaliksi yhteiskunnaksi mukaan lukien liikenteen käyttämä energia. Arviolta 80 % kaikista kasvihuonepäästöistä Suomessa syntyy energiantuotannosta ja -kulutuksesta. Pientuotannon myötä kuluttaja voi tietoisemmin pyrkiä säästämään energiaa. (1, s. 9, 35.)

Mikro-CHP-laitos on yksi tapa tuottaa energiaa siellä, missä kulutus on. Hajautetulla energiantuotannolla voidaan syrjäisemmillä seuduilla pyrkiä kohti energiaomavaraisuutta, jolloin kiinteistö ei ole riippuvainen sähköverkosta. Biopolttoaineiden käytöllä pienen ja mikro-kokoluokan CHP-tuotannossa voidaan vähentää polttoaineen kuljetuksesta aiheutuvia kustannuksia, kun biomassa saadaan läheltä ja energia tuotetaan kulutuskohteen lähellä. Biopolttoaineita käyttäviä alle 1000 kW:n CHP-laitoksia on tutkittu pitkään, mutta ne eivät ole yleistyneet laajasti huonon kannattavuuden ja teknisten ongelmien takia. Ennusteiden mukaan sähkön hinta tulee nousemaan tulevaisuudessa, jolloin lämmön ja sähkön tuottaminen itse voi tulla kannattavammaksi. (2, s. 107.)

Opinnäytetyö on osa H-CHP-projektia, jonka tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa prototyyppi pientalon energiantuotantoon tarkoitettua mikro-CHP-laitoksesta, joka käyttää kiinteitä biopolttoaineita. Northern Periphery and Arctic 2014 - 2020 -ohjelmaan kuuluvaan projektiin osallistuu yhdeksän maata, joita suurilta osin yhdistää matala asumistiheys, hankala saavutettavuus ja runsaat luonnonvarat. (3; 4.)

Työn tilaaja on Oulun Yliopiston alaisuudessa toimivan alueyksikön Kerttu Saalasti Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat FMT -tutkimusryhmä, joka toimii Pohjois-Suomen alueella. Tutkimusryhmän tarkoitus on kehittää alueen valmistavan teollisuuden toimintaa tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnallaan. (5; 6.) Kerttu Saalasti Instituutin tutkimustyö painottuu harvaan asuttujen alueiden mikro- ja pk-yritysten kehitykseen sekä tuotantoteknologioiden ja kansainvälisyyden edistämiseen. Instituutin tarkoitus on myös tuoda Oulun yliopisto lähemmäs alueen yrityksiä, kuntia ja muita koulutusorganisaatioita ja tuottaa näin alueellista hyötyä. (7.)

Tulevaisuuden tuotantoteknologiat eli FMT (Future Manufacturing Technologies Reseach Group) - tutkimusryhmän tutkimusalueina ovat muun muassa erikoisterästen tehokas hyödyntäminen, tuotantoautomaation kustannustehokkuus ja ainetta lisäävä valmistus. Ryhmä tutkii pääasiassa tekniikoita ja menetelmiä, joita käytetään levymäisten materiaalien tuotteeksi jalostamisessa tehden yhteistyötä Materiaalitekniikan ja Tuotantotekniikan tutkimusryhmien kanssa. Se tekee tilaustutkimuksia ja palvelutoimintaa liittyen prototyyppien suunnitteluun ja valmistukseen, suunnittelun valmistustekniseen tukeen, materiaalikokeisiin ja rakenteiden testaukseen. (5.) Tutkimusryhmä on myös osa Oulun yliopiston Terästutkimuskeskusta eli CASR:a (8).

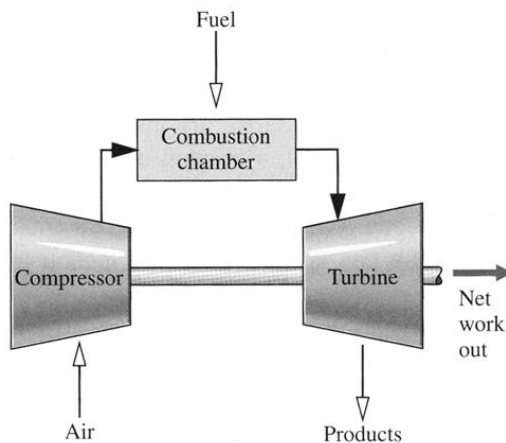
Opinnäytetyössä otetaan selvää kiinteitä biopolttoaineita ja mäntähöyrykonetta lämpövoimakoneena käyttävän omakotitalokohtaisen mikro-CHP-laitoksen toimintaperiaatteesta ja perehdytään kirjallisuuden avulla siihen, millaisista komponenteista laitos rakentuu. Komponenttien esittelyn yhteydessä käydään läpi niiden valintaan ja suunnitteluun, ja lopuksi myös koko mikro-CHP-laitokseen mitoitukseen ja ohjaukseen liittyviä asioita. Tämän lisäksi työssä tutkitaan, voiko vesi-höyrykierrossa käyttää tavallista vesijohtovettä, mutta varsinaiset vedenkäsittelyyn keinot on rajattu työn ulkopuolelle. Yhtenä osana työssä on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmistolla laskennallista arviointia noin 20 kW lämpöä ja 3 kW sähköä tuottavan mikro-CHP-laitoksen toiminnasta pientalon energiantuotannossa. Laskurilla voi tarkastella, voidaanko aurinkopaneelien käytöllä mikro-CHP-laitoksen rinnalla vähentää merkittävästi polttoaineen kulutusta ja hukkalämmön tuotantoa kesällä. Tämän lisäksi laskurilla voi vertailla laitoksen käyntiaikojen perusteella polttoainekustannuksia verrattuna suoran sähkölämmityksen kustannuksiin.

2 MIKRO-CHP-TEKNOLOGIAT

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten eli CHP-laitosten toiminta (Combined Heat and Power) voi perustua useaan eri teknologiaan ja laitokset voidaan luokitella sähköntuotantotehon mukaan eri kokoluokkiin. Euroopan Unionin yhteistuotantodirektiivi 2004/8/EC määrittelee alle 50 kW sähköä tuottavat lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitokset mikro-CHP-laitoksiksi ja alle 1000 kW sähköä tuottavat pientuotantolaitoksiksi (9, s. 4). Tässä luvussa käydään läpi CHP-laitoksissa käytettyjä teknologioita, jotka voidaan jakaa avoimiin ja suljettuihin kiertoprosesseihin sen mukaan, missä osassa prosessia palaminen tapahtuu (10, s. 175).

2.1 Avoimet CHP-kiertoprosessit

Polttomootoria ja avointa mikrokaasuturbiinia sähköntuotannossa voimakoneena käyttävät sovellukset ovat avoimia kiertoprosesseja, ja niissä käytetään yleensä kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita (kuva 1). Avoimissa kiertoprosesseissa voidaan käyttää myös kiinteitä biopolttoaineita kaasutuksen avulla. (10, s. 175.) Kaasutuksessa kiinteä polttoaine käy läpi pyrolyysiprosessin, jossa sen kaasuuntuvat komponentit saadaan erotettua muusta aineesta korkean lämpötilan ja vähähappisten olosuhteiden avulla. Syntynyt kaasu tulee kuitenkin puhdistaa epäpuhtauksista, jotta sitä voidaan käyttää polttomootoreissa tai kaasuturbiineissa. (11.)



KUVA 1. Avoin kaasuturbiiniprosessi (12, s. 443)

Palaminen tapahtuu kaasumootorissa sylinterin sisällä ja avoimessa kaasuturbiinissa kuvan 1 mukaisesti erillisessä polttokammiossa ja työtä tehdään molemmissa suoraan savukaasun paisunnan

avulla, minkä jälkeen savukaasusta otetaan jäljelle jäänyt lämpö talteen lämmönsiirtimen avulla. (10, s. 175.)

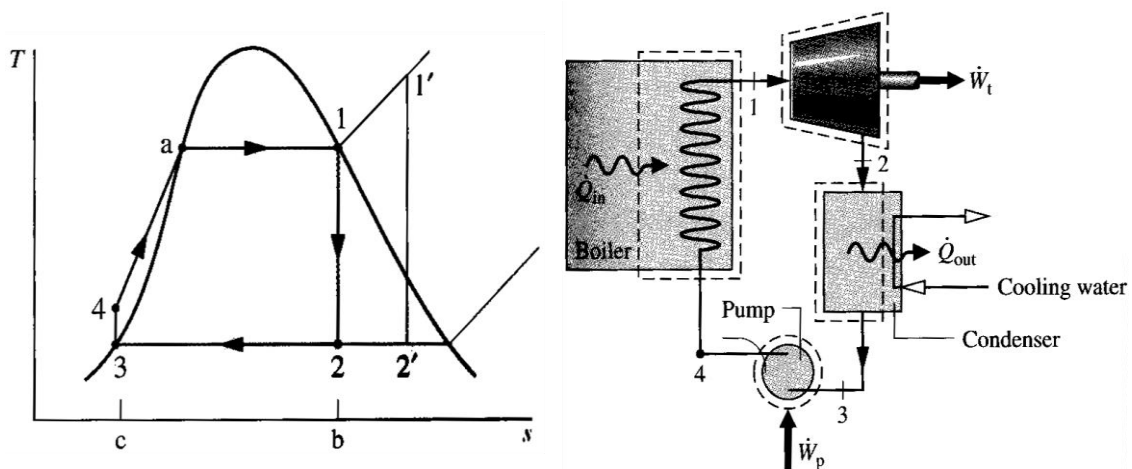
Mikrokokoluokassa polttomoottoria käyttäviä mikro-CHP-laitoksia on markkinoilla 1 kW:n sähköntuotantokapasiteetista ylöspäin sähköntuotannon hyötysuhteen ollessa 20–30 % ja kokonaishyötysuhteen ollessa 80–90 %. Sähköntuotannon hyötysuhde voidaan laskea kaavan 1 mukaan ja vastaavasti kokonaishyötysuhde kaavan 2 mukaan. (13, s. 25.)

$$\eta_e = \frac{\text{Sähköntuotantoteho (kW)}}{\text{Polttoaineteho (kW)}} \quad \text{KAAVA 1}$$

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{\text{Sähköntuotantoteho (kW)} + \text{talteenotettu lämpö (kW)}}{\text{Polttoaineteho (kW)}} \quad \text{KAAVA 2}$$

2.2 Suljetut CHP-kiertoprosessit

Biopolttoaineiden palamisessa syntyvissä savukaasuissa on komponentteja, jotka voivat aiheuttaa ongelmia moottoreissa. Suljetussa kiertoprosessissa palaminen tapahtuu erillisenä prosessina, jossa vapautunut energia siirretään savukaasuista lämmönsiirtimellä varsinaisen kiertoprosessin energiaa kuljettavaan paineistettuun väliaineeseen, jota esimerkiksi höyryturbiinissa tai mäntähöyrykoneessa paisuttamalla voidaan tehdä työtä. (10, s. 175) Tätä suljettua kiertoprosessia kutsutaan Rankine-kierrokseksi, jonka ideaalisen tapauksen vaiheet on havainnollistettu kuvassa 2 Ts-kuvaajan ja yksinkertaistetun prosessikaavion avulla (12, s. 376).



KUVA 2. Ideaalisen Rankine-kierron Ts-kuvaaja ja yksinkertaistettu prosessikaavio (12, s. 376, 379)

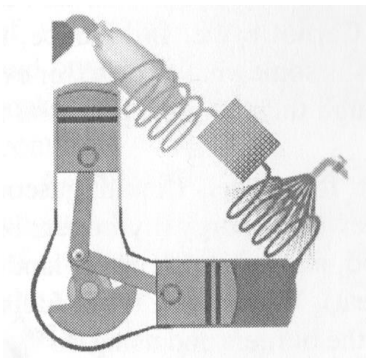
Kuvan 2 ideaalisen Rankine-kierron vaiheessa 1 - 2 tapahtuu väliaineen isentrooppinen paisunta lämpövoimakoneessa kylläisestä kaasusta (tila 1) lauhduttimen paineeseen (tila 2), minkä jälkeen väliaine jäädytetään lämmönsiirtimen avulla vakioaineessa tilaan 3. Sitten lauhde paineistetaan isentrooppisesti syöttövesipumpulla tilaan 4 ja syötetään kattilaan, jossa väliaineen lämpötilaa nostetaan vakioaineessa kunnes saavutetaan uudelleen tila 1. Lämmöntuonnin jatkuessa väliaineen saavutettua kylläisen kaasun tilan sen lämpötila alkaa nousta ja fluidi on tulistettua (tila 1'), jolloin paisuntavaiheessa saadaan enemmän tehoa irti ja paisunnan lopussa (tila 2') höyryn kosteuspitoisuus on pienempi verrattuna tilaan 2. (12, s. 379.) Todellisessa tilanteessa höyryn paisunta ja paineistus eivät tapahdu isentrooppisesti eli molemmissa vaiheissa kuvan 2 pisteistä 1 ja 3 lähtevät viivat kallistuvat oikealle, mikä kuvaa entropian kasvamista. Tämä tarkoittaa käytännössä, että paisunta- ja paineistusprosesseissa tapahtuu häviöitä.

Höyryä väliaineena käyttävän CHP-laitoksen pääkomponentit ovat höyrykattila, sähkögeneraattoriin kytketty höyryvoimakone, lauhdutin ja syöttövesipumppu. Höyrykattilassa polttoaineen sisältämä energia muutetaan lämpöenergiaksi, joka siirtyy kattilan läpi virtaavaan veteen lämmönsiirtimen välityksellä ja höyrystää veden. Vesihöyry johdetaan kattilasta lämpövoimakoneeseen, jossa höyry paisuu matalampaan paineeseen ja osa sen sisältämästä lämpöenergiasta muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Tämä mekaaninen energia muutetaan sähköksi sähkögeneraattorin avulla. Lämpövoimakoneesta tuleva paisunut höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa höyry lauhdutetaan vedeksi lämmönsiirtimen avulla. Lopuksi lauhtunut vesi syötetään takaisin kattilaan syöttövesipumpun tuottaman paineen avulla.

ORC-prosessin (organic Rankine cycle) toiminta perustuu myös Rankine-kiertoon, mutta siinä veden sijasta väliaineena käytetään orgaanista fluidia, jolla on matalampi kiehumispiste kuin vedellä. (10, s. 189) Tällaisen fluidin termofysikaaliset ominaisuudet mahdollistavat korkeamman tehon tuoton verrattuna fyysisesti identtiseen höyryvoimalla toimivaan laitokseen (14, s. 460–461).

Suljettujen kaasuturbiinien toimintaperiaate on muuten sama kuin avoimien kaasuturbiinien, mutta suljetuissa kaasuturbiineissa lämpö siirretään savukaasuista sekundäärikierrossa olevaan, kompressorilla paineistettuun kaasumaiseen väliaineeseen. Tämä kaasu sitten paisutetaan turbiinissa ja matalapaineinen kaasu jäädytetään uudelleen paineistettavaksi. Korkeassa lämpötilassa toimivat kaasu-kaasu lämmönvaihtimet ovat kuitenkin monimutkaisia, kalliita ja vaativat suuren pintalan verrattuna kaasu-vesilämmönvaihtimeen. (10, s. 175.)

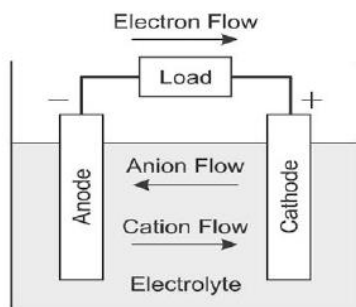
Lämpövoimakoneena mikro-CHP-laitoksessa voidaan käyttää myös Stirling-moottoria, josta eräs versio on esitettynä poikkileikkauksena kuvassa 3. Stirling-moottorit voidaan jakaa alfa-, beta- ja gamma-tyyppin moottoreihin sylinterien ja lämmönvaihtimien sijoittelun mukaan. Stirling-moottorin toiminta perustuu moottorissa väliaineena olevan kaasun lämpötilaeroon sylinteripäiden välillä. Kaasujen lämpötilaero saadaan aikaiseksi jäähdyttämällä toista päätä ja lämmittämällä toista. Tämä saa väliaineen virtaamaan vuoronperään sylinteristä toiseen. Lämmönsiirtimien välille voidaan suunnitella regeneraattori, jonka tarkoitus on vuorotellen varastoida ja luovuttaa lämpöä sen lävitse edestakaisin virtaavalle väliaineelle parantaen hyötysuhdetta. (15, s. 3.)



KUVA 3. Alfa-tyyppin Stirling-moottorin toimintaperiaate (14, s. 465)

2.3 Polttokennot

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuttavat polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköksi ja lämmöksi ilman palamisprosessia. Polttokenno rakentuu kuvan 4 mukaisesti kahdesta ulkoisella virtapiirillä yhdistetystä elektrodista, anodista ja katodista, jotka on upotettu samaan elektrolyyttiin. Polttoaineena polttokennoissa voidaan käyttää esimerkiksi vetyä ja hapettimena ilman happea. (15, s. 5.)



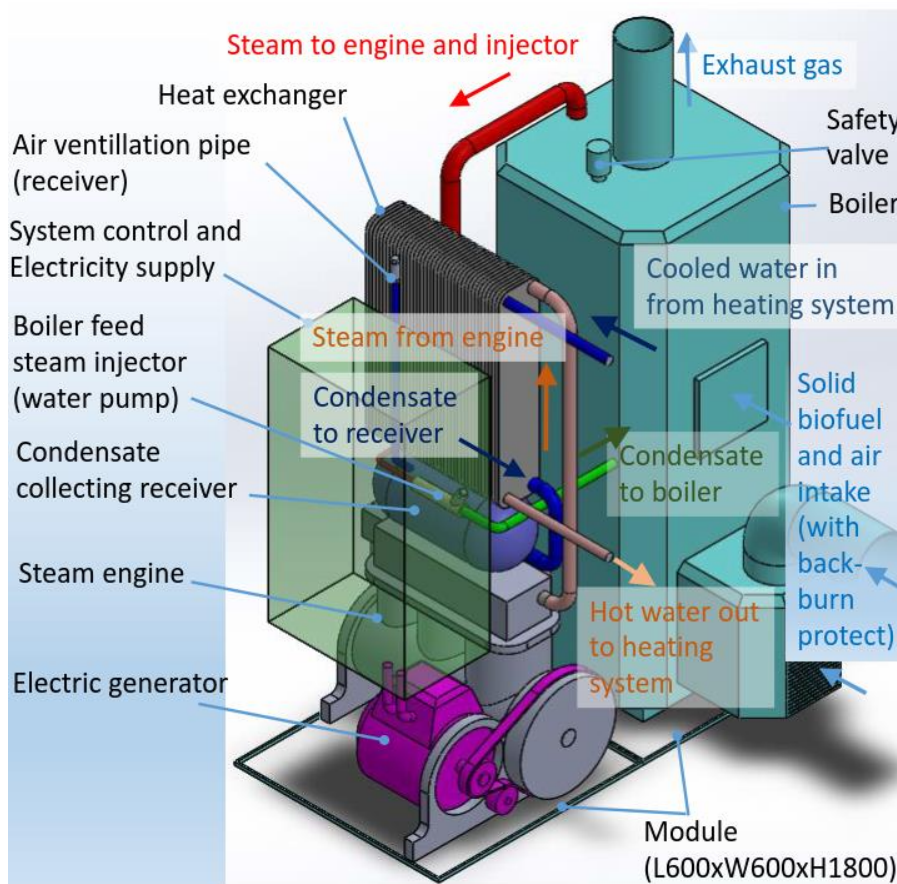
KUVA 4. Polttokennon toimintaperiaate (16, s. 5)

Polttoaine ja hapetin reagoivat katalyyttisesti vaiheittain elektrodeilla ja elektrolyytti mahdollistaa reaktiossa syntyneiden ionien virtauksen. Yksittäisiä kennoja voidaan asentaa sarjaan- tai rinnankytkennällä halutun tehon aikaansaamiseksi. (12, s. 720.)

Mikrokokoluokan polttokennot sopivat 1–5 kW sähköä tuottavana pientalojen lämmön ja sähkön yhteistuotantoon jopa 45–55 %:n sähköntuotannon hyötysuhteen, hiljaisen toiminnan ja pienten päästöjen ansiosta (17, s. 233; 18, s. 404). Kokonaishyötysuhde polttokennolla varustetuissa mikro-CHP-laitoksissa on 70–90 %:n luokkaa, mutta polttokennokäyttöisten laitosten ongelmana on kuitenkin korkea hinta (13, s. 28).

3 MÄNTÄHÖYRYKONEELLA VARUSTETTU MIKRO-CHP-LAITOS

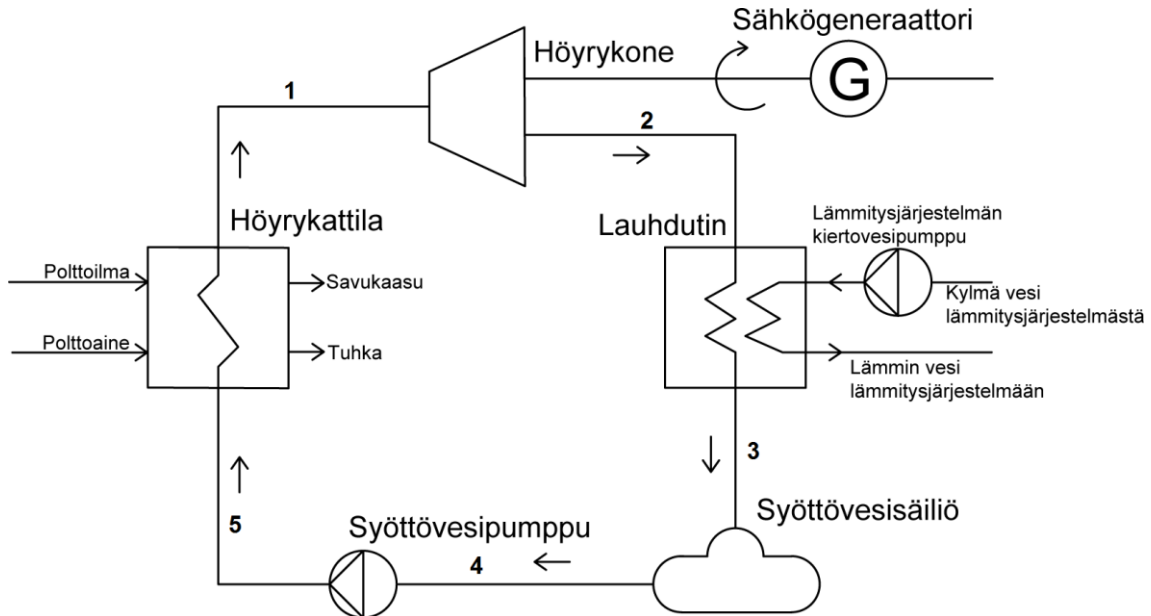
Opinnäytetyön tarkoituksena on pellettejä, haketta tai muuta kiinteää biomassaa polttavan mikro-CHP-laitoksen prosessin kokonaistarkastelu pientalon energiantuotannossa. Laitos tuottaa noin 20 kW lämpöä ja 3–6 kW sähköä. Tässä luvussa esitellään mäntähöyrykoneella lämpövoimakoneena käyttävän mikro-CHP-laitoksen toimintaperiaate, komponenttien toimintaa ja suunnitteluun liittyviä asioita. Kuvassa 5 nähdään komponentit, jotka muodostavat mikro-CHP-laitoksen.



KUVA 5. 3D-mallinnus suunnitellusta mikro-CHP-laitoksesta (19)

Laitoksen toiminta perustuu luvussa 3.2 esiteltyyn Rankine-kiertoon. Höyrykattilassa tuotettu höyry paisuu mäntähöyrykoneessa ja osa höyryn sisältämästä energiasta muuttuu työksi. Paisunut höyry lauhdutetaan takaisin vedeksi lauhduttimessa ja kerätään syöttövesisäiliöön, josta se pumpataan syöttövesipumpun avulla paineistettuna uudelleen kattilaan höyrystettäväksi. Lauhduttimessa höyrystä otettu lämpö siirtyy rakennuksen lämmitysjärjestelmään tai lämpövarastona toimivaan vesi-varaajaan, josta otetaan lämpö rakennuksen lämmityspiiriin ja lämpimään käyttöveteen. Laitoksen

sähkötuotannon hyötysuhde ja kokonaishyötysuhde voidaan laskea luvussa 3.1 esiteltujen kaavojen 1 ja 2 avulla. Kuvasta 6 voidaan nähdä mäntähöyrykoneella varustetun mikro-CHP-laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio.



KUVA 6. Mäntähöyrykoneella varustetun mikro-CHP-laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio

Mäntähöyrykone on yhdistetty generaattoriin, joka muuttaa mekaanisen energian sähköksi. Generaattori on yhdistettynä tehoelektroniikkayksikköön, joka mahdollistaa sähkötuotannon 50 Hz:n vakiotajuudella vaikka höyrykoneen pyörimisnopeus vaihtelee. Mikro-CHP-laitoksen energiatase on prosessin ollessa vakioilassa kaavan 3 mukainen. (20, s. 1316.)

$$\dot{H}_{pa} + \dot{H}_{pi} + P_{pa} = P_{netto} + \dot{Q}_{lj} + \dot{H}_{sk} + \dot{Q}_{muut\ häviöt} \quad \text{KAAVA 3}$$

missä \dot{H}_{pa} = polttoaineen sisältämä entalpiavirta kattilaan tullessa

\dot{H}_{pi} = polttoilman sisältämä entalpiavirta kattilaan tullessa

P_{pa} = polttoaineen palaessa vapautuva energia

P_{netto} = pumppujen ja apulaitteiden sähköteho vähennettynä höyrykoneen tehosta

\dot{Q}_{lj} = lämmitysjärjestelmään talteenotettu lämpöenergia

\dot{H}_{sk} = savukaasujen mukana poistuva hukkalämpö

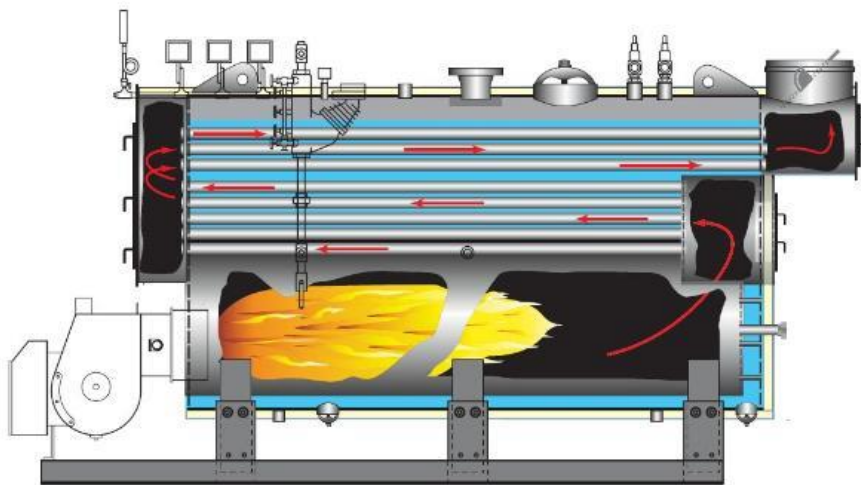
$\dot{Q}_{muut\ häviöt}$ = kattilan ja järjestelmän muut lämpöhäviöt

3.1 Höyrykattilatekniikka

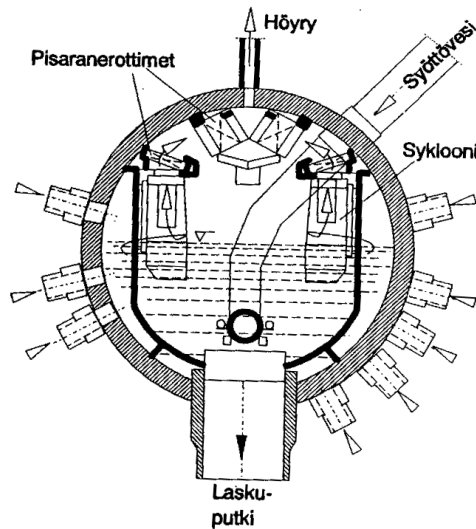
Höyrykattilat voidaan jakaa suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat suurvesitilakattiloita, ja niitä käytetään prosessiteollisuudessa matalapaineisen höyryn tuotantoon, kun höyryntarve on vähäinen eikä sähköntuotanto ole kannattavaa. Vesiputkikattilat voidaan jakaa luonnonkierto-, pakkokierto- ja läpivirtauskattiloihin sen mukaan, miten vesi niissä kiertää. Pakko-kierto- ja läpivirtauskattiloissa veden ja höyryn kierto kattilassa saadaan aikaiseksi pumpun avulla, kun luonnonkiertokattilassa vesi virtaa kattilan putkistossa veden ja höyryn tiheyseron johdosta. Edellä mainittujen kattilatyyppien rakennetta käsitellään tässä luvussa. (21, s. 111.)

3.1.1 Suurvesitilakattilat

Tulitorvi-tuliputkikattiloissa käytetään yleensä öljyä tai kaasumaista polttoainetta, joka palaa sylinterin muotoisessa tulitorvessa. Toisessa päässä tulitorvea palotilassa on kääntökammio, jossa savukaasut ohjautuvat tuliputkiin. Kolmivetoisessa kattilassa (kuva 7) tuliputkien päässä on vielä toinen kääntökammio ja toiset tuliputket. Höyryä tuottavissa suurvesitilakattiloissa tulitorvi ja tuliputket ovat kaikki veden peitossa ja höyrystynyt vesi nousee vesitilan yllä olevaan höyrytilaan painovoimaisesti. Rakenteensa takia tulitorvi-tuliputkikattiloita ei käytetä yli 20 baarin paineissa tai yli 12 MW:n tehoissa, koska paineen kasvaessa painekuoren täytyy olla paksumpi kestääkseen. Suurempi teho taas vaatii enemmän lämmönsiirtopinta-alaa, joka kasvattaa kattilan kokoa heikentäen myös painekuoren kestävyyttä. Tulitorvi-tuliputkikattilan terminen hyötysuhde voi olla 70 % ja elinkaari yli 25 vuotta. (21, s. 112; 22, s. 5.)



KUVA 7. Tulitorvi-tuliputkikattilan poikkileikkaus (23)



KUVA 9. Lieriön rakenne (21, s. 118)

Luonnonkierron ansiosta näiden kattiloiden omakäyttötehon tarve on pienempi verrattuna muihin kattilatyyppeihin, mutta luonnonkiertokattiloita ei voida käytännössä käyttää yli 170 baarin paineessa. Luonnonkiertokattilan etu läpivirtauskattilaan on pienempi vedenkäsittelyn tarve, koska epäpuhtaudet voidaan poistaa vedestä lieriössä ja syöttää puhdasta vettä tilalle. (21, s. 113–114.)

Luonnonkiertokattilassa lieriön ja virtausputkien koosta johtuen vesitulavuus on suuri, mikä hidastaa kattilan ylös- ja alasajoa sekä tehon muutosta, mutta samalla suurempi vesitulavuus toimii pientä paremmin nopeissa kuorman muutoksissa puskurina. Esimerkiksi höyryntarpeen noustessa äkillisesti paine järjestelmässä laskee, jolloin myös veden höyrystymislämpötila laskee ja näin ollen höyryntuotanto kasvaa. (21, s. 118)

Luonnonkiertokattilassa höyrystimen laskuputken veden ja höyrystinputkien veden ja vesihöyryn seoksen välisen tiheyseron aiheuttaman paine-eron tulee olla suurempi kuin kierrossa aiheutuvat painehäviöt, jotta luonnonkierto voi toimia. Painehäviöt muodostuvat putkiston kitkavastuksista ja dynaamisen paineen kasvamisesta, joka aiheutuu virtausnopeuden muutoksesta veden höyrystyessä ja laajentuessa. Kirjassa Höyrykattilatekniikka Huhtinen et al. (2000) veden ja vesihöyryn kiertovoima esitetään kaavan 4 muodossa. (21, s. 114.)

$$\Delta p_{st} = \Delta p_R + \Delta p_B$$

KAAVA 4

missä Δp_{st} = kiertovoima

Δp_R = kitkavastus

Δp_B = kiihtyvyysovastus

Kiertovoima Δp_{st} saadaan laskettua kaavalla 5.

$$\Delta p_{st} = g * (H_F - H_S) * (\rho' - \rho_G) \quad \text{KAAVA 5}$$

missä g = maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyyys = $9,81 \frac{m}{s^2}$

$(H_F - H_S)$ = korkeusero lieriön vedenpinnasta nousuputkien kohtaan, jossa höyrystyminen alkaa

ρ' = kylläisen veden tiheys laskuputkessa

ρ_G = veden ja höyryn seoksen keskimääräinen tiheys nousuputkissa

Kaavasta 5 nähdään, että luonnonkierto toimii paremmin korkeilla kuin matalilla kattiloilla, minkä takia luonnonkiertokattila ei välttämättä ole toimivin valinta mikro-CHP-laitoksen kattilaksi. Laskettaessa kohtaa, jossa höyrystyminen nousuputkissa alkaa, tulee ottaa huomioon kylläisen veden aiheuttama hydrostaattinen paine, jonka johdosta nousuputkien alaosassa veden paine on korkeampi kuin lieriössä eli se ei ole enää kylläistä. Tämä on otettu huomioon kaavassa 6, jolla voidaan laskea kyseinen korkeus höyrystinputkissa. (21, s. 114–115.)

$$\frac{H_S}{H_F} = \frac{h'' - h'}{\Delta h * U} \quad \text{KAAVA 6}$$

missä h'' = kylläisen höyryn ominaisentalpia lieriön paineessa

h' = kylläisen veden ominaisentalpia lieriön paineessa

Δh = paineen noususta aiheutuva ominaisentalpianmuutos, joka vastaa alijäähtymistä

U = kiertoluku (5-100, on riippuvainen painetasosta)

Kaavan 4 putkiston ja kertavastuksien aiheuttamat kitkavastushäviöt Δp_R voidaan laskea kaavalla 7 (21, s. 115).

$$\Delta p_R = R * \left(\lambda * \frac{l}{D} + \sum \xi \right) * \frac{1}{2} * \rho * w^2 \quad \text{KAAVA 7}$$

missä R = kaksifaasitekijä (laskuputkissa yksifaasivirtaus eli $R=1$, nousuputkille määritellään erikseen, ks. lähde 21 s. 116)

λ = kitkakerroin

$\frac{l}{D}$ = putken pituuden suhde halkaisijaan

$\sum \xi$ = kertavastusten vastuskertoimien summa

ρ = veden tiheys

w = veden nopeus

Dynaamisen paineen kasvamisesta aiheutuva painehäviö Δp_B voidaan laskea kaavan 8 avulla (21, s. 116).

$$\Delta p_B = (\rho w) * \Delta w$$

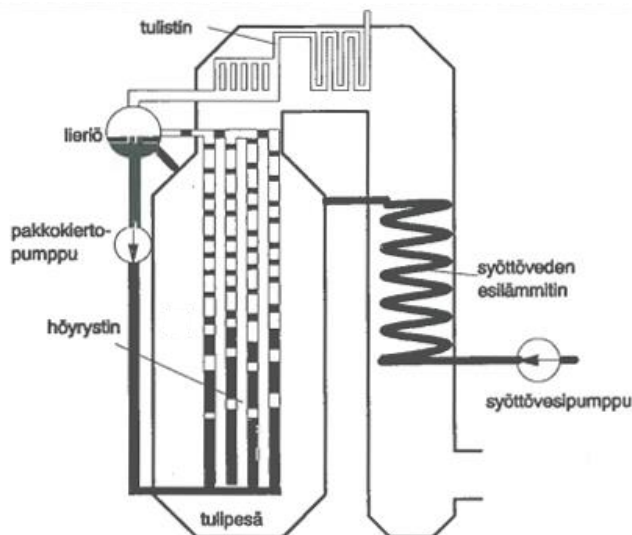
KAAVA 8

missä ρw = massavirran tiheys

Δw = veden nopeuden muutos

3.1.3 Pakkokiertokattilat

Kuten aikaisemmin mainittiin, eroaa pakkokiertoperiaatteella toimiva höyrykattila (kuva 10) vesi-höyrykierroltaan luonnonkiertoperiaatteella toimivasta siinä, että lieriöstä lähtevässä laskuputkessa on yksi tai useampi pakkokierto-pumppu, jonka avulla kierto höyrystimessä saadaan aikaiseksi. Pakkokierto-kattilan lieriö toimii samoin kuin luonnonkierto-kattilassa ja toimiakseen sekin vaatii tiheyseron, joten yli-221 baarin painetta ei voida käyttää. (21, s. 118.)



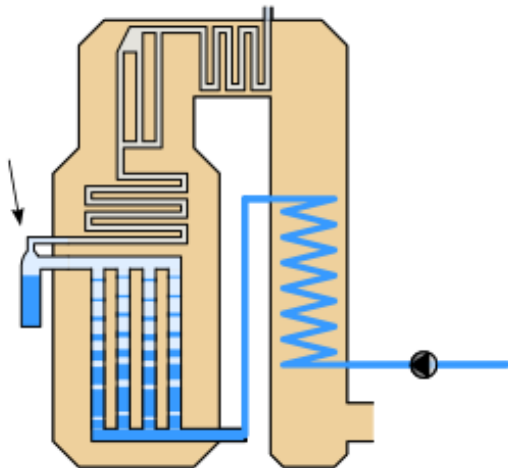
KUVA 10. Pakkokierto-kattilan vesi-höyrypiiri (21, s. 119)

Pakkokierron vuoksi höyrystinputkien asento voidaan suunnitella vapaammin ja mitoittaa isompiin painehäviöihin, jolloin höyrystinputkista voidaan tehdä pienempiä materiaalikustannuksissa säästäten. Pakkokierto-kattiloista voidaan tehdä matalampia kuin luonnonkierto-kattiloista. Pumpkauksen

takia laitoksen omakäyttötehotarve on kuitenkin suurempi ja vaatii tyypillisesti noin 0,5 % tuotetusta sähköstä. Veden jakautumista höyrystimen nousuputkiin säädellään pakkokiertokattilassa ylikuumentumisen välttämiseksi virtauksenkuristimien avulla, joilla käytännössä muutetaan putkien painehäviöitä niin, että kaikkiin putkiin virtaa sama määrä vettä. (21, s. 118–119.)

3.1.4 Lämpivirtauskattilat

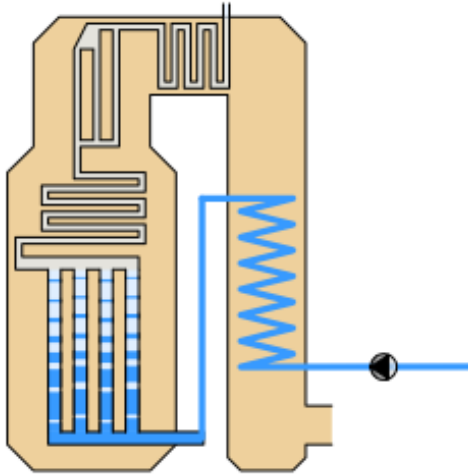
Luonnonkierto- ja pakkokiertokattiloissa veden ja höyryn erotukseen käytetty lieriö muodostaa ison osan pienitehoisen kattilan kustannuksista, jolloin lämpivirtauskattilan valinta mikro-CHP-laitoksen höyryntuotantoon voi olla perusteltua, koska tarvetta lieriölle ei tällöin ole. Lämpivirtauskattilassa vesi kulkee vain kerran kattilan läpi höyrystyksen kerralla. Ne voidaan jakaa Sulzer- ja Benson-kattiloihin, joista Sulzer-kattilassa (kuva 11) on kiinteä höyrystymispiste ja Benson-kattiloissa höyrystymispiste vaihtelee. (21, s. 120)



KUVA 11 Sulzer-lämpivirtauskattilan vesi-höyrypiiri (22, s. 18)

Kuvassa 11 nuolella on merkitty vedenerotuspullo eli niin sanottu Sulzer-pullo, joka erottaa veden höyrystä. Vedenerotuspullossa vesi on höyrystymispisteessään ja siitä voidaan erottaa epäpuhtaudet, kuten lieriöstä. (22, s. 18.)

Lämpivirtauskattiloissa painehäviöt ovat suuret, joten syöttöveden pumppaus vaatii paljon tehoa. Materiaalikustannuksissa kuitenkin säästetään, koska veden virratessa pumpun avulla höyrystinputkien läpimitta voi olla pieni ja pienien putkien paineenkesto on parempi, joten voidaan käyttää ohutseinäisiä putkia. Benson-kattiloilla (kuva 12) liukuvan paineensäädön johdosta osatehoilla syöttövesipumpun vaatima teho on pienempi, mikä parantaa laitoksen hyötysuhdetta.



KUVA 12. Benson-läpivirtauskattilan vesi-höyrypiiri (22, s. 17)

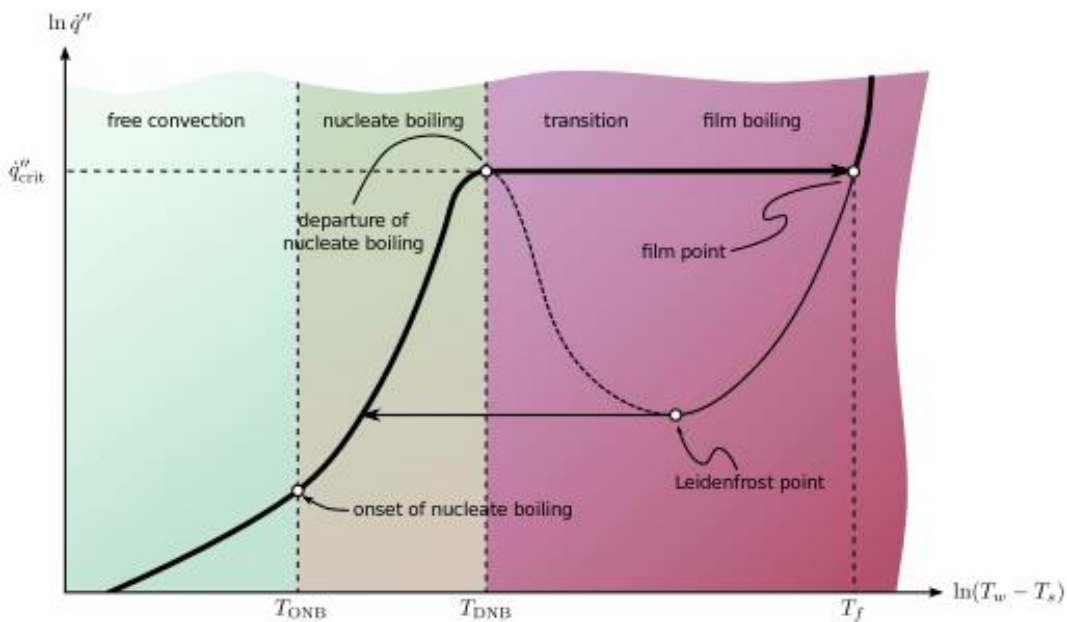
Lieriötön läpivirtauskattila on vesimäärältään ja putkien seinämien paksuuksiltaan pienempi kuin lieriöllinen kattila, joten lämmölle puskurina toimivaa massaa on vähemmän. Tällöin kattila on nopeampi käynnistää, mutta vaatii samalla nopean säätöautomaatiikan ettei kattila pääse vikatilanteissa kiehumään tyhjäksi. Benson-kattilan suunnittelussa lähdetään siitä, että tulistuksen loppulämpötilaa voidaan säätää kulloinkin sopivaksi vesivirran ja polttoainevirran suhdetta muuttamalla. (21, s. 120, 123.)

Läpivirtauskattilassa höyrystinputkiin menevällä vedellä tulee olla tietty miniminopeus, jotta virtaus on stabiili ja vesi jakautuu tasaisesti putkiin. Virtausnopeus on suoraan verrannollinen kattilan tehoon ja painehäviö putkissa taas on verrannollinen virtausnopeuden toiseen potenssiin, jolloin syöttövesipumpun vaatima teho kattilan maksimiteholla on moninkertainen. Painehäviön pienentämistä ajatellen läpivirtauskattilassa voidaan käyttää aiemmin mainittua pakkokiertoa, jolla höyrystimeen syötettävän veden nopeutta voidaan säädellä ja varmistaa stabiili virtaus vähentäen syöttövesipumpun vaatimaa tehoa. (21, s. 124–125.)

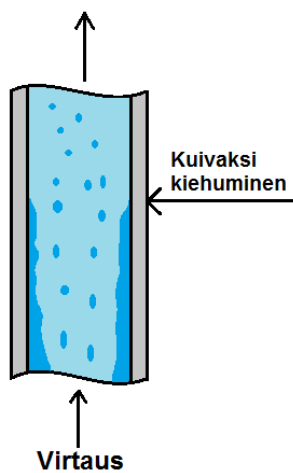
3.1.5 Kriittisen lämpövuon muodostuminen kattilassa

Höyrykattiloiden lämmönsiirtimien suunnittelussa yksi tärkeä määriteltävä asia on kriittisen lämpövuon muodostuminen. Kattilan lämmönsiirrossa pyritään mahdollisimman korkean lämpövuon saavuttamiseen ilman suuria lämpötilaeroja lämmönsiirtimeen pinnan ja lämmönsiirtoon osallistuvan fluidin välillä. Lämpövuolla tarkoitetaan siirtyvää lämpötehoa yhtä pinta-alayksikköä kohti, ja sen

yksikkö on W/m^2 . Pakotetussa yksifaasivirtauksessa lämpövuon ja lämpötilaeron välillä on lineaarinen yhteys. Lämpövuon kasvaessa kiehumisen alkaessa höyrykuplia muodostuu kuumalla pinnalla, ja ne kulkevat alijäähtyneeseen osaan virtausta, missä kuplat hajoavat. Lämpövuon kasvaessa lisää alkaa höyrystä muodostua niin sanottu filmikerros kuumalle pinnalle, minkä takia lämmönsiirto yhtäkkisesti vähenee ja putken seinämän lämpötila nousee (kuvassa 13 kohta *departure of nucleate boiling*). Seinämän ja fluidin lämpötilaerolla, jolla höyryfilmikerros alkaa muodostua, on lämpövuon niin sanottu kriittinen, ja sen ylittyessä puhutaan lämmönsiirtokriisistä tai kuivaksi kiehumisesta (kuvan 14 nuolen osoittama kohta). (22, s. 12–13; 24, s. 1713.)



KUVA 13. Lämpövuon välinen yhteys seinämän ja virtaavan fluidin lämpötilaeroon (24, s. 1716)



KUVA 14. Putkivirtauksen kohta, jossa lämmönsiirtokriisi alkaa

Kriittisen lämpövuon muodostuminen on riippuvainen paineesta, höyrynlaadusta, putkityypistä, -asennosta ja -halkaisijasta sekä virtausprofiilista. Kattilasuunnittelussa tulipesän kriittisen lämpövuon tulee olla suurempi kuin palamisen tuottama lämpövu. (22, s. 13.) Kriittisen lämpövuon ylityminen ja seinämän ylikuumentuminen voivat aiheuttaa lämmönsiirron heikkenemisen lisäksi materiaalin lujuuden heikkenemistä ja korroosiota. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloissa kriittisen lämpövuon muodostumista halutaan välttää, mutta alikriittisissä paineissa toimivissa läpivirtauskattiloissa se tapahtuu aina, koska periaatteeltaan läpivirtauskattila on kuin yksi pitkä putki, jonka alussa vesi on nestefaasissa ja lopussa kylläistä tai usein tulistettua höyryä. Rihlatuilla höyrystinputkilla (kuva 15) voidaan viivästyttää kriittisen lämpövuon muodostumista verrattuna sileäpintaisten putkien aiheuttamatta liian suurta painehäviötä. Rihlaus aiheuttaa virtaukseen pyörteilyä ja niin sanotusti pakottaa veden putken seinämälle, mikä mahdollistaa korkeammat lämpövuot ilman lämmönsiirtokriisiä. (25, s. 4–18; 5–6.)



KUVA 15. Rihlatun putken poikkileikkaus (26, s. 5–6)

3.1.6 Vesiputkikattiloiden suunnittelu

Höyryä tai vettä tuottavien vesiputkikattiloiden suunnittelussa tulee noudattaa standardia SFS-EN 12952, kun kattilan tilavuus on yli 2 litraa, suurin sallittu paine on suurempi kuin 0,5 baaria ja lämpötila yli 110 °C. (26, s. 5.) Standardin SFS-EN 12952 osan 5 mukaan höyrykattilaan menevässä syöttölinjassa täytyy olla suoja- tai sulkulaite takaisinvirtauksen estämiseksi. Lisäksi höyrönsyöttölinjan liitäntä höyrykattilaan on toteutettava niin, että takaisinvirtausta estävän laitteen vuotaessa höyrykattila ei voi tyhjentyä alemmas kuin laskuputkien ylin kohta. Laskuputket ovat lieriöstä alas kattilan höyrystinputkille menevät vesiputket. Höyrykattilalle on määritettävä myös alin sallittu vedenkorkeus, jonka tulee olla vähintään 150 mm lieriön ylintä lämmitettyä kohtaa ja laskuputken liitoksen ylimmän kohdan sijainnin yläpuolella. Ylikuumentumisen varalta kattilassa tulee olla rajotin, joka katkaisee tai lukitsee lämmönsyötön, jos veden pinnan korkeus laskee alle sallitun. (27, s. 20, 26, 30.) Kattilan syöttöveden määrän säätämiseen käytettävä syöttövesiventtiili on usein istukka-, pallo- tai kiertoistukka venttiili ja paine-erosta riippuen niiden rakenne tulee olla sellainen, että se ehkäisee kavitaatiota. (28, s. 129.)

Vesiputkikattilassa tulee olla kattilaveden pinnankorkeuden mittaukseen vähintään kaksi laitetta, joista toinen on läpinäkyvästä materiaalista valmistettu mittari, josta näkee nestepatsaan korkeuden. Tämän lisäksi on oltava kaksi sähköistä vedenkorkeuden mittaavaa laitetta, vedenkorkeuden mittaava vedenkorkeuden säätölaite tai vedenkorkeutta rajoittava laite, joka osoittaa vedenkorkeuden. Vesiputkikattila on varustettava ainakin yhdellä painemittarilla, joka täyttää standardin EN 837-1 vaatimukset ja näyttää baareina ylipaineen määrän ja suurimman sallitun paineen järjestelmässä. Luonnonkiertoisissa kattiloissa täytyy myös olla automaattinen säätö paineelle ja vedenkorkeudelle. (27, s. 28, 22.) Standardin SFS-EN 12952 lisäksi höyrykattilan suunnittelussa tulee noudattaa painelaitedirektiiviä 2014/68/EU, joka pätee myös höyrykoneiden suunnitteluun.

Varoventtiilien tarkoitus on estää suurimman sallitun käyttöpaineen ylittyminen paineenalaisissa laitteissa. Venttiilit tulee mitoittaa tämän mukaan ja sen kunnosta tulee huolehtia jumiutumisen estämiseksi. Paineensäätölaitteena varoventtiiliä ei kuitenkaan saa käyttää. (29, s. 9–10.) Hyvin toimiva varoventtiili on tiivis kattilan ollessa lähellä venttiilin avautumispainetta, mutta myös kykenee mahdollisimman suureen ulospuhallukseen paineen nousun estämiseksi ja sulkeutuu nopeasti paineen laskiessa (30, s. 165–166).

Laitokseen on asennettava standardin SFS-EN 12952 osan 5 mukaan tyhjennys- ja ulospuhalluslaitteet ennaltaehkäisemään onnettomuustilanteiden syntyä, ja höyrykattilan on oltava erotettavissa muusta järjestelmästä luotettavasti. Käytettäessä laitteita, joilla vedenkorkeus voidaan kattilassa määrittää tarkasti, standardin mukaan kattilan lämmitysjärjestelmä on suunniteltava niin, ettei lämmöntonniin päätyttyä kattilaan varautunut lämpö höyrystä haitallisesti kattilassa olevaa vettä. (27, s. 26.)

Standardisarjan SFS-EN 12952 osassa 16 määritellään höyrykattiloille, että apulaitteena olevat polttoaineiden syöttölaitteet on suunniteltava niin, ettei tuli pääse mitenkään kulkeutumaan syöttölaitteen kautta polttoainevarastoon. Enintään 50 kW:n lämpötehon arinallisissa kattiloissa tulipesän tulee olla osoitinlaite paineelle, mutta tätä isommissa tarvitaan paineenrajoitinlaite. (31, s. 16, 22.)

Valtioneuvoston painelaiteturvallisuutta koskevan asetuksen 1549/2016 kuudennessa pykälässä todetaan painelaitteiden rekisteröintivelvollisuudesta seuraavaa:

Seuraavat painelaitteet eivät aiheuta painelaitelain 51 §:n 1 momentissa tarkoitettua rekisteröintivelvollisuuden synnyttävää merkittävää vaaraa: - -

2) höyrykattila, jonka pienin sallittu nestetilavuus on enintään 100 litraa, kun kysymyksessä on:

a) vesiputkirakenteinen höyrykattila, jonka putkien ulkohalkaisija on enintään 38 millimetriä ja suurin sallittu käyttöpaine enintään 16 baaria sekä suurimman sallitun käyttöpaineen ja pienimmän sallitun nestetilavuuden tulo enintään 750 baaria kertaa litra (bar • L); paineen ja tilavuuden tuloa ei sovelleta, jos veden läpivirtaus kattilassa aikaansaadaan syöttölaitteiden avulla ja vesi suurimmalla jatkuvalla kuormituksella toimittaessa kattilan höyrystämisputkiston läpi virratessaan höyrystyy kokonaan tai suurimmaksi osaksi;

b) muu höyrykattila, jonka suurin sallittu käyttöpaine on enintään 10 baaria ja suurimman sallitun käyttöpaineen ja pienimmän sallitun nestetilavuuden tulo on enintään 500 bar • L; (32.)

Päätöksen perusteella vesiputkirakenteisen kattilan pienin sallittu nestetilavuus tulee olla alle 46,9 litraa suurimman sallitun käyttöpaineen ollessa 16 baaria, jotta sitä ei tarvitse rekisteröidä. Vettä saa olla kattilassa enemmän, jos vesi virtaa pumppujen tuottaman paineen avulla eli ei luonnonkiertoisesti, mutta sen täytyy myös höyrystyä kokonaan tai lähes kokonaan. Tästä päätellen vesiputkikattiloiden paineen ja tilavuuden tuloa ei koske läpivirtauskattiloita, koska siinä vesiputkikattilatyypissä kaikki vesi höyrystetään kerralla. Suurvesitilakattiloille tulo on 500 barL eli suurimman sallitun käyttöpaineen ollessa 10 baaria tilavuus saa olla 50 litraa. Tulitorvi-tuliputkikattiloiden suunnittelussa käytetään standardia SFS-EN 12953.

3.2 Laitoksen vesi-höyrykierron veden laatuvaatimukset

Osana opinnäytetyötä on tarkoitus selvittää, voiko talousvettä käyttää mikro-CHP-laitoksen vesi-höyrykierrossa vai vaatiiko se käsittelyä. Höyrykattiloissa käytettävän veden laatuvaatimukset riippuvat muun muassa höyrykattilan tyypistä, käyttöpaineesta, suurimmasta paikallisesta lämpökuormasta ja höyryn käyttötarkoituksesta. Standardissa SFS-EN 12952-12 on eriteltynä laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle vesiputkikattiloissa ja niihin liittyvissä laitteistoissa. Standardista SFS-EN 12953-10 löytyy vastaavat tiedot tulitorvi-tuliputkikattiloiden veden laatuvaatimuksille. Vesiputki- ja tulitorvi-tuliputkirakenteisille höyrykattiloille määritellään 0,5–20 baarin käyttöpaineessa taulukossa 1 seuraavalla sivulla näkyviä laatuvaatimuksia. Läpivirtauskattilan osalta luvut kattavat kaikki paineluokat. Taulukossa on vertailuarvona myös vesijohtoveden vastaavat arvot, jotka on määritelty sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 1352/2015 talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista.

TAULUKKO 1. Eri kattilatyyppien veden ja vesijohtoveden laatuvaatimuksia (33, s. 12–26; 34, s. 7–9; 35; 36; 37)

Muuttuja	Yksikkö	Luonnonkiertoinen tai avustetun kierron vesiputkikattila		Läpivirtauskattila	Tulitorvi-tuliputkikattila		Vesijohtovesi
		Syöttövesi	Kattilavesi	Syöttövesi	Syöttövesi	Kattilavesi	
Suora sähköjohtavuus 25 °C lämpötilassa	µS/cm	-	< 6000	-	ohjearvo < 6000	< 6000	< 2500
pH-arvo 25 °C lämpötilassa	-	>9,2 (pehmenneillä vedellä pH-arvo > 7 tulee harkita arvoa 10,5...12)	10,5...12,0	7...10 riippuen happipitoisuudesta	>9,2 (pehmenneillä vedellä pH-arvo > 7 tulee harkita arvoa 10,5...12)	10,5...12,0	6,5...9,5
Kokonaiskovuus (Ca + Mg)	mmol/l	< 0,02	-	-	< 0,01	-	ei määritelty, mutta esim. Oulun alueella vaihtelee 0,09...1,1 (35.)
Natrium ja kalium (Na + K)	mg/l	-	-	< 0,01	-	-	Suositus: Na < 200 mg/l
Rauta (Fe)	mg/l	< 0,05	-	< 0,02	< 0,3	-	Suositus: < 200 µg/l
Alkali-teetti	mmol/l	-	1...15	-	-	1...15	-
Kupari (Cu)	mg/l	< 0,02	-	< 0,003	< 0,05	-	< 2
Silikaatti (SiO ₂)	mg/l	-	80...160 riippuen alkaliteetistä	< 0,02	ohjearvo 80...160 riippuen alkaliteetistä	80...160 riippuen alkaliteetistä	-
Fosfaatti (PO ₄)	mg/l	-	Kun suora sähköjohtavuus > 30 µS/cm: 10...20	-	-	Kun suora sähköjohtavuus > 30 µS/cm: 10...20	-
Happi (O ₂)	mg/l	< 0,02	-	0,1...0,25 riippuen pH:sta	< 0,02	-	Ei määritelty, suositus > 3 mg/l (36.)
Öljyrasva	mg/l	< 1	-	-	< 1	-	-
Permanganaattiluku	mg/l	5	-	-	-	-	20 (37.)

Tietojen perusteella talousvedessä kokonaiskovuus eli kalsiumin ja magnesiumin määrä, natriumin sekä raudan, kuparin ja hapen määrät voivat olla sallituissakin rajoissa korkeammat kuin kattilave-

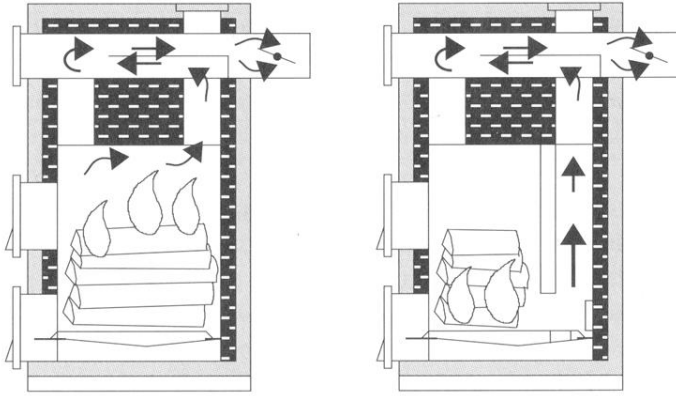
den ja syöttöveden laatuvaatimukset, joten talousvettä voi sellaisenaan käyttää mikro-CHP-laitoksen vesi-höyrypiirissä. Esimerkiksi kalsium, magnesium ja silikaatti voivat lämpötilan noustessa kattilassa saostua ja muodostaa niin sanottua kattilakiveä, joka muodostaa käytännössä eristekerroksen lämmönsiirtopinnoille. Höyrynpaineen noustessa kattilakivi voi kulkeutua myös höyryvirtauksen mukana mäntäkoneeseen aiheuttaen siellä ongelmia. Natrium ja kalium taas alkaleina voivat johtaa alkalikorroosion syntymiseen saostuessaan. Rauta ja kupari aiheuttavat myös korroosiota, kun kattilavedessä on happea. (21, s. 297–298.) Tämän raportin puitteissa ei käydä läpi vedenkäsittelyyn tarvittavia vaiheita.

3.3 Polttotekniikka kiinteillä biopolttoaineilla

Kiinteitä biopolttoaineita käytettäessä polttolaitte voi olla arina-, poltin- tai leijukerrospoltoon perustuva. Polttolaitteen tarkoitus on saada polttoaine palamaan ja sitä kautta vapauttamaan sen sisältämä kemiallinen energia lämpönä. Tehokas palaminen vaatii, että palamisilma ja polttoaine pääsevät reagoimaan mahdollisimman hyvin. Ylimääräisen ilman syöttöä kattilaan kuitenkin vältetään, koska se laskee savukaasun lämpötilaa ja näin ollen myös kattilan tehoa. Poltinpoltto vaatii kiinteiden polttoaineiden kohdalla polttoaineen jauhamisen pölyksi, jotta se voidaan syöttää kattilaan. Leijukerrospoltoissa kattilan pohjasta puhalletaan ilmaa niin paljon, että kattilassa oleva hiekka saadaan leijumaan. Polttoainetta syötetään hiekan sekaan, jolloin saadaan aikaan tehokas palamisprosessi. (38, s. 35–36.) Poltin- ja leijukerrospolto ovat kuitenkin arinapoltoon verrattuna monimutkaisempia tekniikoita ja näin ollen myös kalliimpia, joten ne eivät ole niin varteenotettavia vaihtoehtoja mikro-CHP-laitoksen polttotekniikaksi.

Arinapoltoissa polttoaine syötetään kiinteälle tai liikkuvalla arinalle, jossa palaminen tapahtuu. Pienitehoisissa kattiloissa käytetään yleensä kiinteää arinaa, joka voi olla taso-, viisto- tai porrasarina. Etenkin kiinteillä arinoilla ongelmaksi muodostuu kuitenkin palamisen hallinnan vaikeus ja polttoaineen epätasainen jakautuminen ja palaminen arinalla, mistä aiheutuu ylimääräisiä päästöjä verrattuna tasaiseen palamiseen. (38, s. 35–36)

Arinakattilat voidaan jakaa myös yläpalo- ja alapalokattiloihin (kuva 16). Yläpaloperiaatteella toimivaan kattilaan polttoaine syötetään yleensä panoksena eikä niissä yleensä ole säädettävää tehonsäätöä palamiselle. Yläpalokattilassa päästöjen määrä voi olla korkeampi verrattuna muihin kattilatyyppeihin palamiskaasujen ja ilman huonon sekoittumisen takia. (39, s. 479.)



KUVA 16. Yläpalo- (vas.) ja alapaloperiaatteella toimivat kattilat (39, s. 479)

Alapaloperiaatteella toimivaan kattilaan voidaan sen sijaan lisätä polttoainetta vaikuttamatta negatiivisesti palamisvyöhykkeen olosuhteisiin. Tämä helpottaa tehonsäätöä, joka voidaan tehdä polttoilmavirtausta kuristamalla. Palamisilman ja -kaasujen kunnollinen sekoittuminen voi kuitenkin vaatia koneellisen ilman syötön tai savukaasupuhaltimen käytön. (39, s. 479.)

Höyrykattilan hyötysuhde $\varepsilon_{kattila}$ voidaan laskea kaavan 9 avulla (20, s. 1318).

$$\varepsilon_{kattila} = \frac{\dot{m}_1(h_1 - h_5)}{\dot{m}_{pa} \cdot LHV_{pa}}$$

KAAVA 9

missä \dot{m}_1 = vesihöyrypiirin massavirta [kg/s]

h_1 = kattilasta poistuvan höyryn ominaisentalpia [kJ/kg]

h_5 = kattilaan tulevan veden ominaisentalpia [kJ/kg]

\dot{m}_{pa} = polttoaineen massavirta [kg/s]

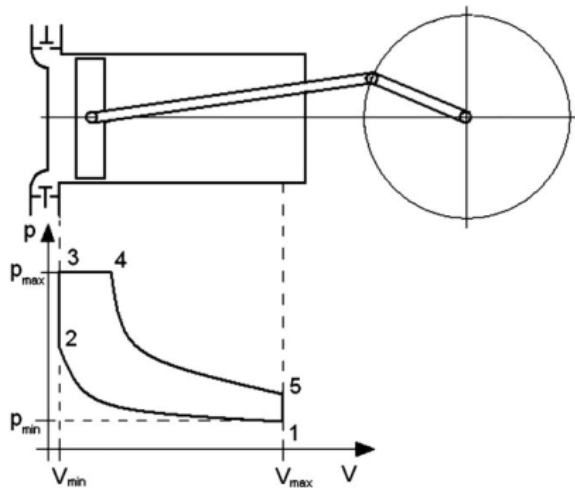
3.4 Mäntähöyrykone

Mäntähöyrykoneita on kehitetty yhdestä kuuteen sylinterisinä 1–1500 kW:n kokoluokassa. Monisylinteriset mäntähöyrykoneet voivat höyryn parametreista riippuen olla yksi- tai monivaiheisia ja niiden sisääntulopaine on tyypillisesti 6–60 baaria vastapaineen ollessa 0–25 baaria. Tyypillisesti yksivaiheisen koneen sähköntuotannon hyötysuhde voi olla 4–7 %. Monivaiheisessa koneessa paisunta voidaan jakaa korkea-, keski- ja matalapainesylintereihin, ja sen sähköntuotannon hyötysuhde voi olla 8–14 %. Mäntähöyrykone sietää höyryturbiinia paremmin kosteuspitoista höyryä ja se voi kestää jopa 12 %:n kosteuspitoisuuden, jolloin voidaan käyttää suhteellisen matalapaineista kylläistä höyryä laskien kattilalle asetettuja vaatimuksia. Tulistetulla höyryllä kuitenkin saavutetaan

korkeampi hyötysuhde, kun sylinterissä tapahtuu vähemmän höyryn lauhtumista ja höyryä tarvitaan vähemmän saman tehon saavuttamiseksi korkeamman entalpian takia. (10, s. 183–185.)

Mäntähöyrykoneet kykenevät parempaan hyötysuhteeseen osateholla kuin höyryturbiinit, koska tehon ollessa 50–100 % koneen ominaistehosta sähköntuotannon hyötysuhde voi olla jopa 90 % maksimista. Tästä on hyötyä pientalon energiantuotannossa, kun sähkön- ja lämmöntarve vaihtelee jatkuvasti ja laitosta täytyy ajaa osatehoilla. Eräitä mäntähöyrykoneiden ongelmia ovat sen tuottama melu ja värinä 750–1500 rpm:n kierrosnopeuksilla. (10, s. 185.)

Kuvasta 17 nähdään mäntähöyrykoneen toimintaperiaate ja pV-kuvaaja ideaalisessa tilanteessa. Puristusvaiheessa (1->2) mäntä liikkuu alakuolonkohdasta yläkuolonkohtaan puristaen jäänhöyryä. Syöttövaiheessa (2->3 ja 3->4) korkeapaineinen höyry virtaa sylinteriin ja paisuu tilasta 4 tilaan 5 työntäen mäntää kohti alakuolonkohtaa. Tässä työtahdissa männässä kiinni oleva männänvarsi pyörittää kampiakselia, joka on yhteydessä generaattoriin. Poistotahdissa (5->1) paisunut höyry virtaa joko lauhduttimeen tai monivaiheisessa mäntäkoneessa alemmassa paineessa toimivaan sylinteriin. (20, s. 1319.)



KUVA 17. Mäntähöyrykoneen toimintaperiaate (20, s. 1318)

Mäntähöyrykoneen toimintaan vaikuttavat sylinterin puristussuhde ε ja täytössuhde φ , jotka voidaan laskea kaavojen 10 ja 11 avulla. (20, s. 1319.)

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

KAAVA 10

missä V_{max} = Sylinterin tilavuus, kun mäntä on alakuolonkohdassa

V_{min} = Sylinterin tilavuus, kun mäntä on yläkuolonkohdassa

$$\varphi = \frac{V_4 - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}$$

KAAVA 11

missä V_4 = Sylinterin tilavuus V_{min} kohdasta laskien siihen kohtaan, kun sylinteriin ei enää virtaa höyryä ja varsinainen paisunta alkaa.

Mäntähöyrykoneen optimaalinen mitoitus mikro-CHP-laitokselle saavutetaan, kun höyrykone toimii mahdollisimman korkealla hyötysuhteella, kykenee paisuttamaan kaiken kattilan tuottaman höyryvirran ja on mahdollisimman pieni iskutilavuudeltaan (20. s. 1320). Järjestelmässä voi olla ohitusventtiili höyrykoneelle, jolla ylös- ja alasajotilanteissa ja häiriötilanteissa suojataan höyrykonetta. Ohitusventtiilit ovat höyrymuutoventtiilejä, joille on ominaista nopeus ja suurien lämpötila- ja paine-erojen kestävyys. (28, s. 129.)

3.5 Sähkögeneraattori ja tehoelektronikka

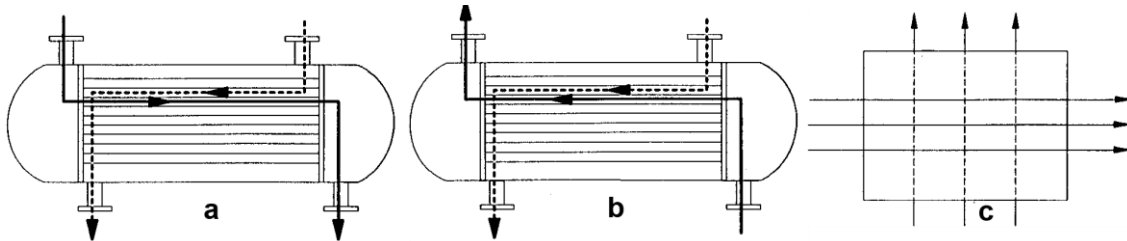
Sähkögeneraattorina mäntähöyrykoneella varustetussa mikro-CHP-laitoksessa voidaan käyttää tahtigeneraattoria tai epätahtigeneraattoria. Generaattorilaitteisto liitetään katkaisijan kautta suoja-laitteisiin, joiden avulla laitos liitetään kiinteistön verkkoon tai sähköverkkoon. Laitoksen on sähköverkkoon kytkettäessä vastattava jakeluverkon taajuutta, joka voidaan esimerkiksi tahtigeneraattorin tapauksessa tehdä tahdistuslaitteiston avulla. (40, s. 25.) Epätahtigeneraattorin taajuuden taas tulee olla lähellä sähköverkon taajuutta liitettäessä generaattoria verkkoon. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää AC/DC- ja DC/AC-konverttereista koostuvaa tehoelektronikkayksikköä, jonka avulla höyrykonetta voidaan ajaa vaihtelevilla nopeuksilla eli myös osatehoilla tuottaen aina 50 Hz:n taajuista vaihtovirtaa kiinteistön verkkoon tai jakeluverkkoon. (20, s. 1316.) Taajuusmuuttajaa käyttämällä höyrykoneen ja generaattorin väliin ei tarvita mekaanista vaihteistoa eikä generaattori vaadi synkronisointia.

3.6 Lauhdutin ja lämmönvarastointi

Mikro-CHP-laitoksen lauhduttimen tarkoitus on nimensä mukaisesti lauhduttaa höyrykoneelta tuleva paisunut vesi-höyryseos, jotta se voidaan pumpata takaisin kattilaan. Lauhdutin on lämmönsiirrin, jolla tässä tapauksessa siirretään laitoksen vesi-höyrypiiristä lämpöä kiinteistön lämmitysjärjestelmän energiavaraajaan. Energiavaraajan käytöllä lämmönvarastoinnissa mahdollistetaan

joustavampi ajotapa mikro-CHP-laitokselle. Kiinteistön lämmöntarpeen ollessa vähäinen järjestelmässä tulisi olla mahdollisuus käyttää vesivaraaja-lauhdutinkierron sijaan muuta jäähdytyskiertoa lauhduttimelle, jotta mikro-CHP-laitosta voidaan ajaa. Tämä vaatii yhden lämmönsiirtimen järjestelmään lisää, jolla lämpö voidaan siirtää esimerkiksi maaperään tai ulkoilmaan.

Lauhdutin voi olla toimintaperiaatteeltaan vasta-, myötä- tai ristivirtalämmönsiirrin. Vastavirtalämmönsiirtimessä (kuvassa 18 a) fluidit virtaavat vastakkaisiin suuntiin toisiinsa nähden, myötävirtalämmönsiirtimessä (b) virtaussuunta on sama ja ristivirtalämmönsiirtimessä (c) virtaukset ovat koh-tisuorassa toisiinsa nähden. (21, s. 202.) Lauhduttimet ovat yleensä pintalauhduttimia eli fluidien välillä on kiinteä seinämä eivätkä ne sekoitu keskenään.



KUVA 18. Lämmönsiirtimien toimintaperiaatteita. a) vastavirtalämmönsiirrin, b) myötävirtalämmönsiirrin ja c) ristivirtalämmönsiirrin (21, s. 203).

Vastavirtalämmönsiirtimet tarvitsevat näistä pienimmän pinta-alan tietyn lämpömäärän siirtämi- seen ja käytännössä kattilan lämmönsiirtimet toimivat tällä periaatteella. Lämmönsiirtimien mitoi- tusta varten tulee tietää siirrettävä lämpöteho ja lämmönsiirtoon osallistuvien fluidien lämpötilat en- nen ja jälkeen lämmönsiirtimen. Lämmönsiirtoteho on verrannollinen lämmönsiirtimen pinta-alaan A , lämmönläpäisykertoimeen k sekä fluidien väliseen keskimääräiseen lämpötilaeroon ΔT ja se voidaan laskea kaavalla 12.

$$\Phi = k \cdot A \cdot \Delta T$$

KAAVA 12

Kaavassa 12 oleva lämpötilaero ΔT voidaan laskea joko aritmeettisena (yksinkertaisempi) tai lo- garitmisena (tarkempi) kaavan 13 tai 14 avulla (21, s. 201–203).

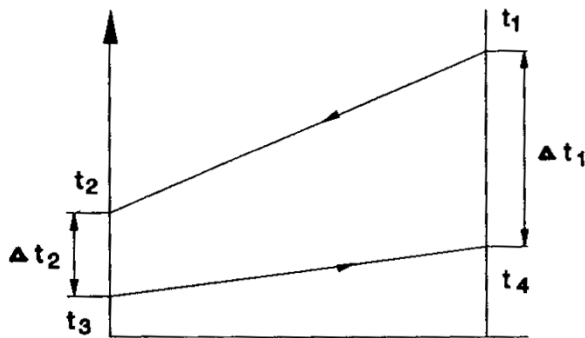
$$\Delta T_{aritmeetti} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2}$$

KAAVA 13

$$\Delta T_{logaritminen} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

KAAVA 14

joissa lämpötilaerot $\Delta T_1 = t_1 - t_4$ ja $\Delta T_2 = t_2 - t_3$ ovat alla olevan kuvan 19 mukaiset.



KUVA 19. Vastavirtalämmönsiirtimen fluidien lämpötilat ennen ja jälkeen lämmönsiirtimen. Ylempi viiva kuvaa jäähtyvää ja alempi lämpenevää virtaa. (21, s. 202).

Lämpöä voi siirtyä johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä. Lauhduksessa tapahtuu pääasiassa johtumista lämmönsiirtimen kiinteän väliaineen läpi ja konvektiota jäähtyvistä fluidista kiinteän väliaineen pintaan ja väliaineen pinnasta lämpenevään fluidiin. Johtumalla siirtyvän lämpövirran suuruus riippuu lämmönsiirtopinta-alasta, seinämän pintojen lämpötilaerosta, väliaineen lämmönjohtavuudesta ja fluidien välillä olevan aineen paksuudesta. Konvektio eli kulkeutuminen taas on riippuvainen lämmönsiirtopinta-alan lisäksi fluidin ja kiinteän pinnan lämpötilaerosta ja konvektiivisesta lämmönsiirtokerroimesta. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin taas määräytyy muun muassa fluidin ominaisuuksien, virtausnopeuden, seinämän pinnankarheuden ja paineen perusteella. Esimerkiksi suuremmalla virtausnopeudella konvektiota tapahtuu enemmän, mutta toisaalta taas virtausnopeuden nostaminen kasvattaa painehäviötä putkessa. Säteilylämmönsiirron merkitys on riippuvainen voimakkaasti lämpötilasta ja mikro-CHP-laitoksessa sillä on merkitystä lähinnä kattilan tulipesässä ja mahdollisissa säteilytulistimissa. Lämmönläpäisykerroin k kertoo lämmönsiirtimen kyvystä siirtää lämpöä fluidien välillä ja ottaa huomioon edellä mainitut lämmönsiirtymisen tavat. Lämmönläpäisykerroin voidaan laskea kaavalla 15. (21, s. 204–208.)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{k1} + \alpha_s} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{k2}}}$$

KAAVA 15

missä $\alpha_{k1} + \alpha_s$ = jäähtyvän puolen konvektiivisen ja säteilylämmönsiirtokerroimen summa
[W/m²K]

s = lämmönsiirtimen seinämän paksuus [m]

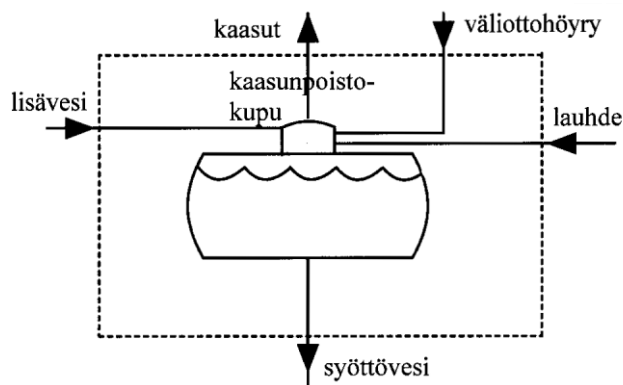
λ = lämmönsiirtimen materiaalin lämmönjohtavuus [W/mK]

α_{k2} = lämpenevän puolen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m²K]

Lauhduttimessa lämmenteellä vesivirralla lämmitetään energiavaraajassa olevaa vettä, johon varastoituvaa lämpöä käytetään lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Energiavaraajan käyttö pientalon lämmitysjärjestelmässä mahdollistaa sen, että mikro-CHP-laitoksella voidaan ajaa täydellä teholla tietyn mittainen ajanjakso, mikä parantaa laitoksen hyötysuhdetta, vähentää päästöjä ja laitoksen käynnistyksiä, kun laitosta ei tarvitse ajaa suoraan sen hetkisen lämmitystarpeen mukaan. Energiavaraajan koon mitoittamiseen vaikuttaa muun muassa pientalon lämmitystehontarve, lämpimän käyttöveden kulutus ja lämmönlähteen teho. (41, s. 5.)

3.7 Syöttövesisäiliö ja -pumppu

Syöttövesisäiliön tehtävä mikro-CHP-laitoksessa on varastoida lauhduttimelta tuleva lauhde ennen pumppaamista kattilaan. Syöttövesisäiliö voidaan varustaa kaasunpoistokuvulla (kuva 20), jonka avulla kiertovettä puhdistetaan siihen liuenneista korroosiota aiheuttavista aineista, mutta tämä vaatii veden lämmittämisen kylläiseen tilaan, jotta kaasujen liukoisuus pienenee nolliin. Kaasunpoistokuvun kautta järjestelmään voidaan syöttää myös lisävettä. (38, s. 23.)



KUVA 20. Virtaukset syöttövesisäiliöstä sisään ja ulos (38, s. 23).

Syöttövesipumpun valintaan vesihöyrykierrossa vaikuttaa systeemin tarvitsema paine-ero eli pumpun nostokorkeus ja pumpattavan veden määrä. Näiden tietojen ja laitevalmistajien pumppujen ominaiskäyrästä perusteella valitaan järjestelmään sopiva pumppu. Nostokorkeus tarkoittaa paine-eroa muutettuna vesipatsaan korkeudeksi, jonka vastaava paine luo. Tarvittava paine-ero voidaan määrittellä nostokorkeuden avulla seuraavalla sivulla olevan kaavan 16 mukaisesti, jossa nostokorkeus H on imu- ja painesäiliön nestepintojen välinen korkeusero (kuva 21). Höyrykattilan

tapauksessa kyseessä on syöttövesisäiliön ja kattilan lieriön vedenpintojen korkeuksien erotus.
(21, s. 221.)

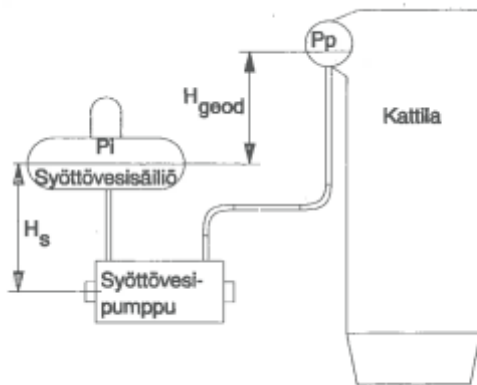
$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H$$

KAAVA 16

missä Δp = paine-ero [Pa]

ρ = fluidin keskimääräinen tiheys [kg/m³]

H = nostokorkeus [m]



KUVA 21. Veden paineistus syöttövesisäiliöstä höyrykattilaan (21, s. 221).

Pumpun nostokorkeuteen vaikuttavat tekijät on otettu huomioon kaavassa 17, jossa virtausvastukset H_i imupuolen ja H_p painepuolen putkistossa saadaan kaavalla 18 (21, s. 222).

$$H = H_{geod} + \frac{p_p - p_i}{\rho \cdot g} + \frac{v_p^2 - v_i^2}{2g} + H_p + H_i,$$

KAAVA 17

missä H_{geod} = imu- ja painepuolien nestepintojen korkeusero [m]

p_p = painepuolen säiliön paine [Pa]

p_i = imupuolen säiliön paine [Pa]

v_p = virtausnopeus painepuolen säiliössä [m/s]

v_i = virtausnopeus imupuolen säiliössä [m/s]

$$H_{i/p} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{1}{2g} w^2,$$

KAAVA 18

missä, λ = kitkakerroin

l = putken pituus [m]

d = halkaisija [m]

$\sum \xi$ = kertavastusten summa

w = veden nopeus [m/s]

Pumppua voidaan säätää kuristussäädöllä tai pyörimisnopeuden säädöllä, jolloin voidaan muuttaa tuotettua painetta ja tilavuusvirtaa. Näistä kuristussäätö on investoinniltaan halvempi kuin pyörimisnopeudensäätö, mutta toisaalta käyttökustannuksiltaan kalliimpi tapa. Paineputken säätöventtiiliä kuristamalla voidaan lisätä pumpun nostokorkeutta samalla tilavuusvirtaa pienentäen. Tämä kuitenkin virtausnopeuden suurentuessa kuluttaa venttiiliä enemmän eikä kuristaminen ole taloudellista siihen käytetyn energian muuttuessa lämmöksi. Pumpun imupuolta ei voida kuristaa, sillä pumppu saattaa alkaa kavitoida, jos tulopaine tippuu liian alas. Pumpun pyörimisnopeutta muuttamalla esimerkiksi hydraulisella kytkimellä tai sähköisillä säätölaitteilla saadaan tilavuusvirtaa, nostokorkeutta ja pumpun vaatimaa tehoa muutettua kaavojen 19, 20 ja 21 mukaisesti. Näitä kutsutaan affiniteettisäännöiksi, joiden perusteella pumpun kierroslukua vastaava toimintapiste saadaan selvitettyä. Monesti kuristussäädöllä toimintapiste on huonomman hyötysuhteen alueella kuin pyörimisnopeutta säätämällä. (21, s. 223–224.)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{KAAVA 19}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \text{KAAVA 20}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad \text{KAAVA 21}$$

joissa n = pyörimisnopeus [1/s]

Q = tilavuusvirta [m^3/s]

H = nostokorkeus [m]

P = pumppauksen vaatima teho [kW]

Standardi SFS-EN 12952-5 määrää, että syöttövesipumpun tulee pystyä syöttämään höyrykattilaan vettä 1,1 kertaa suurimman sallitun paineen verran ottaen huomioon korkeuserosta johtuva painehäviö ja kattilan dynaamiset painehäviöt. Alempaa kerrointa voidaan käyttää laskennassa, jos suurimman sallitun paineen ylittyessä paineenpurkauslaitteet pystyvät suurimmalla jatkuvalla teholla purkamaan höyryä niin, ettei paine nouse enempää kuin 10 % yli suurimmasta sallitusta pai-

neesta. Laitteiston hälytysjärjestelmään on myös ohjelmoitava hälytys, joka laukeaa syöttövesipumpun vikaantuessa. (27, s. 24.) Syöttövesipumppu sisältää monesti kierrätysventtiilin, jolla varmistetaan minimivirtaus pumpun läpi ja ehkäistään pumpun ylikuumentuminen (28, s. 129).

3.8 Putkisto ja putkivarusteet

Tilavuusvirta q_v putkessa voidaan määrittellä halutun virtausnopeuden v ja putken virtauspoikkipinta-alan A avulla ja toisaalta se voidaan kirjoittaa massavirran q_v ja fluidin tiheyden ρ kautta kaavan 22 merkintöjen mukaan (42, s. 99). Tästä saadaan johdettua kaava 23 pyöreän putken sisähalkaisijan d_s laskemiseksi.

$$q_v = vA = \frac{q_v}{\rho} \quad \text{KAAVA 22}$$

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot \rho \cdot v}} \quad \text{KAAVA 23}$$

Nesteillä virtausnopeuden optimaalinen arvo on riippuvainen viskositeetista ja matalammilla viskositeeteilla voidaan käyttää suurempaa nopeutta. Kaasuilla ja höyryillä optimaalinen nopeus nousee paineen noustessa. Karkeasti voidaan arvioida, että kaasuilla ja höyryillä on kymmenkertainen nopeus verrattuna nesteeseen. Putkiston mitoituksessa tulee ottaa huomioon myös painehäviö, koska esimerkiksi paine ja lämpötila ovat toisistaan riippuvia, joten esimerkiksi kattilasta lähtevän putken painehäviö ei saa olla liian suuri, ettei höyry ala lauhtua putkessa. Painehäviön laskemista käsiteltiin luvussa 4.6, jossa todettiin myös painehäviön merkitys pumppujen mitoituksessa. Putkistomateriaalien valintaan vaikuttava tärkein ympäristötekijä on lämpötila ja materiaali on valittava niin, että se kestää kaikki putkiston käytönaikaiset olosuhteet. Korroosio-ongelmien ehkäisemiseksi tulee ottaa huomioon putkistossa virtaavan fluidin ominaisuudet. (43, s. 29, 45.)

Voimalaitoksen putkiston varusteisiin kuuluvat erilaiset venttiilit, jotka voidaan jakaa sulk-, säätö- ja varoventtiileihin. Sulkuventtiilien tarkoitus on sulkea tai avata virtaus ja ne voivat olla käsikäyttöisiä tai toimilaitteella ohjattuja. Säätöventtiileillä säädetään jotakin suuretta jatkuvasti säätöpiirin ohjearvon mukaan ja niitä käytetään toimilaitteen avulla. Varoventtiileillä taas ehkäistään paineen nousemista järjestelmässä sallittua korkeammalle. Sulku- ja säätöventtiilien toimilaitteet ovat hydraulisia, pneumaattisia tai sähkötoimisia. (28, s. 119.)

Venttiilien valintaa rajaa sovelluksen vaatimat olosuhteet, kuten paine, lämpötila-alue, liitäntäpin-
nat, tiiviysvaatimus ja materiaali. Näiden seikkojen lisäksi huomioon tulee ottaa myös venttiilin ai-
heuttama paine-ero sulku- ja säätötilanteissa. Säätöventtiilien tarkkuuden varmistamiseksi ne tulee
mitoittaa huolellisesti. Mitoitukseen vaikuttaa muun muassa tilavuusvirta, virtausnopeus ja kavitaatio.
Mitoituksen jälkeen tulee venttiilille valita toimilaitte, joka kykenee säätämään venttiiliä luotetta-
vasti ja tarkasti. Sulkuventtiilien tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä tiiviys ja käytettävyys. Useiden
venttiilien ja toimilaitteiden valmistajien sivuilta löytyy laskureita niiden valintaan. (28, s. 127.)

Sähkötoimilaitteen voima tuotetaan sähkömoottorilla, joka siirretään vaihteen avulla venttiilin liik-
keeksi. Ne toimivat yleensä vaihtojännitteellä, mutta myös tasajännitteellisiä toimilaitteita on mark-
kinoilla. Sähkötoimilaitteet ovat tarkkoja, mutta hitaita ja kalliita, ja niiden käyttöikä on yleensä ly-
hempi kuin hydraulisten tai pneumaattisten toimilaitteiden. (28, s. 126.)

3.9 Säätö ja ohjaus

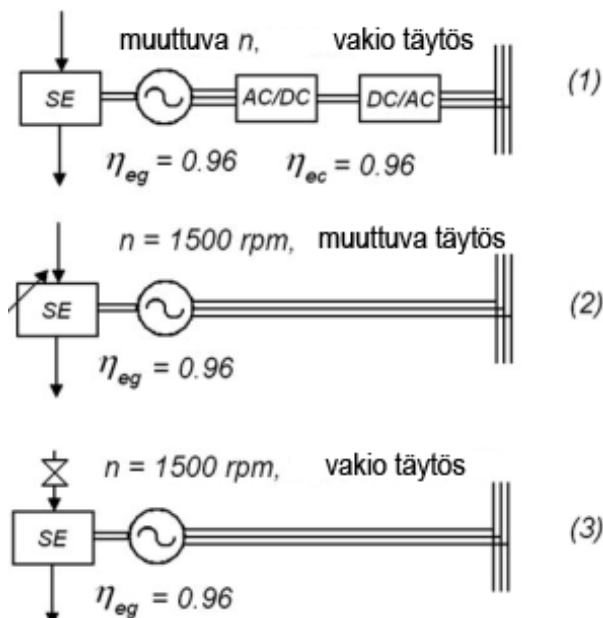
Mikro-CHP-laitoksen säätöä ja ohjausta varten on tarpeellista saada mittaustietoa eri osista pro-
sessia. Tärkeimpiä mittauksia ovat virtaus-, lämpötila- ja painemittaukset. Mittausten ja säädön
kautta tavoitteena on taata mahdollisimman turvallinen, hyvin toimiva ja taloudellinen laitoksen
käyttö, mutta myös viranomaismääräykset asettavat vaatimuksia mittauksille, kuten aiemmissa lu-
vuissa on todettu. (44, s. 84.) Tämän kokoluokan mikro-CHP-laitoksen vesimäärä on suhteellisen
pieni, joten se on dynamiikaltaan hyvin nopea. Tämän takia laitoksen säätöjärjestelmän tulee olla
nopea ja reagoida mahdollisiin häiriötilanteisiin nopeasti, ettei vaaratilanteita pääse syntymään.

Höyrykattilan tarkoitus on tuottaa höyryä, jolla saadaan tuotettua höyrykoneessa sähköä ja lauh-
duttimen kautta lämpöä tässä tapauksessa pientalolle. Kattilan höyryntuotantoon vaikuttaa useita
asioita, jotka tulee ottaa huomioon laitoksen säätöjärjestelmää suunniteltaessa. Laadultaan epäta-
saista polttoainetta käytettäessä tulee laadun vaihtelu ottaa huomioon polttoaineen syöttöjärjestel-
mässä, jotta mahdollisimman tasainen veteen ja vesihöyryyn siirtyvä lämpöteho saadaan ai-
kaiseksi. Säätöjärjestelmän tavoite on ajaa laitosta aina optimaalisimmassa toimintapisteessä. Ta-
vanomaisissa säätöratkaisuissa asetetaan prosessimuuttujille tietyt arvot, joissa säätöjärjestelmä
ne pyrkii pitämään. Edistyneissä säätöratkaisuissa, kuten esimerkiksi malliprediktivisessä sää-
dössä (MPC = model predictive control) voi käyttää reaaliaikaista optimointia, jonka tarkoitus on

minimoida haluttu kustannusfunktio. Kustannusfunktio voi sisältää eri painotuksilla useita säätöta-voitteita, kuten erilaisia raja-arvoja, joita esimerkiksi turvallisuus voi asettaa. (10, s. 161.)

Prosessin dynamiikan ymmärtäminen ja mallintaminen auttavat säädön rakentamisessa ja proses- sin konfiguroinnissa. Nykyaikaisessa biomassaa polttavassa laitoksessa on yleensä säätöpiirit te- holle, palamiselle, tulipesän lämpötilalle ja tulipesän paineelle. Kehittyneillä säätöjärjestelmillä, ku- ten mallipohjaisella ja malliprediktiivisellä säätöjärjestelmällä voidaan hyödyntää tietoa prosessin dynaamisesta käyttäytymisestä. Malliprediktiivinen säätö on ideaalinen säätötapa voimalaitoksille ja muille monimuuttujajärjestelmille, joissa yksi muuttuja vaikuttaa useampaan toiseen muuttujaan yhtäaikaisesti. Tämä säätöstrategia pystyy mukautumaan hyvin muuttuviin tilanteisiin. Mallipohjai- sen säädön ja säätimien suunnittelussa käytetään hyväksi tietoa prosessin käyttäytymisestä ja näi- den perusteella voidaan simuloida erilaisten säätöstrategioiden ja -parametrien toimintaa. (10, s. 163–165.)

Mikro-CHP-laitoksen tehonsäätö voidaan tehdä säätämällä kattilan tehoa, ja höyrykoneelle mene- vän höyryn lämpötilaa ja painetta voidaan säädellä syöttövesivirtausta säätämällä. Höyrykoneen tehon säätämiseen voidaan käyttää alla olevan kuvan 22 mukaisia keinoja. Lähteen tutkimuksessa tarkastellaan noin 25 kW sähkötehon höyrykoneella varustettua mikro-CHP-laitosta. (20, s. 1321.)



KUVA 22. Höyrykoneen tehonsäätö (muokattu 20 s. 1322)

Vaihtoehdossa 1 höyrykoneen pyörimisnopeutta muutetaan ja täytösmäärä pidetään vakiona kamppiakselin mukaan liikkuvalla lautasventtiilillä. Höyrykoneen pyörimisnopeutta säädellään tehoelektroniikkayksikön avulla niin, että kaikki höyrykoneeseen tuleva höyry paisuu. Vaihtoehdossa 2 koneen pyörimisnopeus pidetään vakiona ja täytösmäärää säädetään niin sanotulla muuttuvalla tuloventtiilin ajoituksella (VVT = Variable Valve Timing), jolloin venttiilin ajoitusta ja nostoa säädetään. Vaihtoehdossa 3 höyrykoneelle tulevan höyryn painetta säädetään erillisellä säätöventtiilillä, jolloin höyrykoneetta voidaan ajaa vakiotäytöksellä ja -nopeudella, mutta tämä huonontaa samalla laitoksen kokonaishyötysuhdetta. Tutkimuksessa sanotaan vaihtoehdon 2 olevan paras säätötapa koko säätöalueella hyötysuhteen kannalta, mutta vaihtoehto 1 on kehittyneen tehoelektronikan ansiosta varteenotettava vaihtoehto yksinkertaisuudessaan. (2, s. 1321–1323.)

3.10 Laitoksen suunnittelu

Mikro-CHP-laitoksen suunnittelussa pientalon energiantuotantoon voidaan lähtökohdaksi ottaa, että laitoksella katetaan

- kokonaan rakennuksen lämmön- ja sähköntarpeet
- kokonaan rakennuksen lämmöntarve ja osa sähköntarpeesta
- kokonaan rakennuksen sähköntarve ja osa lämmöntarpeesta
- osa sekä rakennuksen lämmön- ja sähköntarpeesta (13, s. 2).

Kun halutaan kattaa koko rakennuksen energiantarve, on lämmön- ja sähköntuotannon vastattava kulutusta, koska lämmöntarpeen ollessa pienempi kuin lämmöntuotanto, joudutaan laitosta ajamaan osateholla, sulkemaan laitos tai siirtämään ylimääräinen lämpö höyrystä joko hukkaan tai varastoimaan se esimerkiksi vesivaraajaan (13, s. 3). Vaikka järjestelmässä käytettäisiin vesivaraajaa lämmönvarastointiin, voi tulla tilanne, jossa varaajaan ei voida enää ladata energiaa. Näin ollen mikro-CHP-laitoksen höyryn lauhdutus ei onnistu, jolloin tarvittaisiin esimerkiksi ulkoilmaa hyödyntävä jäähdytysjärjestelmä. Tästä syystä ilman jäähdytysjärjestelmää tällainen laitos ei pystyisikään esimerkiksi kesäaikaan kattamaan yksinään koko rakennuksen sähköntarvetta, jolloin taas ongelmaksi muodostuu alhainen sähköntuotannon hyötysuhde höyrykoneen ollessa lämpövoimakoneena järjestelmässä. Kun lämpöäkin ei voida kesällä ottaa talteen, on mikro-CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde alhainen. Tällöin voisi olla järkevämpää käyttää mikro-CHP-laitoksen rinnalla sähköntuotantoon aurinkopaneeleja tai pientuulivoimaa. Hybridijärjestelmiä käsitellään aurinkopaneelien osalta luvussa 4.11.

Tilanteessa, jossa mikro-CHP-laitoksen sähköntuotanto ylittää kiinteistön sähköntarpeen, voidaan ylimääräinen sähkö syöttää verkkoon, mikäli energiantuotanto järjestelmä on kytketty verkkoon, tai vaihtoehtoisesti varastoida akkuun tai kondensaattoriin. Järjestelmän kannattavuus riippuu hinnan lisäksi huoltokustannuksista, polttoaineen hinnasta ja ostosähkön hinnasta. Korkean investointikustannuksen takia mikro-CHP-järjestelmä tulee mitoittaa tarkasti kohteeseen sopivaksi ottaen huomioon itse laitteiston lisäksi lämmönvarastointijärjestelmä ja älykäs säätöjärjestelmän, joka osaa ennustaa lämmöntarvetta ja näin ohjata koko järjestelmää optimaalisesti. (13, s. 3)

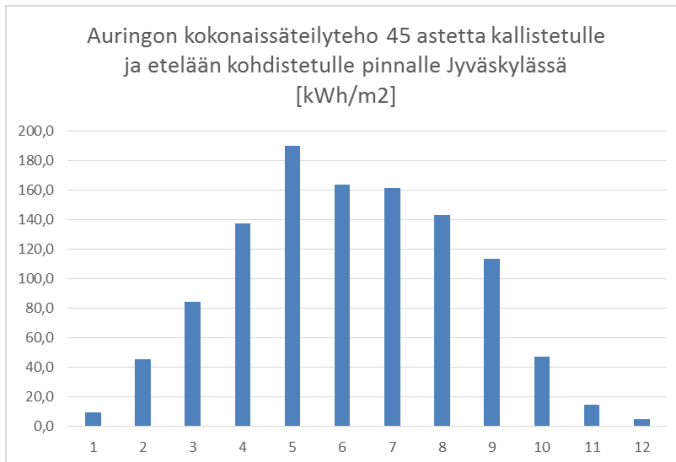
Säätöjärjestelmä voidaan rakentaa ottamaan huomioon sääennusteet ja ajamaan laitosta tarvittaessa ennakoivasti, esimerkiksi, jos tulossa on pidemmän aikaa kestävä kovat pakkaset. Ilmatieteenlaitoksen mukaan lämpötilaa voidaan ennustaa 4–7 vuorokauden ajalle suhteellisen tarkasti, mutta ennusteisiin liittyy aina epävarmuutta (45). Sääennusteet toteutuvat kahden vuorokauden päähän noin 85 %:n todennäköisyydellä ja vuorokauden päähän 90 %:n todennäköisyydellä (46). Tämän perusteella voidaan jo järkevästi mitoitettua pientalon lämpö- ja sähkövarastot täyttää ennakoivasti.

3.11 Hybridijärjestelmä - aurinkopaneelit mikro-CHP-laitoksen rinnalla

Mikro-CHP-laitoksen rinnalla sähköntuotannossa on mahdollista käyttää aurinkopaneeleja, kuten edellisessä luvussa mainittiin. Tällöin esimerkiksi aurinkoisina kevät- ja kesäpäivinä voitaisiin korvata mikro-CHP-laitoksen sähköntuotantoa ja vähentää näin energiantuotannossa syntyvää hukkalämmön määrää ja säästää polttoainekustannuksissa.

Auringon kokonaissäteily määrään lasketaan suoraan auringosta tulevan säteilyn lisäksi hajasäteily, joka heijastuu ilmakehästä, pilvistä ja maasta. Aurinkopaneelien kannalta vain kokonaissäteily määrä on merkitsevää, mutta Suomessa merkittävän hajasäteilyn osuuden vuoksi aurinkoa seuraavat ja keskittävät aurinkosähköjärjestelmät eivät ole järkeviä investointeja, koska niillä pyritään hyödyntämään suoraa säteilyä. Aurinkopaneelien asennuskulmalla ja sijoittelulla voidaan vaikuttaa paneelien sähköntuotantoon. Suomessa auringon säteily määrä vaihtelee paljon vuodenaikojen mukaan, kuten kuvasta 23 nähdään. (47.) Kuvan 23 data on Ilmatieteenlaitoksen energialaskennan testivuoden mukaiset vaakatasolle tulevan auringon kokonaissäteilyenergian määrien

kuukausikohtaiset arvot Jyväskylässä kerrottuna muunnoskerroimilla, joilla saadaan kokonaissäteilyenergian määrä etelään päin kohdistetulle ja 45 astetta kallistetulle pinnalle.



KUVA 23. Auringon kokonaissäteilyteho 45 astetta kallistetulle ja etelään päin kohdistetulle pinnalle Jyväskylässä (48)

Aurinkopaneelien sarjaan- ja rinnankytkennällä saadaan halutun suuruinen jännite ja virta aikaiseksi. Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joka voidaan syöttää hybridijärjestelmässä lataussäätimen kautta sähkövarastona oleviin akkuihin, joista se muutetaan invertterin eli vaihtosuuntaajan avulla vaihtovirraksi. (49.) Lataussäätimenä voi käyttää esimerkiksi MPPT-säädintä (Maximum Power Point Tracking), joka pitää aurinkopaneelien ulostulojännitteen maksimitehopisteessä, jolloin hyötysuhde pysyy korkeana (50). Aurinkokennoissa, joista aurinkopaneeli koostuu, auringon säteilyenergia muuttuu suoraan sähköenergiaksi. Aurinkopaneelin sähköteho saadaan laskettua Joulen lain avulla (kaava 24), kun tiedetään paneelissa syntynyt jännite U ja virta I (51, s. 209.)

$$P = U \cdot I$$

KAAVA 24

Toisaalta aurinkopaneelin nimellisteho P voidaan laskea kaavalla 25 (51, s. 210.)

$$P_{nim} = \eta \cdot G \cdot A$$

KAAVA 25

missä η = paneelien hyötysuhde [%]

G = auringon säteilyteho pinta-alan yksikköä kohti [W/m^2]

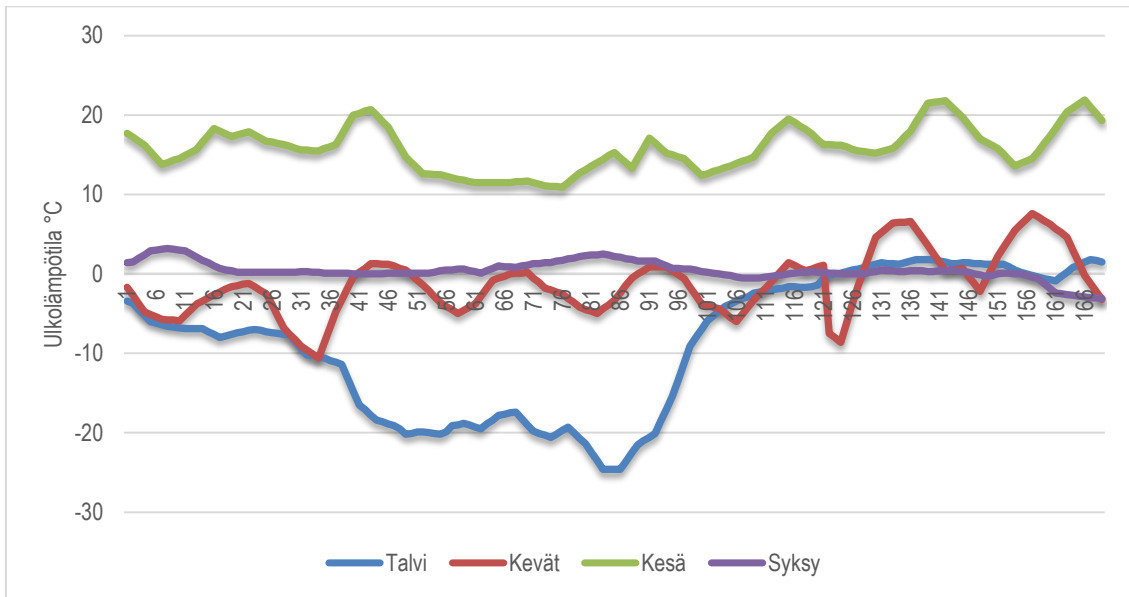
A = paneelien pinta-ala [m^2]

4 MIKRO-CHP-LAITOKSEN LASKENNALLINEN TARKASTELU JA TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään laskennallista tarkastelua, joka tehtiin osana opinnäytetyötä. Kohteena on noin 20 kW lämpöä ja 3 kW sähköä tuottava mikro-CHP-laitos, jota käytetään 180 m²:n pientalon energiantuotannossa. Tämän lisäksi arvioidaan valituilla lähtötiedoilla varustetun laitoksen käyntiaikoja. Varsinainen laskenta suoritettiin käyttäen Excel-taulukkolaskentaohjelmistoa ja teoriaa, jota on esitelty aiemmissa luvuissa tai käydään läpi tässä luvussa. Laskurilla voi myös arvioida, kuinka paljon aurinkopaneelien avulla voidaan vähentää mikro-CHP-laitoksen käyntiaikaa lämpimillä keleillä ja näin vähentää myös hukkalämmön tuotantoa.

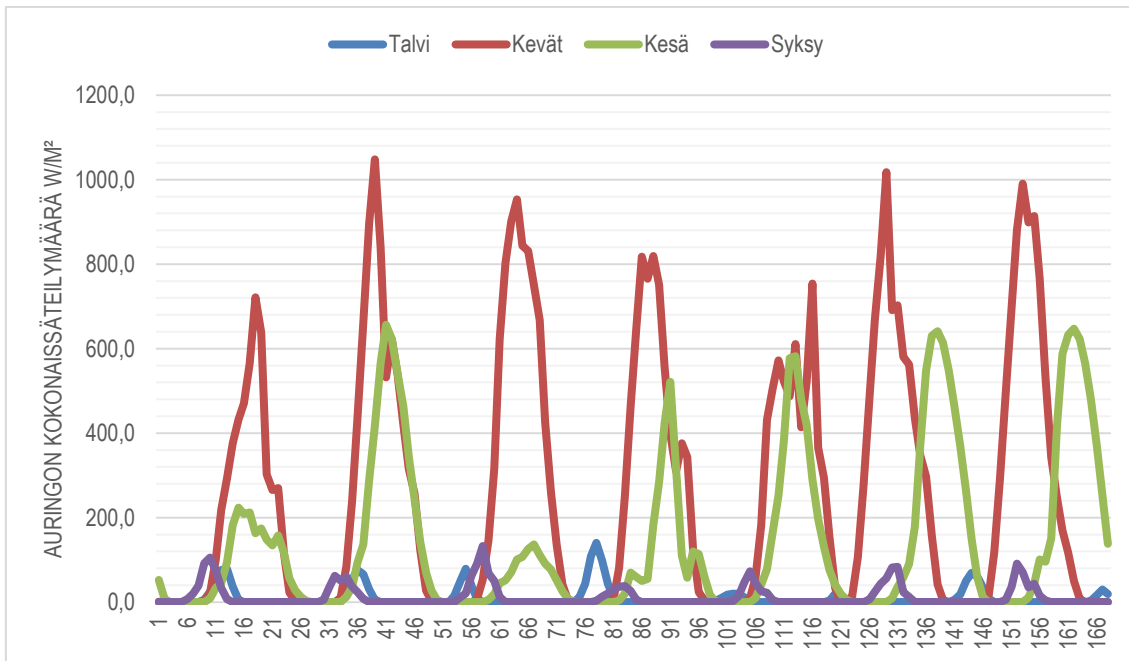
Rakennuksen lämmöntarpeen arvioinnissa käytettiin hyväksi tuntikohtaista aineistoa ulkolämpötilojen osalta Ilmatieteenlaitoksen energialaskennan nykyilmaston testivuotta (TRY2012) lämpötilavyöhykkeeltä III eli tietoja Jyväskylän lentoaseman mittapisteestä mitoitussulkolämpötilan ollessa -32 °C ja halutun sisälämpötilan +21 °C. Laskennassa ei oteta huomioon ylimääräistä lämpökuormaa tai jäädytysenergiatarvetta, joita lämpimillä keleillä voi olla. Aineistosta hyödynnettiin myös tuntikohtaiset tiedot auringon kokonaissäteilystä vaakapinnalle aurinkopaneelien sähköntuotannon arvioimiseksi. Nämä kokonaissäteilymäärät on kerrottu lämpötilavyöhykkeen III muunnoskertoimella, jolla vaakapinnalle tuleva säteily muunnetaan 45 astetta kallistetulle pinnalle tulevaksi säteilyksi, kun paneelit on suunnattu etelään päin. (49.)

Valittujen testiviikkojen aikana ulkolämpötilat ovat kuvan 24 mukaiset.



KUVA 24. Ulkolämpötilat testiviikkojen aikana (data 49)

Vastaavasti kuvasta 25 nähdään auringon kokonaissäteily määrä testiviikkojen aikana. Valituilta testiviikoilta keväällä auringon säteily määrät ovat suurimmillaan, mutta säteily määrä on merkittävä myös kesällä.



KUVA 25. Auringon kokonaissäteily määrä testiviikkojen aikana (data 49)

Laskurilla voi tarkastella viikon mittaisia testijaksoja, joille haetaan valinnan mukaan tuntikohtaiset arvot ulkolämpötilalle ja kokonaissäteilymäärälle taulukkoon Ilmatieteenlaitoksen TRY2012-datasta. Testiviikoksi voi valita talven, kevään, kesän tai syksyn. Esimerkkilaskussa rakennuksen lämmön huipputehontarpeeksi on määritelty 10 kW, jolloin kaavalla 12 saadaan laskettua kuinka suuri lämpöhäviö rakennuksen rakenteiden läpi keskimäärin kulkee, kun sisä- ja ulkolämpötilojen erotus on yhden yksikön suuruinen. Merkitään lämmönläpäisykerrointa nyt U :lla.

$$U \cdot A = \frac{\Phi}{\Delta T} = \frac{10 \text{ kW}}{21 \text{ }^\circ\text{C} - (-32 \text{ }^\circ\text{C})} = 0,19 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

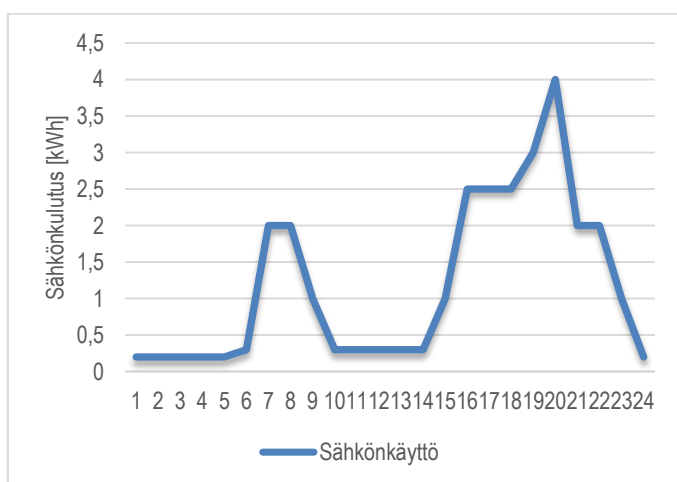
Tämän arvon perusteella on laskettu kiinteistön lämmitystehon tarve eri ulkolämpötiloilla välillä -32 – 21 °C:n kymmenesosan välein, mutta laskennassa on arvioitu, ettei lämmöntarvetta ole ulkolämpötilan ylittäessä 17 °C. Lämpimän käyttöveden kulutus aiheuttaa todellisuudessa piikkejä lämmöntarpeeseen, mutta sitä ei ole eritelty tässä arviossa.

Motivan tutkimusraportin Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 mukaan korkeasti varustellun, pinta-alaltaan 180 m^2 :n ja neljän asukkaan omakotitalon keskimääräinen sähkönkulutus vuonna 2011 oli $10\,350 \text{ kWh}$:a jakautuen taulukon 2 mukaisesti eri sähkön käyttökohteiden kesken (52, s. 44). Tässä tapauksessa tutkimusraportissa oleva lattialämmityksen osuus (650 kWh) jätetään pois laskuista, koska kaikki lämpö tuotetaan mikro-CHP-laitoksen avulla.

TAULUKKO 2. Neljän asukkaan korkeasti varustellun omakotitalon (180 m²) keskimääräinen sähkönkulutus vuonna 2011 (52, s. 44)

Käyttökohde	Kulutus vuodessa [kWh]
Kylmälaitteet	1200
Valaistus	1500
LVI-laitteet	1600
Auton lämmitys	1000
Ruoan valmistus ja asti- apesu	700
Muu	1000
Sähkökuuas	1000
Pyykinpesu ja -kuivaus	700
Kodin elektroniikka	1650
YHTEENSÄ	10350

Laskennassa arvioitiin, että sähköenergian kulutus jakautuu tasaisesti vuoden jokaiselle päivälle, jolloin päiväkohtaiseksi kulutukseksi saadaan $\frac{10350 \text{ kWh}}{365} = 28,4 \text{ kWh}$. Päiväkohtainen kulutus jaettiin edelleen tunti-kohtaiseksi kuvan 26 mukaan. Laskennassa käytettiin samaa sähkönkulutusprofiilia kaikille päiville, mutta todellisuudessa sähkönkulutusprofiili on riippuvainen esimerkiksi kiinteistön asukkaista ja viikonloppuisin sähköä kulutetaan yleensä enemmän kuin arkena. Tämän lisäksi auton lämmityksestä aiheutuva kulutus painottuu talvikaudelle.



KUVA 26. Kiinteistön tuntikohtainen sähkönkulutus päivän aikana.

Seuraavaksi laskurin käyttäjä voi valita sähkön- ja lämmönvarastojen eli akuston ja vesivaraajan varastointikapasiteetin. Esimerkissä valittiin akuston kapasiteetiksi 20 kWh ja vesivaraajan kooksi 2 m³, joka tarkoittaa lämmönluovutuskapasiteetiltaan noin 116,2 kWh, kun veden lämpötilan muutos on varaajassa 50 °C. 20 kWh:n akusto maksaa keskimäärin yli 5 000 €, joten kapasiteetin tuomia hyötyjä tulee tarkastella tarkkaan. Kapasiteettien määrittämisen jälkeen laskuriin määritellään energiavarastojen osalta rajat, joiden mukaan laitos käynnistyy tai sammuu. Rajat määritellään niin, etteivät energiavarastot mene negatiivisen puolelle missään tilanteessa tai maksimikapasiteetti ylity. Esimerkkilaskussa on käytössä alla olevat rajat.

- Alarajat: lämmölle 10 kWh - sähkölle 6,3 kWh
- Ylärajat: lämmölle 106 kWh - 18,4 kWh

Seuraavaksi käyttäjä voi valita onko järjestelmässä käytössä aurinkopaneeleja ja mikä on paneelien pinta-alan ja hyötysuhde. Näillä ja tuntikohtaisilla auringon kokonaissäteily määrän tiedoilla saadaan laskettua aurinkopaneelien tuotanto. Esimerkissä valittiin aurinkopaneelien pinta-alaksi 10 m² ja hyötysuhteeksi 15 %, jolloin aurinkopaneelien tuotannoksi saadaan eri laskettua testiviikkojen aikana taulukon 3 mukaiset energiantuotot kaavalla 25.

TAULUKKO 3. Aurinkopaneelien laskennalliset energiantuotannot testiviikkojen aikana

	Talvi (tammikuu)	Kevät (maaliskuu)	Kesä (heinäkuu)	Syysy (lokakuu)
Energiantuotto [kWh]	2,4	70,6	36,2	3,2

Kattilan polttoaineteho saadaan laskettua kaavalla 26 kattilatehon $\Phi_{kattila}$ ja kattilan hyötysuhteen $\eta_{kattila}$ avulla.

$$\Phi_{pa} = \frac{\Phi_{kattila}}{\eta_{kattila}}$$

KAAVA 26

Nyt kattila tehoksi valitaan 25 kW:a, jolloin 80 %:n hyötysuhteella polttoainetehoksi saadaan

$$\Phi_{pa} = \frac{25 \text{ kW}}{0,8} \approx 31,3 \text{ kW}.$$

Kuten aiemmin on todettu, monivaiheisen mäntähöyrykoneen sähköntuotannon hyötysuhde on noin 8–14 %. Laskentaan valittiin 10 % sähköntuotannon hyötysuhde, jonka kautta päästään laskemaan mikro-CHP-laitoksen höyrykoneen sähkönteho kaavan 1 avulla, kun tiedetään kattilan polttoainetehto.

$$P_e = \eta_e \cdot \Phi_{pa} = 0,10 \cdot 31,3 \text{ kW} \approx 3,1 \text{ kW}$$

Kun tiedetään höyrykoneen sähköteho, saadaan höyrykoneen höyrystä ottama lämpöteho laskettua kaavalla 27 arvioimalla generaattorin hyötysuhde η_g ja höyrykoneen mekaaninen hyötysuhde η_m .

$$\Phi_{\text{höyrykone}} = \frac{P_e}{\eta_g \cdot \eta_m} \quad \text{KAAVA 27}$$

Laskennassa valittiin generaattorin hyötysuhteeksi 95 % ja höyrykoneen mekaaniseksi hyötysuhteeksi 80 %, jolloin höyrystä otettu lämpöteho on

$$\Phi_{\text{höyrykone}} = \frac{3,1 \text{ kW}}{0,95 \cdot 0,80} \approx 4,1 \text{ kW}.$$

Olettamalla pumpun vaikutuksen järjestelmän syöttöveden ominaisentalpiaan olemattomaksi, saadaan lauhduttimen jäähdytysteho laskettua kaavalla 28.

$$\Phi_{\text{lauhduutin}} = \Phi_{\text{kattila}} - \Phi_{\text{höyrykone}} = 25 \text{ kW} - 4,1 \text{ kW} = 20,9 \text{ kW} \quad \text{KAAVA 28}$$

Laskennan alussa energiavarastojen oletettiin olevan täynnä. Näistä arvoista laskuri lähtee vähentämään kulutuksen mukaiset arvot tuntikohtaisesti. Toisen määritellyn energiavaraston alarajan tullessa vastaan laitos käynnistyy ja täyttää varastot niin, etteivät kumpikaan mene kapasiteetistaan yli. Laitoksen käynnistyessä ensimmäisen tunnin aikana tuotannon on arvioitu olevan aina 75 % maksimista, koska käynnistymisessä kestää jonkin aikaa.

Laitoksen käyntiajoiksi saatiin eri testiviikkojen aikana taulukon 4 mukaiset arvot aurinkopaneelien kanssa ja ilman.

TAULUKKO 4. Mikro-CHP-laitoksen käyntiajat testiviikkojen aikana aurinkopaneelien kanssa ja ilman

Vuodenaika \ Käyntiaika	Ilman aurinkopaneeleja [h]	Aurinkopaneelilla [h]	Ero [h]	Ero [%]
Talvi	65	64	-1	-0,8
Kevät	67	41	-26	-20,3
Kesä	67	56	-11	-8,6
Syksy	67	66	-1	-0,8

Taulukosta nähdään, että keväällä ja kesällä saadaan vähennettyä eniten laitoksen käyttöaika aurinkopaneelien avulla, mikä oli jo ennestään tiedossa. Seuraavaksi on laskettu, kuinka paljon laitoksen käyntiajan pieneneminen vaikuttaa polttoainekuluihin, jotta voidaan arvioida onko aurinkopaneelien lisääminen järjestelmään kannattavaa.

Laitoksen tunnissa kuluttama polttoainemäärä saadaan laskettua polttoainetehon ja polttoaineen lämpöarvon kautta. Lämpöarvona laskennassa on käytetty hakkeelle 7 MJ/kg, joka on keskimääräinen tehollinen lämpöarvo saapumistilassa eli kun sen kosteus on 50–60 %. Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo hakkeelle on 18,5–20 MJ/kg (53). Laitoksen käyttämä polttoainemäärä tunnissa saadaan kaavalla 29.

$$m_{pa} = \frac{\Phi_{pa}}{H_{pa}} = \frac{31,3 \text{ kW}}{7 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \cdot 3600 \text{ s} = 16,1 \text{ kg} \quad \text{KAAVA 29}$$

Hakkeen hintana esimerkkilaskussa on 25 €/MWh, jolloin polttoainekuluiksi testiviikoille saadaan taulukon 5 mukaiset luvut (54).

TAULUKKO 5. Polttoainekulut testiviikkojen aikana aurinkopaneelien kanssa ja ilman

Vuodenaika \ Pa-kulut	Ilman aurinkopaneelleja [€]	Aurinkopaneeleilla [€]	Ero [€]
Talvi	50,8	50,0	-0,8
Kevät	52,3	32,0	-20,3
Kesä	52,3	43,8	-8,6
Syksy	52,3	51,6	-0,8

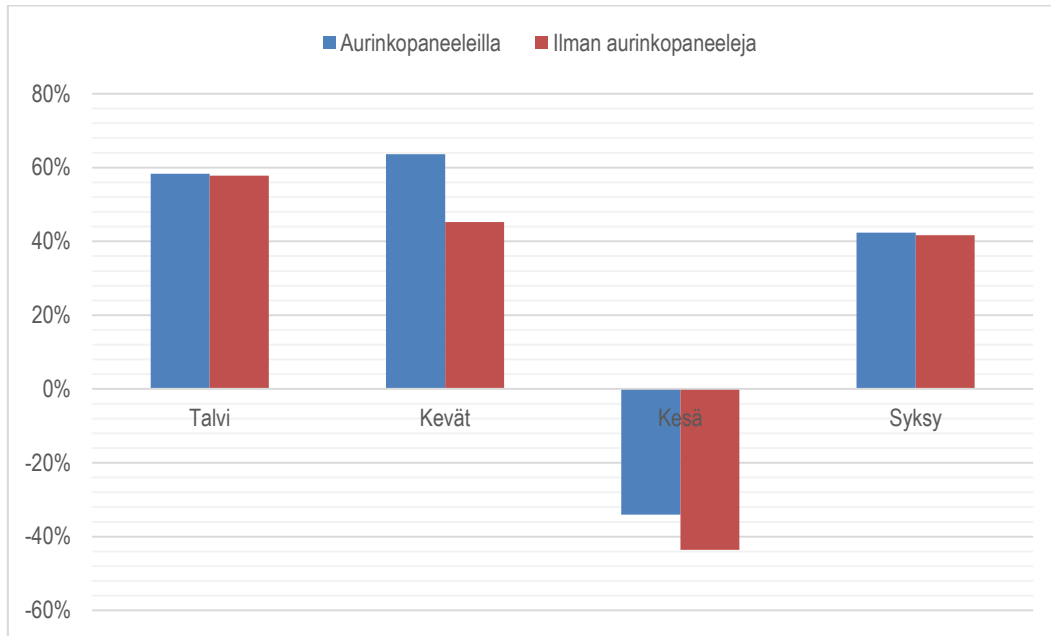
Taulukosta nähdään, että keväällä aurinkopaneeleilla voidaan säästää noin 10 € testiviikon kaltaisen viikon aikana. Näistä luvuista on kuitenkin hankala arvioida, paljonko säästöä saadaan esimerkiksi tilanteessa vuoden aikana. Kiinteistön sähköntarve on vuodessa 10 350 kWh ja lämmöntarve noin 28300 kWh, mikä on laskettu tuntikohtaisesti samoin kuin testiviikkojen tapauksessa. Aurinkopaneelien tuotannoksi testivuonna saadaan noin 1 620 kWh. Vuositasolla laskettuna säästöä polttoainekuluissa 10 m²:n aurinkopaneelijärjestelmällä voidaan saada noin 400 €, kun käyttötunteja kertyy noin 520 vähemmän. Aurinkopaneelien käyttö mikro-CHP-laitoksen rinnalla voi olla siis kannattavaa, mutta tarkemmassa tarkastelussa tulee ottaa huomioon investointikustannukset ja vaikuttaako paneelien lisääminen tarvittavan akuston suuruuteen.

Taulukossa 6 on vertailtu mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannuksia testiviikoilla tilanteeseen, jossa kaikki kiinteistön käyttämä energia on ostosähköä. Ostosähkön hintana on käytetty laskelmissa 10,51 snt/kWh.

TAULUKKO 6. Polttoainekustannukset verrattuna ostosähköön

Vuodenaika \ Kulut	Ilman aurinkopaneelleja [€]	Aurinkopaneeleilla [€]	Ero [€]
Talvi	120,3	120,1	-0,2
Kevät	95,5	88,1	-7,4
Kesä	36,4	32,6	-3,8
Syksy	89,8	89,5	-0,3

Taulukosta nähdään, etteivät aurinkopaneeleilla saatavat säästöt ole niin suuret kuin mikro-CHP-laitoksen ohessa käytettäessä. Kuvasta 27 nähdään vertailua, kuinka paljon mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannukset eroavat ostosähkön kustannuksista.



KUVA 27. Mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannukset verrattuna ostosähkön hintaan (% halvempi)

Kuvasta nähdään, että ainoastaan kesällä sähkölämmitteisen rakennuksen kustannukset ovat pienemmät kuin mikro-CHP-laitoksen, oli järjestelmässä aurinkopaneelit tai ei. Talvella, keväällä ja kesällä mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannukset ovat keskimäärin 55 % pienemmät kuin ostosähkön kustannukset, kun kiinteistössä on aurinkopaneelit. Vastaava luku ilman aurinkopaneeleja on 48 %.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tehtiin osana H-CHP-projektia, jossa työn tilaaja eli Tulevaisuuden tuotantoteknologiat FMT -tutkimusryhmä on mukana. Projektin tarkoituksena on suunnitella ja valmistaa prototyyppi mikro-CHP-laitoksesta, joka on tarkoitettu syrjäisillä ja harvaanasutuilla seuduilla sijaitsevien pientalojen energiantuotantoon. Suunniteltu mikro-CHP-laitos tuottaa noin 20 kW lämpöä ja 3-6 kW sähköä ja käyttää kiinteitä biopolttoaineita, kuten haketta tai pellettejä.

Tämän työn tarkoituksena oli ottaa selvää mäntähöyrykoneella toimivan mikro-CHP-laitoksen toimintaperiaatteesta ja siitä, millaisista komponenteista järjestelmä koostuu. Lisäksi työssä käytiin läpi lyhyesti muita mikro-CHP-teknologioita. Työssä otettiin selvää myös laitoksen ja sen komponenttien mitoitukseen, valintaan ja säätöön liittyvistä asioista. Höyrykattilatekniikan kohdalla tutkittiin vesiputki- ja tulitorvi-tuliputkikattiloiden etuja ja haittoja mikro-CHP-laitoksen kattilana. Työssä oli myös tavoitteena selvittää, voiko vesijohtovettä käyttää syöttö- ja kattilavetenä järjestelmässä. Opinnäytetyö tehtiin pääasiallisesti kirjallisuusselvityksenä, mutta siihen kuului myös laskennallinen osuus, jolla pyrittiin vertailemaan mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannuksia suoran sähkölämmityksen kustannuksiin ja aurinkopaneelien vaikutusta ostoenergiakustannuksiin pientalon energiantuotannossa. Esimerkin pientalon vuotuinen sähkönkulutus oli 10 350 kWh ja lämmönkulutus noin 28 300 kWh.

Selvityksen perusteella tulitorvi-tuliputkikattila voi olla paras valinta mikro-CHP-laitoksen kattilatyypiksi. Tulitorvi-tuliputkikattilan etuna vesiputkikattilaan verrattuna on sen suurempi vesitilavuus, jolloin se on helpommin säädettävä ja turvallisempi. Tämän lisäksi tulitorvi-tuliputkikattiloiden vedenkierto saadaan aikaiseksi helpommin eikä tarvetta erilliselle lieriölle ole, jolloin kattilan kustannukset voivat olla pienemmät. Veden laatuvaatimukset eivät myöskään ole tulitorvi-tuliputkikattiloilla niin korkeat kuin vesiputkikattiloilla. Työssä selvisi, että läpivirtauskattiloiden lämmönsiirtimiä suunniteltaessa tulee tarkastella kriittisen lämpövuon muodostumista. Kriittisen lämpövuon muodostumiseen voidaan vaikuttaa useilla suunnitteluparametreilla, jotka ovat esiteltyinä työssä. Painetasojen valinnassa huomioitavaa on, että laitoksen terminen hyötysuhde paranee kattilapainetta nostamalla tai lauhdutinpainetta laskemalla, mutta toisaalta Valtioneuvoksen asetus 1549/2016 asettaa kattilan tilavuuden ja paineen tulolle ylärajan, jonka ylittyessä painelaitteeksi lukeutuva kattila tulee rekisteröidä. Vesiputkikattiloille tämä raja on 750 barL ja muille höyrykattiloille 500 barL.

Luonnonkiertoiset vesiputkikattilat vaativat toimiakseen ajavana voimana toimivan tiheyseron kattilan nousuputkissa olevan vesi-höyryseoksen ja veden välille. Luonnonkierto toimii paremmin korkeissa kattiloissa. Pakkokiertokattiloilla korkeudella ei ole väliä, koska virtaus saadaan aikaan pumppun avulla. Läpivirtauskattila ei välttämättä sovi näin pienen kokoluokan kattilaksi, koska kriittistä lämpövuota voi olla hankala hallita. Veden laatuvaatimuksia tutkittaessa huomattiin, että vesijohtoveden laatuvaatimukset ovat sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 1352/2015 perusteella löysemmät kuin standardien SFS-EN 12952-12 ja SFS-EN 12953-10 asettamat laatuvaatimukset vesiputki- ja tulitorvi-tuliputkikattiloiden syöttö- ja kattilavedelle, joten nähtävästi vesijohtovettä ei voida käyttää suoraan kattilan kiertovetenä.

Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että mäntähöyrykone kannattaa rakentaa monivaiheiseksi, koska monivaiheisella koneella on parempi hyötysuhde kuin yksivaiheisella. Tämän lisäksi tulistetulla höyryllä voidaan saavuttaa parempi hyötysuhde verrattuna kylläisen höyryn käyttöön, koska tällöin tapahtuu vähemmän niin sanottua sylinterilauhtumista. Mäntähöyrykoneen mitoituksessa tulee pyrkiä mahdollisimman korkean hyötysuhteen lisäksi siihen, että se kykenee paiseuttamaan aina kaiken kattilan tuottaman höyryn. Samalla pyritään myös mahdollisimman pieneen iskutilavuuteen pienen koon saavuttamiseksi.

Työssä selvisi, että yhdistämällä mäntähöyrykoneen pyörittämä sähkögeneraattori tehoelektronikan avulla rakennuksen verkkoon tai sähköverkkoon voidaan höyrykoneen tehoa säätää sen pyörimisnopeutta muuttamalla. Tämä on yksinkertaisin tapa säätää höyrykoneen tehoa. Toisaalta parhaaseen hyötysuhteeseen laajemmalla tehoalueella säädön osalta päästään pitämällä pyörimisnopeus vakiona ja säätämällä sylinterin täytösmäärää. Sylinterien täytösmäärää voidaan säätää muuttamalla tuloventtiilien ajoitusta.

Alusta lähtien oli selvää, että höyrykoneesta tulevan paisuneen höyryn lauhduttamiseen tarvitaan lauhduttimen lisäksi erillinen lämmönsiirrin, jonka avulla höyrykoneelta tulevan vesi-höyryseoksen lauhduttaminen onnistuu myös silloin, kun lämpöä ei voida siirtää lämmitysjärjestelmään. Lämmön- ja sähkönvarastoinnin avulla laitosta voidaan ajaa korkealla teholla ja hyötysuhteella, kun laitoksen ei tarvitse seurailta sen hetkistä tehontarvetta. On kuitenkin huomioitavaa, että sähkön varastointitekniikka on vielä hyvin kallista.

Työtä tehtäessä nousi esille myös säätöjärjestelmän tärkeä merkitys mikro-CHP-laitosta suunniteltaessa. Mikro-CHP-laitoksen kattilan pienen vesimäärän takia sen dynamiikka nopea, joten laitos

vaatii nopeasti reagoivan säätöjärjestelmän ja säätävät toimilaitteet. Kiinteän polttoaineen käyttö tuo omat haasteensa kattilan säädettävyyteen.

Työn laskennallisessa osuudessa selvisi, että aurinkosähköjärjestelmällä voidaan vähentää mikro-CHP-laitoksen käyntiaikaa vuositasolla merkittävästi pienentäen polttoainekuluja. Kuten voitiin olettaa, saadaan laitoksen käyntiaikaa vähennettyä merkittävimmin keväällä ja kesällä. Säästöä esimerkiksi laskun tapauksessa tulisi vuositasolla noin 400 €, joten aurinkosähköjärjestelmän käyttö mikro-CHP-laitoksen ohella voi olla kannattavaa. Toisaalta aurinkosähköjärjestelmään investoinnin sijaan voi olla järkevämpää investoida esimerkiksi diesel-generaattoriin, joka voisi toimia myös varavoimalana mikro-CHP-laitoksen ollessa poissa käytöstä. Aurinkosähköjärjestelmän haasteena on kausiluontoinen tuotanto. Laitoksen polttoainekustannuksia verrattaessa suoraan sähkölämmitykseen huomattiin, että kaikkina muina vuodenaikoina paitsi kesällä mikro-CHP-laitos on 40–60% halvempi polttoainekustannuksiltaan kuin ostosähkön kustannukset. Kesällä suora sähkölämmitys tulee 30–45 % halvemmaksi.

Mäntähöyrykoneella varustetun mikro-CHP-laitoksen yksi ongelma on sähköntuotannon matala hyötysuhde, jolloin lämpöä syntyy ylimäärin sähköön nähden eikä tuotanto vastaa kulutusta. Tilannetta parantaa osaltaan jo esimerkiksi tämän työn laskennassakin mukana olleen sähkökiukaan vaihtaminen puukiukaaseen, jolla mikro-CHP-laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon suhdelukua saadaan hieman lähemmäs vastaavaa rakennuksen energiankäytön suhdelukua. Tämän lisäksi laitoksen polttoainekustannuksia voidaan vähentää, jos polttoainetta voidaan hankkia omasta metodista, jolloin kannattavuus verrattuna ostosähköön paranee entisestään.

LÄHTEET

1. Energia- ja ilmastotiekartta 2050 2014. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: <http://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-+ja+ilmastotie-kartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052>. Hakupäivä 25.4.2017.
2. Liu, H 2011. Biomass fuels for small and micro combined heat and power (CHP) systems: resources, conversion and applications. Julkaisussa Beith, Robert (toim.) Small and micro combined heat and power (CHP) systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. S. 88-122.
3. The programme in brief. 2017. Northern Periphery and Arctic Programme. Saatavissa: <http://www.interreg-npa.eu/?id=11>. Hakupäivä 25.4.2017.
4. Funded projects. 2017. Northern Periphery and Arctic Programme. Saatavissa: <http://www.interreg-npa.eu/projects/funded-projects/project/182/>. Hakupäivä 25.4.2017.
5. FMT - Tulevaisuuden tuotantoteknologiat tutkimusryhmä - Esittely. 2017. Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/fmt/index.html>. Hakupäivä 25.4.2017.
6. FMT - Tulevaisuuden tuotantoteknologiat tutkimusryhmä - Tarkoitus. 2017. Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/fmt/FMT-Missio-fi.html>. Hakupäivä 25.4.2017.
7. Oulun Eteläisen instituutin nimeksi Kerttu Saalasti Instituutti. 2017. Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/yliopisto/node/44033>. Hakupäivä 25.4.2017.
8. FMT - Tulevaisuuden tuotantoteknologiat tutkimusryhmä - Toimintaympäristö. 2017. Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/fmt/FMT-Op-Environment-fi.html>. Hakupäivä 25.4.2017.
9. Direktiivi 2004/8/EY. 2004. Euroopan parlamentti ja neuvosto. Saatavissa: 25.4.2017, <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/8/oj>.
10. Van Loo, Sjaak - Koppejaan, Jaap 2008. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London. Earthscan.
11. Puun kaasutus. 2017. Gasek. Saatavissa: <http://www.gasek.fi/technology/wood-gasification/>. Hakupäivä 2.4.2017.
12. Moran, Michael – Shapiro, Howard – Boettner, Daisy – Bailey, Margaret 2015. Principles of Engineering Thermodynamics, Eighth edition, SI version. John Wiley & Sons, Inc.
13. Knight, Ian - Ugursal, Ismet 2005. Residential Cogeneration Systems: A Review of the Current Technologies. Ottawa: CANMET Energy Technology Centre. Saatavissa:

http://www.ecbcs.org/docs/Annex_42_Review_Residential_Cogen_Technologies.pdf.

Hakupäivä 1.4.2017.

14. Mahkamov, K. 2011. Thermal-engine-based small and micro combined heat and power (CHP) systems for domestic applications: modelling micro-CHP deployment. Julkaisussa Beith, Robert (toim.) Small and micro combined heat and power (CHP) systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. S. 459-508.
15. Karjalainen, Timo 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus - laitteet ja niiden käyttöönotto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/sites/default/files/content/files/Pien%20CHP%20raportti.pdf>. Hakupäivä 1.4.2017.
16. Halinen, M. 2007. Polttokennot. VTT. Saatavissa: <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>. Hakupäivä 25.3.2017.
17. Brett, D. J. L. - Brandon, N. P. - Hawkes, A. D. - Staffell, I. 2011. Fuel cell systems for small and micro combined heat and power (CHP) applications. Julkaisussa Beith, Robert (toim.) Small and micro combined heat and power (CHP) systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. S. 233-257.
18. Varbanov, P. S. - Klemeš 2011. Small and micro combined heat and power (CHP) systems for the food and beverage processing industries. Julkaisussa Beith, Robert (toim.) Small and micro combined heat and power (CHP) systems. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. S. 395-423.
19. Mäntyjärvi, Kari 2016. Re: Opinnäytetyö/ CHP-laitteisto. Sähköpostiviestin liite, Micro CHP Minimum Block. Vastaanottaja: Mikko Tahkola. 21.9.2016.
20. Badami, M. - Mura, M. 2009. Preliminary design and controlling strategies of a small-scale wood waste Rankine Cycle (RC) with a reciprocating steam engine (SE). Julkaisussa: Energy 2009, Vol.34(9), S. 1315-1324.
21. Huhtinen, Markku - Kettunen, Arto - Nurminen, Pasi - Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uusittu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
22. Teir, Sebastian - Kulla, Antto 2002. Steam/Water Circulation Design. Espoo: Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering.
23. Google kuvahaku, hakusana "firetube boiler design". Saatavissa: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/10/de/8b/10de8bf6effc7d71a9bdc97941b1bbbd.jpg>. Hakupäivä 3.4.2017.
24. Theler, G. - Freis, D. 2011. Theoretical critical heat flux prediction based on non-equilibrium thermodynamics considerations of the subcooled boiling phenomenon. Julkaisussa:

- Mecánica Computacional Vol XXX, s. 1713-1732. Saatavissa: <http://www.ci-mec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3856/3777>. Hakupäivä 15.4.2017.
25. Stultz, S. C. - Kitto J. B. 1992. Steam/ its generation and use. 40. painos. Ohio, The Babcock & Wilcox Company. S. 4-18 ja 5-6.
 26. SFS-EN 12952-1. 2015. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 1: Yleistä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
 27. SFS-EN 12952-5. 2012. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
 28. Kirmanen, J. 2007. Venttiilit. Julkaisussa Joronen, T. Kovacs, Jenő - Majanne, Y (toim.) Voimalaitosautomaatio. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry.
 29. Painelaitteiden kunnossapito. 2004. TUKES. Saatavissa: http://www.tukes.fi/tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/painelaitte-kunnossapito-opas.pdf. Hakupäivä 2.4.2017.
 30. Näretie, V – Arpalahti, Esko 1981. Höyrytekniikka – Kattilat ja koneet. 3. painos. Keuruu: Otava
 31. SFS-EN 12952-16. 2003. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 16: Vaatimukset kiinteään polttoaineen polttolaitteistoille arina- ja leijupoltossa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
 32. Asetus 1549/2016 painelaiteturvallisuudesta. 2016. Valtioneuvosto. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161549>. Hakupäivä 25.4.2017.
 33. SFS-EN 12952-12. 2006 Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 12: Laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
 34. SFS-EN 12953-10. 2008. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 10: Vaatimukset sallitun paineen ylitykseltä suojaaville turvajärjestelmille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
 35. Yleistä vesihuollosta kysyttyä. 2017. Oulun Vesi. Saatavissa: <http://www.oulu-vesi.fi/usein-kysytyt-kysymykset>. Hakupäivä 22.4.2017.
 36. Asetus pienten yksiköiden talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista, Suomen säädöskokoelma 401/2001. 2001. Sosiaali- ja terveysministeriö. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20010401>. Hakupäivä 22.4.2017.
 37. Hyvän talousveden ominaisuudet. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: https://www.jamk.fi/globalassets/tutkimus-ja-kehitys--research-and-development/tki-projektien-lohkot-ja-tiedostot/vesihuoltohanke/12332_hyvan_talousveden_ominaisuudet.pdf. Hakupäivä 22.4.2017.

38. Huhtinen, Markku - Korhonen, Risto - Pimiä, Tuomo - Urpalainen Samu 2013. Voimalaistekniikka. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.
39. Maskuniitty, Hannu 2002. Arinapoltto. Julkaisussa Raiko, Risto - Saastamoinen, Jaakko - Hupa, Mikko - Kurki-Suonio, Ilmari (toim.) Poltto ja Palaminen. Toinen täydennetty painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. S. 466-489.
40. Sähkön pientuotannon liittäminen verkkoon. 2006. Pöyry Energy Oy. Helsinki: Motiva Oy. Saatavissa: http://www.tornionlaaksonsahko.fi/uploads/files/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf. Hakupäivä 25.4. 2017.
41. Varaajan valintaopas. Akvaterm Oy. Saatavissa: <https://www.rakentaja.fi/pdf/valintaopas.pdf>. Hakupäivä 22.4.2017.
42. Mäkelä, M. - Soininen, L. - Tuomola, S. - Öistämö, J. 2012. Tekniikan kaavasto. 10. painos. Hämeenlinna: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy.
43. Kallio, Kauko 2012. Teollisuusputkistot 3 op. Opintojakson luentomateriaali. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
44. Halttunen, J. 2007. Virtauksen, lämpötilan ja paineen mittaukset. Julkaisussa Joronen, T. Kovacs, Jenő - Majanne, Y (toim.) Voimalaitosautomaatio. Helsinki: Suomen Automaatioseura ry.
45. Kuinka pitkälle säättä voi ennustaa. 2017. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/kuinkapitkallesaatavoiennustaa>. Hakupäivä 23.4.2017.
46. Kysymyksiä sääennusteesta. 2017. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saaennustekysymyksia>. Hakupäivä 23.4.2017.
47. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa. Hakupäivä 26.4.2017.
48. Auringosta sähköä. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa. Hakupäivä 26.4.2017.
49. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2017. Ilmatieteenlaitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>. Hakupäivä 3.4.2017.
50. Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä. 2017. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_kytkeaton_aurinkosahkojarjestelma. Hakupäivä 26.4.2017.

51. Eicker, Ursula 2003. Solar Technologies for Buildings. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. Saatavissa: http://library.uniteddiversity.coop/Ecological_Building/Solar_Technologies_for_Buildings.pdf. Hakupäivä 26.4.2017.
52. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011 tutkimusraportti. 2013. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/8300/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_Tutkimusraportti.pdf. Hakupäivä 2.4.2017.
53. Puu polttoaineena. 2017. Bioenergiapörssi. Saatavissa: <http://www.bioenergia-porssi.fi/k%C3%A4sitteet-ja-laskurit/puu-polttoaineena>. Hakupäivä 7.5.2017.
54. Hakkeen myynti. 2017. Ruutana Heating Oy. Saatavissa: <http://www.ruutanaheating.fi/palvelut/hakkeen-myynti>. Hakupäivä 7.5.2017.
55. Quaak, Peter - Knoef, Harrie - Stassen, Hubert 1999. Energy from Biomass. A Review of Combustion and Gasification Technologies. World bank technical paper no. 422. Saatavissa: <http://documents.worldbank.org/curated/en/936651468740985551/pdf/multi-page.pdf>. Hakupäivä 27.4.2017.