

Susanna Ylimartimo

## **OMAKOTITALOKOHTAISEN MIKRO-CHP-LAITOKSEN HÖYRYKATTILA**

Suunnittelu ja mitoitus

# **OMAKOTITALOKOHTAISEN MIKRO-CHP-LAITOKSEN HÖYRYKATTILA**

Suunnittelu ja mitoitus

Susanna Ylimartimo  
Opinnäytetyö  
Syksy 2016  
Energiatekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Energiatekniikka

---

Tekijä: Susanna Ylimartimo

Opinnäytetyön nimi: Omakotitalokohtaisen mikro-CHP-laitoksen höyrykattila

Työn ohjaajat: Kari Mäntyjärvi ja Timo Kiviahde

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2016

Sivumäärä: 59+7

---

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmän kanssa, joka on osa Oulun Eteläisen Instituuttia. Työssä perehdytään mikro-CHP-laitoksen höyrykattilan suunnitteluun ja mitoitukseen liittyviin tekijöihin. Työn tavoitteena on ottaa huomioon höyrykattilan pieni kokoluokka sekä sen mukana tulevat haasteet ja ongelmat.

Energiantarve ja hinta ovat olleet kasvussa usean vuosikymmenen ajan. Tämän vuoksi yhä tehokkaampien tuotantotapojen tutkiminen ja kehittäminen ovat olleet tärkeässä asemassa. Yksi energiantuotannon haasteista on haja-asutus: millainen tuotantotapa olisi mahdollisimman tehokas, vähäpäästöinen ja hinnaltaan kilpailukykyinen esimerkiksi haja-asutusalueen omakotitaloja ajatellen. Tavoitteena olisi saada omakotitaloudet mahdollisimman omavaraisiksi energiantuotannon suhteen. Mikro-CHP-laitos on hyvin pienen luokan lämmön ja sähkön yhteistuotantoyksikkö, jossa lämpöenergia tuotetaan höyrykattilan avulla ja sivutuotteena tuleva sähköenergia tuotetaan voimakoneen avulla. Tässä CHP-laitoksessa voimakoneena toimii höyrykone.

Työssä selvisi, että kyseisen mikro-CHP-laitoksen höyrykattilaksi sopisi vesiputkikattila. Se luokitellaan painelaitteeksi, jonka suunnittelussa, valmistuksessa sekä käytössä tulee noudattaa painelaitteille säädetyjä standardeja ja lakeja. Standardisarjaa SFS-EN 12952 sekä painelaitedirektiiviä 97/23/EY 1997 käytettiin apuna kattilan lämpö- ja lujuusteknisen mitoituksen suunnittelussa. Työssä käytiin läpi myös polttoaineet, kuten hake, sekä kiinteän polttoaineen palaminen, johon liittyi palamisilman tarpeen sekä savukaasujen määrittely. Myös palamisprosessin päästöt käytiin läpi, sillä niihin vaikuttavat lähinnä polttoaineen ominaisuudet ja polttotekniset ratkaisut.

---

Asiasanat: paineastia, höyrykattila, mikro-CHP-laitos, lämmöntuotanto, sähköntuotanto, biopolttoaine

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Energy Technology

---

Author: Susanna Ylimartimo

Title of thesis: Steam boiler of house-specific micro-CHP-plant

Supervisors: Kari Mäntyjärvi and Timo Kiviahde

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2016    Number of pages: 59+7

---

This thesis is made in co-operation with Future Manufacturing Technologies- research group, which is part of Oulu Southern Institute. Thesis focuses on the design of micro-CHP-plant's steam boiler. The aim of the work is take account challenges and problems, which are caused by the small size of the boiler.

Energy demand and price have been increasing for several decades. Because of that, research and development of more efficient energy production methods have played an important role. One of the challenges of energy production is sparsely populated area: what kind of production would be the most efficient, low emission and price competitive for example to single family houses. The aim would be to obtain self-sufficient energy production to single-family houses. Micro-CHP-plant is very small class of combined heat and power unit, which produces the heat in the boiler and electrical energy by the power machine. In this CHP-plant steam engine works as the power machine.

It was found that water tube boiler is suitable for micro-CHP-plant. Water tube boiler is classified as pressure equipment, which has to be designed, manufactured and operated according to standards and laws. Sets of Standards SFS-EN 12952 and the Pressure Equipment Directive 97/23/EY 1997 was used to design of boiler's thermal and structural dimensioning. The thesis explains also fuels such as wood chips, and a solid fuel combustion which involves the definition of combustion air and flue gases. Also emissions from the combustion process are defined, because they mainly depend on fuel properties and combustion technology.

---

Keywords: Pressure equipment, steam boiler, micro-CHP-plant, heat production, power production, biofuel

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
SISÄLLYS.....	5
1 JOHDANTO.....	7
2 OULUN ETELÄISEN INSTITUUTTI.....	8
3 HÖYRYKATTILA.....	9
3.1 Toimintaperiaate.....	9
3.1.1 Tulipesä ja keittoputkisto.....	10
3.1.2 Tulistimet.....	10
3.1.3 Syöttöveden esilämmitin (Ekonomaiser, EKO).....	11
3.1.4 Ilmanesilämmittimet (Luftvorwärmer, LUVVO).....	12
3.1.5 Kattilan likaantuminen ja hyötysuhde.....	14
3.2 Vesiputkikattilat.....	15
3.2.1 Luonnonkiertokattila.....	15
3.2.2 Pakkokierto kattila.....	16
3.2.3 Läpivirtauskattila.....	17
3.3 Tulitorvi- ja tuliputkikattilat.....	18
4 POLTTOAINE JA PALAMINEN.....	20
4.1 Biopolttoaine.....	20
4.1.1 Hake.....	20
4.1.2 Puubriketit ja pelletti.....	23
4.1.3 Turve.....	25
4.1.4 Peltobiomassa.....	25
4.1.5 Seospoltto.....	27
4.2 Kiinteän polttoaineen palaminen.....	28
4.2.1 Palamisreaktiot.....	29
4.2.2 Palamisilman tarve ja savukaasut.....	31
4.2.3 Päästöt.....	34
5 MIKRO-CHP-LAITOS.....	36
6 MIKRO-CHP-LAITOKSEN KATTILA.....	38
6.1 Rakenne.....	38

6.2	Painelaitesuunnittelu .....	40
6.2.1	Standardit.....	41
6.2.2	Lujuustekninen mitoitus.....	42
6.3	Lämpötekni­sen mitoituksen periaate .....	46
6.3.1	Teho ja massavirrat .....	48
6.3.2	Paine ja nestetilavuus .....	50
6.4	Polttolaite.....	51
6.5	Puhdistus ja huolto .....	52
6.6	Laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle .....	55
7	YHTEENVETO .....	56
	LÄHTEET.....	58
	LIITTEET .....	

# 1 JOHDANTO

Energiantuotanto on tärkeä tekniikan ala, joka kehittyy jatkuvasti ja tulee kehittymään tulevaisuudessa uuden teknologian myötä. Tehokas energiantuotanto säästää arvokkaita luonnonvaroja ja ehkäisee saasteiden päätymistä ympäristöön. Euroopan unionissa ja Suomessa energiantuotanto on yleisesti huippuluokkaa.

Oulun yliopiston Oulun Eteläisen Instituutin tutkimusryhmä FMT on keskittynyt tulevaisuuden tuotantoteknologioihin ja tekee yhteistyötä suomalaisten konepajojen sekä isojen teollisuusyritysten kanssa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia omakotitalokohtaisen mikro-CHP-laitoksen höyrykattilan suunnitteluun liittyviä tekijöitä. Mikro-CHP-laitos suunnitellaan haja-asutusalueiden omakotitalouksiin, joilla ei ole mahdollisuutta liittyä esimerkiksi kaukolämpöverkoon. Näin omakotitalot voidaan saada omavaraisemmiksi energian suhteen: tarvittava lämpöenergia saataisiin tuotettua mikro-CHP-laitteistolla, minkä lisäksi laitos tuottaisi sähköenergiaa esimerkiksi valtakunnan sähköverkoston sähkökatkojen varalle.

Työssä tutustutaan aluksi Oulun Eteläisen instituutin toimintaan sekä käydään läpi höyrykattilan yleistä toimintaperiaatetta. Työssä perehdytään myös biopolttoaineisiin, joista erityisesti hakkeeseen, kiinteän polttoaineen palamiseen sekä palamisprosessin ilmantarpeen selvittämiseen. Paineastiansuunnittelu sekä pienen höyrykattilan mitoittamiseen ja suunnitteluun vaikuttavat asiat nousevat työssä esille tärkeinä tekijöinä. Paineastiansuunnitteluun liittyvissä asioissa käytetään apuna painelaitedirektiiviä 97/23/EY 1997 sekä vesiputkikattilan suunnitteluun tarkoitettua standardisarjaa SFS-EN 12952.

## 2 OULUN ETELÄISEN INSTITUUTTI

Oulun Eteläisen Instituutti on osa Oulun yliopistoa oleva erillislaitos, joka tutkii muun muassa tulevaisuuden tuotantoteknologioita. Instituutille tärkeitä asioita ovat uuden tiedon tuottaminen, erilaiset innovaatiot sekä kansainvälisyys. Instituutti tekee tiivistä yhteistyötä muiden yliopiston tiedekuntien sekä johtavien teollisuuden yritysten kanssa: esimerkiksi SSAB:n ja Outokummun terästen laadunvalvonta on osa instituutin toimintaa. (1.)

Instituutin tavoitteita ovat yritysten kehittäminen, tuotantotekniikan tutkiminen, uusien innovaatioiden tuottaminen sekä nopeiden kokeilujen edistäminen. Tämän avulla kehitetään yritysten toiminnallista erinomaisuutta. Oulun Eteläisellä Instituutilla on tärkeä paikallinen ja yhteiskunnallinen vaikutus esimerkiksi energiantuotannon kannalta. (1.)

Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT, Future Manufacturing Technologies) on Oulun Eteläisen Instituutin tutkimusryhmä, jonka toiminta-alueena on koko Pohjois-Suomi. Ryhmän päätoimipaikka on ELME Studiassa Nivalassa. FMT keskittyy pääasiassa menetelmiin ja tekniikoihin, jotka liittyvät levymäisen materiaalin tuotteeksi jalostamiseen. Ryhmä aloitti toimintansa vuonna 2004 ja sen tutkimusalueisiin kuuluu muun muassa erikoisterästen tehokas hyödyntäminen, kustannustehokas automaatio sekä ainetta lisäävä valmistus. Ryhmä on osa Oulun yliopistolla olevaa terästudkimuskeskus CASR:ia (Center of Advanced Steels Research). (2.)

FMT-ryhmän tarkoituksena on edistää paikallisen teollisuuden menestyksen mahdollisuuksia sekä huolehtia alueen tutkijakoulutuksesta ja teollisuuden osaajatarpeen tyydytyksestä. Tutkimusryhmä on aktiivinen kansainvälisessä toiminnassa ja edustaa toiminta-alueellaan korkeinta osaamista. (2.)



### 3 HÖYRYKATTILA

Vedellä on kolme olomuotoa, jotka ovat kiinteä, neste ja kaasu. Höyry on kaasumaista vettä, jonka erilaisia tiloja käytetään voimalaitosprosessissa hyödyksi. Höyrykattila on suljettu paineastia, jonka perusidea on veden höyrystäminen: kattilan putkistoon syötetään vettä, jota kuumentamalla saadaan ilmanpaineen ylittävää paineistettua vesihöyryä. Tällä tavoin syntynyttä höyryä käytetään energiatuotantoyksikön voimakoneiden, kuten höyrykoneen tai höyryturbiinin välityksellä energiantuotantoon. (3, s. 7; 4, s. 42.)

Vesi vaatii ulkopuolista lämpöä muuttuakseen putkistossa höyryksi: lämpö tuotetaan polttoaineilla, jonka lähteiksi kelpaavat esimerkiksi kiinteät materiaalit, kuten puu, hiili tai turve. Muita lämpöenergian lähteitä ovat muun muassa nestemäiset (öljy) ja kaasumaiset (biokaasu) polttoaineet tai ydinvoima. Polttoaineita polttamalla keittoputkistossa oleva vesi saadaan lämpenemään höyrystymislämpötilaan. Höyrymuodostuminen saavuttaa suurimman mahdollisen arvonsa tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Vesihöyry on kylläistä silloin, kun sitä on niin paljon kuin on mahdollista kyseisessä lämpötilassa. Kun tässä tilassa olevaa höyryä kuumennetaan, on kyseessä puolestaan höyryntulistaminen. (3, s. 7; 4, s. 42.)

#### 3.1 Toimintaperiaate

Höyrykattila voidaan ajatella vedenkierron kannalta pitkäksi putkeksi, jossa vesi käy läpi erilaisia vaihteita. Kattilan toimintaperiaatteen perusajatus on muuttaa vesi tulistetuksi höyryksi eli tuorehöyryksi, mihin kuuluu kaksi päävaihetta: paineistettu vesi kuumennetaan kiehumispisteeseen ja höyrystetään, minkä jälkeen höyryntulistausta nostetaan kiehumispistettä korkeammaksi eli höyryntulistetaan. (3, s. 7.)

Kattilan lämpöpinnat ovat lämmönsiirtimiä, jotka siirtävät savukaasujen sisältämää energiaa mahdollisimman tehokkaasti kattilan vesi-höyrykiertoon. Lämpöpintoja lämmitetään palamisprosessista syntyvällä savukaasulla ja jäähdytetään lämpöä talteenottavilla massavirroilla, kuten vedellä ja vesi-höyryseoksella. Näin ollen lämpöpinnoiksi luetaan keittoputkisto, tulistimet, vedenesilämmitin (EKO) ja ilmanesilämmitin. (LUVO) (3, s. 184.)

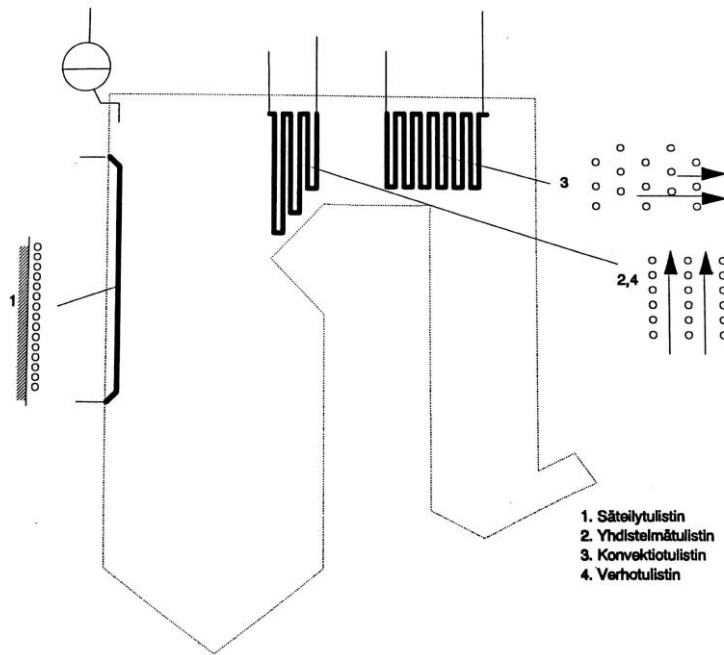
### 3.1.1 Tulipesä ja keittoputkisto

Höyrykattilan lämpötilat ovat korkeimmillaan tulipesässä, yleensä noin 800–1300 °C. Lämpötila on riippuvainen käytettävästä polttoaineesta ja polttotekniikasta. Jotta lämmönsiirtomateriaalit kestäisivät tulipesän lämpötilat, on veden höyryttämiseen tarkoitettu ns. keittoputkisto sijoitettu tulipesän ympärille. Nykyaikaisissa kattiloissa keittoputkisto muodostaa tulipesän ympärille kaasu- tiiviin seinämän. Keittoputkiseinämien lämpötila on lähellä veden höyrytyslämpötilaa, sillä höyrytyvä vesi aiheuttaa niihin tehokkaan jäähtymisen. Veden höyrytyslämpötila on puolestaan riippuvainen vallitsevasta paineesta: 10 bar:n paineessa lämpötila on 179 °C ja 221 bar:n paineessa 374 °C. Höyrytinsäan kuuluvat yleensä tulipesän seinäputket sekä joissain tapauksissa savukaasukanavaan sijoitettu jälkikeittopinta. Höyrytinsäan paine on hieman korkeampi kuin tulistetun höyryn paine, mikä johtuu painehäviöistä. (3, s 185–187.)

### 3.1.2 Tulistimet

Höyryllä ei ole veden kaltaista materiaaleja jäädyttävää vaikutusta, minkä vuoksi tulistimet sijoitetaan yleensä tulipesän yläosaan tai sen jälkeiseen savukaasukanavaan. Tulistusvyöhykkeellä savukaasujen lämpötila on vielä tarpeeksi korkea, jotta saavutetaan tavoiteltu höyryn tulistuslämpötila (450–550 °C). Materiaalitekniisten rajoitusten vuoksi tulistuslämpötilat ovat kuitenkin maksimissaan noin 550 °C. (3, s. 185, 188.)

Tulistimet koostuvat yleensä useista eri tulistimista, jotka voidaan jaotella niiden lämmönsiirron ja sijoituspaikan mukaan: säteily-, konvektio-, yhdistelmä- ja verhotulistin. Tulistintyyppit sekä niiden sijoittelu esitetään kuvassa 1. Säteilytulistimissa lämpö siirtyy niiden nimen mukaisesti säteilynä ja ne sijoitetaan yleensä tulipesän yläosaan. Konvektiotulistimet sijaitsevat puolestaan savukaasukanavassa, jolloin lämpö siirtyy ainoastaan konvektion välityksellä. Yhdistelmätulistimessa on yhdistetty säteily- ja konvektiotulistimet. Verhotulistin on puolestaan eräänlainen säteilytulistin, jota käytetään lämpöpintoja likaavia polttoaineita polttavissa kattiloissa. Kyseinen tulistin suojaa konvektiotulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. (3, s. 188–191.)



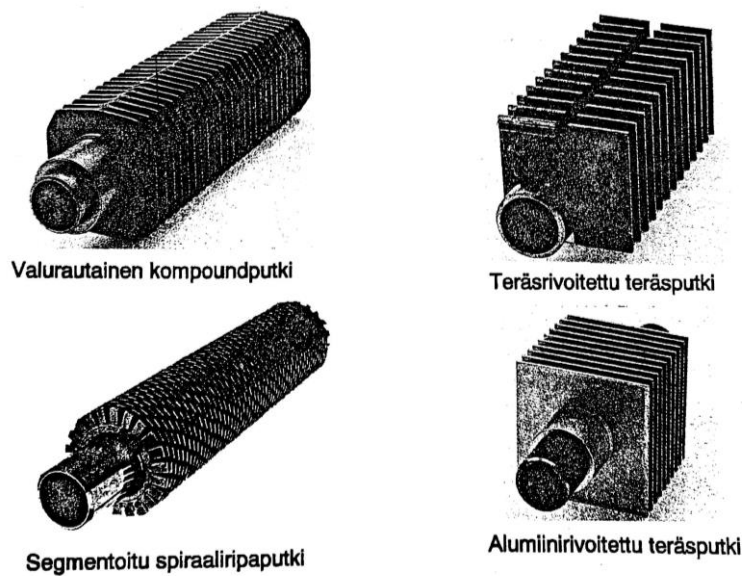
KUVA 1. Tulistintyytit ja niiden sijoittelu (3, s. 189)

Lämpötilan on oltava vakaa tulistuksessa: yleensä lähtevän höyryn lämpötila on 450–550 °C. Höyrystä saatava energia luonnollisesti vähenee lämpötilan laskiessa, jolloin myös turbiinin teho laskee. Lämpötilan ollessa liian suuri materiaalit voivat puolestaan ylikuumentua, mikä voi vaurioittaa esimerkiksi kattilan rakenteita. Höyryn lämpötilaa voidaan ylläpitää tasaisena veden ruiskutuksella höyryn joukkoon. Välitulistimella saadaan tehostettua turbiinin sähköntuotantoa: välitulistimessa tulistetaan matalapaineista höyryä, joka on johdettu turbiinilta takaisin kattilaan. (3, s. 185, 188.)

### 3.1.3 Syöttöveden esilämmitin (Ekonomaiser, EKO)

Savukaasujen lämpötila on suurempi kuin höyryn lämpötila tulistimien jälkeen, jopa noin 600–800 °C. Ilman savukaasujen lämpöenergian talteenottoa lämmöntuotantoyksikön hyötysuhde olisi huono. Hyötysuhdetta voidaan kuitenkin parantaa käyttämällä lämpöä kattilan syöttöveden lämmitykseen. Kyseinen lämmitys tapahtuu savukaasukanavaan sijoitetussa ekonomaiserissa eli lämmönsiirtimessä, jonka avulla savukaasujen lämpötila saadaan puotettua lähelle syöttöveden tulolämpötilaa. Ekonomaiserityyppejä on kaksi, höyrystävä ja höyrystämätön. Höyrystävässä ekonomaiserissa vesi saavuttaa höyrystymislämpötilan ja siirtyy kattilaan osaksi höyrystyneenä. Höyrystämättömässä ekonomaiserissa vesi lämpenee noin 20 °C alle höyrystymislämpötilan. (3, s. 194–195.)

Syöttöveden esilämmittimet voidaan jakaa valurautaesilämmittämiin sekä teräsputkiesilämmittämiin käytetyn raaka-aineen mukaan. Valurauta soveltuu esilämmittimen materiaaliksi, jos syöttövesi on kylmää: se kestää materiaalina paremmin matalalämpötilasyöpymistä. Tämän lisäksi valurautaputket kestävät hyvin savukaasuissa olevien hiukkasten sekä nuohoimien kulutusta. Se on myös helppo rivoittaa ulkopuolelta. Valurautainen putki kestää kuitenkin suhteellisen huonosti painetta, minkä vuoksi putkessa käytetään compoundrakennetta, joka on esitetty kuvassa 2. Kyseisessä rakenteessa rivoitetun valurautaputken sisään asennetaan teräsputki, joka kestää paremmin painetta. (3, s. 195.)



KUVA 2. Rivoitettuja vedenesilämmittinputkia (3, s. 195)

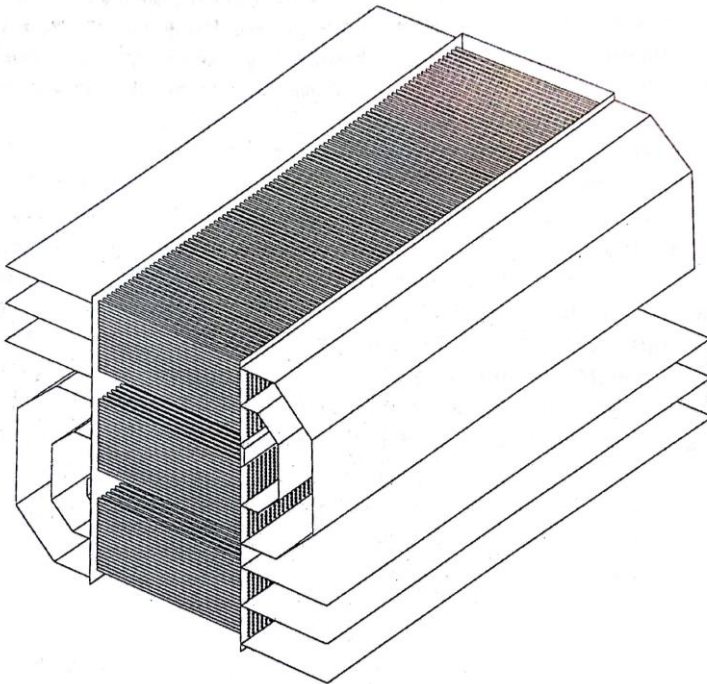
Teräsputkiesilämmittämiä käytetään silloin, kun savukaasujen syövytysominaisuuden ovat vähäisemmät. Nämä esilämmittimet ovat yleisemmin käytettyjä, ja myös niihin voidaan asentaa rivoitus. Kuvassa 2 esitetään teräsputkiesilämmittimien rivoitusmahdollisuuksia. (3, s. 195.)

### 3.1.4 Ilmanesilämmittimet (Luftvorwärmer, LUVO)

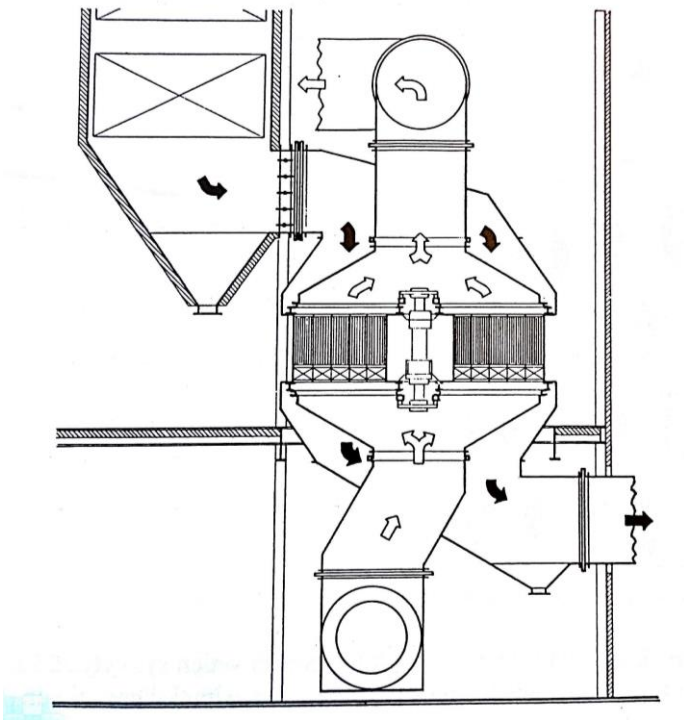
Ilman esilämmitin (LUVO) sijaitsee kattilassa viimeisimpänä lämmönsiirtimenä: LUVOn tehtävänä on lämmittää kattilaan menevää palamisilmaa, mikä tehostaa syttymistä, nopeuttaa palamista ja vähentää polttoaineen kosteutta. Suurin merkitys palamisilman esilämmityksellä on silloin, kun poltetaan joko kosteita tai epähomogeenisiä polttoaineita. Tällaisia polttoaineita ovat esimerkiksi kivihiili ja turve. Yleensä palamisilman lämpötila on 100–400 °C, mikä riippuu sekä polttoaineesta että

polttotekniikasta. LUVOsta lähtevien savukaasujen lämpötila riippuu puolestaan happokastepisteestä. Jos on olemassa happokastepisteen alittumisen vaara, voidaan ilmaa lämmittää höyrylämmitteisellä esilämmittimellä ennen savukaasulämmitteistä lämmönsiirintä. (3, s. 196–197.)

Ilman esilämmittimet voidaan jakaa rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin esilämmittäjiin niiden toimintaperiaatteen mukaan. Esilämmittimet näkyvät kuvissa 3 ja 4. Rekuperatiivisessa ilman esilämmittimessä lämpö siirtyy kuumemmasta ainevirrasta (savukaasu) kylmempään ainevirtaan (ilma) lämmönsiirtopinnan läpi. Niiden rakennusmateriaalina voidaan käyttää terästä, valurautaa tai lasia. Regeneratiivinen esilämmitin siirtää lämpöä puolestaan varaavien massojen välityksellä: kylmä ja kuuma massavirta koskettaa vuoron perään lämpöä siirtävää materiaalia. (3, s. 197–199.)



KUVA 2. Rekuperatiivinen teräsputkinen ilman esilämmitin (3, s. 198)



KUVA 3. Regeneratiivinen ilman esilämmitin (3, s. 200)

### 3.1.5 Kattilan likaantuminen ja hyötysuhde

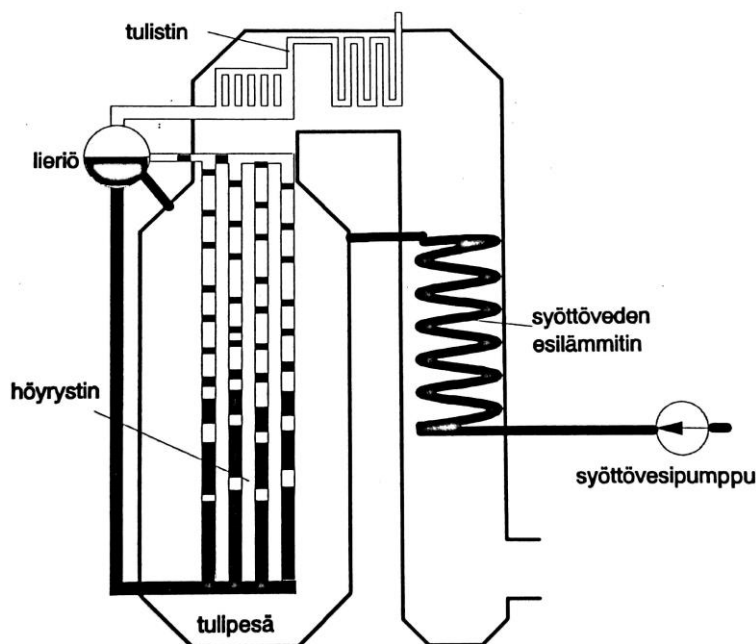
Suurin kattilan hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on yleensä savukaasuhäviöt eli savukaasujen mukana poistuva lämpöenergia. Mikro-CHP-laitoksen kattilan kohdalla voidaan ajatella, että häviöt koostuvat pelkästään savukaasuhäviöistä, sillä yksikkö on erittäin tehokkaasti eristetty. Häviöiden määrä riippuu luonnollisesti savukaasujen määrästä ja lämpötilasta. Mitä kylmempänä savukaasut poistuvat kattilasta, sen parempi hyötysuhde kattilalla on. Savukaasujen lämpötilan on oltava kuitenkin yli happokastepisteen korroosion ehkäisemiseksi, kun poltetaan rikkiptioisia polttoaineita. Myös lämmönsiirtopintojen likaantuminen vaikuttaa kattilan lämmönsiirron tehokkuuteen ja savukaasuhäviöihin: likaantuneet pinnat siirtävät lämpöä heikommin, jolloin höyryn loppulämpötila on suurempi. Myös virtausvastus ja kattilan omakäyttöteho nousevat likaantumisen myötä. Likaantumista voidaan estää ja ehkäistä kattilan puhdistamisella eli nuohouksella. Huollettavuus sekä nuohoaminen ovatkin asioita, joihin täytyy kiinnittää erityistä huomiota mikro-CHP-laitoksen kattilaa suunniteltaessa. (3, s. 101, 209.)

## 3.2 Vesiputkikattilat

Vesiputkikattiloiden vesi höyrystyy kattilan rakenteissa kulkevilla putkilla. Kyseinen rakenne mahdollistaa korkean käyttöpaineen, jolloin höyryn lämpötila voi nousta hyvin korkeaksi. Vesiputkikattilat sopivat voimalaitosprosessihin tulitorvikattiloita paremmin juuri korkean paineensietokyvyn vuoksi. (3, s. 111; 4, s. 51.)

### 3.2.1 Luonnonkiertokattila

Luonnonkiertokattila on yksi yleisimmistä vesiputkikattiloista, jonka nimitys tulee siitä, että vesi kulkee putkistossa ns. itsestään ilman erillistä pumppaamista. Kattilan keskeiset komponentit vedenesilämitin, lieriö, höyrystin ja tulistin esitetään kuvassa 5. Syöttövesi pumpataan vesiputkiin syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpun avulla. Ensimmäisenä vesi kulkee syöttöveden esilämmittimeen, jossa se lämpenee lähelle kylläistä lämpötilaa. Tämän jälkeen syöttövesi johdetaan lieriöön, josta se kulkeutuu vedenlaskuputkea pitkin tulipesän höyrystinputkien alapäähän. Osa vedestä höyrystyy höyrystinputkissa, minkä jälkeen vesi-höyryseos palaa lieriöön. Lieriössä vesi ja muodostunut höyry erotetaan toisistaan: vettä kevyempi höyry nousee lieriön yläosaan, josta se virtaa tulistimeen. Siellä höyryä tulistetaan ennen turbiiniin johtamista ja muuta käyttöä. Kylläinen vesi puolestaan sekoittuu uuteen syöttövedeen ja palaa kattilan höyrystinputkiin höyrystettäväksi. (3, s. 113.)

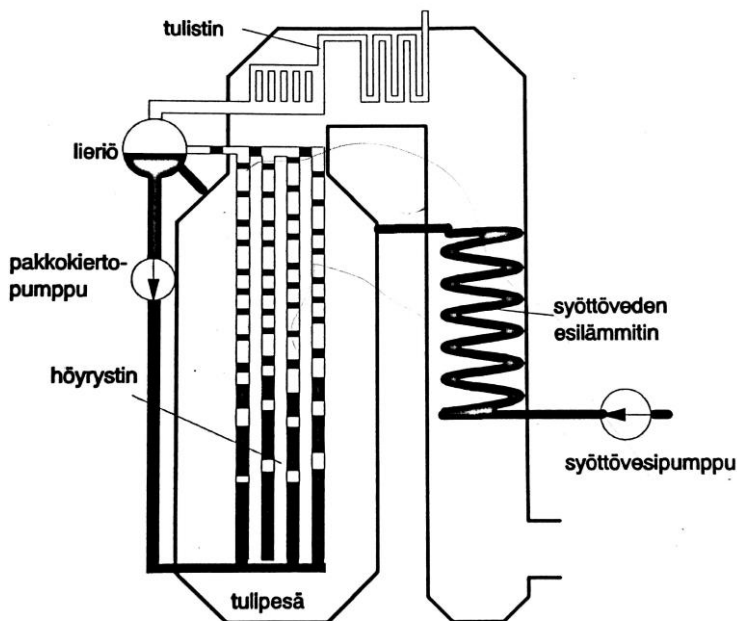


KUVA 4. Luonnonkiertokattilan toimintaperiaate (3, s. 113)

Veden kierto lieriöstä höyrystimeen ja takaisin tapahtuu veden ja vesihöyryn tiheyseron avulla: laskuputkessa oleva kylläinen vesi on tiheämpää kuin höyrystinputkessa oleva vesihöyryseos. Tähän perustuen kevyempi vesihöyryseos nousee takaisin lieriöön höyrystinputkista ja raskaampi kylläinen vesi virtaa laskuputkea pitkin höyrystinputkiin höyrystettäväksi. Jos höyryn paine kasvaa, veden ja höyryn tiheysero pienenee ja kriittisessä paineessa ( $p = 221 \text{ bar}$ ) niiden tiheys on sama ( $315 \text{ kg/m}^3$ ). Koska luonnonkiertokattilan vedenkierto perustuu tiheyseroihin, ei kyseinen kattila sovellu korkeille höyrynpaineille. Käytännössä tulistimesta tulevan höyryn paineen pitäisi olla alle  $170 \text{ bar}$ . (3, s. 113–114; 4, s. 51.)

### 3.2.2 Pakkokiertokattila

Pakkokiertokattilassa veden ja vesihöyryn kierto saadaan aikaiseksi pakkokiertopumpun avulla. Kattilan periaate ja osat näkyvät kuvassa 6. Kuten luonnonkiertokattilassa, myös pakkokiertokattilassa syöttövesi pumpataan lieriöön syöttövesipumpulla. Lieriöstä kylläinen vesi puolestaan pumpataan pakkokiertopumppujen avulla höyrystimeen ja samalla höyrystimessä oleva vesihöyryseos nousee takaisin lieriöön pumpun aiheuttaman paineen vuoksi. Lieriö on yleensä samanlainen kuin luonnonkiertokattilassa: kylläinen vesi ja höyry erotetaan toisistaan, ja höyry johdetaan tulistinputkien kautta tulistimiin. Pakkokiertopumppu täytyy sijoittaa laskuputkeen useita metrejä lieriön alapuolelle kylläisen veden höyrystymisen (kavitoinnin) estämiseksi. (3, s. 118; 4, s. 62.)



KUVA 5. Pakkokiertokattilan toimintaperiaate (3, s. 119)

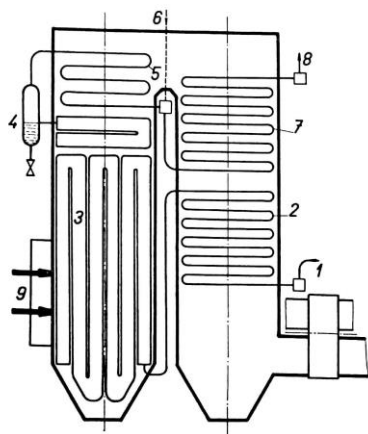


Pakkokierto-kattila soveltuu luonnonkierto-kattilaa paremmin korkeammille höyryn paineille. Veden ja höyryn erottaminen lieriössä perustuu kuitenkin edelleen tiheyseroihin, minkä vuoksi pakkokierto-kattila ei sovellu ylikriittisille paineille ( $p > 221$ ). Pakkokierto-kattilan tuorehöyryn paineen tulee olla kriittistä painetta pienempi eli maksimissaan noin 190 bar. (3, s. 118.)

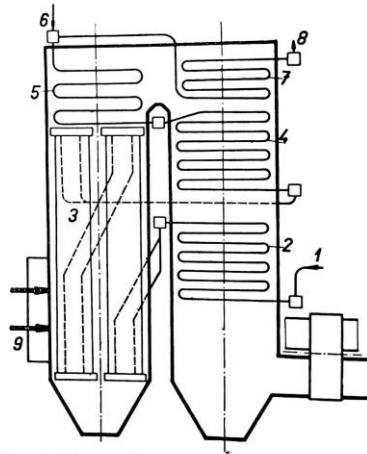
### 3.2.3 Läpivirtauskattila

Veden kiertoa ajatellen läpivirtauskattila voidaan mieltää pitkäksi putkeksi tai putkiryhmäksi, joka lämmitetään ulkoapäin: putken alkupäästä vesi syötetään sisään ja putken loppupäästä vesi poistuu tulistuneena höyrynä. Läpivirtauskattilat poikkeavat luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloista siinä, että niissä ei ole höyryn erottamiseen tarkoitettua lieriötä. Näin ollen läpivirtauskattilassa ei ole myöskään lieriön ja höyrystimen välistä sisäistä kiertoa. Tämän vuoksi läpivirtauskattilan kiertoluku on 1. (3, s. 120; 4, s. 65–66.)

Läpivirtauskattilat voidaan jakaa kahteen eri ryhmään vesihöyrykierron mukaan: kiinteän vesihöyrypisteen (Sulzer-kattila) ja muuttuvan höyrystinpisteen läpivirtauskattila (Benson-kattila). Molempien kattiloiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7. Koska läpivirtauskattilassa kaikki vesi höyrystyy ja näin ollen veden ja höyryn erotusta ei tarvita, sopii se myös ylikriittisiin höyryn paineisiin. Läpivirtauskattiloita käytetäänkin yleensä suurien voimalaitosten kattiloina, kun voimalaitosprosessi on korkealla tuorehöyrypaineella paremman sähköntuotannon hyötysuhteen vuoksi. Mikro-CHP-laitoksen kattilan käyttöpaineet ovat puolestaan hyvin matalat, minkä vuoksi läpivirtauskattila ei sovellu laitoksen kattilaksi. (3, s. 120; 4, s. 66–67.)



43. Sulzer-kattila [1].  
 1 Syöttöveden sisäänmeno  
 2 Syöttöveden esilämmitin  
 3 Höyrystin  
 4 Vedenerotin  
 5 Säteilytulistin  
 6 Vedenruiskutus  
 7 Kosketustulistin  
 8 Tuorehöyryjohto  
 9 Poltin

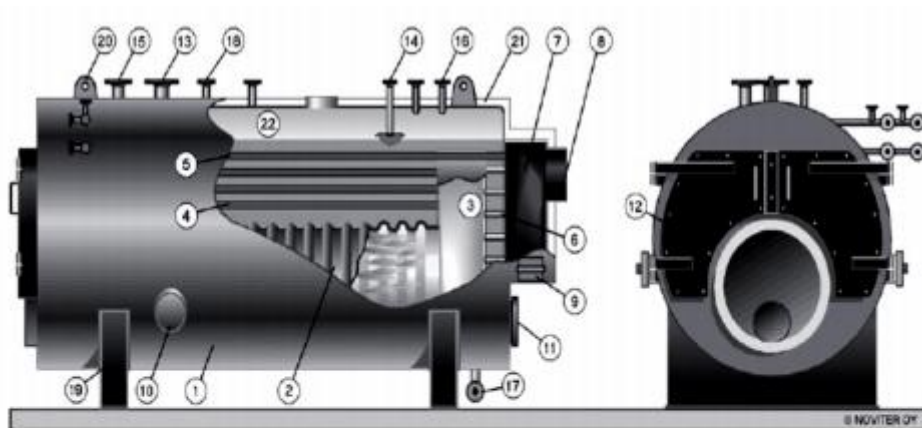


44. Benson-kattila [1].  
 1 Syöttöveden sisäänmeno  
 2 Syöttöveden esilämmitin  
 3 Höyrystin  
 4 Loppuhöyrystin  
 5 Säteilytulistin  
 6 Vedenruiskutus  
 7 Kosketustulistin  
 8 Tuorehöyryjohto  
 9 Poltin

KUVA 6. Sulzer- ja Benson-kattiloiden kaavio (4, s. 68)

### 3.3 Tulitorvi- ja tuliputkikattilat

Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat suurvesikattiloita, joissa polttoaineena käytetään yleensä öljyä tai kaasua. Polttoaine palaa tulitorvessa, jonka jälkeen on kääntökammio. Kammiossa savukaasut jatkavat matkaa tuliputkiin. Jos tuliputkikattila on kolmivetoinen, myös sen etuosassa on kääntökammio: savukaasut virtaavat tuliputkien läpi vielä kerran kattilan peräpäähän kokoojakammioon. Sieltä jäähtyneet savukaasut johdetaan savukanavan yhteen kautta savupiippuun. Tulitorvea ja tuliputkia ympäröi vesi, jota savukaasujen on määrä lämmittää ja höyrystää. Yleensä tulitorvi sijaitsee vesitilassa alimmaisena ja tuliputket ovat sen yläpuolella. Tulitorvi-tuliputkikattilan rakenne on esitetty kuvassa 8. (3, s. 112; 4, s. 46–47.)



**NST-höyrykattilan osat:**

1. Paineastian vaippa	2. Tulitorvi	3. Lieskakammio	4. II-veden tuliputket
5. III-vedon tuliputket	6. Sidetangot	7. Savukaasukammio	8. Savukanava
9. Puhdistusluukku	10. Tarkastusluukku	11. Räjähdysluukku/kulkuaukko	12. Etuluukku
13. Päähöyry-yhde	14. Syöttövesiyhde	15. Pinnanmittausyhde	16. Varoventtiilyhde
17. Tyhjennys/pohjapuhallusyhde	18. Pintapuhallusyhde	19. Jalusta	20. Nostokorva
21. Eristys	22. Höyrytila		

*KUVA 7. Tulitorvi-tuliputkikattilan rakenne (5)*

Kattilan rakenteesta johtuen tarvitaan tulitorvissa sekä kattilan vesi/höyrytilan painekuorissa paksut seinämät, kun höyryn paine kasvaa tarpeeksi. Tämän vuoksi kattila on kalliimpi kuin vesiputkirakenteinen kattila, jossa vesi höyrystyy ulkopuolelta lämmitettävissä putkissa. Jos tulitorvi-tuliputkikattilan höyryntuottoa halutaan lisätä, vaatii se lämpöpintojen kasvattamista. Tämä puolestaan edellyttää koko kattilan suurentamista sekä paineenalaisten seinämien paksuntamista. Yleensä tulitorvi-tuliputkikattiloita käytetään alle 20 bar:n paineessa ja käyttötehona on alle 12 MW. (3, s. 112.)

Vaikka tulitorvi-tuliputkikattilaa käytetään yleensä matalissa paineissa, ei se sovellu mikro-CHP-laitoksen kattilaksi niin hyvin kuin vesiputkikattila: tulitorvi-tuliputkikattilassa poltetaan yleensä nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita, kun taas mikro-CHP-laitoksen polttoaineeksi on suunniteltu nimenomaan kiinteät polttoaineet (puu, turve). Vesiputkikattila on myös huomattavasti tehokkaampi höyryntuotannossa kuin tulitorvi-tuliputkikattila, minkä vuoksi se soveltuu paremmin pienen lämmöntuotantoyksikön kattilaksi. Tulitorvi-tuliputkikattiloita käytetäänkin yleensä matalapaineisen höyryn tuotantoon silloin, kun höyryn tarve on niin vähäinen, että sähkön tuottaminen ei ole kannattavaa. (3, s. 111–112.)

## 4 POLTTOAINE JA PALAMINEN

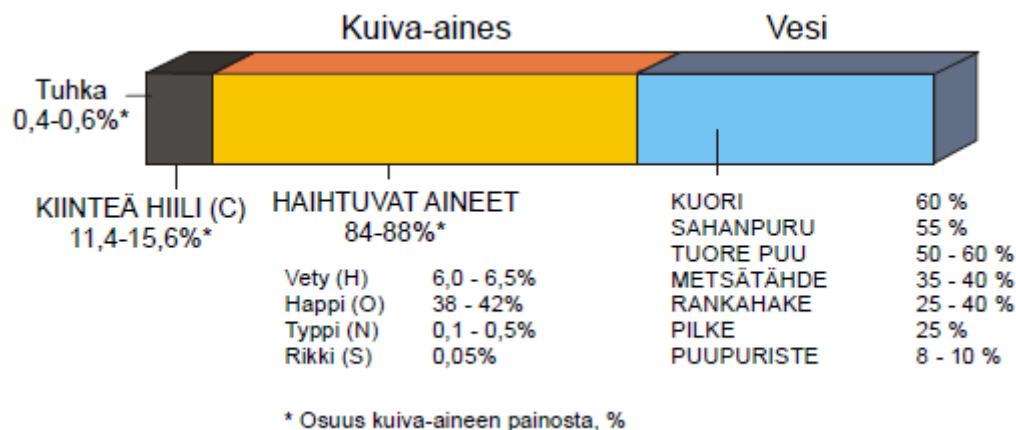
### 4.1 Biopolttoaine

Biopolttoaine on eloperäistä massaa, joka on jalostettu polttoaineeksi ja josta saatua energiaa sanotaan bioenergiaksi. Biomassaa voidaan kuivattaa ja polttaa sellaisenaan tai siitä voidaan jalostaa erilaisia polttoaineita. Suomessa biopolttoaineiden raaka-aineet ovat peräisin muun muassa metsästä (esim. metsähakkuujäte), maataloudesta tai yhdyskuntajätteestä. Maataloudesta saadaan esimerkiksi peltobiomassaa, joka koostuu pelloilla ja soilla kasvatetuista energiakasveista sekä niiden osista. Tällaisia kasveja ovat muun muassa ruokohelpi, öljykasvit sekä viljakasvien osat kuten olki. Puuperäisiä polttoaineita ovat puolestaan hakkuujäte, halot, pelletit, hake ja lastut. (6, s. 124; 7.)

Biopolttoaineiden käyttö hillitsee ilmastonmuutosta, sillä poltetun biomassan tilalle kasvatetaan uusia kasveja sitomaan ilmakehän hiilidioksidia. Biopolttoaineet aiheuttavat lähes yhtä paljon hiukkas- ja typpipäästöjä kuin kivihilli, mutta rikkipäästöt ovat yleensä vähäisemmät. Poltossa syntyvää tuhkaa voidaan käyttää hyödyksi samoin kuin kivihiilen tuhkaa. (6, s. 124; 7.)

#### 4.1.1 Hake

Puupolttoaine on kiinteää biomassaa, joka on peräisin puun rungosta, oksista ja juurista. Polttamalla vapautetaan puuhun sitoutunut energia, jota voidaan käyttää hyödyksi lämmön- tai sähköntuotannossa. Puu on uusiutuva energianlähde ja sen ei ajatella lisäävän hiilidioksidipäästöjä palamisprosessissa, sillä puuhun sitoutuneen ja sitoutuvan hiilen katsotaan kuuluvan hiilen luonnonkiertoon. Kuivan puun lämpöarvo on noin 19 MJ/kg. Lämpöarvo on riippuvainen puupolttoaineen tuhkapitoisuudesta sekä siitä, mistä puunosasta polttoaine on valmistettu. Kuvassa 9 esitetään puun keskimääräinen koostumus. (3, s. 29; 4, s.24–25; 8; 9.)



KUVA 8. Puun koostumus (9, s. 37)

Hake on kotimaista, puhdasta ja uusiutuvaa bioenergiaa. Se on hakkurilla mekaanisesti hakettua puuta, jota voidaan valmistaa karsitusta ja karsimattomasta kokopuusta (kokopuuhaake), hakkuutähteistä, kannoista ja muusta puujätteestä. Hakkeen valmistukseen löytyy siis valtavasti puumateriaalia, minkä vuoksi sen käyttö energiantuotannossa on edullista. Hake sisältää suuren energia-arvon oikein kuivattuna ja poltettuna ja sen monivaiheinen prosessiketju vaikuttaa merkittävästi työllistymiseen kotimaassa. (8; 9, s. 48.)

Kokopuuhaaketta käytetään yleensä pienemmissä lämmöntuotantoyksiköissä, kuten kotitalouksien lämpökattiloissa. Se valmistetaan teollisuudelle kelpaamattomasta pienpuusta tai hukkarunkopuusta, jota ei karsita. Rankahake, joka soveltuu myös pienten laitosten polttoaineeksi, valmistetaan puolestaan karsitusta runkopuusta. Taulukossa 1 näkyy eri puulajien koko- ja rankapuun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo. (9, s. 59.)

TAULUKKO 1. Rangan ja kokopuun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo eri puulajeille (9, s. 63)

Puulaji	Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa MJ/kg	
	Ranka	Kokopuu
Mänty	19,33	19,53
Kuusi	19,02	19,29
Hieskoivu	19,19	19,30
Rauduskoivu	19,15	19,21
Harmaaleppä	19,00	19,18
Tervaleppä	19,31	19,31
Haapa	18,65	18,65

Pienlämmityskohteiksi luokitellaan 20 kW–200 kW:n suuruiset yksiköt. Pienemmissä laitoksissa polttoaineen laatuvaatimukset ovat tiukemmat kuin isommissa laitoksissa: hakkeen kosteuden on oltava alhaisempi ja palakoko tasaisempi. Mikro-CHP-laitoksen polttoaineeksi onkin suunniteltu nimenomaan haketta, joka on valmistettu koko- tai rankapuusta. Hakkeen käytön etuihin kuuluu myös sen helppo käytettävyys puulämmityksessä: se mahdollistaa lämmityksen automatisoinnin lähes täydellisesti. Nykyaikaiset hakelämmitykset ovat yhtä huolettomia ja helppoja käyttää kuin esimerkiksi öljylämmitys. Hakkeen käyttö lämmön ja sähkön erillistuotannossa on kasvanut merkittävästi Suomessa ja se sopii erittäin hyvin myös lämmön ja sähkön yhteistuotannon eli CHP-laitosten polttoaineeksi. (8; 9, s. 59.)

Hyvälaatuiselle hakkeelle on kolme määritelmää: kosteusarvo, palakoko ja laadun tasaisuus. Hakkeen kosteusprosentti vaikuttaa puusta saadun lämpöenergian määrään, sillä liian kostea hake palaa huonosti ja energiaa kuluu veden haihduttamiseen. Hyvälaatuisen hakkeen kosteus on alle 30 %, jolloin energia-arvo on parempi ja hake ei pääse esimerkiksi homehtumaan. Kuten taulukosta 2 nähdään, puun eri osien kosteus vaihtelee huomattavasti, minkä vuoksi myös eri haketyyppien kosteus voi vaihdella paljon. Palakoko ja hakkeen laatu vaikuttavat puolestaan lämmöntuotanto-yksikön luotettavaan toimintaan. Yleensä hakkeen palakoko vaihtelee 5–50 mm. Runkopuusta haketettu hake on laadultaan ja palakooltaan tasaisempaa kuin esimerkiksi puujätteestä haketettu hake. Heikkolaatuisen hakkeen käytöllä on useita ongelmia: kattilan nokeaminen, tuhkan kertyminen, korkeammat päästöarvot, lämpöhäviö, itsestään syttyminen, kasvavat kuljetuskustannukset, lisääntynyt sähkönkulutus ja huono lämpöhyötysuhde. (8; 9, s. 48.)

TAULUKKO 2. Havupuiden eri osien kosteuspitoisuudet (9, s. 42)

Puun osa	Kosteuspitoisuus, p-%	
	Mänty	Kuusi
Runkopuu	45–50	40–60
Oksat	50–56	42–46
Latva	60	60 (50*)
Kuori:		
Kaarna	36–60	38–58
Muu kuori	53–67	47–63

\*Pohjois-Suomen kuuset

Hakkeen tiiviys tarkoittaa kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhdetta eli sitä, kuinka monta kiintokuutiota tulee yhdestä irtokuutiosta. Se on kosteuden jälkeen merkittävä epävarmuustekijä hakkeen käytössä. Tiiviys voi vaihdella paljon, sillä siihen vaikuttavia tekijöitä ovat haketuksen, murskauksen ja kuljetuksen tekniset ratkaisut: palakoko, palan muoto, puulaji, oksat, kosteus, vuodenaika, kuormausmenetelmä ja painuminen. Palakoko on yleensä epäyhtenäinen ja kuormauksen sekä kuljetuksen aikana pienemmät palaset täyttävät suurempien palasien välisiä ilmatiloja, mikä tekee hakkeesta tiiviimpää. Hauraista puulajeista haketettu hake sisältää enemmän hienojauhetta, mikä lisää tiiviyyttä. Tuoreista oksista syntyy hakkurissa puolestaan liian pitkiä kapaleita, mikä vähentää hakkeen tiiviyyttä. (9, s. 48, 54.)

Haketettava puu, puun koko ja polttoaineen kulutus vaikuttavat haketuksen toteutustapaan. Kuorma-auton päällä olevaa rumpuhakkuria tai traktorikäyttöistä hakkuria käytetään silloin, kun polttoaineen kulutus on suuri ja haketettava raaka-aine metsätähdettä tai kokopuuta. Kyseiset hakkurit pystyvät hakettamaan puuta useita satoja kuutioita kerralla. Kohteet, joissa kulutus on pienempi, voidaan käyttää esimerkiksi pieniä traktorihakkureita, jotka hakettavat raaka-aineen suoraan siiloon. Nämä hakkurit on suunniteltu hakettamaan puhdasta ja pientä rankapuuta, jonka halkaisija voi olla enintään 25 cm. Haketta voi hankkia myös valmiiksi haketettuna. (8; 9.)

Hakevarasto sijoitetaan yleensä lämmöntuotantoyksikön läheisyyteen, jos se vain on mahdollista. Kooltaan varasto on kulutukseen ja haketuskertojen määrään verrannollinen. Yleensä varasto on niin suuri, että sinne mahtuu vähintään puolen vuoden polttoaineet. Jos tällainen varasto ei ole mahdollinen, hake välivarastoidaan esimerkiksi katettuun siiloon, jossa lattia on betonia tai asfalttia. Lattian materiaalin avulla vältetään epäpuhtauksien, kuten hiekan ja kivien joutumista hakkeen sekaan. (8; 9.)

#### **4.1.2 Puubriketit ja pelletti**

Puubriketin raaka-aineina käytetään kuivaa purua, hiontapölyä sekä kutterinlastua. Briketti valmistetaan puristamalla, eikä puristeeseen käytetä yleensä sideaineita, sillä puun omat ainesosat pitävät sen koossa. Yleensä puubriketti on muodoltaan pyöreä tai neliö ja sen halkaisija on noin 50–80 mm. Pyöreän briketin sisällä voi myös olla reikä, joka on halkaisijaltaan noin 10–20 mm. Puubriketti on hyvin kuiva polttoaine muihin polttoaineisiin verrattuna, sillä sen kosteus on puristamisen aikana alle 15 %. Keskimäärin briketissä on kuiva-ainemassaa 1000 kg/i-m<sup>3</sup>, sen

lämpöarvo on noin 4,8 kWh/kg, kosteus noin 6 % sekä tuhkapitoisuus noin 0,5 %. Taulukosta 3 nähdään esimerkkinä sahanpurusta valmistetun sylinterimäisen puubriketin ominaisuuksia. (9, s. 74.)

TAULUKKO 3. Sahanpurusta valmistettujen sylinterimäisten puubrikettien ominaisuuksia (9, s.77)

	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg	Kosteus valmistusvaiheessa, %	Haihtuvat aineet, %	Tuhkapitoisuus, %
Puubriketti	18,93 ka keskihajonta 0,19	5,4 keskihajonta 0,4	83,6 keskihajonta 0,7	0,3

ka = keskiarvo

Puupelletit ovat puolestaan sylinterimäisiä tai neliömäisiä rakeita, jotka valmistetaan puristamalla esimerkiksi teollisuuden puutähteistä, kuorista sekä metsähakkeesta. Niiden halkaisija on yleensä noin 8–12 mm ja pituus 10–30 mm. Pellettien tehollinen lämpöarvo on 4,6–4,9 kWh/kg, kosteus 8–10 %, tuhkapitoisuus 0,3–0,5 % sekä irtotiheys 600–700 kg/i-m<sup>3</sup>. Pellettoitaessa puun ihannekosteudeksi katsotaan 10–15 %. (9, s. 76.)

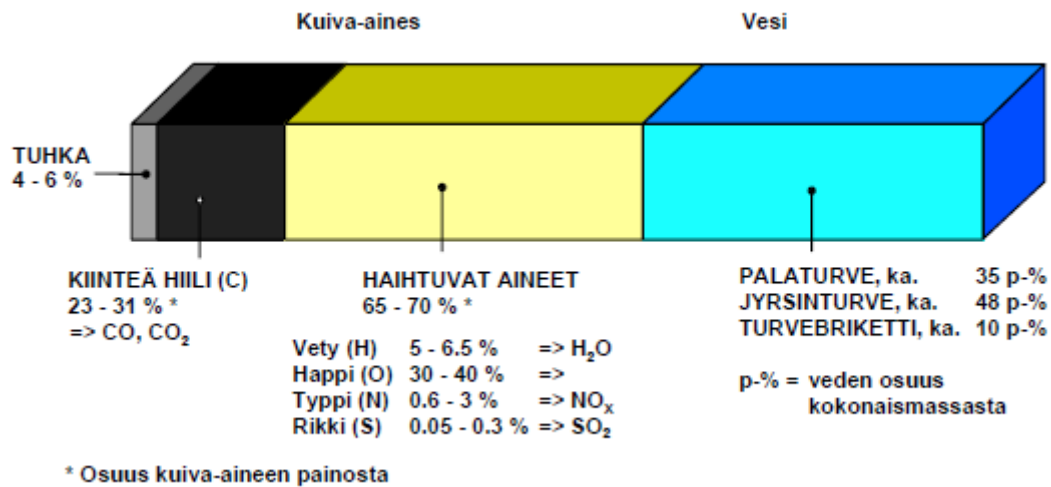
Puupelletit sopivat hyvin esimerkiksi maatilojen, pientalojen sekä suurkiinteistöjen lämmityspolttoaineeksi. Pellettien käyttö vaatii kuitenkin erityisesti pellettien polttoa varten suunnitellun laitteiston. Myös asianmukainen varastointi täytyy ottaa huomioon pellettiä käytettäessä: ne kestävät kosteutta huonosti, sillä ne turpoavat ja hajoavat kostuessaan. Pellettiä voidaan käyttää polttoaineena myös isoissa voimalaitoksissa, joissa se yleensä murskataan ennen kattilaan syöttämistä. (9, s. 76–77.)

Hakkeeseen verrattuna puupellettien ja -brikettien käyttö polttoaineena on voi olla huomattavasti kalliimpaa: raaka-ainetta ei ole niin paljon saatavilla kuin hakkeella ja sen puristaminen on kalliimpaa kuin haketus. Pellettien ja brikettien varastointi voi tulla myös kalliimmaksi, sillä ne reagoivat haketta voimakkaammin kosteuteen. Niiden käyttö polttoaineena voi vaatia myös monimutkaisempaa polttolaitteistoa, mikä puolestaan voi nostaa lämmöntuotantoyksikön investointikustannuksia.



### 4.1.3 Turve

Turve on suolla hapettomissa olosuhteissa syntynyt eloperäinen maalaji, joka sisältää vaihtelevan määrän maatumattomia ja huonosti maatumia, karkeita kasvinosia. Sen katsotaan olevan hitaasti uusiutuva energianlähde, jota hyödynnetään Suomessa laajasti polttoraaka-aineena. Suomessa käytetään pääturvelajien luokitusta kasvitieteellisen koostumuksen perusteella. Päälajeja ovat rahkaturpeet, saraturpeet sekä ruskosammalturpeet. Yleensä turvelaji koostuu kahdesta pääturvelajista. Kuvassa 10 on polttoturpeen keskimääräinen koostumus. (3, s. 31; 4, s. 26; 9, s. 87.)



KUVA 9. Turpeen koostumus (\*osuus kuiva-aineesta) (9, s. 90)

Pääosa turpeesta on hiiltä, keskimäärin noin 53–56 %. Hiilipitoisuuden vaikuttavia tekijöitä ovat maatumisaste sekä turvelaji. Maatumisaste vaikuttaa myös turpeen sisältämien aineiden määrään: maatumisasteen kasvaessa ligniinin määrä kasvaa, kun taas selluloosan ja heliselluloosan pitoisuudet alenevat. Yleisesti turpeessa on vetyä 5–6 %, happea 30–40 %, rikkiä alle 0,3 % sekä typpeä 0,6–3 %. Turpeessa on vähemmän haihtuvia aineita kuin puussa, minkä vuoksi turpeen tehollinen lämpöarvo on suurempi kuin puulla. Lämpöarvoon vaikuttavia tekijöitä ovat myös turvelaji, maatumisaste sekä hiili- ja tuhkapitoisuus. Yleisesti turpeen tuhkapitoisuus on 2–10 %. (9, s. 88–90.)

### 4.1.4 Peltobiomassa

Peltobiomassoista kiinteässä olomuodossa poltettavaksi soveltuvat esimerkiksi olki, energiaheinä, jyvät, bagasse (sokeriruo'on puristejäte) sekä rapsikakku. Oljella ja jyvillä on erilaiset palamisominaisuudet, minkä vuoksi niitä poltetaan erikseen. Olkea voi käyttää hyvin laajasti maatilojen,

pientalojen sekä maaseudun taajamien lämpökeskusten polttoaineena. Polttamiseen tarvitaan kuitenkin olkea varten suunniteltu kattila: olkikattilan arinan pitäisi toimia sekä sulalla että sulamattomalla tuhalla ja tuhkanpoistolaitteen pitäisi pystyä käsittelemään uudelleen jähmettyynyttä sekä sulamatta jäänyttä tuhkua. Tämän vuoksi oljen käyttö kyseisessä mikro-CHP-laitoksessa voi osoittautua liian haastavaksi. Taulukossa 4 esitellään olkilajien lämpöarvoja ja tuhkapitoisuuksia. (9, s. 98.)

TAULUKKO 4. Erialaisten olkien lämpöarvo ja tuhkapitoisuus (9, s. 98)

Ominaisuus	Ruis	Vehnä	Ohra	Kaura	Viljan olki yleensä
Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa p-%	4,5	6,5	4,5-5,88	4,9	5
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg	17,0	17,8	17,4	16,7	17,4
Tehollinen lämpöarvo 20 % käyttökoosteudessa, MJ/kg	13,6	13,8	13,4	12,9	13,5

Oljen käytössä on myös muita ongelmia: sen tilavuus hankaloittaa varastointia sekä tekee kuljetuksen kalliiksi muihin polttoaineisiin verrattuna. Tämän vuoksi polttoaineeksi tarkoitettua oljesta valmistetaan suurpaaleja, kovapaaleja, silppua, jauhetta tai puristetta. Olki ja puu ovat samankaltaisia polttoaineita muutamaa ominaisuutta verrattaessa: alkuainesisältö sekä tehollinen lämpöarvo (oljen kuiva-aineella 16,7–17,8 MJ/kg) ovat hyvin samanlaiset. Ne sisältävät myös paljon haihtuvia aineita, minkä vuoksi palo tapahtuu pitkällä ja valaisevalla liekillä, mikä puolestaan vaatii laajan tulipesän. Oljella on kuitenkin pieni energiatiheys ja suuri tuhkapitoisuus (yleisesti noin 4–7 % kuiva-aineessa), mikä tekee siitä ongelmallisen polttoaineen. Tuhkan ominaisuudet vaihtelevat suuresti viljalajin, kasvupaikan sekä lannoituksen mukaan. (9, s. 98–99.)

Viljanjyvillä on myös lähes sama lämpöarvo kuiva-ainekiloa kohti kuin oljella ja puulla. Erityisesti kauranjyvät palavat kuten olki, sillä niissä on paljon kuorta. Yleensä jyvät poltetaan sellaisenaan tai jauhettuna. Esimerkiksi ohran jyvän tehollinen lämpöarvo on 16,2 MJ/kg ja sen tiheys on 536 kg/m<sup>3</sup>. (9, s. 98.)

Ruokohelpi on monivuotinen heinäkasvi, joka kasvaa luonnonvaraisena Suomessa. Sillä on korkea biomassasato eli polttoraaka-aineen saatavuus on hyvä. Luontaisia kasvupaikkoja sillä ovat järvien

ja meren rannat sekä ojat ja tienpientareet. Samoin kuin oljella, ruokohelven polttoaineominaisuuksiin vaikuttavat kasvilajike, kasvupaikka ja -alusta, lannoitus sekä korjuuajankohta. (9, s. 104; 10.)

Energiäkäytössä voidaan hyödyntää ainoastaan ruokohelven korsiosa, eikä lehtiä tai kukintoja, joiden tuhkapitoisuus energiakäyttöön on liian suuri. Korsien osuus sadosta on suurimmillaan keväällä, jolloin myös haitallisten aineiden pitoisuus on alimmillaan: keväällä ruokohelven rikki- (0,19 %), typpi- ja klooripitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä syksyyn verrattuna. Tämän vuoksi ruokohelpi korjataan energiakäyttöön yleensä keväällä. Raskasmetallipitoisuudet ovat kuitenkin suuremmat kevätkorjatulla ruokohelvellä. Myös ruokohelven pehmenemispisteessä on eroja: syyskorjatulla se on vain 820 °C, kun kevätkorjatulla se on 1125 °C. Tämänkaltaisen polttoaineen laadun vaihtelu aiheuttaa suuria polttoteknisiä ongelmia, minkä vuoksi myös ruokohelven käyttö polttoaineena kyseisessä mikro-CHP-laitoksessa voi olla hyvin haastavaa. Ruokohelpeä käytetäänkin lähinnä suurimpien voimalaitosten kattiloissa. (9, s. 104; 10; 11, s. 7.)

#### **4.1.5 Seospoltto**

Seospoltolla tarkoitetaan polttotapaa, jossa pääpolttoaineeseen lisätään sivupolttoainetta, minkä avulla palamisprosessia saadaan tehostettua ja parannettua. Suomessa käytetään seospolton raaka-aineina yleensä puuta, turvetta ja peltobiomassoja. Puupolttoaineiden yleisenä ongelmana on vaihtelu laadussa ja saatavuudessa, kun taas turve on tasalaatuista ja kestää pitkääkin varastointia. Myös vakaa hintataso lukeutuu turpeen etuihin. Seospolton avulla voidaan varmistaa, että polttoainetta on aina saatavilla ja sen energiateho on riittävä kylmänäkin aikana. Seospolton tarve korostuu kuitenkin erityisesti suurissa voimalaitoksissa. Seospoltto voi olla hyödyllistä myös pienissä lämmöntuotantoyksiköissä: metsähake vaatii yleensä rinnalleen toisen peruspolttoaineen, johon voidaan turvautua tarvittaessa. (12.)

Puun ja turpeen seospoltto vaikuttaa myönteisesti polttotekniikkaan, sillä yhdessä ne palavat puhtaammin, mikä vähentää tehokkaasti hiilidioksidipäästöjä. Seospolton periaatteena on myös säästää kattilaa yhdistämällä rikki- ja alkalipitoinen polttoaine: palamisessa syntynyt rikkitrioksidi (SO<sub>3</sub>) muodostaa alkalien kanssa sulfaatteja, mikä vähentää alkalikloridien muodostumista. Alkalikloridit, jotka ovat lämpöpintojen korroosiota aiheuttavia suoloja, muodostuvat polttoaineen kloorin

(Cl) vapautuessa polton yhteydessä. Klooria löytyy yhteyttävistä kasvinosista, sillä se toimii yhteyttämisen apuna. Turpeen käyttö pääpolttoaineen rinnalla vähentää myös tuhkan paakkuutumisen aiheuttamia käyttöhäiriöitä sekä kattilan nuohouksen tarvetta. (12.)

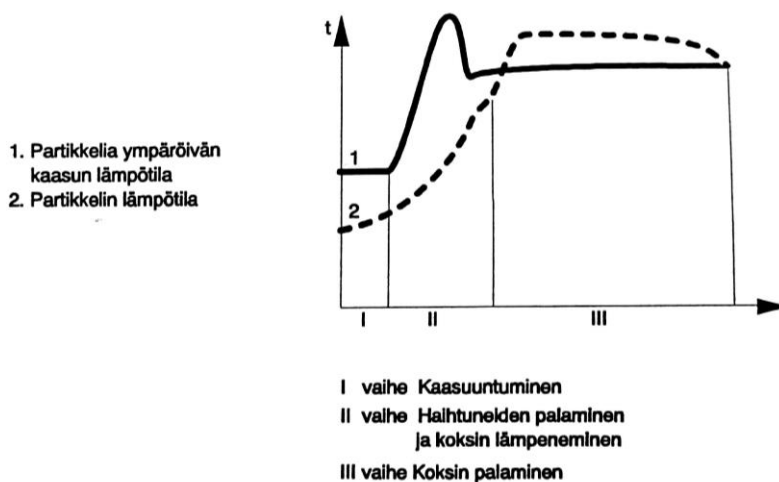
Peltobiomassoja voidaan myös käyttää seospoltossa puupolttoaineen kanssa ja rikkiptoisena polttoaineena ne toimivat seospoltossa turpeen kaltaisesti. Peltobiomassan ja puun seospoltto voi alentaa polttoaineseoksen kokonaiskosteutta, sillä yleensä puun kosteus on varsin suuri esimerkiksi ruokohelpeen verrattuna. Yleensä ruokohelven osuus tällaisessa seospolttoaineessa voi olla noin 10–15 %, mikä riippuu kuljettimien ja kattilan rakenteesta. Peltobiomassoja käytettäessä seos täytyy sekoittaa huolellisesti, sillä kunnollinen palaminen edellyttää tasalaatuista polttoaineseosta. Yksinään peltobiomassoja ei kannata yleensä käyttää polttoaineena, sillä ne palavat nopeasti aiheuttaen korkean lämpötilan ja vaativat peltobiomassojen polttoon erikoistetun voimalaitoksen. (10, s. 18.)

Turve on peltobiomassoja järkevämpi vaihtoehto seospolttoaineena, jos mikro-CHP-laitoksen kattila suunnitellaan seospolttoon sopivaksi. Peltobiomassojen käyttö voi vaatia niiden polttoon suunniteltuja kuljettimia ja arinaa, mikä nostaa yksikön investointikustannuksia. Myös varastointi voi olla peltobiomassojen käytössä ongelmana, sillä ne reagoivat turvetta herkemmin kosteuden kanssa. Kunnollisen sadon ja laadun saaminen on peltobiomassoilla epävarmaan, sillä ne ovat riippuvaisia muun muassa viljelyolosuhteista. Turve kestää puolestaan pitkäänkin varastointia, sitä on runsaasti saatavilla vuoden ympäri ja sen hintataso on vakaa.

## **4.2 Kiinteän polttoaineen palaminen**

Palamisreaktiossa aine yhdistyy happeen vapauttaen paljon lämpöä. Hapen kanssa reagoivia aineita ovat hiili (C), vety ( $H^2$ ), Rikki (S) ja typpi (N). Palaminen on yleensä eksotermisen reaktio, jossa vapautuu kemiallista energiaa. Tämän energian voi havaita lämpönä ja yleensä myös valona. Palamisreaktiossa voi syntyä joko kaasussa tapahtuva ilmiö eli liekkipalo tai ilman liekkiä palava hehkupalo. Liekkipalo tarkoittaa kaasun palamista, joka vaatii syttyvää ainetta, tarpeeksi korkean lämpötilan, tarpeeksi happea ja katkeamattoman ketjureaktion. Hehkupalossa happi yhdistyy puolestaan aineen pinnassa, jolloin katkeamatonta ketjureaktiota ei tarvita. (3, s. 79; 4, s.18; 6, s. 122.)

Kiinteän polttoaineen palamisessa on erilaisia vaihteita, joiden lämpötiloja käydään läpi kuvassa 11. Ensimmäisessä vaiheessa kosteus ja muut haihtuvat aineet poistuvat polttoaineesta ympäristöstä tulevan lämmön vaikutuksesta. Kiinteä ja kostea polttoaine siis kuivataan ennen polttamista siksi, että veden haihduttamiseen kuluisi vähemmän energiaa. Polttoaineen jäännöskosteus poistuu juuri ennen varsinaista polttoa, kun polttoaine lämmitetään hyvin nopeasti noin 400–600 °C:seen. Tällöin myös kaasuuntuvat komponentit haihtuvat polttoaineesta. Toisessa vaiheessa kyseiset komponentit syttyvät palamaan, minkä seurauksena lämpötila nousee ja polttoainehiukkaset alkavat lämmitä. Jos polttoaineessa on paljon kaasuntuvia komponentteja, riittää se sytyttämään myös koksipartikkelit, jotka ovat jääneet jäljelle polttoaineeseen. Viimeisen vaiheen alussa koksipartikkeli syttyy palamaan. Sen lämpötila kohoaa 800–1000 °C:seen, mikä on korkeampi lämpötila kuin ympäristöllä. Tämän vuoksi koksipartikkeli toimii tässä vaiheessa lämmönluovuttajana. Koko paloajasta koksipartikkelin palaminen vie suurimman osan (noin 50–70 %) ja kyseinen aika on riippuvainen muun muassa polttoainehiukkasen koosta ja laadusta. (3, s. 83.)

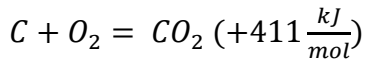


KUVA 10. Kiinteän polttoaineen lämpötilat palamisen eri vaiheissa (3, s. 82)

#### 4.2.1 Palamisreaktiot

Polttoaineessa palavia komponentteja on vain kolme: hiili (C), vety (H<sub>2</sub>) sekä rikki (S). Tämän vuoksi on tunnettava kyseisten aineiden reagointi hapen kanssa. Hiili on yksi yleisimmistä aineissa esiintyvistä alkuaineista ja näin ollen myös yleisimpien polttoaineiden tärkein palava komponentti. (3, s. 83.)

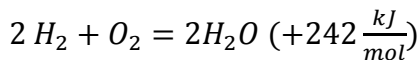
Hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia. Kaava 1 on hiilen nettoreaktiokaava. (3, s. 84.)



KAAVA 1

Yhtälöstä nähdään, että hapen ja hiilen välisessä reaktiossa vapautuu lämpöä 411 kJ/mol. Tämän lisäksi nähdään, että reagoivien aineiden määrasuhteet mooleina: yksi mooli hiiltä vaatii palaakseen yhden moolin happea, ja reaktion tuloksena syntyy yksi mooli hiilidioksidia. (3, s. 84; 4, s. 19.)

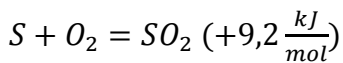
Kaava 2 on vedyn palamisen nettoreaktiokaava. (3, s. 84.)



KAAVA 2

Reaktiosta nähdään, että kaksi moolia vetyä tarvitsee palaakseen yhden moolin happea, ja reaktiosta syntyy kaksi moolia vettä. Lämpöä kyseisessä reaktiossa vapautuu 242 kJ/mol. (3, s. 84; 4, s. 20.)

Kaava 3 on puolestaan rikin palamisen nettoreaktiokaava. (3, s. 84.)



KAAVA 3

Rikki muuttuu palamisreaktiossa melkein täydellisesti rikkidioksidiksi. Reaktiossa vapautuu lämpöä 9,2 kJ/mol. Osa rikistä voi kuitenkin reagoida edelleen rikkiatrioksidiksi (SO<sub>3</sub>), joka voi muodostaa veden kanssa rikkihappoa. Rikkihappo on korroosiota aiheuttava komponentti, minkä vuoksi se voi olla hyvin haitallinen esimerkiksi kattilan lämpöpinnoille. (3, s. 84; 4, s. 20.)

Polttoaineissa on myös komponentteja, jotka vaikuttavat palamiseen, mutta eivät itsessään pala. Kyseisiä komponentteja ovat happi, tyyppi, kosteus ja tuhka. Esimerkiksi polttoaineen sisältämä happi vähentää palamisilman määrän tarvetta. Kosteus puolestaan pienentää polttoaineen lämpöarvoa höyrystymällä ennen palamista. Myös tuhka heikentää polttoaineesta saatavaa tehoa, minkä lisäksi se likaa kattilan lämpöpintoja vaikuttaen näin myös lämmönsiirtoon. Polttoaineessa oleva tyyppi voi muodostaa palamisreaktiossa ympäristölle haitallisia yhdisteitä. (3, s. 84.)

## 4.2.2 Palamisilman tarve ja savukaasut

Palamisreaktiossa tarvittavan palamisilman tarve lasketaan yleensä yhtä polttoainekiloa kohti. Tu-loksena saatavia palamisilman kulutuslukuja voidaan käyttää ilmantarpeen määrittämiseen, kunhan tiedetään kattilan tarvitsema polttoainemäärä. (3, s. 84.)

Palamisilmantarpeen laskenta aloitetaan määrittämällä polttoaineen koostumus sekä palavien komponenttien ja hapen väliset reaktiot. Polttoaineen koostumus merkitään yleensä grammoina tai kiloina polttoainekiloa kohti. (3, s. 84.)

Polttoaineen palamiseen tarvittava happimäärä saadaan palavien komponenttien ja hapen välisistä reaktioyhtälöistä: reaktiosta nähdään, kuinka monta moolimäärää happea palava komponentti tarvitsee palaakseen täydellisesti. Kaavan 4 avulla saadaan laskettua polttoaineen palamisen tarvitsema happimäärä teoreettisessa palamisessa. (3, s. 85.)

$$\frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} = n_C + \frac{1}{2} \times n_{H_2} + n_S - n_{O_2} \quad \text{KAAVA 4}$$

$N_{O_2(teor)}/m_{pa}$  = teoreettinen hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$n_C$  = hiilen palamiseen tarvittava hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$n_{H_2}$  = vedyn palamiseen tarvittava hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$n_S$  = rikin palamiseen tarvittava hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$n_{O_2}$  = polttoaineessa olevan hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

Palamiseen tarvittava happi saadaan puolestaan ilmasta, joka sisältää myös muita kaasuja, kuten typpeä. Argon sisältyy yleensä typen osuuteen, jolloin happea on ilmassa 21 % ja typpeä 79 %. Palamisreaktion tarvitseman happimäärän avulla voidaan laskea polttoaineen palamiseen tarvittava teoreettinen kuiva ilmamäärä (kaava 5): (3, s. 85.)

$$\frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \times \frac{1}{0,21} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \times 4,76 \quad \text{KAAVA 5}$$

$N_{i(teor)}/m_{pa}$  = teoreettinen ilmamäärä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$N_{O_2(teor)}/m_{pa}$  = teoreettinen hapen määrä (mol/kg<sub>pa</sub>)

Todellinen palamisessa käytettävä ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Palamisilman suhteellinen kosteus on yleensä 40–60 %. Polttoaineen täydellistä palamista ei kuitenkaan saavuteta teoreettisella minimi-ilmamäärällä, vaan palamisilmaa on syötettävä tulipesään hieman sitä enemmän. Ilmakerroin ( $\lambda$ ) kuvaa käytetyn todellisen ilmamäärän suhdetta teoreettiseen ilmamäärään. Todellinen ilmamäärä saadaan laskettua kaavalla 6. (3, s. 86.)

$$\frac{N_{i(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} \times \lambda \quad \text{KAAVA 6}$$

$N_{i(tod)}/m_{pa}$  = todellinen ilmamäärä (mol/kg<sub>pa</sub>)

$\lambda$  = ilmakerroin

Vaikeammin poltettavat ja kiinteät polttoaineet tarvitsevat suuremman ilmaylimäärän palaakseen kuin kaasumaiset tai nestemäiset polttoaineet. Puujätteen (kosteus 60 %) polton tyypillinen ilmakerroin on 1,15–1,50. Mikro-CHP-kattilassa poltettava hake on kuivempaa kuin puujäte yleisesti ottaen, minkä vuoksi ilmakerroin 1,50 voi olla liian suuri. Suuntaa antavan todellisen ilmamäärän määrittämiseen voidaan käyttää siis kyseistä minimi-arvoa eli  $\lambda = 1,15$ . (3, s. 86.)

Palamiseen tarvittavan ilman massavirta saadaan, kun ilmamäärä kerrotaan ilman molekyylipainolla. Tällöin kaava 6 voidaan esittää kaavan 7 muodossa. (3, s. 85.)

$$\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} = \frac{\dot{m}_{i(teor)}}{\dot{m}_{pa}} \times \lambda \quad \text{KAAVA 7}$$

$\dot{m}_i/\dot{m}_{pa}$  = palamisilman massavirta (kg i/kg<sub>pa</sub>)

$\dot{m}_{i(teor)}/\dot{m}_{pa}$  = teoreettinen palamisilman massavirta (kg i/kg<sub>pa</sub>)

$\lambda$  = ilmakerroin

Polttoaineen koostumuksen ja palamisreaktioiden avulla saadaan määritetyksi myös syntyvien savukaasujen koostumus ja määrä. Palamisreaktioiden mukaan palamistuotetta syntyy yhtä monta moolia kuin polttoaineessa on palavaa komponenttia. Palamistuotteiden lisäksi savukaasuissa on ilman mukana tullut typpi, jota tulee 3,76-kertainen määrä palamiseen tarvitseman happeen verrattuna. Savukaasuihin siirtyy myös muut palamattomat komponentit sellaisenaan. Savukaasujen koostumus voidaan esittää seuraavan kaavan 8 muodossa. (3, s. 86.)



$$\frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_C + n_{H_2} + n_S + 3,76 \times \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_n + n_{H_2O} \quad \text{KAAVA 8}$$

Savukaasujen määrä saadaan laskettua kaavalla 9, kun tunnetaan syntyvien savukaasujen määrä sekä ilmantarve teoreettisessa palamisessa, jolloin ilmakerroin on 1. Kaava perustuu siihen, että ilmakertoimen suurentuessa palamisessa syntyvän savukaasun virta pysyy samana, mutta teoreettista suurempi ilmamäärä siirtyy savukaasuihin. (3, s. 87.)

$$\frac{N_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) \times \frac{N_i(teor)}{m_{pa}} \quad \text{KAAVA 9}$$

### Adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella lämpötilalla tarkoitetaan teoreettisessa palamisessa saavutettavaa korkeinta lämpötilaa. Se on saavutettavissa, jos liekistä ei siirry lämpöä ympäristöön. Tämä tarkoittaa sitä, että palamisprosessissa syntyvä lämpöenergia kuluu kokonaan syntyvien savukaasujen lämmittämiseen. Asiaa voidaan tarkastella energiataseen näkökulmasta: kattilan palotilaan tulee polttoainevirta  $m_{pa}$ , jolla on tehollinen lämpöarvo  $H_u$ . Palotilaan tulee myös palamisilmavirta  $m_i$ , jonka lämpötila on  $t_i$ . Energiatase voidaan siis esittää kaavan 10 muodossa. (3, s. 95.)

$$\dot{m}_{pa} \times H_u + \dot{m}_i \times c_{pi} \times t_i = \dot{m}_{sk} \times c_{psk} \times t_{sk} \quad \text{KAAVA 10}$$

$m_{pa}$  = polttoaineen massavirta (kg/s)

$H_u$  = polttoaineen lämpöarvo (kJ/kgpa)

$m_i$  = palamisilman massavirta (kg/s)

$c_{pi}$  = ilman keskimääräinen ominaislämpö (kJ/kgK)

$t_i$  = ilman sisäänmenolämpötila (C)

$m_{sk}$  = savukaasun massavirta (kg/s)

$c_{psk}$  = savukaasun keskimääräinen ominaislämpö

$t_{sk}$  = savukaasun lämpötila eli adiabaattinen palamislämpötila (C)

Kun edeltävä kaava jaetaan polttoaineen massavirralla, saadaan

$$H_u + \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} \times c_{pi} \times t_i = \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}} \times c_{psk} \times t_{sk} \quad \text{KAAVA 11}$$

### 4.2.3 Päästöt

Palamisreaktion seurauksena syntyvät savukaasut sisältävät useita päästökomponentteja. Tavallisimpia päästökomponentteja ovat hiilidioksidi, hiilimonoksidi eli häkä, rikkidioksidi- ja typpidioksidihydriidit. Yli-ilmaisessa palamisessa ylimääräinen happi sekä palamisilman mukana tuleva argon siirtyvät myös savukaasuihin. Happea, argonia, palamistuotteista vettä sekä palamiseen osallistumattomien kaasujen moolityyppiä ei pidetä ympäristölle vaarallisina päästöinä. (3, s. 91; 6, s. 134.)

Hiilidioksidi on tärkeä kasvihuonekaasu: se päästää auringon säteilyn lämpöenergian maahan, mutta ei päästä maasta heijastunutta säteilyä takaisin avaruuteen. Tämän vuoksi maan pinnan lämpötila on riippuvainen kasvihuonekaasujen pitoisuudesta ilmakehässä. Liian suurina pitoisuuksina kyseiset kaasut aiheuttavat ilmaston liiallista lämpenemistä, joka tunnetaan kasvihuoneilmaston lämpenemisenä. Ilman hiilidioksidipitoisuus on lisääntynyt huomattavasti fossiilisten polttoaineiden käytön myötä. (3, s. 94; 6, s. 141.)

Kun palaminen on epätäydellistä eli happea ei ole tarpeeksi läsnä, hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilimonoksidia eli häkää. Savukaasujen häkäpitoisuutta voidaan laskea riittävän suurella yli-ilmamäärällä. Tämä kuitenkin lisää palamisreaktion osallistumattomaa ilmapirtta kattilassa, mikä suurentaa kattilan savukaasuhäviöitä. Häkää muodostuu myös polttoaineen ja palamisilman epätäydellisen sekoittumisen vuoksi. Hiilimonoksidin ei kuitenkaan katsota olevan ympäristölle vaarallista, vaikka se on ihmiselle haitallinen yhdiste. (3, s. 91.)

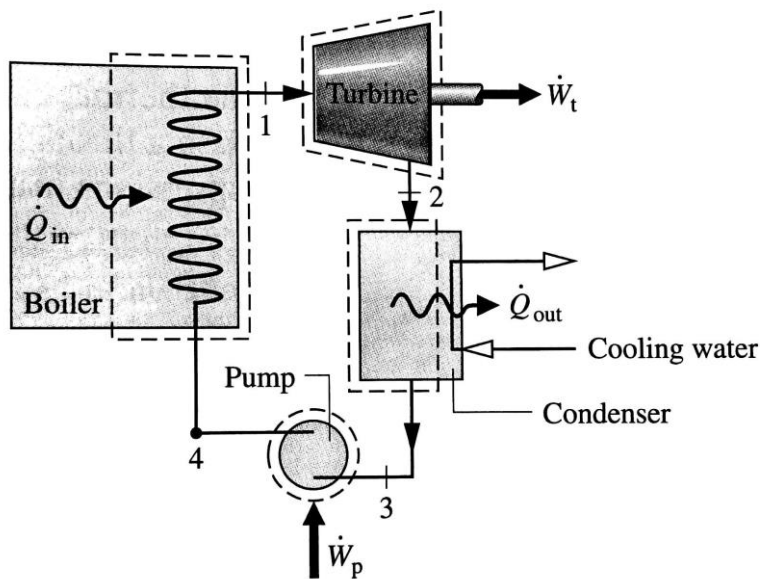
Rikki muodostaa palamisreaktiossa rikkidioksidia, josta pieni osa voi hapettua edelleen rikkitrioksidiksi. Rikkitrioksidi on hyvin haitallinen aine kattilan lämpöpinnoille, sillä se muodostaa veden kanssa syövyttävää rikkihappoa. Hapon muodostumista voidaan kuitenkin ehkäistä pitämällä savukaasujen lämpötila happokastepistettä korkeammalla. Rikkidioksidi on haitallinen päästö myös luonnolle: rikkilaskeumat happamoittavat maaperää ja vesistöjä, mikä voi aikaansaada esimerkiksi kalakannan häviämisen. Pääosa rikkidioksidipäästöistä on peräisin teollisuuden ja voimalaitosten kattilalaitoksista, joissa käytetään rikkipitoisia polttoaineita, kuten polttoöljyä ja hiiliä. Rikkidioksidi voidaan poistaa savukaasusta poltetun kalkin ja veden tai kalkkikivien avulla: rikkidioksidi reagoi kalkin kanssa joko tulipesässä tai savukaasukanavan savukaasupesurissa muodostaen kipsiä eli kidevedellistä kalsiumsulfaattia. (3, s. 92; 6, s. 134.)

Palamisreaktiossa typen oksideja, typpimonoksidia ja typpidioksidia, muodostuu typen ja hapen reagoiessa keskenään. Tulipesässä muodostuu ensin typpimonoksidia, joka voi hapettua typpidioksidiksi, kun lämpötila laskee tarpeeksi. Yleensä typen oksideista puhutaan yhteisnimityksellä NO<sub>x</sub>-päästöt. Typen oksidit happamoittavat ympäristöä samalla tavalla kuin rikkidioksidi, minkä vuoksi niiden pitoisuutta pyritään pienentämään savukaasuista. Keinona siihen käytetään typen oksidien poistamista savukaasuista erilaisilla puhdistusmenetelmillä tai pienentämällä niiden muodostumista tulipesässä polttotekniikan avulla. (3, s. 93; 6, s. 136.)

## 5 MIKRO-CHP-LAITOS

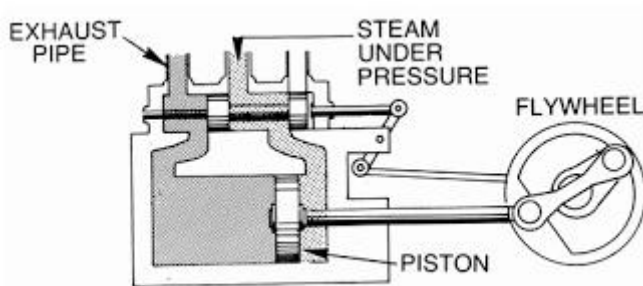
Mikro-CHP-laitos on pienen luokan energiantuotantoyksikkö, joka tuottaa sekä lämpöä että sähköä. Nimi CHP tulee englannin kielen sanasta combined heat and power. Mikro-CHP-laitos soveltuu lämmöntuotantoyksiköksi haja-asutusalueen omakotitalouksiin, jotka haluavat olla omavaraisia energiantuotannon suhteen: laitoksen myötä omakotitalous ei olisi niin riippuvainen esimerkiksi valtakunnallisesta sähkönjakeluverkosta. Mikro-CHP-laitos suunnitellaan kuitenkin aina lämmöntuotannon kannalta, jonka sivutuotteena tulee sähköntuotanto. (13.)

Kuten kuvasta 12 nähdään, voimalaitokseen tarvittavia komponentteja ovat höyrykattila, lämpövoimakone, lämmönsiirrin sekä pumppu. Nämä komponentit pätevät myös mikro-CHP-laitokseen. Lämpövoimakone (turbiini, höyrykone tai Stirling-kone) muuttaa lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi. Kyseisessä mikro-CHP-laitoksessa sitä hyödynnetään sähköntuotannossa. Lämmönsiirrin siirtää puolestaan lämpöenergiaa kattilan vesi-höyrypiiristä lämpimän käyttöveden lämmittämiseen sekä patteriverkostoon. Koska vesi siirtyy höyrykoneen jälkeen eteenpäin höyryn muodossa, mikro-CHP-laitokseen sopii ainoastaan höyry-vesilämmönsiirrin. Lämmönsiirtimessä höyry lauhtuu vedeksi, jonka jälkeen se pumpataan takaisin kattilaan. Mikro-CHP-laitoksessa on siis oltava myös pumppu, joka tuottaa systeemiin tarvittavan paine-eron. (13; 14.)



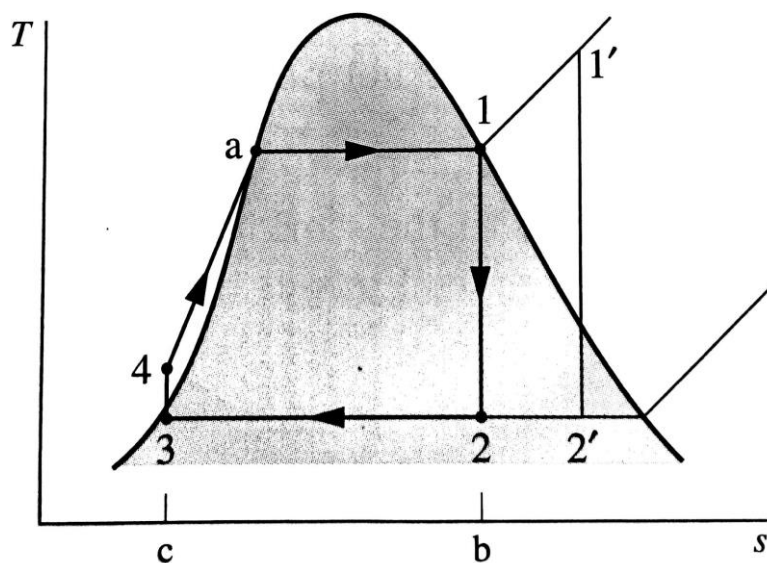
KUVA 11. Energiantuotantoyksikön periaatteellinen työn- ja lämmönsiirto (14, s. 393)

Isommista CHP-laitoksista poiketen mikro-CHP-laitoksessa turbiinin tilalla käytetään yleensä Stirling-konetta. Höyrykone on kuitenkin rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin Stirling-kone, minkä vuoksi se on kustannustehokkaampi valinta. Kuvassa 13 on höyrykoneen toimintamekanismi. Lämpövoimakoneet tarvitsevat aina kiertosysteemin. Seuraavaksi tarkastellaan lähemmin Rankine-kiertoa, joka kuvaa Carnot-kiertoa paremmin CHP-laitoksen vesi-höyrykierron. (13.)



KUVA 12. Höyrykoneen toimintaperiaate (15)

Ideaalinen Rankine-kierto kuvaa nesteen muuttumista kaasuksi ideaaliprosessissa, mikä nähdään kuvassa 14. Prosessin vaiheessa 1–2 tapahtuu nesteen isentrooppinen laajeneminen. Vaiheessa 2–3 lauhduttimessa tapahtuu vakio paineinen lämmön siirtyminen kylläiseksi vedeksi. 3–4. vaiheessa tapahtuu isentrooppinen puristuminen pumpun avulla paineistetun nesteen alueelle. Viimeisessä vaiheessa eli 4–1 höyrykattilassa tapahtuu lämmönsiirto nesteeseen, mikä täydentää Rankine-kierron piirin. (14, s. 395.)



KUVA 13. Ideaalinen Rankine-kierto (14, s. 395)

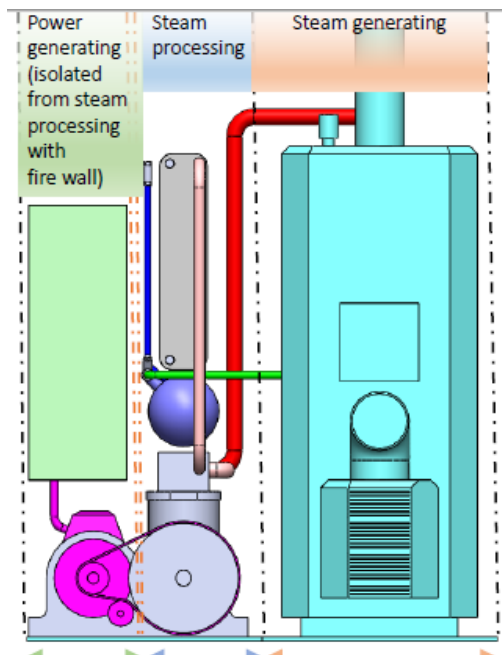
## 6 MIKRO-CHP-LAITOKSEN KATTILA

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia suunnittelua ja mitoitusta höyrykattilalle, joka soveltuu noin 20 kWh lämpöä ja 3–6 kW sähköä tuottavaan yksikköön. Yksikön kokorajoituksena on 600X600X1800 mm tai 600X1200X1800 mm.

Kattilan tulisi olla polttoteknisesti tehokas sekä taloudellinen ja polttoaineena käytettäisiin lähinnä haketta. Hakkeen käyttö, muut mahdolliset biopolttoaineet sekä kiinteän polttoaineen palaminen käytiin läpi työn luvussa 4. Suunnittelussa nousevat esille kattilassa vaadittavan paineen sekä sopivan vesimäärän määrittely. Työssä täytyy ottaa huomioon myös paineastian suunnitteluun vaadittavia asioita.

### 6.1 Rakenne

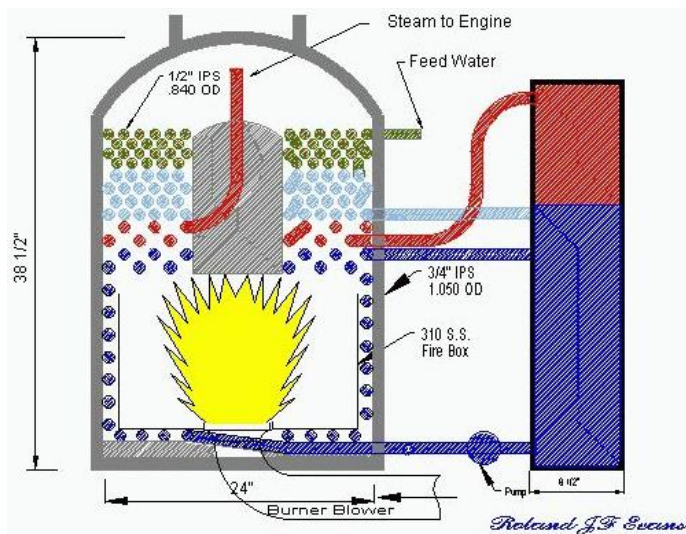
Kattilan rakenne on oltava yksinkertainen mikro-CHP-laitoksen kaltaisessa pienessä lämmöntuotantoyksikössä. Kuvassa 15, joka on saatu opinnäytetyön tilaajalta, esitetään mikro-CHP-laitoksen yksinkertainen mallinnos, jossa näkyy yksikön kaikki tarvittavat komponentit.



KUVA 14. Mikro-CHP-laitos

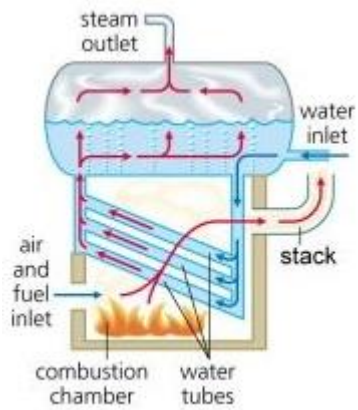
Yksi pienen höyrykattilan oleellisimmista rakenneongelmista on se, millä ratkaisulla vesi-höyrypiiri saadaan olemaan mahdollisimman paljon tekemisissä vettä lämmittävän savukaasun kanssa. Sillä on suora vaikutus kattilan tehoon ja hyötysuhteeseen. Voidaan ajatella, että kattilahäviöt koostuvat pääasiassa savukaasuhäviöistä, minkä vuoksi savukaasujen loppulämpötilan tulisi olla mahdollisimman matala.

Kuvassa 16 on hyvin pienen luokan Lamount-vesiputkikattila, joka on varustettu lieriöllä. Kuten kuvasta nähdään, pienessä kattilassa ei ole suurta tulipesää ja savukaasukanavaa. Tämän vuoksi lämmönsiirtimien sijoittelu on erityisen tärkeää: lähimpänä tulipesää on höyrystinosa, josta vesi-höyryseos menee lieriöön. Lieriön yläosasta kylläinen höyry palaa takaisin kattilan sisälle, minkä jälkeen höyry johdetaan voimakoneelle. Viimeisimpänä lämmönsiirtimenä kattilan yläosassa on syöttöveden esilämmitin, jossa syöttövesi lämpenee ennen kuin se johdetaan lieriön sisälle. Kuvan kattilan halkaisija (noin 600 mm) voisi olla sopiva esimerkiksi 600X1200X1800 mm:n kokoluokan mikro-CHP-laitteistoon. (16.)



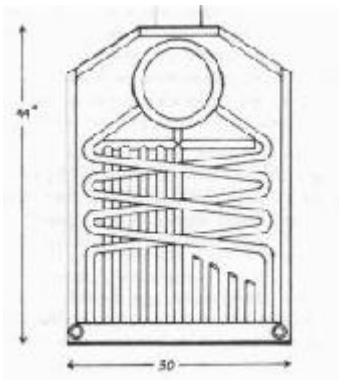
KUVA 15. Pieni Lamount höyrykattila (16)

Vesiputkikattila voi olla myös sellainen, että lieriö on kattilan yläosassa, kuten kuvassa 17. Tässä mallissa putkien asettelu edistää nopeaa vesi-höyrykiertoa. Tämän vuoksi lämpö jakautuu tasaisesti ja lämmönsiirto tiettyä pinta-alaa kohden on suuri. Kyseisessä mallissa räjähdysvaara vähenee huomattavasti pienemmän vesimäärän ja painelieriön koon vuoksi. (17.)



KUVA 16. Lieriöllä varustetun vesiputkikattilan toimintaperiaate (17)

Kuvassa 18 oleva hörykattila, joka on voisi olla myös yksi esimerkki kattilan rakenteelle, on puupolttoaineella toimiva vesiputkikattila, jossa on ison kapasiteetin lieriö. Suorituskyvyltään kyseinen kattila on parempi kuin muut samantyyppiset puuta polttoaineena käyttävät kattilat. Kattila on myös helppokäyttöinen ja se on suunniteltu standardien mukaisesti. (17.)



KUVA 17. 10 HP Roberts-vesiputkikattila (17)

## 6.2 Painelaitesuunnittelu

Erilaiset säiliöt, höyry- ja kuumavesikattilat, varolaitteet sekä paineenalaiset lisälaitteet luetaan painelaitteiksi, joista muodostetaan erilaisia laitekokonaisuuksia. Päätöstä 938/1999 käytetään kaikkiin laitekokonaisuuksiin ja yksittäisiin painelaitteisiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine ylittää 0,5 bar. Tämänkaltaisissa kokonaisuuksissa ja laitteissa täytyy olla CE-merkintä, käyttöohjeet sekä niistä laadittava EY-vaatimustenmukaisuusvakuutus. (18, s. 5.)



Painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnittelussa ja valmistuksessa täytyy noudattaa olennaisia turvallisuusvaatimuksia sekä hyvää konepajakäytäntöä. Turvallisuusvaatimukset koskevat materiaaleja ja asettavat tiettyjä erityisvaatimuksia putkistoille ja kattiloille. Kyseiset turvallisuusvaatimukset löytyvät painelaitedirektiivistä 97/23 EY, joka koskee siis uusien painelaitteiden suunnittelua, valmistusta sekä vaatimuksenmukaisuuden arviointia. Painelaitedirektiivin avulla helpotetaan painelaitteiden ja -laitetekonaisuuksien markkinoille saattamista sekä yhdenmukaustetaan Euroopan unionin lainsäädäntöä. Painelaite luokitellaan tyyppin, maksimikäyttöpaineen, tilavuuden ja sisällön sekä sen vaarallisuuden mukaisesti. Luokittelu esitetään taulukossa 5. (18, s. 5.)

TAULUKKO 5. Painelaitteiden luokittelu (18, s. 6)

1. Painelaitteen tyyppi	Säiliöt				Höyryn tai ylikuumennetun veden tuotannon painelaitteet	Putkistot			
2. Luokitusperuste	PS, V				PS, V	PS, DN			
3. Sisältö	Kaasu		Neste		-	Kaasu		Neste	
4. Sisällön ryhmä	1	2	1	2	-	1	2	1	2
5. Kuva	1	2	3	4	5	6	7	8	9

### 6.2.1 Standardit

Vesiputkikattilat mitoitetaan standardin SFS-EN 12952 mukaisesti. Standardi on jaettu 18 osaan. (19, s. 3.)

- Osa 1: Yleistä
- Osa 2: Kattiloiden ja niiden varusteiden paineenalaisiin osiin tarkoitetut materiaalit
- Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta
- Osa 4: Käytössä olevan kattilan odotettavissa olevan käyttöajan laskenta
- Osa 5: Kattilan paineenalaisten osien rakenne ja valmistus
- Osa 6: Kattilan paineenalaisten osien valmistuksen aikainen tarkastus, dokumentointi ja merkintä
- Osa 7: Vaatimukset kattilan varusteille

- Osa 8: Vaatimukset nestemäisten ja kaasumaisten polttoaineiden polttolaitteistoille
- Osa 9: Vaatimukset pölymäisten polttoaineiden polttolaitteistoille
- Osa 10: Vaatimukset sallitun paineen ylitykseltä suojaaville turvajärjestelmille
- Osa 11: Vaatimukset rajoitinlaitteille ja turvajärjestelmille
- Osa 12: Laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle
- Osa 13: Vaatimukset savukaasun puhdistuslaitteistolle
- Osa 14: Vaatimukset savukaasun typenpoistolaitteistolle (DENOX)
- Osa 15: Vastaanottokokeet
- Osa 16: Vaatimukset kiinteän polttoaineen polttolaitteistoille arina- ja leijupoltossa
- Osa 17: Tekninen raportti CR 12952-17: Vesiputkikattilat – Opas valmistajasta riippumattoman tarkastuslaitoksen toiminnasta
- Osa 18: Käyttöohjeet

Tätä standardisarjaa käytetään yli 2 litran kuuman veden tai höyryn tuottamiseen tarkoitettuihin vesiputkikattiloihin, joiden suurin sallittu paine on enemmän kuin 0,5 bar ja lämpötila yli 110 °C. Standardia sovelletaan myös muihin laitoksen laitteisiin. Osassa 1 esitetään kaikki kattilakokoonpanoon liittyvä osat, kuten vesiputkikattila, johon sisältyy kaikki paineenalaiset osat syöttöveden sisääntulosta höyryn tai kuuman veden lähtöön. Kokoonpanoon kuuluvat siis kaikki tulistimet, välitulistimet ja syöttöveden esilämmittimet sekä niihin liittyvät yhdysputket. Myös putket, joiden tarkoitus on esimerkiksi tyhjennys, ilmanpoisto ja höyryjäähdytys, kuuluvat kokoonpanoon. (19, s. 5.)

Vesiputkikattiloiden kaikki paineenalaiset osat suunnitellaan standardin osan 3 mukaan. Suunnittelussa on otettava kuitenkin huomioon, että standardisarjan jokainen osa on jollakin tapaa kytköksissä toisiinsa. Tämän vuoksi painelaitedirektiivin vaatimusten täytyminen sekä suunnitteluprosessi vaativat enemmän kuin yhden osan soveltamista. (20, s. 10.)

### 6.2.2 Lujuustekninen mitoitus

Painelaitteet on suunniteltava asianmukaisesti niin, että sen turvallisuus voidaan taata käyttöiän ajaksi. Painelaitteet täytyy suunnitella kestävänsä kuormitusta, joka vastaa sen käyttötarkoitusta, ja kohtuudella ennakoitavissa oleviin olosuhteisiin. Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon

- sisäinen ja ulkoinen paine
- ympäristön lämpötila ja käyttölämpötila

- staattinen paine ja sisällön massa käyttö- ja koeolosuhteissa
- liikenteestä, tuulesta ja maanjäristyksestä aiheutuvat kuormitukset
- tukien, kiinnikkeiden, putkiston jne. aiheuttamat vastavoimat ja -momentit
- korroosio, eroosio, väsyminen jne.
- epästabiliilien fluidien hajoaminen. (21, liite 1, kohta 2.1 ja 2.2.1.)

Mikro-CHP-laitoksen kattila on kooltaan hyvin pieni. Painelaitedirektiivissä (97/23/EY) todetaan, että painelaitesuunnittelun on perustuttava liitteessä esiteltävään laskentamenetelmään, jota täydennetään tarvittaessa kokeellisella suunnittelumenetelmällä. Direktiivin mukaan suunnittelu voi perustua myös pelkästään kokeelliseen suunnittelumenetelmään ilman laskentaa, jos suurimman sallitun paineen  $PS$  ja tilavuuden  $V$  tulo on alle 6000 barL tai tulo  $PS \cdot DN$  on alle 3000 bar. (21, liite 1, kohta 2.2.2.)

### **Kokeellinen suunnittelumenetelmä**

Kokeellinen suunnittelumenetelmä tarkoittaa sitä, että painelaitteen suunnittelu voidaan osoittaa vaatimustenmukaiseksi koetusohjelman avulla. Ohjelma on määriteltävä ennen varsinaista koetusta ja se suoritetaan koekappaleella, joka edustaa kyseistä painelaitetta tai -laiteryhmää Ohjelmassa on määriteltävä koetusolosuhteet sekä hyväksymis- ja eväämisperusteet. Ennen koetusta on myös mitattava laitteiden rakenneaineiden ominaisuuksien arvot sekä olennaisia mittoja. Painelaitteen kriittisiä alueita pitää pystyä seuraamaan oikeanlaisilla välineillä koetuksen aikana. (21, liite 1, kohta 2.2.4.)

Koetusohjelmaan on kuuluttava

- paineenkestokoe
- virumis- tai väsymisvaaralle tarkoituksenmukaiset kokeet
- täydentävät kokeet. (21, liite 1, kohta 2.2.4.)

### **Laskentamenetelmä**

Painelaitteen suurinta mahdollista jännitystä on rajoitettava. Rajoitusta tehtäessä täytyy ottaa huomioon ennakoitavissa olevat viat käyttöolosuhteissa, minkä vuoksi varmuuskertoimien käyttö on aiheellista. Varmuuskertoimien avulla voidaan poistaa muun muassa valmistuksesta, käyttöolosuhteista, jännityksestä ja laskentamalleista johtuvat epävarmuustekijät. Painelaitedirektiivin säännöksiä voidaan soveltaa seuraavilla menetelmillä:

- kaavojen mukainen suunnittelu
- analyysin mukainen suunnittelu
- murtumatekniikan mukainen suunnittelu. (21, liite 1, kohta 2.2.3.)

Lujuus on laskettava painaleitteelle tarkoitettujen lujuuslaskelmien avulla. Laskelmissa on otettava huomioon seuraavat asia:

- suunnittelupaineet, joissa on otettava huomioon fluidin dynaamiset ja staattiset paineet sekä epästabiliilien fluidien hajoaminen, eivät saa olla pienempiä kuin suurimmat sallitut paineet,
- varmuusvaran on oltava tarpeeksi suuri suunnittelulämpötiloissa,
- suunnittelussa pitää ottaa huomioon ennakoivissa olevat paineen ja lämpötilan yhdistelmät,
- jännitysten sekä jännityskeskittymien pitää pysyä turvallisissa rajoissa,
- paineenkestolaskelmissa täytyy käyttää riittäviä rakenneaineen ominaisuusarvoja, jotka perustuvat muun muassa riittäviin varmuuskertoimiin. (21, liite 1, 2.2.3.)

Suunnittelupaksuudella pyritään takaamaan riittävä rakenteellinen stabiliteetti. Jos tämä ei onnistu, täytyy ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin, joissa otetaan huomioon käsittelyn ja kuljetuksen aiheuttamat riskitekijät. (21, liite 1, 2.2.3.)

### **Lieriövaipan seinämän paksuus**

Sisäpuolisen paineen kuormittaman sylinterimäisen lieriön tai kammion vaipan paksuuden on täytettävä suurin seuraavista vaatimuksista lisien (kaava 12 ) vähentämisen jälkeen:

- vähintään 9,5 mm kammiolle, jonka ulkohalkaisija on 300 mm tai enemmän
- vähintään 6 mm kammiolle, jonka ulkohalkaisija on alle 300 mm
- kaavan 13 tai 14 avulla laskettu arvo (soveltamalla standardin SFS-EN 12952-3 kohtaa 8.2 tai kohtia 8.3.3 ja 8.3.4)
- SFS-EN 12952-3 kohtien 7.3 (vaipan yhdistetyt jännitykset) ja 7.4 (kattilalieriön tuenta) vaatimukset soveltuvin osin. (20, s. 34.)

$$e_{rs} = e_s - c_1 - c_2$$

KAAVA 12

$e_{rs}$  = runkokappaleen todellinen seinämän paksuus ilman varmuusvaraa (mm)

$e_s$  = runkokappaleen tilattu seinämän paksuus (mm)

$c_1$  = miinustoleranssi tilattaessa nimellisellä seinämän paksuudella (mm)

$c_2$  = kulumislisä (mm)

$$e_{cs} = \frac{p_c \times d_{is}}{(2f_s - p_c) \times v}$$

KAAVA 13

$e_{cs}$  = runkokappaleen laskettu seinämän paksuus ilman varmuusvaraa (mm)

$p_c$  = laskentapaine (MPa, bar)

$d_{is}$  = runkokappaleen sisähalkaisija ilman varmuusvaraa (mm)

$f_s$  = runkokappaleen materiaalin nimellinen suunnittelujännitys (MPa)

$v$  = hitsauskerroin

$$e_{cs} = \frac{p_c \times d_{os}}{(2f_s - p_c) \times v + 2p_c}$$

KAAVA 14

$d_{os}$  = runkokappaleen nimellinen ulkohalkaisija (mm)

Standardin mukaan hitsauskerroin on pienin lujuuskertoimien arvoista, jotka määritetään

- yksittäiselle yhteelle ( $v_b$ ) tai vierekkäisille yhteille ( $v_m$ )
- yksittäisille tai vierekkäisille aukoille pitkittäisessä, vinossa tai poikittaisessa suunnassa.

Pinnoitetta, joka suojaa metallia kulumiselta, ei oteta tässä huomioon. (20, s. 36.)

## Päädyt

Kaava 15 koskee muovattujen päätyjen suunnittelua ja mitoitusta. Siinä ei ole otettu huomioon ulkopuolisten momenttien tai voimien vaikutusta, minkä vuoksi ne otetaan tarvittaessa erikseen huomioon. Tilatun seinämäpaksuuden pitää olla vähintään

$$e_s \geq e_{cs} + c_1 + c_2$$

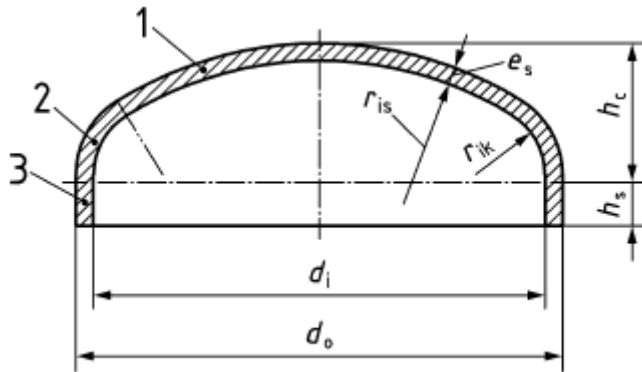
KAAVA 15

Korikaaripäädyn (kuva 19) laskelmissa huomioon otettavat mittojen rajoitukset:

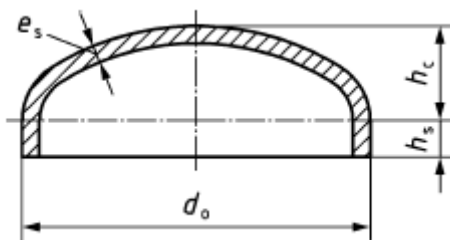
- $r_{is} \leq d_o$
- $r_{ik} \geq 0,1 d_o$
- $r_{ik} \geq 2 e_s$
- $h_s \geq 50$  mm, paitsi jos vaipan halkaisija  $d_o \leq 80$  mm
- $h_c \geq 0,18 d_o$
- $e_s - c_1 = 0,005 d_o$

Puolielliptisen päädyn (kuva 20) rajoitukset:

- $h_s \geq 50$  mm, paitsi jos vaipan halkaisija  $d_o \leq 80$  mm
- $h_c \geq 0,18 d_o$
- $e_s - c_1 = 0,005 d_o$  (20, s. 108.)



KUVA 18. Korikaaripääty (20, s.108)



KUVA 19. Puolielliptinen pääty (20, s. 108)

### 6.3 Lämpötekni­sen mitoituksen periaate

Vesiputkikattilan lämmönsiirtimiä ovat keittoputkisto, tulistin, vedenesilämmitin sekä ilmanesilämmitin. Lämmönsiirto savukaasuista vesi-höyrypiirin veteen tapahtuu johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä. Usein lämpöä siirtyy kaikilla tavoilla samanaikaisesti. (3, s. 184.)

Kun mitoitetaan lämmönsiirintä, täytyy tietää siirrettävä lämpöteho lämmitettävän tai jäädytettävän ainevirran puolelta. Mitoitusta varten pitää tietää myös virtaavien fluidien lämpötilat ennen lämmönsiirintä sekä sen jälleen. Siirtyvä teho on verrannollinen pinta-alaan, lämmönläpäisykertoimeen sekä lämpötilaeroon jäähtyvän ja lämpiävän fluidin välillä. Kaava 16 on lämmönsiirtymisen peruskaava. (3, s. 201–202.)

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

KAAVA 16

$\phi$  = teho (W)

$k$  = lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$A$  = pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = lämpötilaero (K)

Lämmönläpäisykerroin  $k$  on lämmönvastusten käänteisarvo. Rajapintojen lämmönsiirtokertoimet on otettava myös huomioon, kun lämpö siirtyy putken välityksellä savukaasuista veteen. Lämmönläpäisykerroimen arvo saadaan laskettua kaavalla 17. (22, s. 18.)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sk}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}}$$

KAAVA 17

$k$  = lämmönsiirtymiskerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_{sk}$  = savukaasun rajapinnan lämmönsiirtymiskerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$s$  = putken seinämän paksuus (m)

$\lambda$  = putken lämmönjohtavuus (W/mK)

$\alpha_v$  = veden rajapinnan lämmönsiirtymiskerroin (W/m<sup>2</sup>K)

Kaavojen 16 ja 17 avulla saadaan laskettua tarpeellinen lämpöpinta lämmönsiirtimelle. (3, s. 202.)

$$A = \frac{\Phi}{k \times \Delta T}$$

KAAVA 18

Näissä kaavoissa esiintyvän lämpötilaeron eli  $\Delta T$ :n laskemiseen käytetään logaritmista tai aritmeettista lämpötilaeroa. Aritmeettinen tapa on yksinkertaisempi, kun taas logaritminen tapa kuvaa todellista tilannetta paremmin. Logaritminen lämpötila saadaan laskettua kaavalla 19. (3, s. 202.)

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

KAAVA 19

$\Delta T_{ln}$  = logaritminen lämpötilaero (K)

$\Delta T_1$  = lämpötilaero alussa (K)

$\Delta T_2 =$  lämpötilaero lopussa (K)

### 6.3.1 Teho ja massavirrat

Massatase tarkoittaa lämmöntuotantoyksikköön vietyjä ja sieltä poistuvia massavirtoja. Tässä tapauksessa niitä ovat polttoaine eli hake, palamisprosessiin tarvittava palamisilma, savukaasut sekä puun palamistuotteena syntyvä tuhka. Tuhkan osuus on pieni muihin ainevirtoihin verrattuna. Se ei myöskään vie mukanaan lämpöenergiaa. Kattilan massatase esitetään kuvassa 21.



KUVA 20. Höyrykattilan massatase

Kattilan polttoaineteho saadaan laskettua kaavalla 20, kun tiedetään kattilan teho ja arvataan hyötysuhde. Kattiloiden hyötysuhteeseen vaikuttaa olennaisesti esimerkiksi polttoaine ja polttotapa. Tyypillisesti höyrykattilan hyötysuhde on korkea, jopa noin 90 %. Polttoainetehon laskemista varten voidaan siis ajatella, että CHP-laitoksen kattilan hyötysuhde olisi 0,9. (3, s. 104; 22, s. 12.)

$$P_{pa} = \frac{P}{\eta}$$

KAAVA 20

$P_{pa}$  = polttoaineteho (W)

$P$  = teho (W)

$\eta$  = hyötysuhde

Polttoaineen massavirta voidaan laskea puolestaan kaavalla 21, kun tiedetään polttoaineteho sekä polttoaineen tehollinen lämpöarvo. Mikro-CHP-laitoksessa käytetään polttoaineena haketta, mutta hakkeen tehollinen lämpöarvo vaihtelee hieman puulajeittain ja tässä tapauksessa on mahdoton sanoa, mitä puulajia kattilassa mahdollisesti tulisi polttamaan. Tämän vuoksi lasku suoritetaan kuivan puun keskimääräisellä tehollisella lämpöarvolla, joka on 19 MJ/kg. (22, s. 13.)



$$\dot{m}_{pa} = \frac{P_{pa}}{H_u}$$

KAAVA 21

$m_{pa}$  = polttoaineen massavirta (kg/s)

$H_u$  = polttoaineen tehollinen lämpöarvo (kJ/kg)

Polttoaineen massavirran avulla saadaan puolestaan laskettua savukaasun massavirta. (22, s. 13.)

$$\dot{m}_{sk} = \dot{m}_{pa} \times \left[ \frac{m_{sk}}{kg_{pa}} + (\lambda - 1) \times \frac{m_i}{kg_{pa}} \right]$$

KAAVA 22

$m_{sk}$  = savukaasun massavirta (kg/s)

$m_{pa}$  = polttoaineen massavirta (kg/s)

$m_{sk}/kg_{pa}$  = savukaasua polttoainekiloa kohti (kg<sub>sk</sub>/kg<sub>pa</sub>)

$\lambda$  = ilmakerroin

$m_i/kg_{pa}$  = ilmaa polttoainekiloa kohti (kg<sub>i</sub>/kg<sub>pa</sub>)

Mikro-CHP-laitoksen höyrykattilassa vesivaipan lämpötilat ovat suhteellisen pienet ja laitos on eristetty tarkoin, minkä vuoksi lämpöhäviöt ovat hyvin pienet. Tämän vuoksi voidaan ajatella, että kyseisessä laitoksessa käytännössä kaikki häviöt koostuvat savukaasuhäviöistä. Näin ollen tarkennettu hyötysuhde saadaan laskettua kaavan 23 avulla. Kyseisessä kaavassa vertailulämpötilana käytetään yleensä 20 °C. (22, s. 13–14.)

$$\eta = 1 - \frac{c_{psk} \times \dot{m}_{sk} \times \Delta T}{P_{pa}}$$

KAAVA 23

$\eta$  = hyötysuhde

$c_{psk}$  = savukaasujen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

$m_{sk}$  = savukaasun massavirta (kg/s)

$\Delta T$  = lämpötilaero (K)

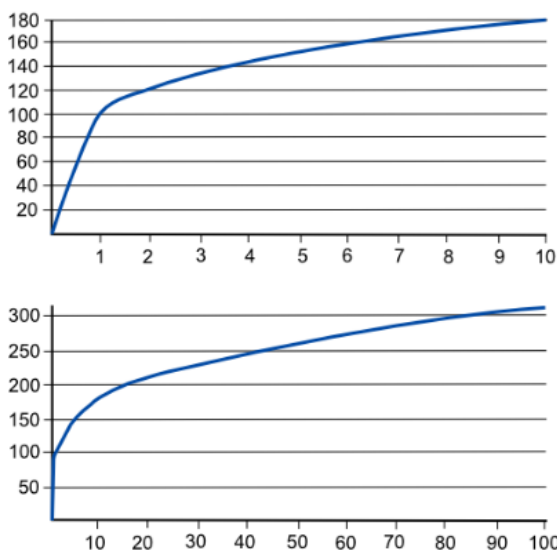
$P_{pa}$  = polttoaineteho (W)

### 6.3.2 Paine ja nestetilavuus

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöstä painelaiteturvallisuudesta (953/1999) sovelletaan painelaitteiden rekisteröintiin, sijoitukseen, käyttöön sekä niihin liittyviin tarkastuksiin. Sen luvussa 2 (painelaitteen rekisteröinti) ilmoitetaan seuraavasti: höyrykattilaa ei tarvitse rekisteröidä, jos on kyseessä vesiputkirakenteinen höyrykattila, jonka nestetilavuus on enintään 100 L ja suurin sallittu käyttöpaine on 16 bar. Suurimman sallitun paineen ja pienimmän sallitun nestetilavuuden tulo saa olla enintään 750 barL, mikä tarkoittaa noin 47 L:n tilavuutta. Kyseistä tuloa ei kuitenkaan käytetä, jos veden läpivirtaus saadaan aikaan syöttölaitteiden avulla ja se höyrystyy kokonaan tai melkein kokonaan, kun toimitaan suurimmalla jatkuvalla kuormituksella. (23.)

Standardin SFS-EN 12952-3 mukaan vesiputkikattilan suunnittelupaine  $p_d$  voi olla yhtä suuri tai suurempi kuin suurin sallittu paine  $PS$ . Siellä todetaan myös, että suunnittelupaineen on oltava yhtä korkea kuin tilaan asennettujen varoventtiilien korkein asetuspaine. Mikro-CHP-laitoksen kattilan käyttöpainetta mietittäessä täytyy ottaa huomioon myös muut yksikköön tulevat komponentit: laitoksen sähköenergia on tarkoitus tuottaa höyrykoneella ja esimerkiksi kolmivaiheisen höyrykoneen maksimipaine on 13,8 bar. Tämän vuoksi voidaan todeta, että mikro-CHP-laitoksen kattilalle sopiva maksimikäyttöpaine  $PS$  olisi 13,8 bar ja suunnittelupaine 16 bar. (17; 20, s. 14.)

Höyrykattilan paine vaikuttaa myös veden höyrystymislämpötila, joka on riippuvainen ympäristössä vallitsevasta painesta: esimerkiksi 10 bar paineessa höyrystymislämpötila on 179 °C. Kuvalla 22 havainnollisesta kyseistä riippuvuussuhdetta. (3, s. 185.)



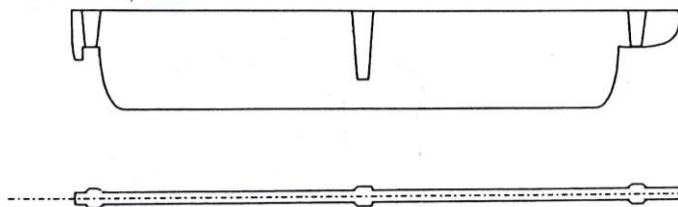
KUVA 21. Veden höyrystymislämpötila tietyssä paineessa (24)

Standardin SFS-EN 12952-3 mukaan vesiputkikattilan suurin sallittu lämpötila ( $T_S$ ) on veden tai höyryn ulostulokohdan lämpötila. Vertailulämpötila ( $t_{or}$ ) on puolestaan kyseessä olevan sisällön keskimääräinen käyttölämpötila, joka esiintyy käytön aikana. Vertailulämpötilassa pitää ottaa huomioon lämmönsiirron ja sisällön virtauksen vaihtelu osien välillä, kun vesi tai höyry virtaa rinnakkaisten osien läpi. Laskentalämpötilaa ( $t_c$ ) varten on myös otettava huomioon veden tai höyryn ja lämmönsiirron vaihtelu kattilassa, mutta jos näitä laskelmia ei tehdä, muodostuu laskentalämpötila vertailulämpötilasta sekä kyseisen standardin mukaisesta lämpötilalisästä. (20, s. 20.)

#### 6.4 Polttolaite

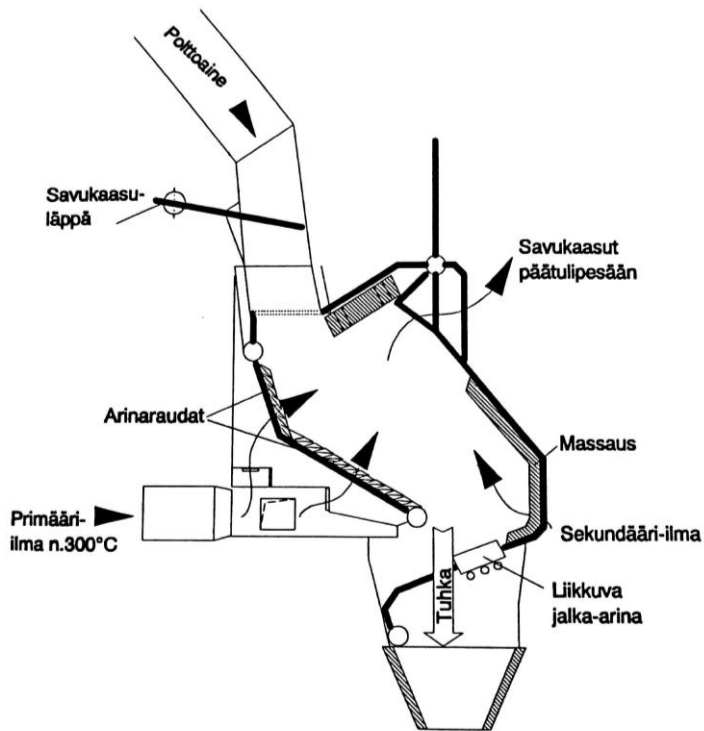
Arina on polttolaite, joka sijoitetaan kattilan pohjalle ja jonka päällä kiinteät polttoaineet poltetaan paikallaan pysyvänä tai hitaasti liikkuvana kerroksena. Arinapoltto sopii höyrykattilalle, jossa poltetaan kiinteitä polttoaineita. Hyvin toimivia arinapolttoratkaisuja onkin suurimmalle osalle kiinteistä polttoaineista. (3, s. 146.)

Arinat jaetaan kahteen eri arinatyyppiin, kiinteisiin ja mekaanisiin. Kiinteät arinat, joita ovat taso-, viisto- ja porrassarina, soveltuvat parhaiten pienitehoisen kattilan, kuten tässä tapauksessa mikro-CHP-laitoksen kattilan polttolaitteeksi. Tasoarina on ratkaisusta kaikista yksinkertaisin: se koostuu vierekkäisistä arinasauvoista, jotka on ladottu kannatuspalkkien varaan. Sauvojen rakenne on esitetty kuvassa 23. Sauvoissa on ulkonemia, jotka aikaansaavat sauvojen väliset ilmaraot. Ilmaraosta polttoilma virtaa arinan läpi polttoainekerroksen sekaan. Tasoarina voi olla myös yhtenäiseksi valettu levy, jossa on ilmareiät. Tasoarinoita käytetään yleensä pienissä kattiloissa, joissa polttoaineen syöttö tapahtuu käsin. (3, s. 147; 4, s. 87.)



KUVA 22. Tasoarinan arinasauvan rakenne (3, s. 147)

Kun kiinteä arina sijoitetaan 30–50°:n kulmaan vaakatasosta, puhutaan viisto- tai porrassarinasta, jossa polttoaine kulkeutuu arinalla painovoiman vaikutuksesta. Kaltevuuskulma voi vaihdella arinan eri kohdissa ja yleensä se onkin suurempi arinan yläpäässä kuin alapäässä. Viistoarinan jälkeen voi olla myös jalka-arina, joka varmistaa polttoaineen loppuun palamisen. Kuvassa 24 on esimerkki kiinteän viistoarinan rakenteesta. Jäähdytetty viistoarina rakennetaan kattilan höyrystinputkiston päälle. Höyrystinputkiston välissä on lattarautoja, joiden päälle on sijoitettu valurautaiset arinaraudat. Arinarautojen väliin jäävistä raoista palamisilma virtaa polttoaineen sekaan. Arinaraudat kuluvat käytössä jonkin verran, minkä vuoksi niitä on uusittava muutaman vuoden välein. Polttoaineen syöttö voi tapahtua omavoimaisesti polttoainesilosta: arinaan valuu polttoainetta sitä mukaa kun se tyhjenee. Uusimmissa kattiloissa polttoainesyöttö on yleensä koneellistettu esimerkiksi tankopurkaimien avulla. (3, s. 148; 4, s. 89.)



KUVA 23. Kiinteällä viistoarinalla varustettu kattila (3, s. 148)

## 6.5 Puhdistus ja huolto

Kattilan lämpöpinnoille kertyvä lika heikentää lämmönsiirtoa ja vaikuttaa siis oleellisesti kattilan hyötysuhteeseen. Lika kasvattaa myös savukaasun vastusvirtausta, minkä vuoksi kattilan omakäyttöteho nousee. Likaantumisen vaikutus näkyy erityisesti tiheissä lämpöpinnoissa. Kattilan nuohoustarve vaihtelee käytettävän polttoaineen ja kattilatyypin mukaisesti. Kattilatyypin vaikutus myös

nuohoinratkaisun valintaan ja nuohotapaan. Kattilan puhdistusta varten on kehitetty erilaisia nuohoimia, joista yleisimpiä ovat höyrynuohoimet eli puhallusnuohoimet. Muita nuohointyyppisiä ovat vesipesulaitteet, kuulanuohouslaitteet, mekaaniset ravustuslaitteet sekä ääninuohoimet. (3, s. 214; 4, s. 145; 25, s. 171.)

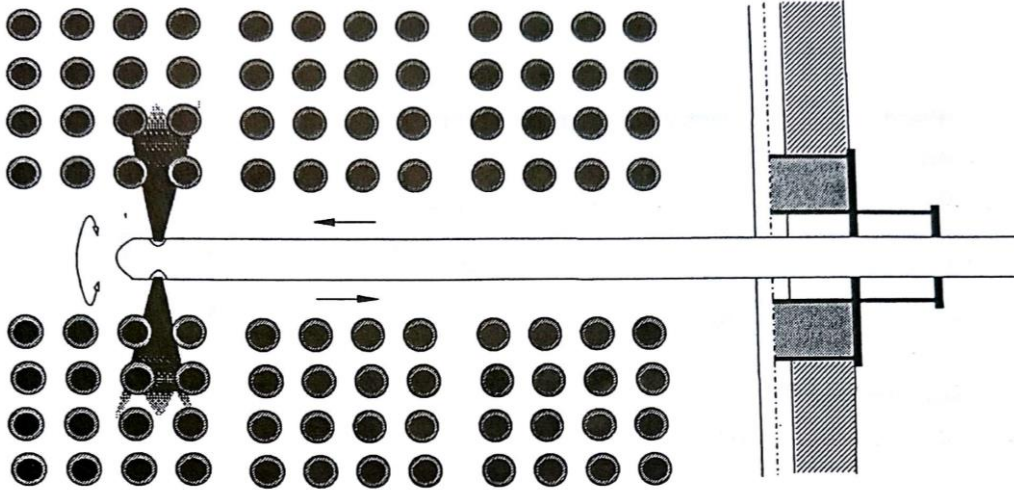
Puhallusnuohoimiin kuuluvat seinänuohoimet, ulosvedettävät nuohoimet, pyörivät monisuutinnuohoimet, haravanuohoimet sekä pyörivien ilmanesilämmittimien nuohoimet. Nämä nuohoimet puhdistavat lämpöpintoja yleensä höyryn tai ilman avulla. Taulukossa 6 on vertailtu höyry- ja vesinuohouksen etuja ja haittoja.

TAULUKKO 6. Höyry- ja ilmanuohouksen edut ja haitat (3, s. 216–217)

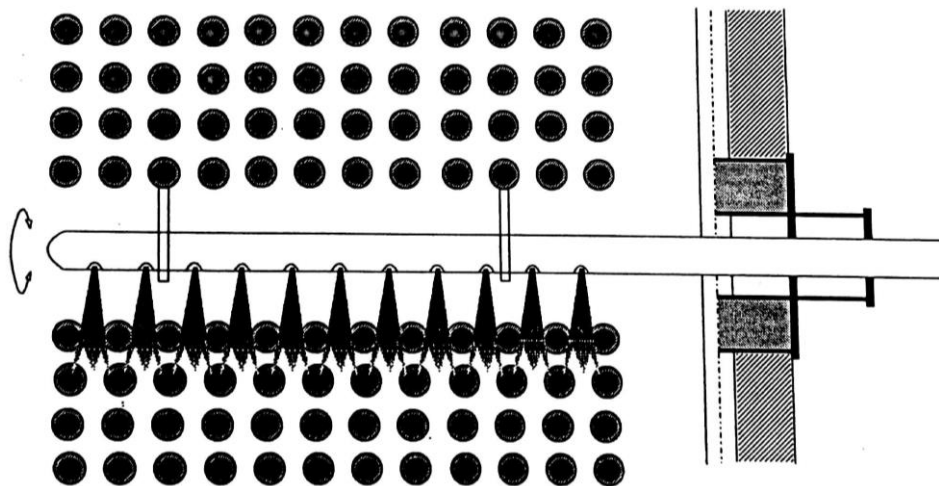
	Edut	Haitat
Höyrynuohous	Halvat perustuskustannukset Säädettävä puhalluspaine Lyhyet puhallusjaksot	Lisäveden tarve kasvaa Rikkihapon muodostuminen Lämpölaajeneminen huomioitava Tarvitsee paljon huoltoa Edellyttää putkiston eristystä Pienissä kattiloissa paineenvaihtelua Mahdolliset lämpöshokit putkille
Ilmanuohous	Halvat huoltokustannukset Edullinen putkilinja Ei huomioida lämpöliikkeitä Johtojen vesitystä ei tarvita Ei lämpöshokkeja Savukaasun kosteus ei kasva	Kalliit hankintakustannukset Käyttökustannusten lisääntyminen Pidempi puhallusjakso Painetta ei voi muuttaa Tuhkapitoisten pintojen tulipalovaara

Seinänuohoin puhaltaa tulipesän seinämää vinosti ja puhalluskuvio on spiraalimainen. Yleensä kahdella suuttimella varustetun suutinputken kokonaisliikkumavara on 0,2–0,25 m ja puhdistussäde 1,5–2 m. Sekä suuttimet että puhallusputki ovat kuumankestävää ainetta. Kyseisellä nuohoimella poistetaan vaikeasti irtoavaa likaa alle 1500 °C:n savukaasulämpötilassa. Myös ulosvedettävää nuohointa (kuva 25) käytetään korkeissa lämpötiloissa tulistimien puhdistusta varten. Nuohoinputki, jonka päässä on yleensä kaksi suutinta, työnnetään kattilaan vain käytön ajaksi. Pyörivä monisuutinnuohoin (kuva 26) asennetaan kiinteästi kattilan sisäpuolelle ja se puhdistaa lämpöpintoja, joiden ohi virtaavien savukaasujen lämpötila on alle 800 °C. Suuttimet on sijoitettu suutinputkeen niin, että puhallus osuu nuohottavien lämpöpintojen väleihin. Haravanuohointa käy-

tetään myös matalissa lämpötiloissa (alle 800 °C) esilämmittimen putkien puhdistukseen. Kyseisessä nuohoimessa on muutama poikittainen suutinputki ja niissä jokaisessa on oma suuttimensa. (3, s. 214–215; 4, s. 145–148.)



KUVA 24. Ulosvedettävä nuohoin (3, s. 215)



KUVA 25. Pyörivä monisuutinnuohoin (3, s. 215)

Kattilan vesipesulaitteita käytetään yleensä vain silloin, kun kattila on seisokissa. Puhdistus tapahtuu välittömästi alasajon jälkeen lämpöpintojen ollessa vielä kuumat. Puhdistuksen jälkeen pinnat täytyy aina kuivata korroosion ehkäisemiseksi. Myös käytössä olevan kattilan puhdistus vedellä on

mahdollista, mutta lämpötilan äkillinen lasku saattaa aiheuttaa lämpöshokkeja ja metallipintoja suojaavan oksidikerroksen rikkoontumisen, mikä lisää korroosiota. Yleensä vettä käytetään puhdistukseen vain pakottavissa tilanteissa. (3, s. 217.)

Kattilan huoltoon liittyy oleellisesti myös silmämääräiset tarkistukset, jotka tehdään päivittäin. Tarkistuksissa kiinnitetään huomiota muun muassa vuotoihin, epänormaaleihin ääniin, tiivisteisiin ja eristeisiin. Tarkistusten avulla pyritään havaitsemaan kaikki epänormaaliin toimintaan viittavat asiat, mikä auttaa löytämään huoltoa vaativat osat ja ehkäisemään tällä tavoin järjestelmän rikkoontumista. (25, s. 171.)

## **6.6 Laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle**

Standardi SFS-EN 12952-12, laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle koskee vesiputkikattiloita, joita lämmitetään joko polttamalla polttoaineita tai kuumilla kaasuilla kuuman veden ja höyryn tuottamista varten. Standardi varmistaa, että kattilan käyttö aiheuttaa mahdollisimman pienen riskin kattilalle, lähellä oleville rakenneosille sekä henkilöstölle: se asettaa vähemmäisvaatimukset tiettyille vesille lietteen muodostumisen, kerrostumien sekä korroosion riskin pienentämiseksi. Sen avulla vähennetään siis kattilan vesi-höyrypiirin puhdistuksen ja huollon tarvetta. (26, s. 6.)

Standardin mukaan syöttöveden ja kattilaveden tiettyjä laatuominaisuuksia täytyy parantaa kemikaalien avulla. Kemikaalikäsittelyllä voidaan vaikuttaa muun muassa oksidikerroksien muodostumiseen, korroosion minimoimiseen (pH-arvon), kovuuden tasapainottamiseen, kemialliseen hapenpoistoon sekä erityisten suojaavien pinnoitteiden muodostumiseen ns. metallipinnan filmikalvon avulla. Yleisiä epäorgaanisia lisäaineita ovat natrium- ja kaliumhydroksidi, natriumfosfaatti, natriumsulfiitti, ammoniakki sekä hydratsiini. Orgaanisia lisäaineita käytettäessä kemikaalin toimittaja määrittelee käytettävät määrät ja menetelmät. (26, s. 10.)

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua höyrykattiloiden toimintaperiaatteeseen. Työssä perehdyttiin myös polttoaineisiin: kattilan polttoaineena on tarkoitus käyttää lähinnä haketta, mutta myös muut biopolttoaineet sekä seospoltto ovat mahdollisia mikro-CHP-laitoksessa. Polttoaineisiin liittyen työssä selvitettiin kiinteän polttoaineen palamista sekä siihen liittyvää palamisilman tarvetta, savukaasuja ja päästöjä. Tärkeimpänä tavoitteena oli kuitenkin tutkia paineastian suunnittelua ja mitoitusta pienen höyrykattilan näkökulmasta. Myös höyrykattilan puhdistusta käytiin läpi, sillä lämpöpintojen likaantumisella on suuri vaikutus kattilan tehoon ja hyötysuhteeseen.

Työssä havaittiin, että vesiputkikattila olisi soveltuva malli mikro-CHP-laitokseen. Vesiputkikatiloissa käytetään polttoaineena yleensä nimen omaan kiinteitä polttoaineita, kuten puuta ja turvetta, ja se on tehokkaampi höyryntuotannossa kuin tulitorvi-tuliputkikattila. Vesiputkikattilan suunnittelussa käytetään apuna painelaitedirektiiviä sekä standardisarjaa SFS-EN 12952, josta erityisesti osaa 3. Työssä pohdittiin vesiputkikattilan mahdollista rakennetta ja siihen liittyviä ongelmia, joista tärkeimpänä on lämmönsiirtimien sijoittelu kattilan sisällä. Työssä käytiin läpi paineastian lujuus- ja lämpötekni- sen mitoituksen periaatteet. Painelaitedirektiivin mukaan näin pienen höyrykattilan lujuustekninen mitoitus voidaan suorittaa kokeellisen suunnittelumenetelmän avulla. Se on menetelmä, jossa painelaitteen suunnittelu voidaan osoittaa vaatimuksenmukaiseksi koetusohjelman avulla. Koetusohjelma suoritetaan koekappaleella, joka edustaa kyseistä painelaitetta.

Opinnäytetyössä nousi esille myös kattilan käyttö- ja suunnittelupaineen sekä nestetilavuuden määrittäminen. Käyttöpaineen rajoittavana tekijänä olivat laitoksen muut komponentit: kolmi- vaiheisen höyrykoneen maksimi käyttöpaine on 13,8 bar, minkä vuoksi höyrykattilaa ei voida käyttää suuremmissa paineissa. Kauppa- ja teollisuusministeriön pääöksen (953/1999) mukaan höyrykattilaa ei tarvitse rekisteröidä, jos kyseessä on vesiputkikattila, jonka nestetilavuus on enintään 100 L ja suurin sallittu käyttöpaine 16 bar. Tässä tapauksessa 16 bar olisi kattilan suunnittelupaine.

Mikro-CHP-laitoksen kattila on pieni, minkä vuoksi sen polttolaitteena käytetään kiinteää arinaa. Arinapoltto sopii hyvin kiinteille polttoaineille. Kattilan lämpöpintojen likaantumisella on suuri



vaikutus sekä kattilan tehoon että hyötysuhteeseen: lämpöpinnoille kertyvä lika estää lämpöenergian tehokkaan siirtymisen savukaasusta vesi-höyrykiertoon. Tämän vuoksi työssä selvitettiin erilaisten nuohomien toimintaa sekä standardin laatuvaatimuksia kattilan syöttövedelle.

Nykyisin on käytössä useita mikro- tai pien-CHP-laitoksia, joilla lämmitetään esimerkiksi maatilalla navetta ja talo. CHP-laitos, jossa lämpö tuotetaan pienellä ja tehokkaalla vesiputkikattilalla ja sähkö höyrykoneella, voisi olla kilpailukykyinen lämmöntuotantoyksikkö nimenomaan omakotitalouksia ajatellen. Laitoksen myötä taloudet eivät olisi niin sidottuja esimerkiksi kaukolämpöverkkoon tai valtakunnalliseen sähkönjakeluverkkoon.

## LÄHTEET

1. Oulun Eteläisen Instituutti. 2016. Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/oei/>. Hakupäivä 17.08.2016.
2. FMT – Tulevaisuuden tuotantoteknologiat tutkimusryhmä. 2012. Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://www oulu.fi/fmt/>. Hakupäivä 17.08.2016.
3. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uudistettu painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
4. Näretie, V – Arpalhti, Esko 1972. 3. painos. Höyrytekniikka, kattilat ja koneet. Helsinki: Otava.
5. Höyrykattilan käyttö- ja huolto-ohje. 2005. Noviter Oy.
6. Antila, Anna-Maija – Karppinen, Maarit – Leskelä, Markku – Mölsä, Heidi – Pohjakallio, Maija. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita Prima Oy.
7. Bioenergia käyttö. 2016. Motiva, asiantuntija energian ja materiaalien tehokkaassa käytössä. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/bioenergian\\_kaytto](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto). Hakupäivä 15.09.2016.
8. Hake. 2016. Bioenergianeuvoja. Saatavissa: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/hake/>. Hakupäivä 15.09.2016.
9. Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Hakupäivä 15.09.2016.
10. Ruokohelpin tie pellolta polttoon. 2016. Motiva, asiantuntija energian ja materiaalien tehokkaassa käytössä. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/7937/Ruokohelpin\\_tie\\_pellolta\\_polttoon.pdf](http://www.motiva.fi/files/7937/Ruokohelpin_tie_pellolta_polttoon.pdf). Hakupäivä 17.10.2016.
11. Pahkala, Katri – Isolahti, Mika – Partala, Anneli – Suokangas, Antti – Kirkkari, Anna-Maija – Peltonen, Mika – Sahramaa, Mia – Lindh, Tuulikki – Paappanen, Teuvo – Kallio, Esa – Flyktman, Martti 2005. Ruokohelven viljely ja korjuu energiakäyttöä varten. 2. Korjattu painos. Jokioinen. MTT. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/met/html/met1b.htm>. Hakupäivä 17.10.2016.
12. Turve ja puu tukevat toisiaan energiakäytössä. 2015. Turveinfo. Saatavissa: <http://www.turveinfo.fi/kayttotavat/energiakaytto/turve-ja-puu-yhdessa>. Hakupäivä 17.10.2016.
13. Takasalo, Heidi – Saksio, Anni 2013. Mikro- ja pien-CHP, teknologia- ja laitekantaselvitys sekä kannattavuuden tarkastelu tapausesimerkin avulla. Iin Micropolis Oy. Saatavissa:

- [http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004\\_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitetekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf](http://www.greenpolis.fi/wp-content/uploads/004_13-Mikro-ja-pien-CHP-Teknologia-ja-laitetekantaselvitys-sek%C3%A4-kannattavuuden-tarkastelu-tapausesimerkin-avulla.pdf). Hakupäivä 18.10.2016.
14. Moran, Michael – Shapiro, Howard – Boettner, Daisie – Bailey, Margaret. Principles of Engineering Thermodynamics. SI version, seventh edition.
  15. Steam engines. 2015. Mechanical Technology. Saatavissa: <http://4mechtech.blogspot.fi/2013/12/steam-engines.html>. Hakupäivä 19.10.2016.
  16. The forgotten Lamont boiler. 1998. George Nutz-MemberSACA/Northeast. Saatavissa: <https://www.steamautomobile.com/northea/lamont.html>. Hakupäivä 19.10.2016.
  17. Boilers. 2015. Reliable Steam Engine Co. Saatavissa: <http://www.reliablesteam.com/RSE/RSEboilers.html>. Hakupäivä 19.10.2016.
  18. Painelaitteet. Tukes-opas. Helsinki: Turvatekniikan keskus Tukes. Saatavissa: [http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet\\_ja\\_opaat/painelaitteopas.pdf](http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_opaat/painelaitteopas.pdf). Hakupäivä 18.10.2016.
  19. SFS-EN 12952-1 2012. Vesiputkikattilat. Yleistä. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS
  20. SFS-EN 12952-3 2012. Vesiputkikattilat. Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.
  21. Painelaitedirektiivi 97/23/EY 1997. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi.
  22. Kakko, Markku 2012. Lämminvesikattilan lämpötekkinen suunnittelu. Insinööriyö. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Kone- ja tuotantotekniikka.
  23. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös painelaiteturvallisuudesta 953/1999. 1999. Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990953>. Hakupäivä 22.10.2016.
  24. Veden kiehumispiste. 2015. Wikipedia. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kiehumispiste>. Hakupäivä 22.10.2016.
  25. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2008. Voimalaistekniikka. Opetushallitus. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
  26. SFS-EN 12952-12 2012. Vesiputkikattilat. Laatuvaatimukset syöttö- ja kattilavedelle. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.



## Project in a nutshell

- **Micro Combined Heat and Power (Micro CHP) system for the single family house**
  - Energy and cost efficient
  - Uses renewable bioenergy
  - Prototype design and realization
- **Priority Axis 3 - Renewables and energy efficiency**
  - Energy efficient solution to remote and sparsely populated areas
  - Transnational cooperation
    - New innovative solutions and products
    - Better utilization of the existing innovation capacity within the program area
  - A tangible result in the medium term will be use of renewable energy suited for small dispersed settlements and public infrastructures in cold climates.
    - New concepts could create business opportunities for companies developing and installing such solutions

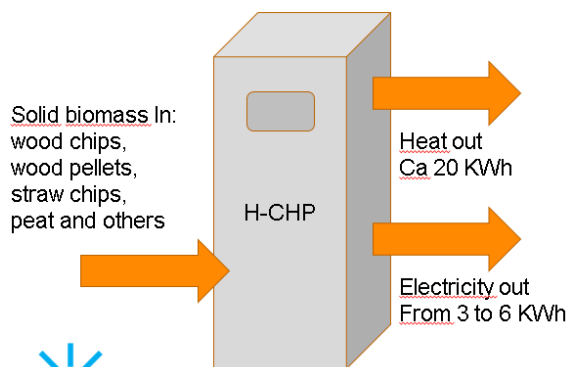


3

University of Oulu - Oulu Southern Institute - Future Manufacturing Technologies  
Oulun projekti - Oulun ERIITin instituutti - Tulevaisuuden teknologiat (FMT)



## Objectives



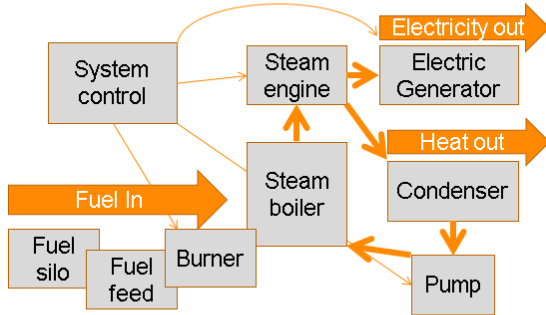
4

University of Oulu - Oulu Southern Institute - Future Manufacturing Technologies  
Oulun projekti - Oulun ERIITin instituutti - Tulevaisuuden teknologiat (FMT)

- **Energy efficient use of renewable bioenergy in single family homes for remote and sparsely populated areas**
- **Design and build prototype of the Micro Combined Heat and Power (CHP) system for the single family house**
  - Heat power ca. 20 kWh and electric power from 3 to 6 kWh
  - Use of energy biomaterials like wood chips, wood pellets, straw chips, peat and others
  - Compact size for competitive price
- **Decentralized energy - Smart Grid and Off Grid**
  - System can be part of the modern smart grid but offers also the opportunity to get heat and energy outside of the power grid



## Challenges and solutions

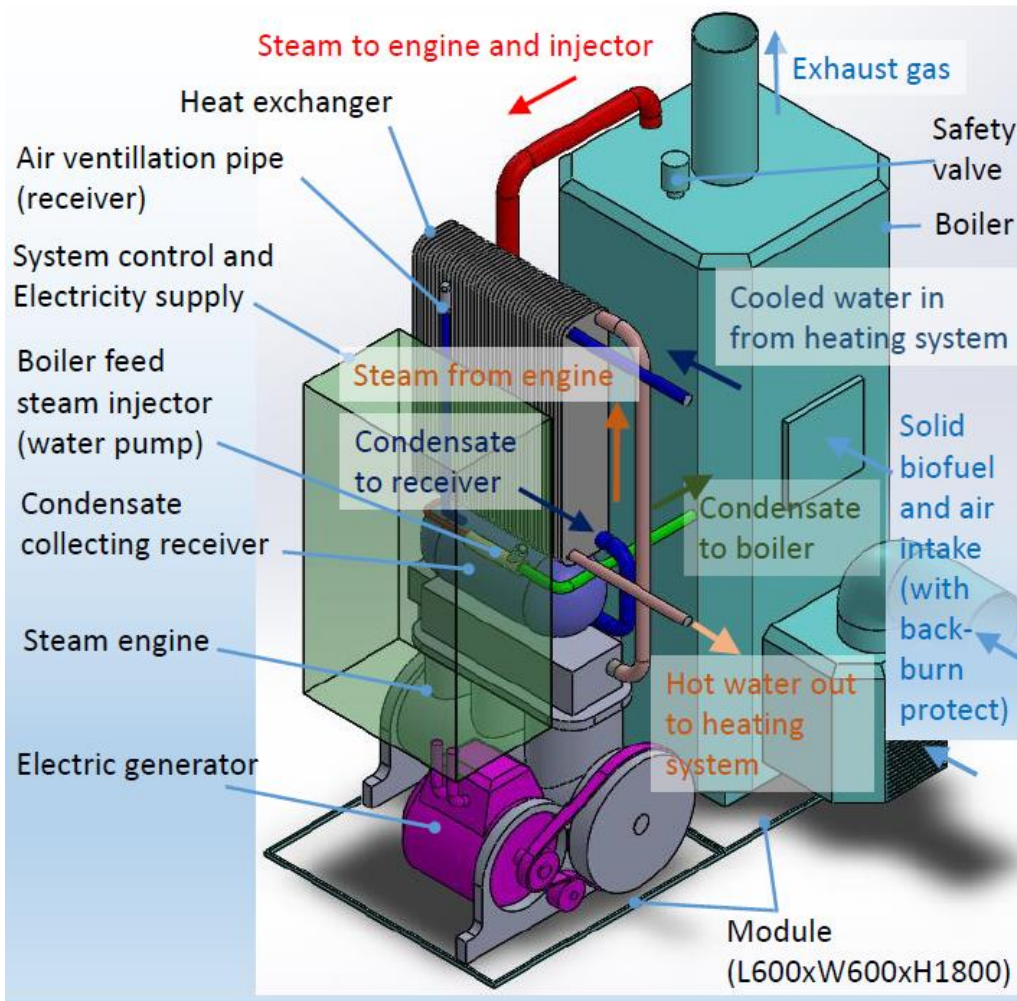


- **Business situation**
- Usually micro CHP heat power systems in the market are over 100 kWh
- In 20 kWh size category there is solutions that use natural gas or liquid fuel but not for solid fuel
- As the electricity price and transfer price get higher and the security of supply decreases there is market for decentralized energy production solutions
- **Technical challenges**
- Small size – challenging combustion technology
- Electrical efficiency is challenge – Over all efficiency will be excellent
- Cost efficient manufacturing – decent end user price
- **Solutions**
- High pressure boiler and modern steam engine



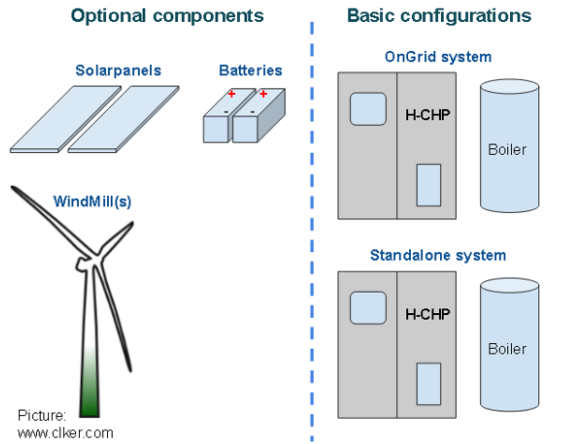
6

University of Oulu – Oulu Southern Institute – Future Manufacturing Technologies  
Oulun seutu – Oulun ERIKRI:n instituutti – tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT)

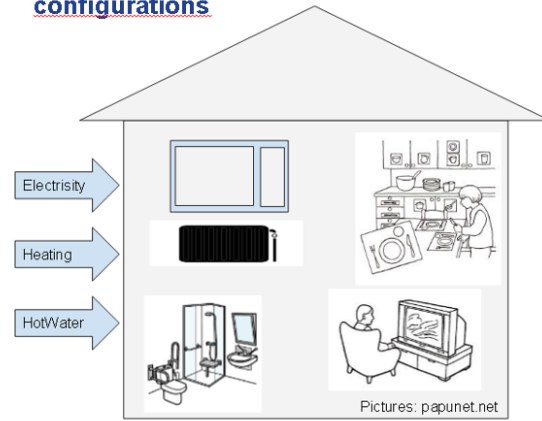




## Configurations



- **Basic H-CHP system ongrid or standalone**
- **Optional components – many alternative configurations**



University of Oulu – Oulu Southern Institute – Future Manufacturing Technologies  
Oulun yliopisto – Oulun Eteläinen instituutti – Tulevaisuuden tekniikan teknologiat (FMT)

7



## Budget and Consortium

**OAMK**  
OULUN AMMATTIKORKEAKOULU

**UNIVERSITY OF ICELAND**

**Energy Action**  
THE WARM CHARITY

**LULEÅ UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**TIGHEAN INNSE GALL**

**University of the Highlands and Islands**  
Lews Castle College

**Oilthigh na Gàidhealtachd agus nan Eilean**  
Colaisde a' Chaisteil

**FMT**

- **3 year project budget is ca. 2 M€,**
- **Consortium - 5-6 partners**
- Finland
  - University of Oulu – Oulu Southern Institute – Future Manufacturing Technologies (FMT) research group
  - Oulu university of applied sciences – Energy and automation unit
- Sweden
  - Lulea Technical University – Department of Engineering Sciences and Mathematics
- Ireland
  - Energy Action Ireland
- Iceland
  - University of Iceland
- Scotland
  - University of the Highlands and Islands – Lews Castle College
  - Tighean Innse Gall
- **5-10 Associate partners**

University of Oulu – Oulu Southern Institute – Future Manufacturing Technologies  
Oulun yliopisto – Oulun Eteläinen instituutti – Tulevaisuuden tekniikan teknologiat (FMT)

8



**Northern Periphery and Arctic Programme**  
2014–2020



Oilthigh na Gàidhealtachd agus nan Eilean  
Colaiste a' Chaisteil



**EUROPEAN UNION**

Investing in your future  
European Regional Development Fund



# In co-operation



Palamisen nettoreaktiokaavat		
Hiili	C:	$C + O_2 = CO_2$
Vety	H <sub>2</sub> :	$2 H_2 + O_2 = 2 H_2O$
Rikki	S:	$S + O_2 = SO_2$

Polttoaineen kuiva-ainekoostumus (%) ja tyypillinen kosteus							
Polttoaine	C	H	S	O	N	Tuhka	Kosteus
Puu	50,4	6,2	-	42,5	0,5	0,4	55

Palamislaskuissa tarvittavat polttoaineen lähtötiedot (oletus: polttoainetta 1 kg)					
Komponentti	kg/kg <sub>pa</sub>	kg/kg <sub>pa</sub>	kg/kmol	kmol/kg <sub>pa</sub>	kmol/kg <sub>pa</sub>
	Osuuden kuivassa pa:ssa	Ainemäärä kosteassa pa:ssa	Molekyylipaino	Kosteus pa	O <sub>2</sub> -tarve (teor.)
C (hiili)	0,504	0,3528	12,01	0,02937552	0,02937552
H <sub>2</sub> (vety)	0,062	0,0434	2,016	0,021527778	0,010763889
N <sub>2</sub> (typpi)	0,005	0,0035	28,02	0,000124911	0
O <sub>2</sub> (happi)	0,425	0,30	32	0,009296875	-0,009296875
H <sub>2</sub> O (vesi)*	-	0,3	18,016	0,016651865	
O <sub>2</sub> tarve yht.					0,030842534

\*Hyvälaatuisen hakkeen kosteus, joka on huomattavasti pienempi kuin puun tyypillinen kosteus

Kuivan ilman koostumus. Kuten taulukosta nähdään, ilma sisältää happea 21 % ja typpeä 79 %.			
Aine	Pitoisuus til.-%	Molekyylipaino kg/kmol	Moolitilavuus l/mol
N <sub>2</sub> (typpi)	78,03	28,02	22,40
O <sub>2</sub> (happi)	20,99	32,00	22,39
Ar (argon)	0,94	39,94	22,39
CO <sub>2</sub> (hiilidioksidi)	0,03	44,01	22,26
H <sub>2</sub> (vety)	0,01	2,02	22,43
Yht.	100	28,96	22,40

Palamiseen tarvittava teoreettinen hapen määrä =	0,030843 kmol/kg <sub>pa</sub>	$\frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} = n_C + \frac{1}{2} \times n_{H_2} + n_S - n_{O_2}$
Palamiseen tarvittava teoreettinen ilmamäärä =	0,14681 kmol/kg <sub>pa</sub>	$\frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \times \frac{1}{0,21} = \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} \times 4,76$
Palamiseen tarvittava todellinen ilmamäärä =	0,168832 kmol/kg <sub>pa</sub>	$\frac{N_{i(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} \times \lambda$
λ =	1,15	
Palamiseen tarvittavan ilman massavirta =	4,889376 kg <sub>v</sub> /kg <sub>pa</sub>	$\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} = \frac{\dot{m}_{i(teor)}}{\dot{m}_{pa}} \times \lambda$



Syntyvien savukaasujen teoreettinen määrä =	0,183648 kmol/kg <sub>pa</sub>	$\frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} = n_C + n_{H_2} + n_S + 3,76 \times \frac{N_{O_2(teor)}}{m_{pa}} + n_{N_2} + n_{H_2O}$
Syntyvien savukaasujen todellinen määrä =	0,20567 kmol/kg <sub>pa</sub>	$\frac{N_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) \times \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}}$
Syntyvien savukaasujen m <sub>sk</sub> /kg <sub>pa</sub> teoreettinen =	4,410674 kg <sub>sk</sub> /kg <sub>pa</sub>	
Syntyvien savukaasujen m <sub>sk</sub> /kg <sub>pa</sub> todellinen =	5,048418 kg <sub>sk</sub> /kg <sub>pa</sub>	

Teoreettisen palamisen savukaasumäärät			
Komponentti	Määrä kosteassa polttoaineessa	Reaktiotuote	Savukaasujen määrä
	kmol/kg <sub>pa</sub>		kmol/kg <sub>pa</sub>
C	0,02937552	CO <sub>2</sub>	0,02937552
H <sub>2</sub>	0,021527778	H <sub>2</sub> O	0,030824653
O <sub>2</sub>	0,009296875		
N <sub>2</sub>	0,000124911	N <sub>2</sub>	0,116105177
H <sub>2</sub> O	0,016651865		
Savukaasujen määrä kiloina ja kuutioina			
Komponentti	Määrä savukaasussa	Molekyylipaino	Määrä savukaasussa
	kmol/kg <sub>pa</sub>	kg/kmol	kg/kg <sub>pa</sub>
CO <sub>2</sub>	0,02937552	44,01	1,292816653
H <sub>2</sub> O	0,030824653	18,016	0,555336944
N <sub>2</sub>	0,116105177	28,02	3,253267052
Yht.	0,17630535		5,101420649

