



# **Micro-chp pientalon sähkön- ja lämmönlähteenä**

Jarmo Eloranta

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2016  
Automaatioteknologia  
(YAMK)

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Automaatioteknologia

JARMO ELORANTA:

Micro-chp pientalon sähkön- ja lämmönlähteenä

Opinnäytetyö 48 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Maaliskuu 2016

---

Tämän kehitystyön tarkoitus oli puukaasulla toimivan, pientalo käyttöön soveltuvan, micro-chp-laitoksen laitteistovaihtoehtojen vertailu ja niistä edullisimman löytäminen. Tavoitteena oli esittää laitteistokokonaisuus, josta pystytään valmistamaan kaupallisesti kannattava tuote. Työ tehtiin tämän kehitystyön tekijän omiin tarkoituksiin.

Teoriaosuudessa perehdyttiin puukaasuun ja sen tuottamiseen sekä puukaasun käsitteilyyn tarvittavaan laitteistoon. Samoin perehdyttiin puukaasun käyttöön sähkön tuottamiseksi sekä siinä tarvittaviin laitteisiin. Lisäksi työssä kuvattiin laitteiston automatisointia ja liittämistä pientalon sähköverkkoon sekä yleiseen sähkönjakeluverkkoon.

Pientalokäyttöön soveltuva laitteisto määriteltiin yleisesti käytössä olevaa tuotekehitysmallia soveltaen. Laitteistolle asetetut vaatimukset ja toiveet pisteytettiin ja niille annettiin painoarvo. Painoarvotaulukon perusteella löytyi ratkaisuksi esitettävä kiinteoksidipolttokennolaitteisto.

Löydetty laitteistoratkaisu pitää sisällään avoimia kysymyksiä liittyen polttokennostojen saatavuuteen. Teknologia on kuitenkin niin hyvä, että vaikka laitteiston kaupallistaminen viivästyisi, kannattaa sitä odottaa. Laitteistossa on useita kohtia, jotka vaativat vielä jatkotutkimusta. Haastavimpana niistä on puukaasun käsittelyyn liittyvä höyryreformointi ja sen laitteet.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Automation Technology

JARMO ELORANTA:  
Micro-chp Detached House Electricity and Heat Source

Master's thesis 48 pages, appendices 4 pages  
March 2016

---

Purpose of this thesis was to compare different micro-chp solutions and their suitability for household use. Price issue was also regarded as one main parameter for comparison. Target of the thesis was to find construction, which could be manufactured at industrial basis economically. First evaluated end user was writer of the thesis.

In theory part, focus was wood gas itself, methods to produce wood gas and equipment to produce electricity from wood gas. In addition, equipment to automatize production and circuits needed to connect electricity to household systems or commercial electrical networks, were also examined.

In the beginning, the system was specified as in normal development process. After specification, all the features were studied and priority of the features was settled. By comparing possible architectures, after priority definition, solid oxide fuel cell was selected as basic architecture.

The main issue of selected architecture is availability of fuel cell. Fuel cell technology itself has so many benefits that it is worth of waiting. In architecture, there are couple of other items, which need further investigations. The most challenging issue is steam reformation of wood gas and equipment needed for that.

---

Key words: micro-chp, wood gas, household use

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Kehittämistyön tavoitteet ja näkökulma .....	7
1.2	Kehittämisaie ja – kysymykset .....	8
1.3	Katsaus nykytilanteeseen .....	8
1.4	Kehittämistyön yleiskuvaus .....	9
1.5	Kehittämistyön menetelmät .....	10
2	PUUN KAASUTUS .....	12
2.1	Puukaasu .....	13
2.2	Puukaasun valmistus .....	13
2.3	Kaasunkehittimen toiminta .....	15
2.4	Kaasun jälkikäsittely .....	18
2.4.1	Sykloni .....	18
2.4.2	Suodatin .....	19
2.4.3	Jäähdytin .....	19
3	SÄHKÖN TUOTANTO.....	21
3.1	Generaattori .....	21
3.1.1	Otto- ja dieselmoottori .....	21
3.1.2	Stirling-moottori.....	22
3.2	Kaasuturbiini.....	23
3.3	Polttokenno .....	23
3.3.1	Kaasun reformointi.....	26
3.3.2	Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC) .....	28
3.3.3	Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC).....	28
3.3.4	Fosforihappopolttokenno (PAFC).....	29
3.4	Akusto .....	30
3.5	Vaihtosuuntaaja .....	31
4	LÄMMÖN TUOTANTO .....	32
4.1	Lämmön lähteet .....	32
5	AUTOMAATIO .....	33
5.1	Laiteautomaatio .....	33
5.2	Sähkön syötön automaatio .....	34
6	ESITETTÄVÄ RATKAISU PIENTALOKÄYTTÖÖN.....	36
6.1	Sopivan laitteistokokonaisuuden määrittely .....	36
6.1.1	Energiatehokkuuslaskelma.....	38
6.1.2	Laitteistojen vertailu.....	39

6.2 Valinnan perusteet .....	40
6.3 Laitteiston valita .....	40
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	42
LÄHTEET .....	43
LIITTEET .....	45
Liite 1. Kehittämistehtävän miellekartta. ....	45
Liite 2. Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja ja tiheyksiä (Energiatilasto 2011).....	46
Liite 3. 3 Phase Faraday AC Generator Power Generator Brushless Diesel Generator .....	47
Liite 4. Arviointitaulukon pisteytys.....	48

## ERITYISSANASTO

kaasunkehitin	Puukaasun tuotantolaite
kuiva-tuoretiheys	Puuaineen kuivamassa tuoreessa tilassa tilavuusyksikköä kohden
micro-chp	Asuinkiinteistöjen yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon kehitetty voimalaitos
pelkistyminen	Tässä; kaasuprosessi, missä hiilidioksidi muuttuu hiilimonoksidiksi eli häkäkaasuksi.
pilke	Isokokoinen tasalaatuinen palahake
polttokenno	Sähkökemiallinen laite, joka muuntaa kemiallisen reaktion vapaata energiaa sähköksi
puukaasu	Korkeassa lämpötilassa puusta erotetut kaasuuntuvat aineet
pyrolyysi	Kemiallinen reaktio, jossa orgaanisia kiinteitä aineita hajotetaan kuumentamalla
reformointi	Prosessi, jolla hiilivedyistä tuotetaan höyryn avulla vetykaasua.
shift-reaktio	Reformoinnin jälkeinen prosessi, jossa lisätään vedyn osuutta kaasuseoksessa sekä vähennetään hiilimonoksidin määrää
stirling-moottori	Kuumakaasumoottori
sykloni	Kiintoaineet kaasusta erottava pyörrekammio

## 1 JOHDANTO

Metlan (2013) mukaan Suomen vuosittainen puuston kasvu on 104,4 miljoonaa kuutiometriä. Metsien vuosikokonaispoistuma on noin 70 miljoonaa kuutiometriä. Tämän perusteella puunkäyttöä voitaisiin nostaa jopa 30 miljoonalla kuutiometrillä vuodessa. Nykyisen hallituksen hallitusohjelman yhtenä kärkihankkeena on ”Puu liikkeelle ja uusia tuotteita metsästä”. Tämän hankkeen tavoitteena on puun käytön lisääminen 15 miljoonalla kuutiometrillä vuodessa. Tavoitteeseen pääsemiseksi on tutkimus- ja kehittämistoimintaan panostamalla tarkoitus saada syntymään uusia tuotteita, jollainen tämän kehitystehtävän perusteella syntyvä tuotekin olisi. Käyttöä voidaan lisätä esimerkiksi energiatuotannossa, jossa puuta voidaan käyttää monessa muodossa. Yksi tapa on puun kaasuttaminen. Menetelmä on ollut tunnettu jo melkein kaksi sataa vuotta. Sitä on hyödynnetty suuremmissa määrin vain toisen maailmansodan aikana ajoneuvojen polttoaineen tuottamiseen.

Toinen tähän kehitystehtävään liittyvä hallituksen kärkihanke on ”Hiilettömään, puhtaan ja uusiutuvaan energiaan kustannustehokkaasti”. Tavoite on nostaa päästöttömän, uusiutuvan energian käyttö kestävästi 2020-luvulla yli 50 prosenttiin sekä omavaraisuus yli 55 prosenttiin. Tähän päästäisiin erityisesti bioenergian ja muun päästöttömän uusiutuvan energian tarjonnan lisäämisellä. Myös tähän kärkihankkeeseen tämä kehitystehtävä omalta osaltaan vastaa.

### 1.1 Kehittämistyön tavoitteet ja näkökulma

Tässä kehitystehtävässä tavoitteena on esittää pientalokäyttöön soveltuva, kotitalouden tarvitseman sähkön ja lämmön puusta tuottava, käyttäjäystävällinen laitteisto eli mikro-chp sekä tutkia laitteiston kaupallistamismahdollisuuksia. Markkinoilla sen tulee pystyä kilpailemaan hinnallaan maalämpöpumppulaitteistojen kanssa.

Mikro-chp:tä käytetään usein kuvaamaan pienen mittakaavan chp-järjestelmää, jossa sähkön tuotanto on alle 15 kWe (Dong 2009, 2119 - 2126). Ratkaisuvaihtoehtoja tutkitaan erityisesti sähkön tuotannon näkökulmasta. Oletuksena on, että lämpöä syntyy riittävästi sähkön ohella, joten lämmön tuottamiseen ei tässä työssä keskitytä.

## 1.2 Kehittämisasihe ja – kysymykset

Kehittämisasiheena on sähkön tuottaminen polttokennojen avulla puukaasusta.

Kehittämistyön tavoitteen pohjalta muodostettiin kaksi tutkimuskysymystä, joihin haluttiin vastauksia työssä:

1. *Mitkä ovat pientalokäyttöön soveltuvat micro-chp – laitteistokokonaisuusvaihtoehdot?*
2. *Mikä on taloudellisin pientalokäyttöön soveltuva micro-chp – laitteistokokonaisuus?*

## 1.3 Katsaus nykytilanteeseen

Tällä hetkellä talojen lämmitysratkaisut niin uudistuotannossa kuin korjausrakentamisessakin painottuvat lämpöpumpputekniikkaan. Useissa tapauksissa lämmönjako tapahtuu nestekiertoisella lattialämmityksellä. Vanhasta rakennuskannasta Suomessa löytyy vielä noin 200 000 öljylämmitteistä omakotitaloa. Lisäksi taloja on liitetty kaukolämpöverkkoihin. Kaikkiin taloihin, joissa lämmönjako tapahtuu nestekierrolla, voidaan liittää erilaisia uusiutuvan energian lämmitysratkaisuja kuten tämän kehittämistyön kohteena oleva micro-chp-laitteisto. Lämmön lisäksi laitteisto tuottaa sähköä. Lämmön ja sähkön tuotanto toimii säästä ja vuorokauden ajasta riippumatta, toisin kun aurinko- ja tuuli-voima.

Markkinoilla ei vielä ole pientalokäyttöön soveltuvaa micro-chp – laitteistoa. Markkinoilla olevat laitokset perustuvat toiminnaltaan polttomoottori-generaattori yhdistelmään, jossa sähköntuotannon osuus on kolmannen ja loput on lämpöä (Kara et al. 2004, 257.) Käytännössä tällaiset laitokset tuottavat liikaa lämpöä yksittäisen pientalon tarpeisiin ja laitoksen huoltotarve vähentää kiinnostusta tällaisen laitoksen hankintaan. Suomessa on toteutettu yksi, kymmenen omakotitalon alue, jossa tuotetaan yhteisellä laitteistolla alueella tarvittava sähkö ja lämpö. Aluetta ei ole liitetty yleiseen sähköverkkoon, vaan sähkö tuotetaan hakekäyttöisellä chp – laitoksella. Lämpöä ei erikseen tehdä, tarvittava lämpö saadaan sähköntuotannosta syntyvästä hukkalämmöstä.

## 1.4 Kehittämistyön yleiskuvaus

Kehittämistyö perustuu teoriaan ja empiriaan sekä pohdintaan eli menetelmänä on konstrukttiivinen kehittäminen. Liitteessä 1 on kuvattu tämän kehittämistyön miellekartta. Teoriaosuudessa perehdytään tutkimustyöhön ja kokeiluihin, jotka liittyvät puukaasun tuottamisesta sähkön tuottamiseen. Lisäksi on kartoitettu nykytilannetta yhteiskunnallisesta näkökulmasta tarkastelemalla hallitusohjelman kärkihankkeita, joihin kehittämissanke liittyy. Empiriaosuudessa on haastateltu polttokennolaitteiston mahdollista toimittajaa. Kokeiluja on tehty tuotteen valmistamiseksi.

Kyseessä on kehittämisprojekti, jossa kehitetään uutta tuotetta. Tuotteen kehittämisprojekti palvelee tekijänsä oppimis- ja opiskeluprosessia sekä tuottaa mahdollisesti kaupallisesti hyödynnettävään laitteiston. Samalla tekijä toteuttaa visiotaan, jota hän on tähän mennessä ajatuksissaan pohtinut ja jota on pitänyt jo aiemmin mielenkiintoisena.

Häkäpöntön eli puunkaasuttimen ja siihen liittyvän tuotteen kehittämisen kuvaus on esitetty seuraavassa kuviossa 1.

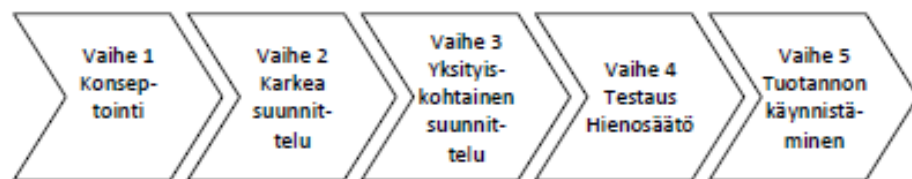


KUVIO 1. Kehittämisprojektin kuvaus

## 1.5 Kehittämistyön menetelmät

Tämän kehitystehtävän tavoitteena on aikaansaada kaupallinen tuote. Tuotekehityksessä käytetään erilaisia systemaattisia menetelmiä, jotta löydettäisiin teknisesti ja taloudellisesti toimiva kokonaisuus. Monesti, kuten tässäkin tapauksessa, ennen varsinaista tuotekehitystä edeltää vaihe, jossa tunnistetaan asiakkaidentarpeita ja luodaan tuoteideoita. Kyseessä on niin sanottu ”the fuzzy front end” eli ”sumea alku” (Rosenau 2000), missä etsitään ja haetaan ensin mahdollisuuksia ilman tarkkoja tietoja tai rajoja. Sumea alku liittyy tyypillisesti sellaisiin tuotekehitysprosesseihin, joissa tavoitellaan suhteellisen korkean uutuusarvon omaavia tuotteita. Tyypillistä näille prosesseille on, että asiakkaiden uudet tarpeet ja tuoteideat saavat alkunsa potentiaalisista uusista teknologioista tai ympäröivän maailman muutoksista. (Haapalainen & Lindman 2011.)

Tämän kehittämistyön tuotekehitysprojektin henkinen alku on ollut kehittäjänsä kiinnostus kaikenlaisiin koneisiin ja härveleihin. Tekstien ja piirustusten muotoiseksi konkretiaksi projekti alkoi hahmottua kehittäjänsä opiskelun myötä, koska opintojen edistyminen vaati teknologiatietämyksen syventämistä. Kehittämistyössä käsiteltävän tuotteen, micro-chp laitoksen, kehittämiseksi tarvitaan puolestaan materiaa ja testejä. Tuotekehitysprosessi käytettiin soveltuvin osin Ulrich ja Eppingerin määrittelemää tuotekehitysmallia. Ulrich ja Eppinger (1995) määrittelevät tuotekehityksen sarjaksi toimintoja (kuvio 2.), joiden avulla yritys keksii, suunnittelee ja kaupallistaa tuotteen.



Kuvio 2. Tuotekehitysprosessi (mukailtu Ulrich & Eppinger 1995, 9)

Tuotekehitys jaetaan mallissa viiteen vaiheeseen. Kuhunkin vaiheeseen liittyy tehtäviä ja lisäksi malli linkittää myös organisaation eri toiminnot tuotekehityksen eri vaiheisiin. (Ulrich & Eppinger 1995, 14.)

Tässä kehittämistehtävän raportissa sovelletaan ja kuvataan Ulrich ja Eppingerin (1995) tuotekehitysprosessin vaihteita kaksi ja kolme. Prosessin toisessa vaiheessa määritellään tuotearkkitehtuuri sekä tuotteen eri osat ja komponentit. Työ voidaan aloittaa luomalla erilaisia vaihtoehtoja, joita sitten tarkastellaan ja joista valitaan lopulta yksi. (Ulrich & Eppinger 1995, 15, 17.)

Prosessin kolmas vaihe on yksityiskohtainen suunnittelu. Kaikki tuotteen osat määritellään yksityiskohtaisesti: mitkä ovat niiden mitat, toleranssit ja materiaalit. Tässä vaiheessa eritellään myös, mitkä osat ovat standardiosia, jotka voidaan hankkia muualta ja mitkä tullaan valmistamaan itse. Myös valmistus / kokoonpanosuunnitelmia täsmennetään. (Ulrich & Eppinger 1995, 15, 17.)

Koska molempiin edellä esitettyihin tuotekehityksen vaiheisiin kuuluu mukaan myös talousnäkökulma, on tässä työssä pohdittu myös laitteiston järkevää hinnanmuodostusta ja mahdollista kilpailuasetelmaa laitemarkkinoilla.

## 2 PUUN KAASUTUS

Kaasutusta käytetään, kun halutaan muuttaa kiinteät polttoaineet, kuten puu, kaasumaiseen muotoon. Kaasumainen polttoaine voidaan polttaa sellaisenaan, sitä voidaan käyttää moottoripolttoaineena tai jatkojalostettuna polttokennoissa. Puun kaasutus tapahtuu kaasunkehittimessä, jossa puu on lämpötilassa jossa se normaalisti palaisi, mutta ilma- saantia rajoittamalla puu saadaan kaasuuntumaan. Palaminen eroaa kaasuuntumisesta siinä, että palamisen tavoite on tuottaa mahdollisimman korkea lämpötila hapetus- pelkistysreaktion avulla käyttämällä palamiskelpoinen materiaali kokonaan. Kaasutuk- sessa osa palavasta materiaalista käytetään tuottamaan lämpöä, jolla loppu materiaali muutetaan kaasuksi.

Puun alkuainekoostumus muodostuu pääasiassa hiilestä, vedystä ja hapesta. Näiden osuus puun kuiva-aineen massasta on noin 99 %, joten tuhkaa on vähän. Puun tuhka- pitoisuus on tavallisesti pienempi kuin muiden kiinteiden polttoaineiden. Puussa haihtuvia eli helposti kaasuuntuvia aineita on paljon, 80 – 90 % (Kytö et al. 1983). Kiinteä aine on pääosin hiiltä. Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien poltettavien puulajien tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ).

TAULUKKO 1. Puulajien kuiva-tuoretiheys (Kytö et al. 1983)

Puutavara laji	Puulaji	Kuiva-tuoretiheys, $\text{kg/m}^3$
Kuorellinen pinopuu	Mänty	390
	Kuusi	380
	Koivu	490
	Leppä	360

Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,3 – 20,0 MJ/kg (5,083 – 5,555 kWh/kg) ja vastaavasti dieselöljyn 41,5 MJ/kg (11,528 kWh/kg) (Liite 2).

## 2.1 Puukaasu

Kaasutusprosessissa puun biomassasta erotetaan kaasuuntuvia ainesosia korkeassa lämpötilassa. Vähähappisen prosessin ja siitä seuraavan kaasuuntumisen tuloksena saadaan puukaasua, jonka koostumus on keskimäärin seuraava:

hiilimonoksidi	CO	17 – 22%
vety	H <sub>2</sub>	16 – 20%
metaani	CH <sub>4</sub>	2 – 3%
erilaisia hiilivetyjä	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	0,2 – 0,4%
hiilidioksidi	CO <sub>2</sub>	10 – 15%
typpi	N <sub>2</sub>	45 – 50%

Ennen käyttöä, puukaasu puhdistetaan noesta, hiilestä sekä muista hiukkasista.

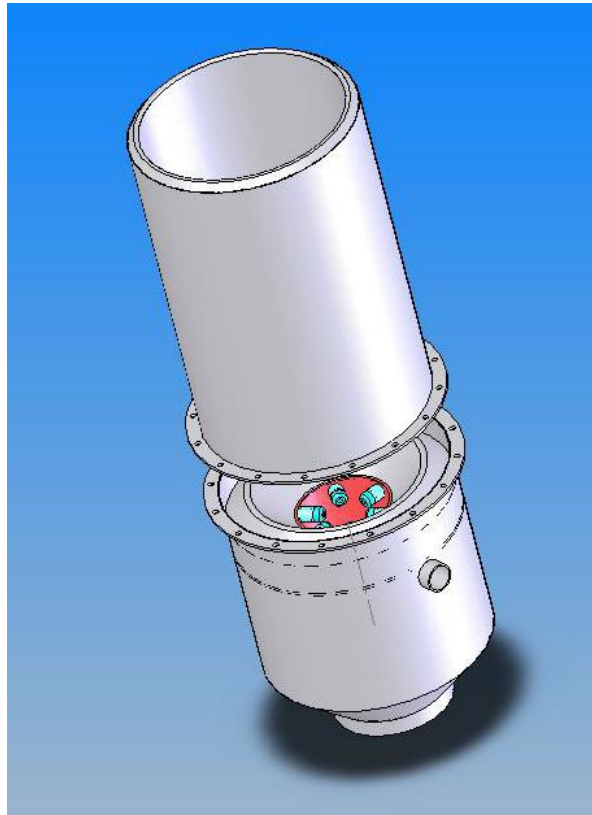
Puukaasu sisältää runsaasti vetyä ja hiilimonoksidia, eikä sen poltossa sivutuotteena synny lainkaan ympäristölle haitallisia päästöjä. Energiaa kuivassa puukaasussa on 5,0 – 5,5 MJ/m<sup>3</sup> eli 1,4 – 1,5 kWh/m<sup>3</sup>. Uusiutuvana ja päästöttömänä, energiantuotannon muotona puukaasu on erittäin ympäristöystävällinen (Gasek 2012).

## 2.2 Puukaasun valmistus

Puukaasua saadaan helpoiten tehtyä metsähakkeesta, koska silloin puun käsittely kaasuttimessa voidaan helposti automatisoida. Hakkeen palakoolla on merkitystä, koska liian pieni palakoko haittaa ilmankiertoa puukaasuttimessa ja riittävää sekä läpäisykykyistä pelkistymishiilikerrosta ei muodostu (Parmala 1980). Hake saa olla kosteusarvoltaan 20 – 40 % hyvän kaasuuntumisen aikaansaamiseksi, kosteusarvo vaikuttaa kaasun lämpöarvoon. Gasekin mukaan kuivan kaasun lämpöarvo on 5,0 – 5,5 MJ/m<sup>3</sup> ja lämpöarvo kosteana 4,5 – 5,0 MJ/m<sup>3</sup>. Raakakaasu sisältää ~12 % vettä, kun polttoaineen kosteus on 20 %. Kaikki puulajit sopivat kaasuttamiseen ja myös muun biomassan kaasuttaminen on mahdollista samalla periaatteella (Gasek 2009).

Kaasu valmistetaan kaasunkehittimessä (kuva 1), joka koostuu polttoainevarastosta ja tulipesästä sekä tarvittavista ilma- ja kaasukanavista. Kehitin on rakenteeltaan ilmatii-

vis, ja palamiseen tarvittava ilma tuodaan tulipesään hallitusti palamisilmasuuttimien kautta.



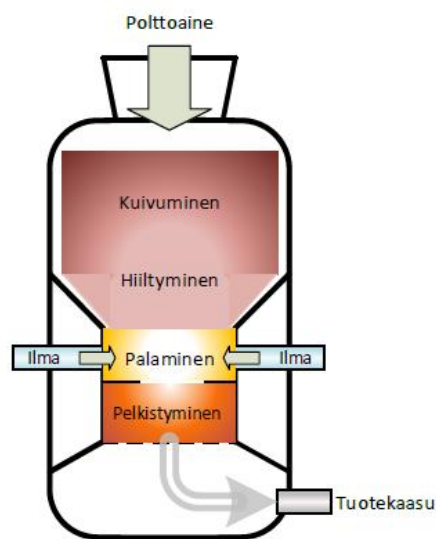
KUVA 1. Kaasunkehitin (Eloranta 2015)

Kaasunkehitin voidaan rakentaa hyvin monella eri tavalla, mutta päätoimintatavaltaan ja – rakenteeltaan ne ovat joko myötävirtakaasuttimia, vastavirtakaasuttimia tai ristivirtakaasuttimia. Nimi viittaa siihen, mihin suuntaan kaasut virtaavat polttoaineeseen nähden. Kaasujen virtaussuunnalla on vaikutusta kaasun koostumukseen. Puhtain kaasu saadaan myötävirtakaasuttimella ja huolehtimalla siitä, että tulipesän hiilikerros pysyy kuohkeana. Näin kaasuun ei muodostu epäpuhtauksia, esimerkiksi tervaa, juuri lainkaan. Epäpuhtauksista terva on laitteiston pitkäaikaisen ja häiriöttömän käytön kannalta vaikein hiilivety-yhdiste. Tervan syntyä pitää pyrkiä rajoittamaan ja sen sisältämä energia tulisi hyödyntää. Kaasunkehittäimestä tuleva tuotekaasu on erittäin kuumaa, jopa yli 400 °C. Tervan kastepiste eli lämpötila, jonka alapuolella se kondensoituu ja yläpuolella se on kaasumaisessa muodossa, on 375 – 400 °C (Basu 2006). Koska tulevan tuotekaasun lämpötila ja tervan kastepiste ovat samaa suuruusluokkaa, on laitteiston kannalta kriittistä, missä laitteen osassa terva kondensoituu ja miten kondensoitunut terva käsitellään.

Polttoaineena kaasunkehittimessä voidaan käyttää pilkettä tai palahaketta, joilla saadaan aikaiseksi varma toiminta, mutta teho on pienempi kuin pienhakteella. Pienhakteella tulee hyvää kaasua runsaasti, mutta vaarana on arinan tukkeutuminen ja syöttöhäiriöt.

### 2.3 Kaasunkehittimen toiminta

Parmalan (1980) mukaan kaasunkehitin voi olla rakenteeltaan, joko panos- tai jatkuva- täyttöinen. Polttoainesäiliö sijaitsee tulipesän yläpuolella, josta uutta polttoainetta laskeutuu palaneen tilalle tulipesään. Kun polttoaine on sytytetty, syntyy kaasunkehittimeen erilaisia vyöhykkeitä kuvan 2 mukaisesti. Ilmasuuttimien kohdalla polttoaine palaa. Syntyvä lämpö kuivattaa ja hiiltää palamisvyöhykkeen yläpuolella olevan polttoaineen. Palamisvyöhykkeessä syntyneet kaasut ja osa vesihöyrystä kulkevat tulipesässä alaspäin pelkistymisvyöhykkeeseen. Pelkistymisvyöhykkeen muodostaa hehkuva hiilikerros, jonka lämpötila on yli 800 °C.



KUVA 2. Kaasunkehittimen vyöhykkeet (Eloranta 2016)

Kulkiessaan hehkuvan kerroksen läpi hiilidioksidi pelkistyy kaavan (1) mukaan hiilimonoksidiksi eli häkäkaasuksi (Parmala 1980).



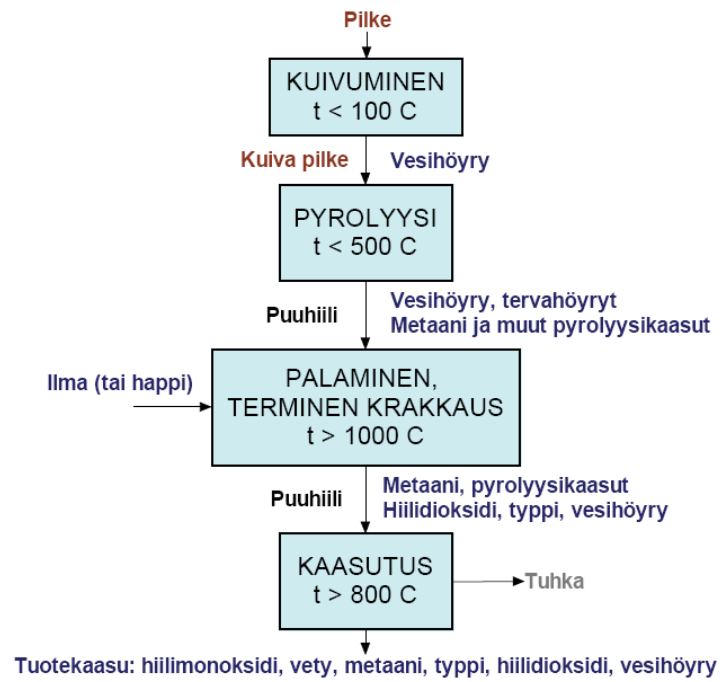
Vesihöyry reagoi hehkuvan hiilen kanssa kaavan (2) mukaisesti (Parmala 1980).



Kaasujen muodostuminen tapahtuu kaasunkehittimen tulipesässä. Tulipesässä alimmaisena on arina. Arina on rakenteeltaan kaksiosainen. Siinä on kiinteä osa ja liikuteltava osa. Liikuteltava osa nousee ja laskee kiinteän osan välissä ylös ja alas. Tällä liikkeellä arina pidetään avoinna. Arinan päälle muodostuu hiilestä pelkistyskerros. Keskimmäisenä tulipesässä on tulipesärenkas. Tulipesärenkaassa olevan reiän läpimitta määrää saatavan kaasunmäärän aikayksikköä kohden. Tulipesärenkaan ja arinan välinen etäisyys on oltava riittävä, jotta CO:ta ja lämpöä muodostuisi tarpeeksi. Liian suuri väli aiheuttaa kaasun virtauksen tulipesän reunoille, jolloin CO:n muodostus pienenee. Ylimpänä tulipesässä ovat ilmasuuttimet. Niiden etäisyys tulipesärenkaasta on myös määriteltä, samoin suuttimien lukumäärä ja niissä olevan reiän koko. Suuttimia voi olla kahta eri pituutta, näin saadaan tasaisempi ilmanjako palovyöhykkeelle, joka muodostuu suuttimien tasalle.

Koska vyöhykkeet kaasunkehittimessä ovat vain polttoainekerroksia, on vakaa kaasun kehittyminen häiriöille altis. Häiriöitä aiheuttavat ensinnäkin arinan tukkeutuminen hienojakoisesta hiilestä sekä tuhkasta ja toiseksi arinan liike, kun arinaa pidetään auki. Myös polttoaineen lisäys häiritsee kaasuuntumisprosessia.

Kuviossa 3 on kuvattu myötävirtakaasuttimen vyöhykkeiden tapahtumat ja niiden lämpötilat (Lampinen 2009, 290).



KUVIO 3. Pilkekäyttöisen myötävirtakaasuttimen toiminnan lohkokaavio (Lampinen 2009, 290)

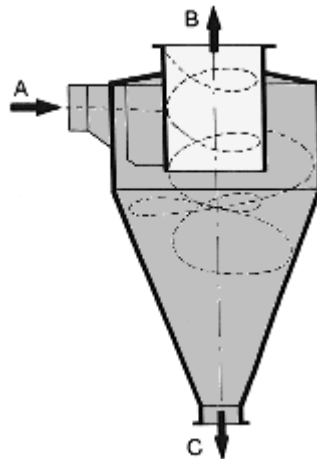
Syntyvä kaasu sisältää siten vetyä ja hiilimonoksidia eli häkää. Lisäksi kaasussa on pieniä määriä metaania ja muita hiilivetyjä. Palavien ainesosien lisäksi kaasu sisältää erilaisia palamattomia komponentteja, kuten typpeä, hiilidioksidia sekä vesihöyryä. Lisäksi se sisältää erilaisia epäpuhtauksia, lähinnä tuhkaa ja nokea  $2 \dots 5 \text{ g/Nm}^3$  (Parmala 1980).

## 2.4 Kaasun jälkikäsitely

Kaasunkehittimestä tullessaan, puukaasu sisältää kiinteinä epäpuhtauksina tuhkaa ja nokea, joten kaasu on puhdistettava ennen käyttöä. Moottorikäytössä epäpuhtaudet aiheuttaisivat eri osien nopean kulumisen. Lisäksi ne tukkisivat jäähdyttimen sekä kaasuputkiston ja polttokennokäytössä koko polttokennon.

### 2.4.1 Sykloni

Kaasunkehittimestä puukaasu imetään erillisellä imurilla/puhaltimella tai moottorikäytössä moottori-imulla. Imu aiheuttaa sen, että kaasun mukana kulkeutuu ilmaa raskaampia ainesosia, kuten tuhkaa. Syklonin tehtävänä on poistaa tulevasta kaasusta ilmaa raskaampia ainesosia ja samalla se estää hehkuvien kipinöiden pääsyn suodattimeen. Sykloniin kaasu tulee pyörrekammion yläosasta, kuvassa 3 kohta A. Kaasu saa pyörivän liikkeen ja keskipakoisvoima erottaa kaasusta raskaammat ainesosat, jotka putoavat liike-energian vähentyessä kohti syklonin pohjaa ja ovat siten poistettavissa aukon C kautta. Kaasu poistuu liitännän B kautta. (Pölynerotus 2013.)



KUVA 3. Sykloni (Pölynerotus 2013)

Rakenteellisesti sykloni voi olla erillinen osa tai se voidaan sijoittaa suodattimen yhteyteen.

### 2.4.2 Suodatin

Suodattimella poistetaan loput kiinteät epäpuhtaudet, jotka eivät ole jääneet sykloniin. Suodatin rakenteita ja -materiaaleja on erilaisia. Suodattimen valintaan vaikuttaa ensisijaisesti haluttu puhdistustaso ja jäännöspartikkelikoko. Lämmönkestävyys ja haluttu huoltoväli/huollettavuus ovat myös ratkaisevia tekijöitä suodatusjärjestelmän valinnassa.

Kangassuodattimella tuotekaasusta voidaan poistaa 70 – 95 % partikkeleista ja 0 – 50 % tervapitoisuuksista (Han & Kim 2008). Kangassuodattimet voivat olla levymäisiä, pusseja tai patruunoita. Suodatin voi olla jäykkä tai joustava, ja materiaalina voi olla lähes kaikentyyppiset materiaalit, kuten kudottu lanka (luonnollinen tai synteettinen), huopa ja punottu huopa, erilaiset polymeerit sekä muut sulatevedetyt materiaalit, kuten lasikuitu. (Sutherland 2008.)

Keraamiset suodattimet soveltuvat hyvin kuumien kaasun suodattamiseen. Ne kestävät hyvin korkeita lämpötiloja ja kemiallisia olosuhteita. Kiinteinä rakenteina ne pysyvät muodossaan eivätkä tarvitse erillisiä pidikkeitä. Keraamiset suodattimet ovat pitkäkestoisia ja ne ovat puhdistettavissa paineilmalla, vastavirralla tai vielä tehokkaammalla pulssipuhdistuksella. Lisäksi kokonaisuuden kannalta hyvänä asiana täytyy ottaa huomioon keraamisten suodattimien pieni virtausvastus.

### 2.4.3 Jäähdytin

Suodatuksen jälkeen kaasun lämpötila on edelleen korkea, 150...200 °C. Moottorikäytössä kaasu jäähdytetään lämpötilaan 20...30 °C moottoritehon parantamiseksi. Näin moottorin volymetrinen hyötysuhde saadaan paremmaksi ja siten myös moottoriteho paranee (Parmala 1980). Moottorikäytössä jäähdytys voidaan tehdä käyttämällä kaasun suodatukseen vesipesua. Vesipesun ongelmaksi muodostuvat saastuneet pesuvedet, jotka on jatkokäsiteltävä asianmukaisesti.

Polttokennokäytössä kaasua ei kannata jäähdyttää, vaan se johdetaan suodatuksen jälkeen suoraan reformeriin. Koska reformointiprosessi tarvitsee toimiakseen 750 – 1000 °C lämpötilan, voidaan prosessissa hyödyntää kaasun lämpö ja näin nostaa laitteiston

kokonaishyötysuhdetta. Jos tuotekaasu saadaan johdettua riittävän korkeassa lämpötilassa reformerille asti, terva on kaasumaisessa muodossa eikä aiheuta laitteistolle ongelmia.

### 3 SÄHKÖN TUOTANTO

Mikro- chp laitoksen kokorajana voidaan pitää yksivaiheisen tuotannon liittymisrajaa 16 A, joka vastaa tuotantolaitoksen maksimitehoa 3,68 kW. Kolmivaiheisena liitetylle tuotannolle tämä tarkoittaa maksimitehoa 11 kW jännitetasolla 400 V. Mikrotuotantoa on tuotanto, joka liittyy maksimissaan virralla 16 A per vaihe yksi- tai kolmivaiheisena jännitetasolle 230/400 V ja toimii rinnan jakeluverkon kanssa. Mikrotuotantoa voitaneen ajatella tuotantona, joka on tarkoitettu tuottamaan energiaa ensisijaisesti kulutuskohteen omaan käyttöön ja toissijaisesti verkkoon. (Lehto 2009.)

#### 3.1 Generaattori

Generaattorilla liike-energia muutetaan sähköenergiaksi. CHP-laitteistossa generaattorin tarvitsema liike-energia saadaan moottorista, joka käyttää puukaasua polttoaineenaan. Yleisesti ottaen generaattorit toimivat hyvällä, yli 90 %:n hyötysuhteella (Liite 3).

##### 3.1.1 Otto- ja dieselmoottori

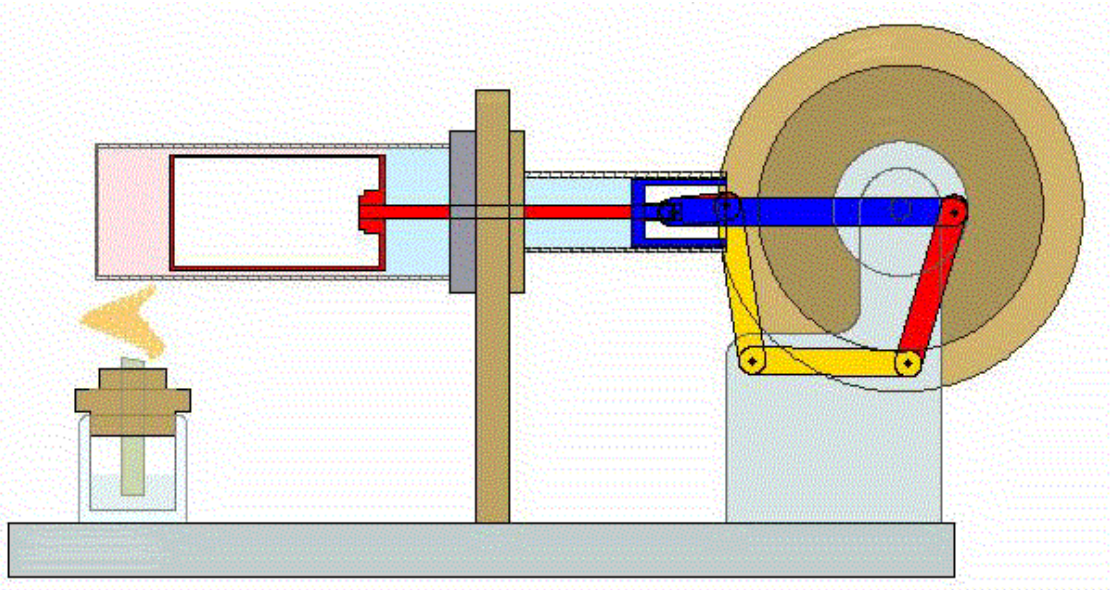
Otto- ja dieselmoottorit soveltuvat puukaasukäyttöön hyvin. Ottomoottorin muutos puukaasukäyttöiseksi vaatii ainoastaan kaasunsekoittimen lisäämisen ja sytytysennakon säätämisen aikaisemmalle. Dieselmoottoreista puukaasukäyttöön kannattaa ottaa vain suoraruiskutusmoottoreita ja käyttää niitä dieselkaasukäyttöisinä. Siinä kaasusekoittimesta syötetty kaasuseos sytytetään sylinteriin ruiskutettavalla sytytyspoltonesteannoksella. Sylinteriin ruiskutettavan polttonesteen määrä säädetään noin puoleen normaalin tyhjäkäynnin syöttämästä polttonesteannoksesta. Ruiskutuslaitteiden tilalle voi myös laittaa sytytystulpat ja toteuttaa sytytys niillä. Lisäksi tarvitaan myös muut sytytysjärjestelmän osat. (Parmala 1980.)

Otto- ja dieselmoottoreiden käyttöä micro-chp laitteistoissa puoltaa moottoreiden helppo saatavuus ja edullinen hinta. Hyötysuhteeltaan ottomoottorit pääsevät enimmillään 30 %:iin ja dieselmoottorit 40 %:iin. Tästäkin huolimatta niitä käytetään pyörittämään generaattoria, koska tekniikka on tuttua ja varmatoimista, varaosat ovat edullisia ja te-

hoa saadaan riittävästi. Puukaasukäytössä tulee kuitenkin vielä huomioida, että otto-moottorin teho laskee noin puoleen bensiinikäyttöön verrattuna ja dieselmoottorin teho-kin noin neljänneksen (Parmala 1980). Moottoreiden lyhyt huoltoväli tekee niiden käytöstä työlästä ja se voi olla monelle este hankkia micro-chp – laitteistoa.

### 3.1.2 Stirling-moottori

Stirling-moottori on keksitty ennen polttomoottoria vuonna 1816, mutta sen hyödyntäminen on jäänyt vähäiseksi. Stirling-moottori on lämpötilaeron avulla toimiva kuuma-kaasumoottori, jossa kaasun kuumennus tapahtuu moottorin ulkopuolella, kuten kuvios-  
ta 4 nähdään. Stirling-moottorissa on suljettu kaasunkierto, joten sen lämmönlähteenä voidaan käyttää erilaisia energialähteitä. Micro-chp laitteistoon liitetyssä Stirling-moottorissa, tuotettu puukaasu voidaan polttaa suoraan puhdistamattomana ja näin lait-  
teiston hyötysuhde kasvaa.

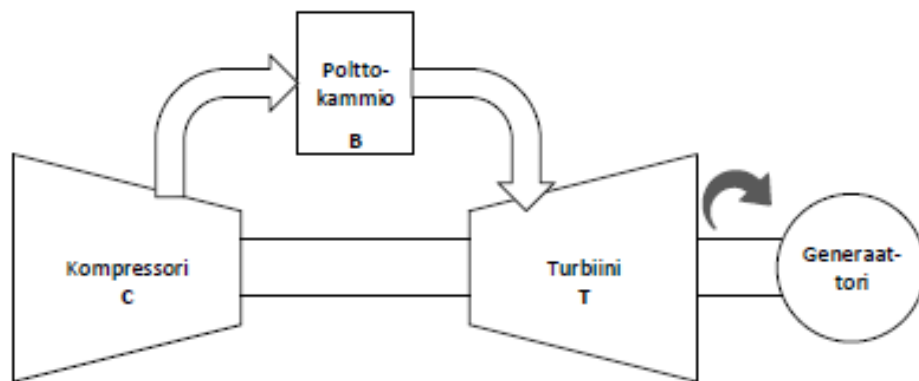


KUVIO 4. Beetatyyppin Stirling-moottori (<http://web.mit.edu>).

Stirling-moottorit ovat kokoonsa nähden pienitehoisia. Stirling-moottorin eduiksi voi-  
daan lukea sen yksinkertainen rakenne ja etenkin se, että sen polttoaineena voidaan  
käyttää melkein mitä vaan, mistä saadaan lämpöä. Moottori toimii myös suoralla aurin-  
koenergialla. Maailmalta löytyy myynnistä pienitehoisia moottori-  
generaattoriyhdistelmiä, mutta niiden hinnat ovat liian korkeita suunniteltuun micro-chp  
laitteistoon (New Energy Direction).

### 3.2 Kaasuturbiini

Kaasuturbiini on rakenteeltaan yksinkertainen ja kokoonsa nähden tehokas moottori. Kaasuturbiini koostuu samalle akselille liitetystä ahtimesta ja turbiinista. Ahtimen (kuviassa 5. kohta C) ja turbiinin välissä on polttokammio (B), johon ahdin työntää ilmaa. Polttokammiossa polttoainetta poltetaan ja palokaasut ohjataan turbiinin (T) siivistöön. Laajenevat palokaasut työntävät turbiinin siipiä edestään ja saavat aikaan pyörimisliikkeen.



KUVIO 5. Kaasuturbiinin toimintaperiaate. (Eloranta 2016)

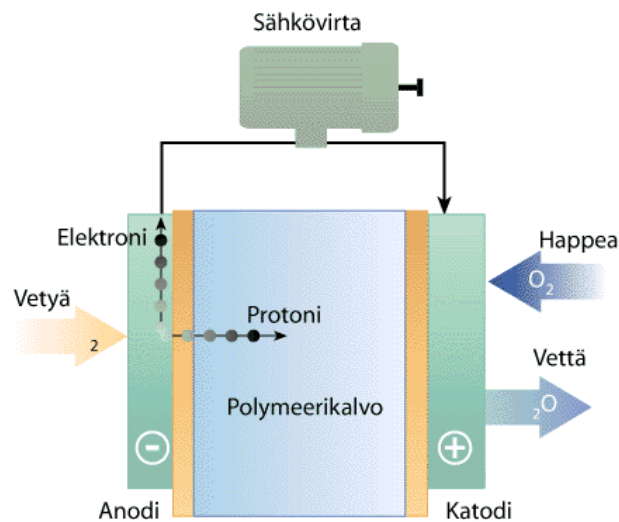
Stirling-moottorin tapaan, kaasuturbiinissa voidaan puukaasu käyttää sellaisenaan polttoaineena. Sähköntuotannon hyötysuhde on pelkällä kaasuturbiinilla noin 25 - 37 % (Motiva). Vähäisen huollontarpeen vuoksi, kaasuturbiini olisi sovelias voimanlähde micro-chp laitteistoon, mutta tällä hetkellä korkea hinta ja riittävän pienitehoisen kaasuturbiinin saatavuus rajoittaa niiden käyttöä.

### 3.3 Polttokenno

Vety (H) on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Sitä voidaan käyttää lähes päästöttömänä polttoaineena modifioiduissa polttomoottoreissa, koska palamistuotteena syntyy lähinnä vettä. Vedyn tehollinen lämpöarvo massa-yksikköä kohden on huomattava eli 119,9 MJ/kg. Esimerkiksi kevyen polttoöljyn lämpöarvo on noin 42,5 MJ/kg ja diesel-

öljyn noin 41,5 MJ/kg, eli näihin verrattuna vedyllä on lähes kolminkertainen lämpöarvo. (Teräsvirta 2010.)

Polttomoottoreihin verrattuna vety toimii vielä paremmin polttokennoissa (kuvio 6). Polttokennoissa ei niiden nimestä huolimatta pala mikään, vaan ne ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuttavat vedyn tai vetyrikkaan polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköksi. Toisin kuin polttomoottorit, polttokennot eivät synnytä lainkaan tyypen oksideja. Polttokennoissa ei myöskään ole liikkuvia osia, ne toimivat lähes äänettömästi ja voivat olla jopa 2,5 kertaa polttomoottoria tehokkaampia.



KUVIO 6. Polttokennon toimintaperiaate (Ojanperä 2008)

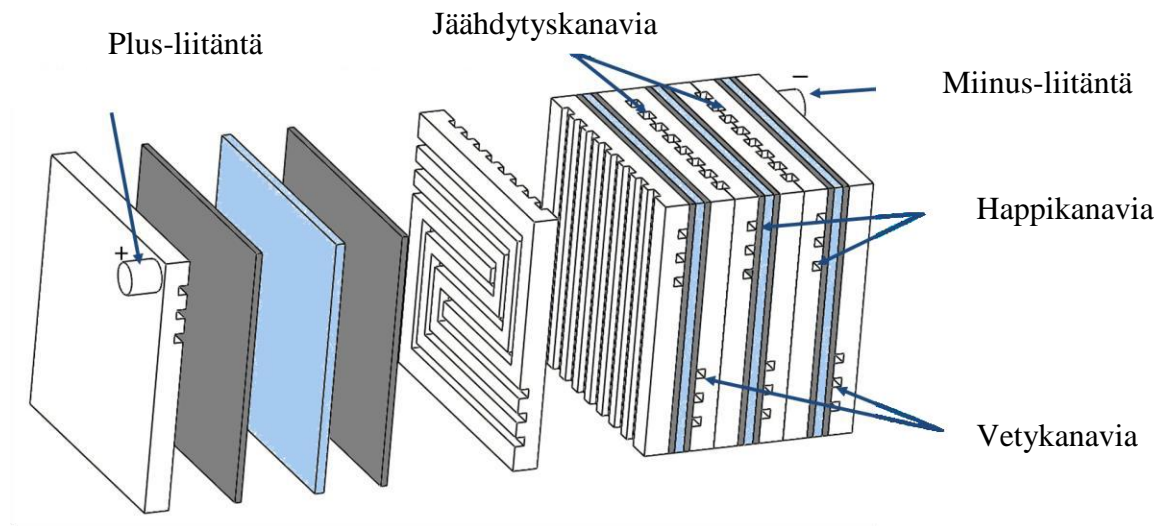
Polttokennon toimintaperiaatteeseen kuuluvat seuraavat vaiheet: (esimerkiksi Corre & Irvine 2010)

- Polttokennon polttoainetta, vetyä, syötetään paineella negatiiviselle elektrodille (anodille) ja hapetinta, hapetta, syötetään paineella positiiviselle elektrodille (katodille).
- Kun vetyatomit paineen pakottamana kohtaavat anodin pinnalla olevan katalyytin, hajoavat vetymolekyylit kahdeksi vetyioniksi (positiivisesti varautuneiksi ioneiksi) ja kahdeksi negatiivisesti varautuneeksi elektroniksi. Positiivisesti varautuneet protonit kulkeutuvat elektrolyyttikalvon läpi ja yhtyvät katodilla happeen. Negatiivisesti varautuneet elektronit eivät pääse kulkeutumaan positiivisia ioneja johtavan elektrolyyttikalvon läpi, vaan ne pakotetaan kulkemaan ulkoisen

virtapiirin ja kuorman läpi katodille. Elektronien kulkeminen virtapiirissä tuottaa sähkövirtaa.

- Kun elektronit ovat kulkeneet läpi virtapiirin, yhtyvät ne katodilla protoneihin sekä happeen muodostaen polttokennon lopputuotteita eli vettä ja lämpöä. Polttokennon reaktiotuotteena syntyy käytettävän polttoaineen palamistuotteita. Jokainen polttokenno tuottaa yksinään vain pienen jännitteen (~1V).

Koska yksittäinen polttokenno tuottaa vain noin 1 V:n jännitteen, täytyy niistä koota sarjaan kytkemällä halutun suuruisen jännitteen antavia kennostoja. Kuviossa 7 on esitetty osat, joista polttokennosto muodostuu.



KUVIO7. Polttokennoston rakenne (Teräsvirta, A 2010)

Polttokenno käy useille polttoaineille, yleisimpiä ovat vety, metanoli ja maakaasu mutta on olemassa myös esimerkiksi bensiinillä käyvä japanilainen kenno (Cosmo Oil). Vety on ainoa polttoaine joka käy polttokennolle suoraan, kaikkien muiden polttoaineiden rakennetta on muokattava reformoimalla. Matalan lämpötilan kennot tarvitsevat erillisen laitteen, mutta korkeamman lämpötilan kennot kykenevät itse reformoimaan polttoaineensa.

Polttokennojen kemialliset kennoreaktiot riippuvat käytettävästä polttoaineesta ja kennon elektrolyytistä (Teräsvirta 2010). Polttokennotyypit nimetään varauksenkuljettajan eli elektrolyytin mukaisesti. Tärkeimmät polttokennotyypit ovat (Fuel Cell Handbook 2004, 27):

1. Fosforihappopolttokenno (PAFC)
2. Polymeerielektrolyttikalvopolttokenno (PEMFC)

3. Alkalipolttokenno (AFC)
4. Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)
5. Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)

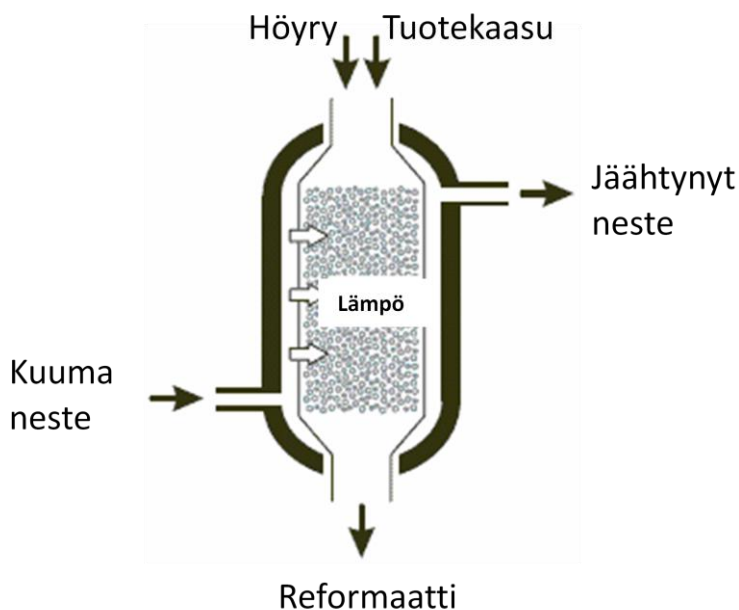
Polttokennot voidaan jaotella myös käyttölämpötilan mukaan. Tällöin sulakarbonaatti- ja kiinteäoksidipolttokennot ovat korkean lämpötilan polttokennoja. Polymeerielektrolyyttikalvo- ja alkalipolttokennoja kutsutaan matalan lämpötilan polttokennoiksi. (Teräsvirta 2010). PAFC-polttokennot luetaan kuuluvan matalan lämpötilan polttokennoihin, mutta joskus myös korkean lämpötilan polttokennoihin.

Matalan lämpötilan polttokennot soveltuvat vaihtelevien kuormien sovelluksiin, koska ne käynnistyvät nopeasti ja pystyvät vastaamaan nopeasti kuorman muutoksiin. Polttoaineen pitää kuitenkin olla puhdasta vetyä tai laitteistossa pitää olla reformaattori kaasun käsittelyä varten.

Korkean lämpötilan polttokennot soveltuvat paremmin tasaisen kuorman sovelluksiin. Korkean toimintalämpötilan takia niiden käynnistyminen toimintakuntoon vie aikaa, mutta toisaalta ne taas kestävät paremmin huonompilaatuista polttoainetta. Korkean käyttölämpötilansa ansiosta polttoaine reformoituu suoraan polttokennossa, ilman erillistä reformaattoria. Micro-chp käytössä polttokennon korkea lämpötila voidaan hyödyntää lämmönlähteenä ja näin kokonaishyötysuhde kasvaa ja voi olla jopa 90 %.

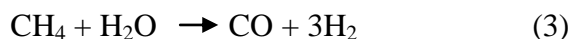
### 3.3.1 Kaasun reformointi

Koska puukaasu koostuu eri alkuaineista ja yhdisteistä, sitä on muokattava ennen sen syöttämistä polttokennoon. Polttokennon ”polttoaine” on vety (H), jonka osuus puukaasussa on 16 - 20 %. Lisäksi kaasussa on yhdisteitä, jotka sisältävät vetyä. Metaania puukaasussa on 2 - 3 % ja muita hiilivetyjä 0,2 - 0,4 %. Vety voidaan erottaa hiilivedyistä höyryreformoinnilla, joka on teollisuudessa vallitseva tapa vedyn tuottamiseen. Prosessissa hiilivety reagoi vesihöyryn kanssa, jolloin tuotekaasuna muodostuu pääosin hiilimonoksidia ja vetyä. Kuviossa 8 on tyypillisen reformointiastia (In Genuity Creations, 2008).



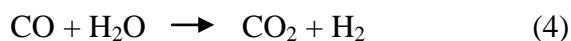
KUVIO 8. Tyypillinen reformointiasia (In Genuity Creations, 2008). Tuotekaasu ja höyry tulevat yläkautta ja reformaatti poistuu alakautta.

Reformointi tapahtuu puhaltamalla hiilivetykaasua 20 - 35 baarin paineella reformeriin, jossa se nikkeli-katalyytin vaikutuksesta reagoi veden kanssa 750 - 1000 C° lämpötilassa. Metaanilla reaktio menee kaavan (3) mukaisesti (Noponen 2003).



Reaktio on endoterminen eli vaatii ylimääräistä lämpöä toteutuakseen. Osa tarvittavasta lämmöstä tulee puukaasun mukana, koska kaasuttimesta tulevan puukaasun lämpötila on 250 - 300 °C.

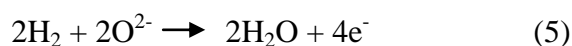
Puukaasu sisältää kaasuttimesta tullessaan hiilimonoksidia 17 – 22 %, lisäksi sen osuus kasvaa reformoinnin seurauksena. PEM- ja PA-polttokennoissa hiilimonoksidi voi aiheuttaa ongelmia niissä käytetyn platinakatalyytin kohdalla. Reformoitu kaasu voidaan käsitellä vielä yhdellä tai useammalla shift-reaktiolla. Shift-reaktion tarkoituksena on lisätä vedyn osuutta kaasuseoksessa sekä vähentää hiilimonoksidin määrää. Vesikaasu shift-reaktio menee kaavan (4) mukaisesti (Noponen 2003).



Reaktion lämpötila on katalyytistä riippuen 200 – 600 °C. Normaalisti shift-reaktion jälkeinen kaasu on pääosallisesti vetyä (70 – 80 %) ja hiilimonoksidin osuus on vain joitain painoprosentteja kokonaiskaasukoostumuksesta. Shift-reaktion jälkeen vety vielä tarvittaessa puhdistetaan. Puhdistustarve riippuu käytetyistä polttokennoista. Polymeeri-polttokennoilla vaaditaan alle 10 ppm CO-puhtautta.

### 3.3.2 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)

Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC) sisältää vain kiinteitä osia. Se käyttää elektrolyytinä kiinteää metallioksidia. Se on tästä johtuen muita polttokennotyyppejä yksinkertaisempi eikä vikaannu yhtä helposti. Lisäksi korkeiden käyttölämpötilojen johdosta arvo-metallikatalyyttejä ei tarvita. SOFC käyttää kiinteätä keraamista elektrolyyttiä. Suosituin SOFC elektrolyyttimateriaali on yttriumoksidilla stabiloitu sirkoniumoksidi (YTZ), joka on happi-ionijohde. Varauksenkantajana toimivat siis happi-ionit, jolloin vettä muodostuu katodin sijasta anodilla yhtälön (5) mukaisesti (Teräsvirta 2010).



SOFC:n operointilämpötila on tällä hetkellä 600 – 1000 °C. Korkea operointilämpötila tarjoaa sekä haasteita että etuja. Haasteet liittyvät kennojen keskinäisliitännään ja kennoon liitettävään laitteistoon. Erityisesti sen tiivistys on ongelmallinen materiaalien lämpölaajenemisesta johtuen. Etuja ovat polttoaineiden kirjo, korkea sähköntuotannon hyötysuhde (50 – 60 %) ja mahdollisuus sähkön ja lämmön yhteistuotantoon käyttämällä hyödyksi korkealämpötilaista hukkalämpöä.

### 3.3.3 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)

Sulakarbonaattikennon (MCFC) elektrolyytti on sula alkalimetallikarbonaattiseos (Liti-um-kalium- tai litium-natrium -karbonaatti), joka on kiinnitetty keraamiseen LiAlO<sub>2</sub> -matriisiin. Huomionarvoista on se, että toisin kuin muissa polttokennotyypeissä on katodille syötettävä hapen lisäksi hiilidioksidia. Sulakarbonaattikennon verrattain korkea käyttölämpötila (650 °C) tarjoaamahdollisuuden käyttää useampaa eri polttoainetta. MCFC voi käydä vedyllä, yksinkertaisilla hiilivedyillä (esim. metaani) ja alkoholeilla.

Yleisin käytetty polttoaineen maakaasu. MCFC kestää epäpuhtauksia matalan lämpötilan polttokennoja paremmin ja pystyy hyödyntämään hiilimonoksidia polttoaineena. Sähköntuotannossa MCFC polttokenno pääsee lähelle 50 %:a. MCFC polttokennon teknologia on kaupallisella asteella toisin kuin SOFC polttokennojen teknologia (Teräsvirta 2010).

### 3.3.4 Fosforihappopolttokenno (PAFC)

Fosforihappopolttokenno (PAFC) käyttää protoneja johtavaa fosforihappoelektrolyyttiä. Polttoaineena käytetään vetyä ja hapettimena joko happea tai ilmaa. Elektrolyytin molemmilla puolilla on huokoiset, platinakatalyytillä päällystetyt grafiittielektrodit. Fosforihappo ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) on epäorgaanisista hapoista kemiallisesti stabiilein, se kestää parhaiten lämpötilavaihteluita ja haihtuu vähiten yli 150 celsiusasteen lämpötiloissa. Lisäksi fosforihappo sietää polttoaineen ja/tai hapettimen sisältämää  $\text{CO}_2$ :a, toisin kuin esimerkiksi alkalielektrolyytit. Puhtaan fosforihapon jähmettymislämpötila on  $+42\text{ }^\circ\text{C}$ , joten fosforihappokennoja pyritään yleensä pitämään käynnistyksen jälkeen aina tämän lämpötilan yläpuolella, jotta vuorottelevista jähmettymisistä ja sulamisista ei aiheutuisi elektrolyyttille turhaa rasitusta. Optimaalinen käyttölämpötila on  $180 - 210\text{ }^\circ\text{C}$ . (Larminie 2000).

Sähköntuotannossa PAFC polttokennon vedyllä hyötysuhde on 40 %. Puukaasukäytössä hyötysuhde laskee. PAFC polttokennoja on saanut kaupallisesti jo hyvin pitkään. Ensimmäiset sarjatuotantovalmisteiset polttokennolaitokset tulivat markkinoille 1990-luvun alussa. PAFC polttokennojen käyttöikä on pitkä, jopa yli 80 000 tuntia, mutta korkeat valmistuskustannukset vähentävät niiden käyttöä (Teräsvirta 2010).

### 3.4 Akusto

Akustoa tarvitaan micro-chp laitteistossa silloin, kun sähköä tuotetaan polttokennoilla. Polttokennojen tuottama sähkö on tasasähköä ja sen jännitteen suuruus riippuu kennoston kennojen lukumäärästä. Polttokennot lataavat akkuja ja akuista sähkö syötetään vaihtosuuntaajalle. Koska sähkönkulutus ei ole koskaan täysin tasaista, vaan siinä on suuriakin vaihteluja, akustolta vaaditaan hetkittäin suuria tehoja. Tarvittava akuston kapasiteetti riippuvat myös tavasta, millä kiinteistön sähköverkko liitetään yleiseen jakeluverkkoon. Suurin kapasiteetti tarvitaan, kun kiinteistön sähköverkko pidetään täysin erillään jakeluverkosta. Pienin kapasiteetti silloin kun kiinteistön sähköverkko syöttää jakeluverkkoa. Akustolla tulee kuitenkin aina olla niin paljon kapasiteettia, että sillä selvitetään jakeluverkoston häiriötilanteista.

Akkutyyppejä on monenlaisia. Avoimet lyijyakut soveltuvat ominaisuuksiltaan micro-chp – laitteiston sähkövarastoksi. Lyijyakut ovat olleet suosittuja jo yli vuosisadan ajan. Niiden tuotanto ja käyttö on edelleen kasvussa johtuen ajoneuvojen määrän lisääntymisestä ja hybridiautojen suosioista. Lyijyakuille on löytynyt uusia käyttötarkoituksia kulutuselektronikasta ja häiriöttömästä sähkönsyötöstä. Lyijyakun osuus koko maailman akkumarkkinoilla on noin 40 – 45 %. Se on lähes aina halvin vaihtoehto silloin kun sen käyttö on mahdollista. Akun käyttöikä on pitkä ja se säilyy kauan suorituskykyisenä käyttämättömänäkin. (Linden & B. Reddy 2002, 587.) Lyijyakut tarvitsevat huoltoa, kennoihin on lisättävä aika ajoin akkuvettä jota poistuu akkujen ylläpidossa. Varatessa akkuja syntyy vetyä, joka herkästi syttyvänä pitää johtaa ulkoilmaan.

Toinen vaihtoehto on suljetut, huoltovapaat lyijyakut eli rekombinaatioakut. Huoltovapaata lyijyakkua, on kahta eri tyyppiä. AGM-akuissa elektrolyytti on imeytetty huokoiseen lasikuitumattoon, jolloin matto toimii erottimena ja elektrolyyttivarastona. Geeliakussa elektrolyytistä on tehty geeli lisäämällä siihen hienojakoista piidioksidia. Nämä akut on varustettu ylipaineventtiilillä ja elektrolyytin määrä on rajoitettu, eikä sitä voi lisätä. Tämän rakenteen ominaisuutena on ylivarauksessa syntyvän hapen kulkeutuminen negatiivilevylle ja reagoiminen vedeksi. Suljettuihin akkuihin laitetaan enemmän negatiiviaktiivimateriaalia koska rekombinaatioreaktion tapahtuessa negatiivilevy ei saa olla täysin varattu. Suljettujen lyijyakkujen hyviä puolia ovat: huoltovapaus, pitkä käyttöikä, korkea varaushyötysuhde, matala hinta, jänniteskaala (saatavilla pienistä yhden kennon 2 voltin yksiköistä isoihin 48 voltin akkuihin), akkujen asentaminen eri asentoihin, tärinän kesto (AGM-akuissa), varausnopeus (AGM-akuissa noin viisinkertainen normaaliin lyijyakuun verrattuna). (Linden & B. Reddy 2002, 676; Buchmann 2013b.)

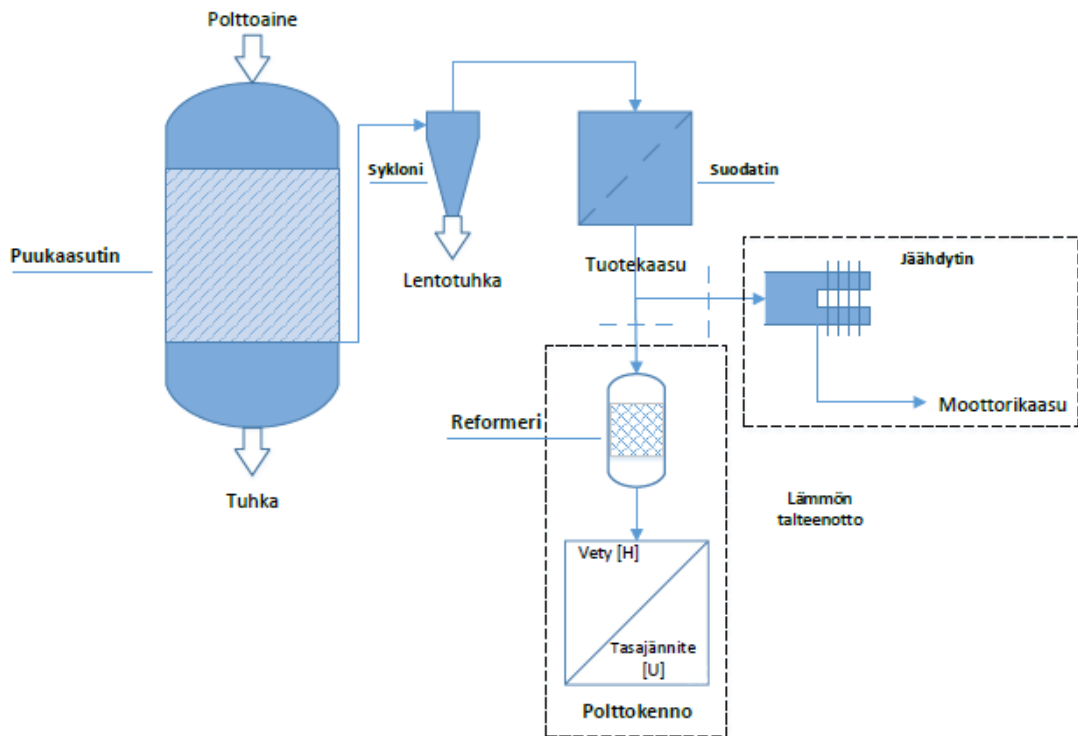
### 3.5 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja eli invertteri on laite, jolla tasasähköstä tehdään siniaallon muotoista vaihtosähköä. Vaihtosuuntaajaa tarvitaan micro-chp – laitteistossa silloin kun sähkö tuotetaan polttokennoilla ja varastoidaan akustoon. Vaihtosuuntaaja voi toimia myös akkulaturina, jolloin erillistä laturia ei tarvita. Vaihtosuuntaajan tulee tahdistua verkkoon kun käytössä on jakeluverkon ja oman tuotannon rinnakkaiskäyttö.

## 4 LÄMMÖN TUOTANTO

### 4.1 Lämmön lähteet

Pääasialliset lämmön lähteet ovat moottori-generaattoriyhdistelmässä jäähdytin ja moottori. Polttokennoilla sähköä tuottaessa reformeri ja polttokenno tuottavat tarvittavan lämmön. Kuviossa 9 (Eloranta 2016) lämmön talteenottoalueet on erotettu katkoviivalla. Muu osa laitteistoa on lämpöeristetty.



KUVIO 9. Lämmön talteenottoalueet (Eloranta 2016)

## 5 AUTOMAATIO

Koska kyseessä on kehittämisprojekti, jossa kehitetään uutta tuotetta ja haetaan ratkaisuja laitteiston käyttöön normaalissa pientalossa, tuote tulee suunnitella käyttäjäystävälliseksi ja mahdollisimman itsenäisesti toimivaksi. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan automaatiota. Laitteistossa voidaan automatisoida polttoaineen syöttö, kaasutusprosessin ohjaus ja valvonta, sähkötuotannon ohjaus ja valvonta sekä sähkön syötön ohjaus. Lisäksi erilaisia hälytystoimintoja voidaan lisätä automaatioon. Laitteistossa tulee olla valittavana erilaisia käyttötapoja.

### 5.1 Laitteautomaatio

Kaasun tuotanto lähtee polttoaineesta ja sen katkeamattomasta syötöstä laitteistolle. Puukaasuttimessa itsessään on pieni polttoainevarasto, mutta sen tarkoitus on lähinnä valmistella polttoainetta kaasutettavaksi, kuivaamalla polttoaine. Varsinaisesta polttoainevarastosta puuainesta tuodaan kaasuttimelle kolakuljettimella, jolla saadaan suhteellisen samankokoisia polttoaineannoksia jokaisesta kolavälistä. Kuljetin syöttää ennalta määritellyn määrän polttoainetta kaasuttimen yläosassa olevaan, kahdesta levyluistiventtiilistä muodostuvaan sulkusyöttimeen. Kolakuljetin saa pyöriä ainoastaan silloin kun ylempi luistiventtiili on auki. Alempi luistiventtiili saa aueta vasta kun ylempi luistiventtiili on kiinni.

Kaasutusprosessissa tulipesään johdettavan ilman määrää ohjataan tuotekaasun CO-pitoisuutta mittaamalla. Jos CO-pitoisuus laskee, ilman määrää pienennetään kuristamalla ilmaventtiiliä.

Sähkön kulutusta seuraamalla saadaan tieto tarvittavasta tuotekaasun määrästä. Tuotekaasun määrää säädetään tulipesärenkaan aukon halkaisijaa muuttamalla.

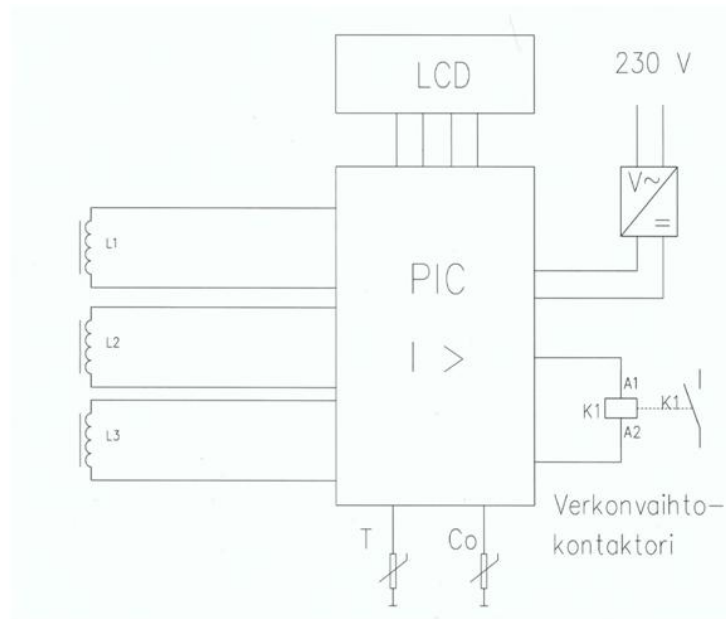
Ohjaustietona saadaan ja käytetään sekä digitaalista, että analogista tietoa. Analoginen tieto käsitellään standardiviesteinä ja se lisää ohjauslaitteen vaatimuksia. Ohjauslaitteena voidaan käyttää jotakin valmista ohjelmoitavaa logiikkaa tai micro-chip – laitteistolle rakennettua ohjausyksikköä.

## 5.2 Sähkön syötön automaatio

Sähkön syötön automatisoinnin laajuus ja toteutus riippuvat tavasta, jolla sähköverkkoihin liitytään. Jos laitteisto syöttää vain kiinteistön omaa sähköverkkoa ja toimii täysin erillään yleisestä jakeluverkosta, mittauskeskukseen asennetaan mekaaninen verkonvaihtokytkin. Mekaanista verkonvaihtokytkintä ohjataan manuaalisesti ja se eristää sähköverkot toisistaan täysin silloin, kun oma sähköntuotanto on käytössä. Kun käytetään sähköä yleisestä sähköverkosta, oma sähkön tuotantolaitos on täysin eristetty kiinteistön sähköverkosta. Tämä järjestely ei vaadi sopimuksia yleisen jakeluverkon haltijan kanssa. Laitteiston kannalta tämä toteutus edellyttää mahdollisimman tasaista sähkökuormaa ilman suuria tehopiikkejä.

Jos kiinteistön sähköverkossa esiintyy äkillisiä suuren tehon tarpeita, kuten esimerkiksi sähkökiukaan tai vastaavan teholuokan sähkölaitteen päälle kytkeytymisiä, tarvitaan sähkön syöttöön oman tuotantolaitoksen lisäksi yleistä jakeluverkkoa. Verkonvaihto voidaan automatisoida, mutta laitteisto vaatii jakeluverkon haltijan hyväksynnän. Vaadittavaa laitteistoa on ohjeistettu Energiateollisuuden (2013) *Enintään 50 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset* Teknisessä liitteessä 1 seuraavasti: ”Mikäli verkon kanssa rinnan käyvää tuotantolaitosta halutaan käyttää myös varavoimana sähkökatkoissa, tulee järjestelmään asentaa kaksoiskytkentämahdollisuus, jossa toisella kytkennällä tuotantolaitos toimii verkon kanssa rinnan ja toisella kytkennällä täysin verkosta erotetussa saarekkeessa. Tämä vaatii erillisen kytkimen ja lisälaitteiston”.

Automaattinen verkonvaihtaja (kuvio 10) seuraa kiinteistön sähköverkon vaiheiden virta-arvoja. Jos sähköverkossa havaitaan tietyn raja-arvon ylittävä jatkuva virta, automaattinen verkonvaihtaja vaihtaa sähkösyötön yleisen jakeluverkon puolelle. Tuotekaasun tuotantoa pienennetään. Tässäkin tapauksessa ei tarvita sopimuksia jakeluverkon haltijan ja kiinteistö sähköverkon haltijan välillä.



KUVIO 10. Automaattinen verkkovaihtaja (Eloranta 2015)

Oma sähköntuotanto voidaan myös liittää osaksi yleisen jakeluverkon sähköntuotantoa. Itse tuotetun sähkön liittäminen yleiseen jakeluverkkoon ja myyminen sitä kautta vaativat sopimuksia sähkön ostajayhtiön ja paikallisen jakeluverkon haltijan kanssa. Jakeluverkon haltijalla on teknisiä vaatimuksia sähkön laadulle sekä verkon turvalaitteille. Turvalaitteiden tulee toimia niin, että oma tuotantolaitos ei jää syöttämään sähköverkkoa, kun verkkoa ei syötetä muualta. Tämä on ehdottoman välttämätöntä verkon viankorjaus- ja asennustöiden turvallisuuden takia. Jotta jakeluverkon sähkökatkon aikana voidaan käyttää itse tuotettua sähköä, tarvitaan laitteistoon aiemmin mainittu kaksois-kytkentämahdollisuus. Lisäksi sähkön mittaukseen tarvitaan laitteisto, jolla selvitetään yleisestä jakeluverkosta tulevan ja sinne syötetyn sähkön määrää. Koska tässä kehitystehävässä suunniteltu laitteisto liitetään osaksi kiinteistön sähköverkkoa, se ei tarvitse omaa mittalaitetta. Riittää, että kiinteistön etäluettava mittari ohjelmoidaan mittaamaan erikseen jakeluverkosta otettu ja siihen syötetty energia. Tämä ratkaisu on koko microchp – laitteiston toiminnan kannalta paras. Sähkön tuotannon määrä voidaan optimoida laitteiston mukaiseksi ja laitteiston käytön aikaisessa säädössä ei tarvitse huomioida kulutuksen vaihtelua. Jos tuotantoa on liikaa, ylijäämäenergia syötetään jakeluverkkoon ja myydään. Jos oma tuotanto ei riitä täyttämään kulutuksen määrää, jakeluverkko syöttää puuttuvan sähköenergian määrän.

## 6 ESITETTÄVÄ RATKAISU PIENTALOKÄYTTÖÖN

### 6.1 Sopivan laitteistokokonaisuuden määrittely

Kun pientalokäyttöön soveltuvaa micro-chp – laitteistokokonaisuutta haetaan, ratkaisevia asioita ovat käytön helppous ja huolettomuus. Huoltotoimenpiteet eivät saa olla monimutkaisia ja liian usein toistuvia. Laitteisto on myös pystyttävä valmistamaan tämän kehitystyön tekohetkellä markkinoilta löytyvistä laitteista. Koska laitteisto on tarkoitus kaupallistaa, sen valmistuskustannusten pitää pystyä kilpailemaan maalämpöpumppulaitteistojen kanssa. Edellä mainitut laitteistot antavat samansuuruisista taloudellista hyötyä käyttäjilleen.

Sopivan laitteistokokonaisuuden selvittämiseksi, laitteistoon liittyvät vaatimukset ja toiveet listattiin taulukkoon 2.

TAULUKKO 2. Vaatimukset micro-chp laitteistoille.

V = vaatimus	
T = toivomus	
V	Saatavuus
V	Hinta < 3000 €
V	Käyttöikä 15 v
V	Sähköntuotanto $\geq 3$ kW
V	Käyttötoimenpiteet 1 kerta /vko
V	Automatisoitavuus
V	Energiatehokkuus
T	Lämmöntuotanto alle 15 kW
T	Äänettömyys
T	Huoltoväli $\geq 1$ v

Taulukon 2 vaatimukset ja toiveet muutettiin arviointikriteereiksi pisteuttamalla ne. Pisteityksessä on käytetty karkeaa pisteasteikkoa 0 – 4 (taulukko 3), riittävän tarkkojen, tasapuolisten tietojen puuttuessa. (Pahl & Beitz 1986, 145 - 147)

TAULUKKO 3. Arviointikriteerien pisteytys (Pahl &amp; Beitz 1986, 145 - 147)

<b>Merkitys</b>	<b>Pisteet</b>
Hylättävä	0
Juuri hyväksyttävä	1
Riittävä	2
Hyvä	3
Erittäin hyvä	4

Tässä työssä on esitelty liitteenä 1 olevan ”Kehitystehtävän miellekartan” kahta sähköntuotantohaaraa ja niihin liittyviä laitteita. Esitellyt laitteistot on pisteytetty vaatimuslistan sisällön perusteella tehdyn, liitteenä 4 olevan arviointikriteerien pisteytystaulukon mukaisesti.

Ulrich ja Eppingerin tuotekehitysprosessin toisessa vaiheessa luodaan laitteistosta erilaisia vaihtoehtoja, joista valitaan yksi. Valintavaiheessa tarkastellaan laitteistolle asetettuja vaatimuksia ja niiden pistemääriä. Jos arviointikriteerien pisteytyksessä jokin laitteisto saa jostakin vaatimuskohdasta nolla pistettä, tarkoittaa se, että laitteisto ei täytä sille asetettuja vaatimuksia ja se laitteisto tulee hylätä.

Stirling-moottori ja kaasuturbiini hylättiin moottori-generaattoriyhdistelmän voimanlähteinä niiden saatua nolla pistettä yhdestä arviointikriteerien vaatimuksesta. Polttokennoista pois putosivat sulakarbonaattikenno (MCFC) ja fosforihappopolttokenno (PAFC). Lopulliseen vertailuun jäivät polttomoottori-generaattori yhdistelmä ja kiinteä-oksidi (SOFC) polttokenno.



taa antava. Täydellisen laskelman tekemiseen täytyisi ottaa huomioon myös laitteiden hankinta- ja valmistuskustannukset.

### 6.1.2 Laitteistojen vertailu

Arviointikriteerien pisteytyksen jälkeen, jäljelle jääneille laitteistovaihtoehdoille tehdyn energiatehokkuuslaskelman perusteella, moottori-generaattori yhdistelmän voimakoneeksi tulee dieselmoottori. Lopulliseen painoarvotaulukon vertailuun jäivät dieselmoottori-generaattori yhdistelmä ja kiinteäoksidipolttokennolaitteisto.

Eri arviointikriteerien painoarvo perustuu tämän kehitystyön tekijän näkemykseen eri vaatimusten ja toiveiden vaikutuksesta laitteiston valmistukseen ja myytävyyteen. Painoarvotaulukossa, taulukko 4, on listattu arviointikriteerit ja niiden perässä painoarvot. Taulukossa, laitteistovaihtoehtojen alla, on niiden saamat painotetut pisteet. Painotettujen pisteiden summa kertoo ratkaisuvaihtoehdon hyvyyden.

TAULUKKO 4. Painoarvotaulukko laitteistojen valintaan

Arviointikriteeri	Painotus	Arvo 0 - 4	Dieselmoottori	Arvo 0 - 4	SOFC
Saatavuus	0,1	4	0,4	3	0,3
Hinta < 3000 €	0,1	4	0,4	2	0,2
Käyttöikä 15 v	0,2	3	0,6	2	0,4
Sähköntuotanto 3 kW	0,2	4	0,8	3	0,6
Käyttötoimenpiteet 1 kerta /vko	0,05	3	0,15	4	0,2
Automatisoitavuus	0,05	3	0,15	4	0,2
Energiatehokkuus	0,1	3	0,3	4	0,4
Lämmöntuotanto alle 15 kW	0,1	1	0,1	4	0,4
Äänettömyys	0,05	1	0,05	4	0,2
Huoltoväli $\geq$ 1 v	0,05	1	0,05	3	0,15
			<b>2,24</b>		<b>3,05</b>

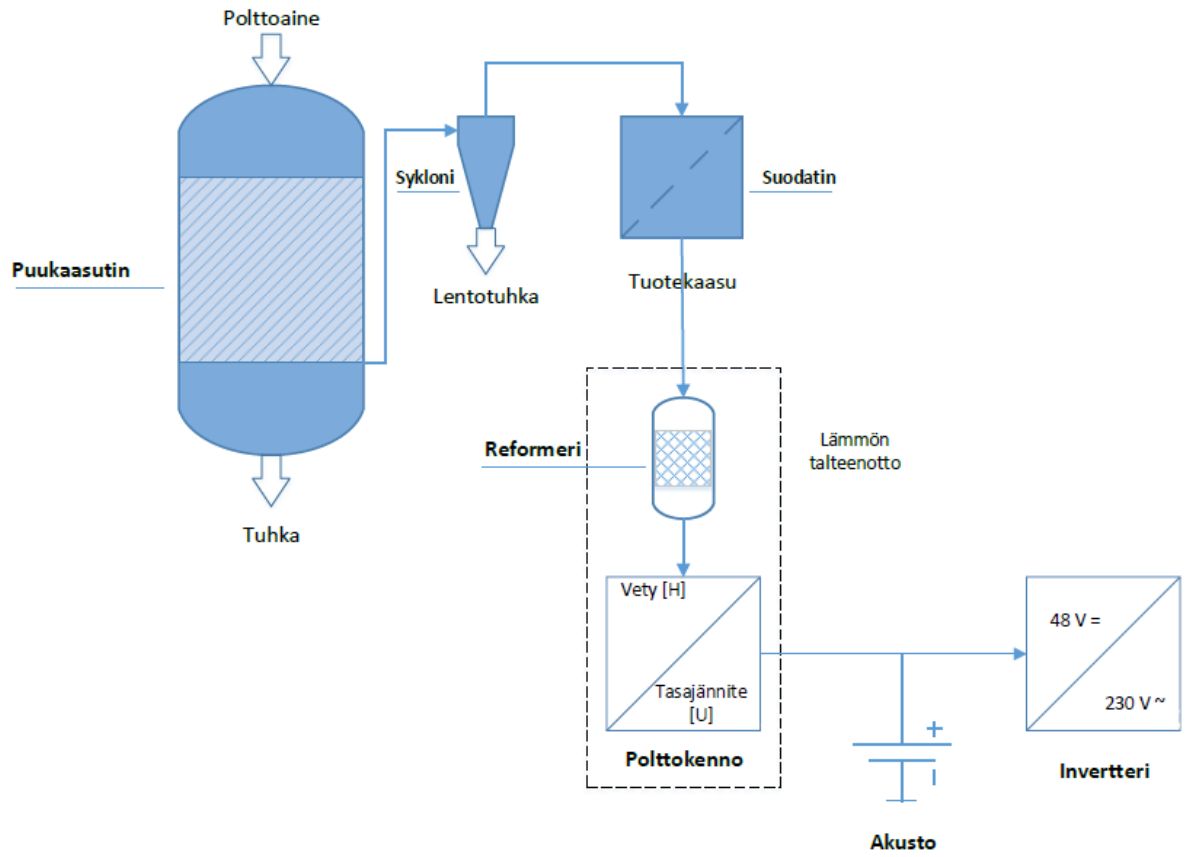
## 6.2 Valinnan perusteet

Painoarvotaulukon mukaan molemmat laitteistovaihtoehdot ovat hyviä ja mahdollisia. Diesel-moottori-generaattoriyhdistelmällä on monta hyvää puolta laitteiston valmistustaajattellen, mutta laitteiston käyttöön liittyvät ominaisuudet ovat huonoja. Polttokenno-laitteisto sai paremmat kokonaispisteet ja ominaisuuksiltaan se on tasaisempi. Huonona puolena ja epävarmuustekijänä voidaan mainita se, että kiinteäoksidipolttokenno on vielä kehitysasteella ja sitä ei päästä testaamaan. Kotimaisen (Elcogen Oy) polttokenno-valmistajan mukaan heidän SOFC-polttokennonsa tulee kaupalliseen jakeluun syksyllä 2016. Pyrkimyksensä hinnaksi he ilmoittavat kennostolle 1 k€ / kW.

Polttokennolaitteistolla on muitakin hyviä ominaisuuksia arviointikriteerien lisäksi. Niistä voidaan mainita pieni koko, päästöttömyys ja dieselmoottoriin verrattuna huolto-jätteiden puuttuminen. Jos polttokennojen valmistaja pysyy ilmoittamassaan aikataulus- ja hinnassa, tällä hintatasolla micro-chp-laitteistosta pystytään valmistamaan kilpai-lukykyinen tuote markkinoille.

## 6.3 Laitteiston valita

Valittava laitteisto on alkuosaltaan, suodattimeen asti sama, valittiin sähköntuotantota-vaksi sitten generaattori tai polttokennot. Työssä on päädytty ratkaisuun, jossa sähkö tuotetaan kiinteäoksidipolttokennoilla (SOFC). Lopullisesti laitteiston kokoonpano rat-keaa kuitenkin vasta siinä vaiheessa, kun SOFC-polttokennot ovat kaupallisesti myyn-nissä. Tämä siksi, että vasta siinä vaiheessa päästään koeajamaan laitteistoa ja nähdään kuinka itsereformointi toteutuu sekä kuinka pitkän käyttöjakson polttokenno kestää ja pystytäänkö se sen jälkeen elvyttämään. Kuviossa 11 on esitetty laitteistoratkaisu pien-talokäyttöön.



KUVIO 11. Esitetty ratkaisu pientalokäyttöön (Eloranta 2016)

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn suunnittelu lähti puhtaasti puukaasun tuottamiseen tarvittavan laitteiston teknisen konstruktion hahmottamisesta. Mutta siinä vaiheessa, kun havahduin työn olevan pitkäl-  
ti myös kemialla, alkoi työn vaativuus todella avautua. Myös mahdollisen laitteiston käy-  
tön vaatimukset selvisivät yksi kerrallaan. Alun perin laitteistoa oli ajateltu käytettäväk-  
si täysin erillään yleisestä sähköjakeluverkosta, koska ei ollut riittävästi tietoa laitteis-  
ton liittämismahdollisuudesta jakeluverkkoon. Kun esitettävä laitteistokokonaisuus al-  
koi hahmottua, niin selvisi myös, että laitteiston liittämällä yleiseen jakeluverkkoon ei  
ole mitään teknistä estettä. Valitsemalla ratkaisu, jossa laitteisto liitetään yleiseen jake-  
luverkkoon, laitteiston käyttöön liittyvät säätötoimenpiteet tulevat helpommiksi ja sa-  
moin ylijäämäsiähkön käyttö. Yleiseen jakeluverkkoon liittämistä huolimatta, laitteisto  
voi toimia myös silloin, kun jakeluverkossa on sähkökatko. Tämä oli yksi laitteistovaa-  
timuksista.

Käyttämällä Ulrich ja Eppingerin määrittelemää tuotekehitysmallia ja arviointikriteerien  
pisteystystä (Pahl 1986) saatiin vaihtoehtoisille laitteistoille numeerinen järjestys. En-  
simmäiseen tutkimuskysymykseen, pientalokäyttöön soveltuvista micro-chp-  
laitteistoista, löydettiin teknisesti tasavertaisia laitteistoja useita. Erot laitteistojen välille  
syntyivät kun haettiin vastausta toiseen tutkimuskysymykseen laitteistojen taloudelli-  
suudesta. Lopullinen laitteistovaihtoehto ratkesi enemmänkin toisen vaihtoehdon huon-  
ojen ominaisuuksien huonouteen, kuin toisen vaihtoehdon paremmuuteen. Vaikka,  
esitetty ratkaisu pientalokäyttöön soveltuvasta micro-chp - laitteistosta sisältääkin  
avoimia kysymyksiä polttokennoston osalta, uskon polttokennovalmistajan pystyvän  
toteuttamaan suunnitelmansa ja näin mahdollistamaan laitteiston rakentamisen.

Kaikkia laitteistokokonaisuuden valmistamiseen tarvittavia laitteita ei ole vielä olemas-  
sa, joten ne pitää kehittää ja muun muassa sähkölaitteille pitää saada viranomaishyväk-  
synnät. Myös jo kaupallisesti saatavia laitteiston osia täytyy testata ja siten varmistaa  
niiden soveltuvuus. Etenkin inverttereiden soveltuvuus kaikilta osiltaan tähän käyttöön  
jää hieman epäselväksi. Näyttää kuitenkin mahdolliselta, että laitteistosta voidaan tehdä  
toimiva prototyyppi. Moni laitteiston osa vaatii vielä tutkimus- ja kehitystyötä. Ehkä  
mielenkiintoisin ja haastavin osa kehitettävästä laitteistosta on reformeri. Vaatii jatko-  
kehittelyä, että siitä saadaan riittävän pienikokoinen ja että se yhdistyy optimaalisesti  
muihin laitteisiin.

## LÄHTEET

Basu, P. 2006. COMBUSTION and GASIFICATION in FLUIDIZED BEDS. Taylor & Francis Group. 84

Corre, G. P. G. & Irvine, J. T. S. (2010). High-Temperature Fuel Cell Technology. Stolten, D. (toim.). Hydrogen and Fuel Cells –Fundamentals, Technologies and Applications (61 - 87). Weinheim: Wiley-vch.

Cosmo Oil. Luettu 29.10.2015. [ceh.cosmo-oil.jp/eng/csr/sustain/pdf/2003/03p19.pdf](http://ceh.cosmo-oil.jp/eng/csr/sustain/pdf/2003/03p19.pdf)

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

Elcogen. Hallanoro Paul. Toimitusjohtaja. Tapaaminen 13.3.2015. Vantaa.

Energiateollisuus, 2013. Tekninen liite 1. Enintään 50 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset.

Fuel Cell Handbook. 2004. Seventh Edition. EG&G Technical Services, Inc. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy.

Gasek. 2009. Luettu 20.11.2015. <http://www.gasek.fi/technology/wood-gasification/>

Gasek. 2012. Luettu 20.11.2015. <http://www.forestenergy.org/openfile/376>

Haapalainen, P. & Lindman, M. 2011. Kokeellisen tuotekehityksen soveltuvuus huonekalualalle. Vaasa. Vaasan yliopiston julkaisu.

Han, J. & Kim, H. 2008. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Sustain. 12, 397 – 416.

In Genuity Creations. 2008. Hydrogen. [In Genuity creationsin www-sivuilla]. Saatavissa: <http://ingenuitycreations.com/>

Pölynerotus. 2013. Saatavissa: <http://prosessiteknikka.kpedu.fi/kg/gallery/k55.gif>

Kara, M. et al. 2004. Energia Suomessa; Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

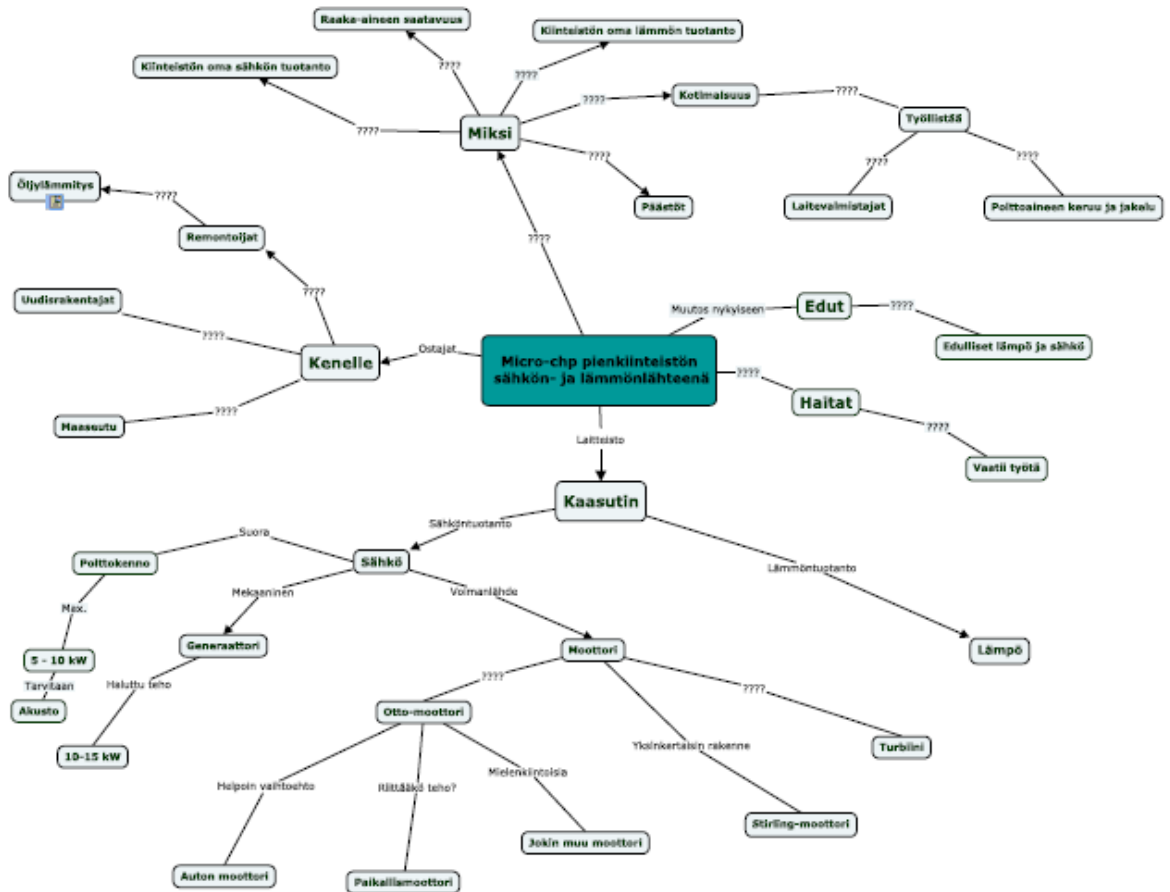
Kytö, M., Äijälä, M. & Panula, E. 1983. Metsäenergian käyttö ja jalostus. Osa 8. Puun ominaisuudet ja energiakäyttö. Kirjallisuustutkimus. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 237.

Larminie, J. 2000. Fuel Cell Systems Explained. John Wiley & Sons, Inc. Haettu 11.1.2016 osoitteesta <https://87eb298c-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/senthilvssc/Home/fuel-cells/FuelCellSys>

- Lampinen, A. 2009. Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta. Tampere. Tampereen Yliopistopaino – Juvenes Print Oy.
- Lehto, Ina. 2009. Mikrotuotannon liittäminen sähköverkkoon. Diplomityö. Elektroniikan, tietotekniikan ja automaation tiedekunta. Teknillinen korkeakoulu. WWW dokumentti. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100081.pdf>. Luettu 10.11.2015.
- Linden & B. Reddy. 2002, 587,676.
- Massachusetts Institute of Technology. Haettu 1.2.2016. <http://web.mit.edu>
- Metla. 2013. Metsätilastollinen vuosikirja 2013.
- Motiva. 2015. Luettu 29.10.2015.  
[http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/bioenergian\\_tuotantotekniikka/polttotekniikka\\_kaasumaisille\\_polttoaineille/kaasuturbiini](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/polttotekniikka_kaasumaisille_polttoaineille/kaasuturbiini)
- New Energy Direction. Luettu 1.2.2016. <http://newenergydirection.com>
- Noponen, M. 2003. Tfy-56.191 Vedyn tuotantotavat – Reformointi. Julkaisussa: Vetyteknologiat. Helsinki University of Technology Publications in Engineering Physics. Espoo.
- Ojanperä, K. (2008). Suomi yrittää polttokennoissa maailman kärkeen. Tekniikka & talous. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article64161.ece>. (luettu 29.10.2015)
- Pahl, Gerhard & Beitz, Wolfgang. 1986. Koneensuunnitteluoppi. Porvoo: Metalliteollisuuden kustannus Oy.
- Parmala, S-P. 1980. Tutkimuslause N:o 24. Polttomoottorien varustaminen kotimaisten polttoaineiden käyttöön soveltuvaksi. Vihti: Vakola.
- Ratkaisujen Suomi, Pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma  
29.5.2015, Hallituksen julkaisusarja 10/2015
- Rosenau, Milton (2000). *Successful Product Development – Speeding from Opportunity to Profit*. New York ym.: John Wiley & Sons, Inc.
- Sutherland, K. 2008. Filters and Filtration Handbook, Fifth Edition, 5. painos. Elsevier.
- Teräsvirta, A. 2010. Voimalaitosmittakaavan polttokennojärjestelmien teknis-taloudellinen vertailu. <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki3ID1440.pdf>
- Tilastokeskus. 2012. Energiatilasto. Vuosikirja 2011. Helsinki.
- Ulrich, K. & Eppinger, S. 1995. Product Design and Development. First Edition. McGraw-Hill. New York.

## LIITTEET

Liite 1. Kehittämistehtävän miellekartta.



## Liite 2. Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja ja tiheyksiä (Energiatilasto 2012)

### Yksiköt ja muuntokertoimet Units and conversion factors

Polttoaineiden teholliset keskimääräiset oletuslämpöarvot ja tiheydet  
Average default calorific net heat contents and densities of fuels

Polttoaine Fuels	Mittayksikkö Unit	Tehollinen keskimääräinen lämpöarvo Average default calorific net heat content			Tiheys Density
		GJ	MWh	toe	t/m <sup>3</sup>
Raakaöljy – Crude oil .....	t	41,8	11,62	1,00	0,855
Raskas polttoöljy – Heavy fuel oil .....	t				
rikkipitoisuus < 1% – sulphur content < 1% .....	t	41,1	11,42	0,98	0,975
rikkipitoisuus ≥ 1% – sulphur content ≥ 1% .....	t	40,5	11,25	0,97	0,987
Kevyt polttoöljy – Light fuel oil .....	t	42,7	11,86	1,02	0,845
Dieselöljy – Diesel fuel .....	t	42,8	11,89	1,02	0,840
Lentopetroli – Kerosenes .....	t	43,3	12,03	1,03	0,795
Muut petrolit – Other kerosines .....	t	43,1	11,98	1,03	0,810
Teollisuusbenssiini – Naphtha .....	t	44,3	12,32	1,06	0,700
Moottoribensiinit – Motor gasolines .....	t	42,2	11,72	1,01	0,750
Lentobensiinit – Aviation gasolines .....	t	43,7	12,14	1,04	0,710
Nestekaasu – LPG .....	t	46,2	12,83	1,10	0,507
Jalostamokaasut – Refinery gases .....	t	50,0	13,89	1,19	
Kivihiili – Hard coal .....	t	25,1	6,97	0,60	
Koksi – Coke .....	t	29,3	8,14	0,70	
Maakaasu <sup>1)</sup> – Natural gas <sup>1)</sup> .....	1 000 m <sup>3</sup> (0 °C)	36,0	10,00	0,86	
Masunikaasu <sup>2)</sup> – Blast furnace gas <sup>2)</sup> .....	1 000 m <sup>3</sup>	3,8	1,05	0,09	
Koksikaasu – Coke oven gas .....	1 000 m <sup>3</sup>	16,7	4,64	0,40	
Mustalipeä – Black liquor .....	t <sub>ka</sub> – t dry matter	11,5	3,19	0,28	
Puupelletit – Wood pellets (kosteus – moisture 8–10 %) .....	t	15–18			
Kuori – Bark (kosteus – moisture 45–65 %) .....	t	5–11			
Sahanpuru – Sawdust (kosteus – moisture 45–60 %) .....	t	6–10			
Metsätähdehake – Forest residue chips (kosteus – moisture 40–60 %) ..	t	6–11			
Kokopuuhake – Whole tree chips (kosteus – moisture 45–55 %) .....	t	7–11			
Polttohake – Chips .....	i-m <sup>3</sup> – loose m <sup>3</sup>	3,3	0,90	0,08	
Ruokohelpi – Reed canary grass (kosteus – moisture 14%) .....	t	14,6–17,9			
Biokaasu – Biogas .....	1 000 m <sup>3</sup>	17–23			
Jyrsinturve – Milled peat .....	t	10,1	2,81	0,24	0,320
Palaturve – Sod peat .....	t	12,3	3,42	0,29	0,380

<sup>1)</sup> Maakaasun ylempi lämpöarvo on 39,9 GJ/1 000 m<sup>3</sup> (0 °C) ja 37,8 GJ/1 000 m<sup>3</sup> (15 °C).

<sup>2)</sup> Sisältää CO-kaasun.

### Eri energiayksikköjen väliset muuntokertoimet Conversion factors between energy units

	toe	MWh	GJ	Gcal
toe	1	11,63	41,868	10
MWh	0,086	1	3,6	0,86
GJ	0,0239	0,2778	1	0,2388
Gcal	0,1	1,163	4,1868	1

Esimerkki – Example: 1 toe = 11,63 MWh

### Etuliitteet Prefix

k	=kilo	=10 <sup>3</sup>	=1 000
M	=mega	=10 <sup>6</sup>	=1 000 000
G	=giga	=10 <sup>9</sup>	=1 000 000 000
T	=tera	=10 <sup>12</sup>	=1 000 000 000 000
P	=peta	=10 <sup>15</sup>	=1 000 000 000 000 000

## Liite 3. 3 Phase Faraday AC Generator Power Generator Brushless Diesel Generator

Item	FD5 Three-phase Industry Alternators					
	50Hz(1500Rpm)			60Hz(1800Rpm)		
Voltage(V)	Class H(125k)			Class H(125k)		
Star-Series	380	400	415	440	460	480
Star-Parallet	190	200	208	220	230	240
Delta-series	220	230	240	254	266	277
FD5S-4 RatedCapacity(kva)	450	450	450	550	563	581
Rated Power(kw)	360	360	360	440	450	465
Efficiency(%)	93.8	94.1	94.3	93.9	93.3	93.4
FD5M-4 RatedCapacity(kva)	500	500	500	575	594	625
Rated Power (kw)	400	400	400	460	475	500
Efficiency (%)	94.1	94.4	94.6	94.2	94.4	94.6
FD5MP-4 RatedCapacity(kva)	563	563	563	650	663	670
Rated Power (kw)	450	450	450	520	530	536
Efficiency (%)	94.7	94.9	95	94	94.2	94.3
FD5LS-4 RatedCapacity(kva)	600	600	600	713	731	750
Rated Power (kw)	480	480	480	570	584	600
Efficiency (%)	94.7	94.9	95	94.9	95.0	95
FD5L-4 RatedCapacity(kva)	625	625	625	740	780	800
Rated Power (kw)	500	500	500	592	624	640
Efficiency (%)	94.6	94.9	95.0	94.8	94.9	95.1
FD5LP-4 RatedCapacity(kva)	688	688	688	775	800	825
Rated Power (kw)	550	550	550	620	640	660
Efficiency (%)	94.6	95.0	95.1	94.8	94.9	94.9

## Liite 4. Arviointitaulukon pisteytys

	Toiveet ja vaatimukset	Generaattori			Polttokeino		
		Otto- ja dieselmoottori	Stirling - moottori	Kaasuturbiini	SOFC	MCFC	PAFC
V	Saatavuus	4	2	2	3	2	2
V	Hinta < 3000 €	4	0	0	2	0	0
V	Käyttöikä 15 v	3	3	3	2	2	3
V	Sähköntuotanto ≥ 3 kW	4	1	4	3	3	3
V	Käyttötoimenpiteet 1 kerta /vko	3	3	4	4	4	4
V	Automatisoitavuus	3	4	4	4	4	4
V	Energiatehokkuus	3	2	2	4	4	4
T	Lämmöntuotanta alle 15 kW	1	2	2	4	4	3
T	Äänettömyys	1	4	1	4	4	4
T	Huoltoväli ≥ 1 v	1	4	4	3	3	3