

**Hybridilämmitysjärjestelmän hakekattilan  
optimoiva automaattiohjaus**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Valkeakoski, Sähkö- ja automaatiotekniikka

lokakuu, 2019

Ari P. Lindgren

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Valkeakoski

---

<b>Tekijä</b>	Ari P. Lindgren	<b>Vuosi</b> 2019
<b>Työn nimi</b>	Hybridilämmitysjärjestelmän biokattilan optimoiva automaattiohjaus	
<b>Työn ohjaaja</b>	Juhani Henttonen	

---

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella TOE-hankkeen hybridienergia-kontin hakepolttimen automaatio-ohjaus. Ohjauksen avulla tavoitellaan hybridilämpöjärjestelmän energiatuotannon tehokkuutta maksimoimalla auringon säteilystä kerättyä lämpöenergiaa ja minimoimalla hakepolttimella tuotettua lisälämpöenergiaa hienosäätämällä polttoprosessia perinteisen jaksotuspolton sijaan.

Opinnäytetyössä tarkastellaan paikallisen pienlämmöntuotannon merkitystä kansantaloudellisesti, osana kansallista omavaraisuutta sekä ratkaisuna tulevaisuuden energiantarpeisiin. Biopolttoaineista tarkastellaan pellettityyppisten lämmönlähteiden ominaisuuksia paloprosessin ennakoitavuuden ja hallittavuuden vuoksi.

Lopuksi opinnäytetyössä esitetään periaatteet hakepolttimen automaatoimiseksi. Ratkaisussa on kiinnitetty erityistä huomiota siihen, että se on laitteisto tai järjestelmäriippumaton, jolloin se on helposti sovitettavissa teollisuusautomaatiojärjestelmistä aina kevyisiin DIY-laitteisiin.

**Avainsanat** Automaatiojärjestelmät, bioenergia, hybridienergia, pienvoimalat.

**Sivut** 39 sivua

Electrical and Automation Engineering  
Valkeakoski

---

<b>Author</b>	Ari P. Lindgren	<b>Year</b> 2019
<b>Subject</b>	Optimizing autopilot for a bio boiler in a hybrid heating system	
<b>Supervisors</b>	Juhani Henttonen	

---

#### ABSTRACT

The aim of this thesis project was to design the automation control of the wood chip boiler of the hybrid energy container built in the TOE project. The aim of the automation was to achieve efficiency in the energy production of the hybrid thermal system by maximizing the heat energy collected from solar radiation and by minimizing the added heat produced by the biomass, by fine-tuning the burning process in the wood chip boiler instead of using conventional timer-based burning.

This thesis examines the significance of a local small-scale heat economy, as part of national self-sufficiency and as a solution to future energy needs. Pellet-type biofuels are considered here as heat sources due to their qualities as to the predictability and controllability of the burning process.

Finally, the thesis presents the principles for automating a wood chip burner. In the solution, special attention was paid to the fact that it is hardware or system-independent, making it easily adaptable from industrial automation systems to lightweight DIY devices.

**Keywords** Automation systems, bio energy, hybrid energy, small power plants.

**Pages** 39 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	LÄHIENERGIAN MAHDOLLISUUDET SUOMESSA .....	1
2.1	Aurinkoenergia .....	3
2.1.1	Aurinkolämpö .....	3
2.1.2	Aurinkosähkö .....	4
2.2	Bioenergia .....	5
2.3	Lämpöpumput .....	6
2.4	Tuulivoima .....	7
2.5	Vesivoima.....	8
2.6	Taloudellinen merkitys .....	10
3	BIOENERGIA OSANA LÄMMÖNTUOTANTOA .....	10
3.1	Biopolttoaineet .....	12
3.2	Bioenergian päästöt.....	15
4	HYBRIDILÄMMÖNTUOTANTO .....	17
5	BIOLÄMPÖKATTILAN AUTOMATISOINTI .....	19
5.1	Taloudellisuus .....	19
5.2	Ekologisuus .....	20
5.3	Päästöttömyys .....	20
5.4	Helppohoitoisuus.....	21
5.5	Säätöjärjestelmä .....	21
5.6	Säätöjärjestelmän mallinnus .....	23
6	LÄMMITYSPROSESSI .....	26
6.1	Laitteisto .....	26
6.2	Lämmitysprosessin vaiheet .....	27
6.2.1	Alkutoimet .....	27
6.2.2	Sytyttäminen .....	28
6.2.3	Alkupoltto .....	29
6.2.4	Peruspoltto .....	30
6.2.5	Valmiustila .....	31
6.2.6	Sammutus.....	32
6.2.7	Säätöpoltto .....	32
6.3	Turvallisuus.....	33
7	YHTEENVETO .....	33
	LÄHDELUETTELO .....	36

## Lyhenteet

- BC** eli musta hiili. Tällä tarkoitetaan voimakkaasti valoa sitovia hiukasia, joissa on runsaasti epäorgaanista hiiltä. Musta hiili on peräisin epätäydellisestä palamisesta. Yleisiä päästölähteitä ovat dieselajoneuvot, puunpoltto ja laivaliikenne. Musta hiili on pienhiukkasten (PM<sub>2,5</sub>) kokoluokkaa.
- CHP** Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Tulee sanoista Combined Heat and Power.
- CO** eli hiilimonoksidi tai häkä on hiilen ja hapen yhdiste. Se on hajuton, väritön, myrkyllinen, reaktioherkkä ja erittäin helposti syttyvä kaasu. Sitä syntyy, kun hiili tai hiiltä sisältävät aineet palavat epätäydellisesti eli liian vähäisessä happimäärässä.
- ILP** Ulkoilma-ilmalämpöpumppu kerää lämpöä ulkoilmasta ja siirtää lämmön lämpöpumpun avulla talon sisällä olevalla yksikön kautta sisäilmaan. Laitteistoa voidaan käyttää myös sisäilman jäähdyttämiseen kääntämällä prosessin suunta päinvastaiseksi.
- IPCC** Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli on poliittisen päätöksenteon tueksi vuonna 1988 perustettu ilmastotieteen johtavista asiantuntijoista koottu elin, jonka tehtävänä on koota ja arvioida ihmisen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä ja sen vaikutuksia koskevaa tieteellistä tietämystä.
- KAISU** Suomen valtion keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma
- MLP** Maalämpöpumppu kerää lämpöä maahan poratuista lämpökaivoista lämpöpumpun avulla lämmitys- ja käyttöveden tai sisäilmaan erillisen sisäyksikön välityksellä.
- PAH** tarkoittaa polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä jotka ovat yhteen liittyneistä aromaattisista renkaista koostuvia hiilivetyjä. Lyhenne tulee sanoista polycyclic aromatic hydrocarbons. PAH-yhdisteitä syntyy, kun orgaaninen aine, esimerkiksi puu, palaa epätäydellisesti. Monet PAH-yhdisteet aiheuttavat syöpää tai mutaatioita.
- PILP** Poistoilmapumppu kesää lämpöä rakennuksen poistoilmasta ja siirtää lämpöpumpun avulla lämmön lämmitys- tai käyttöveden. (PILP)
- PILTTI** Yhteisprojekti Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen (THL), Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ja Ilmatieteen laitoksen (FMI) yhteinen projekti keskittyen aiheeseen: Pienhiukkasten lähipäästöjen terveysriskit: puun pienpoltto ja tieliikenne

- PM2.5** tarkoittaa pienhiukkasia, joiden läpimitta on alle 2,5 mikrometriä. Näitä pienhiukkasia vapautuu muun muassa palamisprosessissa, liikenteestä ja joistain teollisuusprosesseista. Pienhiukkasilla on haitallisia terveysvaikutuksia.
- PPA** Power Purchase Agreement. PPA-sopimuksella tarkoitetaan pitkäaikaista sähkönostosopimusta, jossa tyypillisesti suuri sähkönkäyttäjä tai joukko pienempiä sähkönkäyttäjiä sopii ostavansa sähkön tuottajalta tietyn määrän sähköä sopimuksen mukaiseen hintaan esimerkiksi 10-20 vuoden ajan.
- SULPU** Suomen lämpöpumppuyhdistys, jonka tarkoituksena on valvoa lämpöpumppualalla toimivien ammatinharjoittajien yleisiä ja yhteisiä ammatinharjoittamiseen liittyviä etuja, edistää jäsentensä välistä yhteistoimintaa ja parantaa alan yleisiä toimintaedellytyksiä
- TOE** Tarkalla ohjauksella energiatehokkuutta. Pirkanmaan liiton ja Hämeen ammattikorkeakoulun yhteishanke, jonka erityistavoite on uusiutuvan energian ja energiatehokkaiden ratkaisujen kehittäminen.
- UVLP** Ulkoilma-vesilämpöpumppu kerää lämpöä ulkoilmasta ja siirtää lämmön lämpöpumpun avulla lämmitys- ja käyttöveteen.
- VOC** tarkoittaa haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Lyhenne tulee sanoista Volatile organic compound. Niiden yhdisteiden kiehumispiste on alle 250 °C ja osa näistä on kaasuja jo huoneenlämmössä. Ne liukenevat helposti veteen.

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on toteuttaa Tarkalla Ohjauksella Energiatieteiden (TOE) -hankkeessa suunniteltuun hybridienergiakonttiin liitetyn hakepolttimen säätöohjaus. Hakepolttimen aikajaksotuspolttoon perustuva toimintaprosessi on tarkoitus korvata jatkuväsäätöisellä polttoprosessilla, millä mahdollistetaan tarpeen mukainen lisälämpöenergian tuotanto hybridienergia systeemiin. Tämän toteuttamiseksi polttoaineen syöttö tulee muuttaa tehotarpeen mukaan säätäväksi. Haitallisten palokaasujen pienentämiseksi ohjausjärjestelmän tulee seurata jäännöshapen määrää ja säätää ilmansyöttöä saamansa anturitiedon mukaan.

TOE-ohjausjärjestelmän avulla tavoiteltiin hybridilämpöjärjestelmän kokonaisenergiatuotannon tehokkuutta maksimoimalla auringon säteilystä kerätyn lämpöenergian käyttöä ja minimoimalla hakepolttimella tuotettua lisälämpöenergiaa. TOE-hanke oli Pirkanmaan liiton ja Hämeen ammattikorkeakoulun yhteishanke, jonka erityistavoite oli uusiutuvan energian ja energiatehokkaiden ratkaisujen kehittäminen ja oli osa Toimintalinja 2:ta (EAKR).

TOE-hanke tavoitteli uusia keinoja energiatehokkuuden edistämiseen omakotitalo-, maatalo- ja kylämittakaavassa. Hanke perustui uusiutuvien energialähteiden käyttöön ja hybridiohjausjärjestelmän suunnitteluun, testaukseen ja rakentamiseen. Hanke tähtäsi fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen ja uusiutuvien energialähteiden tehokkaampaan hyödyntämiseen. Kun energian tuotannossa käytetään älykästä ohjausta, voidaan käytettävistä energialähteistä valita vähähiilisin ja ekologisin energialähde. Ohjausjärjestelmä tekee päätöksen järjestelmään liitettyjen antureiden ja ulkoisten tietolähteiden perusteella, milloin mikäkin energialähde on sovelia. (ELY-keskus, 2019)

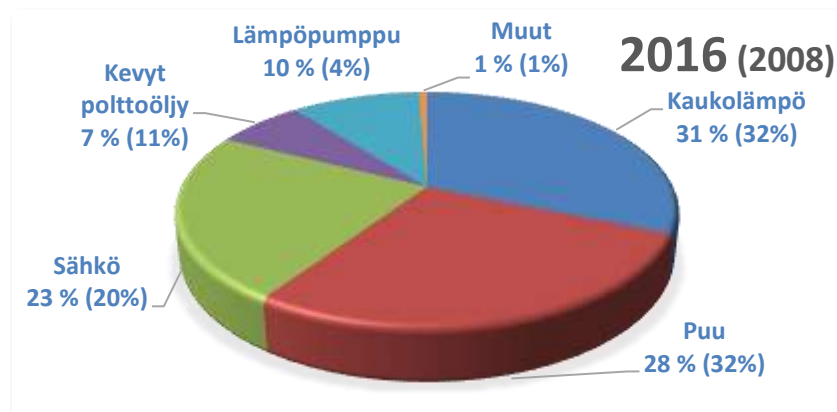
Opinnäytetyössä esitetään periaate hakepolttimen automatisoimiseksi. Ratkaisussa on kiinnitetty erityistä huomiota siihen, että se ei ole sidonnainen käytettyihin laitteisiin tai valittuun automaatiojärjestelmään. Tämä mahdollistaa esitettyjen periaatteiden käyttämisen polttoprosessin ohjauksen muissakin kiinteitä biopolttaineita käyttävissä järjestelmissä.

## 2 LÄHIENERGIAN MAHDOLLISUUDET SUOMESSA

Suomessa huomioonotettavia lähienergianmuotoja ovat aurinkoenergia, bioenergia, lämpöpumput ja niiden sovellukset sekä tuuli- ja vesivoima. Kaikki nämä ovat uusiutuvia energian muotoja ja lisäksi niiden hyödyntä-

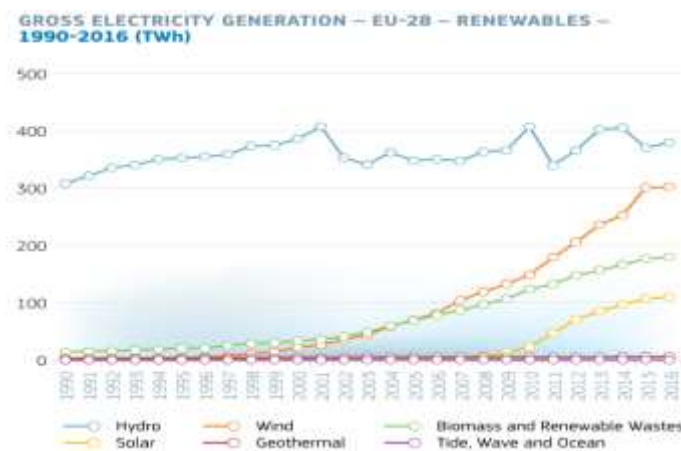
minen mahdollistaa energiantuotannosta syntyvän hiilijalanjäljen pienentämistä. Näiden energiamuotojen hyödyntäminen on kansainvälisten ja Suomen valtion asettamien ilmastotavoitteiden mukaisia. Suomen ilmastostrategiassa tavoitellaan vuoteen 2030 mennessä energiankäytössä 38 % osuutta uusiutuville energianlähteille.

Tilastokeskuksen mukaan asuntojen lämmittämisen energialähteiden keskinäisessä osuudessa on tapahtunut pienoista muutosta vuoden 2008 ja 2016 välillä. Merkittävin muutos on tapahtunut öljylämmityksen ja lämpöpumppujen välillä, mikä näkyy kuvassa 1. Öljyn käyttö on lähes puolittunut, kun taas lämpöpumppujen käyttö on samassa ajassa yli kaksinkertaistunut. (Rouhiainen V., 2018)



Kuva 1. Lämmitysenergian osuudet vuonna 2016, sulkeissa vuosi 2008 (Rouhiainen V., 2018)

EU-tilastojen mukaan lähienergian hyödyntäminen sähköntuotannossa on kasvanut merkittävästi erityisesti tuuli-, bio- ja aurinkoenergian osalta. Aurinkoenergian osalta kasvua on tapahtunut merkittävästi viimeisen 10 vuoden ajan, mikä on nähtävissä kuvassa 2. (Directorate General for Energy, 2018)



Kuva 2. Uusiutuvien energianlähteiden käyttö EU:n sähköntuotannossa (Directorate General for Energy, 2018)

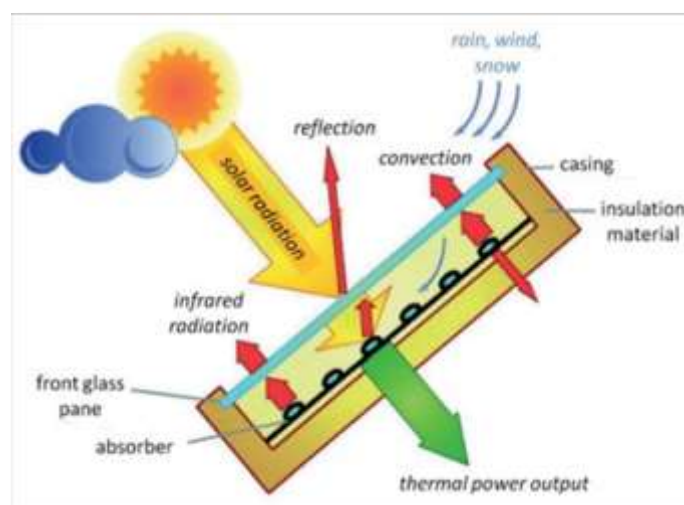
## 2.1 Aurinkoenergia

Aurinkoenergian käyttömahdollisuudet vaihtelevat hyvin suuresti vuoden aikojen mukaan. Etelä-Suomessa vuotuisesta säteilyenergiasta saadaan 90 % maalisyyskuun välisenä aikana. Mitä pohjoisemmaksi mennään sitä suuremmaksi kausivaihtelu kasvaa. Kesäkuukausina (touko-heinäkuu) auringon säteilyenergia kohtisuoralle pinnalle on Suomessa keskimäärin 150 kWh/m<sup>2</sup> ja talvikuukausina (loka-helmikuu) alle 30 kWh/m<sup>2</sup>. (Suntekno Oy, 2019) Aurinkoenergiasta puhuttaessa toteutukset jaetaan kahteen eri kokonaisuuteen – aurinkolämpöön ja aurinkosähköön.

### 2.1.1 Aurinkolämpö

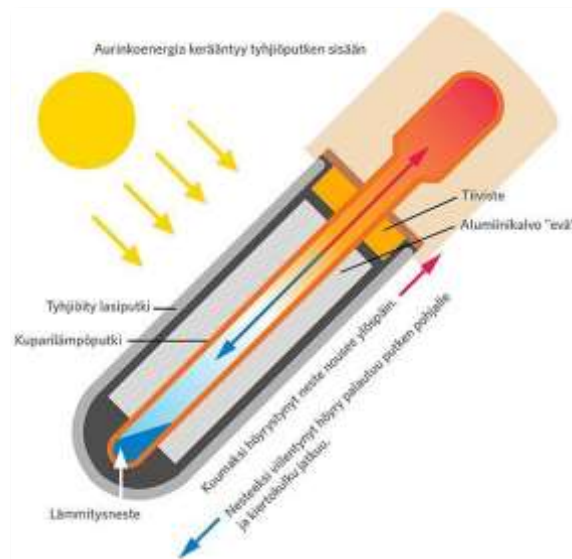
Aurinkolämmön hyödynnettävyyttä hankaloittavat lämpösäteilyn vuorokausi ja vuodenaikavaihtelut sekä vaihtelevat sääolosuhteet. Aurinkolämmön tuottamisessa käytetään taso- tai tyhjiöputkikeräimiä. Aurinkosähkön tuotantoa rajoittaa edellä mainittujen lisäksi aurinkosähköpaneelien pienet hyötysuhteet (17-20 %) ja hankintakustannukset suhteessa tuotettuun energiaan. Tutkimusolosuhteissa on päästy yli 40 % hyötysuhteeseen, mikä ennustaa hyvää tulevaisuutta aurinkosähkölle. (Ahola, 2014)

Tasokeräimessä auringosta tulevaa lämpöä kerätään tumman keräinelementin avulla. Elementin pinta imee suurimman osan siihen kohdistuvasta säteilystä ja sen vuoksi lämpenee. Keräinelementtiin on yhdistetty lämmönsiirtoputket, joissa kiertävän nesteen avulla lämpö siirretään käytettäväksi lämmitys- tai käyttöveden lämmittämiseen. Keräinelementti on suojattu yleisimmin erikoislasilla, joka kestää lämpötilanvaihteluita -30 - +210 °C ja läpäisee vähintään 90 % aurinkosäteilystä. Muitakin soveltuvia materiaaleja voidaan käyttää säteilyä läpäisevänä suojana. Muista suunnista keräinelementti on vuorattu lämmöneristävällä materiaalilla ja ulkokuori säänkestävästä materiaalista esimerkiksi alumiinista. (Motiva, 2016a)



Kuva 3. Tasokeräimen toimintaperiaate (Ahola, 2014)

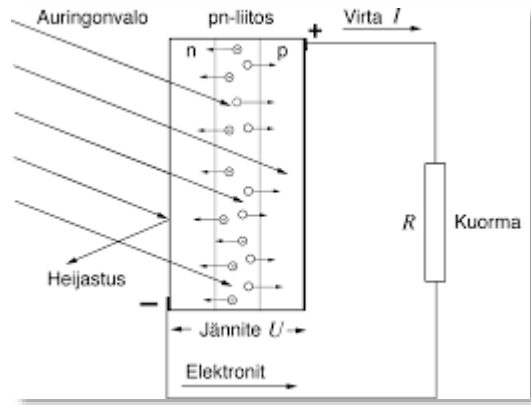
Tyhjiöputkikeräimissä auringosta tuleva säteilylämpöenergia kerätään niimensä mukaisesti tyhjiöputken sisälle. Tyhjiö toimii lämmöneristeenä ja estää lämpöä johtumasta ulkoilmaan. Tämän vuoksi tyhjiökeräimet toimivat alhaisissa lämpötiloissa paremmin kuin tasokeräimet. Keräimen sisäosan lämpötila voi nousta jopa 250 °C. Lämmönsiirto tapahtuu läpivirtausperiaatteella tai lämpöputken avulla kuten kuvassa 3 esitetyssä toimintaperiaatteessa. Läpivirtausperiaatteella toimivassa järjestelmässä lämpöputki muodostuu u-muotoisesta putkesta tai sisäkkäin olevista putkista, missä lämmönsiirtoneste kulkee. Kuvan 4 lämpöputki voi olla valmistettu lasista tai metallista. Lämpöputken sisällä oleva helposti höyrystyvä neste muodostaa oman lämmönsiirtopiirin. Höyrystynyt neste kondensoituu putken yläpäässä, luovuttaen lämpönsä keräimen yläosan lämpöeristetyin kotelon sisällä olevan putkituksen lämmönsiirtonesteeseen. (Motiva, 2016b)



Kuva 4. Tyhjiöputkikeräimen toimintaperiaate (Motiva, 2016b)

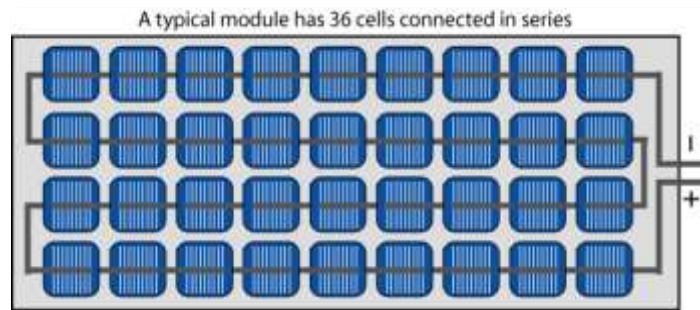
### 2.1.2 Aurinkosähkö

Auringosta tuleva säteilyenergia muutetaan pii- tai ohutkalvokennoston avulla sähköksi. Kennon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, missä auringon fotonien energia muuttuu kennoston pn-liitoksessa elektronien siirtymiseksi rajapinnan ylitse kuvan 5 mukaisesti. Koska prosessi itsessään on hyvin yksinkertainen, muodostuu prosessista käyttövarma ja vaatii elinkaarensa aikana vain vähän huoltotarvetta. Keskimääräinen hyötysuhde on 15-20 % välillä optimaalisissa olosuhteissa.



Kuva 5. Aurinkokennon toimintaperiaate (Tanninen, 2009)

Aurinkosähköpaneelit muodostuvat yksittäisistä kennoista, jotka on liitetty toisiinsa sarjaan. Yhden kennon tuottama jännite on noin 0.5 voltia ja virta noin  $30 \text{ mA cm}^2$  riippuen käytetystä materiaalista ja valaistusolosuhteista. (Honsberg C., Bowden S., 2017) Näin ollen esimerkiksi 12 voltin paneeliin tarvitaan vähintään 24 kennoa kytkettynä sarjaan kuvan 6 mukaisesti. Käytännön toteutuksissa paneeleissa on vähintään 36 kennoa, jotta saadaan riittävä jännite akuston lataamiseen. Lisää tehoa saadaan kytkemällä paneeleita rinnakkain. (Motiva, 2017a)



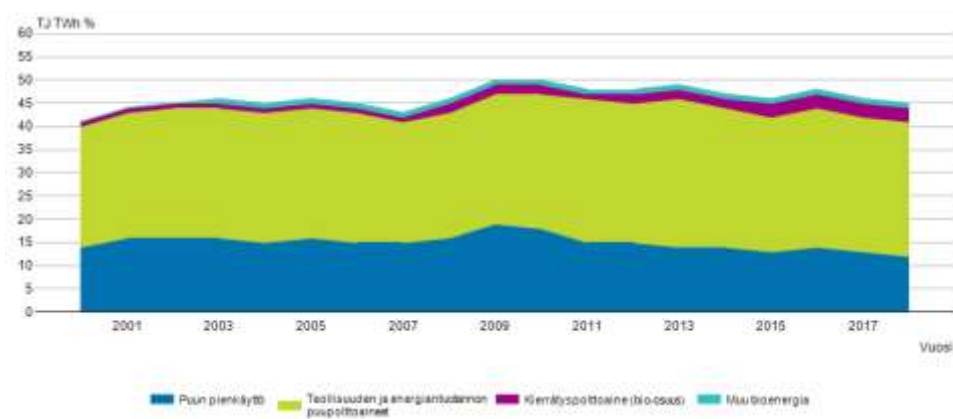
Kuva 6. Tyypillinen 36 kennoinen aurinkosähköpaneeli, minkä jännite riittää 12 v akuston lataamiseen. (PVEducation, 2017)

## 2.2 Bioenergia

Biomassasta saadut polttoaineet luokitellaan kolmeen eri ryhmään olomuodon mukaisesti: kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasuihin. Biopolttoaine nimenä on määritelty EU-direktiivin (2009/98/EY) mukaan nestemäiseksi tai kaasumaiseksi polttoaineeksi, mitä käytetään liikenteessä ja jota tuotetaan biomassasta. Rakennusten lämmittämiseksi käytetään ensisijaisesti kiinteässä muodossa olevia polttoaineita. Nämä polttoaineet luokitellaan yleisellä tasolla neljään eri kategoriaan. Puuperäisiin polttoaineisiin kuuluu

puu, puuhake, hakkuujäte, kannot, sahateollisuudet purut ja lastut sekä niistä tehdyt puristeet kuten puupelletit ja briketit. Turve on oman erillinen kategoriansa koska kyseessä on kuolleiden kasvinosien maatumisesta muodostunut biomassa. Biojätteiden kategoriaan kuulu eloperäinen jäte, jota saadaan teollisuuden, yhteiskunnan ja maatalouden jätteineksistä. Peltobiomassat muodostavat oman kategoriansa, mihin kuuluu kasvatetut energiakasvit ja niiden osat.

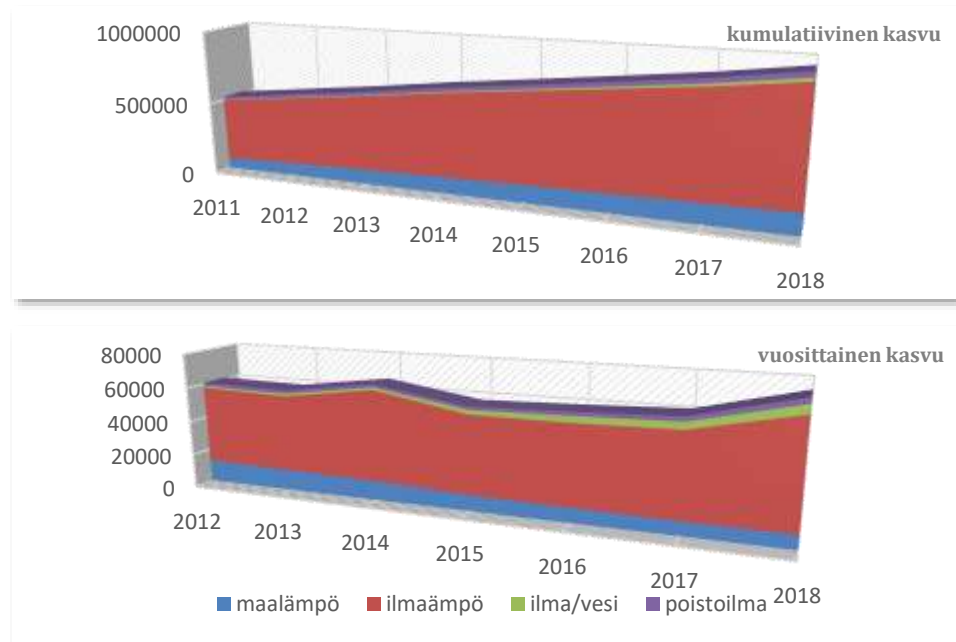
Suomen ilmastostrategiassa on tavoitteena kotimaisten uusiutuvien energiamuotojen lisääntyvä käyttö. Puun hyödyntäminen on yhtenä painopistealueena. Tilastokeskuksen energiataulukon, kuva 7, mukaan 2000-luvulla tuotantomäärä on pysynyt lähes ennallaan. Nykyinen strategia on ollut voimassa vuodesta 2016 lähtien. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2016) Ilmastostrategian bioenergiaosuutta käsitellään enemmän kappaleessa 3.



Kuva 7. Puun ja muun bioenergian käytön kehitys Suomessa (Tilastokeskus, 2019a)

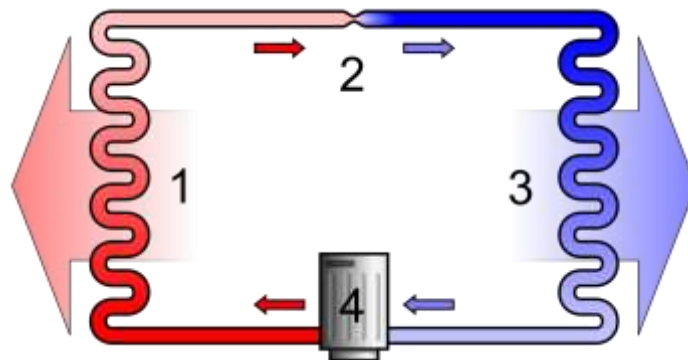
### 2.3 Lämpöpumput

Lämpöpumppujen käyttö lisälämmönlähteenä tai varsinaisena lämmönlähteenä ovat kasvattanut suosiotaan tasaisesti vuosituhaten alusta lähtien kuten kuvasta 8 voi nähdä. Lämpöpumpputekniikat luokitellaan neljään pääkategoriaan: maalämpöpumput (MLP), ulkoilma-vesilämpöpumput (UVLP), ulkoilma-ilmalämpöpumput (ILP) ja poistoilmapumput (PILP). Suosituimmaksi lämmönlähteeksi on muodostunut ilmalämpöpumppu suhteellisen edullisen hinnan ja helpon asennuksen vuoksi. Maalämpöpumppu on pysynyt toiseksi suosituimpana lämpöpumpputekniikkana ympärivuotisen käytettävyyden vuoksi. (Sulpu, 2019b)



Kuva 8. Käyttöön otetut lämpöpumput tyypeittäin (Sulpu, 2019a)

Lämpöpumpun toimintaperiaate perustuu aineen olomuodon muutokseen kaasusta nesteeksi ja päinvastoin. Kompressorissa kaasumainen aine puristetaan kokoon, jolloin se muuttuu nestemäiseksi ja lämpenee. Paisuntaventtiin jälkeen neste kaasuuntuu, sitoo itseensä energiaa ja viilenee. Olomuodon muutos tuottaa enemmän vapautuvaa energiaa kuin mitä prosessi tarvitsee toimiakseen.



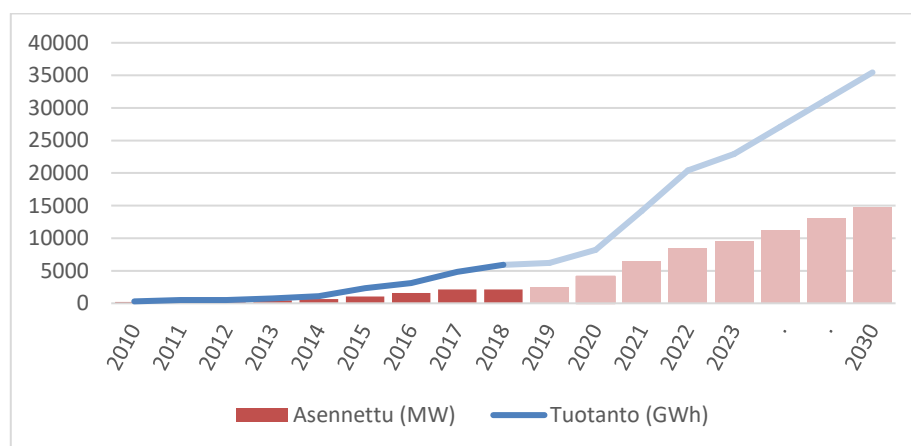
Kuva 9. Lämpöpumpun toiminnalliset osat. 1) lauhdutin (lämmin puoli), 2) paisuntaventtiili, 3) höyrystin (kylmä puoli), 4) kompressor (Karonen, 2017)

## 2.4 Tuulivoima

Tuulivoiman käyttö Suomessa on suhteellisen uutta. Alkuvuosina voimaloiden lukumäärä on kasvanut hyvin hitaasti, kunnes vuoden 2010 jälkeen voimalaitosten määrä on kasvanut merkittävästi vuosittain kuten kuvasta 10 voidaan havaita. Alkuvaiheessa tuulivoiman kasvua on edesauttanut

valtiolliset panostukset erilaisten taloudellisten tukien ja takuutariffien muodossa.

Vuodesta 2015 lähtien Suomen Tuulivoimayhdistys ry on kerännyt virallista tilastoa tuulivoiman käytöstä Suomessa. Tätä ennen tilastojen kerääminen oli VTT:n vastuulla. Vuoden 2019 helmikuun raportissa rakenteilla olevien hankkeiden tuotantoteho on noin 380 megawattia. Hankkeiden valmistuessa yhteenlaskettu tuotantoteho kasvaa lähes 20 prosentin verran. Rakennusluvan saaneita hankkeita on 3850 megawatin edestä, joidenka toteutuminen kasvattaisi Suomen tuulienergiatuotannon yli kaksin kertaiseksi. Kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa mainitaan uusiutuvan energian kohdalla tuulienergian kasvun hidastuvan 2010 luvun jälkeen, kun uusille voimaloille ei enää tarjota tuotantotukea. (Kinnunen, M, 2017) Edellä mainituista rakenteilla olevista tuulivoimahankkeista 54 % valmistuu ilman valtiollista tukea. Tuulivoima onkin alkanut kiinnostaa myös yksityisiä sijoittajia ilman valtiollistakin panostusta. Vuonna 2018 julkaistiin Suomen ensimmäinen pitkän aikavälin tuulivoimatuotantoa koskeva PPA-sopimus, jossa sähkönkäyttäjät sitoutuvat ostamaan toimittajalta sähköä useiksi vuosiksi eteenpäin sovitulla hinnalla. PPA-sopimukseen perustuva tuulivoiman uustuotanto on yleistä maissa, joissa tuulivoima on vakiinnuttanut paikkansa energian tuotantokentässä. Tuulivoimayhdistyksen julkaiseman hankelistan perusteella ja PPA-sopimusten käyttöönotolla Suomessa tuulivoima voi saada uutta nostetta.

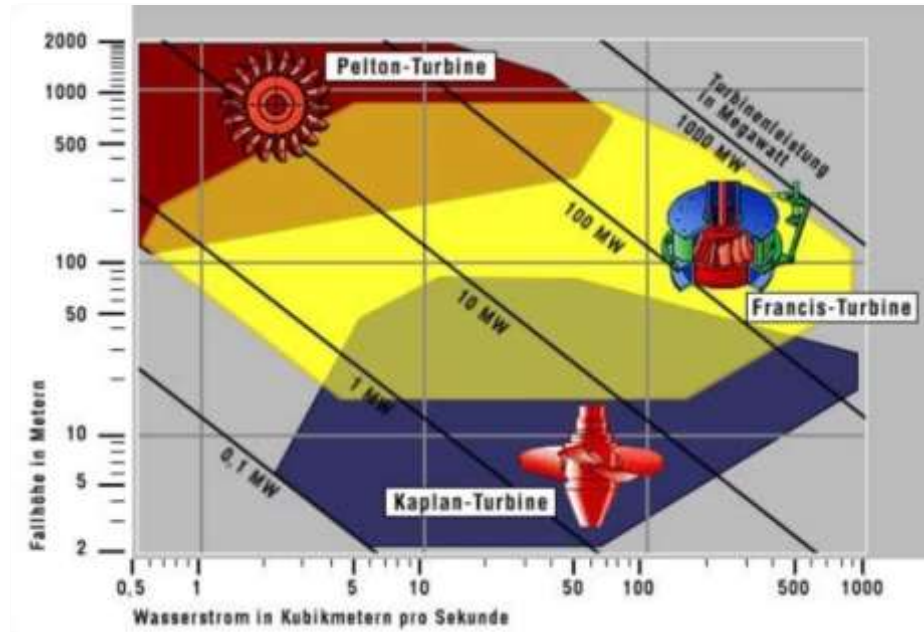


Kuva 10. Tuulivoiman kasvu 2018 toteuman ja hankelistan mukaan (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2018)

## 2.5 Vesivoima

Vesivoima perustuu veden virtaukseen ja korkeuseroihin säilötyn potentiaalienergian muuttamista käyttökelpoiseksi energiaksi. Vesipyöriä ja rat-taita on käytetty hyödyksi maataloudessa ja teollisuudessa pitkään. Nyky-aikaiset vesiturbiinit jaotellaan kahteen pääryhmään, jotka ovat reaktioturbiinit ja impulssiturbiinit. Reaktioturbiinin siivet ovat koko ajan kosketuksissa veden virtaukseen ja siksi niitä voidaan hyödyntää paikoissa, joissa korkeuserot ovat pieniä mutta virtaama on suuri. Reaktioturbiineista

tunnetuimpia ovat Kaplan- ja Francis-turbiinit. Impulssiturbiinit vastaavasti hyödyntävät kohdistetun vesisuihkun voimaa ja toimivat tilanteissa missä veden virtaamat ovat pieniä mutta korkeuserot suuria. Impulssiturbiineista yleisin Pelton-turbiini. Kuvassa 11 on esitetty näiden kolmen turbiinityypin teholliset käyttöalueet.



Kuva 11. Eri turbiinityypin teholliset toimialueet veden virtaaman ja korkeuseron suhteen. (Tiihala, 2009)

Vesivoimalaitoksilla on tuotettu sähköä Suomessa jo yli sadan vuoden ajan. Ensimmäinen vesivoimalla toimiva sähkölaitos aloitti toimintansa 1882 Tampereella Tammerkosken yläjuoksulla. Voimalaitos tuotti sähköä Finlaysonin kutomon valoihin. Vuonna 2016 Suomen vesivoimalla tuotetusta sähköstä vastasi noin 250 voimalaitosta, joiden tuottaman energiamäärä vastasi lähes 16 % sähkön kokonaiskulutuksesta. (Motiva, 2017b)

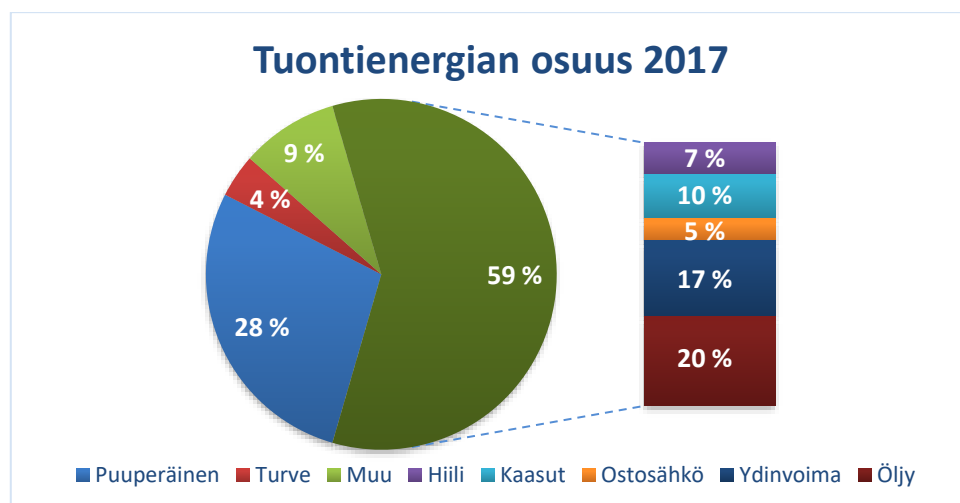
Vesivoiman merkittävä lisääminen on enää hyvin rajallista ympäristönsuojelullisista syistä. Vesivoiman suurin kasvu tapahtuu nykyisten voimalaitosten peruskorjausten ja päälaitteistojen uusimisen kautta. Suomen sähköenergian tuotannossa vesivoimaa käytetään säätövoimana käyttöhuippujen tasaamisessa.

Viime vuosina pienvesivoiman tuotanto on herättänyt kiinnostusta paikallisena sähköntuotantona. Se parantaa sähkön saantivarmuutta. Paikalliset pienvoimalat sopeutuvat paremmin ympäristöönsä ja siten niiden aiheuttamat muutokset maisemaan tai ekologiaan ovat pieniä. Pienvesivoimalla tuotetaan noin 9 % vesivoiman kokonaisenergiatuotannosta. (Motiva, 2016c)

## 2.6 Taloudellinen merkitys

Energian kulutuksessa asukasta kohti olemme Euroopan kärkimaita. Tämä johtuu muun muassa pohjoisesta sijaintimme kylmästä ilmalasta, pitkistä etäisyyksistä, korkeasta elintasosta sekä paljon energiaa kuluttavasta teollisuudesta. EU:n jäsenenä Suomi on sitoutunut vähentämään energia-päästöjä ja suosimaan uusiutuvan energian hyödyntämistä. Energiapoliittikka ja ilmastopolitiikka ovat hyvin läheisesti kiinni toisissaan. Nämä poliittiset tavoitteet ovat saaneet aikaan sen, että vuonna 2018 uusiutuvan energian osuus oli 37 % kokonaistuotannosta. (Motiva, 2019) Viime vuosien aikana tapahtunut positiivinen kehitys tuulivoiman ja puuperäisten energialähteiden käytön lisääntymisessä mahdollistaa ilmastostrategiassa asetetun 38 % tavoitteen ylittämisen ennen asetettua vuoden 2020 takarajaa.

Lähienergian lisääminen kestävä kehityksen näkökulmasta on erittäin tärkeää Suomelle. Vuosittain käytetystä energiasta vain 41 % tuotetaan kotimaisilla energialähteillä. Kuvassa 12 on eritelty Suomessa tilastoitujen energialähteiden suhteelliset osuudet. Poikkeuksena moneen Keski-Euroopan maahan, Suomi ei laske ydinenergiaa osaksi kotimaista energiaa.



Kuva 12. Suomen energiaomavaraisuus 2017 (Tilastokeskus, 2019b)

Lähienergian lisääntyvä hyödyntäminen kasvattaa Suomen energiaomavaraisuutta ja vähentää fossiilisten energiamuotojen käyttöä.

## 3 BIOENERGIA OSANA LÄMMÖNTUOTANTOA

Suomen valtion energia- ja ilmastostrategian ja keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmassa (KAISU) tavoitellaan saavuttaa vuoteen 2030 mennessä EU:ssa sovitut ilmastotavoitteet. Suomen osalta tämä tarkoittaa

haitallisten päästöjen vähentämistä 16 % päästökaupan ulkopuolisilla sektoreilla, joihin luetaan rakentaminen, rakennusten lämmitys, asuminen, maatalous, liikenne ja jätehuolto sekä teollisuuden fluoratut kasvihuonekaasut. Suomen tulee myös nostaa uusiutuvan energian osuus 38 % energian loppukulutuksesta sekä vähentää kasvihuonepäästöjä 39 % vuoden 2005 tasosta (Ympäristöministeriö, 2017)

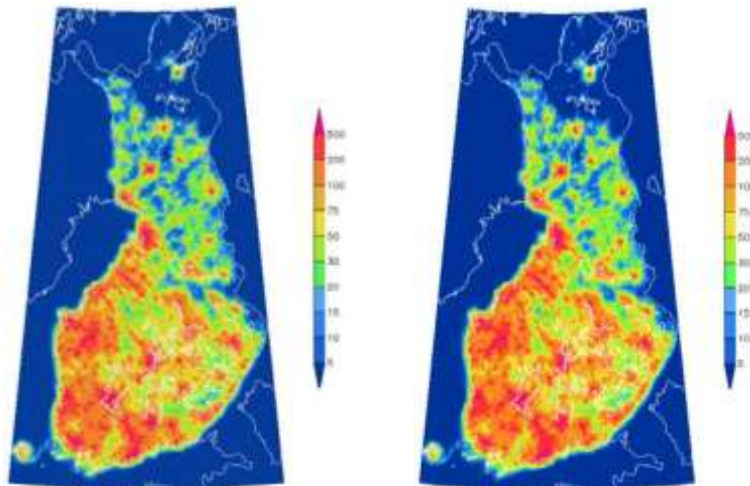
Strategian tämän opinnäytetyön aihepiiriin kuuluvan osion, rakennusten erillislämmitys, osalta tuodaan esille kiinteistöissä käytettävän öljylämmityksen muodostavan suurimman osan aihealueen päästöistä. Tämän johdosta lämmitysöljyn tuottajia tullaan velvoittamaan öljyn biokomponenttien nostamista 10 % vuoteen 2030 mennessä. Valtio osaltaan sitoutuu luopumaan öljylämmityksestä kaikissa omistamissaan kiinteistöissä vuoteen 2025 mennessä ja kannustaa kaikkia julkisia toimijoita tavoittamaan samaa. Pellettien ja muun puuaineksen puhdaspolttota pyritään edistämään. (Ympäristöministeriö, 2017)

Puuaineksen käyttämistä rakennusten lämmittämiseksi on menneinä vuosina vähennetty terveydellisiin syihin vedoten. 1960-luvulla kaupunkialueilla vähennettiin puulämmitystä ja siirryttiin käyttämään öljylämmitystä sekä kaukolämpöä. Tämän seurauksena kaupunkien ilmanlaatu on parantunut. (Terveyden ja Hyvinvoinnin laitos, 2017)

Puun käyttö lämmityksessä on jälleen kasvanut, kuten kansallisessa ilmastosuunnitelmassa on tavoiteltu. Tämä on tuonut mukanaan 1960-luvulla olleita ongelmia ilman laadun suhteen, koska puun puhdaspolttota ei ole yksinkertaista. Tapa miten puuta käytetään nykytavoin polttoaineena, aiheuttaa Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen mukaan Suomessa

- 40 % kaikista pienhiukkaspäästöistä (PM2.5)
- 55 % kaikista mustan hiilen (BC) päästöistä
- yli 80 % kaikista soluille myrkyllisten ja syöpävaarallisten PAH-yhdisteiden päästöistä
- 30 % haisevien ja limakalvoja ärsyttävien haihtuvien orgaanisten hiilivetyjen (VOC) päästöistä
- 25 % hiilimonoksidin (CO) päästöistä

Kuvassa 13 on esitetty, kuinka pienhiukkasten määrä on lisääntynyt mittauksissa vuosien 2000 ja 2003 välillä. Eroavaisuuden huomaa, kun vertailee punaisella merkittyjen alueiden kokoa mittaustuloksissa. Eriyksen merkittävä muutos on tapahtunut eteläisen Suomen taajama-alueiden ympäristössä.



Kuva 13. Puun pienpolton hiukkaspäästöpitoisuudet vuodelta 2000 (vasen) ja vuodelta 2003 (oikea) PILTTI-projektin loppuraportin mukaan. (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, 2010)

Yksi yhteinen syy edellä mainittuihin päästöihin puulämmitysratkaisuissa on vajavainen tai virheellinen palamisprosessin hallinta. Puutteellisesti toteutetut puulämmitysratkaisut sekä käyttäjien heikko ymmärrys siitä, kuinka puuta voidaan polttaa puhtaasti, vaatii julkisen sektorin toimia. Yritysten, jotka tarjoavat ratkaisuja puun polttamiseksi, tulisi varmistaa, että edustamansa tuotteet oikein käytettynä mahdollistavat puhdaspolton ja tuotteiden käyttäjät saavat riittävän opastuksen tuotteiden käyttämiseen oikealla ja ympäristöystävällisellä tavalla.

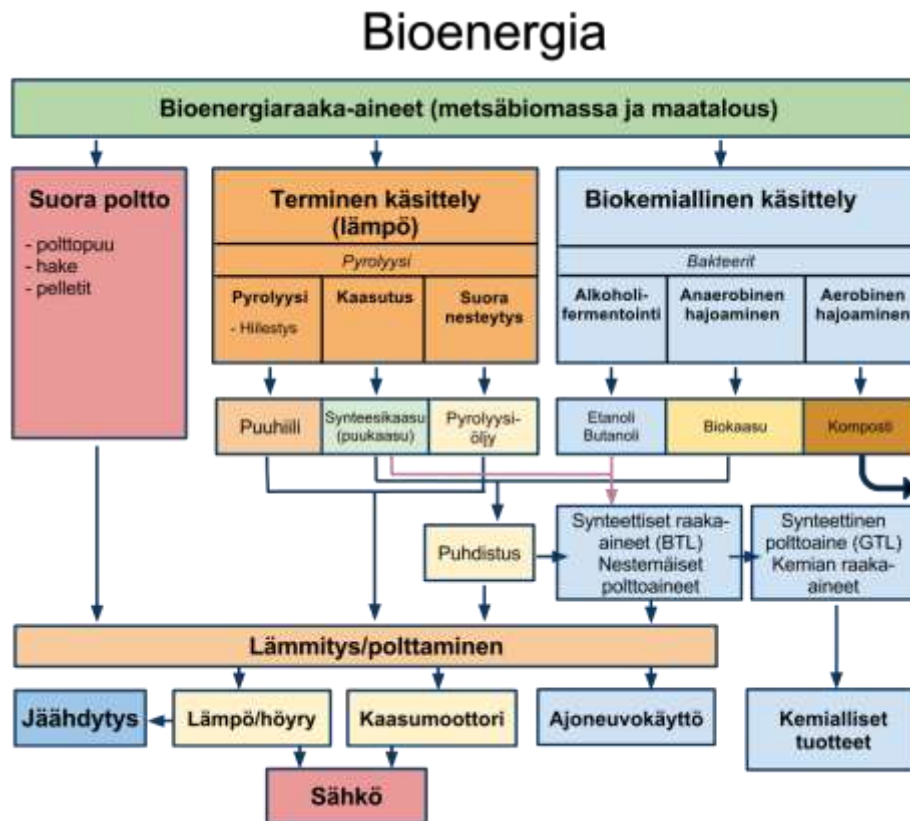
### 3.1 Biopolttoaineet

Suomessa bioenergian lähteenä käytetään pääasiallisesti puuta ja turvetta suoraan poltettuna tai muunnettuna lämpö- ja sähköenergiaksi. Muuta biomassaa hyödynnetään jalostettuna bioperäisten polttoaineiden tuottamiseksi. (Bioenergianeuvoja, 2019) Kuva 14 kuvaa kuinka bioenergian raaka-aineet saadaan jalostettua biopolttoaineiksi tai kemiallisiksi tuotteiksi.

Kuiva puuaines omaa hyvän energiasisällön ja on siksi erittäin hyvä energian sekä lämmön lähde. Vaikka puuston kasvu Suomessa on hidasta, metsätalouden kokonaiskasvu on riittävä kompensoimaan käytön vaatimukset.

Turve on ilmastopoliittisesti mielenkiintoinen energian lähde. Hallitustenvälinen ilmastopaneeli (IPCC) määrittelee turpeen omaksi energialuokaksi. Sitä ei lasketa uusiutuvaksi biomassaksi, muttei myöskään fossiiliseksi energian lähteeksi. Suomen maapinta-alasta on turvemaata yli 9 miljoonaa hehtaaria, josta energiantuotantoon on käytettävissä yksi prosentti. Turpeen käyttäminen lisää kotimaista energiaomavaraisuutta ja työllisyyttä.

Kansainvälisesti turvetta käytetään enemmän kasvualueena ja kuivikkeena kuin energiantuotantoon. Suomessa energiatuotteen noston jälkeen tuotantoalueet palautetaan luonnontilaan, otetaan viljelykäyttöön tai metsitetään. (Energiamailma, 2014)



Kuva 14. Bioenergian tuotteistusaskleet (Avannainen, 2010)

Biojäte on erinomaista raaka-ainetta käytettäväksi biokaasun tuotannossa. Voidaankin ajatella, että biokaasutus on järkevimpiä tapoja tuottaa energiaa koska nyky-yhteiskunnassa jäte on ehtymätön luonnonvara. Eniten hyödynnettyjä raaka-aineita ovat jätevedenpuhdistamojen lietteet, maatalouden lannat ja kasvubiomassat sekä yhdyskuntien ja teollisuuden biopohjaiset jätteet. Käytännössä raaka-aineeksi kelpaa mikä tahansa biohajoava aines.

Pelloilla ja soilla kasvatetut energiakasvit tai niiden osat muodostavat luokituksen peltobiomassan. Näitä voidaan käyttää sellaisenaan polttoaineena tai niistä voidaan jalostaa kiinteitä tai nestemäisiä polttoaineita. Esimerkiksi öljyperäiset kasvit sopivat biodieselin raaka-aineeksi.

Nestemäisistä ja kaasumaisista biopolttoaineista keskusteltaessa tulee esille ensimmäisen ja toisen sukupolven raaka-aineet ja valmistusprosessit. Tekniikan kehittyessä on raaka-aineiden valikoimaa pystytty laajenta-

maan sekä jalostusastetta nostamaan, jolloin lopputuotetta on voitu käyttää laajemmin kuin aikaisemmin. Tälle sukupolvijaolle ei vielä ole olemassa vakiintunutta määrittelyä.

HighBio EU-hankkeessa on esitetty kuvan 15 mukaisesti ensimmäisen sukupolven polttoaineiden raaka-aineiksi tuotteita, jotka useimmiten ovat elintarvikkeita. Tyypillisiä esimerkkejä ovat maissi, sokeriruoko, peruna sekä rypsi ja rapsi. Valmistusprosessissa raaka-aineet muunnetaan polttoaineiksi fermentoimalla tai puristamalla ja esteröimällä. Tällä menetelmässä saatuja polttoaineita ovat etanoli ja rasvahappometyyliestrerit, jota käytetään biodieselinä (FAME). (Lassi U., Wikman B., 2011)

<b>Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet</b>			
<b>Polttoaine</b>	<b>Nimike</b>	<b>Raaka-aine</b>	<b>Valmistusprosessi</b>
Bioetanoli	Tavanomainen bioetanoli	Sokeriruoko, -juurikkaat Vehnä, maissi	Hydrolyysi + fermentointi
Kasviöljyt	Puhtaat kasviöljyt	Rapsi, rypsi	Kylmäpuristus Uutto
Biodiesel	RME FAME	Rapsi, rypsi	Kylmäpuristus Uutto Transesterointi
Biodiesel	Biodieseliä jätteistä	Jäterasvoja ja öljyjä, eläinrasvaa	Transesterointi
Biokaasu	Puhdistettu biokaasu	(Märkä) biomassa	Metabolisointi
Bio-ETBE		Bioetanoli	Kemiallinen synteesi

Kuva 15. Ensimmäisen sukupolven jalostetut biopolttoaineet  
(Lassi U., Wikman B., 2011)

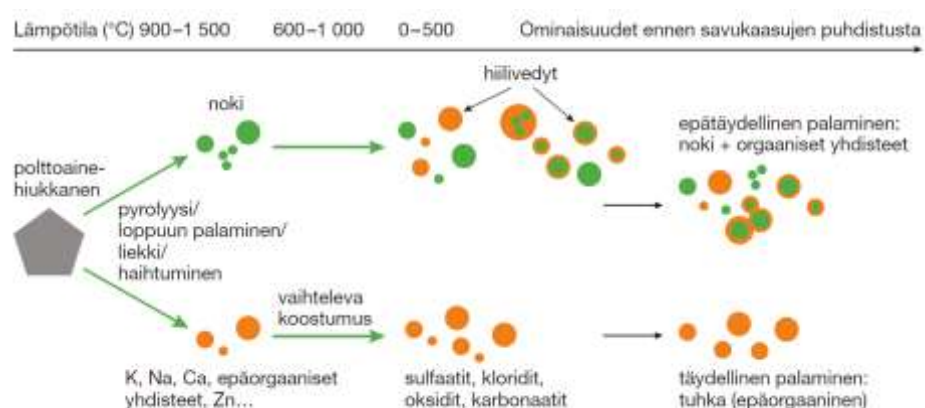
Vastaavasti toisen sukupolven biopolttoaineiden raaka-aineina käytetään kuvan 16 mukaan pääasiassa lignoselluloosapitoista jätettä kuten hakkuujätettä, maatalousjätettä sekä purkupuutavaraa ja erikoisviljeltyä energiviljaa kuten ruokohelpiä. Elintarviketuotannon jäännöstuotteita voidaan käyttää myös raaka-aineena. Käytettyjä valmistus tekniikoita ovat entsymaattinen tai hapan hydrolyysi, jonka jälkeen suoritetaan fermentointi tai vaihtoehtoisesti kaasutus. Kaasutuksessa biomassa muunnetaan vetykaasuksi ja hiilimonoksidiksi eli tuotekaasuiksi.

Toisen sukupolven biopolttoaineet			
Polttoaine	Nimike	Raaka-aine	Valmistus-prosessi
Bioetanoli	Selluloosapohjainen bioetanoli	Lignoselluloosa	Vaativa hydrolyysi + fermentointi
Synteettiset biopolttoaineet	Biomass-to-liquid (BTL) Fischer-Tropsch diesel Biometanoli Seosalkoholit Biodimetyylieetteri (Bio-DME)	Lignoselluloosa	Kaasutus + Synteesi
Biodiesel	Vetykäsitelty Biodiesel	Kasviöljyt Eläinrasva	Hydraus
Biokaasu	SNG (synteettinen luonnonkaasu)	Lignoselluloosa	Kaasutus + Synteesi
Biovety		Lignoselluloosa	Kaasutus + synteesi vaihtehtoisesti biologisia prosesseja

Kuva 16. Toisen sukupolven jalostetut biopolttoaineet  
(Lassi U., Wikman B., 2011)

### 3.2 Bioenergian päästöt

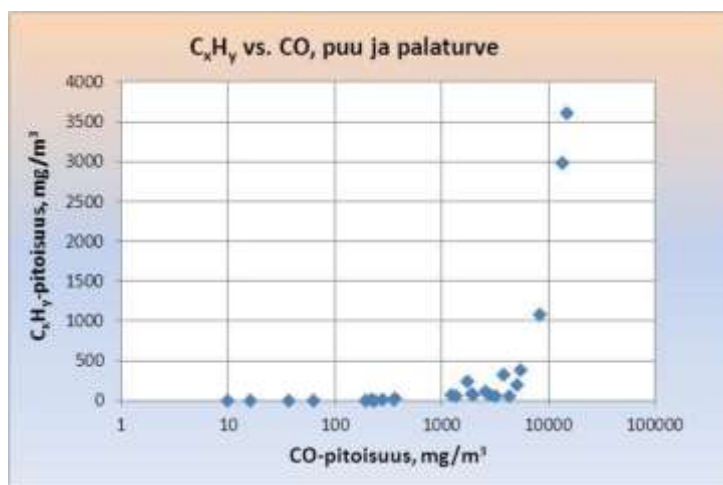
Puun pienpoltto on lisääntynyt huomattavasti 2000-luvulla. Vaikka puun polttaminen on energiamuotona tavoiteltu, sillä on merkittäviä ihmisen terveyteen ja ilmastoon kohdistuvia vaikutuksia. Pienpoltton seurauksena ulkoilmaan muodostuvat pienhiukkaset ovat ihmiselle terveysriski. Helsingissä tehtyjen ilmakehämittausten mukaan talviaikaan lähes 40 % ilmassa olevista pienhiukkasista on peräisin puun pienpoltosta. (Boreal, 2012) Pienhiukkasia syntyy aina puun polttoprosessin aikana. Kuva 17 havainnollistaa paloprosessin kulkua. Silloin kun palaminen ei tapahdu puhtaasti, syntyy nokea ja hiilivetyjä, jotka yhdistyvät toisiinsa muodostaen ihmiselle haitallisia yhdisteitä. Täydellisessä palamisessa savukaasut sisältävät pääasiassa epäorgaanisia yhdisteitä. Hyvälaatuinen ja kuiva polttoaine käytettynä huolletussa, oikein säädetyssä laitteessa ja sopivalla polttotekniikalla mahdollistaa puhtaan palamisen sekä kemiallisesti vaarattomat päästöt. (Lappalainen, 2007, s. 7)



Kuva 17. Päästöjen syntyprosessi (Lappalainen, 2007, s. 7)

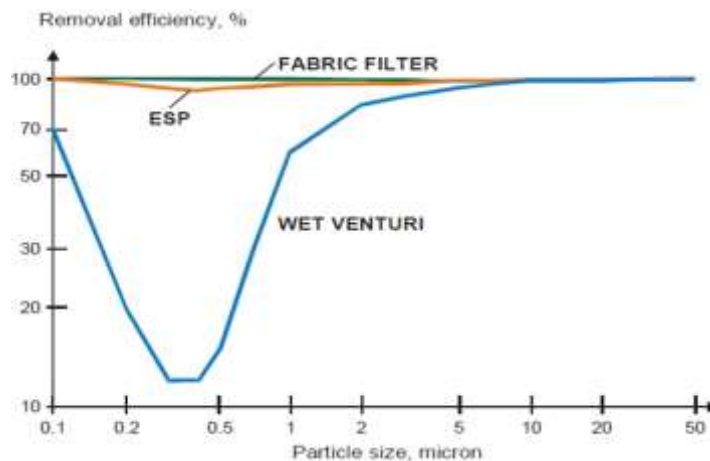
Palamisen puhtautta seurataan palokaasujen päästömittauksilla, joiden perusteella voidaan paloprosessin aikana tehdä tarvittavia säätötoimenpiteitä. Merkittävin säätösuure on palokaasujen häkäpitoisuus eli hiilimonoksidin (CO) määrä. Kuvan 18 mittaustuloksesta käy hyvin esille, kuinka hiilivetypäästöt kasvavat, kun häkäpitoisuus kasvaa riittävän korkeaksi. Vastaavasti häkäpitoisuuden pysyessä matalana, myös muut terveydelle haitalliset päästöt pysyvät pieninä. Häkäpitoisuudella on vaikutusta terveydelle haitallisten PAH-yhdisteiden määrään ja pienhiukkasten koostumukseen. (Ympäristöministeriö, 2012)

Häkäpitoisuutta voidaan hallita pitämällä palamislämpötila riittävän korkeana ja säätämällä paloprosessin toisioilman määrää. Häkää syntyy epätäydellisen palamisen eli liian vähäisestä hapen saannista palamisen aikana.



Kuva 18. Hiilivetypäästö kasvaa jyrkästi, kun häkäpitoisuus ylittää kynnyksarvon. Pitoisuudet on reducedoitu kuivaan savukaasuun 6 % happipitoisuudessa. (Ympäristöministeriö, 2012)

Toinen palamisen puhtauden mittausarvo on palokaasussa esiintyvät pienhiukkaset. Puun polttamisen seurauksena syntyvästä lentotuhkasta on suurin osa alle 2,5 µm kokoisia pienhiukkasia ja näistäkin valtaosa on alle 1,0 µm kokoisia kertymähiukkasia. Tämä kokoluokan hiukkasten erottelu palokaasuista onnistuu parhaiten kuitu- tai sähkösuodattimilla, kuten kuvasta 19 käy esille. Näistä vaihtoehdoista sähkösuodatinta on esitetty taloudellisesti varteenotettavaksi vaihtoehdoksi puun pienpolton suodattimeksi. (Hytönen .K, Jokiniemie J., 2006)



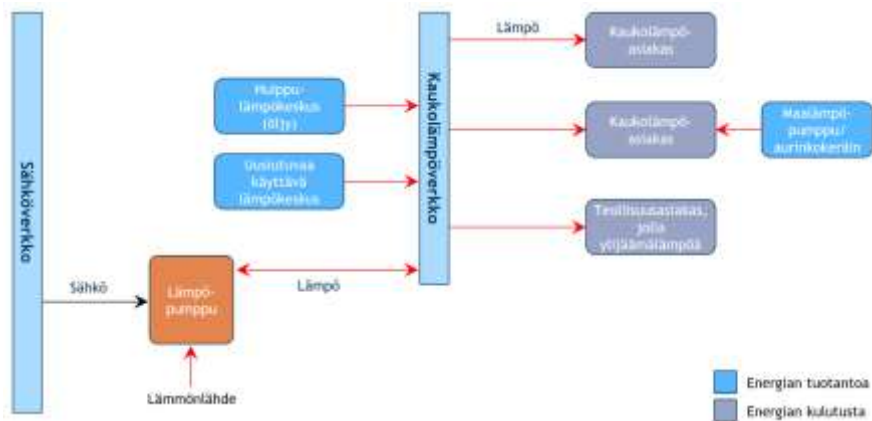
Kuva 19. Hiukkaserottimien pienhiukkasten poistotehokkuus. ESP = sähköstaattinen suodatin (Hytönen .K, Jokiniemi J., 2006)

#### 4 HYBRIDILÄMMÖTUOTANTO

Uusiutuvan energian käyttäminen ympärivuotisessa käytössä tukeutuen vain yhteen energiamuotoon on osoittautunut haasteelliseksi vaihtoehdoksi erityisesti pienten yksiköiden energianlähteenä. Esimerkiksi, aurinkoenergian saatavuus talviaikaan on rajallista ja kesäaikaan sitä on saatavilla enemmän kuin tarpeeksi. Tuuli- ja aurinkoenergia ovat riippuvaisia ilmasto-olosuhteista, minkä takia tarvittavan energiamäärän saatavuutta ei voida taata. Talven huipputarpeeseen mitoitettu puuenergiaa käyttävää lämpölaitosta ei ole mielekästä käyttää kesällä koska laitos tuottaa pienimmälläkin tehoasetuksella lämpöä enemmän kuin sitä tarvitaan. Haasteita siis syntyy uusiutuvan energian ympärivuotisesta saatavuudesta suhteessa tarvittavaan tehotarpeeseen.

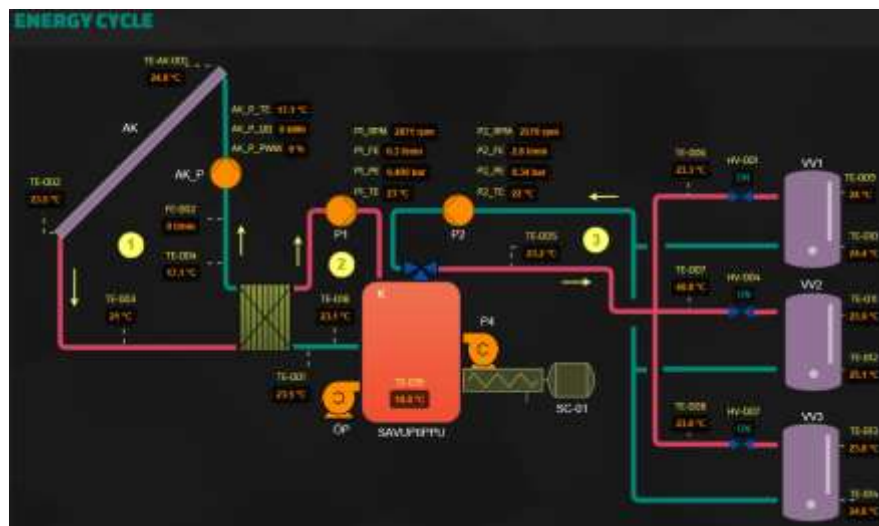
Ratkaisua tähän energian saannin ympärivuotiseen saatavuuteen on etsitty yhdistämällä useita erilaisia energianlähteitä yhdeksi kokonaisuudeksi. Aurinkokeräimet, maalämpö- ja ilmalämpöpumput ovat kasvattaneet suosiotaan tasaavana energianlähteenä.

Pienissä kaukolämpöjärjestelmissä hybridiratkaisut korvaavat tyypillisesti lämpökeskuksissa fossiililla polttoaineilla tuotettua lisälämpöä kuten kuvan 20 mukaisessa ratkaisussa. Hybridilämmöntuotantoratkaisuja on haluttu tehdä siksi, että kaukolämpöverkon vuotuinen käyttötarve on tukenut sitä. Lämpöverkon tehomitoitus on tehty isommalle kuormalle kasvua silmällä pitäen ja kesäisin laitoksen tehoa ei voida säätää riittävän pieneksi, vaan lämpö joudutaan tuottamaan käyttämällä polttoöljyä. Öljyn käyttöä voidaan vähentää hyödyntämällä aurinkolämpöä kesäkuukausina. (Korhonen, 2018)



Kuva 20. Pienen kaukolämpöverkon kaaviokuva (Valor, 2016)

Keskisuurissa kaukolämpöjärjestelmissä, joissa perusenergiakuorman tarve tuotetaan CHP-järjestelmällä, lämpöpumppuja käytetään laitoksen tuotannon optimointiin, mikä lisää kokonaisjärjestelmän kannattavuutta. Lämpöpumpuilla yhdessä sopivilla lämpövarastoilla pystytään minimoimaan kalliiden huippukuormakoneiden käyttöä. Parhaimmillaan lämpöpumppu on kaukolämpöjärjestelmissä, joissa sen avulla liitetään yhteen sähkö-, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät. Näissä lämpöpumppujen rooli on tuottaa lämpöä ja jäähdytystä mahdollisimman kustannustehokkaasti mahdollistaen koko järjestelmän kannattavuuden optimoinnin. (Valor, 2016)



Kuva 21. TOE-hankkeen hybridimoduulin lämpöenergiavirtojen seuranta (TOE, 2017)

TOE-hankkeessa käytetyn hybridimoduulin lähtökohtana on ollut koota yhteen toimiva kokonaisuus useasta energialähteestä, joidenka energiavirtojen seuranta on kuvassa 21. Peruslämmönlähteenä toimii bioenergiakattila, jonka polttoaineena voidaan käyttää haketta, pellettiä tai muuta energiapitoista kiinteätä polttoainetta. Tämän rinnalla toimii aurinkolämpökeräin lisälämmön tuottamiseksi sekä aurinkopaneeli käyttösähköenergian tuottamiseksi. Lämpöenergiaa säilötään kolmeen vesivaraajaan, joista kaksi on faasivaraajia ja yksi tavallinen vesivaraaja. Sähköenergiaa syötetään invertterin kautta hybridimoduulin sisäverkkoon. Kattilaan on liitetty myös öljypoltin katkottoman energiansaannin varmistamiseksi.

## 5 BIOLÄMPÖKATTILAN AUTOMATISOINTI

Nykyaikaisissa puuperäisillä polttoaineilla toimivissa lämmityskattiloissa suurin muutos aiempaan on automaation mukanaan tuomat mahdollisuudet säätää polttoprosessia taloudellisemman ja puhtaamman lämpöenergian tuottamiseksi. Suurissa laitteistoissa automatisointi ja ohjausjärjestelmät ovat jo perusolettamuksia suunnittelussa. Nykyiset ympäristötavoitteet asettavat kasvavia vaatimuksia myös pienempien kokoluokkien laitteistoille. Taloudellisuuden, ekologisuuden ja päästöttömyyden vaatimukset ovat saavutettavissa automaation keinoin. Haasteena on kyetä toteuttamaan tämä kotitalousluokan laitteistoissa riittävällä tasolla ja yksinkertaisin ratkaisuin. Tarkoin valittu mittaustieto ja lämmitysprosessin mallinnus saattaa olla vastaus tähän haasteeseen.

### 5.1 Taloudellisuus

Taloudellisella näkökulmalla automatisoinnissa tavoitellaan pääasiassa kahta asiaa. Ensinnäkin kattilatehon säätöä tarpeen mukaiseksi ja polttoaineen kulutuksen minimointia tarvittavan lämmitystehon aikaansaamiseksi. Hybridilämmitysjärjestelmissä eri energialähteillä on eri kustannuseroin tuotettua lämpöenergiayksikköä kohden. Tarkasteltavassa hybridienergiamoduulissa on käytettävissä kolme eri lämmönlähdettä, joista taloudellisin on aurinkolämpö. Toiseksi edullisin on puupelletit ja kallein vaihtoehto on öljypoltin.

Koska aurinkoenergian saanti on riippuvainen säätilasta ja vuodenajasta, täytyy tarvittaessa käyttää vaihtoehtoista lämpöenergian lähdettä lämmön tuottamiseksi. Puupelletti on edullisempaa kuin polttoöljy kun vertailukohtana käytetään energiasisältöä. Lyhytaikaisen lämpöenergian tarpeen tyydyttämiseksi on kuitenkin edullisempaan käyttää öljypoltinta pellettipolttimen sijaan. Tämä johtuu siitä, että pellettipolttimen käynnistämässä ei heti päästä maksimaaliseen hyötytehoon vaan energiaa pääsee hukkaan.

Pellettipolttimen pitäminen valmiustilassa kuluttaa jatkuvasti polttoainetta ilman että sen energiaa saadaan hyödynnettyä tehokkaasti. Tämän vuoksi pellettipolttimella tuotettu energia on parhaiten hyödynnettävissä, kun on tarvetta jatkuvalla lämpöenergian tuottamiselle, kuten kylmänä vuoden aikana peruslämmön ylläpitämiseen.

Vaikka automatisointi nostaa lämmitysjärjestelmän hankintakustannuksia saavutetaan säästöjä käytön aikana polttoainekustannuksissa, vähäisemmässä huolto- ja ylläpitotarpeessa. Esimerkiksi käyttöä helpottavia automatisoitavia toimia ovat tuhkan poistaminen kattilasta, palokaasukanavien ajoittainen puhdistaminen sekä palopäähän syntyvien kuonapaakujen poistaminen. Lämmitysjärjestelmää hankittaessa voidaan uusi laiteisto sovittaa nykyisen tarpeen mukaiseksi. Tulevaisuuden kasvavan tarpeen arvioiden perusteella hankittu järjestelmä tuottaa osakäytöllä toimissaan haitallisia päästöjä ja kuluttaa suhteessa enemmän polttoainetta ilman ohjaavaa automaatiota.

## 5.2 Ekologisuus

Polttoprosessin ekologisuudella tavoitellaan mahdollisimman pientä haittaa luonnolle ja ympäristölle. Tässä yhteydessä ei oteta kantaa valmistus tai tuotteistusprosessissa syntyvistä ekologisista rasitteista. Käsitellyssä hybridienergiamoduulissa on kolme erillistä lämmön lähdettä, aurinkokeräin, pellettipoltin ja öljypoltin.

Näistä kolmesta energianlähteestä käytön aikana ekologisim on aurinkolämpökeräin, joka ei toimiessaan aiheuta muuta ekologista rasitetta kuin ohjausjärjestelmän ja nesteen kiertopumpun käyttämän sähkön verran. Toiseksi ekologisim lämmönlähde on kiinteän biopolttoaineen poltin, joka hyödyntää uusiutuvaa energiaa lämmön tuottamiseen. Kun polttoainetta hankitaan, voidaan pelkän hinnan sijasta ottaa huomioon polttoaineeseen käytettävä materiaali ja käyttöpaikan etäisyys polttoaineen valmistuspaikasta. Öljypolttimen käytön ekologisuutta voidaan kasvattaa käyttämällä biopohjaista polttoöljyä.

## 5.3 Päästötömyys

Päästöjen suhteen tavoitteena on tuottaa energiaa mahdollisimman pienin päästöin. Aurinkoenergia on käytön aikana päästötöntä energiaa ja tarvitsee ainoastaan vähän sähköenergiaa kerätyn lämmön siirtämiseksi vesivaraajiin. Polttoöljyn käytönaikaisiin päästöihin voidaan vaikuttaa valitsemalla käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuva poltin ja polttoaine sekä huolehtimalla polttimen säännöllisestä huollosta. Suurimmat päästöt syntyvät kiinteän biopolttoaineen käytöstä.

Jaksotusajastimella toimivassa biokattilassa paloprosessi vaihtelee valmiustilan tai peruspolttotilan välillä. Käytännössä tämä tarkoittaa samaa kuin auton ajaminen kiihdyttäen täysillä ja tavoitenopeuteen päästyä siirytään moottorijarrutukseen, kunnes tullaan miniminopeuteen ja aloitetaan jälleen kiihdyttäminen täysillä. Ilman tarkempaa säätöä lämmön tuotanto on pumppaavaa ja puhdas palaminen saavutetaan ainoastaan peruspolton saavutettua polttimelle suunnitellun tehon. Suurimmat päästöt muodostuvat paloprosessin alkuvaiheessa, kun palamislämpötila ei ole vielä saavuttanut riittävää lämpötilaan puhtaan palamisen mahdollistamiseksi.

Automatisointi ja sähkömoottoreiden nopeudensäätö mahdollistavat kiinteän biopolttoaineen paloprosessin sopeuttamisen polttoaineen tuottaman lämpöarvon ja tarvittavan lämpötehon muutoksiin. Kun automatisoinnilla päästään toteuttamaan tilanne, missä palamisen tuottamaa tehoa pystytään säätämään säilyttämällä samalla puhtaan palamisen ominaisuudet, voidaan kiinteätä biopolttoainetta käyttää ympärivuotisessa käytössä.

#### 5.4 Helppohoitoisuus

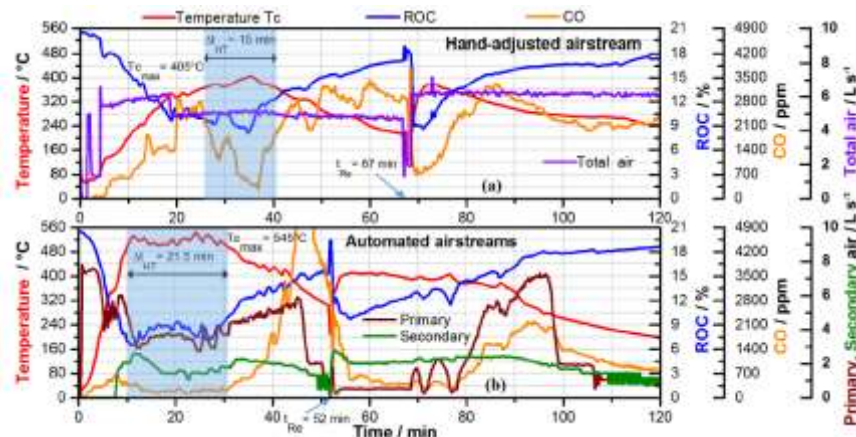
Helppohoitoisuus tavoitellaan käyttäjän kannalta mahdollisimman huoltovapaata energiantuotantoa. Mitä vähemmän käyttäjän täytyy seurata tai ottaa osaa tuotannon toimintaa sitä parempi.

Aurinkolämpö on käyttäjän kannalta ehdottomasti helppohoitoisin. Kun järjestelmä on asennettu ja säädetty toimimaan käyttäjältä ei tarvita mitään huoltotoimia. Öljypoltin mahdollistaa lähes huoltovapaan lämmönsaannin. Ainoat toimenpiteet liittyvät polttoainemäärän seuraamiseen ja tilaamiseen sekä polttimen kausihuollon huolehtimiseen. Öljypolttimen huolto ja korjaaminen tarvitsee lähes aina asiantuntijan palvelua. Kiinteällä biopolttoaineella toimiva lämpökattila vaatii selvästi enemmän manuaalista työtä toimintakunnon varmistamiseksi. Hyvin säädettyinäkin järjestelmä vaatii säännöllisesti polttoainesäiliön täydentämistä, palotilaan muodostuneen tuhkan poistamista sekä lämmönsiirtokanavien nuohousta. Mikäli nämä toimenpiteet suoritetaan säännöllisesti, voidaan manuaalisen lisätyön määrä pitää kohtuullisissa rajoissa.

#### 5.5 Säätöjärjestelmä

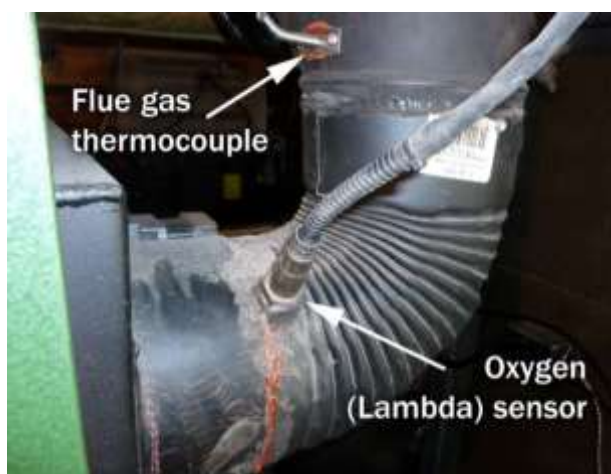
Säätöjärjestelmien avulla voidaan vaikuttaa merkittävästi paloprosessin tehokkuuteen ja erityisesti kiinteän polttoaineen palamisesta syntyviin haitallisiin päästöihin. Kuvassa 22 on mittaustulokset siitä, kuinka suljetussa takassa poltetun puun päästöihin voidaan vaikuttaa lisäämällä jäänöshapen mittauksen perusteella ohjautuva paloilman puhallus. Säädollä

saadaan aikaiseksi merkittävästi pidempi puhtaan palamisen aikajakso, mikä näkyy kuvassa harmaalla pohjalla olevana alueena. (Ojha B., 2017)



Kuva 22. Ylemmässä kaaviossa paloprosessin mittaustulokset silmämääräisellä ilmamäärän säädöllä ja alemmassa vastaavat mittaustulokset jäännöshapen mukaan säätyvällä ilmamäärällä. (Ojha B., 2017, s. 241)

Paloilman säätö voidaan tehdä suoraan seuraamalla jäännöshapen määrää kuvan 23 mukaisesti lambda-anturilla. Kyseisiä antureita käytetään myös nykyaikaisissa autojen polttomooottoreissa haitallisten päästöjen vähentämiseksi. Puhtain palaminen saadaan säätämällä paloilmaa siten että suhteellinen jäännöshapen määrä pysyttelee noin 8 % vaiheilla riippuen käytetyn biopolttimen ominaisuuksista. (Ojha B., 2017, s. 243) Pienemmillä arvoilla paloprosessi ei saa riittävästi ilmaa ja palaminen ei ole täydellistä ja aiheuttaa nokeutumista sekä haitallisia kaasuja. Yli tavoitearvon olevat jäännöshapen määrät kertovat paloprosessia jäädyttävästä paloilmasta syötöstä, mikä heikentää haitallisten palokaasujen palamista. (Lappalainen, 2007, s. 53)



Kuva 23. Happianturi (Lambda) asennettuna savukaasujen poistoputkeen. (Sauvé, 2014)

Jäännöshapen seuraaminen antaa mahdollisuuden säätää kaksivaiheista paloprosessia, jonka optimaaliseen toimintaan vaikuttaa käytetyn polttoaineen materiaali, koostumus ja kosteus. Paloprosessin ensimmäisessä vaiheessa polttoaineen lämpötila nousee yli 250 °C saaden kiinteän polttoaineen kaasuuntumaan. (Puuinfo, 2019) Prosessin toisessa vaiheessa syntyneisiin kaasuihin ohjataan lisähappia, joka mahdollistaa palamatta jääneiden kaasujen palamisen korkeassa lämpötilassa. Näin saavutetaan tavoiteltu puhdas palaminen. Koska biopolttoaineen koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat täytyy paloprosessin ohjausarvoja säätää tarpeen mukaan korkean hyötysuhteen ylläpitämiseksi. (Sauvé, 2014)

Biopolttimien valmistajat tarjoavat oletusarvoiset asetukset kaikille poltintyypeilleen ainakin muutamalle peruspolttoaineelle kuten puupelletti, puuhake ja brikitit. Esimerkiksi Ala-Talkkarin ChipMatic-järjestelmän poltinkohtaiset oletusarvoiset syöttöasetukset kuhunkin teholuokkaan on nähtävissä kuvassa 24. Nämä asetukset antavat lähtökohdan järjestelmän tarkempaan säätämisen.

Polttoaine	Polttolaitteen teho, kW	Lämpöarvo, kW/kg	Kosteus-%	Puhaltimen asetus	Jälkipuhallus (s)	Tehokäynti		Tulen ylläpitokäynti	
						Pulssi (ms)	Tauko (s)	Pulssi (ms)	Tauko (min)
Puuhake	40	2,9	20	4	20	1600	15	1000	6min 40s
Puupelletti	40	4,8	8-10	3	40	500	25	500	12min 30s
Briketti	40	3,5	15	5	40	1000	25	1000	10 min
Puuhake	60	2,9	20	5	20	2000	15	1330	6min 40s
Puupelletti	60	4,8	8-10	4	40	650	25	665	12min 30s
Briketti	60	3,5	15	5	40	1000	20	1000	10 min
Puuhake	80	2,9	20	7,5	20	2100	11	1400	6min 40s
Puupelletti	80	4,8	8-10	6,5	40	850	24	700	12min 30s
Briketti	80	3,5	15	7	40	1100	15	1000	10 min

Kuva 24. Ala-Talkkarin Veto ChipMatic-polttolaitteen oletusarvoiset syöttöasetukset eri polttolaitetehoille ja polttoaineille. (Karhu, 2019)

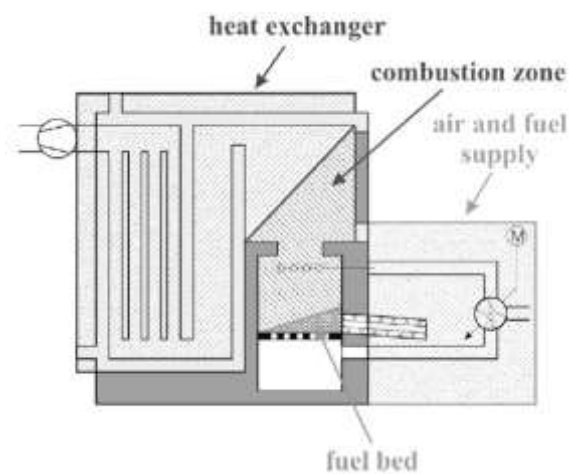
Nykyiset ilmasto- ja päästötavoitteet ovat vauhdittaneet paloprosessin hallintaa kehittävien menetelmien tutkimista ja näihin menetelmiin perustuvien ohjausjärjestelmien toteuttamista. Suomessa VTT ja Oulun yliopiston yhteishankkeet ovat tutkineet erilaisten säätötekniikoiden vaikutusta paloprosessiin. Mittaukset ovat osoittaneet, että yksinkertaisillakin menetelmillä pystytään saamaan hyviä tuloksia. (Lappalainen, 2007, s. 49)

## 5.6 Säätöjärjestelmän mallinnus

Tarkempaan ohjaukseen päästään luomalla paloprosessista ja polttolaitteen ominaisuuksista matemaattinen mallinnus. Mallinnuksen onnistumiseksi täytyy laitteistoon liittää riittävästi antureita mittaamaan käytettyä

polttoaineen määrää, polttoaineen kosteutta, polttoalustan lämpötilaa, palotilan lämpötilaa, paloilman määrää ja lämpötilaa, tuotettua tehoa, jäännöshapen määrää sekä palokaasujen koostumusta. Koska näin laaja mallintaminen vaatii paljon laskentaa, käytetään täydellisiä mallinnuksia ainoastaan suurissa lämmitysjärjestelmissä. (Gölles M., 2014, s. 94)

Jokaisella lämmitysjärjestelmällä on omat toimintaan liittyvät omaisuudet ja niitä kuvaavat mallinnukset ovat yksilöllisiä. Siksi onkin tarpeen löytää soveltuva mallinnus, joka kykenee riittävällä tasolla kuvaamaan palamisprosessia pienissä laitteissa. Markus Gölles kumppaneineen tutkimuksessa otsikolla ”Model based control of a small-scale biomass boiler” esittää kuinka pienen hakekattilan toiminnan mallinnus voidaan yksinkertaistaa jakamalla se neljään mallinnettavaan osaan kuvan 25 mukaisesti. (Gölles M., 2014, s. 96)



Kuva 25. Hakekattilan jako mallinnettaviin osiin (Gölles M., 2014, s. 96)

Arina-alueen mallin kaavat 1-5 määrittelevät riippuvuudet syötetyn polttoaineen määrän, käytetyn paloilman määrän, höyrystyneen veden, polttoaineen kaasuuntumisen ja hiilen palamisen välillä. Mallissa olevat vakiot ( $a_{wev}$ ,  $a_{thd}$ ,  $m_{pa,0}$ ,  $a_d$ ) on saatu kokeellisesti palamiskokeiden tuloksena. Muut termit ovat haihtuvan veden massa  $m_w$ , kuivan polttoaineen massa  $m_{ds}$ , ensiöpaloilman massavirtaus  $\dot{m}_{pa}$ , kumuloituva veden massa  $m_{w,inlet}$ , kumuloituva kuivan polttoaineen massa  $m_{ds,inlet}$ , syöttötauco  $t_d$ . (Gölles M., 2014, s. 96)

$$\frac{dm_w(t)}{dt} = -a_{wev}m_w(t) + \frac{dm_{w,inlet}(t-t_d(t))}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{ds}(t)}{dt} = -a_{thd}m_{ds}(t)[\dot{m}_{pa}(t) + \dot{m}_{pa,0}] + \frac{dm_{ds,inlet}(t-t_d(t))}{dt} \quad (2)$$

$$m_{w,inlet}(t) = \int_0^t \dot{m}_{w,inlet}(\tau)d\tau \quad (3)$$

$$m_{ds,inlet}(t) = \int_0^t \dot{m}_{ds,inlet}(\tau)d\tau \quad (4)$$

$$t_d(t) = a_d \frac{m_w(t)}{\dot{m}_{ds,inlet}(t)} \quad (5)$$

Palotilan ensiö- ja toisioalueen malli määrittelee kaasuuntuneen ja hiiltyneen polttoaineen palamisen sekä syötetyn paloilmän välisen suhteen. Koska mallinnettava hakekattila on kooltaan pieni ja palotilan rakenteista johtuvat häviöt ovat vähäisiä, niillä ei ole merkittävää vaikutusta ohjausmalliin. Siksi palotilan malli voidaan yksinkertaistaa käyttämällä palotilan lämpötilaa  $T_{fg,in}$  lämmönvaihtimen mallissa. (Gölles M., 2014, s. 96)

Lämmön vaihtimen osalta malli sisältää palokaasun lämmön siirtymistä vesivaippaan suhteessa sen tilavuuteen ja lämmön muutokseen. Koska lämmönvaihtimen tulo- ja lähtölämpötilan eron on yleensä alle 20 °C ja palokaasujen lämpötila noin 1000 °C on merkittävästi suurempi, voidaan ohjausmallissa olettaa veden lämpötilan olevan sama lämmönvaihtimessa. Näillä oletuksilla saadaan yksinkertainen kaava (6), missä  $Q$  on veteen johnutunut energia,  $T_{fg,in}$  palokaasun lämpötila lämmönvaihtimen sisääntulossa,  $\dot{m}_{fg}$  palokaasujen massavirta, keskimääräinen veden lämpötila  $T_w$  ja kokeellisesti saadut vakioarvot  $a_{he}$ ,  $q_{he1}$ ,  $q_{he2}$ . Vedelle saadaan kaava (7), missä  $T_{feed}$  on lähtöveden lämpötila,  $\dot{m}_w$  on veden massavirtaus,  $c_w$  on veden lämpökapasiteetti,  $T_{ret}$  on paluuveden lämpötila ja  $a_{\tau,he}$ ,  $S_{d,he}$  ovat kokeellisesti saatuja vakioarvoja. (Gölles M., 2014, s. 96)

$$\dot{Q} = a_{he} [T_{fg,in} - T_w]^{q_{he1}} \dot{m}_{fg}^{q_{he2}} \quad (6)$$

$$\frac{dT_{feed}}{dt} = -\frac{\dot{m}_w}{a_{\tau,he}} T_{feed} + \frac{\dot{m}_w}{a_{\tau,he}} \left[ \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_w c_w} + T_{ret} \left( t - \frac{a_{d,he}}{\dot{m}_w} \right) \right] \quad (7)$$

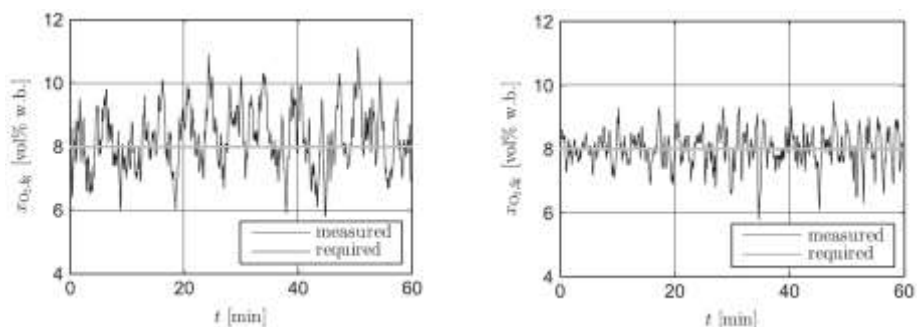
Ilman syöttömalli kuvaa ensiö- ja toisioilman suhdetta toisiinsa, ilmavirtauksen säätimen sekä ilmanpaineen eroa ennen ja jälkeen polttoarinaa. Käytettävä kaava (8) koostuu kolmesta ilmavirtausta säätelevästä tapahtumasta, jotka ovat ilmanavien aiheuttama painehäviö, tiiveysvuodot ja puhaltimen ilmanpaine.  $R_{pipe}$ ,  $R_{orifice}$  ja  $a_{fan}$  ovat kokeellisesti saatuja vakioita,  $\Delta p$  ilmanavien halkaisijan pinta-ala,  $V$  ilmanvirtaus ja  $f_{fan}$  puhaltimen nopeus. (Gölles M., 2014, s. 97)

$$\Delta p = R_{pipe} \dot{V}^{1,75} + R_{orifice} \dot{V}^2 + a_{fan} f_{fan}^2 \quad (8)$$

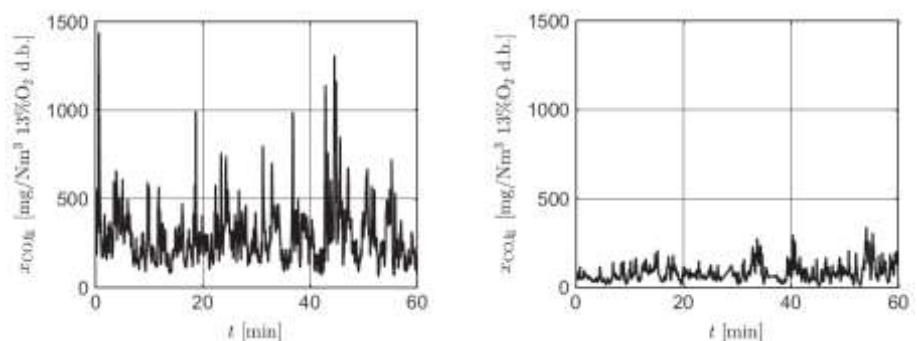
Polttoaineen syöttömalli kuvaa ajastetun polttoaineen syötön ja polttoainemassan välistä suhdetta. Näistä saadaan yhtälöpari (9), missä  $\dot{m}_f$  on polttoaineen massavirtaus,  $t_{on}$  ja  $t_{off}$  polttoaineen syötön ajastukset sekä  $\dot{m}_{f,max}$  polttoaineen massavirtausta jatkuvalla syötöllä. (Gölles M., 2014, s. 97)

$$\dot{m}_f = \begin{cases} \dot{m}_{f,max} \frac{t_{on} - t_{min}}{t_{on} + t_{off}} & \text{for } t_{on} \geq t_{min} \\ 0 & \text{for } t_{on} < t_{min} \end{cases} \quad (9)$$

Tämän mallinnuksen perusteella toteutetun ohjausjärjestelmän kautta on saatu lupaavia tuloksia hallitun palamisprosessin aikaan saamiseksi kotitalouksiin tarkoitetulla hakekattilalla. Kuvissa 26 ja 27 näkyy selvästi, kuinka automaatio lisää laitteiston tehokkuutta vähentämällä tarpeetonta paloilmamäärää sekä ympäristöystävällisyyttä vähentämällä savukaasujen häikäpitoisuutta. (Gölles M., 2014, s. 100)



Kuva 26. Jäännöshapen määrä käyttäen tavallista ohjausta ja mallinnusta hyödyntävällä ohjauksella. (Gölles M., 2014, s. 100)



Hiihimonoksidin (CO) arvot savukaasuissa tavallisen ohjauksella ja mallinnusta hyödyntävällä ohjauksella. (Gölles M., 2014, s. 100)

## 6 LÄMMITYSPROSESSI

Kiinteällä polttoaineella toimivat biokattilat ovat toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertaisia. Polttoaine syötetään polttimeen jaksoittaisesti. Toimintaperiaate on sama riippumatta käytetystä polttoaineesta. Variointia jaksotusajastuksiin tulee eri polttoaineiden tilavuusmassan ja kosteusprosentin kautta. Paloilmaa puhalletaan polttimen palopäähän paloprosessin tehostamiseksi ja riittävän hapen saamiseksi polttoaineen palamiseen.

### 6.1 Laitteisto

Automatisoitava lämmityslaitteisto on Ala-Talkkari Oy:n valmistama ja siihen kuuluu Veto 60 stokerikattila sekä Veto turvehakemaatti 40 kW stokeri eli kiinteän polttoaineen biopolttolaite. Automatisoinnin toteuttamiseksi

stokerikattilaan on lisätty lämpötila-anturit lämmityspiiriin sisään ja ulostuloon. Savukaasuyhteen on lisätty lämpöanturi ja palokaasuanalysaattori. Turvehakemaatin paloilmapuhaltimen manuaalinen säätö on laajennettu nopeussäätimellä ja ilmamassa-anturilla. Syöttöruuvien sähkömoottorin suora käyttö on vaihdettu taajuusmuuttaja ohjaukseen.

Koko järjestelmän automatisointi toteutetaan hyödyntäen Beckhoff automaatiokomponentteja ja TwinCat ohjausjärjestelmää. Anturitiedot antavat ohjauksen tarvitsemat lähtötiedot. Polttoaineen syöttöä hallitaan säätämällä aikajaksotusta sekä polttoaineen syöttömoottorin nopeutta taajuusmuuttajalla. Paloilman määrää hallitaan paloilman puhaltimen nopeutta säätämällä.

## 6.2 Lämmitysprosessin vaiheet

Kiinteän polttoaineen hallittu paloprosessi on periaatteessa hyvin yksinkertainen kuvan 27 mukaisesti. Automatisoitaessa prosessista tulee hieman monimutkaisempi, kun kaikki mahdolliset virhetilanteet pitää ottaa huomioon. Seuraavat alakappaleet kuvaavat kunkin vaiheen toimintaa.



Kuva 27. Kiinteän polttoaineen palamisprosessin vaiheet

### 6.2.1 Alkutoimet

Kuvan 28 mukaisten alkutoimien tarkoituksena on saattaa polttoprosessin aloitusolosuhteet sellaisiksi, että alkulatauksella polttimelle kuljetettu polttoaine voidaan sytyttää. Polttimelle tulee saada juuri sopiva määrä polttoainetta, jotta se riittää sytyttämistä varten.

Edellytyksenä alkutoimien käynnistämiseksi on ohjausjärjestelmän ilmoittamien virhetilojen läpikäynti ja kuittaaminen, kattilaveden lämpötila tulee olla alle asetetun maksimilämmön ja liekkivahti varmistaa, ettei polttimella ole palavaa polttoainetta. Mikäli liekkivahdin mukaan polttimessa on vielä liekki päällä, voidaan siirtyä suoraan alkupolttuun ilman sytytysvaihetta.

Alkutoimet alkavat tarkistamalla käynnistysedellytykset asennetuista antureista ja erillisjärjestelmistä saatavan tilatiedon perusteella. Esimerkiksi,

mikäli alkutoimia aloitettaessa kattilaveden lämpötila on alle asetetun minimilämpötilan eikä mikään virhetila ole päällä, voidaan olettaa, että järjestelmää käynnistetään pidemmän käyttökätkön jälkeen ja polttimessa ei ole enää palavaa tai hiilloksella olevaan polttoainetta. Tällä oletuksella polttimelle syötettävän polttoaineen määränä voidaan käyttää täyttä alkulatausta. Polttoaineen määrä on riippuvainen käytettävän polttimen tehosta ja mallista. Aloitusmäärä tulee selvittää poltinvalmistajan määräyksistä tai tekemällä silmämääräinen polttoaineen lataus käsikäyttöisesti. Käsikäyttöisen polttoainelatauksen syöttöaika kannattaa ottaa talteen ja tallettaa se järjestelmään oletusarvoiseksi alkulatausajaksi.



Kuva 28. Palamisprosessin alkutoimien vaiheet

Mikäli polttoainetta ladataan polttimelle liikaa, voi varsinainen lataus tukahduttaa alkavan paloprosessin, kun palava polttoaine työntyy pois polttimen paloalustalta.

Seuraavaan vaiheeseen siirtymisen edellytykset ovat onnistunut polttoaineen lataus, kattilan veden lämpötila on alle asetetun maksimilämpötilan, kattilan kiertovesipumppu on käynnistynyt sekä ohjausjärjestelmässä ei ole kuittaamattomia toimintavirheitä.

Alkutoimien aikana voi syntyä seuraavaan vaiheeseen siirtymistä estäviä virhetilaa, mikäli polttoaineen syöttömoottoriin tulee käyntihäiriö tai kiertovesipumppu ei käynnisty.

### 6.2.2 Sytyttäminen

Sytyttämisvaiheen tarkoituksena on saada polttoaine syttymään turvallisesti. Vaihe voidaan toistaa muutaman kerran, mikäli sytyttämisaika ei riitä polttoaineen syttymiseen siten että liekkiwahti voisi luotettavasti tunnistaa palon alkaneen.

Edellytyksenä sytyttämisen aloittamiseen on alkutoimien onnistunut läpivienti. Koska kuvan 29 mukainen sytytysvaihe voidaan toistaa muutaman





Kattilaveden noustessa asetettuun maksimilämpöön siirrytään syöttöjaksoson jälkeen automaattisesti valmiustilaan. Kattilan valmistaja ilmoittaa kattilatyyppille optimaalisen vesivaipan lämpötilan suurimman hyötysuhteen saavuttamiseksi.

Virhetiloja voi syntyä polttoaineen syötössä olevan ongelman seurauksena. Ongelman voi aiheuttaa polttoaineen loppuminen, polttoaineen holvaantumisen siten että syöttöruuviin ei tule polttoainetta, syöttömekanismi mekaaninen ongelma tai syöttömoottorin rikkoontuminen. Kaikissa näissä tilanteissa palokaasujen lämpötila putoaa odottamattomasti ja on selvä indikaatio paloprosessin pysäyttämiseksi virhetilanteeseen, missä tarvitaan käyttäjän toimia. Erityisen vaarallinen tilanne syntyy, kun edellisten ongelmien, virheellisten säätöjen tai paloilmian syöttöongelmien seurauksena polttoaine alkaa palamaan polttoaineen syöttöputkessa. Tätä tilannetta kutsutaan takapaloksi. Mikä tilannetta ei huomata riittävien ajoissa, saattaa palo edetä polttoainevarastoon saakka ja aiheuttaa merkittävää tuhoa.

### 6.2.5 Valmiustila

Valmiustilan tarkoituksena on pitää yllä alkuhiillosta, jotta peruspolton käynnistäminen olisi mahdollista ilman uudelleen sytyttämistä. Tilan toiminnot ovat nähtävissä kuvassa 32.

Valmiustilaan siirrytään, kun kattilan vesitilan lämpötila on noussut asetettuun ylälämpötilaan. Valmiustilassa polttoainetta syötetään jaksotetusti vain sen verran että syttymisvaihe voidaan käynnistää palopäässä olevan hiiloksen avulla. Valmiustilaa pidetään yllä syöttämällä aika ajoin polttoainetta palopäähän. Polttoaineen syötön jaksotuksen tauko-aika on moninkertainen verrattuna peruspolttovaiheeseen. Esimerkkejä eri polttoaineiden jaksotuksen ajastuksesta taukotilassa on aiemmin esitettyssä kuvassa 24.



Kuva 32. Palamisprosessin valmiustilan vaiheet

Paluu peruspolttoon tapahtuu, kun kattilaveden lämpötila on laskenut alle kattilavalmistajan suositteleman alalämpötilan eikä valmiustilan aikana ole ilmaantunut syitä virhetiloihin. Virhetilojen syyt voivat olla samat kuin peruspolttotilassa.

Valmiustilan jaksotuksen onnistunut säätäminen on erittäin tärkeä varmistamisen lämmitysprosessin aikaan saamiseksi. Liian lyhyellä jaksotuksella toimiva valmiustila kuluttaa tarpeettomasti polttoainetta ja nostaa riskiä kattilan veden yllämpenemiseen. Liian pitkä jaksotusväli voi aiheuttaa hiiloksen tukahtumisen ja palopään täyttymisen palamattomalla polttoaineella. Tällöin paloprosessi täytyy aloittaa täyden pysäytyksen jälkeen alusta.

### 6.2.6 Sammutus

Sammutuksen tarkoituksena on varmistaa turvallinen paloprosessin pysäyttäminen. Pysäyttäminen tehdään kuvan 33 mukaisesti, joko suunnitellusti tai prosessin aikana tapahtuneen virhetilan seurauksena.

Sammutus on periaatteeltaan hyvin yksinkertainen. Polttoaineen syöttö ja paloilman puhaltaminen lopetetaan, jolloin palo pysähtyy itsestään. Polttoainesäilöitä ei kuitenkaan saa avata ennen palopään jäähtymistä takapaloriskin vuoksi. Lisätoimena ja sammumisen varmistamiseksi voidaan tehdä polttoaineen takaisin veto ja siten luoda yhtenäiseen polttoainemasaan palamista estävä katkos. Tätä toimenpidettä ei kuitenkaan saa tehdä ilman että sitä edeltää normaali polttoaineen syöttösykli, sillä hiiloksen vetäminen syöttöputkeen käynnistää takapalon.



Kuva 33. Palamisprosessin pysäyttämisen vaiheet

### 6.2.7 Säätopoltto

Säätopoltto on automaation mahdollistama toiminto, jossa tavoitteena on säätää paloprosessin tehoa tarpeen mukaiseksi. Sen sijaan että poltinta ajetaan 100 % teholla säädetään polttoaineen syötön taukojaksoa ja paloilman puhallinta siten että poltin saadaan toimimaan osateholla. Kuvan 34 mukaiseen säätopolttoon voidaan siirtyä ainoastaan peruspolttovaiheen kautta.

Toiminnaltaan säätopoltto on vastaava kuin peruspoltto. Erona on, että käytetään etukäteen määriteltäviä polttoaineen syöttöjaksotusta ja paloil-

man määrää, joiden arvoja säädetään jatkuvasti prosessin aikana. Tavoitteena on säilyttää tasapainotilan käytetyn lämpöenergian ja tuotettavan energian välillä. Osoituksena onnistuneesta säädöstä kattilaveden lämpötila säilyy lähellä asetettua tavoitelämpötilaa ja palaminen tapahtuu täydellisesti sekä puhtaasti.



Kuva 34. Palamisprosessin säätöpolton vaiheet

Puhtaan palon aikaan saamiseksi automatisoidut järjestelmät tarkkailevan palokaasujen määrää hyödyntämällä lambda-anturin kykyä tunnistaa jäännöshapen määrää. Mikäli ilmaa ei ole riittävästi, jää osa palokaasuista palamatta ja ilmaan pääsee haitallisia yhdisteitä sekä laitteiston lämmönsiirtopinnat nokeutuvat huonontaan hyötysuhdetta. Toisaalta mikäli paloilmasta tulee liikaa, tuotettu lämpö poistuu palokaasujen kanssa.

### 6.3 Turvallisuus

Kiinteätä polttoainetta käytettäessä tulee kiinnittää erityistä huomiota paloturvallisuuteen. Kuten edellä on esitetty suurin osa virhe tai vaaratilanteista on seurausta viallisesta tai väärin säädetyistä laitteistosta. Ennen sytytysvaihetta palotilan tuuletuksen jääminen pois aiheuttaa tulipesässä palokaasujen räjähdysriskin. Polttoaineen syöttölaitteiston väärät asetukset tai vikaantuminen saattaa johtaa palamisen siirtymisen syöttöputkeen ja pahimmassa tapauksessa palamisen laajenemiseen polttoainevarastoon. Paloilmapuhaltimen vikaantuessa palokaasut voivat kulkeutua kattilahuoneeseen ja aiheuttaa häikämyrkytysvaaran. Valmiustilassa liian suuri polttoaineen syöttömäärä hiilloksen ylläpitämiseksi voi nostaa kattilan veden lämpötilan yli sallitun lämpötilan.

## 7 YHTEENVETO

Hybridiennergiamuodot ovat tulleet entistä merkityksellisimmiksi vaihtoehtoisiksi nykyisten kansainvälisten ja kansallisten ilmastostrategioiden asettaessa vaatimuksia uusiutuvien sekä kestävä kehityksen mahdollistavien energiamuotojen hyödyntämiseksi. Suomessa näiden tavoitteiden mukaisia energiamuotoja ovat aurinkoenergia, bioenergia, tuulivoima,

vesivoima ja lämpöpumput eri muodoissaan. Kaikki nämä ovat uusiutuvia energiamuotoja ja tämän lisäksi Suomessa ne katsotaan lähienergiaksi. Näiden hyödyntäminen mahdollistaa energiantuotannosta syntyvän hiilijalanjäljen merkittävää pienentämistä.

Energiantuotannon hiilijalanjäljen pienentämisen lisäksi Suomen ilmastostrategian tavoitteena on kotimaisten uusiutuvien energiamuotojen jatkuva lisääntyvä käyttö. Puun hyödyntäminen on yhtenä painopistealueena. Tilastokeskuksen energiatilastoinnin mukaan 2000-luvun alkupuolella puun hyödyntäminen ovat pysyneet lähes ennallaan, joten ainakaan toistaiseksi ilmastostrategia ei ole saanut aikaan suuria muutoksia tämän suhteen.

Energian kulutuksessa asukasta kohti olemme Euroopan kärkimaita. Tämä selittyy muun muassa pohjoisesta sijaintimme kylmästä ilmanalasta, pitkistä etäisyyksistä, korkeasta elintasosta sekä paljon energiaa kuluttavasta teollisuudesta. EU:n jäsenenä Suomi on sitoutunut vähentämään energiapäästöjä ja suosimaan uusiutuvan energian hyödyntämistä. Energiapolitiikka ja ilmastopolitiikka ovat hyvin läheisesti kiinni toisissaan. Suomen ilmastostrategiassa tavoitellaan vuoteen 2030 mennessä energian kulutuksessa 38 % osuutta uusiutuville energianlähteille. Nämä poliittiset tavoitteet ovat hyvässä vauhdissa, sillä vuonna 2018 uusiutuvan energian osuus oli jo 37 % kokonaistuotannosta.

Lähienergian määrän lisääminen on erittäin tärkeitä Suomelle kansantaloudellisesti. Vuosittain käytetystä energiasta vain 41 % tuotetaan kotimaisilla energianlähteillä. Lähienergian lisääntyvä hyödyntäminen kasvattaa Suomen energiaomavarisuutta ja vähentää fossiilisten tuontienergiamuotojen käyttöä. Uusiutuvan energian käyttäminen ympärivuotisessa käytössä tukeutuen vain yhteen energiamuotoon on osoittautunut haasteelliseksi vaihtoehdoksi erityisesti pienten lämmöntuotantoyksiköiden energianlähteenä. Pienissä kaukolämpöjärjestelmissä hybridienergiaratkaisut korvaavat fossiilisilla polttoaineilla tuotettua lämpöä.

Puuaineksen käyttämistä rakennusten lämmittämiseksi on menneinä vuosina pyritty vähentämään terveydellisiin syihin vedoten. 1960-luvulla kaupunkialueilla vähennettiin merkittävästi puulämmitystä ja siirryttiin käyttämään öljylämmitystä sekä kaukolämpöä. Tämän johdosta kaupunkien ilmanlaatu on parantunut. Nyt puun käyttö lämmityksessä on jälleen kasvanut, kuten kansallisessa ilmastosuunnitelmassa on tavoiteltu. Tämä on tuonut mukanaan 1960-luvulla olleita ongelmia ilman laadun suhteen, koska puun puhdaspoltto ei ole yksinkertaista. Puutteellisesti toteutetut puulämmitysratkaisut sekä käyttäjien heikko ymmärrys siitä, kuinka puuta voidaan polttaa puhtaasti, vaativat jatkuvaa tiedon päivittämistä tietoisuuden lisäämiseksi.

Vaikka puun polttaminen on energiamuotona tavoiteltu, sillä on merkittäviä ihmisen terveyteen ja ilmastoon kohdistuvia vaikutuksia. Pienpolton

seurauksena ulkoilmaan muodostuvat pienhiukkaset ovat ihmiselle terveysriski. Helsingissä tehtyjen ilmakehämittausten mukaan talviaikaan lähes 40 % ilmassa olevista pienhiukkasista on peräisin puun pienpoltosta. Puun polttamisen seurauksena syntyvästä lentotuhkasta on suurin osa alle 2,5 µm kokoisia pienhiukkasia ja näistäkin valtaosa on alle 1,0 µm kokoisia kertymähiukkasia. Tämä kokoluokan hiukkasten erottelu palokaasuista onnistuu parhaiten kuitu- tai sähkösuodattimilla.

Tapa miten puuta käytetään nykytavoin polttoaineena, aiheuttaa Terveysten ja hyvinvoinnin laitoksen mukaan Suomessa huomattavia määriä haitallisia päästöjä, joista ehkä merkittävin on yli 80 % osuus kaikista soluille myrkyllisten ja syöpävaarallisten PAH-yhdisteiden päästöistä. Yksi yhteinen syy näihin päästöihin puulämmitysratkaisuissa on vajavainen tai virheellinen palamisprosessin hallinta.

Kiinteän polttoaineen hallittu paloprosessi on periaatteessa hyvin yksinkertainen ja puhtaan palotapahtuman aikaansaaminen yksinkertaisilla mittaus ja ohjausjärjestelmillä on mahdollista. Täydellistä automatisointia tavoiteltaessa prosessista tulee hieman monimutkaisempi, kun kaikki mahdollisen virhetilanteet tulee ottaa huomioon.

Polttoprosessin optimointia voidaan tarkastella useammasta eri näkökulmasta. Optimointia voidaan lähestyä taloudellisen, ekologisen, päästöttömän tai ylläpidettävyyden näkökulmasta. Näitä neljää näkökulmaa voi olla vaikea saada sopimaan samaan optimointiin tasapainoisesti, joten näkökulmien välillä joudutaan tasapainoilemaan ja ristiriitatilanteissa valitsemaan sen mukaan mitä eniten painotetaan. Joka tapauksessa parhaimpaan lopputulemaan päästään mallintamalla järjestelmän toiminta riittävän tarkasti ja toteuttamalla mallinnuksen mukainen optimointi osaksi laitteiston ohjausjärjestelmää.

Esitetyn ohjausjärjestelmän käytännön toiminnallisuus ja mallinnukseen perustuvan optimoinnin toteuttaminen jäävät tulevaisuuden jatkokehityskohteiksi.

## LÄHDELUETTELO

- Ahola, J. (2014). *Aurinkoenergian suora hyödyntäminen Suomessa*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta SlideShare: <https://www.slideshare.net/lahienergialiitto/esitys-kuopio-392014>
- Avannainen. (2010). *Biopolttoaineet*. Haettu 8.3.2019 osoitteesta Wikipedia: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Biopolttoaine>
- Bioenergianeuvoja. (2019). *Biopolttoaineet*. Haettu 6.3.2019 osoitteesta Bioenergian pikkujättiläinen: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/>
- Boreal. (2012). *Using monosaccharide anhydrides to estimate the impact of wood combustion on fine particles in the helsinki metropolitan area*. Haettu 15.3.2019 osoitteesta Boreal Environment Publishing Board: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/229866/ber17-3-4-163.pdf>
- Directorate General for Energy. (2018). *EU energy in figures*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Publications office of the European Union: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/99fc30eb-c06d-11e8-9893-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-79929745>
- ELY-keskus, K.-S. (2019). *TOE-hanketuloskortti*. Noudettu osoitteesta Hanketuloskortit: <http://www.hanketuloskortti.fi/hanketuloskortti/tarkalla-ohjauksella-energiatehokkuutta-toe/>
- Energiamailma. (2014). *Takuulla kotimaista energiaa saadaan turpeesta*. Haettu 10.3.2019 osoitteesta Energiamailma: <https://energiamailma.fi/mista-virtaa/turve/>
- Honsberg C., Bowden S. (2017). *Solar Cell Parameters*. Noudettu osoitteesta PV Education.org: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-parameters>
- Hytönen .K, Jokiniemie J. (2006). *Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion*. Haettu 17.3.2019 osoitteesta Kuopion Yliopisto, Ympäristötieteellinen laitos: <https://www.uef.fi/documents/592626/595218/pava+final+report.pdf>
- Karhu, T. (2019). Ala-Talkkari säätötaulukko. *Henkilökohtainen sähköpostiviestintä*.
- Karonen, I. (2017). *Lämpöpumppu*. Noudettu osoitteesta commons.wikimedia.org: [https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ilmari\\_Karonen/Gallery#/media/File:Heatpump.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Ilmari_Karonen/Gallery#/media/File:Heatpump.svg)

- Kinnunen, M. (2017). *Kansallinen energia- ja ilmastostrategia 2030*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-190-6>
- Korhonen, A.-K. (2018). *Hybridiratkaisujen lisäarvo energiaratkaisuja toimittavan yrityksen asiakkaille*. Haettu 19.3.2019 osoitteesta Tampereen Teknillinen Yliopisto: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/26565/Korhonen.pdf>
- Lappalainen. (2007). *Puupolttoaiden pienkäyttö*. Haettu 16.3.2019 osoitteesta Tekes: <https://docplayer.fi/1358835-Puupolttoaineiden-pienkaytto.html>
- Lassi U., Wikman B. (2011). *Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi*. Haettu 11.3.2019 osoitteesta Jyväskylän Yliopisto: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-4313-4>
- Motiva. (2016a). *Tasokeräimet*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva Oy: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset\\_keraimet/tasokeraimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tasokeraimet)
- Motiva. (2016b). *Tyhjiöputkikeräimet*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva Oy: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset\\_keraimet/tyhjioputkikeraimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/nestekiertoiset_keraimet/tyhjioputkikeraimet)
- Motiva. (2016c). *Pienvesivoima*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva Oy: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/vesivoima/pienvesivoima](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima/pienvesivoima)
- Motiva. (2017a). *Auringosta sähköä*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva.fi: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringosta\\_sahkoa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa)
- Motiva. (2017b). *Vesivoima*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva Oy: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/vesivoima](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima)
- Motiva. (2019). *Uusiutuva energia Suomessa*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Motiva Oy: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/uusiutuva\\_energia\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa)
- Puuinfo. (2019). *Paloteknisiä ominaisuuksia*. Noudettu osoitteesta Puuinfo: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/paloteknisiä-ominaisuuksia>
- PVEducation. (2017). *Module circuit desing*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta PVEducation.org: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>

- Rouhiainen V. (2018). *Suomen virallinen tilasto (SVT) Asumisen energiankulutus*. Haettu 5.6.2019 osoitteesta Tilastokeskus:  
[http://tilastokeskus.fi/til/asen/2017/asen\\_2017\\_2018-11-22\\_fi.pdf](http://tilastokeskus.fi/til/asen/2017/asen_2017_2018-11-22_fi.pdf)
- Sauvé, T. (2014). *Small Biomass Boiler Technology*. Haettu 14.4.2019 osoitteesta Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario:  
<http://www.omafr.gov.on.ca/english/engineer/facts/14-009.htm>
- Sulpu. (2019a). *Lämpöpumpputilasto*. Noudettu osoitteesta Suomenlämpöpumppuyhdistys ry: <https://www.sulpu.fi/tilastot>
- Sulpu. (2019b). *Lämpöpumput*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Suomen lämpöpumppuyhdistys: <https://www.sulpu.fi/lampopumput>
- Suntekno Oy. (2019). *Aurinkoenergia*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Suntekno Oy:  
<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/aurinkoenergia.pdf>
- Suomen Tuulivoimayhdistys. (2018). *Tuulivoimahankkeet Suomessa*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Suomen Tuulivoimayhdistys:  
<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/hankelista>
- Tanninen, A. (2009). *Aurinkopaneelien testausjärjestelmä*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Savonia ammattikorkeakoulu:  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4741/Tanninen\\_Ari.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4741/Tanninen_Ari.pdf)
- Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. (2010). *Domestic wood combustion and road traffic*. Haettu 18.2.2019 osoitteesta Terveyden ja hyvinvoinnin laitos:  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201205085050>
- Terveyden ja Hyvinvoinnin laitos. (2017). *Puunpoltto*. Haettu 18.2.2019 osoitteesta Terveyden ja Hyvinvoinnin laitos:  
<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/puunpoltto>
- Tiihala, A. (2009). *Pienvesivoimalaitokset*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Lappeenrannan Tekninen Yliopisto: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/44879/nbnfi-fe200904271383.pdf>
- Tilastokeskus. (2019a). *Energian hankinta ja kulutus*. Noudettu osoitteesta Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]:  
[https://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2018/04/ehk\\_2018\\_04\\_2019-03-28\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2018/04/ehk_2018_04_2019-03-28_tie_001_fi.html)
- Tilastokeskus. (2019b). *Energian kokonaiskulutus energialähteittäin*. Noudettu osoitteesta Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat:  
[http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ene\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_002.px](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehk/statfin_ehk_pxt_002.px)

- TOE. (2017). *Energy Cycle in TOE Module*. Haettu 20.4.2019 osoitteesta Hämeen Ammattikorkeakoulu IOT: <https://iot.research.hamk.fi/toehanke/>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2016). *100-prosenttisesti uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiajärjestelmä*. Haettu 8.6.2019 osoitteesta Työ- ja elinkeinoministeriö: <https://tem.fi/documents/1410877/3570111/100+prosenttia+uusiutuvaa+tarkastelu.pdf/8e4ee341-77c5-4447-b6ce-1f2686a3daec/100+prosenttia+uusiutuvaa+tarkastelu.pdf.pdf>
- Valor. (2016). *Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä*. Haettu 19.3.2019 osoitteesta Energiateollisuus: [https://energia.fi/files/993/Suuret\\_lampopumput\\_kaukolampojarjestelmassa\\_Loppuraportti\\_290816\\_paivitetty.pdf](https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf)
- Ympäristöministeriö. (2012). *Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta*. Haettu 16.3.2019 osoitteesta Ympäristöministeriö: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B200B1E69-09BB-4654-8DBC-F67274431193%7D/30742>
- Ympäristöministeriö. (2017). *Ilmastosuunnitelma 2030*. Haettu 13.2.2019 osoitteesta Ympäristöministeriö: <http://www.ym.fi/Ilmastosuunnitelma2030>