

Tiedonkeruu ja -analysointi mikro-CHP-koelaitteistossa

Jukka Koponen



Pro gradu -tutkielma

Jyväskylän yliopisto
Fysiikan laitos
28. syyskuuta 2010

Alkusanat

Tämä opinnäytetyö kaikkine käytännön, teoria- ja kirjoitustöineen toteutettiin lokakuun 2009 ja lokakuun 2010 välisenä aikana. Haluan kiittää työni edesauttamisesta niitä Jyväskylän yliopiston Uusiutuvan energian tutkimus- ja koulutusohjelman työntekijöitä, jotka työskentelivät mikro-CHP-projektin parissa tuona aikana. Opinnäytetyöni ohjaajalle ja tarkastajalle professori Jukka Konttiselle kuuluu suuri kiitos mahdollisuudesta tehdä tämä mielenkiintoinen ja monipuolinen opinnäytetyö. Lisäksi haluan kiittää professori Jouko Korppi-Tommolaa sekä professori Markus Ahlskogia toimimisesta opinnäytetyöni tarkastajina. Kaikkein syvimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin perheelleni, erityisesti rakkaalle Johannalle, tuesta ja ymmärryksestä opintielläni.

Jyväskylässä 28. syyskuuta 2010

Jukka Koponen

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö käsittelee Jyväskylän yliopiston uusiutuvan energian tutkimus- ja koulutusohjelman mikro-CHP-koelaitteistoa. Kyseinen mikro-CHP-laitteisto liittyy yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon tutkimukseen pienessä mikrokokoluokassa.

Opinnäytetyöhön kuului kattava tutustuminen koko tutkimuslaitteistoon sekä osallistuminen laitteiston viimeistelyyn ja toimintakuntoon laittoon. Varsinainen tehtävänanto opinnäytetyölle oli tiedonkäsittelyjärjestelmän eli mittaustiedonkeruun ja -analysoinnin suunnittelu, toteutus ja testaus kyseiselle tutkimuslaitteistolle.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi mikro-CHP:hen liittyviä käsitteitä, selvitetään tällä hetkellä mikro-CHP-laitteistoissa käytettävää tekniikkaa sekä tehdään varsin perusteellinen katsaus Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteistoon ja sen ominaispiirteisiin. Näiden esittelyjen jälkeen selvitetään opinnäytetyön ydinaiheen eli tiedonkäsittelyjärjestelmän suunnittelua ja toteutusta sekä itse järjestelmää lopullisessa muodossaan.

Tiedonkäsittelyjärjestelmän käytännöntoteutuksessa ei suunniteltu eikä rakennettu tutkimuslaitteistoon uusia elektroniikkakomponentteja. Mittaustiedonkeruu toteutettiin Mitsubishin E1071-operointipäätteellä ja siinä olevilla tiedonkeruutoiminnallisuuksilla sekä National Instrumentsin PC-tietokonepohjaisella LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä. Mittaustiedonanalysointi toteutettiin kokonaisuudessaan edellä mainitulla LabVIEW-ympäristöllä.

Toteutettu tiedonkäsittelyjärjestelmä testattiin laitteiston kokonaisvaltaisessa koejossa, jolloin tiedonkeruun ja -analysoinnin todettiin toimivan suunnitelmien mukaisesti sekä ilman ongelmia. Jo ensimmäisissä koeajoissa, joissa tässä opinnäytetyössä toteutettu tiedonkäsittelyjärjestelmä oli käytössä, voitiin ilman epäilyksiä havaita kattavan ja toimivan tiedonkäsittelyjärjestelmän tärkeys tutkimuslaitteistolle.

Sisältö

1	Johdanto	1
1.1	Mikro-CHP käsitteenä	1
1.2	Miksi mikro-CHP?	2
1.2.1	Hyödyt	2
1.2.2	Haitat	4
1.3	JY:n mikro-CHP-laitteiston projektikatsaus	5
2	Mikro-CHP-tekniikat	7
2.1	Yleistä	7
2.2	Avoin prosessi	7
2.2.1	Polttomoottori	7
2.2.2	Mikroturbiini	11
2.3	Suljettu prosessi	13
2.3.1	Stirling-moottori	13
2.4	Sähkökemiallinen prosessi	17
2.4.1	Polttokenno	17
2.5	Oheistekniikka	19
3	JY:n mikro-CHP-laitteisto	21
3.1	Yleistä	21
3.2	Rakenne ja komponentit	22
3.2.1	Laboratoriotila	22
3.2.2	Tulipesä	22
3.2.3	Poltin	23
3.2.4	Pellettisiilo ja -kuljetin	26
3.2.5	Palamisilmansyöttö	26
3.2.6	Stirling-moottori	27
3.2.7	Palamisilman esilämmitin	30
3.2.8	Savukaasun jäähtytys ja lämmön talteenotto	30
3.2.9	Savukaasun kierrätys ja poisto	31
3.2.10	Laitteiston jäähtytys	31
3.2.11	Anturit, mittarit ja analysaattorit	33
3.2.12	Ohjaus- ja säätökomponentit	37
3.3	Ohjaus	39
3.4	Koeajot	42
3.5	Haasteet ja ongelmat	45
3.5.1	Valitun tekniikan haasteet	45
3.5.2	Käytännön koeajoissa tehdyt havainnot	47

4	Tiedonkäsittelyjärjestelmä	48
4.1	Yleistä	48
4.2	Esisuunnittelu	48
4.3	Tiedonkeruu	49
4.3.1	Vaatimukset	49
4.3.2	Tiedon talteenotto	50
4.3.3	Tiedon pysyvä tallennus	52
4.3.4	Käytännön toteutus	53
4.4	Tiedonanalysointi	60
4.4.1	Vaatimukset	60
4.4.2	Teoriataustaa	61
4.4.3	Käytännön toteutus	64
4.5	Tiedonkeruun ja -analysoinnin testaus	69
4.5.1	Koeajoasetelma	69
4.5.2	Tiedonkeruun todennus	70
4.5.3	Tiedonanalysoinnin testaus	71
5	Yhteenveto	86
	Viitteet	91
	Liitteet	92
A	JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaavio (lähde [1] pienin muutoksin)	92
B	Tiedonkäsittelyjärjestelmän ja siihen liittyvän prosessin esisuunnitelma UML-kielen mukaisena aktiviteettikaaviona	93
C	Mittaustiedonlatauksen ja -tallennuksen välilehti LabVIEW:n mitaustiedonkeruussa	94
D	KAASU_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mitaustiedonanalysoinnissa	95
E	PAINE_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mitaustiedonanalysoinnissa	96

F	VESI_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa	97
G	VIRTA_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa	98
H	HIUKKAS-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa	99
I	Taselaskennan välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa	100
J	Pellettipolttoaineesta muodostuneen savukaasun ominaislämpökapasiteetti	101

Kuvat

1.1	Kaaviokuva mikro-CHP-laitteistoihin liittyvistä energiavirroista.	3
2.1	Kaaviokuva alfatyypin V-stirlingmoottorista ja sen pääosista.	14
3.1	Valokuva JY:n UE-ohjelman mikro-CHP-tutkimukseen liittyvästä laboratoriotilasta.	23
3.2	Valokuva JY:n mikro-CHP-laitteiston tulipesästä.	24
3.3	Kaaviokuva JY:n mikro-CHP-laitteiston tulipesän alaosasta poltin asennettuna.	25
3.4	Kaaviokuva JY:n mikro-CHP-laitteiston sekundääri- ja tertiääri-ilmojen sekä kiertosavukaasun syöttöputkistosta.	27
3.5	Valokuva JY:n mikro-CHP-laitteistossa sähköntuotannosta vastaavasta Solo V161 -stirlingmoottorista.	28
3.6	Kaaviokuva JY:n mikro-CHP-laitteiston jäähdytysputkistosta.	32
3.7	Osa JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaaviota tulipesän kohdalta.	34
3.8	Osa JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaaviota ekonomaisereiden kohdalta.	35
3.9	Valokuva JY:n mikro-CHP-laitteistossa ohjaukseen ja säätöön käytettävistä automaatiokomponenteista.	38
3.10	Simulaatiolaskelmia JY:n mikro-CHP-laitteiston tulipesälle erilaisilla palamisilmansyötöillä, kun teho on 60 kW _h	44
4.1	Esimerkki Mitsubishin E1071-operointipäätteen muodostamasta mittaustietoa sisältävästä tiedostosta taulukkolaskentaohjelmaan avattuna.	52
4.2	Mitsubishin E1071-operointipäätteen oheislaiteasetuksia JY:n mikro-CHP-laitteistokokoonpanolle.	54
4.3	Mitsubishin E1071-operointipäätteeseen määritetyt lokitiedot sekä esimerkki tiedostoihin liittyvistä asetuksista JY:n mikro-CHP-laitteistokokoonpanossa.	56
4.4	Mitsubishin E1071-operointipäätteen tiedonkeruuseen liittyvä käyttöliittymäikkuna JY:n mikro-CHP-laitteistossa.	59
4.5	Iteratiivinen prosessi, jolla kaksoisneliön menetelmä etsii lineaarisovituksen parametrit LabVIEW-aliohjelmassa.	63
4.6	Esimerkki LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä tehdystä ohjelmakoodista.	69
4.7	TI 90 -lämpötila-anturi ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	72

4.8	TI 01 -, TI 64 - ja TI 20 -lämpötila-anturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa. . .	73
4.9	TI 50 -, TI 52 - ja TI 90 -lämpötila-anturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa. . .	74
4.10	TI 60 -, TI 62 -, TI 63 - ja TI 65 -lämpötila-anturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	75
4.11	PI 01 - ja PI 60 -paineanturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	76
4.12	PDT 60 -, PDT 21 - ja PDT 61 -paineanturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa. . .	77
4.13	TI 02 -, TI 04 - ja TI 05 -lämpötila-anturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa. . .	78
4.14	TI 09 -, TI 10 - ja TI 07 -lämpötila-anturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa. . .	79
4.15	FI 11 - ja FI 22 -virtausanturit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	80
4.16	FI 02 -, FI 03 - ja FI 09 -virtausmittarit suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	81
4.17	Polttoaineteho suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	82
4.18	AT 62 -hiukkanalysointilaite suhteellisen ajan suhteen piirrettynä JY:n mikro-CHP-laitteiston koeajossa.	83

Taulukot

2.1	Mikro- ja pien-CHP-tuotantoon soveltuvien tekniikoiden ominaisuuksia.	8
2.2	Kaasu- ja dieselmoottoareiden tyypillisiä ominaisuuksia, kun sähköteho on $< 200 \text{ kW}_e$	10
2.3	Mikroturbiinien tyypillisiä ominaisuuksia.	12
2.4	Stirling-moottoareiden tyypillisiä ominaisuuksia.	16
2.5	Yleisimpien polttokennomallien tyypillisiä ominaisuuksia. .	18
4.1	Tiedunkeruujärjestelmän lokitiedostojen mittalaitteet JY:n mikro-CHP-laitteistossa.	55
4.2	Tiedunkeruujärjestelmän historiatrendien mittalaitteet JY:n mikro-CHP-laitteistossa.	58

1 Johdanto

1.1 Mikro-CHP käsitteenä

Termillä CHP (engl. Combined Heat and Power) tarkoitetaan yhdistettyä lämmön ja sähköntuotantoa. Esimerkkejä suuren mittakaavan CHP-voimaloista ovat yhteiskunnan perusenergiatarpeita tyydyttävät satojen megawattien voimalaitokset, jotka tuottavat samanaikaisesti kaukolämpöä, teollisuushöyryä sekä sähköä [2]. Huomattavasti pienemmässä usein alle 100 kW_e :n (kW_e = kilowattia sähköä, kW_h = kilowattia lämpöä) mikrokokoluokassa puhutaan taas mikro-CHP-laitteistoista.

Tarkka määritelmä mikro-CHP:n tehorajalle vaihtelee määrittelijästä riippuen. Pienimuotoinen CHP yhdistetään usein noin $1 - 2 \text{ MW}_e$:een sekä sitä pienempiin voimaloihin ja mikro-CHP on useimmiten maksimiteholtaan $50 - 100 \text{ kW}_e$:n suuruusluokkaa [3, 4, 5]. Mikro-CHP-laitteistot ovat tarkoitettuja esimerkiksi maatilojen, toimistorakennusten, hotellien tai pienimmillään jopa yksittäisten kotitalouksien energiaratkaisuiksi. Pienen energiantuotantokapasiteetin ja hajalleen levittäytyneen kulutuspiisteitä lähellä olevan tuotannon vuoksi mikro-CHP:n tuotanto kuuluu hajautetun energiantuotannon¹ mittakaavaan.

Vertaamalla mikro-CHP-laitteistoja suuren kokoluokan teollisiin CHP-voimaloihin voidaan todeta muitakin kuin vain tehoon liittyviä eroavaisuuksia. Yksi toiminnan periaatteellinen ero on, että usein suurissa voimaloissa päätavoitteena on sähköntuotanto, jolloin lämpö on ylimääräisenä hyötynä saatava sivutuote. Mikro-CHP-voimaloissa taas päätavoitteena on useimmiten lämmöntuotto eli kiinteistöjen ja syöttöveden lämmitys, jolloin sähköä saadaan tuotettua siinä sivussa. Toimintaan liittyvistä periaatteellisista eroista puhuttaessa tulee myös huomata, että suuret CHP-voimalat ovat tarkoitettuja yhteiskunnan perusenergiatarpeen tyydyttämiseen suurella jatkuvalla teholla, kun taas mikro-CHP-voimaloiden sähkökuorma voi vaihdella vaikkapa yksittäisen pientalouden kohdalla muutamista sadoista wateista kymmeneen kilowatteihin. [7]

Eroavaisuuksia CHP:n ja mikro-CHP:n välillä on lisäksi käytetyissä polttoaineissa. Suuria teollisia voimaloita käytetään laajalla valikoimalla polttoaineita, muuan muassa kivihieillä, öljyllä, turpeella tai hakkuutäh-

¹Suomessa hajautetuksi energiantuotannoksi on katsottu nimellisteholtaan alle 10 MW :n uusiutuviin energialähteisiin tai pienimuotoiseen CHP-tuotantoon perustuvat laitokset. WADE (World Alliance for Decentralized Energy) määrittää hajautetuksi energiantuotannoksi kaiken loppukäyttökohteen läheisyydessä sijaitsevan tuotannon - kokoluokasta, tyypistä tai polttoaineesta riippumatta. [6]

teillä [2]. Näiden lisäksi suuri CHP-voimala voi olla esimerkiksi ydinvoimaan perustuva. Mikro-CHP-laitteistoja on toki myös useanlaiseen tekniikkaan perustuvia, mutta etenkin Euroopassa niitä käytetään - kehitystyön rajoittuneisuuden ja käyttöympäristön vuoksi - pääasiassa maakaasulla [3].

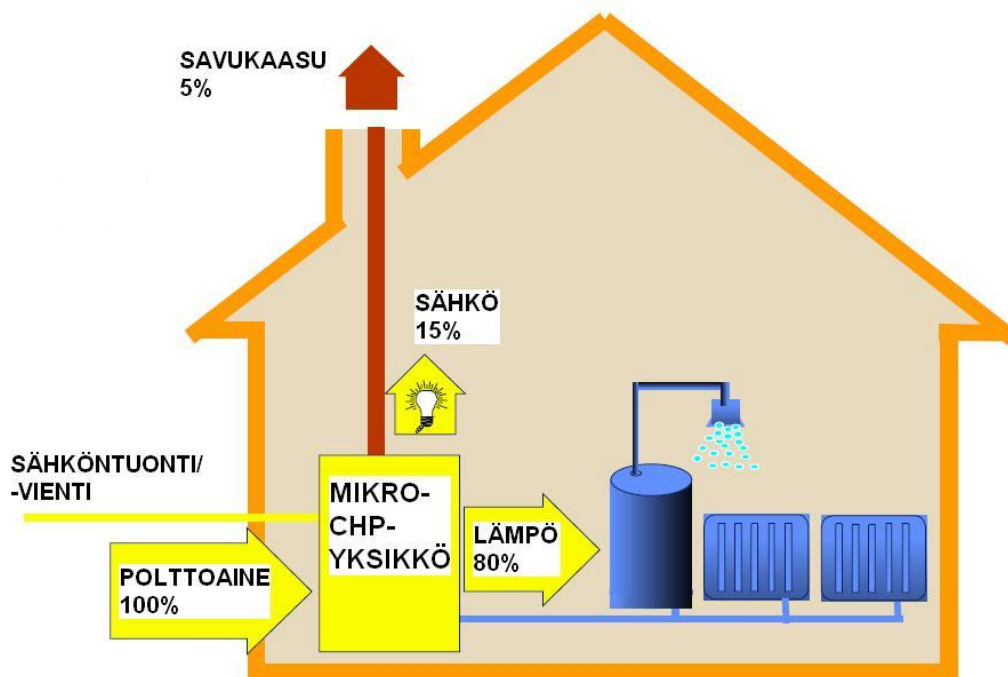
1.2 Miksi mikro-CHP?

1.2.1 Hyödyt

Suurin osa perinteisistä pienten tai keskisuurten kiinteistöjen lämmitysjärjestelmistä perustuvat suoraan sähkölämmitykseen tai valitulla polttoaineella lämpiävään lämpökattilaan. Vaikka sähköä ei lämmitykseen kuluisikaan, tarvitsee nykyaikainen kiinteistö aina sähkönsyöttöä. Sähköä tarvitaan muun muassa ruuan säilytykseen ja valmistukseen, valaistukseen sekä viihde-elektroniikkaan. Esimerkiksi polttokattilalla varustettu lämmitysjärjestelmä mahdollistaa lämpöomavaraisuuden, mutta sähköomavaraisuuteen - kulutuksesta riippumatta - pääsevät vieläkin harvemmat ja lähes aina sähköenergia joudutaan ostamaan ulkopuolisilta sähköntuottajilta.

Jatkuvasti kohoavat sähkön hinta ja siirtomaksut antavat syyn etsiä kilpailevia vaihtoehtoja sähkön suoralle ostolle suurilta sähköntuottajilta. Lisäksi etenkin haja-asutusalueilla mahdolliset sähkönjakeluongelmat herättävät pohtimaan vaihtoehtoisia energiaratkaisuja. Mikro-CHP on yksi vaihtoehto sähköomavaraisuusasteen parantamiseksi tai jopa suoran sähkölämmityksen korvaajaksi. Yksinkertaisimmillaan mikro-CHP-järjestelmä asennetaan jo olemassa olevan lämpökattilan yhteyteen. Tällöin sisätilojen ja käyttöveden lämmitys pysyy ennallaan, mutta samalla saadaan tuotettua, jollei aivan kaikkea, niin ainakin osa kiinteistön sähköntarpeesta. [8]

Nykyaikaiset lämpökattilat ovat hyötysuhteeltaan varsin hyviä ja niissä päästään jopa yli 90 prosentin energiatehokkuuteen [8]. Tällöin mikro-CHP-laitteistoa käyttöönotettaessa energiantuotantotehokkuuden nostaminen entisestään voi olla vaikeaa. Tällä hetkellä useat markkinoilla olevat mikro-CHP-laitteistot pystyvät maksimissaan noin 25 – 30 % hyötysuhteeseen sähköntuotannossa ja samaan aikaan noin 70 % hyötysuhteeseen lämmön talteenotossa. Näillä suoritusarvoilla päästään siis suunnitteen samaan kokonaishyötysuhteeseen kuin kehittyneillä lämpökattiloilla itsessään [3, 8]. Mikro-CHP-tekniikkaa käytettäessä olennaista kuitenkin on omavaraisesti tuotettu sähkö. Sähkö on lämpöön verrattuna hienos-



Kuva 1.1: Kaaviokuva mikro-CHP-laitteistoihin liittyvistä energiavirroista. Prosentuaaliset osuudet ovat vain viitteellisiä ja ne vaihtelevat käytetävästä laitteistotekniikasta sekä kohdekiinteistöstä riippuen. [7]

tuneemmassa muodossa olevaa energiaa ja siten arvokkaampaa. Mikro-CHP-laitteistoa lämpökattilan yhteyteen päivitettäessä periaatteena on, että muodostunut sähköntuotantokapasiteetti kattaa tarvittavat lisäinvestoinnit.

Todellisuudessa valtaosa kuluttajamarkkinoilla tarjolla olevista mikro-CHP-laitteistoista saavuttaa sähköntuotannossa hädin tuskin 30 % hyötysuhteen. Näin pienillä osuuksilla pystytään kattamaan vain osa kiinteistön sähkönkulutuksesta ja sähköä joudutaan ostamaan lisäksi ulkopuolelta. Polttokennojen kohdalla sähköntuotannon hyötysuhde voi olla jopa yli 50 %, mutta teknologian kehittyessä niin polttokennojen kuin muidenkin tekniikoiden osalta hyötysuhteiden odotetaan kasvavan huomattavasti [3, 9]. Yhdeksi mikro-CHP-laitteistojen tarjoamaksi mahdollisuudeksi voikin ideaalimallisissa muodostua ylimääräisen tuotetun sähkön myynti julkiseen verkkoon, mikä tarkoittaa uudenlaista liiketoimintamahdollisuutta mikro-CHP-voimaloiden omistajille. Suomessa on esitetty jopa syöttötariffien käyttöönotosta pienen mittakaavan sähköntuottajille [10, 11].

Kuten aikaisemmin on mainittu, mikro-CHP-laitteistot ovat osa hajautettua energiantuotantoa ja myös tältä kantilta voidaan tekniikalle löytää puolta. Esimerkiksi poltto- tai ydinvoimalaprosessilla sähköä tuottamalla syntyy ylimääräistä lämpöä, jota keskitetyissä suurissa voimaloissa ei aina saada hyötykäyttöön. Lämpöä ei ole taloudellista siirtää pitkiä matkoja, koska energiahäviöt ovat tuolloin paljon suurempia kuin sähkönsiirrossa tai alkuperäisen polttoaineen kuljetuksessa. Mikro-CHP-laitteistoilla kulutus on lähellä tuotantoa, joten merkittäviä lämmönsiirtohäviöitä ei pääse syntymään. Edelleen vähentynyt ulkopuolisen sähkön tarve vähentää myös sähkönsiirtohäviöitä.

Energiantuotantomallia mietittäessä ei toki pidä unohtaa, että myös polttoainekuljetuksissa syntyy aina energiahäviöitä. Hyödyntämällä paikallisesti saatavilla olevia polttoaineita nämä häviöt voidaan kuitenkin minimoida. Polttoaineen ja tuotetun energian siirtoprosessi tulisi aina optimoida, ja parhaassa tapauksessa hajautettu energiantuotanto voi hyvin parantaa energiantuotantoprosessin kokonaishyötysuhdetta.

Mikro-CHP-tekniikan kohdalla huomionarvoisia ovat myös ympäristökysymykset. Vaikka mikro-CHP-laitteiston käyttöönotolla kokonaishyötysuhdetta ei saataisikaan merkittävästi nostettua, on mikro-CHP-laitteistoista tarjolla ympäristöystävällisiä biopolttoaineilla toimivia ratkaisuja. Käyttämällä esimerkiksi biokaasua, biodieseliä tai puupolttainetta päästöt ja ympäristön kuormitus vähenevät verrattuna energian tuottamiseen kivihiihellä tai öljyllä. Biopolttoaineet liitetään usein paikallisten energia-varojen hyödyntämiseen ja esimerkiksi Suomessa puupolttainetta on runsaasti tarjolla. Tutkimus- ja kehitystyötä biopolttoaineilla toimivista mikro-CHP-laitteistoista tehdään jatkuvasti, esimerkkinä juuri tähän opinnäytetyöhön liittyvä JY:n (Jyväskylän yliopisto) mikro-CHP-koelaitteisto.

Vaikka mikro-CHP-laitteistot ovat vielä suurelta osin kehitys- ja testausvaiheessa jo nyt saadut käyttökokemukset osoittavat, että tekniikan jokapäiväiseen käyttöön ei liity korkeaa teknologista muuria. Markkinoilla olevien mikro-CHP-laitteistojen on todettu olevan loppukäyttäjän kannalta helppokäyttöisiä ja esimerkiksi asiakaskäytössä muutamia vuosia olleita maakaasulla toimivia laitteita (ks. viite [12]) voidaan pitää osoituksena siitä, että mikro-CHP-tekniikka pystytään tekemään yksinkertaiseksi ja kuluttajakäyttöön sopivaksi.

1.2.2 Haitat

Huonoina puolina tällä hetkellä tarjolla oleviin mikro-CHP-laitteistoihin liittyen voidaan listata suuret alkuinvestoinnit sekä vielä osittain kehitystä ja testausta vaativa tekniikka. Tämä on kaksisuuntainen ongelma, sillä

korkea hinta pitää ostajakunnan suppeana ja toisaalta pieni asiakaskunta tarkoittaa pieniä valmistusmääriä, jolloin tuotekehitykseen ei ole varaa panostaa ja hinnat pysyvät korkealla. Kuluttajan kannalta tekniikan valintapäätöstä kuormittaa lisäksi se, että investoinnin takaisinmaksuaika tulee jokaisen kiinteistön kohdalla arvioida hyvin tarkasti erikseen.

Mikro-CHP-laitteistojen takaisinmaksuaikaan vaikuttaa erityisesti käytötarkoitus ja valittu laitteistotekniikka sekä käytetyn polttoaineen hinta. Tällä hetkellä esimerkiksi puupelletin hinta on noin 3,5–6 senttiä kilowattituntia kohti [13, 14], mikä on varsin kilpailukykyinen hinta verrattuna alhaisimmillaan samassa suuruusluokassa olevaan sähkön kilowattituntihintaan [15]. Vertailussa pitää toki huomioida tapauskohtaiset kuljetus- ja siirtokustannukset sekä käytetäänkö lämpöä edelleen sähköntuotantoon tai päinvastoin (hyötysuhde). Polttoainekustannuksia merkittävämmäksi arviointiperusteeksi mikrokokoluokassa saattaa kuitenkin muodostua kertaluontoiset investointikustannukset, sillä ainakin toistaiseksi pienissä erissä valmistettavat mikro-CHP-laitteistot ovat varsin hintavia.

Investointikustannusten lisäksi yksi ongelmatekijä mikro-CHP-laitteistojen sopivuutta määritettäessä on sähkön- ja lämmöntuoton suhde. Nykyisillä laitteistoilla lämpöä tuotetaan noin 2 – 8-kertainen määrä tuotettuun sähköön verrattuna [5, 16], mutta todellisuudessa tarvittu energiasuhde ei useinkaan ole näin suuri. Ongelma korostuu erityisesti sähkömavaraisuutta tavoiteltaessa, jolloin korkeaa sähköntuotantoa vastaavalle tuotetulle lämmölle tulee löytää järkevä käyttökohde. Toisaalta jos taas lämmöntarve on varsin vaatimatonta, on tuotettu sähkö marginaalisen pientä verrattuna tarvittuun sähkömäärään, jolloin investointi on taloudellisesti kannattamaton.

1.3 JY:n mikro-CHP-laitteiston projektikatsaus

JY:n (Jyväskylän yliopisto) Uusiutuvan energian (lyh. UE) tutkimus- ja koulutusohjelman alaisuudessa toimiva mikro-CHP-tekniikkaa tutkiva projekti on ollut käynnissä vuodesta 2004 lähtien. Alun perin tärkeänä yhteistyökumppanina toimi VTT (Valtion teknillinen tutkimuskeskus) huolehtien laitteiston esisuunnittelusta ja mallinnuksesta. Pohjatietoa suunnittelulle saatiin DTU:lla (Tanskan tekninen korkeakoulu) tehdyistä mikro-CHP-tekniikkaan liittyvistä julkaisuista. VTT jättäytyi alun jälkeen pois yhteistyöstä, minkä jälkeen JY on huolehtinut päävastuusta useiden eri yhteistyötahojen kuten JAMK:n (Jyväskylän ammattikorkeakoulu) ja yksityisen sektorin yritysten kanssa yhdessä toimien. [17]

Perusajatuksena JY:n mikro-CHP-koelaitteiston alkuperäisessä visioin-

nissa oli teholtaan noin 10 kW_e:n CHP-laitteiston kehittäminen lämmön ja sähkön yhteistuotantoon. Mikro-CHP-kokoluokan sähkö- ja lämpöenergian yhteistuotantovoimaloille nähtiin ja nähdään edelleen löytyvän Suomesta tuhansia käyttökohteita maataloista pienteollisuuteen [18]. Tämänhetkiset markkinoilla olevat mikro-CHP-laitteistot ovat suunnattuja lähinnä maakaasukäyttöön, mutta Suomesta kaasuverkosto puuttuu lähes täysin. Siten ensisijaisena vaatimuksena oli, että polttoaineen täytyi olla puuperäistä kotimaisia luonnonvaroja ajatellen. Lisäksi alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti sähkö tuli tuottaa ulkoisella lämpövoimakoneella, joka tuli olla kaupallisesti saatavilla oleva valmis tuote. Lopulliseksi laitteistokonseptiksi muodostui kiinteän puuaineksen - tässä tapauksessa puupellettien - poltto lämmöntuottamiseen sekä stirling-lämpövoimakoneen käyttö lämmön muuntamiseksi sähköksi. [17]

JY:n mikro-CHP-hanketta eteenpäin vietäessä tavoitteena on ollut, että tutkimuslaitteisto voitaisiin lopulta pelkistää massatuotantoon sopivaksi prototyyppiksi [19]. Vuoden 2009 lopussa lähes kaikki laitteiston asennustyöt stirlingkonetta lukuun ottamatta oli saatu valmiiksi ja projekti otti tärkeän askeleen eteenpäin, kun laitteistoa käytettiin ensimmäisen kerran muutaman kymmenen kilowatin lämpöteholla. Laitteiston komponentteja päästiin siten testaamaan todellisissa olosuhteissa eikä pelkästään kylmäajossa kuten aikaisemmin. Vuonna 2010 projekti tulee siirtymään seuraavaan vaiheeseen, jolloin laitteiston rakentamiseen tarvittava aika vähenee ja testiajoihin käytetty aika lisääntyy.

Tämä opinnäytetyö liittyy JY:n mikro-CHP-tutkimuslaitteiston tiedonkeruu- ja analysointijärjestelmään. Työn toimeksiantona oli suunnitella, toteuttaa ja testata laitteiston sisältämien mittalaitteiden antaman tiedon keräys ja analysointi. Syvällisesti tiedonkäsittelyjärjestelmää on selvitetty luvussa 4. Tätä ennen tekstissä käydään tarkemmin läpi eri prosesseihin perustuvia mikro-CHP-tekniikoita (luku 2) sekä JY:n koelaitteiston rakennetta, komponentteja, toimintaa ja ominaispiirteitä (luku 3).

2 Mikro-CHP-tekniikat

2.1 Yleistä

Mikro-CHP-laitteistoihin löytyy tekniseltä toteutukseltaan useita eri ratkaisuja. Peruseriaateeltaan laitteistot voivat olla joko avoimeen tai suljettuun prosessiin perustuvia. Avoimissa prosesseissa nestemäinen tai kaasumainen polttoaine poltetaan lämpövoimakoneen sylinterissä tai polttokammiossa, joka on mekaanisesti yhdistetty sähkögeneraattoriin. Suljetuissa prosesseissa polttoaine poltetaan erillisessä polttilassa ja lämpöenergia tuodaan ulkoiselle lämpövoimakoneelle työaineen välityksellä.

Polttoprosessitekniikan lisäksi mikro-CHP-laitteisto voidaan toteuttaa polttokennoilla, joissa nimestään huolimatta ei tapahdu varsinaista polttoaineen palamista, vaan sähkön- ja lämmöntuotto tapahtuu sähkökemiallisen prosessiin kautta. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan edellä mainittuja tekniikoita tarkemmin viitteitä [3, 4, 5, 7, 8, 20] mukaillen. Kyseisistä kirjallisuuslähteistä erityisesti JY:n UE-ohjelman alaisuudessa tehdystä kirjallisuusselvityksessä [5] on esitelty tarkemmin pienen kokoluokan CHP-laitteistoja sekä niihin liittyvää tutkimustyötä.

Tässä opinnäytetyössä valittu mikro-CHP:n kokoluokka $< 50\text{--}100\text{ kW}_e$ rajaa mikro-CHP-käsitteen alle tällä hetkellä sopivia tekniikoita, joten avoimen prosessin tekniikoista tarkastelussa on mukana polttomoottori ja mikro-roturbiini. Suljetusta prosessista mukana on vain stirling-moottori² ja tekniikoista viimeisenä käydään läpi polttokennoteknologiaa. Taulukossa 2.1 on lueteltu joitakin tarkastelussa mukana oleviin mikro-CHP-tekniikoihin perinteisesti yhdistettyjä ominaisuuksia. Aivan luvun lopussa on lisäksi hahmoteltu lyhyesti mikro-CHP-laitteistojen ympärille kehitettävää oheisteekniikkaa.

2.2 Avoin prosessi

2.2.1 Polttomoottori

Polttomoottori (myös mäntämoottori tai endoterminen moottori) on suu-
relle osalle ihmisistä tuttu autoista. Polttomoottorissa on sylinterikammio,
jossa polttoaine palaa muuttaen työkaasun lämpötilaa ja painetta, sekä lii-
kuttaen siten mäntää ja sitä kautta akselia. Näin saadaan tuotettu mekaa-

²Suljettuun prosessiin perustuvat muut yleisesti käytetyt tekniikat ovat tyypilliseltä kooltaan seuraavanlaisia: höyrykone $> 100\text{ kW}_e$, höyryturbiini $> 500\text{ kW}_e$ ja Organic Rankine Cycle (lyh. ORC) -prosessi $150\text{ kW}_e - 1\text{ MW}_e$ [5].

Taulukko 2.1: Mikro- ja pien-CHP-tuotantoon soveltuviin tekniikoiden ominaisuuksia [5].

Tekniikka	Polttomoottori	Mikroturbiini	Stirlingmoottori	Polttokeino
Tyypillinen koko	1 – 1000 kW _e	25 – 250 kW _e	10 – 150 kW _e	1 kW _e – 50 MW _e
Sähköhyötysuhde	25 – 40 %	25 – 30 %	8 – 22 %	38 – 55 %
Lämpöhyötysuhde	45 – 50 %	50 – 60 %	50 – 60 %	30 – 45 %
Tyypillinen käyttöikä	15 vuotta	15 vuotta	15 vuotta	1 – 15 vuotta
Kehitysaste	Laajasti käytössä	Varhais-kaupallises- sa vaiheessa	Pilot-vaiheessa	Kehitysvaiheessa
Tekninen vahvuus (pien-CHP-käytössä)	Korkea sähköhyötysuhde	Pieni huoltotarve	Pieni huoltotarve	Korkea sähköhyötysuhde
Tekninen heikkous (pien-CHP-käytössä)	Verrattain suuri huoltotarve	Polttoaineen oltava kaasumainen tai nestemäinen	Verrattain pieni sähköhyötysuhde	Lyhyt kestoikä

nista tehoa. Sähköntuotantosovelluksissa moottorin akselille asennetaan sähkögeneraattori, jossa voidaan generaattorista riippuen tuottaa 1- tai 3-vaihesähköä. Tällaista polttomoottorin ja sähkögeneraattorin yhdistelmää kutsutaan usein moottorivoimalaksi. [4, 20]

Polttomoottorin jäähdytyksestä sekä pakokaasuista talteen otettu lämpö käytetään kiinteistön lämmitykseen. Polttomoottoreita on käytetty pitkään sähköntuotannossa, joten tekniikka on kehittynyttä ja kaupallisesti hyvin saatavilla. Polttomoottoriin perustuvat laitteistot ovat tällä hetkellä jopa hallitseva tekniikka mikrokokuoluokan CHP-markkinoilla. [3, 4, 5]

Polttomoottorit voidaan jaotella niiden toimintaperiaatteiden mukaan kahteen eri kategoriaan, puristusytytteisiin eli dieselmoottoreihin sekä kipinäsytytteisiin eli ottomoottoreihin. Dieselmoottoreissa on ottomoottoreihin verrattuna korkeampi teho-lämpösuhde eli se kuinka paljon sähköä tuotetaan kutakin tuotettua lämpöyksikköä kohti. Ottomoottoreiden kokonaistehokkuus on taas dieselmoottoreita parempi. [3, 4]

Dieselmoottoreita löytyy hyvin laajalle tehoalueelle, 5 kW_e :stä useaan kymmeneen MW_e , kun taas ottomoottoreita on hieman pienemmälle alueelle, muutamasta kW_e :sta yli 6 MW_e :een. Pienet, mikrokokuoluokan, voimalat perustuvat usein auton dieselmoottoriin ja lähes kaikki alle 1 MW_e :n moottorivoimalat, aivan pienimpiä lukuun ottamatta, ovat turboahdettuja tehon kasvattamiseksi. [4, 20]

Polttoaineena dieselmoottoreissa käytetään dieselöljyä, polttoöljyä, biodieseliä tai rapsiöljyä. Ottomoottoreissa taas käytetään maakaasua, neste-kaasua, biokaasua tai naftaa. Tästä voidaan huomata, että kaasumoottorit ovat aina kipinäsytytteisiä. On lisäksi olemassa dieselmoottoreita muistuttavia kaksoispolttoainemoottoreita, joissa dieselin sekaan suihkutetaan imuilman mukana kaasua. Biopolttoaineita käytettäessä tulee olla tarkkana polttoaineen laadusta ja kaikki moottorivalmistajat eivät virallisesti myönnä yhteensopivuutta tämänlaisten polttoaineiden kanssa. Kiinteää biomassaa, esimerkiksi puuta, kaasutettaessa tulee kaasua puhdistaa huolellisesti. [3, 4, 7, 8, 20] Huomiota tulee kiinnittää etenkin syntyvään tervaan, joka helposti pilaa moottorin [21].

Polttomoottoreihin perustuvien mikro-CHP-laitteistojen eli mikrokokuoluokan moottorivoimaloiden hyviä puolia ovat sekä korkea sähkö- (25–40 %, jopa 45 %) että kokonaishyötysuhde (65 – 90 %), laaja tehoalue, monipuolinen polttoainevalikoima, kompakti koko sekä testattu tekniikka. Lisäksi polttomoottoreiden suuret tuotantomäärät alentavat hintoja, voimaloiden rakennusajat ovat lyhyitä ja modulaarisella rakenteella, toisin sanoen kokoamalla voimala pienistä moottoreista yhden ison sijaan, saavutetaan energiatarpeeseen mukautuva laitteisto. [3, 4, 7, 8, 20]

Moottorivoimaloiden huonoja puolia ovat meluisuus sekä muut jak-

Taulukko 2.2: Kaasu- ja dieselmootoreiden tyypillisiä ominaisuuksia, kun sähköteho on $< 200 \text{ kW}_e$ [4, 20].

Sähköhyötysuhde (%)	30 – 38
Lämpöhyötysuhde (%)	45 – 50
Kokonaishyötysuhde (%)	75 – 85
Lämmöntuotto ($^{\circ}\text{C}$) ¹	85 – 100
Peruskorjausväli (h) ²	15000 – 20000
Käytettävyys (%)	96
Kierrosnopeus (rpm)	1000 – 3000
Esimerkkipolttoaineita ³	Kipinäsytytteinen moottori: kaasua, biokaasua, naftaa; Dieselmoottori: kaasua, biokaasua, ELFO, LFO, HFO, rapsiöljyä, RME
Käyttö- ja ylläpitokustannukset ($\text{€}/\text{kWh}_e$)	0,013 – 0,022

¹ Pakokaasujen lämpötila dieselmootoreissa $300 - 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kaasumootoreissa $400 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

² Peruskorjauksessa vaihdetaan männät, sylinterit, yms.; huoltoväli (öljynvaihto) noin $2000 - 5000 \text{ h}$.

³ ELFO (Extra Light Fuel Oil) = erikoiskevytöljy, LFO (Light Fuel Oil) = kevytöljy, HFO (Heavy Fuel Oil) = raskasöljy, RME (Rapeseed Methyl Ester) = rapsisiemenistä valmistettu metyyliesteri.

sottaisen ja epätäydellisen palamisprosessin tuomat ongelmat. Tämä tarkoittaa muihin CHP-tekniikoihin verrattuna tiheää huoltoväliä voitelun ja kuluvien osien kuten männän osalta sekä matalaa käyttöaikaa ja -ikää. Myös päästöt ovat muihin tekniikoihin verrattuna - etenkin uusiutumattomia polttoaineita käytettäessä - huomionarvoinen seikka. [3, 4, 7, 8, 20]

2.2.2 Mikroturbiini

Mikroturbiinien teknologia on sekoitus lentokoneen moottorijärjestelmää, dieselmoottorin turboahdinta sekä autojen teknisiä ratkaisuja. Mikroturbiinissa on samalla akselilla kompressori, turbiini ja sähkögeneraattori. Laakerointi on toteutettu joko ilma- tai öljylaakereilla. [3, 4, 20]

Mikroturbiini toimii siten, että kompressori työntää ilmaa palotilaan, missä ilmaan suihkutetaan polttoainetta. Palamisesta syntyvä pakokaasu virtaa suurella nopeudella turbiinipyörän läpi saaden turbiinin pyörimään. Turbiini pyörittää edelleen kompressoria, joka syöttää lisää ilmaa palotilaan. Turbiini saa myös generaattorin pyörimään, jolloin saadaan tuotettua toteutuksesta riippuen joko 1- tai 3-vaihesähköä. Turbiinin pyörimistaajuus voi olla jopa 100 000 kierrosta minuutissa, joten mikroturbiineista saatava sähkö on hyvin korkeataajuista. Mikroturbiinien sähköteho on yleensä luokkaa 25 - 250 kW eli mikro-CHP-kokoluokan ylärajoilla, tosin muutamankin kW:n turbiineita on kehitteillä. [3, 4, 5, 20]

Nykyaikaisissa mikroturbiineissa yksi olennainen rakenneosana on rekuperaattori. Sillä muutetaan turbiinin teho-lämpösuhdetta, mutta ennen kaikkea rekuperaattori varastoi pakokaasun lämpöenergiaa ja esilämmitteää palotilaan virtaavaa palamisilmaa. Näin kasvatetaan mikroturbiineilla sekä sähköntuotannon että myös kokonaishyötysuhdetta. Rekuperaattorin jälkeinen pakokaasun lämpöenergiaa voidaan käyttää kiinteistön lämmittämiseen tai vaikkapa vesihöyryn tuottamiseen, sillä pakokaasun lämpötila on tällöin vielä korkea, tyypillisesti 450 – 600 °C. Mikroturbiinit soveltuvat erityisen hyvin esimerkiksi teollisuuskohteisiin, sillä niissä tarvitaan korkea lämpötilaa ja vesihöyryä. [3, 4, 20]

Mikroturbiinien sähköhyötysuhde riippuu voimakkaasti turbiinin tehosta sekä kuormituksesta. Mikro-CHP-kokoluokassa ilman rekuperaattoria jäädään usein 15–25 %:iin. Sähköhyötysuhde onkin iso erottava tekijä verrattaessa mikroturbiineja suuriin megawattikokoluokan turbiinivaihtoehtoihin. Kokonaishyötysuhde mikroturbiini-CHP-laitteistoille on yleisesti 75 – 85 %. [4, 20]

Polttoaineena mikroturbiineissa käytetään eniten kaasumaisia polttoaineita, mikä on syynä siihen, että mikroturbiineita kutsutaan usein nimellä kaasuturbiini. Yleisin polttoaine on maakaasu, mutta esimerkiksi propaani-

Taulukko 2.3: Mikroturbiinien tyypillisiä ominaisuuksia [4, 20].

Yksikköteho (kW _e)	25 – 250
Sähköhyötysuhde (%)	15 – 35
Lämpöhyötysuhde (%)	50 – 60
Kokonaishyötysuhde (%)	75 – 85
Lämmöntuotto (°C) ¹	85 – 100, höyry
Peruskorjausväli (h)	20000 – 30000
Elinikä (h)	50000 – 75000
Esimerkkipolttoaineita	Maakaasu, diesel, propaani, petroli, biokaasu
Käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/kWh _e)	0,006 – 0,021

¹ Turbiinista lähtevän kaasun lämpötila 450 – 600 °C.

nin tai vedyn käyttö on mahdollista. Lisäksi biokaasun käyttö on yleistyessä. Nestemäisistä polttoaineista yleisimpiä ovat dieselöljy, kerosiini ja nestekaasu. [4, 20] Suoran polttoaineen polton lisäksi tutkimustyötä on tehty myös epäsuoralla lämmöntuonnilla varustetuilla mikroturbiineilla, joissa polttimella tuotettu lämpö siirretään ilmalämmönsiirrintä pitkin itse mikroturbiinille [22].

Mikroturbiinien hyviä puolia ovat luotettavuus sekä pieni koko ja massa. Vain muutamasta laitteen sisällä liikkuvasta osasta johtuen käyttö- ja huoltokustannukset pysyvät alhaisina verrattuna esimerkiksi polttomootoreihin. Huoltovälit ovat pitkiä ja mikroturbiinien odotettu käyttöikä on säännöllisesti yli 40000 tuntia. Lisäksi mikroturbiinit ovat erittäin vähäpäästöisiä NO_x:n ja CO:n osalta, johon on syynä runsas palamisilmamäärä sekä nopeasti tapahtuva palaminen. [3, 4, 20]

Mikroturbiinien yhtenä huonona puolena mainitaan usein, että turbiinin käyttäminen osakuormalla on erittäin kannattamatonta sekä suuripäästöistä ja sopeutumisen sähköntarpeen muutokseen tapahtuu hyötysuhteen kustannuksella. Toisaalta mikroturbiineihin perustuva mikro-CHP-laitteisto voidaan koota useasta erillisestä turbiinista, jolloin hyötysuhde pysyy sähkön- ja lämmöntarpeen muuttuessa jatkuvasti korkeana. Edellisestä huolimatta mikroturbiinien hyötysuhde joka tapauksessa laskee teholuokan laskiessa ja tämän lisäksi toinen selvä huono puoli niissä on korkea hinta. [3, 4, 20]

2.3 Suljettu prosessi

2.3.1 Stirling-moottori

Stirling-moottori perustuu suljettuun prosessiin, jossa moottorin sisällä oleva työkaasu ei vaihdu toimintasyklin eri vaiheiden välillä ja moottori saa energiansa ulkopuolelta. Yksinkertaisimmillaan stirlingmoottori sisältää sylinterin tai kaksi, samalle akselille kiinnitetyn työmännän ja syrjäyttäjämännän sekä kuuman ja kylmän pään lämmönvaihtimet. Lämmitys kuumalle päälle samoin kuin jäähdytys kylmälle päälle hoidetaan stirlingmoottorin ulkopuolelta ja lämpötilaero kuuman ja kylmän pään välillä saa moottorin toimimaan. [3, 4, 7, 20]

Stirlingmoottorin tuottama teho on mekaanista tehoa, joka pystytään muuttamaan sähköksi asentamalla moottorin akselille sähkögeneraattori. Stirlingperustaisten mikro-CHP-laitteistojen sähköhyötysuhde on useimmiten 8 – 22 % (osalla laitteista jopa 35 %) ja kokonaishyötysuhde on luokkaa 75 – 95 %. Sähköhyötysuhteeseen vaikuttaa voimakkaasti kylmän ja kuuman pään lämpötilojen erotus. [3, 4, 7, 20]

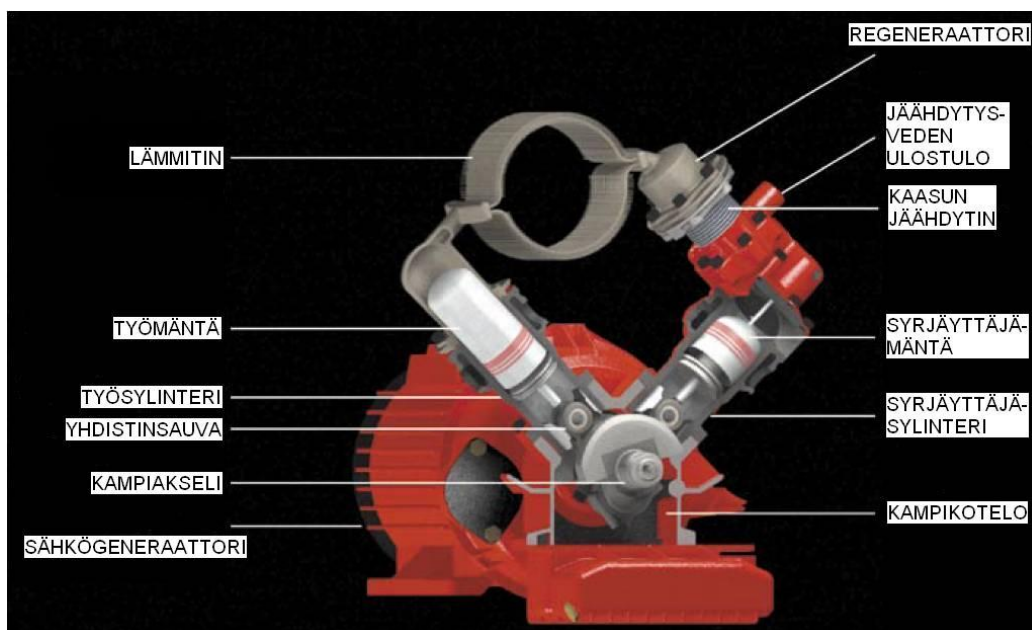
Stirlingmoottorin käydessä - toisin sanoen stirlingsyklin aikana - työkaasu, joka voi olla esimerkiksi ilmaa, vetyä, typpeä tai heliumia, liikkuu jaksottaisesti moottorin sisällä suljetussa tilassa kylmän ja kuuman pään välillä. Kuumassa päässä kaasu lämpenee ja laajenee työntäen työmäntää ja tehden työtä. Laajetessaan kaasu samalla liikkuu kohti kylmää päätä, missä kaasu jäähtyy. Kylmässä päässä liikkuva työmännän kanssa samalle akselille kiinnitetty syrjäyttäjämäntä edelleen puristaa kaasua saaden aikaan kaasuun kohdistuvan työntövoiman kohti kuumaa päätä. Kuumassa päässä kaasu jälleen lämpenee, jolloin sykli alkaa alusta. [4, 5, 7]

Stirlingmoottorin antamaa tehoa voidaan parantaa paineistamalla työkaasu. Moottorin hyötysuhdetta taas saadaan kasvatettua asentamalla kuuman ja kylmän pään välille esimerkiksi metallivillasta valmistettu regeneraattori. Se varastoi lämpimästä päästä virtaavasta kaasusta lämpöenergiaa luovuttaen lämpöä takaisin kylmästä päästä virtaavalle kaasulle. Regeneraattori siis sekä viilentää että lämmittää työkaasua. [5, 7]

Stirlingmoottorit voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan. Ensimmäinen ovat kinemaattiset stirlingmoottorit, joissa männän edestakainen liike muutetaan kampimekanismin avulla pyöriväksi liikkeeksi, esimerkiksi sähkögeneraattoria varten. Työ- ja syrjäyttäjämäntä ovat tässä vaihtoehdossa mekaanisesti kytketty toisiinsa. Toinen pääkategoria ovat vapaamännällä varustetut stirlingmoottorit, joissa ei ole ollenkaan pyöriviä osia. Suurimassa osassa vapaamäntämoottoreista teho saadaan mäntään kiinnitetystä pitkittäisestä vaihtovirtageneraattorista, joka usein koostuu kestopmag-

neetista. Syrjäyttäjämännän liike saadaan aikaiseksi työkaasun paineenmuutoksilla. [7]

Kahden pääkategorian lisäksi stirlingmoottorit voidaan jaotella sylinterien ja lämmönvaihtimien geometrisesta sijoittelusta riippuen alfa-, beta- ja gamma-tyyppeihin. Alfa-tyypissä (ks. kuva 2.1) työkaasu kulkee kahden männän välillä siten, että toinen mäntä puristaa kaasua kokoon kylmässä päässä ja toinen ottaa vastaan kaasun laajenemisen kuumassa päässä. Beta-tyypin moottorissa sekä kokoonpuristuminen että laajentuminen tapahtuvat samalla työmännällä. Kyseisessä moottorityypissä on vain yksi sylinteri, jonka sisällä erillinen syrjäyttäjämäntä liikuttaa työkaasua kylmän ja kuuman pään välillä. Gamma-tyypin moottori toimii kuten beta-tyypin moottori, mutta siinä työmäntä sijaitsee erillisessä sylinterissä. Kolmesta moottorityypistä beta-stirling on osoittautunut hyötysuhteeltaan parhaaksi, mutta sen toteutuksissa on vielä toiminnallisuuteen ja valmistuksen taloudellisuuteen liittyviä ongelmia. [5, 7]



Kuva 2.1: Kaaviokuva alfatyyppin V-stirlingmoottorista (valmistaja Clea-nergy AB) ja sen pääosista [23].

Stirlingmoottori käy moottorin ulkopuolelta tuotavalla lämmöllä, joten energianlähteenä voidaan käyttää lähes mitä tahansa toteutusta. Ulkopuolelta tulevan käyttöenergian vuoksi stirlingmoottorin yhteyteen tarvitaan aina erillinen lämmönlähde, esimerkiksi poltin. Perinteiseen tapaan

polttamalla aikaansaatu lämpö voidaan polttimesta riippuen tuottaa käyttäen kaasumaisia, nestemäisiä tai kiinteitä polttoaineita. Esimerkkeinä tähän ovat bensiini, öljy, alkoholi, maakaasu, butaani, biokaasu tai erilaiset biomassat. Myös aurinkolämpökeräimiä on testattu stirlingmoottoreiden lämmönlähteenä. Olennaisinta lämmönlähteestä riippumatta on, että moottorin kuuma pää on mahdollisimman korkeassa lämpötilassa ja, että kylmä pää saadaan mahdollisimman matalaan lämpötilaan. Viilennys voidaan toteuttaa esimerkiksi kierrättämällä vettä kylmän pään lämmönvaihtimessa. [3, 4, 7, 20]

Stirlingmoottoreiden hyviä puolia ovat monipuoliset polttoaineen tai yleisemmin käyttöenergian lähteet, matalat käyttökustannukset, varma mekaaninen toimivuus sekä hiljainen käyntiäänäni. Yksinkertaisesta rakenteesta ja ulkoisesta lämmöntuonnista johtuen stirlingmoottoreiden huoltotarve on vähäinen ja öljynvaihtoväli pitkä, mikäli öljyjä tarvitsee vaihtaa olleltaan. Stirlingperustaisen mikro-CHP-laitteiston päästöt riippuvat täysin käytetystä lämmönlähteestä. Esimerkiksi aurinkolämpöä käytettäessä päästöjä ei synny lainkaan ja polttimellakin varustettu laitteisto on polttomoottoreihin verrattuna tehokkaampi, vähäpäästöisempi sekä paremmin hallittavissa johtuen keskeytymättömästä polttoprosessista. [3, 4, 7, 8, 20]

Stirlingmoottoreiden huonoja puolia ovat tehoon nähden suuri fyysinen koko sekä korkeat hinnat. Stirlingmoottori ei ole uusi keksintö saati tekniikaltaan monimutkainen, joten korkeiden hintojen syynä ovat lähinnä pienet valmistuserät. Yksi huono puoli on myös hidas tehovaste kuorman muutokseen johtuen kuumaan päähän sitoutuneesta lämpöenergiasta, mutta tämä ongelma ei välttämättä korostu suhteellisen tasaista tehoa vaativissa mikro-CHP-sovelluksissa. [3, 4, 7, 20]

Lämmönvaihdinpintojen likaantuminen voi muodostua stirlingmoottoreilla ongelmaksi, erityisesti biomassaa poltettaessa. Esimerkiksi puunpoltossa syntyvät pienhiukkaset ja tuhka saattavat sulaessaan tarttua kuuman pään lämmönvaihdinpintoihin aiheuttaen korroosiota ja ennen kaikkea sähköntuotannon hyötysuhteen laskua. Biomassaa poltettaessa palamislämpöä voi olla tarvetta rajoittaa ja siten sähköhyötysuhde voi ilman lämmönvaihtimen likaantumistakin jäädä muihin tekniikoihin verrattuna alhaiseksi. [3, 5]

Tällä hetkellä tarjolla olevat stirlingmoottorit soveltuvat varsin hyvin pienen teholuokan mikro-CHP-sovelluksiin ja tutkimus- sekä kehitystyötä tehdään jatkuvasti lisää. [3, 4, 5, 7, 8, 20] Esimerkiksi Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa (LUT) on tehty tutkimusta biopolttaineilla toimivaan maksimiteholtaan 300 kW_h ja 9 kW_e stirling-voimalaitokseen liittyen.

Lappeenrannassa suoritetussa tutkimuksessa stirlingmoottorin ja polt-

Taulukko 2.4: Stirling-moottoreiden tyypillisiä ominaisuuksia [4, 20].

Sähköhyötysuhde (%)	15 – 35
Lämpöhyötysuhde (%)	50 – 60
Kokonaishyötysuhde (%)	75 – 85
Lämmöntuotto (°C)	60 – 80
Huoltoväli (h)	4000 – 6000
Elinikä (h)	50000 – 60000
Kierrosnopeus (rpm)	1500 – 1800
Esimerkkipolttoaineita	Maakaasu, alkoholi, butaani, biokaasu, hake, pelletti
Käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/kWh _e)	0,017 – 0,028

timen väliin rakennettiin erillinen lämmönsiirrin. Tällöin stirlingmoottorin lämmönsaannista vastasi oma suljettu ilmakierto eikä itse stirlingmoottorin lämmönvaihdin joutunut kosketuksiin savukaasujen kanssa. Perusteluna tällaiselle ratkaisulle oli stirlingmoottorin vaatima korkea kuuman pään lämpötila (> 1000 °C), mistä voi seurata käytetyllä puuhakepolttoaineella tuhkan sulamista ja stirlingmoottorin lämmönvaihtimen tukkeutumisista. Lappeenrannassa tehdyllä tutkimuksella on useita yhtymäkohtia tässä opinnäytetyössä raportoitavan JY:n mikro-CHP-laitteiston kanssa ja muun muassa LUT:n koelaitteiston stirlingmoottori oli samalta laitevalmistajalta kuin JY:n tutkimuslaitteistossa. [24]

LUT:llä tehdyn pien-CHP-tutkimuksen tavoitteena oli selvittää muun muassa savukaasun koostumusta, lämpöhäviöitä sekä lämmönsiirtimen suoritusarvoja ja likaantumista. Käytetyn kaasu-kaasulämmönsiirtimen arvosanaksi muissa sovelluksissa käytettyihin vastaaviin lämmönsiirtimeen verrattuna saatiin hyvä. Samoin lämmönsiirtimen likaantumisen ei nähty olevan stirlingmoottorin toiminnan kannalta merkittävässä roolissa noin kolmen viikon aikana tehdyissä koeajoissa. Merkittäviä lämpöhäviöitä kuitenkin havaittiin ja syynä saattoivat olla vuodot lämmönsiirtimessä ja putkistoissa tai ylipäättään lämpöeristyksen toimimattomuus. [24]

Joka tapauksessa ulkopuolelle raportoitujen tietojen mukaan LUT:llä suoritettujen tutkimusten mittaukset ovat osaltaan olleet puutteellisia ja saadut tulokset ovat siten suuntaa antavia. Yksityiskohtaisempaa tietoa kyseisestä LUT:llä tehdystä tutkimuksesta löytyy viitteestä [24].

2.4 Sähkökemiallinen prosessi

2.4.1 Polttokenno

Polttokenno on sähkökemiallinen laite ja eroaa polttomootoreista sekä mikroturbiineista siten, että mitään mekaanista liikettä tai palamista ei polttokennon sisällä tapahdu. Polttokennossa on kaksi elektrodia, joista toiselle syötetään polttoainetta ja toiselle hapetinta (happea tai ilmaa). Tällöin polttoaineen ja hapettimen kemiallinen energia muutetaan suoraan sähköksi ja sivutuotteena syntyy lämpöä, jota voidaan CHP-laitteistoissa käyttää hyödyksi. Polttokennon sisällä tapahtuvassa prosessissa, jota myös kennoreaktioksi kutsutaan, muodostuu edellisten lisäksi vielä vettä. [7, 8, 20]

Polttokennoja on useaa eri tyyppiä ja ne voidaan jaotella käytetyn elektrolyytin perusteella seuraavasti: alkaalipolttokenno (AFC, Alkaline Fuel Cell), polymeeripolttokenno (PEMFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell), fosforihappopolttokenno (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), sulakarbonaattipolttokenno (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) ja kiinteäoksidipolttokenno (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell). Näistä kolme ensimmäistä ovat matalan lämpötilan - toimintalämpötila usein $< 200\text{ °C}$ - ja kaksi viimeistä korkean lämpötilan - toimintalämpötila usein $> 600\text{ °C}$ - polttokennoja. Mikro-CHP-sovelluksissa on tutkittu ja käytetty ainakin PEMFC-, PAFC ja SOFC-kennoja. [3, 20]

Niin matalan kuin korkean lämpötilan kennoilla on etunsa, sillä korkeassa lämpötilassa toimivat kennot tuottavat mikro-CHP-nimenkin vaatima lämpöä. Lämpöä voi tosin syntyä ylen määrin ja se voi jäädä siten hyödyntämättä. Matalan lämpötilan kennot taas saattavat tarvita apulämmittimen runsaasti lämpöä vaativissa sovelluksissa. Käytettävyyserona näiden kahden tyyppin välillä on, että kuuman kennon lämpeneminen käyttövalmiiksi on hidasta, kun taas matalassa lämpötilassa toimivat kennot käynnistyvät nopeasti ja pystyvät nopeammin vastaamaan kuorman muutoksiin. [3, 4, 20]

Polttoaineeksi polttokennot kelpuuttavat muun muassa vetyä, maa-kaasua, metanolia ja jopa bensiiniä. Vety on ainoa polttoaine, joka käy polttokennoille suoraan. Muita polttoaineita on muokattava reformoimalla. Korkean lämpötilan polttokennot kykenevät itse reformoimaan polttoaineensa, mutta matalan lämpötilan kennot tarvitsevat erillisen reformointilaitteen. Sisäisesti tapahtuvan polttoaineen reformoinnin vuoksi korkean lämpötilan kennot kestävät jonkin verran polttoaineen epäpuhtauksia. Matalan lämpötilan kennoissa polttoaineen puhtaus on tärkeää ja esimerkiksi rikki voi suurina pitoisuuksina tukkia kennot. Yksi tapa tuottaa yleisesti

Taulukko 2.5: Yleisimpien polttokennomallien tyypillisiä ominaisuuksia [20].

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Tehoalue	1 – 250 kW	1 – 500 kW	0,1–10 MW	0,1–50 MW
Sähköhyötysuhde (%) ¹	38 – 43	38 – 43	50 – 55	48 – 52
Kokonaisyhyötysuhde (%)	70 – 80	75 – 85	85 – 95	85 – 95
Toimintalämpötila (°C)	60 – 80	150 – 200	500 – 600	800 – 1000
Polttoaine	Vety, maakaasu, metanoli	Vety, maakaasu	Vety, maakaasu	Vety, maakaasu, hiilimonoksidi
Kennon elinikä (h)	-	40000 – 60000	-	-
Käytettävyys (%)	-	95 – 97	-	-

¹ Maakaasua käytettäessä; vetyä käytettäessä korkeampi etenkin PEMFC:ssä ja PAFC:ssa.

polttokennojen kelpuuttamaa vetyä on biomassan kaasuttaminen. [3, 7, 20]

Polttokennojen hyviä puolia ovat pienet päästöt, alhainen melutaso sekä erityisen korkea sähköntuotannon hyötysuhde (38 – 55 %). Myös kokonaishyötysuhde (70 – 95 %), joka ei osakuormalla vaihtelee kovinkaan merkittävästi, on korkea. Hyötysuhde tosin laskee, jos polttoaineen reformointiin tarvitaan ylimääräisiä laitteita, mikä tarkoittaa siis lisääntyneitä energiankulutusta. Polttokennoilta saatava sähkö on lisäksi tasavirtaa (DC), joka tulee useissa sovelluksissa muuttua vaihtovirraksi (AC). Sähkön muuttaminen vaihtovirraksi aiheuttaa edelleen lisähäviöitä. [3, 7, 20]

Tämänhetkinen polttokennotekniikka on vielä varsin kehittymätöntä. Markkinoilla olevat laitteet ovat kömpelöitä, lyhytikäisiä ja niiden hinnat ovat korkealla. Kehitystä ja testausta polttokennoihin liittyen tehdään kuitenkin paljon, joten tulevaisuudessa polttokennoilta voidaan odottaa erittäin toimivia ratkaisuja myös mikro-CHP-sovelluksiin. [3, 4, 7, 8, 20]

2.5 Oheistekniikka

Mikro-CHP-tekniikan käyttöönottoon liittyy muutakin kuin vain itse lämmön- ja sähköntuotantolaitteiston asennus. Laitteiston ja tekniikan kokonaisvaltaista käyttöönottoa ajatellen on otettava huomioon niin liitännät muuhun yhteiskunnan infrastruktuuriin kuin myös lisäkomponentit, joilla saadaan edesautettua mikro-CHP-laitteiston tehokkuutta ja luotua sille lisäarvoa. [7, 8] Seuraavassa käydään läpi muutamia huomionarvoisia asioita paneutumatta sen tarkemmin tarjolla tai kehitteillä oleviin tekniikkiin ratkaisuihin.

Poikkeuksetta kaikissa mikro-CHP-ratkaisuissa nousee esille kysymys lämmön- ja sähköntuotannon suhteesta itse kulutukseen, varsinkin pyritessä energiaomavaraisuuteen. Mikro-CHP-laitteistoissa lämmön- ja sähköntuotanto on kytketty vahvasti toisiinsa ja muutettaessa toista myös toisen tuotantoteho muuttuu. Vaihtelevissa olosuhteissa, ajatellen esimerkiksi kesän ja talven välistä lämpöenergiatarpeen muutosta, voi olla hyvin vaikea löytää optimaalisesti sopivia komponentteja ja laitteiston ajoparametreja siten, että tuotanto vastaisi kulutusta niin lämmön kuin myös sähkön osalta.

Markkinoilla tarjolla olevia mikro-CHP-laitteistoja on jo suunniteltu sisältämään akkupaketteja varastoimaan sähköä pienen kulutuksen aikana ja tarjoamaan lisäenergiaa sitä vaadittaessa. Lämpöenergian pitkäaikainen varastointi sitä vastoin on huomattavasti vaikeampaa eikä tällaiselle varastoinnille löydy toimivia ratkaisuja. Joka tapauksessa energianva-

rastoinnin kehityksen tuomalla teknologialla on selviä sovellusmahdollisuuksia myös mikro-CHP-tekniikkaan liittyen. Lisäksi varastoimalla tuotettua energiaa ja siten tasoittamalla laitteiston tehopiikkejä sekä käyttöastetta saadaan pidennettyä komponenttien elinikää. [3, 7, 8]

Suurin osa markkinoilla olevista mikro-CHP-laitteistoista on tarkoitettu toimimaan yhdessä yleisen sähköverkon kanssa, joten ylimääräiselle tuotetulle energialle mikro-CHP-laitteistojen yhteydessä voidaan hakea myös muita ratkaisuja kuin varastointi. Yksi esitetty ajatus kuormanhallinnalle on virtuaalisen voimalaverkoston rakentaminen. Tällä tarkoitetaan keskitetysti hallinnoitujen, mutta hajautetusti sijaitsevien energiantuotantoyksikköjen verkostoa. Tämä vaatisi rakennemuutoksia niin teknisesti nykyisiin energianjakeluverkostoihin kuin myös ajatusmaailmojen tasolla. [7, 8]

Yksi tekninen näkökulma kyseisenlaisessa rakennemuutoksessa on erityisesti sähkönkulutuksen mittausjärjestelmä. Keskitetyssä energiantuotantomallissa sähkö virtaa suurista tuotantoyksiköistä kulutuspiisteisiin, joissa jokaisessa mitataan ulkopuolelta tullut sähkö. Jos nykyiset kulutuspiisteet muuttuisivat myös tuotantopiisteiksi, sähköä virtaisi verkossa molempiin suuntiin, jolloin sähkönmittaus tulisi osittain haasteellisemmaksi. [7, 8]

Mikro-CHP-tekniikan käyttöönotossa tulee ottaa huomioon muutakin kuin vain yksittäisen kiinteistön muuttuva energianhuolto. Mikro-CHP-laitteistot voivat olla yksi osatekijä muuttamassa koko yhteiskunnan energiantuotantomallia, tosin niin keskitetyllä kuin hajautetullakin energiantuotannolla on omat kannattajansa. Jos hajautettu tuotanto yleistyy, energiantuotannon oheistekniikka ja infrastruktuuri tarvitsevat varmasti muutoksia. Kyse on vain miten laajoja ja mihin uudistuksiin yhteiskunnalta löytyy valmius. Tärkeintä joka tapauksessa on jatkaa teknologian kehitystä ja tukea myös vaihtoehtoisia tekniikoita.

3 JY:n mikro-CHP-laitteisto

3.1 Yleistä

Alkuajatuksena JY:n (Jyväskylän yliopisto) Uusiutuvan energian tutkimus- ja koulutusohjelman (lyh. UE-ohjelma) mikro-CHP-projektille oli kiinnostus tutkia pienessä noin 10 kW_e:n ja poltinteholtaan 60–80 kW:n mittakaavassa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa puupolttoaineella [17]. Kyseissä mittakaavassa mahdollisia sovelluskohteita ovat esimerkiksi maatilat tai muut keskisuuret kiinteistöt.

Vaihtoehtoisia laitteistoratkaisuja oli päätöksentekohetkellä kaksi, joista ensimmäisessä puuainees kaasutettiin termisesti ja saatu puukaasu poltettiin polttomootorissa sähkön aikaansaamiseksi. Toisessa ratkaisussa puu poltettiin suoraan, jolloin vapautuneesta lämmöstä saatiin sähköä ulkoisen lämpövoimakoneen avulla. Lopulta jälkimmäinen ratkaisu tuli valituksi puukaasutuksessa muodostuvien epäpuhtauksien sekä stirling-prosessiin perustuvien lämpövoimakoneiden lupaavien ominaisuuksien vuoksi. Tarvittavaa lämpövoimakonetta ei lähdetty itse kehittämään, vaan se valittiin kaupallisesti saatavilla olevista laitteista. Laitteiston polttoaineeksi valikoitui pelletti. [17]

JY:n mikro-CHP-laitteiston esisuunnittelu tehtiin VTT:llä (Valtion teknillinen tutkimuskeskus). Taustatietoa suunnittelulle saatiin DTU:n (Tanskan tekninen korkeakoulu) julkaisuista sekä VTT:n omista koelaitteistoista. Esisuunnittelun lisäksi myös virtaus- ja palamismallinnus tehtiin VTT:n toimesta. Laitteiston suunnittelun lähtökohtana oli sylinterimäinen tulipesä, jonka pohjalle tuli pyöreä poltin. Jotta laitteisto pysyi yksinkertaisena, päätettiin tulipesästä tulevat savukaasut johtaa suoraan stirlingmoottorin lämmönvaihtimelle. Muita tärkeitä teknisrakenteellisia ratkaisuja olivat palamisilman syöttö tulipesään kolmesta eri lähteestä (primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilma) sekä savukaasujen takaisinkierrätys tulipesään (CGR, Combustion Gas Recycling). [17]

Seuraavissa kappaleissa selvitetään tarkemmin laitteiston rakennetta ja komponentteja sekä sen ohjausta. Lähteinä toimivat tämän opinnäytteen kirjoittajan omakohtainen tieto ja kokemukset sekä viitteenä [17] oleva Marko Rasin kirjoittama laitteiston toimintakuvaus. Kyseisessä dokumentissa laitteisto käydään läpi monelta osin tässä esitettyä yksityiskohdaisemmin. Laitteistokuvauksen jälkeen selvitetään lisäksi lyhyesti laitteistolla tehtyjä koeajoja sekä laitteistoon liittyviä haasteita.

3.2 Rakenne ja komponentit

3.2.1 Laboratoriotila

JY:n mikro-CHP-tutkimuslaitteisto sijaitsee Vaajakoskella UE-ohjelman yhteiskäyttöisessä varastohallissa. Kaikkine komponentteineen mikro-CHP-laitteisto vie lattiatilaa noin kahdenkymmenen neliömetrin verran. Korkeutta laitteistolla on noin viisi metriä. Laitteiston ympärille on rakennettu metallinen huoltotaso, joka edesauttaa komponenttien asennusta ja tukee laitteiston rakennetta sekä mahdollistaa huoltotyöt ylempänäkin sijaitseville komponenteille.

Laboratoriotila on kiinteistön entisenä lämpökattilahuoneena paloturvallinen. Putkien ja johtojen läpiviennit tiiliseinien ja betonikaton läpi on tiivistetty palouretaanimassalla. Tilan ainoat palohälyttimet sijaitsevat katossa ja ovat tyypiltään lämpövaroittimia. Lämpövaroittimien toimintaratat on selvitetty laitteiston päivitystyössä käyttö- ja toimintaohjeessa. Laboratoriotilan alkuperäinen savupiippu on pidennetty mikro-CHP-laitteiston käyttöä varten siten, että piipun läheisyydessä oleva kiinteistön ilmanvaihtojärjestelmä ei ime savukaasuja piipusta.

Laboratoriotilassa ei ole varsinaista lämmityslaitteistoa, mikä johtaa siihen, että suoraan tilasta otettavan laitteiston primääripalamisilman lämpötila voi vaihdella talven alle 10 °C:stä kesän yli 20 °C:een. Laboratoriotilassa on yksi vesipiste, yksi viemäri sekä yksi paineilmapiste.

3.2.2 Tulipesä

Laitteiston keskeisin ja kooltaan huomattavin yksittäinen komponentti on tulipesä, jonka ympärille muu laitteisto rakentuu. Tulipesä on niin ulkoapäin kuin palotilaltaankin sylinterinmallinen. Tällainen rakenne takaa pienen ulkopinta-alan lämpöhäviöille ja on kohtuullisen luotettavasti mallinnettavissa. Palotila on halkaisijaltaan 500 mm, mutta kapenee yläosassa ja on savukanavan alkaessa halkaisijaltaan vain 160 mm. [17]

Tulipesä on asennettu betonilattialla ja se koostuu neljästä erillisestä elementistä, jotka ovat jalkaosa sekä kolme lieriönmallista symmetristä elementtiä. Jalkaosa sisältää tuhkanpoistoluukun ja polttimen asennusluukun. Lieriöelementit taas sisältävät palamisilmansyöttöyhteet sekundääri- ja tertiääri-ilmalle sekä muutamia mittausyhteitä paine-ero- ja lämpötila-antureille. Lisäksi alimmassa lieriöelementissä on yksi sytytys- ja yksi liekintähystysyhde. Kukin neljästä tulipesäelementistä koostuu teräsvaipasta ja eristevuorauksesta. Suurimmissa eli kahdessa keskimmaisessä elementissä eristekerroksen paksuus on 300 – 470 mm. [17]



Kuva 3.1: Valokuva Jyväskylän yliopiston Uusiutuvan energian tutkimus- ja koulutusohjelman mikro-CHP-tutkimukseen liittyvästä laboratoriotilasta. Kuvan ulkopuolelle jäävät analysaattorijärjestelmät sekä ylhäällä huoltotasolla sijaitsevat komponentit.

3.2.3 Poltin

Pellettipoltin on mallimerkinnältään 80 kW Ecotec B2 ja se sisältää muutamia JY:n mikro-CHP-laitteiston - lähinnä tulipesän - vaatimia muutoksia [17]. Mallimerkinnän mukaisesti polttimen maksimilämpöteho on 80 kW. Polttimen liekki suuntautuu suoraan ylöspäin ja paikalleen asennettuna poltin on aivan palotilan keskellä. Poltin koostuu poltinpäästä, primääriilmakanavasta, syöttökanavasta ja -ruuvista sekä poltinvaunusta. Poltinpää sisältää poltinmaljan, tasaajarenkaan ja sen pyörittimen, tuhkarakaan sekä ilmakanavan jatkona olevat ilmaraot.

Ilmakanava sijaitsee polttoaineen syöttökanavan yläpuolella ja on yksi alkuperäiseen polttimeen muutettu yksityiskohta. Uudelleen muotoiltuna ilmakanava on noin 10 mm korkuinen ja poltinpään levyinen metalli-

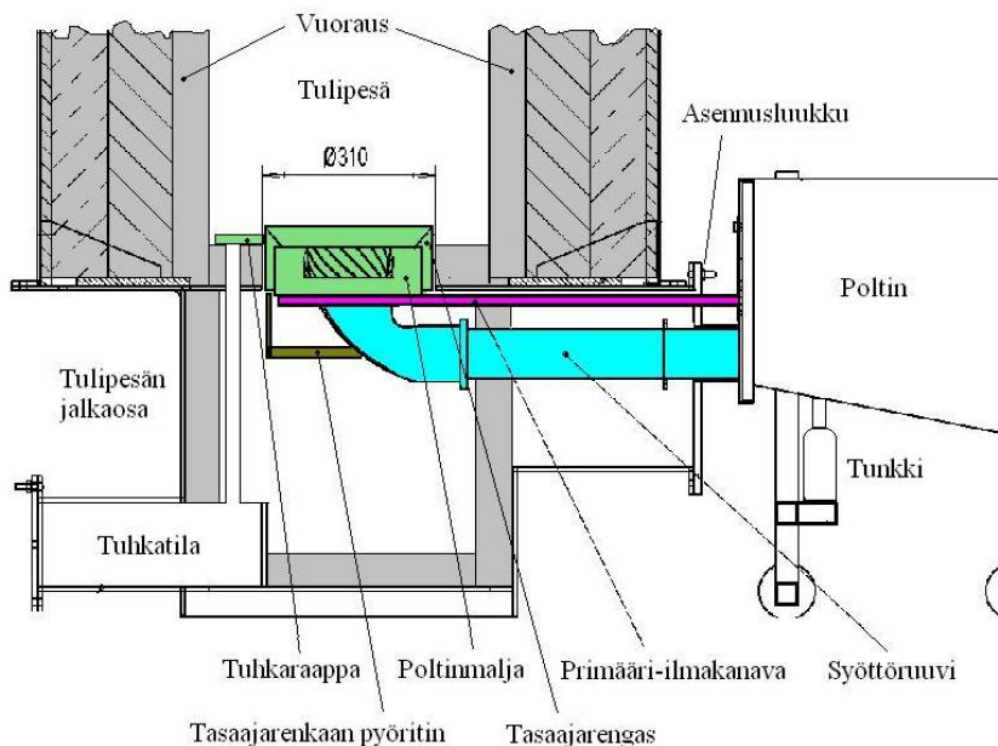


Kuva 3.2: Valokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteiston tulipesästä polttimen suunnasta otettuna. Kuvan yläosassa näkyy huoltotasolla sijaitsevia komponentteja sekä stirlingmoottorin asennuskiskot.

nen kanava, jonka tehtävänä on sekä lämmittää poltinmaljaan kuljetettavaa primääri-ilmaa että suojata polttoainetta ja syöttöruuvia tulipesästä tulevalta lämpösäteilyltä. Primääri-ilmapuhaltimelta tuleva ilma kulkee primääri-ilmanakanavasta poltinmaljan ilmarakojen kautta suoraan pellettikerrokseen. [17]

Myös polttoaineen syöttökanavaa ja -ruuvia on muutettu alkuperäisestä lisäämällä pituutta, jotta poltinmalja ylipäätään ylettyy tulipesän keskelle [17]. Syöttökanavan ympärille on lisäksi laitettu muutaman senttimetrin paksuinen lämpöeristys estämään tulipesästä tulevaa lämpösäteilyä ja sitä kautta syöttökanavan tarpeetonta kuumenemistä.

Edellä mainittujen poltinpään, syöttökanavan ja -ruuvin lisäksi pyö-



Kuva 3.3: Kaaviokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteiston tulipesän alaosa poltin asennettuna [17].

rillä varustettu poltinvaunu sisältää syöttöruuvien 63 W:n sähkömoottorin, syöttöruuvien alkupäässä olevan sulkusyöttimen sekä liittynät pellettiä polttoainesiloista tuovalle varastoruuville ja primääri-ilmapuhaltimelle.

Poltin asennetaan laitteiston käyttötilanteessa siten, että se työnnetään tulipesän polttimen asennusluukusta sisään ja nostetaan vaunussa olevalla tunkilla yläasentoon (ks. kuva 3.3). Polttimen ollessa paikoilleen, tulee asennusluukun suojailevyt kiinnittää poltinvaunun ja tulipesän väliin. Polttimessa olevien pellettien sytytys tapahtuu pudottamalla sytytyspala tulipesässä olevasta sytytysyhteestä maljaan. Polttimen liekkiä voidaan tarkkailla lasin läpi tulipesän kyljessä olevasta liekinvalvontayhteestä.

Poltin toimii niin, että varastoruuvilta tulevat pelletit putoavat sulkusyöttimen kautta syöttöruuvien alkupäähän, josta pelletit kulkeutuvat polttimella kohti ja pusertuvat lopulta alhaalta päin itse maljaan. Poltinvaunussa oleva syöttöruuvien sähkömoottori pyörittää myös polttimessa olevaa tasaajarengasta, joka tasaa maljassa olevaa pellettikerrosta. Ta-

saajarenkaan mukana pyörii siihen kiinnitetty tuhkaräppä, joka kuljettaa palamisessa muodostuneen tuhkan tulipesän tuhkanpoistoaukkoon.

3.2.4 Pellettisiilo ja -kuljetin

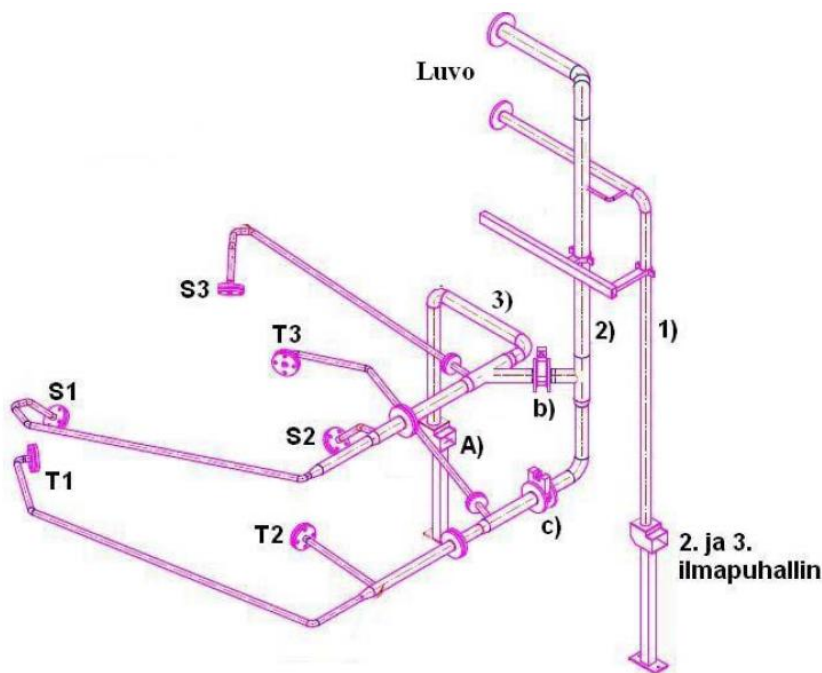
Laitteiston polttoaineensyötöstä vastaa laboratoriotilan ulkopuolella oleva pellettisiilo ja sieltä laboratoriotilan sisään tuleva pellettikuljetin eli varastoruuvi. Pellettisiilon tilavuus on 7 m³ [17] ja sen täyttö tapahtuu puhallinautolla. Pellettikuljetin on noin 8 m pitkä muoviputken sisään asennettu spiraalikuljetin, jonka pyörittämisestä vastaa 180 W:n sähkömoottori. Spiraalikuljetin kuljettaa pelletit polttimen yläpuolelle, josta pelletit tippuvat tulta kestäväntä puruletkua pitkin polttimen sulkusyöttimeen ja siitä edelleen syöttöruuville.

3.2.5 Palamisilmansyöttö

Palamisilmansyöttö tulipesään tapahtuu kolmessa eri osassa. Primääri-ilma syötetään poltinvaunun kautta poltinmaljaan ja tällä ilmansyötöllä on oma 2,2 kW:n keskipakopuhallin. Primääri-ilma otetaan suoraan laboratoriotilasta eikä sitä lämmitetä ennen poltinmaljaan ohjaamista, vaikkakin tulipesästä tuleva lämpösäteily lämmittää ilmaa jonkin verran ennen poltinmaljaan syöttämistä. Sekundääri- ja tertiääri-ilmojen syöttö tapahtuu yhteisen 2,2 kW:n keskipakopuhaltimen kautta. Myös nämä ilmat otetaan suoraan laboratoriotilasta, mutta ennen tulipesään syöttämistä ne lämmitetään palamisilman esilämmittimessä (ks. jäljempää).

Primääri- ja tertiääri-ilmoista poiketen sekundääri-ilmakanavan puhtaaseen palamisilmaan voidaan sekoittaa kierrätettyä savukaasua (ks. jäljempää) polttoprosessin optimoimiseksi. Sekundääri-ilma puhalletaan tulipesään kolmesta palotilan seinälle symmetrisesti jaotellusta suutinaukosta. Samoin tertiääri-ilmalle on tulipesän seinällä kolme omaa puhallusaukkoa. Sekundääri-ilman aukot ovat 300 mm poltinmaljan yläpuolella ja suunnattu 45 asteen kulmassa poltinmaljaa kohti 2,5 astetta tulipesän keskiakselilta sivuun. Tertiääri-ilman aukot ovat 500 mm poltinmaljan yläpuolella ja suunnattu vaakasuoraan 2,5 astetta tulipesän keskiakselilta sivuun. [17]

Sekundääri- ja tertiääri-ilmakanavissa on ennen varsinaisia tulipesän sisäänmenoliitäntöjä käsikäyttöiset venttiilit, joilla voidaan säätää sekundääri- ja tertiääripuhaltimelta tulevan palamisilman jakautumista sekundääri- ja tertiäärikanavien välillä. Kuvassa 3.4 on tarkemmin esitelty sekundääri- ja tertiääri-ilmojen sekä kiertosavukaasun syöttöputkistoa.



Kuva 3.4: Kaaviokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteiston sekundääri- ja tertiääri-ilmojen sekä kiertosavukaasun syöttöputkistosta tulipesään. Kuvassa 1) = palamisilma laboratoriotilasta luvoon (ks. jäljempää), 2) = lämmitetty palamisilma luvosta 2.- ja 3.-ilmakanaviin, 3) = kiertosavukaasu 2.-ilmakanavaan, S1-S3 = sekundääri(2.)-ilmasyötöt, T1-T3 = tertiääri(3.)-ilmasyötöt, A) = kiertosavukaasupuhallin, a) ja b) = 2.- ja 3.-ilmojen manuaaliset säätöventtiilit. [17]

3.2.6 Stirling-moottori

Savukanavaa tarkasteltaessa välittömästi tulipesän jälkeen on vuorossa stirlingmoottori. Stirlingmoottori on JY:n mikro-CHP-laitteistossa erittäin olennainen komponentti, sillä se mahdollistaa sähköntuotannon ja on siten selvimmin erottamassa laitteistoa tavanomaisista lämmityskattilajärjestelmistä. Stirlingmoottoriksi JY:n mikro-CHP-projektissa valikoitui Solon (nyk. Cleanergy AB) V161-malli, joka on maksimiteholtaan 9 kW_e kaksisyylinterinen V-moottori [25]. Kuvassa 3.5 on esitetty JY:n mikro-CHP-laitteiston stirlingmoottori vielä asentamattomana.

JY:n koelaitteistoa varten Solon stirlingmoottori tilattiin aurinkokäyt-



Kuva 3.5: Valokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteistossa sähköntuotannosta vastaavasta Solo V161 -stirlingmoottorista laitteistoon vielä asentamattomana.

töön tarkoitettulla passiivisella ohjausautomaatiikalla, jolloin stirlingmoottori itse tarkkailee kuumen pään lämmönvaihtimen lämpötilaa ja säätää toimintaansa sen mukaan. Yksi valmistajalta tilattu muutos stirlingmoottoriin oli öljynvoitelujärjestelmän muuttaminen vastaamaan pystyasennossa tapahtuvaa käyttöä. Toinen tulevaisuudessa muutoksia vaativa osa moottorissa on kuumen pään lämmönvaihdin, johon valmistajalta ei saatu valmista ratkaisua. [17]

Solo V161 -stirlingmoottorin teknisiä ominaisuuksia ovat 160 cm^3 :n sylinteritilavuus, heliumin käyttö työkaasuna sekä työkaasun 20 – 150 bar:n paine. Moottorin tehonsäätö tapahtuu työkaasun painetta muuttamalla ja maksimibrunto- sekä maksiminettotehoksi moottorille ilmoitetaan $9,8 \text{ kW}_e$ ja $9,2 \text{ kW}_e$. Solon stirlinmoottoripaketti sisältää valmiina sähkögeneraat-

torin, joka tuottaa 400 V:n ja 50 Hz:n 3-vaihesähköä. [25, 26]

Tehdasasenteisesti Solo V161 -moottorin kuumanpään lämmönvaihdin on kaksirivinen ja lomitettu rivoittamaton ristivirtalämmönsiirrin. Tämän lämmönsiirtimen siirtoteho on noin 10 kW_h , kun arviointiperusteena käytetään työkaasun paineelle sen ylärajoilla olevia arvoja, työkaasun lämpötilana $550 - 650 \text{ °C}$ sekä jäähdytysveden tilavuusvirtauksena maksimissaan $0,56 \text{ kg/s}$. Tällöin sähkötehoksi muodostuu stirlingmoottori-sähkögeneraattoriyhdistelmällä $2 - 3 \text{ kW}_e$. Täyteen 9 kW_e :n sähkötehoon tarvittaisiin noin 32 kW_h :n siirtotehoa. [17]

32 kW_h lämmönsiirtotehon ja edelleen 9 kW_e sähkötehon saavuttaminen vaatisi rivoitettua lämmönvaihdinta. Valmistaja ei tehokkaampaa lämmönvaihdinta moottorin yhteydessä toimittanut, joten sen suunnittelu ja valmistus jäi muuta kautta toteutettavaksi. [17] Lämmönvaihtimen mitoitusta ja rivoitusta on käsitelty hyvin kattavasti Mikko Lommin Pro gradu -tutkielmassa [27], mutta kyseisenlaisen lämmönvaihtimen rakenus ja käytännöntoteutus vielä puuttuu.

Stirlingmoottorin tehokas toiminta perustuu mahdollisimman suureen lämpötilaeroon, joten kuuman pään lämmönvaihtimen lisäksi myös kylmän pään jäähdytys on olennaista. Solon V161 -moottorille on ilmoitettu, että sen sähköteho laskee jopa 40 W jäähdytysveden yhden lämpöasteen nousua kohti [17]. JY:n mikro-CHP-laitteiston kohdalla stirlingmoottorin kylmä pää jäähdytetään vesijohtoverkosta saatavalla kylmällä vedellä, jonka lämpötila vaihtelee kesän ja talven välillä. Vesijohtoveden maksimilämpötilan voidaan olettaa pysyvän alle 10 °C [17].

Hieman alle 500 kg painavaa stirlingmoottoria ei vielä ole asennettu eikä käyttöön otettu JY:n mikro-CHP-koelaitteistossa. Syynä tähän on tarve testata muuta laitteistoa ja optimoida polttoprosessia ennen sähkön tuotannon koestamista. Stirlingmoottorin asennus tapahtuu huoltotason päälle, jolloin moottorin kuuman pään lämmönvaihdin on savukaasukanavassa suoraan tulipesän yläpuolella. Stirlingmoottorille on asennusvauvu, jota käyttäen moottori työnnetään tulipesän päälle huoltotasolla olevia kiskoja pitkin.

Tällä hetkellä ensimmäisissä koeajoissa stirlingmoottorin korvaajana on TKK:lla (nyk. Aalto yliopiston teknillinen korkeakoulu) suunniteltu ja valmistettu väliaikainen lämmönvaihdin. Väliaikaisella lämmönvaihtimella on tarkoitus saada laskettua savukaasun lämpötilaa savukaasukanavassa jäljempänä olevien komponenttien kuten kiertosavukaasupuhaltimen ja savukaasun poistoimurin (ks. jäljempää) sietämille tasoille. Väliaikainen lämmönvaihdin on kolmirivinen, ristivirtatyypinen ja arvioitulta lämmönsiirtoteholtaan 40 kW_h . Tämä siirtoteho saavutetaan, kun vaihtimessa virtaa vettä $0,12 \text{ kg/s}$ ja veden lämpötila kasvaa huoneen-

lämmöstä vajaaseen sataan asteeseen. [17]

3.2.7 Palamisilman esilämmitin

Stirlingmoottorin jälkeen savukaasukanavassa on jo aikaisemmin esille tullut palamisilman esilämmitin, josta käytetään lyhennettä luvo (saks. Luftvorwärmer). Luvo on putkityyppinen, rivoittamaton ja kaksivetoinen ristivirtalämmönvaihdin, jossa sekundääri- ja tertiäripalamisilma lämpiää laboratoriotilan teoreettisesta huonelämpötilasta noin 600 °C:een. Samalla savukaasun lämpötila putoaa 850 °C:sta 650 °C:een. Näillä lämpötila-arvoilla ilman vaadittu massavirtaus on noin 24 g/s, jolloin luvo syöttää lämpötehoa sekundääri- ja tertiäri-ilmaan ja sitä kautta tulipesään noin 14,5 kW. [17]

Luvo on lämmitettävän palamisilman kulkusuunnassa U:n muotoinen. Sekundääri- ja tertiäripuhaltimelta tuleva ilma kulkee ensin alapuolella olevan 1. vedon läpi, tämän jälkeen kääntökammioon ja lopuksi ylempänä olevaan 2. vetoon. [17] Savukaasu kulkee luvossa pystysuorasti ylhäältä alaspäin.

3.2.8 Savukaasun jäädytys ja lämmön talteenotto

CHP-sovelluksissa on nimensä mukaisesti tavoitteena tuottaa sekä sähköä että lämpöä molempia. JY:n mikro-CHP-laitteistossa sähköntuotannosta vastaa kuten mainittua stirlingmoottori, jonka kylmän pään jäädytyksessä voidaan saada talteen jonkin verran lämpöä. Varsinaiset lämmön talteenottimet eli ekonomaiserit sijaitsevat kuitenkin savukaasukanavassa palamisilman esilämmittimen jälkeen. Ekonomaisereita on kaksi kappaletta ja ne sijaitsevat savukaasukanavassa peräkkäin siten, että ekonomaiseri 1 on ekonomaiseri 2:en yläpuolella. Savukaasukanava kulkee ylhäältä alaspäin eli ensin ekonomaiseri 1 ja sen jälkeen ekonomaiseri 2 läpi. Lämpiviä syöttövesi taas virtaa päinvastaiseen suuntaan eli aluksi ekonomaiseri 2:seen ja tämän jälkeen ylempänä olevaan ekonomaiseri 1:seen.

Syöttöveden lämmittämisen lisäksi ekonomaisereiden tärkeänä tehtävänä on jäädyttää savukaasu laitteiston loppuosassa sijaitsevien komponenttien kuten kiertopuhaltimen ja poistoimurin (ks. jäljempää) sietämille tasoille. Teoreettisesti savukaasut jäähtyvät ensimmäisessä ekonomaisereissa 650 °C:sta noin 300 °C:aan ja jälkimmäisessä ekonomaisereissa edelleen 300 °C:sta noin 180 °C:een. Jos syöttöveden virtaus on laskennallisesti noin 0,47 kg/s, nousee veden kokonaislämpötila suunnilleen 25 °C. Lämmönsiirtoteho on tällöin ensimmäiselle ekonomaiserialle noin 29 kW ja toiselle ekonomaiserialle noin 6 kW. [17]

Molemmat ekonomaiserit ovat peruspiirteiltään hyvin samanlaisia ja suurimpana erona on ensimmäisen ekonomaiserin ympäröivä vesikiertoon perustuva jäähdytysvaippa. Ylimääräistä jäähdytystä tarvitaan, sillä ensimmäisen ekonomaiserin kohdalla saapuvan savukaasun lämpötila voi olla vielä huomattavan korkea. [17]

3.2.9 Savukaasun kierrätys ja poisto

Laitteiston hyötysuhteen parantamiseksi ja tulipesän lämpötilaerojen tasaamiseksi kuumaa savukaasua tulee JY:n mikro-CHP-laitteistossa kierrättää takaisin tulipesään. Takaisinkierrätettävä savukaasu voidaan ottaa ensimmäisen ja toisen ekonomaiserin välistä sekä toisen ekonomaiserin jälkeen. Kahdesta kohtaa otettavien erilämpötilaisten savukaasujen suhdetta säädetään paineilmalla toimivilla automaattiventtiileillä. Tällöin kierrätettävä savukaasu voi olla vain yhdestä kohtaa savukanavaa otettua tai kahden eri lämpötilassa olevan kaasun sekoitusta.

Ensimmäisen ja toisen ekonomaiserin välissä olevassa kiertosavukaasun ottopisteessä kaasun lämpötila on teoreettisesti noin 300 °C ja toisen ekonomaiserin jälkeisessä ottopisteessä noin 180 °C. Savukaasun lämpötilat eri ottopisteissä ovat olennaisia, sillä valmistajan ilmoittama lämpötilankesto kiertosavukaasupuhaltimelle on 300 °C. [17]

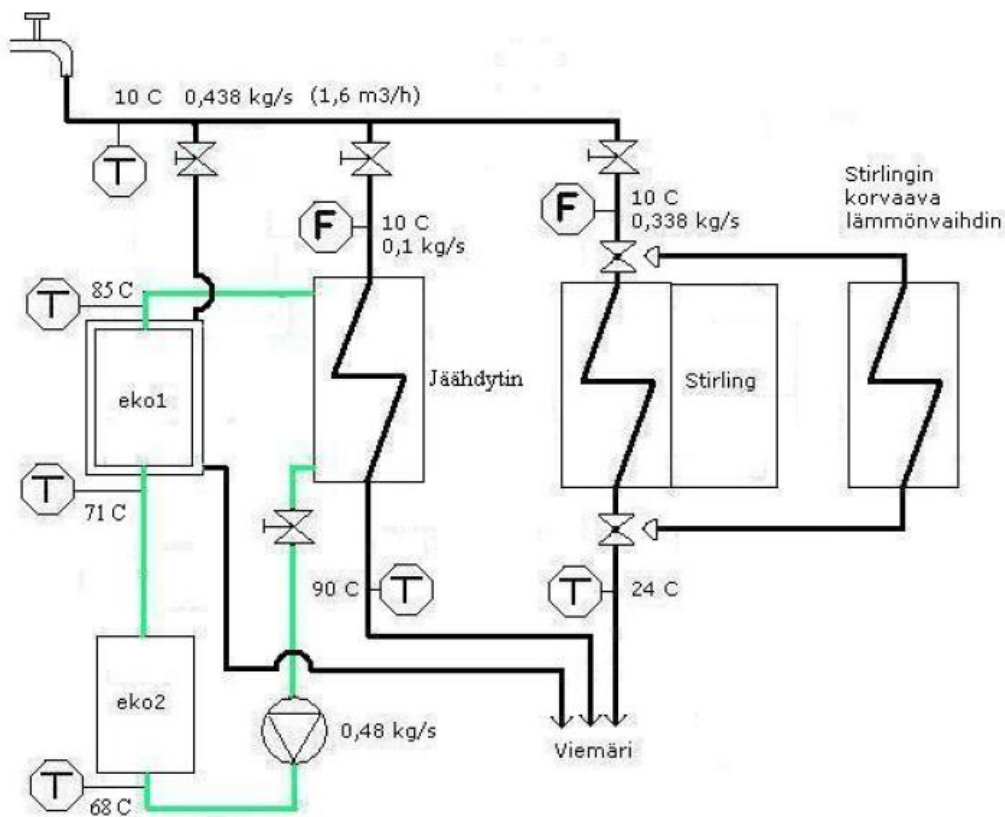
Automaattiventtiileillä säädetty kierrätettävä savukaasu puhalletaan 2,2 kW:n keskipakopuhaltimelta sekundääri-ilman syöttöputkistoon, jossa savukaasu sekoittuu palamisilman esilämmittimeltä tulevaan puhtaan ilmaan. Kiertosavukaasua ei siis voida sekoittaa primääri- tai tertiääri-ilmaan vaan ainoastaan sekundääri-ilmaan.

Prosessista poistettava ja savupiippuun menevä savukaasu otetaan savukaasukanavasta jälkimmäisen ekonomaiserin jälkeen. Savukaasun poistosta vastaa samantyyppinen 2,2 kW:n keskipakopuhallin kuin mitä kiertosavukaasupuhallinkin on. Suurin ero kiertosavukaasupuhaltimen ja savukaasun poistoimurin välillä on lämmönsietokyky, joka poistoimurilla on vain 180 °C. Tästä johtuen toisen ekonomaiserin jälkeistä savukaasun lämpötilaa tulee tarkkailla laitteistoa ajettaessa.

JY:n mikro-CHP-laitteiston savukaasukanavassa järjestyksessä edeten kiertosavukaasupuhallin ja savukaasun poistoimuri ovat viimeisiä prosessiin vaikuttavia yksittäisiä komponentteja.

3.2.10 Laitteiston jäähdytys

JY:n mikro-CHP-laitteistossa lämmön talteenottoa ei todellisuudessa ole toteutettu, joten stirlingmoottorilta ja ekonomaisereilta tuleva lämpö on



Kuva 3.6: Kaaviokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteiston jäähdytysputkistosta laskennallisine toimintaparametreineen. Kuvassa avoin kierto on merkitty mustalla, suljettu kierto vihreällä, lämpötila-anturit T-kirjaimella ja tilavuusvirtausmittarit F-kirjaimella. [17]

jäähdytettävä muulla tavalla. Laitteiston jäähdytys on toteutettu osittain avoimella ja osittain suljetulla vesikierrolla. Avoimessa kierrossa viileä jäähdytysvesi otetaan vesijohtoverkosta ja lämmönvaihtimien jälkeinen kuuma jäähdytysvesi päättyy viemäriin. Suljetussa kierrossa kiertävä vesi jäähdytetään avoimeen kiertoon liitetyllä jäähdyttimellä, jolloin suljetun kierros saama lämpö päättyy myös avoimeen kiertoon ja sitä kautta viemäriin.

Avoim kierto jakaantuu kolmeen eri piiriin, jotka ovat stirlingmoottorin kylmän pään lämmönvaihtimelle, ekonomaisereiden suljetun kierros lämmönvaihtimelle ja ensimmäisen ekonomaiserin jäähdytysvaipalle menevät jäähdytysvesilinjat. Avoimessa jäähdytyskierrossa vesi virtaa vesijohtoverkon paineen aikaansaamana. Suljettu jäähdytyskierto koostuu

ekonomaisereiden läpi kulkevasta vesiputkistosta, vakiokierroksilla toimivasta kiertovesipumpusta sekä avoimeen jäähdytyskiertoon liitetystä levylämmönvaihtimesta [17]. Jäähdytysvesi kulkee suljetussa piirissä ekonomaiseri 2:lle, tämän jälkeen ekonomaiseri 1:lle ja lopulta levylämmönvaihtimelle.

Kuvassa 3.6 on esitetty laitteiston jäähdytysputkisto ja annettu laskennallisia esimerkkisarvoja veden lämpötilasta ja virtauksesta kohdissa, joissa anturit ja mittarit löytyvät.

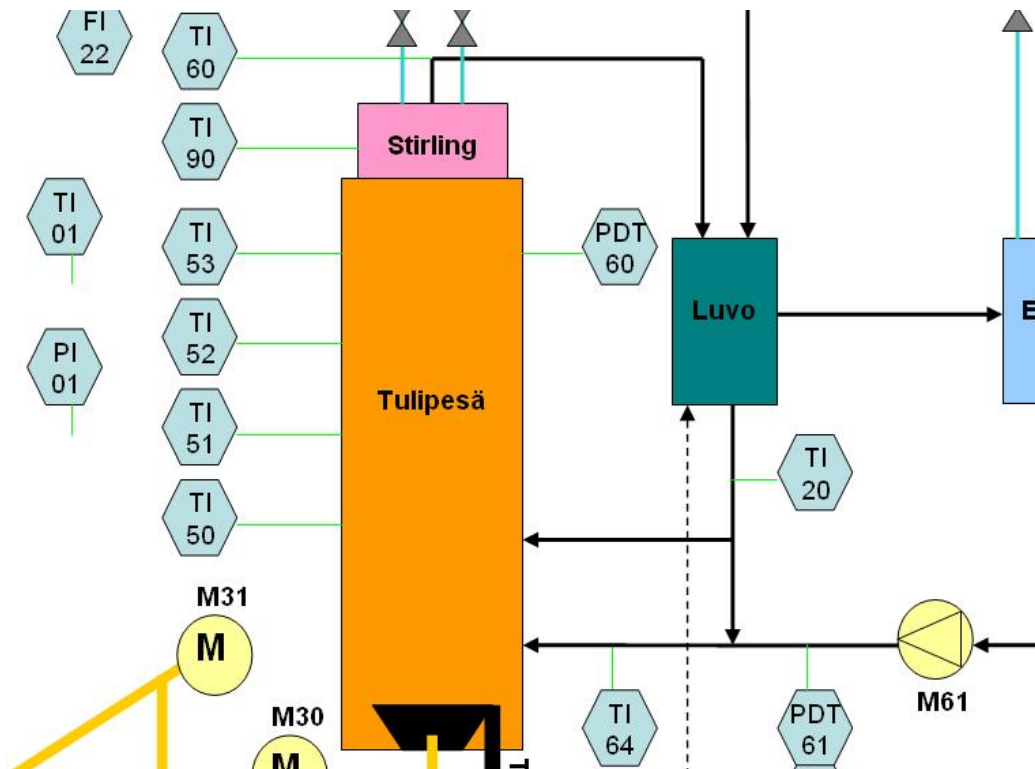
3.2.11 Anturit, mittarit ja analysaattorit

Useasta kohtaa JY:n mikro-CHP-laitteistoa tarvitaan mittaustietoa prosessin valvontaa, säätöä ja optimointia varten. Tämän vuoksi laitteisto sisältää yhteensä 30 erillistä mittalaitetta, joista kaksi on analysaattoreita ja loput mittareita tai antureita. Antureista ja mittareista 18 on tarkoitettu lämpötilan, 2 paineen, 2 paine-eron ja 6 virtauksen mittaamiseen. Analysaattoreista toinen on hiukkasten pitoisuusanalyysiä ja toinen häkä- sekä happipitoisuuden mittausta varten. Liitteessä A on esitetty JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaavio kaikkine mittauspisteineen ja mittalaitteineen.

Lämpötila-antureita sijaitsee tulipesässä (4 kpl) ja savukaasukanavassa (6 kpl) sekä palamisilma- (1 kpl) ja jäähdytysvesiputkistossa (6 kpl). Näiden lisäksi laboratorioilman lämpötilaa mittaa yksi lämpötila-anturi. Yksittäisenä paikkana tulipesään tarvitaan useita antureita, koska pesän lämpötilajakauma on tärkeää tietää tarkoin (ks. luku 3.5). Koko prosessin korkeimmat lämpötilat esiintyvät tulipesässä, joten siellä olevat anturit (TI 50, TI 51, TI 52, TI 53) ovat maksiminäyttämältään 1500 °C olevia S-tyypin (platina-rhodium) termopareja [1].

Savukaasukanavassa olevat lämpötila-anturit on asennettu laitteistoon mahdollisimman kattavasti siten, että lämpötilat tunnetaan lähes jokaisessa kohdassa savukanavaa - niin lämmönvaihtimien kuin savu- ja ilman kanavien yhdistymiskohtienkin jälkeen. Heti tulipesän yläpuolella ennen stirlingmoottoria oleva lämpötila-anturi (TI 90) on samaa S-tyyppiä kuin tulipesän anturit, mutta muualla savukanavassa olevat anturit (TI 60, TI 62, TI 63, TI 64, TI 65) ovat maksimissaan 1000 °C näyttäviä K-tyypin (chromel-alumel) termopareja tai 500 °C:n maksiminäyttämällä olevia Pt-100-vastusantureita [1].

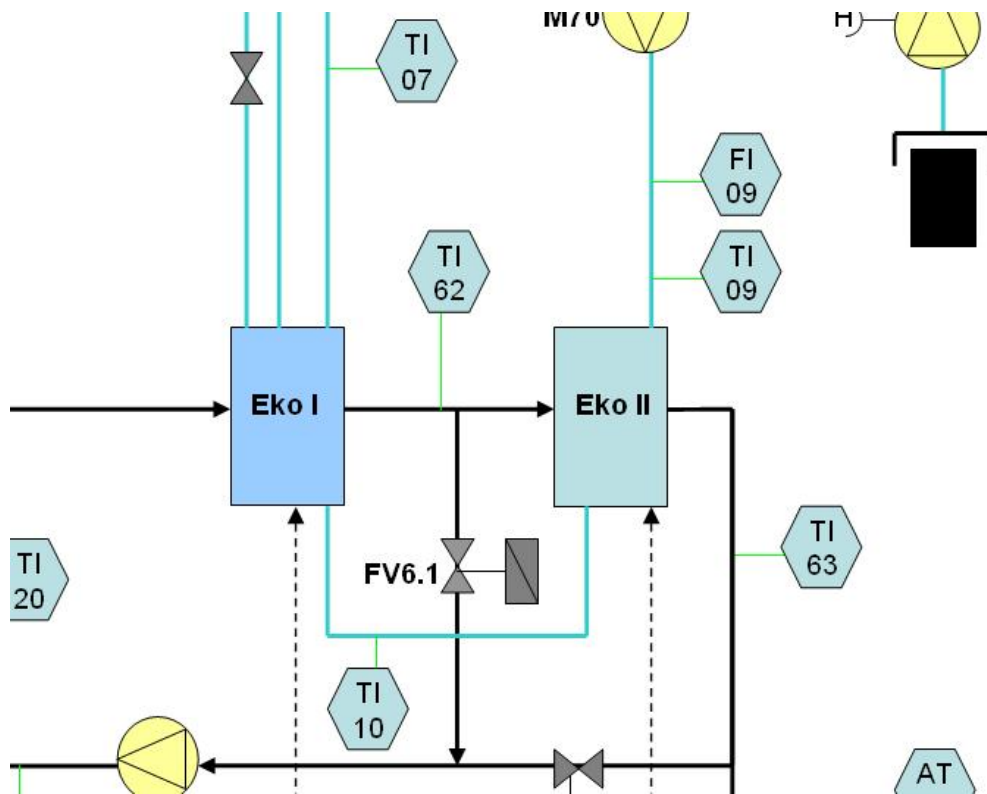
Ainoa palamisilman lämpötilaa mittaava anturi (TI 20) on asennettu palamisilman esilämmittimen jälkeiseen ilmakeenavaan ja tämä anturi on K-tyypin termopari. Primääri-ilman lämpötilan suuruusluokkaa voidaan arvioida Pt-100-tyypin laboratorio-ilman lämpötilaa mittaavalla anturilla (TI 01), jolle maksiminäyttämä on 150 °C. [1]



Kuva 3.7: Osa JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaaviota tulipesän kohdalta. Kuvassa näkyvät lämpötila-antureista tulipesän TI 50, TI 51, TI 52 ja TI 53, savukaasukanavan TI 90, TI 60 ja TI 64, laborioritilan TI 01 sekä palamisilman TI 20. Paine-/paine-eroantureista näkyvissä on laborioritilan PI 01, tulipesän PDT 60 sekä annubar-pitot-putkeen liittyvä PDT 61.

Jäähdytysvesiputkiston anturointi (TI 02, TI 04, TI 05, TI 07, TI 09, TI 10) on jaoteltu siten, että kiertävän veden lämpötila saadaan selville heti vesijohtoverkosta tullessaan sekä jokaisen lämmönvaihtimen jälkeen lukuun ottamatta ensimmäisen ekonomaiserin jäähdytysvaippaa. Jäähdytysvesianturit ovat kaikki 150 °C:n maksiminäyttämällä olevia Pt-100-tyypin vastusantureita [1].

Kahdesta paineanturista ensimmäinen (PI 01) on malliltaan ilmanpaineen seurantaan tarkoitettu 80–120 kPa (0,8–1,2 bar) absoluuttipaineanturi [17]. Se on sijoitettu laborioritilan seinälle ja mittaa laborioritilan absoluuttipainetta. Toinen paineanturi (PI 60) sijaitsee kiertosavukaasukanavassa annubar-pitotputken yhteydessä mitaten staattista absoluuttipai-



Kuva 3.8: Osa JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaaviota ekonomaisereiden kohdalta. Kuvassa näkyvät lämpötila-antureista suljetun jäähdytysvesikierron TI 07, TI 09 ja TI 10 sekä savukaasukanavan TI 62 ja TI 63. Lisäksi näkyvissä on suljetun jäähdytyskierron virtausmittari FI 09.

netta 160 kPa:iin (1,6 bar:iin) asti [1]. Painetietoa tässä viimeksi mainitussa kohdassa tarvitaan määrittäessä savukaasun ja puhtaan palamisilman sekoittumista ennen tulipesään syöttöä [17].

Paine-eroa mittaavista antureista ensimmäinen (PDT 60) on malliltaan DPT-1000 (mittausalue 0 – 1000 Pa) ja sillä saadaan selville tulipesän ja ympäristön välinen paine-ero. Anturin toinen pää on siis kytketty tulipesään ja toinen pää on avoimena laboratoriotilassa. Tulipesän alipaineen mittaaminen ja ylläpitäminen on olennaista, jotta tulipesästä ei työnny savukaasuja laboratoriotilaan. Toinen paine-eroanturi (PDT 61) on kytketty annubar-pitotputken yhteyteen kertomaan kiertosavukaasukanavan paine-eroa laboratoriotilan paineeseen verrattuna. Tämä anturi on malliltaan DPT-250 (mittausalue 0 – 100 Pa). [17]

Virtausantureista kaksi (FI 11, FI 22) on sijoitettu primääripuhaltimen sekä sekundääri- ja tertiääripuhaltimen ilmanottokanaviin ja ne ovat tyypiltään termisiä virtausnopeusantureita [28]. Kyseiset anturit mittaavat ilman virtausnopeutta, josta saadaan laskettua massavirtaus ilman tiheyden, ilmanottokanavan poikkipinta-alan ja virtauksen nopeusjakaumasta riippuvan kertoimen avulla [17]. Massavirtauksen laskeminen tehdään ohjelmoitavan logiikan (ks. jäljempää) avulla.

Kolmas kaasunmittaukseen käytettävä virtausanturi (PDT 21) on annubar-pitotputki. Se sijaitsee kiertosavukaasukanavassa ja mittaa kiertosavukaasun virtausnopeutta. Kyseiseen virtausnopeuden mittaukseen liittyvät myös muut annubar-pitotputken yhteyteen kytketyt anturit (lämpötila, staattinen absoluuttipaine, paine-ero) ja kaikkien näiden sekä kanavan ominaisarvojen avulla voidaan lopulta määrittää kiertosavukaasun massavirtaus. [17] Eri antureilta tulevan datan yhdistäminen tapahtuu ohjelmoitavassa logiikassa (ks. jäljempää).

Kolme jäljelle jäävää virtaukseen liittyvää mittalaitetta sijaitsevat jäähdytysvesikierrossa ja ne ovat tyypiltään siipipyörämittareita [17]. Virtausmittareista yksi (FI 02) sijaitsee stirlingmoottorille menevässä jäähdytysvesilinjassa, yksi (FI 03) suljetun jäähdytyskierron lämmönvaihtimelle menevässä piirissä sekä yksi (FI 09) ekonomaisereiden suljetussa jäähdytysvesikierrossa. Ekonomaiseri 1:n jäähdytysvesivaipan läpi kulkevassa linjassa ei ole virtausmittaria kuten ei ole vaipanjalkeista lämpötila-anturiakaan.

Edellä mainittujen ohjelmoitavaan logiikkaan (ks. jäljempää) kytkettyjen virtausmittareiden lisäksi avoimen jäähdytysvesikierron päälinjassa heti vesijohtoverkon tuloliitännän jälkeen on manuaalisesti luettava virtausmittari. Tällä mittarilla mitataan koelaitteiston jäähdytysveden kokonaiskulutusta.

Laitteistoon asennetut kaksi savukaasuanalysointilaitetta sijaitsevat aivan prosessin loppupäässä savukaasun poistopuhaltimen jälkeen ennen savupiippua. Analysointilaitteet ovat jatkuvatoimisia eli ne suorittavat savukaasun mittausta jatkuvasti [17]. Pölyanalysointilaitteisto (AT 62) mittaa savukaasun hiukkaspitoisuutta ja se sisältää elektrodynaamisella mittauserialla toimivan anturin sekä ohjausyksikön [29]. Ohjausyksiköstä voidaan säätää analysointilaitteen asetuksia ja tarkastella laitteen antamaa hiukkaspitoisuusarvoa. Pölyanalysointilaitteen mittaustilasto on 0,01 – 1000 mg/Nm³ [17].

Toinen analysointilaitteisto (AT 60.1, AT 60.2) on happi- ja häkäpitoisuuksien mittaukseen. Kyseinen analysointilaitteisto sisältää näytteenotto-sondin, lämmitettävän näytelinjan, vesipesunäytteenkäsittelyn sekä itse analysointilaitteen. Analysointilaitteistossa on happi- ja häkämittaukselle omat anturinsa, joita ovat paramagneettinen anturimoduuli happipitoisuuden ja infrapuna-kaasukorrelaatioanturimoduuli häkäpitoisuuden mittaukseen.

Happimittausmoduulin mittausalue on 0 – 25 % ja häkämittausmoduulin mittausalue on 0 – 200/3000 ppm käyttäjän valinnan mukaan. [30] Happi-/häkäanalysaattorisysteemiä ei ole vielä käyttöön otettu JY:n mikro-CHP-laitteistossa.

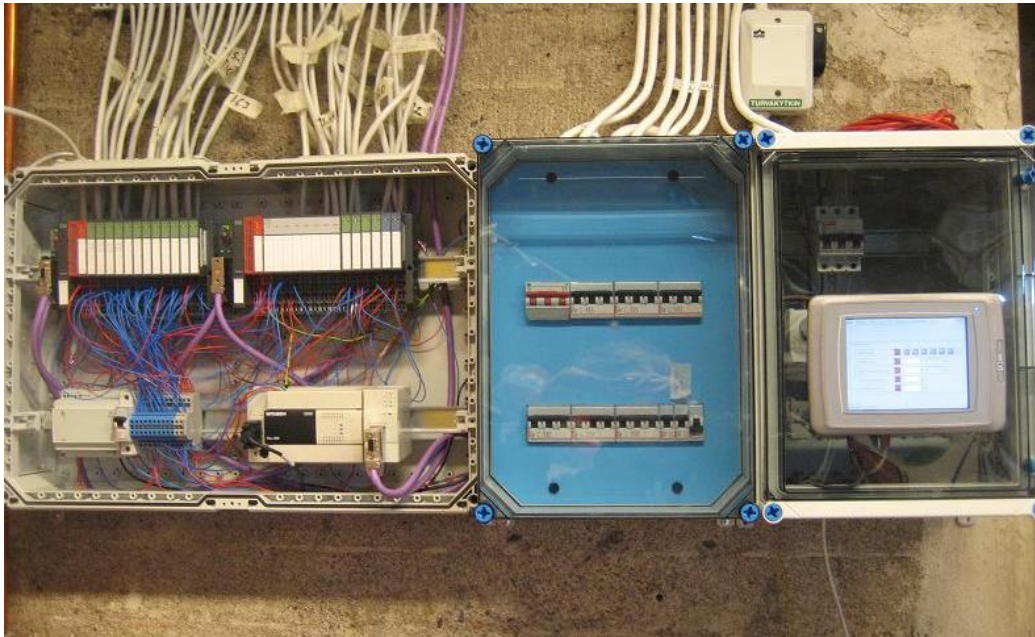
Vesijohtoverkon tuloliitännän yhteydessä olevaa veden kokonaisvirtausmittaria lukuun ottamatta kaikki anturit, mittarit ja analysaattorit ovat kytkettyjä ohjelmoitavaan logiikkaan (ks. jäljempää) ja siten sähköisesti luettavissa. Mittalaitteiden ja ohjelmoitavan logiikan välillä tieto kulkee kahdella eri tavalla. Kolmelta jäähdytysvesikiertoon asennetulta siipipyörämittarilta tieto lähetetään digitaalisessa muodossa, sillä mittarit vaihtavat 20 mA virtaviestin päälle ja pois päältä jokaisen kymmenen litran välein. Muuten antureilta ja analysaattoreilta tuleva mittaus tieto siirretään ohjauslogiikalle analogisina 4 – 20 mA virtaviesteinä.

3.2.12 Ohjaus- ja säätökomponentit

JY:n mikro-CHP-koelaitteiston ohjaus ja prosessin säätö on toteutettu suurelta osin automaatiolaitteiden avulla. Käytettyjä automaatiolaitteita ovat Mitsubishin ohjelmoitava Melsec FX3U-32M -kompaktilogiikka, tähän liitetty FX3U-64DP-M Profibus-DP -kommunikaatiomoduuli ja kaksi Melsec-sarjan hajautettua I/O(sisääntulo/ulostulo)-alustaa (ks. kuva 3.9) [31]. Näiden automaatiokomponenttien lisäksi laitteistossa on kuusi erillistä Emerson Commander SK -taajuusmuuttajaa sekä Mitsubishin E1071-operointipääte (engl. HMI, Human-Machine Interface). Ohjelmoitava logiikka on kytketty hajautettuihin I/O-alustoihin ja taajuusmuuttajiin Profibus(Process Field Bus)-kenttäväylää käyttäen [31]. Operointipäätteen liittäminen ohjelmoitavaan logiikkaan on toteutettu RS-232-sarjaväylällä.

Kompaktilogiikka sisältää ohjauksen ja säädön älykkyyden, sillä siihen voidaan ladata laitteiston toimintaa automatisoiva ja sähköisiä ohjauslaitteita ohjaava ohjelmisto. Käytännössä tämä ohjelmisto tarkoittaa mittalaitteiden antamien arvojen lukua, lukuarvojen vaatimaa käsittelyä ja käyttäjän antamien tai automatisoitujen ohjaukskäskyjen välittämistä laitteiston ohjattaville komponenteille. Ohjelmistoja luodaan kompaktilogiikalle valmistajan laitteiden mukana toimittamilla kehitystyökaluilla. [31]

Hajautettuihin I/O-alustoihin on kytketty I/O-moduuleita, jotka ovat joko A/D(analogi/digitaali)- tai D/A(digitaali/analogi)-tyyppisiä. Näistä ensin mainituilla muunnetaan mittauslaitteilta tuleva virtaviestitieto logiikan ymmärtämään digitaaliseen muotoon. Jälkimmäisillä eli D/A-moduuleilla ohjataan savukaasun kierrätyksessä käytettäviä automaattiventtiileitä siten, että moduuli muuntaa logiikan antaman digitaalisen ohjaustiedon venttiilin ymmärtämäksi virtaviestiksi. [17, 31]



Kuva 3.9: Valokuva Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteistossa ohjaukseen ja säätöön käytettävistä automaatiokomponenteista. Kuvan vasemmassa reunassa on Mitsubishin Melsec FX3U-32M -kompaktilogiikka, FX3U-64DP-M Profibus-DP -kommunikaatiomoduli sekä kaksi Melsec-sarjan hajautettua I/O-alustaa. Kuvan oikeassa reunassa näkyy ohjauksen ja säädön käyttöliittymänä toimiva Mitsubishin E1071-operointipääte.

Laitteistossa olevaa kuutta taajuusmuuttajaa käytetään kuuden eri sähkömoottorin ohjaukseen. Nämä moottorit ovat pellettisyöttöä suorittavat varastoruuvien ja syöttöruuvien sähkömoottorit sekä palamisilman ja savukaasun puhaltamiseen liittyen primääripuhaltimen, sekundääri- ja tertiääripuhaltimen, kiertosavukaasupuhaltimen ja savukaasun poistoimurin sähkömoottorit. Taajuusmuuttajilla voidaan muuttaa sähkömoottoreiden pyörimistaajuutta välillä 0 – 50 Hz. [17]

E1071-operointipääte toimii HMI(Human Machine Interface)-käyttöliittymänä laitteiston ohjauksessa ja säädössä sekä komponenttien tilan tarkastelussa. Operointipääte perustuu kosketusnäyttöperiaatteeseen ja siitä voidaan reaaliajassa nähdä prosessin mittauspisteistä saatua mittaus-tietoa sekä muuttaa sähköisesti ohjattavien laitteiden toimintaparametreja. Operointipäätteessä on verkkoyhteysvalmius, joka tarkoittaa sitä, et-

tä kaikki automaatiokomponentteihin liittyvä ohjaus ja mittaustiedon tarkastelu voidaan tarvittaessa hoitaa etäkäytettävästi. Ohjauksen, säädön ja mittaustiedon tarkastelun lisäksi operointipääte toimii mittaustiedon kerääjänä (engl. Data Logger). [32] Mittaustiedon keruuseen E1071-operointipäätteellä palataan yksityiskohtaisemmin luvussa 4.3.

Tarkemmin JY:n mikro-CHP-koelaitteiston ohjaus- ja säätökomponentteja - lukuunottamatta operointipäätettä - sekä kompaktilogiikkaan tehtyä ohjelmistoa on käsitelty Antero Vauhkonen opinnäytetyössä [31].

Edellä esiteltyjen automaatiolaitteiden lisäksi prosessin säätöön käytetään myös muutamia käsikäyttöisiä venttiileitä. Sekundääri- ja tertiääri-ilmapuhaltimelta ja edelleen luvolta tulevan ilmakehän jakautuessa erillisiksi sekundääri- ja tertiäärikanaviksi on näissä kummassakin haarassa käsikäyttöiset venttiilit virtaussuhteiden hallintaan. Lisäksi jäähdytysvesikierrossa on käsikäyttöisiä venttiileitä siten, että avoimen kierron kokonaispainetta ja -virtausta sekä päälinjasta jakaantuvien kolmen eri piirin paineita ja virtauksia voidaan säädellä kussakin linjassa olevilla käsikäyttöisillä venttiileillä. Myös suljetun jäähdytysvesikierron virtausta säädellään käsikäyttöisellä venttiilillä, jonka lisäksi painetta ja putkistossa olevaa veden määrää säädellään käsipumpulla. [17]

3.3 Ohjaus

Mikro-CHP-laitteiston ohjaukseen kuuluu mittalaitteiden antamien tietojen monitorointi sekä ohjausparametrien säätö aikaisemmin määritettyjen ja ajon aikana saatujen tietojen mukaisesti. Monitoroitavia kohtia ovat erityisesti tulipesän lämpötila-anturit sekä muut savukaasukanavassa olevat lämpötilan mittauspisteet. Lisäksi on olennaista valvoa jäähdytysvesikiertojen lämpötiloja ja virtauksia, jotta lämpötilat pysyvät laitteiston komponenttien sietokyvyn rajoilla ja jotta nähdään, että jäähdytys ylipäättään toimii. Tulipesän paine-ero laboratoriotilan kanssa on myös yksi erityistä huomiota vaativa muuttuja. JY:n mikro-CHP-laitteistossa on sekä ohjelmoitavan logiikan kautta että manuaalisesti muutettavia ajoparametreja ja yhteensä eri säätökohteita on reilut kymmenen.

Sähköisesti automaatiolaitteiston kautta voidaan säätää seitsemää eri ajoarvoa. Ensimmäinen on polttoaineensyöttö eli laitteiston polttoainetehto, jota voidaan ohjata säätämällä pellettiä kuljettavien ruuvikuljettimien nopeutta. Alun perin varasto- ja syöttöruuvien toiminta oli ajateltu toteutettavan niin, että varastoruuvi pyörisi jatkuvasti ja sen nopeutta muuttamalla pellettisyötön massavirta saataisiin halutun suuruiseksi [17]. Syöttöruuvien oli taas tarkoitus pyöriä aina kaksinkertaisella varastoruuvien no-

peudella minimoiden näin tukkeumien muodostuminen [17]. Nyt asennetuilla sähkömoottoreilla tällainen käyttö ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä varastoruuvien moottorissa ei riitä vääntö pienillä kierroksilla.

Toimivaksi toteutukseksi muotoutui polttoaineen massavirran määrittäminen varastoruuvien pyörimistä jaksottamalla siten, että kyseisen ruuvien pyöriessä moottorin nopeus on aina maksimissaan. Syöttöruuvi taas pyörii aina syötön ollessa päällä maksiminopeudella kuljettaen kaiken varastoruuvien tuoman pelletin poltinmaljaan. Tällä hetkellä käytössä olevassa ohjauksessa pelletinsyöttöä ei valita portaattomasti, kuten alkuperäisissä suunnitelmissa oli ajateltu, vaan syötölle on automatiikassa portaittain eri tehoarvoja, joista käyttäjä valitsee haluamansa.

Alustavissa suunnitelmissa polttoaineensyötön suunniteltiin myös seuraavan automaattisesti tulipesän lämpötilarajoja siten, että asetettujen raja-arvojen ylittyessä polttoaineensyöttö hidastuu ja arvojen alittuessa syöttö nopeutuu [17]. Tällaista automatiikkaa ohjaukseen ei kuitenkaan ole käytännön tasolla nähty tarpeelliseksi toteuttaa tässä vaiheessa koeajoja.

Toinen merkittävä ohjelmoitavan logiikan sisältämä säädettävien parametrien joukko on ilmapuhaltimien ohjaus taajuusmuuttajien avulla. Primääri-ilmalla on oma puhallin, jonka pyörimisnopeus tulee täsmätä sekundääri- ja tertiääripuhaltimen nopeuden kanssa siten, että tulipesään puhallettu kokonaisilmamäärä vastaa polttoainemassavirran vaatimaa ilmamäärää. Lisäksi esisuunnittelujen mukaisesti primääri- sekä sekundääri- ja tertiääri-ilman syöttöjen tulee tulipesässä tapahtuvan palon optimoimiseksi jakautua seuraavanlaisessa massasuhteessa: primääri 40 %, sekundääri 30 % ja tertiääri 30 %. [17]

Sekundääri- ja tertiääri-ilman kohdalla puhaltimella säädetään yhteenlaskettu ilmamäärä, mutta ilman jakaantuminen eri syöttöjen kesken määritetään ilmansyöttölinjoissa olevilla manuaalisilla venttiileillä. Venttiileillä palamisilma voidaan ohjata joko sekundääri- tai tertiäärikanavaan, tai sopivassa suhteessa kumpaankin niistä. [17]

Alun perin myös ilmansyötöille suunniteltiin automaattiohjausta siten, että primääri-ilmasyötön ajateltiin noudattelevan polttoaineen syöttönopeutta sekä sekundääri- ja tertiääri-ilmasyötön jäännöshappipitoisuutta [17]. Kuten polttoainesyötönkin kohdalla, kyseisenlaista automaattiohjausta ei käytännöntasolla ole toteutettu. Pääsyyinä tähän on aikaisemmin esille tulleen mukaisesti se, että jäännöshappitietoa antavaa kaasuanalysointia ei ole vielä käytöön otettu.

Kolmas merkittävä ohjelmoitavan logiikan kautta säädettävä kokonaisuus on kierrätettävän savukaasun osuus kokonaisavukaasuvirtauksesta. Savukaasua kierrätettäessä määritetään aluksi kummankin ekonomiserin jälkeisen automaattiventtiilin avauma. Periaatteena on, että venttiili-

lien yhteysavauma säilyy koko ajan samana. Muuttamalla venttiilien avauksen suhdetta voidaan määrätä kierrätettävän savukaasun lämpötila ja massavirta halutunlaiseksi. Näistä varsinkin lämpötilatieto on erityisen merkityksellinen kiertosavukaasupuhaltimen 300 °C:n maksimilämpötilansietoa ajatellen. [17]

Kun sopiva kiertosavukaasukoostumus on määrätty automaattiventtiileillä, voidaan niiden jälkeisellä kiertosavukaasupuhaltimella vaikuttaa kierrätettävän kaasun massavirtaan säätämällä puhaltimen pyörimisnopeutta. Tämän lisäksi kyseisellä puhaltimella säädetään kiertosavukaasun painetta. Kierrätettävän kaasun paine tulee nostaa tulipesän painetta vastaavaksi, jotta kaasun syöttö tulipesään on ylipäätään mahdollista. [17]

Koska kiertosavukaasu yhdistyy sekundäärikanavassa puhtaaseen palamisilmaan, on savukaasua kierrätettäessä säädettävä myös sekundääri-/tertiäripuhaltimen pyörimisnopeutta sekä sekundääri- ja tertiärikanavissa olevia manuaalisia venttiileitä. Kaikkien näiden yhtäaikainen säätäminen on tärkeää, jotta ilman ja savukaasun sekoittumisen pääsee tapahtumaan. [17] Laitteiston ohjausta savukaasun kierrätyksen osalta ei ole käytännötasolla testattu, sillä automaattiventtiileiden käytössä on ilmennyt muutamia ongelmia.

Edellisten lisäksi vielä yksi automaatiolaitteistoon sisällytetty säätökohde on poistoimurin pyörimisnopeuden säätäminen. Poistoimurin tehtävänä on pitää prosessi alipaineisena ympäristöön verrattuna, jolloin poistoimurin nopeussäätöön vaikuttaa vain tulipesän ja laboratoriotilan välinen paine-ero. Jos tulipesä ei ole alipaineinen, tulee poistoimurin pyörimisnopeutta lisätä ja päinvastoin. [17] Käytännössä poistoimurin pyörimisnopeuden lisäys yhdistyy palamisilmapuhaltimiin, sillä lisäämällä palamisilman puhallusta prosessiin kasvaa paine tulipesässä. Tällöin poistoimurilta tarvitaan yhä suurempaa poistotehoa. Polttoaineen- ja palamisilman syöttöjen tavoin myöskään poistoimurin toimintaa ei ole käytännötoteutukseltaan tehty automaattiseksi, vaikka alustavissa suunnitelmissa näin kaavailtiin.

Laitteiston ohjauksessa viimeinen laajempi kokonaisuus on jäähdytysvesikierron käsikäyttöisten venttiilien avauman säätö, joka on siis jätetty automaatiolaitteiston ulkopuolelle. Peruseriaatteeltaan näiden manuaalisten venttiilien tulee vain olla riittävän auki, jotta kaikissa jäähdytyskierröissä kiertää vesi. Erityisesti huoltotasolla olevan stirlingmoottorin tai väliaikaisen lämmönvaihtimen jäähdytyskierron venttiilin tulee olla lähes täysin auki, jotta vesijohtoverkon vedenpaine riittää nostamaan jäähdytysveden huoltotasolle usean metrin korkeuteen. Toisaalta jäähdytysvesikierron manuaalisia venttiileitä säädettäessä on huomioitava, että tarpeetoman isolle säädetyt venttiilit saattavat aiheuttaa niin ison vesivirtauk-

sen, että jäähdytysveden lämpötila ei nouse juuri lainkaan. Tämä taas ei anna kovinkaan havainnollista kuvaa prosessiin toiminnasta.

3.4 Koeajot

Vuoden 2009 lopussa ja vuoden 2010 alussa JY:n mikro-CHP-laitteistolla suoritettiin useita koeajoja. Koeajojen aikana laitteistossa oli käyttöön otettuina kaikki olennaiset komponentit lukuun ottamatta stirlingmoottoria sekä happi- ja häkäanalyysointisysteemiä. Lisäksi savukaasunkieritys ei ollut käytössä muutamien automaattiventtiileihin liittyvien ongelmien vuoksi.

Laitteistopuutteista ainoastaan happi- ja häkäanalyysointisysteemin poisjäämistä voidaan pitää selkeänä puutteena. Hään ja erityisesti jäänöshapen pitoisuuksien tietäminen savukaasusta olisi heti alusta lähtien erittäin olennaista. Stirlingmoottori liittyy sähköntuotannon koestukseen ja automaattiventtiilit taas savukaasun takaisinkieritykseen, jolloin kyseisten komponenttien mukanaolo epäilemättä lisäisi prosessin säädön monimutkaisuutta. Laitteiston koeajoja aloitettaessa tulee edetä vaihe kerrallaan, joten sähköntuotannon tai savukaasun takaisinkierityksen mukanaolo heti alkuvaiheessa ei ole perusteltua.

Koeajot aloitettiin pienellä noin 20 kW:n polttoaineteholla. Vähitellen laitteistotuntuman parantuessa polttoainetehoa kasvatettiin noin 45 kW saakka. Kaikki ohjaukseen liittyvät säädöt tehtiin koeajoissa käyttäjän toimesta - joko käsin tai automaatiologiikan kautta - eikä minkäänlaisia suureiden välisiä riippuvuuksia tai takaisinkytkentöjä ollut ohjelmoitavassa logiikassa käytössä. Luvussa 3.3 esitettyjen ohjauksen periaatteiden mukaisesti tärkeimmät säätökohteet olivat pelletinsyötön, palamisilmapuhaltimien ja savukaasun poistoimurin sekä jäähdytysvesikierron venttiilien säätäminen.

Kenties selvin koeajoissa esiin noussut havainto oli koelaitteiston suuri massa ja siitä johtuva varsin pitkä ylösajoaika. Tulipesän yläosan nousminen laitteiston - erityisesti stirlingmoottorin - vaatimaan käyttölämpötilaan yli 1000 °C:seen kestää lähes puolipäivää, sillä kuuden tunnin koeajoissa yläosan lämpötila nousi vasta reiluun 700 °C:seen. Laitteiston lämmitysvaihe havaittiin myös siten kriittiseksi, että tulipesän lämpötilojen säilyttäminen kokoajan nousujohteisena vaati käyttäjältä jatkuvaa palamisilmansyöttöjen säätöä.

Voidaankin todeta, että laitteiston ylösajo tulee tapahtua saattaen, toisin sanoen se vaatii käyttäjältä jatkuvia prosessin optimointitoimenpiteitä. Tätä opinnäytetyötä tehtäessä ei ylösajolle ollut vielä löytynyt selviä

toimintaohjeita niin, että ylösajo saataisiin sisällytettyä ohjelmoitavaan logiikkaan ja siten automaattiseksi.

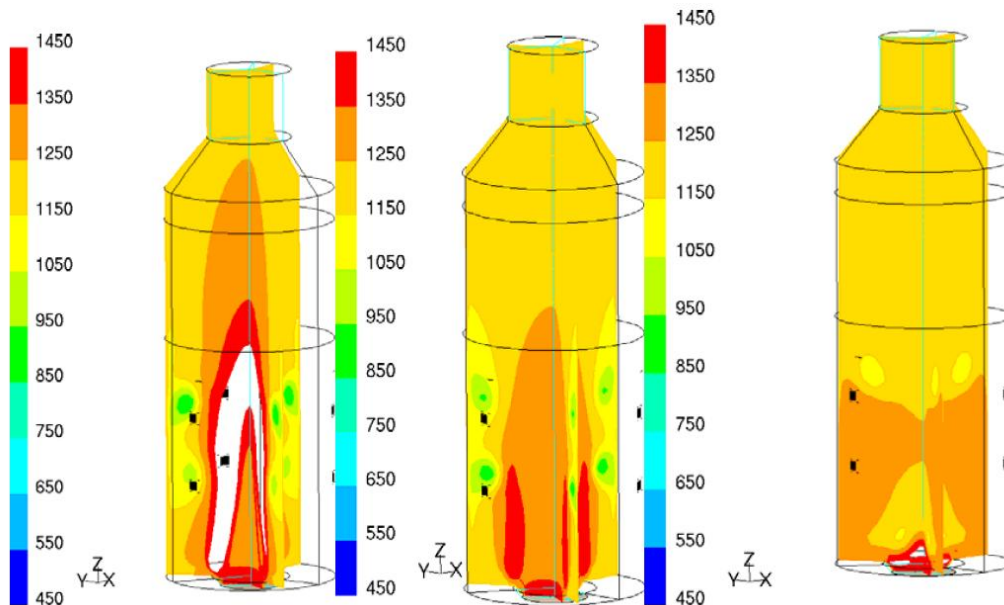
Laitteiston ylösajoon liittyen koeajoissa tuli myös selväksi, että polttoaineen- ja palamisilmansyötön lisäys ei välittömästi tarkoittanut lisääntyntä lämpötilaa. Laitteiston tuli kerätä lämpöä pienin askelin, jolloin äkilliset tai liian radikaalit muutokset syötöissä eivät tuottaneet haluttua tulosta. Esimerkiksi polttoaineen massavirran kasvattaminen saattoi tukahduttaa palamisprosessia, jos syöttöä kasvatettiin liian aikaisessa vaiheessa. Samoin palamisilmansyöttöjä tuli säätää pienin muutoksin, mutta toisaalta jo pienellä ilmavirtauksen kasvattamisella tai muuttamalla primääri- ja sekundääri-/tertiäärisyöttöjen suhdetta saatettiin saada huomattavaa edistystä tulipesän lämpötilojen nousuun.

Muita koeajojen aikana tehtyjä havaintoja olivat muun muassa tulipesän vaihteleva lämpötilajakauma sekä tulipesän ja laboratoriotilan välisen paine-eron heittäminen. Aikaisemmin esitellyn anturoinnin mukaisesti lämpötilaa mitattiin tulipesän pituudelta neljällä tasavälein sijoitellulla anturilla sekä yhdellä välittömästi tulipesän yläpuolella olevalla anturilla. Tulipesän lämpötilajakauma - itse asiassa varsin huomattava sellainen - ilmeni siten, lämpötila laski kohti tulipesän yläosaa ollen useita satoja asteita alhaisempi aivan tulipesän yläpuolella olevassa anturissa.

Lämpötilajakauman jyrkkyys vaihteli ilmansyöttöjen mukaan siten, että lisäämällä sekundääri- ja tertiääri-ilmansyöttöä lämpötilajakauma voimistui. Tämä on jokseenkin suunnitteluvaiheessa tehtyjen tulipesäsimulaatioiden (ks. kuva 3.10) vastaista, sillä sekundääri- ja tertiäärisyötöillä tulipesän lämpötilaerojen tulisi ennemminkin tasaantua. Mitä pesän sisäiseen lämpötilajakaumaan yleisesti tulee, on se toki odotettavissa oleva ilmiö ja pidempi tulipesän lämmitysaika varmasti tasaisi lämpötilaeroja.

Tulipesän ja laboratoriotilan välisen paine-eron vaihtelu oli myös odotettava ilmiö, sillä liekki tulipesässä lepattaa aina jonkin verran luoden palotilaan painenvaihtelua. Huomionarvoista tässä oli se, että arvovaihtelussa varsin voimakkaasti tarkkaa paine-eroa oli mahdotonta sanoa. Tulipesässä vallitseva alipaine voitiin todeta, jos paine-eroanturin ilmoittama arvo oli pääasiassa alipaineen puolella. Alipaineen katoamisen saatoin myös huomata, jos tulipesän tiivistämättömästä polttimen asennusluukusta alkoi työntyä savukaasua laboratoriotilaan.

Koeajoissa havaittu mittausravojen vaihtelu, kuten edellä mainitulla tulipesän ja laboratoriotilan paine-erolla, herättää lisäkysymyksiä ajateltaessa ohjauksen toteuttamista alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti automaattisena. Jotta automaattiohjaus ei jatkuvasti tekisi korjausliikkeitä, tulisi suureiden välisten riippuvuuksien vasteet ohjelmoida ohjauslogiikkaan hyvin hitaiksi ja raja-arvot varsin väljiksi. Toisaalta tietyt raja-arvot -



Kuva 3.10: Simulaatiolaskelmia JY:n mikro-CHP-laitteiston tulipesälle erilaisilla palamisilmansyötöillä, kun teho on 60 kW_h . Vasemmassa kuvassa ilmakerroin on 2,03 ja savukaasun takaisinkieritys ei ole käytössä. Keskimmaisessä ja oikeanpuoleisessa kuvassa ilmakerroin on 1,47 ja savukaasun takaisinkieritys on käytössä, tosin keskimmaisessä vaihtoehdossa sekundaari-/tertiäärisyöttöjen suuntaus on epäsuotuisa, kun taas oikealla sekundaari-/tertiäärisyötöt ovat suunnattuina polttimeen. [17]

esimerkiksi maksimilämpötilat eri kohdissa savukanavaa - ovat prosessin toiminnan kannalta erittäin olennaisia, joten näihin reagointi tulisi tapahtua nopeasti. Mittausarvojen heiluntaa tuleekin tarkkailla laitteiston tulevissa koeajoissa tarkasti.

Mittausarvojen vaihtelun ja heilunnan lisäksi osan mittalaitteista havaittiin koeajoissa antavan jopa selvästi virheellistä tietoa. Hyvänä esimerkkinä tästä on esimerkkikoeajosta (ks. luku 4.5 ja liite I) saadut savukaasun lämpötilalukemat ennen ekonomaisereita, niiden välissä ja jälkeen, sekä vastaavat suljetun jäähdytysvesikierron lämpötilat. Mitattujen lämpötila-arvojen mukaan savukaasu jäähdytti ensimmäisessä ekonomaiseriä alle jäähdytysveden lämpötilan, minkä jälkeen toinen ekonomaiseri puolestaan lämmitti savukaasua yli jäähdytysveden lämpötilan. Koelaitteiston mittalaitteiden toiminnassa on siten selviä ongelmia, jotka tulisi

selvittää sekä korjata ennen kuin laitteistolla saatavaa mittaustietoa voidaan pitää luotettavana.

3.5 Haasteet ja ongelmat

JY:n mikro-CHP-laitteistoon liittyy niin alkuperäisissä suunnitelmissa kuin myös laitteiston rakentamisessa ja koeajoissa esiin tulleita haasteita sekä ongelmakohtia.

3.5.1 Valitun tekniikan haasteet

Aikaisemmin tässä opinnäytetyössä on nostettu esille stirlingmoottoritekniikan vaatimukset, erityisesti suuri lämpötilaero kuuman ja kylmän pään välillä sähköhyötysuhteen maksimoimiseksi. JY:n mikro-CHP-koelaitteistossa korkean lämpötilan tavoittelu asettaa haasteita käytettävän polttoaineen eli puupellettien vuoksi. Puuta poltettaessa tuhka alkaa sulaa yli 1250 °C:ssa, jolloin tuhkapartikkelit alkavat tarttua lämmönvaihdinpintoihin. Edelleen stirlingmoottorin sisäinen rakenne määrittelee lämmönvaihtimen sallitun koon, jolloin koon ollessa ennalta määrätty on savukaasujen oltava mahdollisimman lämpimiä - toisin sanoen lähellä tuhkan sulamispistettä. Noin 1200 – 1250 °C on siis ehdoton tavoitelämpötila, jos halutaan päästä parhaaseen stirlingmoottorin tehoon, mutta samalla se on joustamaton yläraja savukaasujen maksimilämpötilalle. [17]

1250-asteinen savukaasu ei kuitenkaan yksinkertaisella lämmönvaihtimella ole sekään riittävä, vaan tarvittavan lämmönsiirron aikaansaamiseksi lämmönvaihdin tulee rivoittaa. Tuhkan sulaminen jo yksinkertaisen lämmönvaihtimen pinnoille voi muodostua ongelmaksi ja, jos lämmönvaihdin vielä rivoitetaan, kasvaa lämmönvaihdinpintojen tukkeutumisuhka moninkertaiseksi. [17, 27]

Haasteeksi muodostuu sopivan lämmönvaihtimen suunnittelu ja lämpötilan hallinta koko tulipesän alueella, jotta tuhkan sulamispistettä ei ylitetä missään kohtaa tulipesää (ks. kuva 3.10) ja sulanut tuhka ei heti tuiki lämmönvaihdinta. Ensimmäisiä koeajoja varten JY:n koelaitteiston stirlingmoottori hankittiin tukkeutumisongelmien eliminoimiseksi rivoittamattomalla lämmönvaihtimella. Tällä lämmönvaihtimella ei pienen lämmönvaihtopinnan vuoksi päästä kovinkaan suureen sähköntuotannon hyötysuhteeseen. Samalla se ei millään tavalla vastaa käytettävän stirlingmoottorin maksimisähköntuotantoon vaadittavaa lämmönsiirtotehoa. [17]

Tuhkan sulamisen ennaltaehkäisyyn liittyvä haaste on savukaasukierrätysten onnistunut käyttöönotto. Savukaasukierrätys on olennainen osa

tulipesän lämpötilanhallintaa, mutta toimiva toteutus ei välttämättä ole nopeasti tai yksinkertaisesti saavutettavissa. Savukaasunkierrätyksessä tulee ottaa huomioon palamisilman ja savukaasun lämpötiloja, paineita ja massavirtoja useassa kohtaa prosessia, joten haluttuun lopputulokseen pääseminen on varmasti haasteellista. [17] Lisäksi savukaasun kierrätyksen ja tulipesän lämpötilanhallinnan ongelmana ei ole pelkästään niiden saattaminen toimivaksi, vaan kyseisiin toimintoihin kuluu lisäksi huomattavan paljon sähköä.

Sähkönkulutus on koko JY:n mikro-CHP-koelaitteistoa ajatellen varsin merkittävä ongelma-kohta. Nykyisellä rakenteellaan laitteiston sähköntuotannon hyötysuhteen saaminen kaupallisesti järkevälle tasolle on haaste, sillä palamisilmaa syöttämässä ja savukaasuja kierrättämässä sekä poistamassa on neljä noin 2 kW:n puhallinta. Kaikki puhallimet eivät toki jatkuvasti pyöri maksimiteholla, mutta yhdessä muiden koelaitteiston sähkölaitteiden kanssa ne joka tapauksessa kuluttavat suuren osan stirlingmoottorin teoreettisesta 9 kW_e maksimitehosta. Ja niin kauan kuin käytössä on rivoittamaton tai muuten parantelematon lämmönvaihdin, ollaan kaukana sähkön maksimituotosta, jolloin laitteisto kuluttaa enemmän sähköä kuin tuottaa. Kaupallisia sovelluksia tavoiteltaessa laitteiston sähköntuotannon ja -kulutuksen suhteeseen tulee löytää uusia ratkaisuja.

Stirlingmoottorin lämmönvaihtimeen ja samalla koko laitteiston rakenteeseen liittyviin ongelmiin yksi ratkaisu voisi olla ylimääräisen lämmönvaihtimen ja lämmityskierron lisääminen savukaasukanavan ja stirlingmoottorin väliin. Tämä lisäisi kuitenkin laitteiston sähkönkulutusta, sillä lämmityskierto on tarvittaisiin pumppu tai puhallin lämmönsiirtoainetta liikuttamaan. Ylimääräisten lämmönvaihdinten lisääminen voisi myös lisätä lämpöhävikkiä kuten ilmeisesti kävi LUT:n stirling-voimalaitoksessa [24]. Väistämättä ylimääräisten lämmityskiertojen lisääminen myös monimutkaistaisi laitteiston rakennetta ja siten kasvattaisi laitteiston lopullista hintaa. Lisälämmönvaihtimien suunnittelu ei näistä syistä johtuen tunnu järkevältä vaihtoehdolta JY:n mikro-CHP-laitteistoa ajatellen.

Vielä yksi JY:n mikro-CHP-laitteiston ongelmakohdaksi laskettava rakenteellinen tekijä on, että koelaitteisto ottaa tämän hetkisellä toteutuksella jäähdytysvetensä vesijohtoverkosta ja laskee lämmenneen veden suoraan viemäriin. Jäähdytyksen riittävyys on erittäin tärkeää useille laitteistokomponenteille, mutta toisaalta liian isolle säädetyt vesikierron venttiilit ja siten liian tehokas jäähdytys kuluttaa tarpeettoman paljon vettä. Esimerkiksi yhdessä kuuden tunnin koeajossa vesijohtovettä saattaa kulua useita tuhansia litroja.

Mahdollinen ratkaisu jäähdytysveden kulutukseen olisi jäähdytyksen toteuttaminen kokonaan suljetulla vesikierrolla tai vaikkapa järveden

käyttö jäähdytyksessä. Joka tapauksessa tällä hetkellä ainoa tapa rajoittaa veden kulutusta on jäähdytysvesikiertojen venttiilien asettaminen aluksi mahdollisimman pienelle ja asteittainen tehon nosto tarpeen mukaan. Tämä tarkoittaa jäähdytyskiertojen lämpötilojen jatkuvaa tarkkailua, jotta jäähdytysteho on riittävää eikä jäähdytysvesi pääse kuumenemaan liikaa putkistossa.

3.5.2 Käytännön koeajoissa tehdyt havainnot

Koeajoissa esiin nousseista erityisistä ongelmakohdista ensimmäinen on pelletinsyöttönopeuden epätasaisuus. Pelletinsyötön ongelmat kiteytyvät siilosta pellettejä tuovaan varastoruuviin. Kyseiselle spiraalikuljettimella testeissä saadut pelletin massavirtaukset vaihtelivat jopa yli 100 g kahden peräkkäisen samalla syöttönopeudella ajatun 5 minuutin testin välillä. Polttoaineen syötön tasaamiseksi tulee siis löytää ratkaisuja, jotta laitteistolla tehtyjä mittauksia voidaan tarkastella luotettavasti. Yksi mahdollinen ratkaisu voisi olla automaattivaakaa käyttävän annostelijan liittämisen polttoainesyötön yhteyteen.

Toinen käytännön kautta havaittu merkittävä ongelma kohti liittyi tulipesän ja koko prosessin paine-eroon laboratoriotilan kanssa. 45 kW:n polttoaineteholla tehdyissä koeajoissa savukaasun poistoimurin oli pyörittävä jo lähes täydellä teholla, jotta keskimääräinen alipaine saatiin ylläpidettyä tulipesän sisällä. Käytetty 45 kW:n polttoainetehto tarkoittaa vasta noin kahta kolmasosaa polttimen ja laitteiston suunnitellusta maksimitehosta, joten savukaasun poistoimurin tehon riittävydestä muodostuu epäilemättä suuri ongelma, kun polttoainetehoa ja samalla palamisilman syöttöä edelleen kasvatetaan.

Kolmas koeajoissa havaittu, tosin edellisiä lievempi, ongelma kohti oli savukaasun vuoto poistoimurista - ja todennäköisesti myös kiertosavukaasupuhaltimesta vaikkakaan tätä ei vielä ole testattu - laboratoriotilaan. Savukaasun vuotaminen laboratoriotilaan ei vaikuta laitteiston luotettavuuteen tai saatuihin tieteellisiin tuloksiin, mutta haittaa siitä syntyy, kun laboratoriotilassa työskentelevät hengittävät tarpeettomasti savukaasuja. Savukaasuimuria on jo tiivistetty alkuperäisestä, mutta imuria tulee edelleen tiivistää tai muutoin muunnella, jotta tästä kiusallisesta ongelmasta päästään eroon.

4 Tiedonkäsittelyjärjestelmä

4.1 Yleistä

Koelaitteistoilla on tarkoitus perehtyä tutkittavaan ilmiöön ja mitata ilmiöön liittyviä parametreja käytettävissä olevilla mittalaitteilla. Olennaisista tutkimuksista tehtäessä on oikeanlaisten mittalaitteiden käyttäminen niin ajallisesti kuin paikallisestikin oikeassa kohtaa mitattavaa ilmiötä. Mittalaitteiden lisäksi tärkeä osa koelaitteistoa ja edellytys mittaustulosten käyttämiseksi tieteellisessä tutkimuksessa on toimiva tiedonkäsittelyjärjestelmä, jolla ilmiöön liittyvät havainnot saadaan tallennettua ja jolla tallennettua tietoa voidaan tarkastella koetilanteen jälkeen.

Koelaitteistosta saatavan tiedon käsittely jakaantuu kahteen osa-alueeseen, tiedonkeruuseen ja tiedonanalysointiin. Nämä kaksi eri osa-aluetta voivat olla kiinteästi kytköksissä toisiinsa niin, että käyttäjä ei välttämättä pysty erottamaan mittaustietoa käsitellessään, milloin käytössä on tiedonkeruun ja milloin tiedonanalysoinnin komponentteja. JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa tiedonkeruu ja tiedonanalysointi jakautuivat hyvin selkeästi toisistaan erillään oleviin kokonaisuuksiin.

Yksityiskohtaisesti tässä opinnäytetyössä toteutettua tiedonkäsittelyjärjestelmää on esitelty seuraavissa luvuissa. Lähteinä tiedonkeruuseen liittyvissä teknisissä tiedoissa on käytetty viitteitä [32, 33, 34] ja tiedonanalysointiosiossa viitteen [35] internetsivustoa.

4.2 Esisuunnittelu

Ennen JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän yksityiskohtaista suunnittelua ja toteutusta oli järkevää hahmotella mittaustiedon käsittelyyn liittyvä prosessi korkeammalla tasolla. Liitteessä B on esitetty tiedonkäsittelyjärjestelmän toimintaa havainnollistava UML(Unified Modeling Language)-mallinnuskielen mukainen aktiviteettikaavio. Alla on selvitetty kyseistä korkean tason kuvausta sanallisesti.

Aina tiedonkäsittelyjärjestelmää käytettäessä alkuolettamuksena on, että itse mikro-CHP-koelaitteisto on käyttövalmiina ja prosessiin liitetyt mittalaitteet antavat oikeaa mittaustietoa. Tiedonkäsittelyjärjestelmän käyttöprosessi alkaa siten, että käyttäjä tarvittaessa nollaa tai poistaa aikaisemmin väliaikaistiedostoihin tallennettuja mittaustietoja ja aloittaa uuden tiedonkeruun haluamiensa tietojen osalta. Tällöin tiedonkeruujärjestelmä alkaa talteenottaa mittaustietoa tarkoitusta varten määritettyihin tie-

dostoihin. Halutun ajan kuluttua käyttäjä pysäyttää mittaustietojen keruun, jolloin aikavälillä tullut mittaustieto on talteenotettuna ja saatavilla tiedonkeruujärjestelmässä. Jotta talteenotettu mittaustieto olisi pysyvästi tallennettu myöhempää tiedonkäsittelyä varten, tallentaa käyttäjä talteenotetun tiedon erilliseen tietokantaan tiedonkeruujärjestelmän avulla.

Käyttäjän pysäytettyä mittaustiedon talteenoton ja tallennettua tiedot pysyvästi, hän avaa kerätyn mittaustiedon sisältävät tiedostot erillisessä tiedonanalysointijärjestelmässä. Tämän jälkeen käyttäjä käyttää tiedonanalysointijärjestelmän eri osioita tutkiakseen kerättyä mittaustietoa tilastollisesti sekä muilla halutuilla menetelmillä. Käyttäjä voi pyytää analysointijärjestelmää esimerkiksi laskemaan tallennetusta tiedosta eri tunnuslukuja tai piirtämään siitä haluamiansa kuvaajia. Käyttäjän suorittama halutut tiedonanalysointitoiminnot poistuu hän tiedonanalysointijärjestelmästä, jolloin tiedonkäsittelyprosessi päättyy. Koko tiedonkäsittelyjärjestelmän käyttöprosessi tai vain osia siitä voidaan käyttäjän niin halutessa suorittaa tämän jälkeen uudelleen.

4.3 Tiedonkeruu

4.3.1 Vaatimukset

Tiedonkeruujärjestelmän toiminnallisia vaatimuksia [36] eli vaatimuksia sille, mitä järjestelmän tuli pystyä tarkalleen ottaen tekemään, olivat:

- tiedonkeruun tuli pystyä tallentamaan mittaustietoa samanaikaisesti kaikista mikro-CHP-laitteistoon kytketyistä mittalaitteista (ks. luku 3.2.11)
- tiedonkeruun tuli pystyä tallentamaan mittaustietoa riittävän pitkällä aikavälillä, jopa 12 tunnin koeajoja ajatellen
- tiedonkeruun tuli olla käynnistettävissä ja pysäytettävissä täysin käyttäjän toiveiden mukaisesti
- tiedonkeruujärjestelmässä tuli olla valittavissa useita eri vaihtoehtoja mittalaitteista saadun tiedon kahden peräkkäisen tallennettavan arvon väliselle ajalle eli mittausintervallille
- tiedonkeruujärjestelmään kerätty tieto tuli olla helposti luettavissa tiedon esitystä ja analysointia varten
- tiedonkeruujärjestelmällä kerätty tieto tuli lopulta olla pysyvästi tallennettuna sekä saatavilla myöhempänä ajankohtana

Toiminnallisten vaatimusten lisäksi tiedonkeruujärjestelmälle asetettiin myös ei-toiminnallisia vaatimuksia [36]. Tällaisia laadullisia vaatimuksia, joita ei voida suoraan johtaa järjestelmän toimintoihin olivat:

- tiedonkeruujärjestelmän tuli olla helppokäyttöinen ja helposti saatavilla (käytettävyysvaatimukset)
- tiedonkeruun tuli olla luotettavaa siten, että järjestelmän tuli kerätä juuri käyttäjän haluamat tiedot ja kerätty tieto tuli olla oikeaa (luotettavuusvaatimukset)
- tiedonkeruujärjestelmään määritettyjä mittalaitteita tuli pystyä lisäämään ja poistamaan eli järjestelmän tuli olla ylläpidettävissä sekä uudelleen konfiguroitavissa (tuettavuusvaatimukset)

4.3.2 Tiedon talteenotto

JY:n mikro-CHP-laitteistossa tiedonkeruuelektroniikkaa ei tarvinnut suunnitella ja rakentaa tyhjästä. Automaatiolaitteiston ohjaamista varten oli hankittu Mitsubishin kosketusnäytöllä varustettu E1071-operointipääte, jonka ominaisuuksia voitiin käyttää hyväksi mittalaitteilta tulevan tiedon talteenotossa.

E1071-operointipäätteen teknisiä ominaisuuksia ovat, että se sisältää RISC-arkkitehtuurin Intel Xscale -suorittimen ja käyttöjärjestelmänä siinä on sulautetuille järjestelmille suunniteltu Windows CE. E1071-operointipääte tarjoaa lukuisia eri tapoja tietoliikenneyhteyksien muodostamiseen muihin laitteisiin, sillä siinä on RS-232-, RS-485/422- ja USB-sarjaliikenneportit sekä Ethernet-lähiverkkoliitäntä. Lisäksi operointipäätteessä on suurimmillaan yhtä gigatavua tukeva CompactFlash-muistikorttipaikka. Tässä opinnäytetyössä toteutettua tiedonkäsittelyjärjestelmää ajatellen yksi E1071-operointipäätteen olennaisimmista ominaisuuksista on kuitenkin se, että operointipääte sisältää valmiina tiedonkeruutoiminnallisuuden (engl. Data Logger). [33]

E1071-operointipäätteen tiedonkeruutoiminnossa tulee määrittää tiedostoja, joihin mittalaitteilta eli mittareilta, antureilta ja analysointilaitteilta ohjelmoitavan logiikan kautta tullut tieto tallennetaan. Tallennustiedostojen lukumäärälle ei ole rajoituksia, vaan ainoa rajoitus on operointipäätteen kokonaismuistin määrä, joka nyt käytössä olevan E1071:n tapauksessa ilman ulkoisia tallennusmedioita on 12 Mt. [32]

Mittaustiedon tallennukseen on E1071-operointipäätteessä kaksi toisistaan hieman poikkeavaa vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on historiatrendi (engl. Historical Trend), jossa tallennettava tieto näytetään ope-

rointipäätteen näytöllä reaaliajassa kuvaajien muodoissa. Kuhunkin historiatrendiin voidaan liittää enintään kuusi erillistä mittalaitteilta tulevaa signaalia, toisin sanoen kuusi eri mittalaitetta. Kullekin signaalille taas tulee määrittää mittausintervalli, joka on pienimmillään yksi sekunti ja suurimmillaan yksi vuorokausi sekä tallennettavien mittausarvojen lukumäärä, joka voi enimmillään olla 65534 kappaletta. Edelleen operointipäätteen asetuksista voidaan määrittää mahdollisia lisätoimintoja näytelukumäärän täytyessä. [32]

Kaikille operointipäätteeseen tallennettaville historiatrendeille tulee valita tallennetaanko signaalista vain muuttuneet arvot vai suoritetaanko uuden arvon tallennus jokaisen mittausintervallin jälkeen. Valinnaisena asetuksena historiatrendeille voidaan asettaa mittausarvojen tallennuksen käynnistävät ja trenditiedoston tyhjentävät signaalit, jotka voivat olla esimerkiksi mittalaitteilta tulevia signaaleja tai operointipäätteen napinpainalluksesta saatava bittitieto. [32]

Historiatrendin lisäksi toinen mittautiedon tallennustapa E1071-operointipäätteessä on lokitiedosto, joka eroaa historiatrendistä siten, että loikiin tallennettavaa tietoa ei näy reaaliajassa operointipäätteellä ja yhteen lokitiedostoon voidaan liittää useampia mittalaitteilta tulevia signaaleja, kaiken kaikkiaan 16 kappaletta. Muuten lokitiedosto on asetuksiltaan ja tietorakenteeltaan samanlainen kuin historiatrendi. [32]

Sekä historiatrendit että lokitiedostot tallentuvat operointipäätteessä .SKV-tiedostomuotoon, joka on yhteensopiva useiden taulukkolaskentaohjelmien kuten Microsoft Excelin kanssa (ks. kuva 4.1). Tiedostojen sisäinen rakenne on sellainen, että niissä jokaista tallennettua arvoa kohden on sekä päivämäärä- että kellonaikaleima. Päivämäärä- ja kellonaikaleimat sekä mittausarvot on erotettu toisistaan erikseen määritettävällä erotinmerkillä. [32]

Historiatrendit ja lokitiedostot täyttävät operointipäätteen kokonaisuistia ja tallennettujen tiedostojen koko määräytyy sen mukaan, kuinka montaa asetusparametria tiedostossa on muutettu, montako mittaussignaalia tiedostoon on kytketty ja kuinka monta lukuarvoa kullekin yksittäiselle signaalille maksimissaan tallennetaan. Näiden lisäksi tiedostokoon vaikuttaa tallennettavien lukujen tyyppi eli montako bittiä yhdelle tallennettavalle arvolle operointipäätteen muistista on varattu. Tarkka tallennettavien historiatrenditiedostojen koko tavuina määräytyy seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$S = TOS + AK \times (28 + (645 \times ((AS/100) + 1))), \quad (1)$$

missä TOS = trendiobjektin koko (jos kaikkia objektin asetusparametreja

Edit Recipe: TREND.skv

File Help

04-01-07 Insert Row Delete Row Exit

Device	Value						
04-01-07	10:18:10	0	0	0	0	0	0
04-01-07	10:18:40	103	0	0	0	0	25
04-01-07	10:18:51	26	53	0	0	0	25
04-01-07	10:18:55	26	53	0	137	0	25
04-01-07	10:35:00	26	53	0	137	0	25
04-01-07	10:35:26	0	0	0	0	0	0
04-01-07	10:35:35	90	0	0	0	0	0
04-01-07	10:35:44	86	0	0	0	0	0
04-01-07	10:35:51	87	0	0	0	0	0
04-01-07	10:36:20	87	0	0	0	0	0
04-01-07	10:36:48	0	0	0	0	0	0
04-01-07	10:36:57	90	0	0	0	0	0
04-01-07	10:37:01	87	0	0	0	0	20
04-01-07	10:37:04	89	120	0	0	0	20
04-01-07	10:37:06	89	120	0	38	0	20
04-01-07	10:38:00	89	120	0	38	0	20
04-01-07	10:38:25	0	120	0	38	0	20
04-01-07	10:38:36	189	120	0	38	0	20
04-01-07	10:38:40	60	120	12	38	0	20
04-01-07	10:38:55	60	120	12	38	0	14
04-01-07	10:38:50	61	47	12	38	0	14
04-01-07	10:39:03	104	47	12	65	0	14
04-01-07	10:39:07	60	47	47	65	0	14
04-01-07	10:39:57	62	47	12	65	0	14
04-01-07	10:40:00	60	47	12	65	0	46
04-01-07	10:40:04	61	18	12	65	0	46
04-01-07	10:40:06	60	18	12	99	0	46
04-01-07	10:40:12	62	18	12	456	0	46
04-01-07	10:40:15	61	18	12	456	0	478
04-01-07	10:40:17	60	145	12	456	0	478
04-01-07	10:40:21	61	145	152	456	0	478
END							

Kuva 4.1: Esimerkki Mitsubishiin E1071-operointipäätteen muodostamasta mittaustietoa sisältävästä tiedostosta taulukkolaskentaohjelmaan avattuna. Tiedoston muoto määräytyy siten, että eri mittalaitteet ovat eroteltuina eri sarakkeisiin ja kullakin rivillä on esitetty tietyllä päivämäärällä ja kellonajalla mittalaitteilta tallennettu tieto. [32]

on muutettu, on TOS = 320 tavua), AK = trendiobjektiin määritettyjen mittaussignaalien lukumäärä ja AS = yhteen mittaussignaaliin asetettu maksiminäytelukumäärä (pyöristettynä alaspäin lähimpään sataan). [32]

4.3.3 Tiedon pysyvä tallennus

E1071-operointipäätteeltä ei löydy sopivia ominaisuuksia talteenotetun tiedon pitkäaikaisempaan ja pysyvämpään tallennukseen etenkin, jos laitteen koeajoja tehdään usein ja mittaustietoa kertyy runsaasti. Siten tiedon pysyvä tallennus päätettiin toteuttaa PC-tietokonepohjaisesti, koska myös tallennetun tiedon jatkoanalysointi suunniteltiin tehtävän PC-tieto-

koneella.

Erityisen hyvänä puolena E1071-operointipäätteellä on sen varsin kattavat oheislaiteliitännät, jotka mahdollistavat historiatrendien ja lokitiedostojen lataamisen PC-tietokoneelle joustavasti useilla eri tavoilla. Mahdollisia vaihtoehtoja ovat mittaustietoa sisältävien tiedostojen kopioiminen operointipäätteeltä ulkoiselle tallennusmedialle, esimerkiksi muistikortille tai -tikulle, tai tiedostojen siirto sarjaliikenneväylän välityksellä käyttäen esimerkiksi Beijer Electronicsin HMI Tools -ohjelmistopakettin File Transfer -ohjelmaa. [32]

Yksi mahdollinen vaihtoehto operointipäätteen ja PC-tietokoneen välisen tiedonsiirron toteutukselle on FTP:n (File Transfer Protocol) käyttö, mihin muun muassa edellä mainittu HMI Tools -ohjelmistopaketti tarjoaa FTP Client -ohjelman [32]. FTP:n hyviä puolia ovat nopeus sekä se, että FTP käyttää yleistä TCP(Transmission Control Protocol)-protokollaa. Näin FTP-yhteys voidaan luoda verkkoyhteyden kautta, joka mahdollistaa tiedonsiirron etänä, jos tulevaisuudessa koko JY:n mikro-CHP-koelaitteisto halutaan muuntaa etäkäytettäväksi.

FTP:tä käytettäessä voidaan operointipäätteen asetuksissa vaikuttaa tiedostoihin tallennetun tiedon ulkoasuun määrittämällä, mitä erotinmerkkiä eri mittalaitteilta saatujen mittausarvojen välissä historiatrendeissa ja lokitiedostoissa käytetään. Vaihtoehtoja erotinmerkille ovat tabulaattori, puolipiste ja pilkku. Lisäksi tallennettujen tiedostojen ulkoasuun voidaan tiedonsiirtotavasta riippumatta vaikuttaa valitsemalla operointipäätteen asetuksista halutunlainen päivämääräleiman muoto. [32]

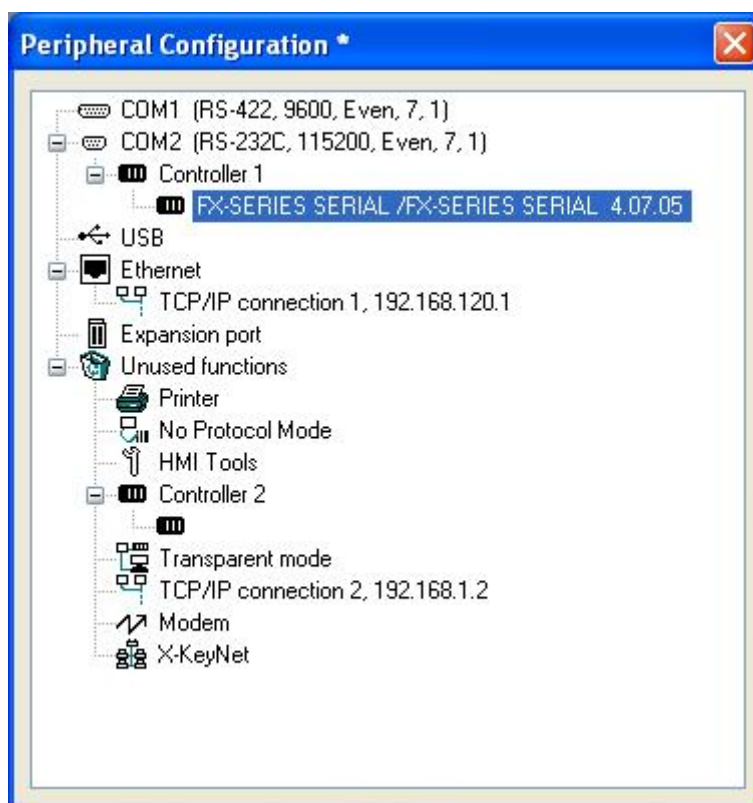
Tämän opinnäytetyön yhteydessä tiedonkeruu kokonaisuutena nähtiin toteutuvan, kun tieto oli talteenotettu operointipäätteelle sekä edelleen siirretty PC-tietokoneen muistiin. Kaikki edellä mainituista tiedonsiirtotavoista operointipäätteen ja PC-tietokoneen välillä olivat aluksi pohdinnan alla.

4.3.4 Käytännön toteutus

Käytännön tasolla tiedon talteenoton ja pysyvän tallennuksen toteutus edellä kuvatulla tavalla vaati E1071-operointipäätteen ohjelmointia, joka tehtiin valmistajan toimittamalla E-Designer-ohjelmointityökalulla. Ohjelman lataus E-Designer-kehitystyökalusta E1071-operointipäätteen muistiin tapahtui tämän opinnäytetyön yhteydessä TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)-yhteyden ja verkkokaapelin välityksellä.

Ensimmäinen ohjelmoinnilla määritettävä asia operointipäätteen käyttöönottoon liittyen - olipa kyseessä automaatiolaitteiden ohjaus tai kuten nyt mittalaitteiden antaman tiedon talteenotto - oli oheislaitteena toimi-

van ohjelmoitavan logiikan määrittäminen. Samalla tuli määrätä kommunikaatiotapa operointipäätteen ja logiikan välille. Käytössä olevasta ohjelmoitavasta logiikasta löytyi vapaa RS-232-sarjaliikenneportti, joten tiedonvälitys toteutettiin RS-232:n protokollaa ja fyysistä rajapintaa käyttäen. Operointipäätteessä RS-232-sarjaportti määrättiin COM2-tietoliikenneporttiin, jonka toimiviksi asetuksiksi käytössä olevan ohjelmoitavan logiikan kanssa havaittiin: baudinopeus 115200, parillinen pariteetti, 7 databittiä ja 1 lopetusbitti.



Kuva 4.2: Mitsubishin E1071-operointipäätteen oheislaiteasetuksia JY:n mikro-CHP-laitteistokokoonpanolle E-Designer-ohjelmointityökalussa. Tietoliikenneportti COM2:seen määritettiin FX-sarjan ohjelmoitava logiikka ja Ethernet-lähiverkkoliitäntään asetettiin TCP/IP-yhteys PC-tietokonetta varten.

Onnistuneen kommunikaatioyhteyden alustuksen jälkeen mittaustietoa saatiin operointipäätteelle kaikilta ohjelmoitavaan logiikkaan kytke-

Taulukko 4.1: Tiedonkeruujärjestelmän lokitiedostojen sisältämät mittalaitteet, lisättyinä polttoaineteholla, jolle ei ole erillistä mittalaitetta, vaan se määritetään kalibraatiomittausten kautta. Mittalaitteet on annettu liitteenä A olevan prosessikaavion merkintöjen mukaisesti.

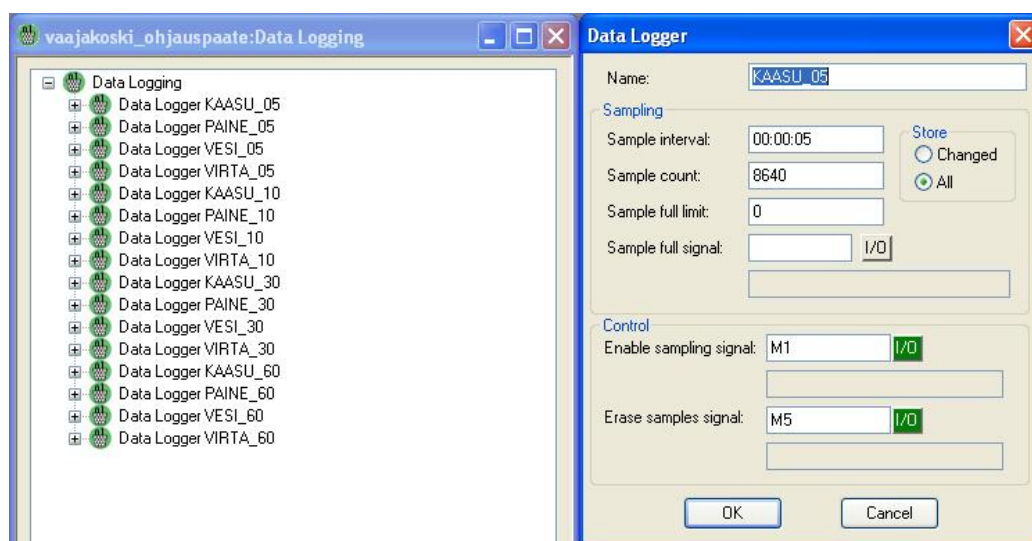
Tiedostonimi	KAASU	PAINE	VESI	VIRTA
Tiedoston sisältämät mittalaitteet	TI 01, TI 64, TI 20, TI 50, TI 51, TI 52, TI 53, TI 90, TI 60, TI 62, TI 63, TI 65	PI 01, PDT 60, PI 60, PDT 21, PDT 61	TI 02, TI 04, TI 05, TI 09, TI 10, TI 07	FI 11, FI 22, FI 02, FI 03, FI 09, Polttoaineteho

tyiltä mittalaitteilta. Mittalaitteita JY:n mikro-CHP-laitteistossa on kaikkiaan 30 kappaletta (ks. luku 3.2.11), joista happi- ja häkäanalyysointilaitteet yksittäisenä mittalaitteena antaa kaksi erillistä mittaussparametria. Lisäksi polttoaineensyötölle ei ole erillistä mittalaitetta, mutta tieto siitäkin tulee saada otettua talteen tiedonkeruujärjestelmään. Yhteensä siis 32 tallennettavaa parametria tarkoittivat sitä, että yksittäisen historiattrendin tai lokitiedoston tallennuskapasiteetti ei riittänyt, vaan parametreja tuli jaotella eri tiedostoihin. Myös mittalaitteiden jakaantuminen lämpötila-, paine- ja virtausmittauksiin sekä eri analyysointijärjestelmiin puolsi mittaustiedon tallennuksen jaottelua.

Kaikista muista mittalaitteista paitsi analyysointilaitteista saatu tieto päätettiin tallentaa lokitiedostoihin, sillä lämpötila-, paine- tai virtaustietoa ei pääasiallisesti ole mielekasta tarkastella ajon aikana pidemmän aikavälin kuvaajina, vaan hetkellinen arvo on merkityksellisin. Mittalaitteet jaoteltiin lokitiedostoihin siten, että ensimmäiseen tiedostoon määritettiin laboratoriotilaa ja palamisilmaa sekä savukaasua mittaavat lämpötila-anturit. Toiseen tiedostoon määritettiin prosessin painetta ja paine-eroa mittaavat anturit ja kolmanteen tiedostoon asetettiin jäähdytysveden lämpötilaa mittaavat anturit. Neljanteen lokitiedostoon määritettiin palamisilman ja jäähdytysveden virtauksen mittalaitteet sekä pelletinsyötön kalibroinnin kautta saatu polttoaineteho. Lokitiedostojen nimiksi valittiin edellä esitetyn mukaisessa järjestyksessä KAASU, PAINE, VESI ja VIRTA. Taulukossa 4.1 on koottu kuhunkin lokitiedostoon sijoitetut mittalaitteet liitteenä A olevan prosessikaavion merkintöjen mukaisesti.

Näytteenottotaajuus eli näyteintervalli kahden samalta mittalaitteelta

tallennetun arvon välillä on hyvä olla valittavissa ainakin muutaman eri arvon väliltä. VTT:llä saatujen kokemusten mukaisesti vastaavissa laitteistoissa käytettyjä näytteenottotaajuuksia ovat 1/5 Hz, 1/10 Hz, 1/30 Hz ja 1/60 Hz [37], joita vastaavat näyteintervallit 5 s, 10 s, 30 s ja 60 s. E1071-operointipäätteessä historia- tai lokitiedostojen mittausintervallia ei voi muuttaa tiedoston määrittämisen jälkeen, joten jokaiselle näytteenottotaajuudelle määritettiin omat tiedostonsa. Siten lokitiedostoja tuli tiedonkeruujärjestelmään kaikkiaan 16 kappaletta ja tiedostot nimettiin lisäämällä aikaisemmin valittuihin nimiin loppupäätteet kuten seuraavassa: KAA-SU_05, KAASU_10, KAASU_30 ja KAASU_60 (ks. kuva 4.3).



Kuva 4.3: Vasemmalla on Mitsubishin E1071-operointipäätteeseen määritetyt lokitiedostot, joita JY:n mikro-CHP-koelaitteistoon kertyi kaikkiaan 16 kappaletta. Oikealla on esimerkkinä KAASU_05-tiedostolle määritetyt asetukset: uuden mittausarvon tallennus tapahtuu aina näyteintervallin välein ja 5 sekunnin näyteintervallilla 12 tunnin koeajossa näytteiden maksimilukumääräksi tulee 8640 kappaletta. Kuva on E-Designer-ohjelmointityökalusta.

Luotuihin lokitiedostoihin mittalaitteilta tulevat signaalit määritettiin ohjelmoitavan logiikan muistipaikkojen avulla. Kaikki samannimiset, mutta eri loppupäätteellä olevat tiedostot sisältävät tällä periaatteella täsmälleen samat logiikan muistipaikat. Eri näytteenottotaajuudella oleville tie-

dostoille määritettiin kuitenkin jokaiselle oma näyteintervalli. Näyteintervalli taas määrittää sen, kuinka monta näytettä kuhunkin tiedostoon ja kullekin signaalille otetaan, jos mittaustietoa halutaan kerätä aina sama maksimiaika.

Tiedossa oli, että koelaitteistolla olisi tarkoituksenmukaista ajaa pitkiä yhtäjaksoisia ajoja, joten näytelukumäärä päätettiin määrätä niin, että jokaisella eri intervallilla tiedostoon mahtuisi 12 tuntia kestävän ajon aikana tullut mittaustieto. Siten näytelukumääräksi 5 sekunnin intervallilla asetettiin 8640, 10 sekunnin intervallilla 4320, 30 sekunnin intervallilla 1440 ja 60 sekunnin intervallilla 720. Kaikki lokitiedostot määritettiin lisäksi niin, että ne tallentavat tietoa aina intervallin välein eikä vain arvon muuttuessa, sillä tällaista jatkuvaa tiedostorakennetta on helpompi käsitellä tiedonanalysointivaiheessa.

Lokitiedostojen ulkopuolelle jääneille analysaattoreiden mittaustiedoille luonnollinen valinta oli historiatrendi, koska niistä tulevaa tietoa on hyödyllistä pystyä tarkastelemaan pidemmällä aikavälillä jo mittaushetkellä. Analysaattoreiden mittayksiköiden erilaisuudesta johtuen pölyanalysaattorin hiukkasmittaukseen sekä happi- ja häkäanalysaattorisysteemin eri mittaussignaaleille määritettiin kullekin omat historiatrenditiedostonsa.

Kyseisille historiatrendeille valittiin näyteintervalliksi 10 sekuntia, sillä tämä on oletettavasti yleisin haluttu näytteenottoaika. Useiden eri asetusarvoilla varustettujen saman signaalin historiatrendien määrittäminen ei ollut järkevää, sillä kaikki luodut historiatrendit ovat näkyvissä operointipäätteellä ja vievät siten operointipäätteen työpöytätilaa. 10 sekunnin näyteintervallin mukaisesti historiatrendien näytelukumääräksi valittiin 4320.

Analysaattoreiden mittaustietoa sisältäville historiatrendeille määritettiin nimiksi HIUKKAS, HAPPI ja HAKA. Näiden kolmen lisäksi mittaustiedon talteenottoon muodostettiin vielä yksi historiatrendi - nimeltään TULIPESA - 10 sekunnin näyteintervallilla ja näytelukumäärällä 4320. Tähän historiatrendiin määritettiin tulipesän sisäiset lämpötila-anturit sekä ensimmäinen välittömästi tulipesän yläpuolella oleva savukaasukanavan lämpötila-anturi, ja sen tarkoitus oli lähinnä mahdollistaa tulipesän lämpötilojen tarkastelu kuvaajien avulla jo ajon aikana. Vaikka TULIPESA-historiatrendin sisältämä tieto löytyy KAASU_xx-lokitiedostoista, voidaan tarvittaessa myös tätä historiatrendiä käyttää mittaustiedon ajonjälkeisessä analysoinnissa.

Kaikki historiatrendit määritettiin operointipäätteen asetuksista siten, että tallennus tapahtuu jatkuvasti ja aina näyteintervallin välein. Taulukoon 4.2 on koottu kunkin historiatrendin mittalaitteet liitteenä A olevan

Taulukko 4.2: Tiedonkeruujärjestelmän historiatrendien sisältämät mittalaitteet annettuna liitteenä A olevan prosessikaavion merkintöjen mukaisesti.

Tiedostonimi	HIUKKAS	HAPPI	HAKA	TULIPESA
Tiedoston sisältämät mittalaitteet	AT 62	AT 60.1	AT 60.2	TI 50, TI 51, TI 52, TI 53, TI 90

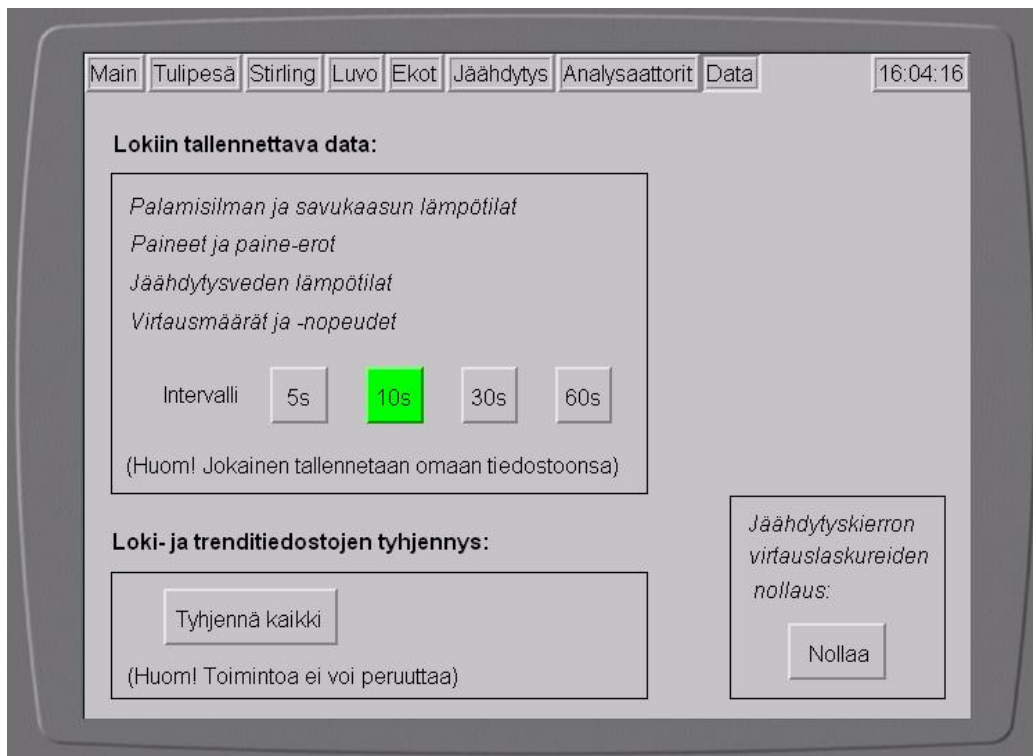
prosessikaavion merkintöjen mukaisesti.

Kuvassa 4.4 on esitetty E1071-operointipäätteelle ohjelmoitu tiedonkeruuseen liittyvä käyttöliittymäikkuna. Ikkunassa on ohjauspainikkeet mittaustiedon talteenoton käynnistykselle lokitiedostoihin eri mittaustervallilla sekä lisäksi painike kaikkien mittaustietoa sisältävien tiedostojen alustusta varten. Historiatrendit tallentavat tietoa aina kun operointipäätteessä vain on virta eli niihin käynnistyspainikkeilla ei ole vaikutusta. Alustuspainike alustaa myös historiatrendit.

Tiedonkeruun merkittävimmän osion eli tiedon talteenoton ollessa valmis siirryttiin tiedon pysyväisluontoisen tallennuksen toteutukseen. Tallennusosion käytännöntoteutukseen vaikutti vahvasti se, miten tiedonanalysointi oli tarkoitus toteuttaa. Käyttäjäystävällisyyden ja yksinkertaisuuden vuoksi oli järkevää minimoida tiedonkeruu- ja analysointijärjestelmiin liittyvät toisistaan erillään olevat komponentit. Koska tiedon talteenotto oli määritetty jo tapahtuvan omassa laitteistossaan ja tiedon pysyvä tallentaminen kuten myös tiedon analysointi tapahtuisi PC-tietokonepohjaisesti, oli tiedon tallentaminen ja analysointi järkevää yhdistää saman ohjelmiston alaisuuteen.

Tiedon tallentamisen ja analysoinnin toteutustavaksi valikoitui erilaisissa mittaussovelluksissa usein käytetty National Instrumentsin LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)-ohjelmointiympäristö. LabVIEW-ohjelmointi perustuu graafiseen G-ohjelmointikieleen, joten se on perusrakenteeltaan varsin erilainen esimerkiksi monien tuntemaan C-kieleen verrattuna. Tämän opinnäytetyön tiedontallennusosioon LabVIEW soveltui hyvin siitä syystä, että erittäin tehokas tapa talteen otetun tiedon lataamiseksi E1071-operointipäätteeltä on FTP-asiakassovelluksen käyttö. LabVIEW-ympäristössä FTP-asiakassovelluksen toteutukseen löytyi valmiita ohjelmistokomponentteja [35], joten toimivan ohjelman toteuttamisen ei oletettu olevan aikaa vievää.

Jotta FTP-tiedonsiirto oli mahdollista, täytyi E1071-operointipäätteessä



Kuva 4.4: Mitsubishin E1071-operointipäätteen tiedonkeruuseen liittyvä käyttöliittymäikkuna JY:n mikro-CHP-laitteistossa. Ikkunassa on ohjauspainikkeet mittaustiedon talteenoton käynnistykseen lokitiedostoihin eri mittausintervallilla sekä lisäksi painike kaikkien mittaustietoa sisältävien tiedostojen - myös historiatrendien - alustusta varten.

aktivoida FTP-palvelintoiminto. Tämän lisäksi tuli määrittää operointipäätteessä olevan FTP-palvelimen IP(Internet Protocol)-osoite ja aliverkon peite, ohjausportin ja dataportin numerot sekä vaaditaanko FTP-asiakassovellukselta yhteydenotossa kirjautumista käyttäjätunnuksin ja salasanoin. [32] IP-osoitteeksi määritettiin 192.168.120.1 (192.168.X.X on lähiverkoissa yleisesti käytetty) ja aliverkon peitteeksi 255.255.255.0, ohjausportiksi 21 ja dataportiksi 20 sekä ei vaadittua kirjautumista yhteydenotossa. Operointipäätteen asetuksista FTP-yhteyksille tuli myös määrittää maksimijoutilasaika [32], jonka arvoksi nyt asetettiin 10 minuuttia. Edellä mainittujen ohjelmointien jälkeen operointipäätte oli täysin FTP-tiedonsiirron vaatimassa toimintakunnossa.

LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä PC-tietokoneelle toteutettu mittaus-tiedon lataus- ja tallennussovellus muotoutui sellaiseksi, että käyttäjän tulee ennen tiedonsiirron aloitusta määrittää seuraavat asetukset:

- mistä IP-osoitteesta ja paikallisesta portista FTP-palvelin löytyy eli mihin osoitteeseen ja ohjausporttiin otetaan yhteyttä
- mikä mittaus-tietoa sisältävä tiedosto halutaan ladata, jolloin valittavissa on kaasu-, paine-, jäähdytys-, virtaus-, hiukkanen-, happi-, häkätai tulipesä-tiedosto sekä tiedoston näyteintervalli, jos kyseessä on lokitiedosto
- mihin PC-tietokoneelle ladattava tiedosto tallennetaan, jolloin vaihtoehtoina ovat kiinteä tiedostopolku kuluvan päivämäärän mukaisesti tai käyttäjän itsensä määrittelemä mielivaltainen tiedostopolku

Liitteessä C on esitetty kuva siitä, miltä valmis mittaus-tiedon lataukseen ja tallennukseen operointipäätteeltä PC-tietokoneelle käytettävän sovelluksen käyttöliittymä näyttää.

4.4 Tiedonanalysointi

4.4.1 Vaatimukset

Tiedonanalysointijärjestelmälle asetettiin seuraavanlaisia toiminnallisia [36] vaatimuksia:

- tiedonanalysointijärjestelmässä tuli pystyä piirtämään kuvaajia kaikista tallennetuista mittaus-signaaleista
- yksittäisiin kuvaajiin tuli pystyä liittämään useita eri signaaleja mittaus-tiedon vertailua varten, esimerkiksi tulipesän antureiden kesken
- tiedonanalysointijärjestelmässä tuli pystyä laskemaan yksittäisen signaalin keskiarvo halutulle aikavälille sekä hakemaan mittaus-signaaliin liittyvä maksimiarvo koko mittaus-tiedon talteenoton ajalta
- tiedonanalysoinnissa tuli pystyä arvioimaan mittaus-tiedon tasaisuutta laskemalla yksittäiselle mittaus-signaalille halutulle aikavälille lineaarisovitus sekä sovituksen hyvydestä kertovia parametreja
- tiedonanalysointijärjestelmässä tuli pystyä laskemaan laitteiston massa- ja energiataseita mittalaitteiden mahdollistamissa rajoissa

Toiminnallisten vaatimusten lisäksi tiedonanalysointijärjestelmälle lisättiin myös ei-toiminnallisia [36] eli laatuun liittyviä vaatimuksia:

- tiedonanalysointijärjestelmän tuli olla mahdollisimman intuitiivinen, käyttäjää tuli tarvittaessa opastaa ohjelmaa suoritettaessa ja toisiinsa liittyvät toiminnot tuli olla sijoitettuna lähelle toisiaan (käytettävyysvaatimukset)
- tiedonanalysoinnin antamien tulosten tuli olla mahdollisimman virheettömiä ja ohjelman tuli toimia sujuvasti (luotettavuusvaatimukset)
- tiedonanalysointijärjestelmän tuli suorittaa pyydetyt toiminnot ja antaa pyydetyt tulokset nopeasti ilman havaittavia viiveitä (suorituskykyvaatimukset)
- tiedonanalysointijärjestelmän tuli olla laaja-alaisesti yhteensopiva ja helposti käyttöönotettava eli käytännössä PC-tietokonepohjaisesti toteutettu (tuettavuusvaatimukset)

4.4.2 Teoriataustaa

Tutkimuslaitteistosta kerätyn mittaustiedon analysointiin tarvitaan aina jonkin verran fysikaalista tai matemaattista teoriataustaa. Tähän opinnäytetyöhön liittyvä teoriatausta ei ollut kovinkaan syvällistä, sillä työssä toteutetulla analysointiohjelmiston ensimmäisellä versiolla oli ensisijaisesti tarkoitus päästä käsiksi kerättyyn tietoon ja tarkastella sitä perinteisillä graafisilla menetelmillä. Teoriatarkastelun näkökulmasta olennaisena pidettiin vain muutamien tärkeimpien ominaisparametrien laskentaa. Opinnäytetyössä käytettyyn vähäiseen teoriapuoleen perehdytään tarkemmin seuraavassa.

Yksi kiinnostavimmista suureista JY:n mikro-CHP-koelaitteiston prosessia ajatellen on energiatase. Kokonaisprosessin energiataseen laskenta voidaan jakaa pienempiin osiin siten, että lasketaan ensin polttoaineesta prosessiin tuleva energia sekä sen jälkeen eri lämmönvaihtimissa väliaineesta toiseen siirtynyt energia. Polttoaineen luovuttama lämpöenergia saadaan laskettua yhtälöllä:

$$Q = L \times m, \quad (2)$$

missä L = polttoaineen lämpöarvo ja m = palavan polttoaineen massa. [38]

Lämmönvaihtimissa siirtyneisiin lämpöenergioihin päästään yksinkertaisimmillaan käsiksi siten, että lasketaan entalpiian muutokset lämmönvaihtimien eri väliaineille yhtälöllä:

$$\Delta H = m \int_{T_1}^{T_2} c \, dT = m \times c \times (T_2 - T_1), \quad (3)$$

missä m = virtaavan väliaineen massa, c = väliaineen ominaislämpökapasiteetti, T_1 = väliaineen tulolämpötila ja T_2 = väliaineen lähtölämpötila. [38]

Taselaskentaa varten laitteistosta tullutta mittaustietoa tulee keskiarvostaa. Jotta keskiarvostetut suureet vastaisivat mahdollisimman hyvin alkuperäisiä mittauksia, on valitun mittaustiedon tasaisuutta mielekästä tutkia tarkemmin. Tähän sopii hyvin lineaarisovituksen muodostaminen, joka voidaan toteuttaa usealla eri tekniikalla. LabVIEW-ohjelmointiympäristössä on muutamia valmiita lineaarisovituksen toteutuksia, jotka perustuvat iteratiivisiin pienimmän neliön ja Levenberg-Marquardt'n menetelmiin. Sovitusmenetelmäksi LabVIEW:n valmiissa ohjelmakomponenteissa voi valita pienimmän neliön, pienimmän absoluuttijäännöksen tai kaksoisneliön menetelmän. [39]

Pienimmän neliön menetelmä etsii lineaarisen mallin mukaiset parametrit minimoimalla jäännöksen seuraavalla yhtälöllä:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i (f_i - y_i)^2, \quad (4)$$

missä N = mittauksissa saatujen riippuvien parametrien lukumäärä, w_i = painotusten i :s elementti, f_i = parhaan lineaarisovituksen i :s elementti ja y_i = mittauksista saatujen riippuvien parametrien i :s elementti. [39]

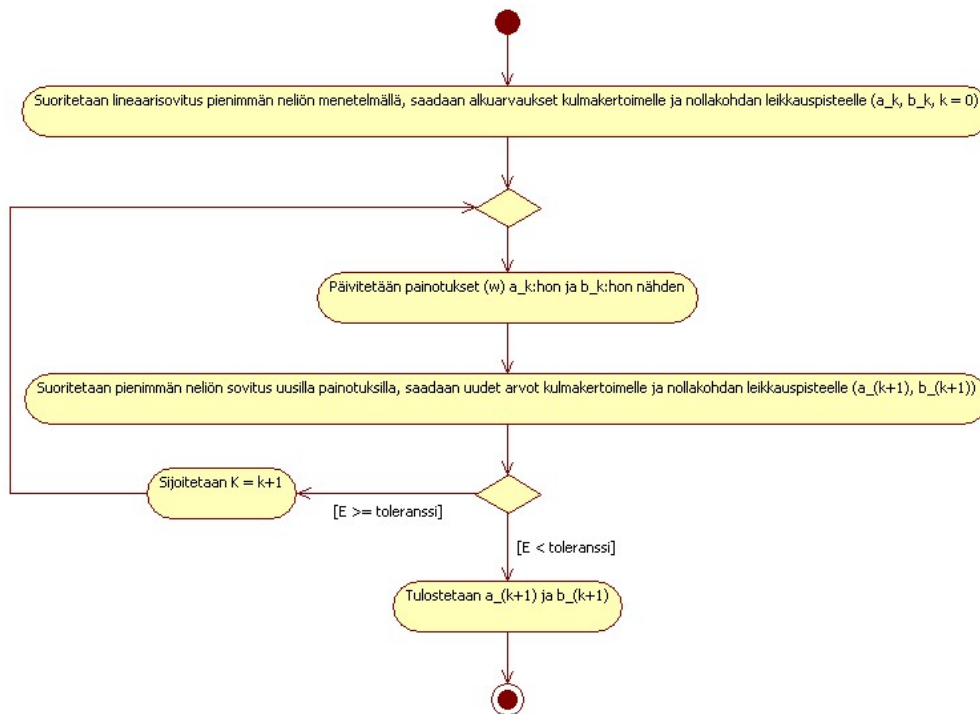
Pienimmän absoluuttijäännöksen ja kaksoisneliön menetelmät ovat vaakaampia sovitusten menetelmiä kuin pienimmän neliön menetelmä. Näitä kahta menetelmää käytetään, kun mittaustieto sisältää selvästi poikkeavia havaintoja, joita ei ole tarkoitus ottaa huomioon lineaarisovituksessa. [39] Pienimmän absoluuttijäännöksen menetelmä etsii lineaarisovituksen parametrit minimoimalla jäännöksen yhtälöllä:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i |f_i - y_i|, \quad (5)$$

missä syötettävät parametrit ovat vastaavat kuin yhtälössä 4. [39]

Kaksoisneliön menetelmä laskee jäännöksen samalla tavalla kuin pienimmän absoluuttijäännöksen menetelmä, mutta muut lineaarimallin pa-

parametrit eli kulmakertoimen ja nollakohdan leikkauspisteen menetelmä laskee kuvan 4.5 osoittamalla iteratiivisella prosessilla. [39]



Kuva 4.5: Iteratiivinen prosessi, jolla kaksoisneliön menetelmä etsii lineaarisovitukseen liittyvät parametrit kulmakertoimelle ja nollakohdan leikkauspisteelle LabVIEW-ohjelmointiympäristön sisältämässä aliohjelmassa. Kuvassa $E = \min \left(\left| \frac{\Delta a}{a} \right|, \left| \frac{\Delta b}{b} \right| \right)$. [39]

Lineaarisovituksen muodostamisen jälkeen on hyödyllistä tarkastella sovituksen hyvyyttä, ja myös tähän LabVIEW-ympäristö tarjoaa valmiita toteutuksia. Sovituksen hyvyyttä tarkastelevissa ohjelmakomponenteissa voidaan laskea SSE eli neliöllisen virheen summa, R-square eli normalisoitu hyvyyttä mittaava kerroin ja RMSE eli neliöllisen keskivirheen neliöjuuri. [40] Edellä esitellyt hyvyyslaskennan tulosparametrit määritellään seuraavasti:

$$SSE = \sum_{i=0}^{n-1} w_i (y_i - f_i)^2, \quad (6)$$

$$R\text{-square} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{DOF}}, \quad (8)$$

missä w_i = painotusten i :s elementti, y_i = mittauksista saatujen riippuvien parametrien i :s elementti ja f_i = parhaan lineaarisovituksen i :s elementti. Lisäksi $SST = \sum_{i=0}^{n-1} w_i (y_i - \bar{y})^2$, missä \bar{y} = mittauksissa saatujen riippuvien parametrien keskiarvo ja DOF = vapausaste. [40]

Sovituksen hyvyydestä kertovia parametreja tulkitaan siten, että sovitukset on sitä parempi mitä pienempiä SSE ja $RMSE$ ovat sekä mitä lähempänä R -square on lukuarvoa 1. [40]

4.4.3 Käytännön toteutus

Kuten aikaisemmin on tullut esille, tiedonanalysointi toteutettiin PC-tietokonepohjaisesti ja ohjelmisto laadittiin mittaustiedon latauksen ja pysyvän tallennuksen tavoin National Instrumentsin LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä. Tiedonkeruun toteutuksessa käytettyjen FTP-toiminnallisuuksien lisäksi LabVIEW-ympäristöstä löytyi myös tiedonanalysointiin ohjelmistokehitystä nopeuttavia komponentteja kuten taulukkomuotoisten tiedostojen käsittelyä, kuvaajien piirtämistä sekä tilastollisen laskennan työkaluja [35].

Mittaustiedon analysointiin käytettävä ohjelma jaettiin toteutusvaiheessa kahteen erilliseen osaan. Jaottelun lähtökohtana nähtiin ensinnäkin tarve tarkastella mittaustietoa yhden yksittäisen tai mahdollisesti muutaman toisiinsa läheisesti liittyvän mittalaitteen osalta, jolloin analysoinnissa käytettävä tieto löytyy samasta tiedonkeruun muodostamasta tiedostosta (ks. taulukot 4.1 ja 4.2). Toisena jakoperusteena pidettiin tarvetta laskea massa- ja energiataseita, mitä tehtäessä tarvitaan raakatietoa lähes kaikista mittaustietoa sisältävistä tiedostoista. Näin saatiin aikaiseksi looginen jaottelu kahteen toisistaan erillään olevaan kokonaisuuteen, joita ovat tiedonkeruun muodostamien yksittäisten tiedostojen tarkastelu sekä taselaskenta.

Koko mittaustiedon lataukseen, pysyvämpään tallennukseen ja analysointiin tarkoitettu LabVIEW-ohjelma toteutettiin käyttöliittymätasolla välilehtirakenteella. Tällöin tiedon lataukselle/tallennukselle ja kullekin tiedonkeruusta saadulle tiedostolle sekä taselaskennalle on varattu yksi välilehti. Kyseiseen rakenteeseen päädyttiin lukuisten vaihtoehtojen jälkeen siitä syystä, että nyt mikään ohjelman osa ei aktivoitaessa varaa ajovuoroa muilta ohjelman osilta ja estää ohjelmakontrollin siirtoa, kun käyt-

täjä haluaa siirtyä ohjelman osasta toiseen. Kyseisenlainen toteutus mahdollistaa esimerkiksi sen, että voidaan tarkastella samanaikaisesti eri välilehdiltä saatavia kuvaajia ja siirtyä kuvaajien tarkastelun välissä saumattomasti vaikkapa taselaskentaan.

Tiedon latauksen ja tallennuksen välilehteä on selvitetty tarkemmin luvun 4.3.4 lopussa. Mittaustiedostojen tarkastelun välilehdet taas muodostettiin osioista, joita olivat ladatun tiedoston avaus, raakatiedon näyttö taulukkomuodossa, kuvaajien piirtotoiminnot sekä mittaustiedon tunnuslukujen etsintään ja laskentaan liittyvät toiminnot.

Kullekin tiedonkeruun muodostamalle tiedostolle määritettiin ohjelmaan oma välilehtensä, sillä operointipäätteen antamat tiedostot eivät sisällä niiden mittalaitteiden nimiä, joista mittaustietoa kuhunkin tiedostoon on tallennettu. Täten raakatiedon näyttöön tarkoitettuihin taulukoihin oli välttämätöntä kiinteästi liittää prosessilaitteiden tai -pisteiden tunnukset. Ohjelma rakennettiin lisäksi sellaiseksi, että millään tiedon tarkastelun välilehdellä ei voi erehdyksessä tarkastella väärää mittaustietoa, sillä ohjelma ilmoittaa, jos avattavan tiedoston nimi ei ole oikeaa muotoa (ks. taulukot 4.1 ja 4.2).

Kuvaajien piirtämistoimintoja on jokaisella mittaustiedon tarkastelun välilehdellä valittavissa kaksi kappaletta, joista ensimmäisessä x- ja y-akselit voidaan valita mielivaltaisesti aikaleiman ja mittaussignaalien kesken, yksi muuttuja kutakin akselia kohti. Tällöin pystytään muodostamaan kuvaajia yksittäisistä mittalaitesignaaleista suhteessa aikaan tai vaikkapa jokin mittalaitesignaali toisen funktiona. Toisessa kuvaajanpiirtotoiminnossa käyttäjä voi valita yhden tai useampia mittaussignaaleja, jotka ohjelma piirtää aikaleiman (ks. jäljempää) funktiona.

Tunnuslukujen etsintään ja laskentaan tarkoitettuja toimintoja on kullakin mittaustiedon tarkastelun välilehdellä kaikkiaan kolme kappaletta. Niistä ensimmäinen on maksimiarvon etsintä, joka ilmoittaa ensimmäisen suurimman mittaussignaaliin liittyvän lukuarvon ja sitä vastaavan aikaleiman. Toinen on keskiarvon laskenta tietylle aikavälille ja kolmas on lineaarisovituksen muodostaminen niin ikään annetulle aikavälille. Lineaarisoitustoiminto kertoo sovituksen kulmakertoimen ja jäännöksen sekä sovituksen hyvyttä kuvaavat parametrit SSE, R-square ja RMSE (ks. luku 4.4.2). Kaikissa edellä mainituissa toiminnoissa yksi mittaussignaali tulee olla valittuna toimintoa pyydettyessä. Lineaarisoitukselle tulee lisäksi valita sovitukseen menetelmä, jossa vaihtoehtoina ovat pienimmän neliön, pienimmän absoluuttijäännöksen tai kaksoisneliön menetelmä.

Keskiarvon määrittämiselle sekä lineaarisovitukselle haluttu laskenta-aikaväli tulee tiedonanalysointiohjelmassa antaa suhteellisena aikana, mikä tarkoittaa juoksevaa aikaa ensimmäisestä mittausarvosta lähtien. Ope-

rointipäätteen toimesta mittausarvon aikaleimaksi asetetaan alun perin suoraan sen hetkinen kellonaika, mutta tiedonanalysoinnin kannalta ei ole olennaista, mihin vuorokauden aikaan mittaus on tapahtunut. Tärkeää sen sijaan on suhteellinen aika koeajon ja mittausten alkamisesta. Suhteellinen aika on muotoa hh:mm:ss ja esimerkiksi tietylle mittaussignaali- le sen pystyy hakemaan suhteellisen ajan mukaan piirretyistä mittaussig- naalikuvaajista.

Mittaustiedon tarkastelun välilehdillä olevat raakatietoa sisältävät tau- lukot esittävät mittausarvot absoluuttisen kellonajan mukaan, joten jotta taulukossa olevaa tietoa pystyy vaivatta lukemaan kuvaajien ja laskua- nalyysien lomassa, määritettiin ohjelmaan taulukoiden yhteyteen muun- tokenttä, joka muuntaa suhteelliset ajat raakatiedoissa oleviksi absoluut- tisiksi kellonaikaleimoiksi. Huomioitavaa on, että tämä muuntaja toimii oikein vain silloin, kun tiedoston sisältämä raakamittaustieto on yhdestä yhtenäisestä ajosta eikä se sisällä katkoksia.

Liitteissä D, E, F, G ja H, on esitetty mittaustiedon tarkasteluun liittyviä välilehtiä niin KAASU_xx-, PAINE_xx-, VESI_xx-, VIRTA_xx- kuin myös HIUKKAS-tiedostojen osalta. Lisäksi kuvissa 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ja 4.18 on esitetty kyseisten välilehtien piirtotoi- minnoilla aikaansaatuja kuvaajia. Kuvaajat liittyvät tiedonanalysointijär- jestelmän testauksessa käytettyyn mittaustietoon ja kuvaajissa - lukuunot- tamatta ensimmäistä kuvaajaa - on näkyvissä kyseisessä testauksessa tar- kempaan tarkasteluun valittu aikaväli (ks. luku 4.5.3). HAPPI- ja HAKA- tiedostoihin liittyvää analysointiosiota ei tämän opinnäytetyön yhteydes- sä toteutettu, sillä niihin liittyvä analysaattorisysteemi oli työtä tehtäessä käyttöönottamatta eikä mittaustietoa ollut tarjolla.

Taselaskentaan tarkoitettu välilehti muodostettiin mittaustiedon tar- kastelun tapaan myös useasta pienemmästä osiosta. Näitä osioita ovat las- kennassa käytettävien parametrien syöttö, laskennassa käytettävien mit- taustietojen keskiarvojen näyttö koelaitteiston prosessikaavion avulla se- kä laskettujen massa- ja energiataseiden esitys laitteiston eri komponent- tien mukaisesti jaoteltuna.

Erityisen huomionarvoista taselaskentaa tehtäessä on, että taselasken- taosio hakee tarvittavat mittaustiedot tiedontarkastelun välilehdillä ava- tuista tiedostoista. Välilehdillä tuleekin olla avattuna nimenomaan samas- ta koeajosta saadut mittaustiedostot KAASU_xx, VESI_xx ja VIRTA_xx, muutoin taselaskenta tuottaa virheellistä tietoa.

Erillistä laskennassa käytettävien parametrien syöttöä tarvitaan, sillä mittalaitteilta ei saada kaikkea energiataseiden määrittämiseen vaadittavaa tietoa. Laskentaparametreina ohjelmaan tulee syöttää käytettyjen puupel- lettien lämpöarvo L (kJ/kg) sekä ominaislämpökapasiteetti kolmelle pro-

sessissa käytettävälle väliaineelle eli palamisilmalle c_{ilma} (kJ/(kg K)), savukaasulle c_{savu} (kJ/(kg K)) ja jäähdytysvedelle c_{vesi} (kJ/(kg K)). Ohjelmallisiksi oletusarvoiksi näille parametreille asetettiin $L = 17500$ kJ/kg [41], $c_{ilma} = 1,01$ kJ/(kg K) [38], $c_{savu} = 1,24$ kJ/(kg K) (ks. liite J) ja $c_{vesi} = 4,19$ kJ/(kg K) [38]. Edellisten lisäksi vielä yhtenä laskentaparametrina tulee käyttäjän antaa haluttu taselaskennan aikaväli suhteellisena aikana ilmoitettuna.

Laskentaparametreihin liittyen erityistä varovaisuutta tulee noudattaa pellettien lämpöarvoa muutettaessa. Kyseinen lämpöarvoparametri on JY:n mikro-CHP-koelaitteiston laitteistototeutuksesta johtuen kovakoodattu ohjelmoitavaan logiikkaan (ks. luku 3.2.12) ja tulee siten päivittää myös sinne uutta lämpöarvoa annettaessa.

Taselaskennassa käytettävien mittauservoista laskettujen keskiarvojen näyttö prosessikaavion avulla otettiin mukaan havainnollistamaan laitteiston kokonaistilannetta tarkasteluaikavälillä. Prosessikaavioon punaisella merkittyjen keskiarvotietojen avulla käyttäjä saa yhdellä vilkaisulla käsityksen, millaisessa keskiarvoistilassa prosessin tietty kohta oli tutkitavalla aikavälillä. Samalla käyttäjä saa pohjatietoa ohjelman laskemille tasearvoille.

Keskiarvot esitetään prosessikaaviossa kaikille taselaskennassa käytetyille prosessipisteille lukuun ottamatta jäähdytysvesikierron kolmea virtausmittaria FI02, FI03 ja FI09. Nämä kolme mittalaitetta ovat kertymään perustuvia ja niistä saatu kokonaisvirtaustieto on suoraan taselaskentaan kelpaavaa muotoa, joten keskiarvostus olisi kyseisille mittalaitesignaaleille turhaa.

Taselaskentavälilehden viimeiseksi osioksi määritettiin laskettujen massa- ja energiataseiden esitys. Massataseiden esitys jaettiin kahteen osaan, sisäänmenoon ja ulostuloon, tosin massan ulosvirtauksesta ei tämänhetkisellä laitteistokokoonpanolla ole saatavilla mittaustietoa. Massataseisiin liittyen voidaan siis ilmoittaa vain sisään virtaava palamisilma ja puupelletit. Tosin puupellettivirtauksellekaan ei JY:n mikro-CHP-laitteistossa ole erillistä mittalaitetta, vaan arvo lasketaan manuaalisesti tehtävän kalibroinnin kautta.

Myös energiataseiden esitys jaettiin massataseiden esityksen tavoin kahteen osaan, sisäänmenoon ja ulostuloon. Tämän lisäksi jaottelua tehtiin eri kiertojen osalta sekä myös anturoinnin mukaisesti koelaitteiston eri komponenttien välillä. Erillisiksi kierroiksi tarkasteluun nimettiin kaasukierto tarkoittaen prosessissa virtaavaa palamisilmaa ja savukaasua, avoin jäähdytysvesikierto tarkoittaen jäähdytystä, joka virtaa suoraan viemäriin, sekä suljettu jäähdytyskierto tarkoittaen ekonomaisereiden suljettua jäähdytysvesiputkistoa. Edelleen näissä kierroista eroteltiin laitteiston kom-

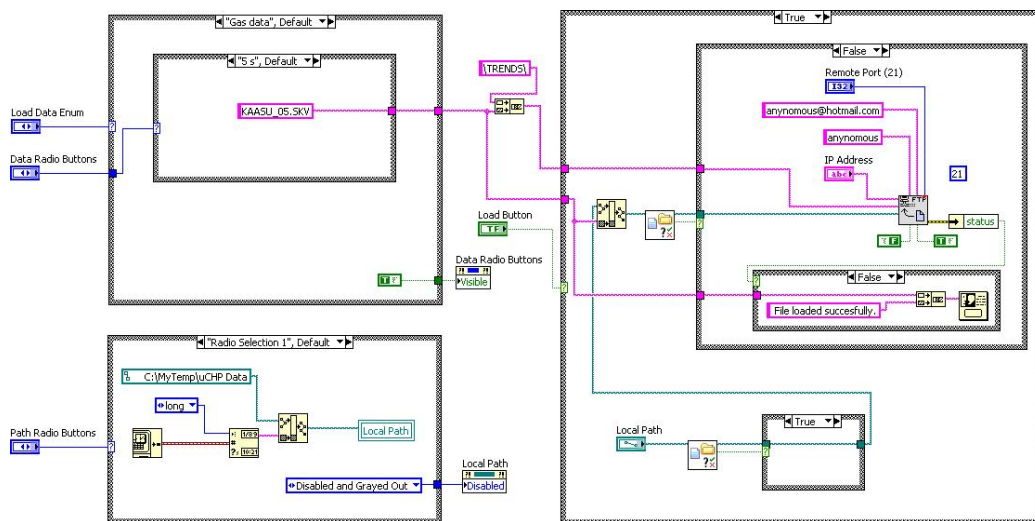
ponentit niin tarkasti kuin vain mittalaitteet mahdollistavat. JY:n mikro-CHP-laitteiston energiavirtojen lopulliseksi jaotteluksi saatiin seuraavaa:

- Kaasukierto, sisäänmeno: Tulipesä, Luvo
- Kaasukierto, ulostulo: Stirling, Luvo ja ekonomaiseri 1 yhdessä, Ekonomaiseri 2
- Avoin jäähdytysvesikierto, sisäänmeno: Stirling, Jäähdytyskiertojen välinen lämmönvaihdin
- Avoin jäähdytysvesikierto, ulostulo: Ei mittaustietoa saatavilla
- Suljettu jäähdytysvesikierto, sisäänmeno: Ekonomaiseri 1, Ekonomaiseri 2
- Suljettu jäähdytysvesikierto, ulostulo: Jäähdytyskiertojen välinen lämmönvaihdin

Lisäksi ekonomaiseri 1:sen jäähdytysvaippa kuuluu rakenteellisesti kaasukierron ulostuloksi ja avoimen jäähdytysvesikierron sisäänmenoksi, mutta jäähdytysvaipasta ei ollut tätä opinnäytetyötä tehtäessä mittaustietoa saatavilla.

Edellä mainitut laitteistokomponentit ja niille lasketut energia-arvot ovat taselaskennan välilehdellä aseteltu taulukkomuotoon niin, että alimmalla rivillä on esitetty kussakin laitteistokomponentissa luovutetun ja vastaanotetun energian erotus eli komponenttikohtainen energiatase. Lukuun ottamatta polttoaineen yhtälön 2 mukaisesti kaasukiertoon luovutettavaa energiaa yksittäiseen komponenttiin liittyvien energia-arvojen laskenta määritettiin taselaskentaohjelmaan yhtälön 3 mukaisesti.

Liitteessä I on esitetty kuva LabVIEW-ohjelmalla toteutetusta taselaskennan välilehdestä. LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä toteutetun ohjelman graafista lähdekoodia - niin mittaustiedon latauksen ja tallennuksen saati analysoinninkaan osalta - ei ole kokonaisuudessaan liitetty tämän opinnäytetyön yhteyteen. Kuvassa 4.6 on esitetty esimerkinomaisesti, miltä LabVIEW-ympäristön ohjelmakoodi näyttää. Kyseinen koodi liittyy mittaustiedon lataukseen operointipäätteeltä ja edelleen sen tallennukseen PC-tietokoneelle.



Kuva 4.6: Esimerkki LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä tehdystä ohjelmakoodista. Kyseinen koodi liittyy JY:n mikro-CHP-laitteiston mittaustiedon lataukseen operointipäätteeltä ja edelleen sen tallennukseen PC-tietokoneelle

4.5 Tiedonkeruun ja -analysoinnin testaus

4.5.1 Koeajoasetelma

Tiedonkeruun ja -analysoinnin testaus suoritettiin JY:n mikro-CHP-tutkimuslaitteiston kokonaisvaltaisen koeajon yhteydessä. Koeajo oli alun perin suunniteltu kestoltaan kahdeksan tunnin mittaiseksi, mutta muutamat tavallisesta poikkeavat alkuvalmistelut viivästyttivät laitteiston käynnistystä, joten pituutta koejolle kertyi lopulta noin kuusi tuntia. Alkuperäisestä suunnitelmasta lyhentynyt koeajo vaikutti käytännössä vain siihen, että laitteiston lämpötilat eivät kerinneet saturoitua korkeaan, esimerkiksi tulipesän osalta tasaiseen noin 1000 °C:een, tavoitelämpötilaan. Tällä ei kuitenkaan ollut suurta merkitystä, sillä koeajon pääasiallisena tarkoituksena oli testata mittaustiedon keruu- ja analysointijärjestelmiä.

Laitteistoa ajettiin esisuunnitelmista saatujen teorialaskelmien sekä aikaisempien laitteistolla tehtyjen koeajokokemusten mukaisesti. Polttoainetehona koeajossa käytettiin portaittain ensin 22 ja tämän jälkeen 40 sekä 45 kilowattia, jotka olivat etukäteen kalibroitu ja määritetty ohjausjärjestelmään. Ilmansyöttöjen suhdetta sekä voimakkuuksia vaihdeltiin koes-tamisen aikana polttoainetehoon verrannollisesti sekä sen mukaan, miten

laitteiston lämpötilojen nähtiin parhaiten pysyvän nousujohteisina. Aivan koeajon loppuvaiheessa kuuden tunnin lämmityksen jälkeen tulipesän yläosassa päästiin noin 700 °C lämpötilaan.

Koelaitteisto oli lähes kaikilta osin siinä kunnossa, mitä sen on kuvattu aikaisemmin tässä opinnäytetyössä olevan. Merkittävimmät, ja täysin tiedostetut, laitteistokokonaisuudelliset puutteet olivat happi- ja häkäanalysaattorisysteemin sekä savukaasukierrätyksen käyttöönoton puuttuminen. Näiden lisäksi ainoastaan tulipesän anturoinnissa oli ongelmia siten, että lämpötila-anturit TI 51 ja TI 53 eivät olleet käyttökunnossa eikä niistä saatu oikeaa mittaustietoa. Tällä ei kuitenkaan ollut testauksen onnistumisen kannalta suurta merkitystä, sillä esimerkiksi taselaskennassa vain tulipesästä lähtevän savukaasun lämpötila on olennainen. Tiedonkeruun ja -analysoinnin testauksen sivuhuomautuksena voidaan todeta, että edelliset puutteet poislukien koestuksessa mukana olleet laitteistokomponentit toimivat koeajossa ilman ongelmia.

4.5.2 Tiedonkeruun todennus

Tiedonkeruun toiminta testattiin siten, että tiedon tallennus käynnistettiin E1071-operointipäätteeltä 10 sekunnin näyteintervallilla heti, kun tuli oli kunnolla syttynyt tulipesään. Tiedonkeruun normaalien toimintatapojen mukaisesti juuri ennen tiedon talteenoton aloitusta trendi- ja lokitiedostot tyhjennettiin sekä jäähdytysvesikierron virtauslaskurit nollattiin.

Huomioitavaa tiedostojen tyhjennyksessä on, että sen tulee tapahtua talteenoton aloittamisen välittömässä läheisyydessä, sillä nykyisellä operointipäätteen ohjelmoinnilla historiatrendit keräävät tietoa jatkuvasti. Tiedonanalysointivaiheessa kaikissa tiedostoissa on havainnollista olla sama kellonaikaleima tiedon talteenoton aloitukselle, joten tiedostojen tyhjennys ja talteenoton aloitus tulee tapahtua lähellä toisiaan. Jäähdytysvesikierron laskureiden nollaus tehtiin tässä koeajossa vain siksi, että haluttiin nähdä tarkasti, kuinka paljon vettä missäkin jäähdytysvesikierron osassa koeajon aikana virtasi.

Nyt suoritettua koeajoa edeltäneissä tiedonkeruun testauksissa oli havaittu ongelmia tapauksissa, joissa kesken tiedon talteenoton oli avattu FTP-yhteys PC-tietokoneelta operointipäätteelle. Ongelmana oli ollut, että tietoa ei ollut kirjautunut tiedostoihin käyttäjän määrittämällä näyteintervallilla. Esimerkiksi Beijer Electronicsin HMI Tools- ohjelmistoa käyttäen FTP-yhteyden avaus oli saattanut häiritä tiedon talteenottoa niin pahasti, että tiedostojen sisältämiin aikaleimoihin oli tullut yksittäisiä jopa kymmenien sekuntien viiveitä.

Syyksi tiedonkirjausongelmiin voidaan epäillä FTP-yhteyden muodostuksen aiheuttamaa resurssien varausta operointipäätteeltä, jolloin tiedon talteenotto alemmalla suoritusprioriteetillä menee hetkellisesti tauolle. Kyseisen ongelman testaamiseksi koeajossa otettiin kesken tiedon talteenoton FTP-yhteys operointipäätteeseen LabVIEW-pohjaisella tiedon lataus- ja tallennusohjelmalla, mutta kuvailtua ongelmaa ei havaittu.

Koko koeajon ajan mittaustiedon talteenotto sujui kaikkineen odotetusti ja ongelmitta. Koestuksen lopussa, kun polttoaineensyöttö oli katkaistu ja tulipesän lämpötilat olivat laskeneet reiluun 600 °C:seen, katkaistiin tiedon talteenotto operointipäätteeltä. Koska historiatrendit eivät reagoi tiedon talteenoton aloitukselle tai lopetukselle, tämä katkaisi talteenoton vain lokitiedostojen osalta ja historiatrendit jatkoivat mittaustiedon talteenottoa. Siten loki- ja historiatrenditiedostot ladattiin ja tallennettiin PC-tietokoneelle välittömästi tiedon talteenoton katkaisun jälkeen, jotta kaikissa tiedostoissa olisi kutakuinkin samalla aikavälillä tallennettua tietoa.

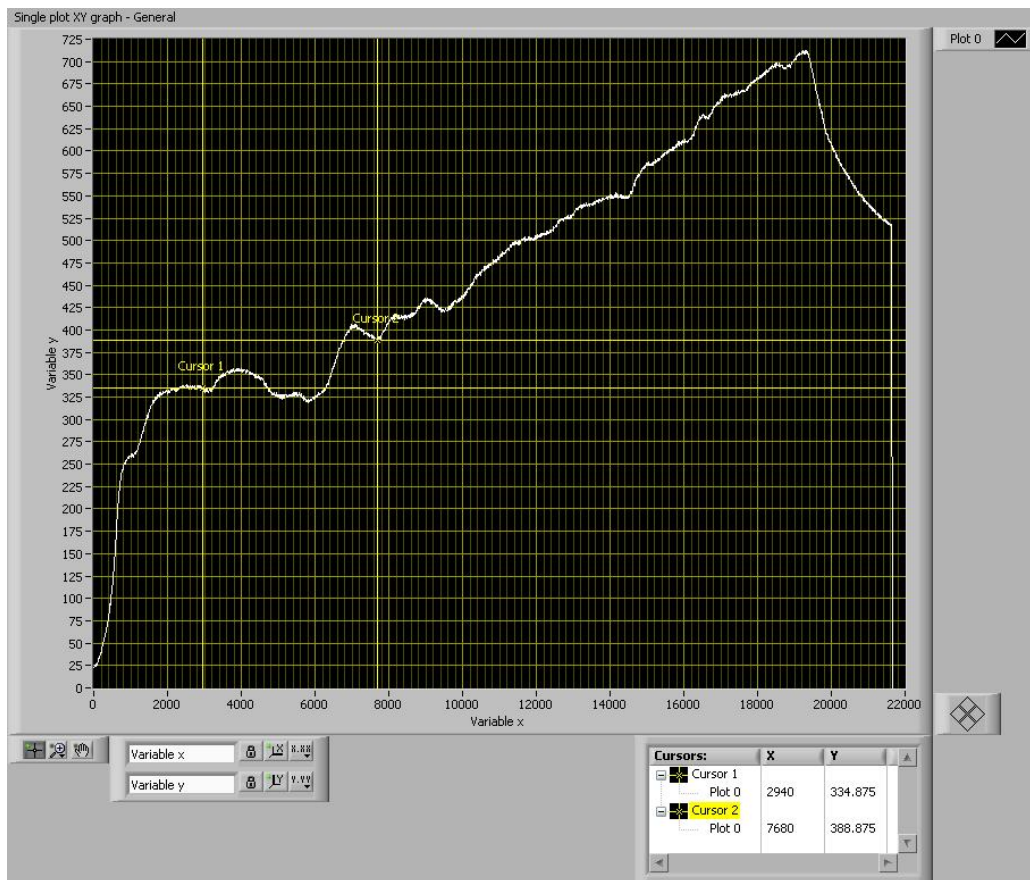
Tiedon talteenoton tavoin myös LabVIEW-sovelluksella tehty mittaustiedostojen lataus ja pysyvä tallennus sujui ilman ongelmia. Voidaankin todeta, että tiedonkeruujärjestelmä toimii kokonaisuutena virheettömästi. Tallennettuja tiedostoja tai niiden sisältämää raakatietoa ei ole täydellisessä muodossaan liitetty tämän opinnäytetyön yhteyteen, sillä jokaiselta tiedonkeruuseen liitetyltä mittalaitteelta kertyi koeajon aikana yli 2000 mitausarvoa.

4.5.3 Tiedonanalysoinnin testaus

LabVIEW:llä tehty tiedonanalysointijärjestelmä testattiin mikro-CHP-laitteiston koeajon jälkeen, kun koestuksessa saatu mittaustieto oli tallennettu PC-tietokoneelle. Tiedonanalysointiohjelman testaus toteutettiin mittaustiedon tarkastelun osalta järjestelmällisesti kaikille kymmenen sekunnin näyteintervallilla otetuille lokitiedostoille sekä myös hiukkanalysointiohjelman historiatrenditiedostolle. Viimeiseksi tiedonanalysointiohjelmassa testattiin taselaskennan toimivuus

Mittaustiedon tarkastelun testaus kaasukierron osalta eteni siten, että ensimmäiseksi avattiin koeajossa saatu KAASU_10.SKV-tiedosto, jolloin raakatieto latautui sille varattuun taulukkoon. Kuvaajien piirtämistä testattiin Single plot -osiossa piirtämällä kuvaajia useilla eri parametrikombinaatioilla. Kuvassa 4.7 on esitetty välittömästi tulipesän jälkeen savukaasukanaavassa sijaitseva TI 90 -lämpötila-anturi ajan suhteen piirrettynä.

Multiple plot -osiossa mittaustiedon tarkastelua testattiin useilla eri mittaussignaaliyhdistelmillä. Kuvissa 4.8, 4.9 ja 4.10 on esitetty eri sig-

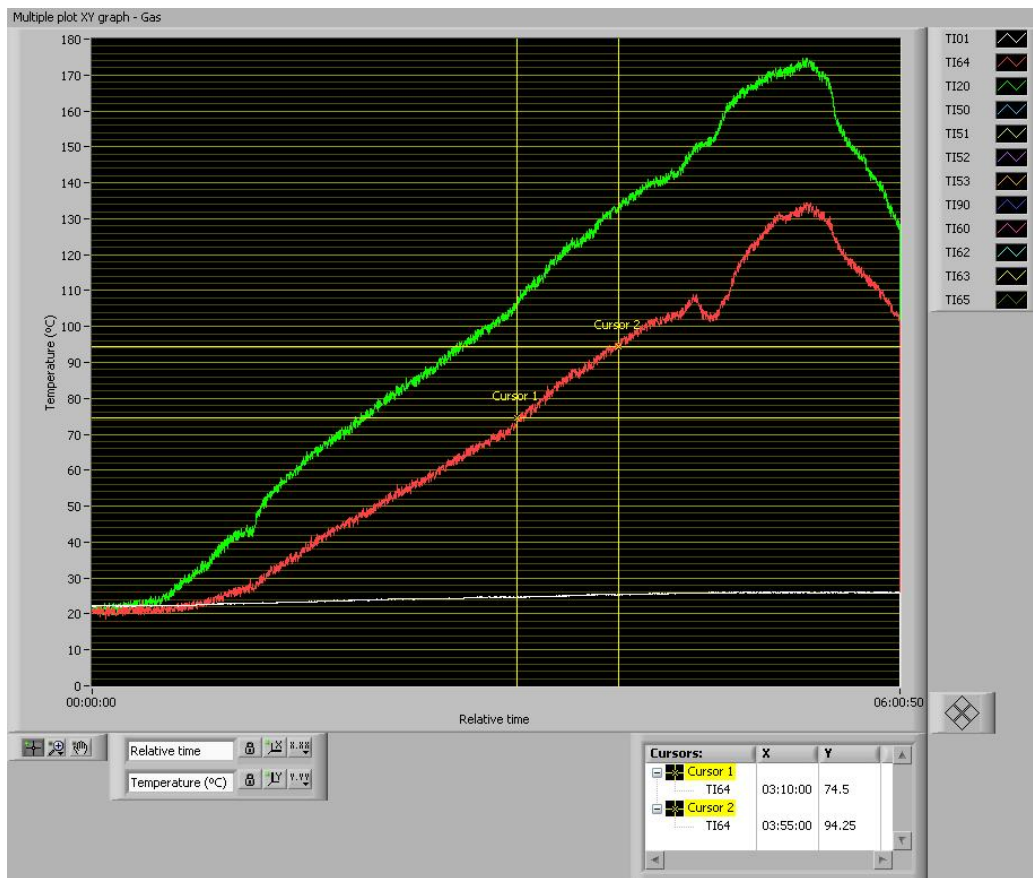


Kuva 4.7: TI 90 -lämpötila-anturi piirrettynä ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Single plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

naaleja samanaikaisesti sisältäviä kuvaajia. Kuvissa on näkyvissä kursorit, joita kuvaajanpiirtotoiminnoissa saa vapaasti lisättyä kuvaajiin ja joiden avulla pystytään tarkemmin analysoimaan mittaustiedon käyttäytymistä.

Mittaustiedon tunnuslukujen etsintään ja laskentaan liittyvät toiminnot eli Key figures - osio testattiin siten, että aluksi haettiin maksimiarvoja eri signaaleille. Tämän jälkeen tarkistettiin ohjelman antaman tiedon oikeellisuus kuvaajanpiirtotoimintojen ja Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelman avulla. Esimerkiksi TI 90 -anturille ohjelma ilmoitti maksimiarvoksi 712,5 °C suhteellisessa ajassa 05:21:50. Taulukkolaskenta antoi saman tuloksen.

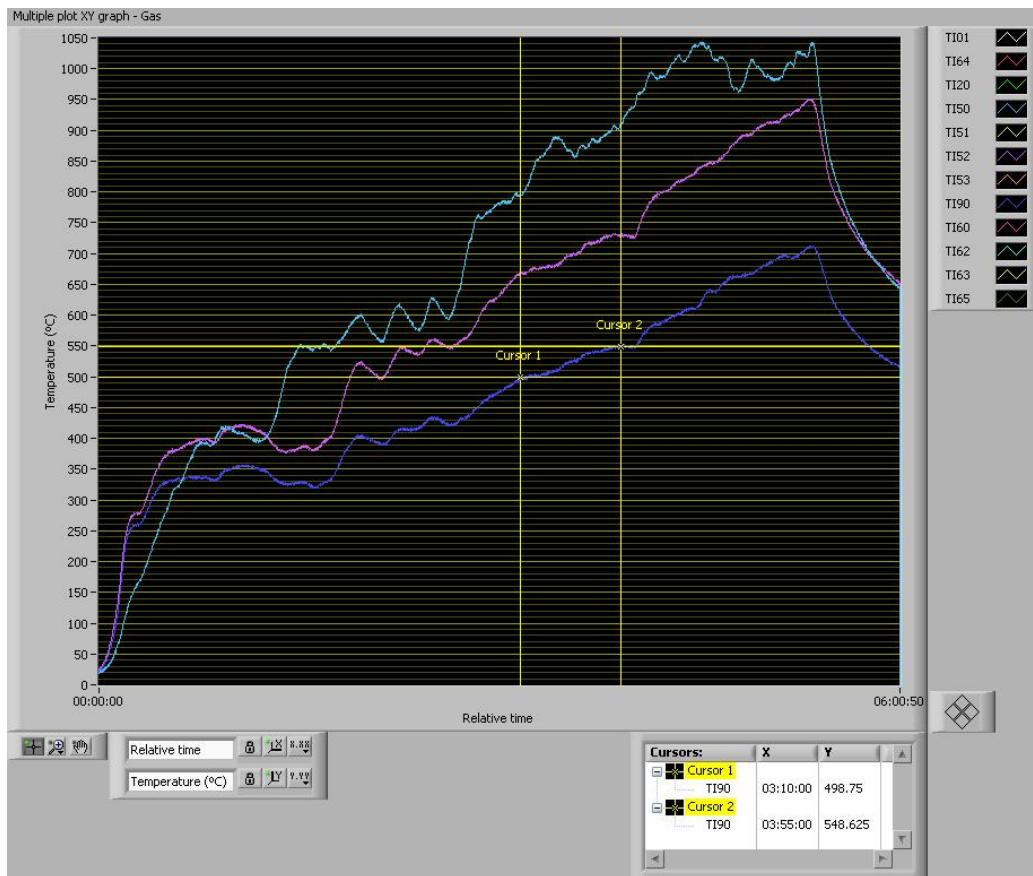
Keskiarvolaskenta testattiin niin, että ensin laskettiin keskiarvoja eri mittaussignaaleille kuvaajista kursorien avulla saaduilla suhteellisen ajan



Kuva 4.8: TI 01 -, TI 64 - ja TI 20 -lämpötila-anturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

arvoilla. Tämän jälkeen vastaavat keskiarvot laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmassa, jolloin eri menetelmillä laskettujen tulosten voitiin havaita täsmäävän kaikilla kokeilluilla signaaleilla ja aikaväleillä. Esimerkiksi TI 90 -anturille aikavälillä (03:22:40 → 04:00:00) saatiin tiedonanalysointiohjelman kautta 533,847 °C ja Excel-ohjelman kautta $\approx 533,847$ °C.

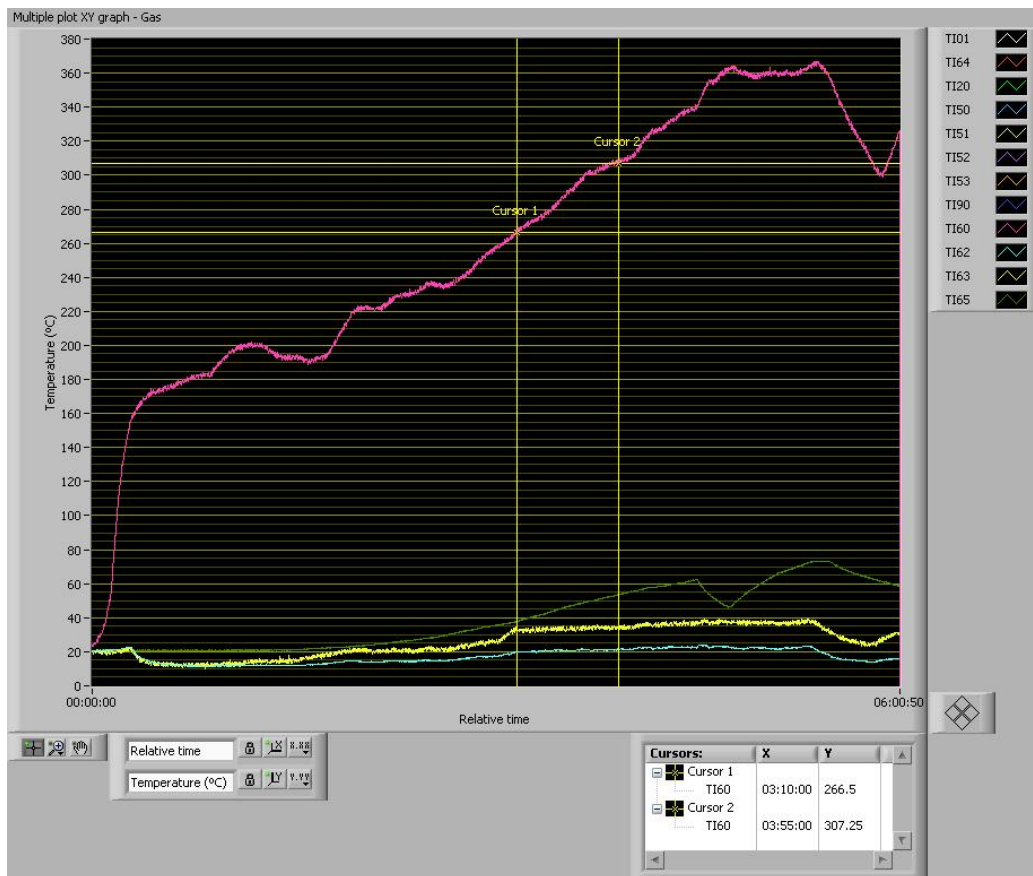
Linearisovitusosio testattiin yksinkertaisesti vain laskemalla lineaarisovituksia eri signaaleille erilaisille aikaväleille ja arvioimalla saatuja tuloksia silmämääräisesti kuvaajien avulla. Esimerkiksi TI 90 -signaalille kuvassa 4.9 esitetyllä aikavälillä (03:10:00 → 03:55:00) lineaarisovituksen antamiksi parametreiksi pienimmän neliön menetelmää (ks. luku 4.4.2) käyttäen saatiin seuraavaa: kulmakerroin = 0,0224418, jäännös = 8,6377, SSE = 2340,82, R-square = 0,97274 ja RMSE = 2,9499.



Kuva 4.9: TI 50 -, TI 52 - ja TI 90 -lämpötila-anturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

Mittaustiedon tarkastelun testaus muiden lokitiedostojen ja hiukkasmittaukseen liittyvän historiatrendin osalta meni täsmälleen edellä esitetyn kaasukierron tapauksen mukaisesti. Kuvissa 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 ja 4.18 on esitetty näissä ohjelman testauksissa saatuja kuvaajia.

Viimeinen tiedonanalysointijärjestelmän testauskohde oli taselaskentaosio. Taselaskennan toiminta testattiin laskemalla taseet tietyllä aikavälillä aluksi LabVIEW-ohjelmalla ja tämän jälkeen käsin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa hyväksikäyttäen. Laskennan aikaväliksi valittiin kaikissa tämän luvun Multiple plot -kuvaajissakin näkyvä 03:10:00 → 03:55:00 (suhteellista aikaa), jolloin laskentaan liittyväksi kokonaisajaksi tuli 45 minuuttia = 2700 s. Ohjelman vaatimina laskentaparametreina käytettiin asetettuja oletusarvoja eli puupellettien lämpöarvolle 17500 kJ/kg, palamisil-



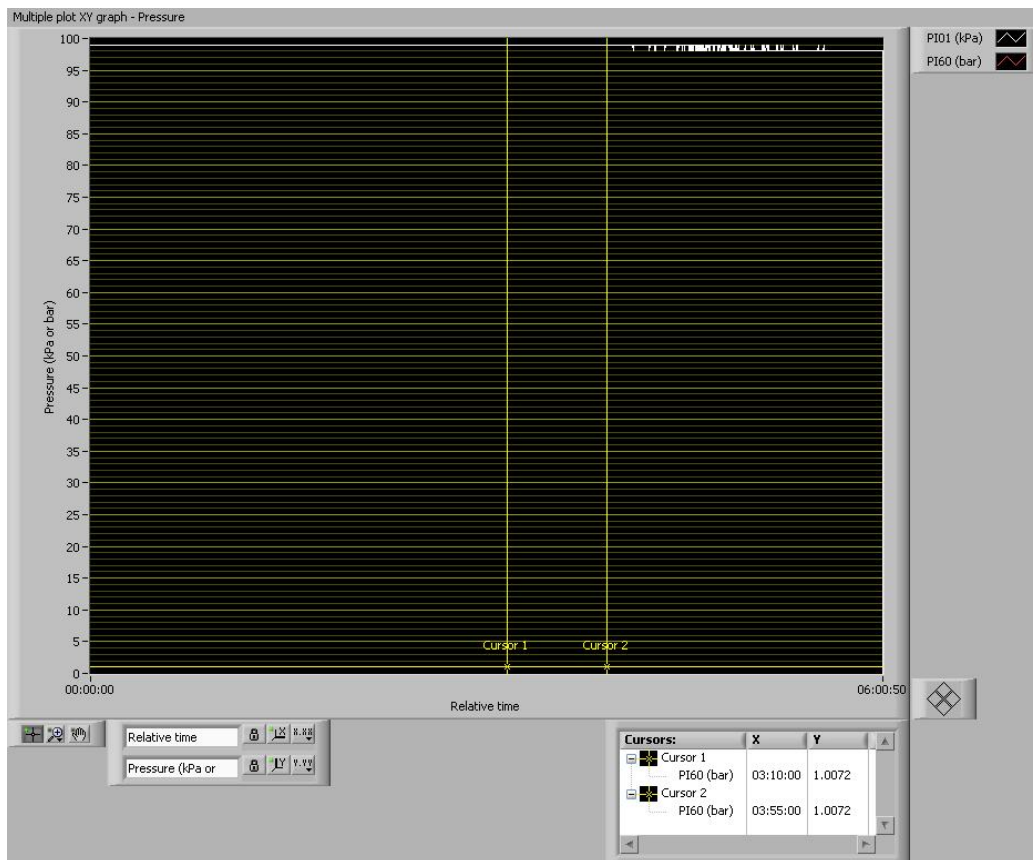
Kuva 4.10: TI 60 -, TI 62 -, TI 63 - ja TI 65 -lämpötila-anturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

man ominaislämpökapasiteetille 1,01 kJ/(kg K), savukaasun ominaislämpökapasiteetille 1,24 kJ/(kg K) ja vesijohtoveden ominaislämpökapasiteetille 4,19 kJ/(kg K).

Liitteessä I on prosessikaavion avulla esitettyä taselaskentaosion käyttämät mittaussignaalien keskiarvot. Massataseiden tapauksessa ohjelma antoi sisäänmenoille puupellettien osalta 6,19705 kg ja palamisilman osalta 53,7772 kg. Massavirtausten ulostuloille ei tämän hetkisessä laitteistossa ole mittaustietoa saatavilla, joten ohjelma ei antanut niille mitään arvoja. Varsinaisia taseita ei siten päästy laskemaan.

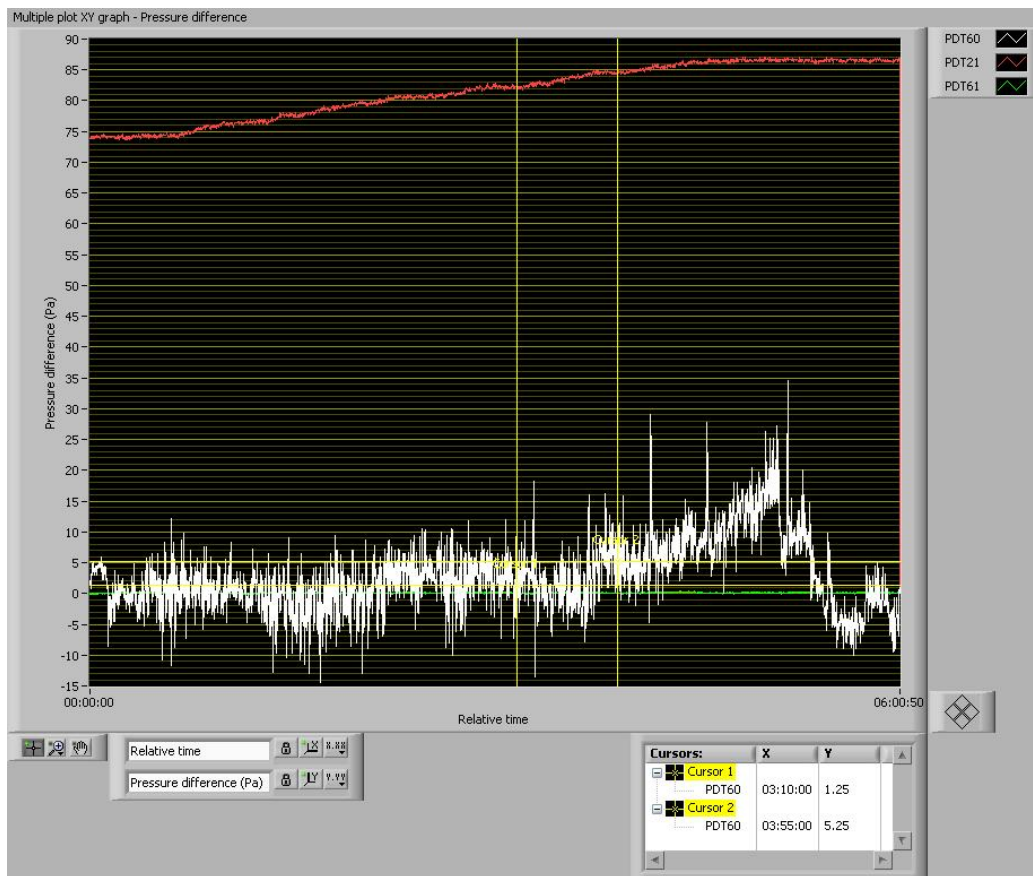
Laitteiston energiavirroille saatiin ohjelmassa ilma-, kaasu- ja vesikiertoja mukaillen seuraavat tulokset:

- Kaasukierto, sisäänmeno:



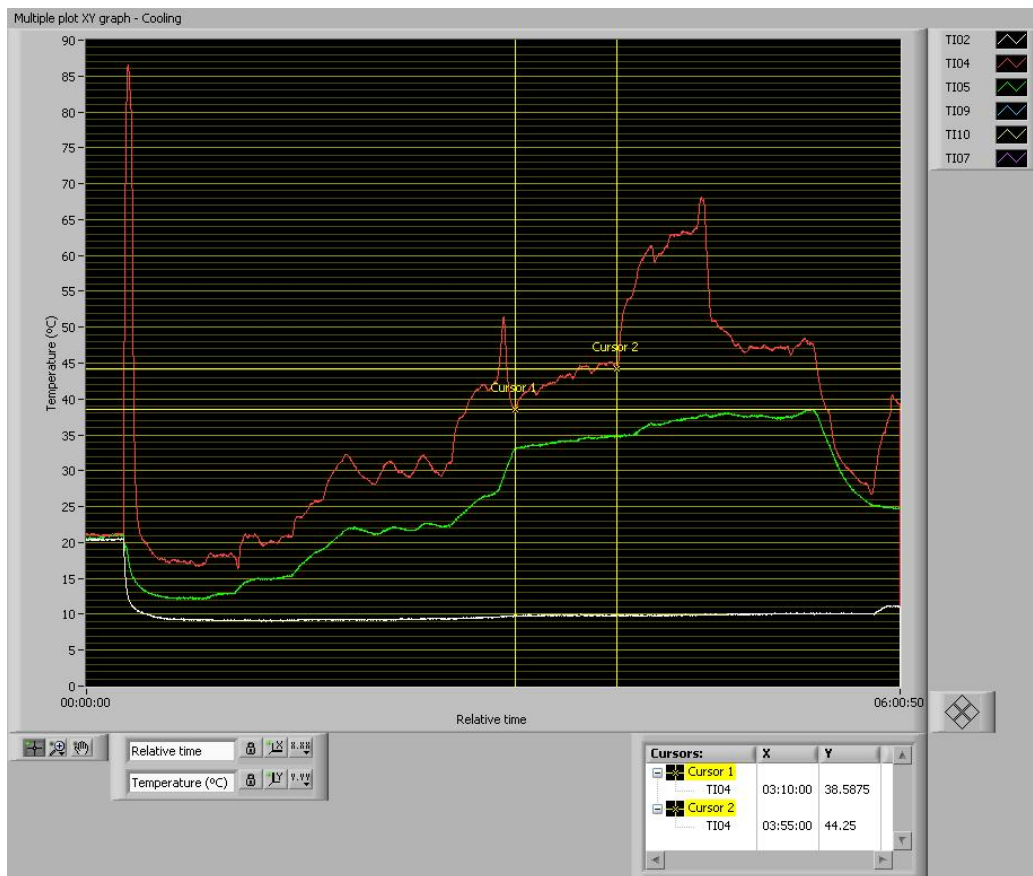
Kuva 4.11: PI 01 - ja PI 60 -paineanturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

- Tulipesä: $Q_{\text{tulipesä}} = 108448 \text{ kJ}$
- Luvo: $\Delta H_{\text{luvo, in}} = 2327,24 \text{ kJ}$
- Kaasukierto, ulostulo:
 - Stirling: $\Delta H_{\text{stirling, out}} = -15605,7 \text{ kJ}$
 - Luvo ja ekonomaiseri 1 yhdessä: $\Delta H_{\text{luvo+eko1, out}} = -17888 \text{ kJ}$
 - Ekonomaiseri 2: $\Delta H_{\text{eko2, out}} = 847,173 \text{ kJ}$
- Avoin jäähdytysvesikierto, sisäänmeno:
 - Stirling: $\Delta H_{\text{stirling, in}} = 40169,9 \text{ kJ}$
 - Lämmönvaihdin: $\Delta H_{\text{lämmönvaihdin, in}} = 14216,7 \text{ kJ}$



Kuva 4.12: PDT 60 -, PDT 21 - ja PDT 61 -paineanturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

- Avoin jäähdytysvesikierto, ulostulo:
 - Ei mittaustietoa saatavilla
- Suljettu jäähdytysvesikierto, sisäänmeno:
 - Ekonomaiseri 1: $\Delta H_{eko1, in} = -2114,06 \text{ kJ}$
 - Ekonomaiseri 2: $\Delta H_{eko2, in} = 2657,96 \text{ kJ}$
- Suljettu jäähdytysvesikierto, ulostulo:
 - Lämmönvaihdin: $\Delta H_{\text{lämmönvaihdin, out}} = -543,908 \text{ kJ}$



Kuva 4.13: TI 02 -, TI 04 - ja TI 05 -lämpötila-anturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

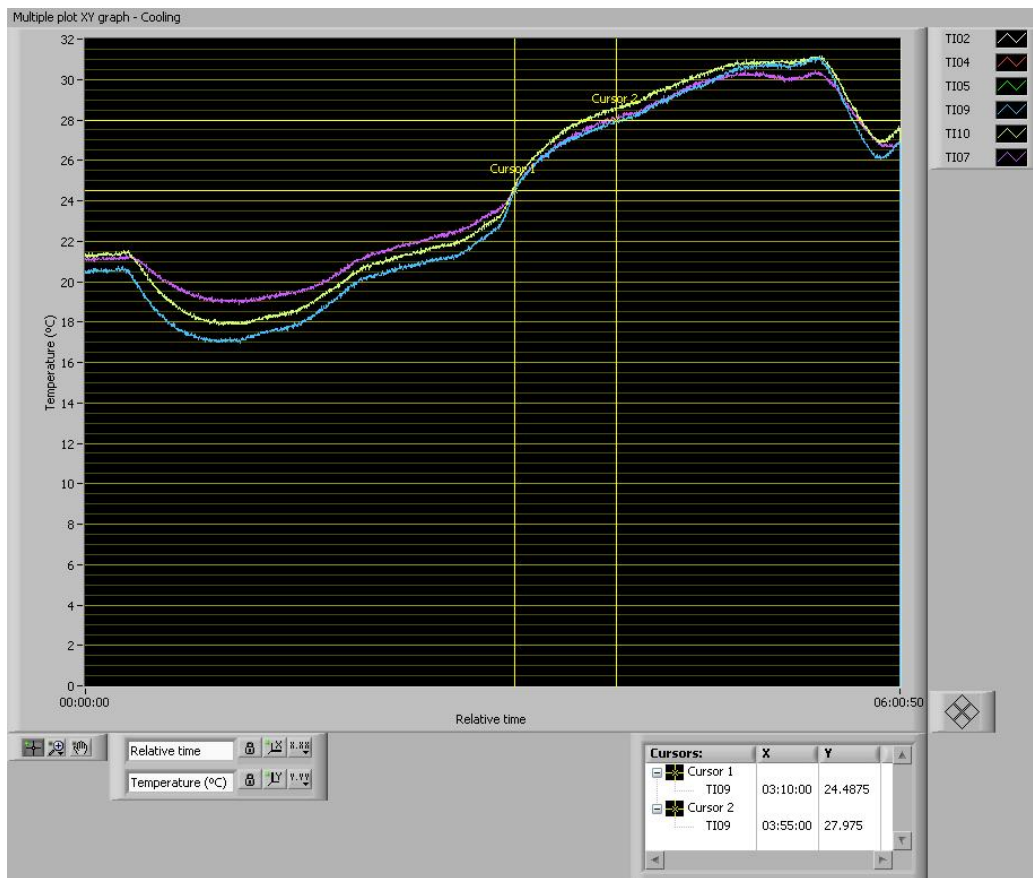
Edellisiä tuloksia käyttäen taselaskentaohjelma antoi komponenttikohtaisille energiataseille seuraavaa:

- Stirling:

$$\begin{aligned} \text{Delta} &= \text{Output} + \text{Input} \\ &= -15605,7 \text{ kJ} + 40169,9 \text{ kJ} = 24564,2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- Luvo ja ekonomaiseri 1 yhdessä:

$$\begin{aligned} \text{Delta} &= \text{Output} + \text{Input} \\ &= -17888 \text{ kJ} + (2327,24 \text{ kJ} - 2114,06 \text{ kJ}) \\ &= -17674,8 \text{ kJ} \end{aligned}$$



Kuva 4.14: TI 09 -, TI 10 - ja TI 07 -lämpötila-anturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

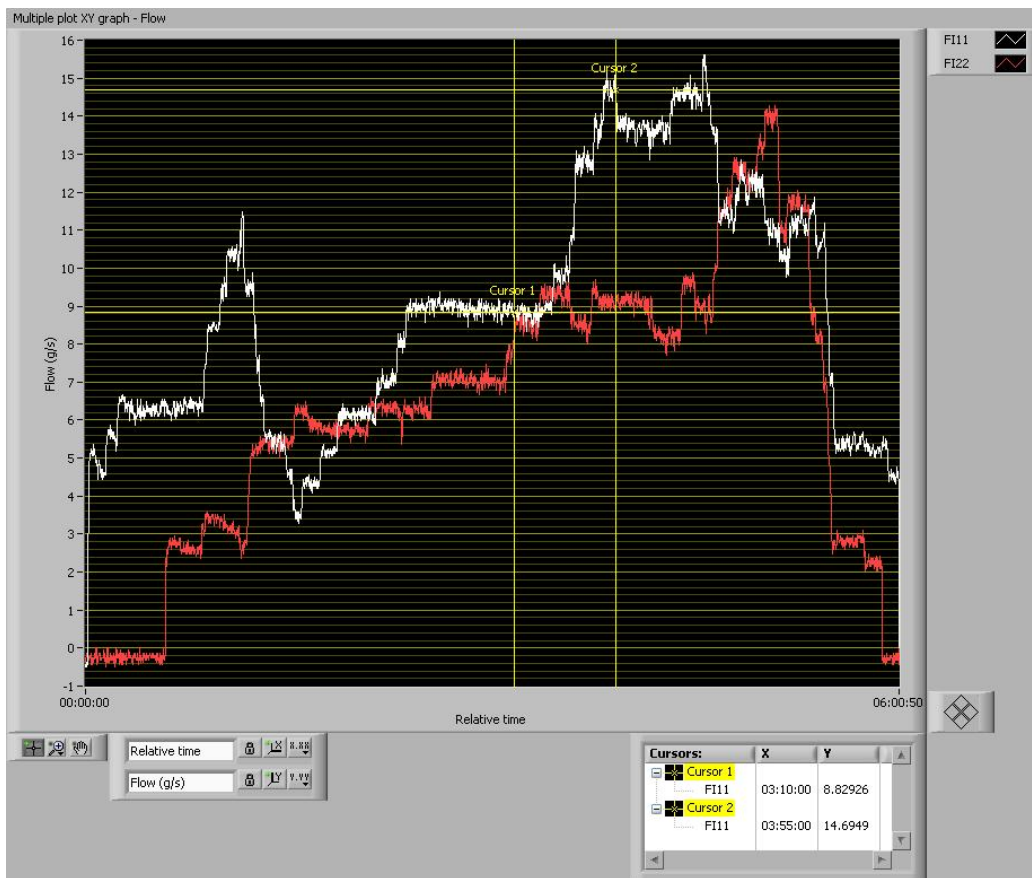
- Lämmönvaihdin:

$$\begin{aligned} \text{Delta} &= \text{Output} + \text{Input} \\ &= -543,908 \text{ kJ} + 14216,7 \text{ kJ} = 13672,8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- Ekonomaiseri 2:

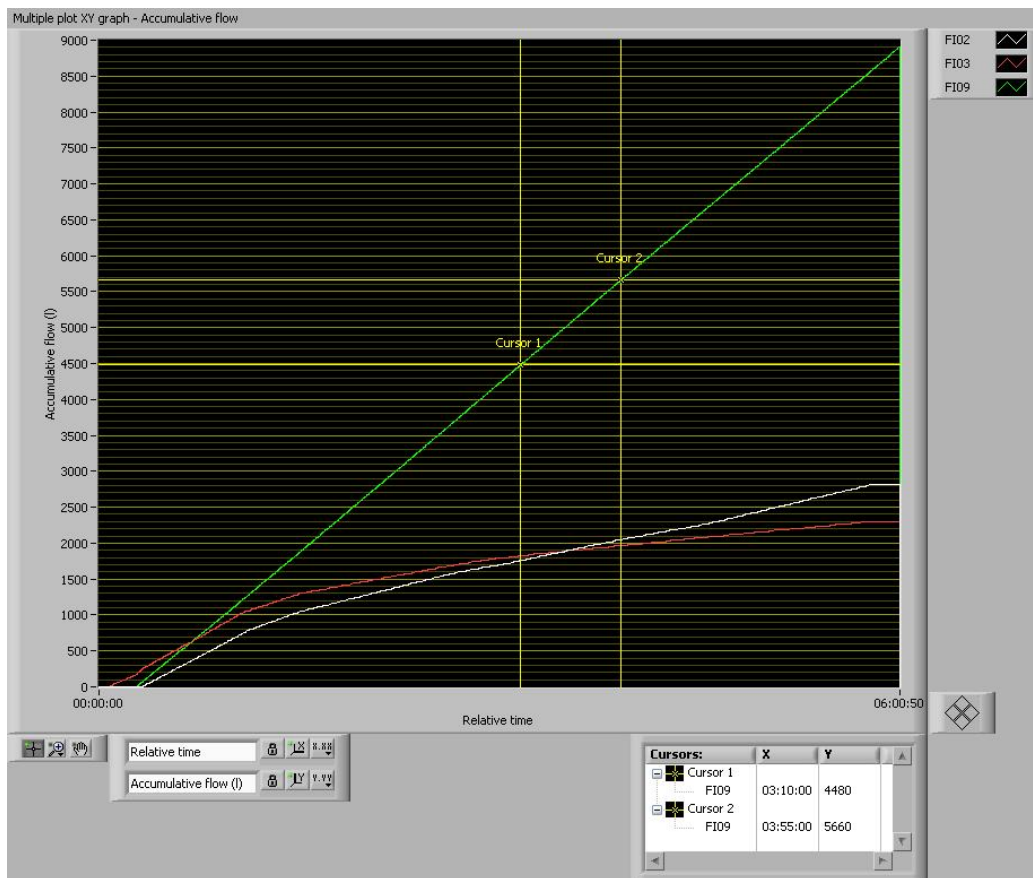
$$\begin{aligned} \text{Delta} &= \text{Output} + \text{Input} \\ &= 847,173 \text{ kJ} + 2657,96 \text{ kJ} = 3505,14 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Käsin ja Excel-taululukkolaskentaohjelmalla laskien saatiin samalta aikaväliltä otetulle mittaustiedolle ja samoilla taselaskentaparametreilla seuraavanlaiset tulokset:



Kuva 4.15: FI 11 - ja FI 22 -virtausanturit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

- Kaasukierto, sisäänmeno:
 - Tulipesä: taulukkolaskennassa keskimääräiselle polttoaineteholle tuli $P'_{\text{polttoaine}} \approx 40,1661 \text{ kW}$, jolloin pellettien luovuttamalle lämpöenergialle saatiin: $Q'_{\text{tulipesä,in}} = P'_{\text{polttoaine}} \times t = 40,1661 \text{ kW} \times 2700 \text{ s} = 108448,47 \text{ kJ}$.
 - Luvo: taulukkolaskennasta keskimääräisiksi arvoiksi saatiin sekundääri-/tertiääri-ilmavirtaukselle $m'_{\text{FI22}} \approx 8,9140 \text{ g/s}$ sekä ilman lämpötiloille ennen ja jälkeen $T'_{\text{T101}} \approx 25,0540 \text{ °C}$ ja $T'_{\text{T120}} \approx 120,7915 \text{ °C}$, jolloin yhtälöä 3 käyttäen siirtyneelle lämpöener-

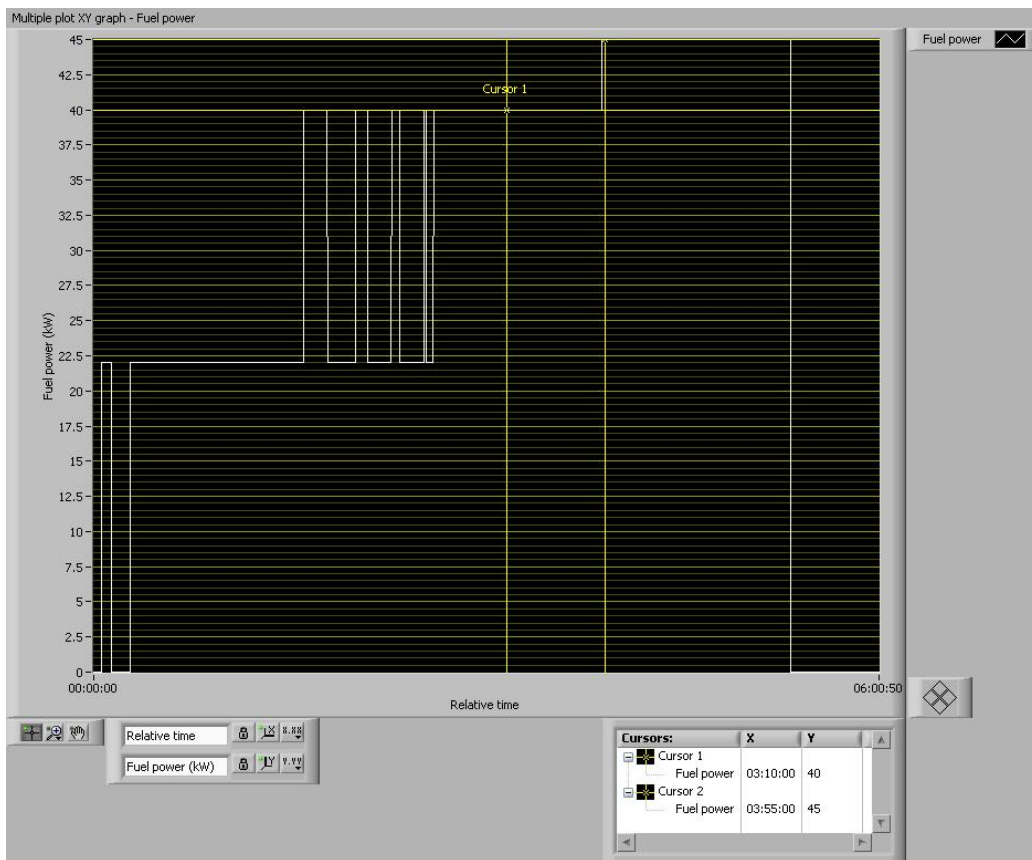


Kuva 4.16: FI 02 -, FI 03 - ja FI 09 -virtausmittarit piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

gialle saatiin:

$$\begin{aligned}
 \Delta H'_{luvo, in} &= c_{ilma} \times m'_{FI22} \times (T'_{TI20} - T'_{TI01}) \times 2700 \text{ s} \\
 &= 1,01 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C}) \times 8,9140 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \times \\
 &\quad (120,7915 \text{ } ^\circ\text{C} - 25,0540 \text{ } ^\circ\text{C}) \times 2700 \text{ s} \\
 &= 2327,2329 \text{ kJ}.
 \end{aligned}$$

- Kaasukierto, ulostulo:
 - Stirling: taulukkolaskennassa keskimääräiseksi primääri-ilma- virtaukseksi saatiin $m'_{FI11} \approx 11,0035 \text{ g/s}$, jolloin edellä annettua m'_{FI22} :sta käyttäen keskimääräiseksi kokonaisvirtaukseksi savu- kaasukanavassa tuli $m'_{savukaasu, tot} = m'_{FI11} + m'_{FI22} \approx 19,9175 \text{ g/s}$.



Kuva 4.17: Polttoaineteho piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

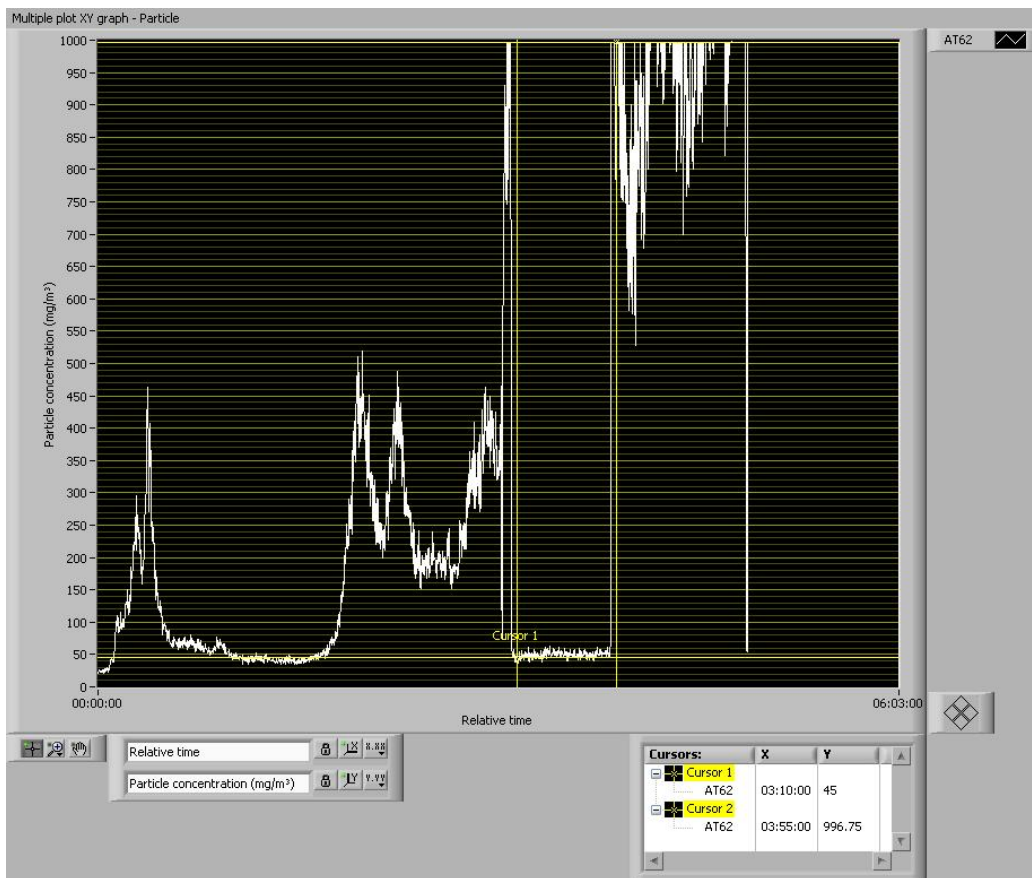
Lisäksi keskimääräisille savukaasun lämpötiloille sisäänmenossa ja ulostulossa tuli $T'_{T190} \approx 523,0461 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $T'_{T160} \approx 289,0203 \text{ }^\circ\text{C}$. Tällöin yhtälöllä 3 saatiin:

$$\Delta H'_{\text{stirling, out}} = -15605,7273 \text{ kJ.}$$

- Luvo ja ekonomaiseri 1 yhdessä: taulukkolaskennassa keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenossa ja ulostulossa saatiin $T'_{T160} \approx 289,0203 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $T'_{T162} \approx 20,7689 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin yhtälön 3 mukaisesti tuli:

$$\Delta H'_{\text{luvo+eko1, out}} = -17888,02 \text{ kJ.}$$

- Ekonomaiseri 2: taulukkolaskennassa keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenossa ja ulostulossa saatiin $T'_{T162} \approx 20,7689 \text{ }^\circ\text{C}$



Kuva 4.18: AT 62 -hiukkaspitoisuusanalysointilaite piirrettynä suhteellisen ajan suhteen mittaustiedon tarkastelun Multiple plot -osiossa. Mittaustieto on JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkäsittelyjärjestelmän testausajosta.

ja $T'_{T163} \approx 33,4733 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin yhtälöllä 3 tuli:

$$\Delta H'_{eko2,out} = 847,1775 \text{ kJ.}$$

Huomionarvoista on, että kyseinen arvo on positiivinen, vaikka luovutettavan energian kohdalla ΔH :n tulisi olla negatiivinen. Saatu tulos on joka tapauksessa yhtäpitävä LabVIEW-ohjelman antaman tuloksen kanssa.

- Avoin jäähdytysvesikierto, sisäänmeno:
 - Stirling: taulukkolaskennassa saatiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenolle ja ulostulolle $T'_{T102} \approx 9,8388 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $T'_{T104} \approx$

42,8978 °C sekä kokonaisvirtaukselle $V'_{F102} = 290$ l eli $m'_{F102} = 290$ kg, jolloin yhtälöllä 3 tuli:

$$\Delta H'_{\text{stirling,in}} = 40169,9909 \text{ kJ.}$$

- Lämmönvaihdin: taulukkolaskennassa saatiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenolle ja ulostulolle $T'_{T102} \approx 9,8388$ °C ja $T'_{T105} \approx 34,0746$ °C sekä kokonaisvirtaukselle $V'_{F103} = 140$ l eli $m'_{F103} = 140$ kg, jolloin yhtälöllä 3 tuli:

$$\Delta H'_{\text{lämmönvaihdin,in}} = 14216,7203 \text{ kJ.}$$

- Avoin jäähdytysvesikierto, ulostulo:
 - Ei mittaustietoa saatavilla
- Suljettu jäähdytysvesikierto, sisäänmeno:
 - Ekonomaiseri 1: taulukkolaskennassa saatiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenolle ja ulostulolle $T'_{T110} \approx 27,2054$ °C ja $T'_{T107} \approx 26,7778$ °C sekä kokonaisvirtaukselle $V'_{F109} = 1180$ l eli $m'_{F109} = 1180$ kg, jolloin yhtälöllä 3 tuli:

$$\Delta H'_{\text{eko1,in}} = -2114,1399 \text{ kJ.}$$

Huomioitavaa on, että kyseinen arvo on negatiivinen, vaikka vastaanotetun energian kohdalla ΔH :n tulisi olla positiivinen. Tästä huolimatta kyseinen arvo on yhtäpitävä LabVIEW:llä saadun lukuarvon kanssa.

- Ekonomaiseri 2: taulukkolaskennassa saatiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenolle ja ulostulolle $T'_{T109} \approx 26,6678$ °C ja $T'_{T110} \approx 27,2054$ °C sekä sama virtaus kuin edellä ekonomaiseri 1:ssä, jolloin yhtälöllä 3 tuli:

$$\Delta H'_{\text{eko2,in}} = 2658,0019 \text{ kJ.}$$

- Suljettu jäähdytysvesikierto, ulostulo:
 - Lämmönvaihdin: taulukkolaskennassa saatiin keskimääräisiksi lämpötiloiksi sisäänmenolle ja ulostulolle $T'_{T107} \approx 26,7778$ °C ja $T'_{T109} \approx 26,6678$ °C sekä virtaukselle sama kuin ekonomaisereissa, jolloin yhtälön 3 mukaisesti tuli:

$$\Delta H'_{\text{lämmönvaihdin,out}} = -543,862 \text{ kJ.}$$

Edellä laskettuja tuloksia käyttäen komponenttikohtaisille energiata-
seille saatiin seuraavaa:

- Stirling:

$$\begin{aligned}\Delta' &= \text{Output}' + \text{Input}' \\ &= -15605,7273 \text{ kJ} + 40169,9909 \text{ kJ} = 24564,2636 \text{ kJ}\end{aligned}$$

- Luvo ja ekonomaiseri 1 yhdessä:

$$\begin{aligned}\Delta' &= \text{Output}' + \text{Input}' \\ &= -17888,02 \text{ kJ} + (2327,2329 \text{ kJ} - 2114,1399 \text{ kJ}) \\ &= -17674,927 \text{ kJ}\end{aligned}$$

- Lämmönvaihdin:

$$\begin{aligned}\Delta' &= \text{Output}' + \text{Input}' \\ &= -543,862 \text{ kJ} + 14216,7203 \text{ kJ} = 13672,8583 \text{ kJ}\end{aligned}$$

- Ekonomaiseri 2:

$$\begin{aligned}\Delta' &= \text{Output}' + \text{Input}' \\ &= 847,1775 \text{ kJ} + 2658,0019 \text{ kJ} = 3505,1794 \text{ kJ}\end{aligned}$$

LabVIEW-ohjelman antamia tuloksia käsin laskettuihin ja Excel-tau-
lukkolaskennalla saatuihin tuloksiin vertaamalla voidaan todeta, että eri
menetelmillä saadut lukuarvot vastaavat hyvin toisiaan. Jonkin verran toi-
sistaan poikkeavat arvot ovat ilmeisesti peräisin eri tietokoneohjelmien
välillä vaihtelevasta laskentatarkkuudesta. Laskentatarkkuuteen ei tässä
kuitenkaan paneuduta sen tarkemmin, joten tiedonanalysointiohjelman
toiminta on nyt tehdyn testauksen perusteella virheetöntä. Tässä vaihees-
sa on tosin järkevää todeta, että osa ohjelmien halutuista ominaisuuksista
tai toiminnallisista virheistä havaitaan usein vasta pitkäaikaisten käyttö-
kokemusten ja käyttäjiltä saadun palautteen perusteella.

Tiedonanalysointiohjelman loogisessa toiminnassa ei siis koestuksessa
ilmennyt ongelmia. Yhdeksi koko laitteistoa koskevaksi ongelmaksi näyt-
tää kuitenkin muodostuvan se, että komponenttikohtaisten energioiden
sisäänmenojen ja ulostulojen summien tulisi olla lähellä nollaa. Nyt näin
ei selvästikään ole, mikä viittaa mittalaitteiden virheelliseen toimintaan.
Näihin mahdollisiin ongelmiin tai muihin tähän liittyviin seikkoihin ei tä-
män opinnäytetyön puitteissa paneuduta sen tarkemmin.

5 Yhteenveto

Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto suuressa mittakaavassa eli CHP-tuotanto on paljon käytetty ja hyötysuhteeltaan hyvä tapa täyttää yhteiskunnan energiantarpeita. Hajautetun energiatuotannon herättäessä yhä enemmän kiinnostusta tutkimusresursseja on suunnattu CHP-tuotantoon myös pienemmässä mikrokokoluokassa. Mikro-CHP-laitteistojen toteutustekniikoille ja polttoaineratkaisuille löytyy lukuisia eri vaihtoehtoja, mutta valmista mikro-CHP-tuotantotekniikkaa kuluttaja-asteella on tarjolla varsin rajoitetusti.

Mikro-CHP-laitteistoihin liittyy selkeästi niin hyviä kuin huonojakin puolia. Suurimmat ongelmakohdat ovat tällä hetkellä laitteistojen korkea hinta sekä sähkön- ja lämmöntuotannon suhde. Jokainen uusi mikro-CHP-laitteistoinvestointi tulee siten punnita erikseen hyvin tarkoin. Etuja mikro-CHP-laitteistoissa ovat paikallisesti tuotettu sähkö tarkoittaen vähentyneitä sähkönsiirtokustannuksia sekä parhaassa tapauksessa kasvanut energiantuotannon kokonaistehokkuus. Lisäksi hyvistä puolista puhuttaessa ei voida unohtaa uusiutuvien energialähteiden hyödyntämistä. Esimerkiksi Suomen energianhuollon tulevaisuutta ajatellen mikro-CHP-laitteistot hajautetun energiantuotannon ratkaisuna ja vaikkapa puuraaka-aine polttoaineena voivat muodostua kilpailukykyiseksi yhdistelmäksi.

Osansa mikro-CHP-tuotantotekniikan kehitysvastuusta on ottanut JY:n (Jyväskylän yliopisto) Uusiutuvan energian tutkimus- ja koulutusohjelma omalla pellettipolttimeen ja stirlingmoottoriin perustuvalla mikro-CHP-tutkimuslaitteistollaan. Koelaitteiston rakennusvaihe on saatu lähes päätökseen, vaikkakin muutamia puutteita laitteistosta vielä löytyy - suurimpina niistä asentamaton stirlingmoottori sekä vielä käyttöönottoa vaille oleva happi- ja häkäpitoisuutta savukaasusta mittaava analysaattorisysteemi. Ensimmäisiä koeajokokemuksia JY:n mikro-CHP-projektista on jo saatu ja lisää koeajoja sekä monimuotoista tutkimustyötä on suunnitteilla koelaitteiston yhteyteen [42].

Opinnäytetyönä JY:n mikro-CHP-koelaitteiston tiedonkeruun ja -analysoinnin suunnittelu, toteutus ja testaus oli erittäin monipuolinen ja antoisaa kokonaisuus. Tehtävänmäärittelyssä tiedonkeruu ja -analysointi olivat keskeisessä roolissa, mutta ydinasian ohella työ mahdollisti myös kokonaisvaltaisen perehtymisen JY:n mikro-CHP-laitteistoon ja sen toimintaan. JY:n koelaitteiston ohella opinnäytetyötä tehdessä tuli tutustuttua lisäksi muuhunkin mikro-CHP-tekniikkaan.

Kirjallisuusselvitysten ja teoriataustojen vastapainona koelaitteiston rakentaminen ja kuuma-ajovalmiuteen saattaminen sekä laitteistolla tehdyt koeajot toivat opinnäytetyöhön vahvasti käytäntöön kytköksissä olevan

näkökulman. Osa opinnäytetyöstä tehtiin läheisessä yhteistyössä muun projektihenkilöstön kanssa, mutta käytännössä suurin osa opinnäytetyön sisällöstä - erityisesti tiedonkeruun ja -analysoinnin suunnittelu, toteutus ja testaus - toteutettuun hyvin itsenäisenä työskentelynä.

Mitsubishin E1071-operointipäätteellä toteutettu mittaustiedon talteenotto sekä PC-pohjaisesti LabVIEW-ohjelmointiympäristössä toteutettu mittaustiedon pysyvä tallennus ja analysointi osoittautuivat toimivan koeajoissa juuri suunnitellusti ja ongelmitta. Nykyisellä toteutuksellaan tiedonkeruujärjestelmällä saadaan talteenotettua mittaustietoa kaikista koelaitteistoon kytketyistä mittalaitteista sekä tallennettua mittaustieto pysyvästi PC-tietokoneelle. Erityismaininnan arvoista on mittaustiedon latauksen ja tallennuksen toteutus operointipäätteestä FTP:tä (File Transfer Protocol) käyttäen, mikä ei ole ainakaan esteenä, jos tulevaisuudessa JY:n mikro-CHP-koelaitteisto halutaan muuntaa täysin etäkäytettäväksi.

Tiedonanalysointijärjestelmällä saadaan mittaustiedosta helposti piirrettyä erilaisia kuvaajia sekä laskettua keskeisimpiä tilastollisia suureita. Tiedonanalysoinnilla voidaan lisäksi laskea massa- ja energiataseita laitteiston komponenttien mukaan jaotellusti. Erityisen huomionarvoista tiedonanalysointiin, ja osittain myös tiedonkeruuseen, liittyen on LabVIEW-ohjelmointiympäristön valinta ohjelmiston toteutukseen. LabVIEW on yleinen mittaus- ja tiedonkäsittelysovelluksissa käytetty alusta, jolloin käyttöliittymä ja perustoiminnallisuudet ovat monille tutkimuslaitteistojen kanssa työskennelleille jo ennestään tuttuja. Kyseisen kehitysympäristön valinta mahdollistaneen verrattain nopean ohjelmistopäivityksen JY:n mikro-CHP-laitteiston tiedonkeruuta ja -analysointia edelleen kehitettäessä.

Ilman toimivaa mittaustiedontallennusta ja -analysointia tutkimuslaitteistot ovat hyödyttömiä. Nyt toteutettu tiedonkäsittelyjärjestelmä osoittautui heti ensimmäisissä koeajoissa erittäin hyödylliseksi työkaluksi laitteiston ja sen komponenttien toiminnan tarkastelun kannalta. Järjestelmän avulla kerättyä tietoa pystytään analysoimaan hyvin nopealla aikavälillä ja esimerkiksi jo ensimmäisten tiedonkeruun ja -analysoinnin testausten (ks. luku 4.5) perusteella voitiin havaita selviä toiminnallisia ongelmia JY:n mikro-CHP-laitteistoon asennetuissa mittalaitteissa.

Tässä työssä esitelty JY:n mikro-CHP-tutkimuslaitteisto tulee todennäköisesti kohtaamaan pieniä tai suuria muutoksia, kuten tutkimuslaitteistoille on usein taipumusta tapahtua. Samoin on selvää, että myös koelaitteiston ympärille rakennettu mittaustiedonkäsittelyjärjestelmä tulee kohtaamaan muutoksia tai päivityksiä. Toteutettu tiedonkäsittelyjärjestelmä on siten vain ensimmäinen versio ja käyttökokemukset sekä käytännön tarve tulevat jatkossa määrittämään, millaiseksi järjestelmä lopulta muotoutuu.

Viitteet

- [1] Vauhkonen, A.: *Jyväskylän yliopiston mikro-CHP-laitteistoon liittyvät dokumentaatiot*, 2009.
- [2] Jyväskylän Energia yhtiöt: *Rauhalahden voimalaitos*. <https://www.jenergia.fi/tuotanto/sahko/rauhalahden-voimalaitos>, viitattu 25.7.2010.
- [3] Hintikka, J.: *Biomassapohjaiset mikro-CHP-tekniikat*. Tekninen raportti Nro 8, Bioenergiakeskuksen julkaisusarja (BDC Publications), 2004.
- [4] Simader, G.S. et al.: *Micro CHP systems: state-of-the-art*. Tekninen raportti Deliverable 8 (D8), Austrian Energy Agency, Wien, maaliskuu 2006.
- [5] Pänkäläinen, H. & Konttinen, J.: *Pienimuotoisen CHP-tuotannon teknologiat ja tutkimus*. tekninen raportti, Jyväskylän yliopisto, Uusiutuvan energian ohjelma, joulukuu 2009.
- [6] Ranta, T.: *Hajautettu vai keskitetty energiantuotanto?* Konferenssiesitys, kuntien 4. ilmastokonferenssi, Tampere-talo, Tre, 6.-7.5.2008. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [7] Harrison, J.: *Micro Combined Heat & Power*. Tekninen raportti IMechE seminar, EA Technology, kesäkuu 2002.
- [8] Harrison, J.: *Micro combined heat & power*. <http://www.microchap.info/>, viitattu 25.7.2010.
- [9] Micropower: *What is Microgeneration?* <http://www.micropower.co.uk/what-microgeneration>, viitattu 25.7.2010.
- [10] Granö, U. P.: *CHP vaihtoehtona energiaosuuskunnille*. Tekninen raportti Highbio-Interreg pohjoinen 2008-2011, Projekti INFO 45, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius, 2010.
- [11] Konttinen, J.: *Kohti biojalostamoja - biomassan termokemiallinen jalostus kaasutuksen avulla*. Virkaanastujaisilaisuus, Jyväskylä, 4.11.2009. Jyväskylän yliopisto, Uusiutuvan energian ohjelma.
- [12] WhisperGen: *Heat and power systems*. <http://www.whispertech.co.nz/>, viitattu 25.7.2010.

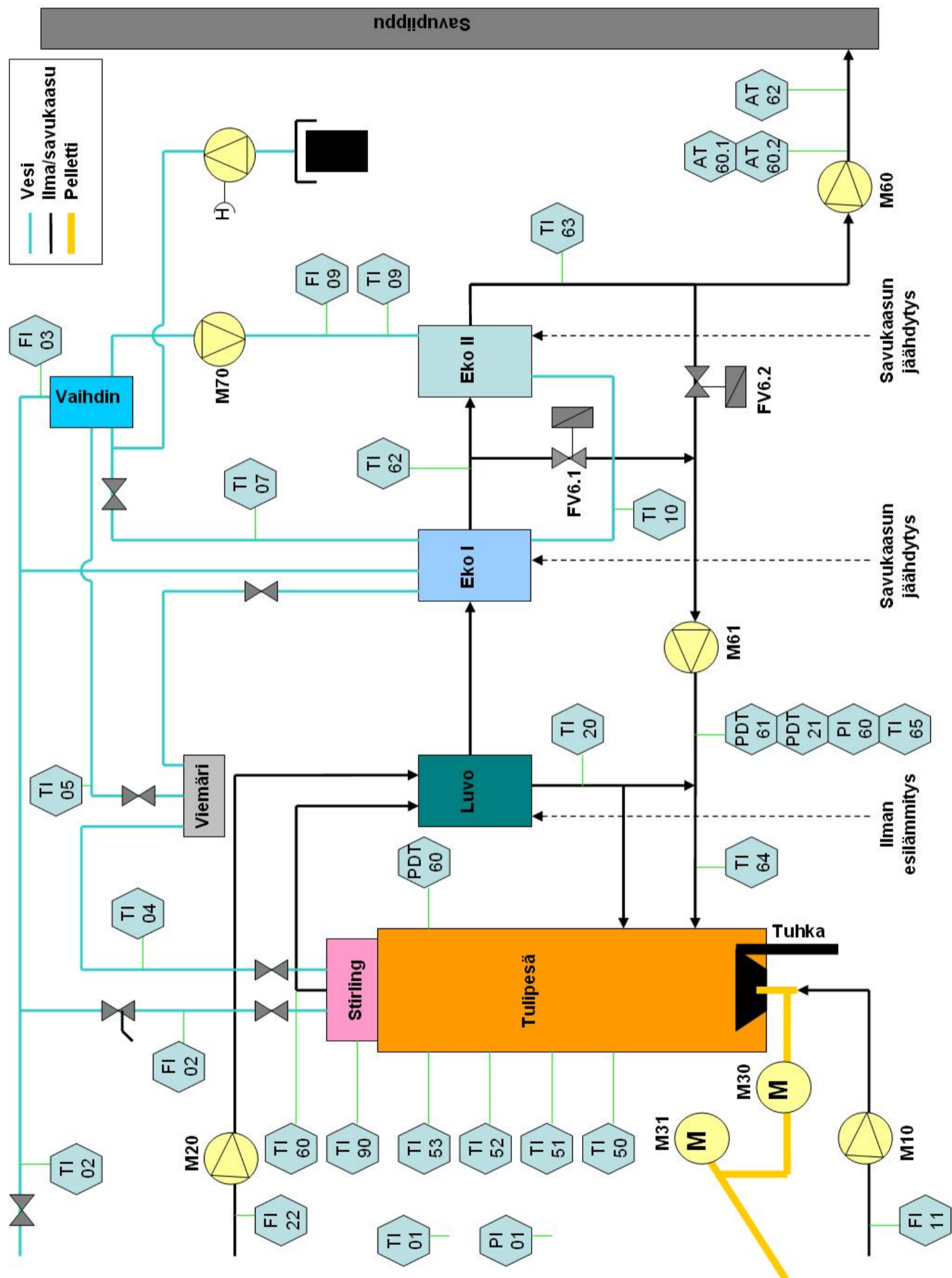
- [13] Metsäkeskus: *Halkoliiteri - Polttopuut netistä*. <http://www.halkoliiteri.com/sivu/?navi=1,2,18>, viitattu 25.7.2010.
- [14] Finnish Firewood Oy: *Klapinetti verkkokauppa*. http://www.klapinetti.fi/product_catalog.php?c=18/, viitattu 25.7.2010.
- [15] Energiamarkkinavirasto: *Sähkön hintavertailu*. <http://www.sahkonhinta.fi/>, viitattu 25.7.2010.
- [16] GASEK Energy Solutions: *CHP-voimala*. http://www.gasek.fi/epages/PPO.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/22082008-1/Categories/%22CHP%20voimala%22, viitattu 25.7.2010.
- [17] Rasi, M.: *Mikro-CHP toimintakuvaus*. tekninen raportti, Jyväskylän yliopisto, Uusiutuvan energian ohjelma, heinäkuu 2009.
- [18] Koskelainen, L.: *Ilmastonmuutoksesta uutta liiketoimintaa - LTY:n ja yritysten yhtestyöllä ratkaisu lämmön ja sähkön hajautettuun yhteistuotantoon*. LUT Energia, http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/ClimBus/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Muu_viestinta_ja_aktivointi/Business_Breakfast/Ilmastonmuutoksesta_uutta_liiketoimintaa_-_LTY.pdf, viitattu 2.6.2008.
- [19] Aho, M.: *Hanke-esitys: Yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotantoteknologian kehittäminen mikro-CHP*. TTS 2009-2012, Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, 2007.
- [20] Vartiainen, E. et al.: *Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt*. tekninen raportti, Gaia Group Oy, Helsinki, 2002.
- [21] GASEK Energy Solutions: *GASEK-kaasutin*. http://www.gasek.fi/epages/PPO.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/22082008-1/Categories/Tuoteryhma2, viitattu 25.7.2010.
- [22] Lehtovaara, M.: *Pieni bio-CHP-laitteisto (esimerkki)*. LUT Energia, Biovoima Innoverkko, <http://tbrc-community.lut.fi/innoverkko/system/files/Pieni%20bio-CHP%20%E2%80%93laitteisto%20%28esimerkki%29.pdf>, viitattu 16.9.2009.
- [23] Cleanergy AB: *Product*. <http://www.cleanergyindustries.com/production.html>, viitattu 2.9.2010.

- [24] Paavola, M.: *Biopolttoaineilla toimiva Stirling-voimalaitos*. Pro Gradu -työ, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikka, Lappeenranta, Finland, 2008.
- [25] Cleanergy AB: *Combined Heat and Power Unit Stirling V161*. tekninen raportti, Åmål, Ruotsi, 2009.
- [26] Cleanergy AB: *Sun powered Stirling-Dish system*. tekninen raportti, Åmål, Ruotsi, kesäkuu, 2009.
- [27] Lommi, M.: *Stirling-perustaisen mikro-CHP-laitteiston prosessilaskenta ja lämmönvaihtimen mitoitus*. Pro Gradu -työ, Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, Uusiutuvan energian koulutusohjelma, joulukuu 2006.
- [28] Fluid Components International LLC: *Model ST98B-AN Mass Flow Meter for Air and Nitrogen*. http://www.fluidcomponents.com/Industrial/Products/MassFlowMeters/ProdST98B_AN.asp, viitattu 3.9.2010.
- [29] PCME: *DT770 & DT270 Product Data Sheet*. http://www.pcme.co.uk/pdf_data/dt270_770.pdf, viitattu 3.9.2010.
- [30] Suonio, M.: *Tuotetarjouksen tekninen erittely*. Kontram Oy, lokakuu 2003.
- [31] Vauhkonen, A.: *Polttoprosessin automatisointi*. Opinnäytetyö, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne, huhtikuu 2009.
- [32] Mitsubishi Electric: *E-Designer for the E1000-series, Reference Manual*, 2006.
- [33] Mitsubishi Electric: *HMI - E1000 Series*. http://www.mitsubishi-automation.com/products/visualisation_e_1000.htm, viitattu 2.8.2010.
- [34] Mitsubishi Electric: *E1071 Installation manual*, 2005.
- [35] National Instruments: *NI LabVIEW - Improving the Productivity of Engineers and Scientists*. <http://www.ni.com/labview/>, viitattu 2.8.2010.
- [36] Leppänen, M. et al.: *ITKA111 Oliosuuntautunut analyysi ja suunnittelu, luentomoniste*. Jyväskylän yliopisto, Informaatioteknologian tiedekunta, 2. painos, kevät 2009.
- [37] Aho, M.: *Projektipalaveri*, 1.12.2009.

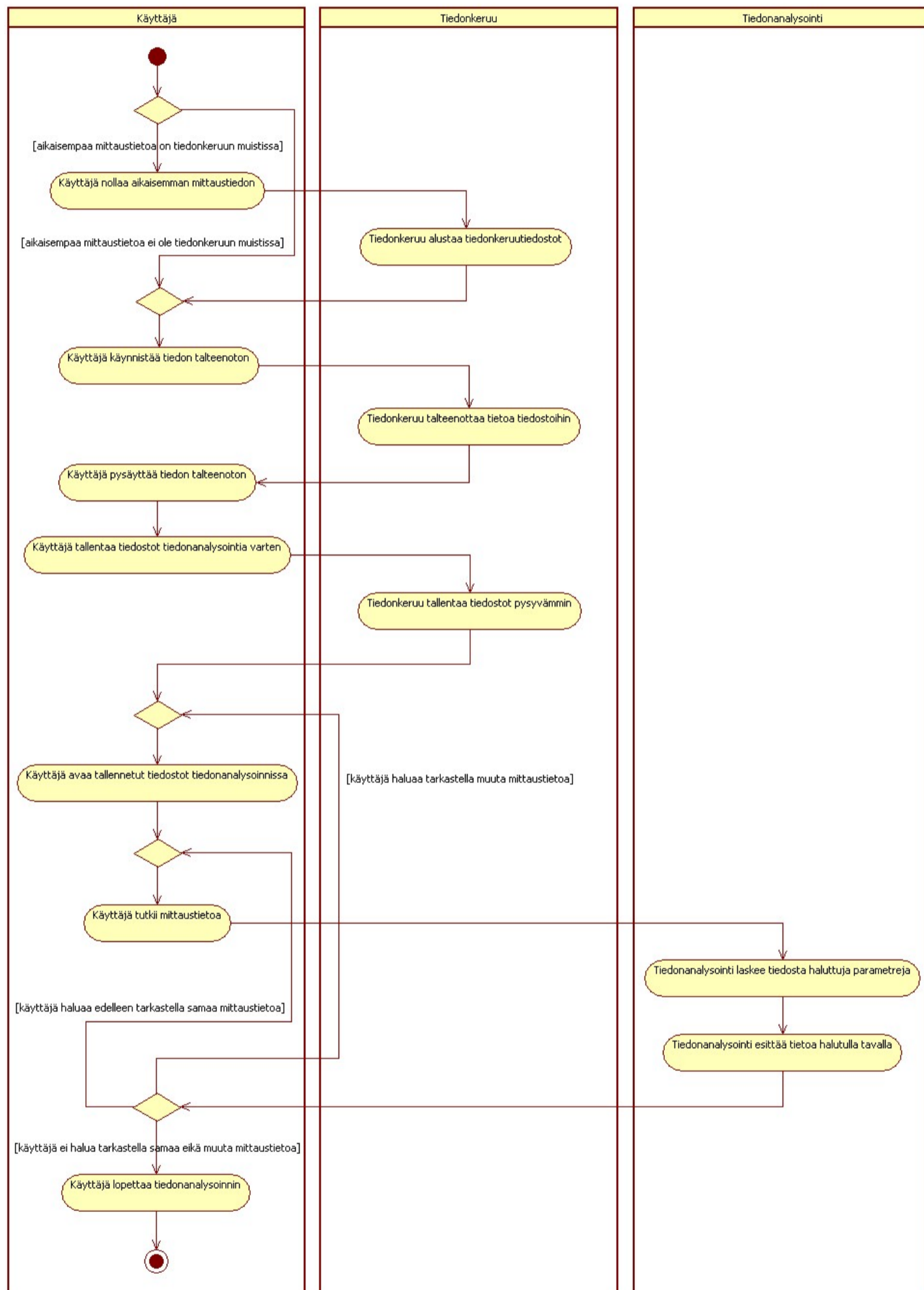
- [38] Young, H. D. & Freedman, R. A.: *University Physics with Modern Physics*. Addison Wesley, 11. painos, 2004, ISBN 0-8053-8684-X.
- [39] National Instruments: *Linear Fit VI - LabVIEW 2009 Help*. http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361F-01/gmath/linear_fit/, viitattu 2.8.2010.
- [40] National Instruments: *Goodness of Fit VI - LabVIEW 2009 Help*. http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361F-01/gmath/goodness_of_fit/, viitattu 2.8.2010.
- [41] Vapo: *Puupelletti*. http://www.vapo.fi/fin/kunta_ja_yrityssasiakkaat/biopolttoaineet/pelletit/puupelletti/ominaisuudet_ja_laatu_kriteerit/?id=507, viitattu 2.8.2010.
- [42] Konttinen, J.: *Pien- tai mikro-CHP-teknologiat - tutkimus Jyväskylän yliopistossa*. Jyväskylän yliopisto, <http://www.tut.fi/units/me/ener/IFRF/Liekkipaiva2010/Sessio2A/KonttinenJYU.pdf>, viitattu 2.8.2010.

Liitteet

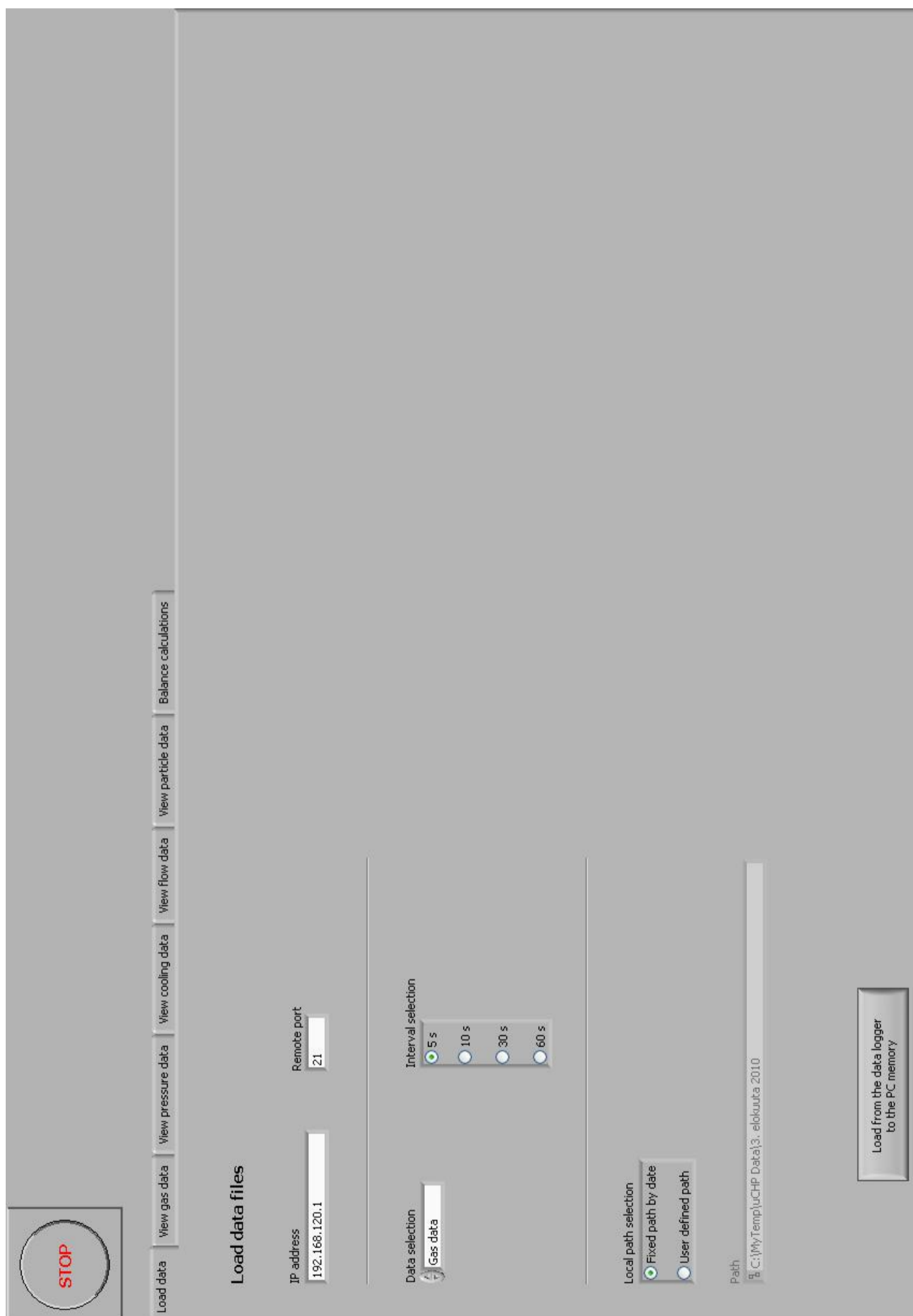
A JY:n mikro-CHP-laitteiston prosessikaavio (lähde [1] pienin muutoksin)



B Tiedonkäsittelyjärjestelmän ja siihen liittyvän prosessin esisuunnitelma UML-kielen mukaisena aktiviteettikaaviona



C Mittaustiedonlatauksen ja -tallennuksen välilehti LabVIEW:n mittaus-tiedonkeruussa



D KAASU_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedon-analysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Open data

Choose gas file to open

REFRESH

Raw data

Date	Time	TI01 °C	TI64 °C	TI20 °C	TI50 °C	TI51 °C	TI52 °C	TI53 °C	TI90 °C	TI60 °C	TI62 °C	TI63 °C	TI65 °C
30.06.10	15:15:13	26.025	132.25	172.5	1031.25	-36	951.375	-16.875	711.375	362.75	23	39.25	72.125
30.06.10	15:15:23	25.95	132.5	173.75	1035	-36	951	-18	711.375	364.5	23	38.5	72.25
30.06.10	15:15:33	26.0625	134	173.25	1036.88	-36	948.75	-19.125	711.75	364.25	23	37.75	72.5
30.06.10	15:15:43	25.95	132.25	174	1037.63	-36	949.875	-16.5	709.5	364	23.125	37.25	72.375
30.06.10	15:15:53	25.9125	134.25	173.5	1040.25	-36	948.75	-21	711	363.25	23	37.75	72.625
30.06.10	15:16:03	25.875	134	173.75	1037.63	-36	950.25	-20.25	710.25	365	22.875	36.5	72.625
30.06.10	15:16:13	25.9125	134.25	172.5	1042.5	-36	951	-19.5	709.125	365	23	36.75	72.75
30.06.10	15:16:23	25.9125	132.25	173	1042.13	-36	948	-18.375	708.75	362.75	22.875	38.5	72.5
30.06.10	15:16:33	25.9125	132	173.75	1042.88	-36	949.5	-16.875	711.75	365.25	23.25	37.25	72.625
30.06.10	15:16:43	25.95	132.5	171.5	1039.88	-36	946.5	-18	711.375	364	22.875	38.25	72.75
30.06.10	15:16:53	25.875	133.5	171.25	1040.63	-36	945	-18.375	712.5	364.75	22.625	37	72.875
30.06.10	15:17:03	25.875	133.5	173.5	1040.25	-36	944.625	-18.75	710.25	366	22.625	38.5	72.875
30.06.10	15:17:13	25.95	132.75	173.25	1037.63	-36	944.625	-19.875	710.625	364.75	22.5	37.5	72.75
30.06.10	15:17:23	25.9875	132	173	1035.38	-36	940.125	-18.375	709.5	365.75	22.125	38	73
30.06.10	15:17:33	26.025	131.5	173.25	1030.5	-36	941.25	-18	710.625	366.5	22.125	37	73
30.06.10	15:17:43	25.95	130.5	171.25	1029.38	-36	940.5	-17.625	708.375	364.25	22.125	36.25	72.75
30.06.10	15:17:53	26.025	132	172.25	1024.88	-36	935.25	-18.375	708	366.75	21.75	38.5	72.875
30.06.10	15:18:03	25.9125	132.25	171.75	1017.38	-36	936	-18.375	705.75	365.5	21.5	37.25	73
30.06.10	15:18:13	26.0625	131.25	172.25	1013.25	-36	931.5	-18.375	705.75	364.75	21.625	35.75	73
30.06.10	15:18:23	25.875	132	172	1007.25	-36	931.125	-18.75	702	367	21.125	38	73.25

Relative time
Absolute time
Convert

Graphics

Single plot

Choose x and y axis

x axis:

y axis:

Draw

Multiple plot

Choose variables to plot versus relative time

TI01
 TI64
 TI20
 TI50

TI51
 TI52
 TI53
 TI90

TI60
 TI62
 TI63
 TI65

Draw

Key figures

Maximum value

Choose variable

Variable:

Maximum value: °C

Relative time:

Find

Average value

Choose variable and time limits (in seconds or in relative time)

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Average value: °C

Calculate

Linear fit

Choose variable, time limits (in seconds or in relative time) and the fitting method

Variable:

Slope:

Lower limit:

Residue:

Upper limit:

SSE:

Method:

R-square:

RMSE:

Calculate

E PAINE_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Open data

Choose pressure file to open

REFRESH

Raw data

Date	Time	PI01 kPa	PDT60 Pa	PI60 bar	PDT21 Pa	PDT61 Pa
30.06.10	9:55:03	99	2	1.008	73.875	-0.075
30.06.10	9:55:13	99	2	1.0084	73.875	-0.025
30.06.10	9:55:23	99	0.75	1.0092	74	-0.05
30.06.10	9:55:33	99	1	1.0092	74.125	-0.025
30.06.10	9:55:43	99	2.25	1.008	73.875	-0.075
30.06.10	9:55:53	99	4.25	1.0088	74	-0.1
30.06.10	9:56:03	99	4.75	1.0064	74.25	-0.1
30.06.10	9:56:13	99	3	1.008	73.875	0
30.06.10	9:56:23	99	3.75	1.008	73.875	-0.1
30.06.10	9:56:33	99	4.25	1.0076	74	0
30.06.10	9:56:43	99	5	1.0064	74.125	-0.125
30.06.10	9:56:53	99	3.5	1.0056	74	-0.075
30.06.10	9:57:03	99	3.25	1.0088	74.125	-0.1
30.06.10	9:57:13	99	3	1.008	73.875	-0.125
30.06.10	9:57:23	99	4.5	1.0084	74	0.025
30.06.10	9:57:33	99	4.5	1.0076	74.125	-0.05
30.06.10	9:57:43	99	4	1.0076	74.25	-0.1
30.06.10	9:57:53	99	3	1.006	74	-0.05
30.06.10	9:58:03	99	4.5	1.0064	74.375	-0.125
30.06.10	9:58:13	99	3.75	1.0092	74.375	0.025

Relative time
Absolute time

Convert

Graphics

Single plot

Choose x and y axis

x axis:

y axis:

Draw

Multiple plot

Choose variables to plot versus relative time

PI01

PDT60

PI60

PDT21

PDT61

Draw

Key figures

Maximum value

Choose variable

Variable:

Maximum value: kPa, Pa, bar

Relative time:

Find

Average value

Choose variable and time limits (in seconds or in relative time)

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Average value: kPa, Pa, bar

Calculate

Linear fit

Choose variable, time limits (in seconds or in relative time) and the fitting method

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Method:

Slope:

Residue:

SSE:

R-square:

RMSE:

Calculate

F VESI_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Open data

Choose cooling file to open

REFRESH

Raw data

Date	Time	TI02 °C	TI04 °C	TI05 °C	TI09 °C	TI10 °C	TI07 °C
30.06.10	15:52:43	11.1	40.425	24.9	26.475	27.225	26.7
30.06.10	15:52:53	11.1	40.3875	24.8625	26.625	27.15	26.7
30.06.10	15:53:03	11.1375	40.275	24.7125	26.625	27.3	26.7
30.06.10	15:53:13	11.175	40.0125	24.75	26.625	27.3375	26.7
30.06.10	15:53:23	11.1	39.975	24.675	26.625	27.375	26.6625
30.06.10	15:53:33	11.1375	39.9	24.75	26.625	27.4125	26.7375
30.06.10	15:53:43	11.025	39.9375	24.75	26.7	27.4125	26.7375
30.06.10	15:53:53	11.1	39.825	24.7875	26.7375	27.3375	26.8125
30.06.10	15:54:03	11.0625	39.75	24.75	26.6625	27.45	26.8125
30.06.10	15:54:13	11.1375	39.75	24.75	26.7375	27.3375	26.7375
30.06.10	15:54:23	11.1	39.525	24.75	26.6625	27.4875	26.85
30.06.10	15:54:33	11.175	39.5625	24.7125	26.775	27.4875	26.7375
30.06.10	15:54:43	11.175	39.5625	24.7125	26.8125	27.4875	26.8125
30.06.10	15:54:53	11.175	39.4875	24.75	26.775	27.525	26.8125
30.06.10	15:55:03	11.0625	39.4125	24.75	26.775	27.5625	26.8125
30.06.10	15:55:13	11.1	39.4125	24.825	26.85	27.4875	26.8875
30.06.10	15:55:23	11.1	39.375	24.75	26.8125	27.7125	26.775
30.06.10	15:55:33	11.025	39.375	24.7125	26.8875	27.525	26.8875
30.06.10	15:55:43	11.0625	39.2625	24.825	26.85	27.6	26.8875
END							

Relative time Absolute time Convert

Graphics

Single plot

Choose x and y axis

x axis:

y axis:

Draw

Multiple plot

Choose variables to plot versus relative time

TI02 TI05 TI10
 TI04 TI09 TI07

Draw

Key figures

Maximum value

Choose variable

Variable:

Maximum value: °C Relative time:

Find

Average value

Choose variable and time limits (in seconds or in relative time)

Variable: Lower limit: Upper limit:

Average value: °C

Calculate

Linear fit

Choose variable, time limits (in seconds or in relative time) and the fitting method

Variable: Lower limit: Upper limit: Method:

Slope: Residue: SSE: R-square: RMSE:

Calculate

97

G VIRTA_xx-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedon-analysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Open data

Choose flow file to open

Raw data

Date	Time	FI11 g/s	FI22 g/s	FI02 l (acc.)	FI03 l (acc.)	FI09 l (acc.)	Fuel Power kW
30.06.10	9:55:03	-0.432202	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:55:13	-0.493945	-0.370458	0	0	0	0
30.06.10	9:55:23	-0.370458	-0.123486	0	0	0	0
30.06.10	9:55:33	-0.493945	-0.185229	0	0	0	0
30.06.10	9:55:43	-0.370458	-0.185229	0	0	0	0
30.06.10	9:55:53	-0.432202	-0.123486	0	0	0	0
30.06.10	9:56:03	-0.370458	-0.185229	0	0	0	0
30.06.10	9:56:13	2.40798	-0.308715	0	0	0	0
30.06.10	9:56:23	3.64284	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:56:33	4.32202	-0.308715	0	0	0	0
30.06.10	9:56:43	4.81596	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:56:53	5.00119	-0.185229	0	0	0	0
30.06.10	9:57:03	5.00119	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:57:13	5.12468	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:57:23	5.12468	-0.123486	0	0	0	0
30.06.10	9:57:33	5.24816	-0.308715	0	0	0	0
30.06.10	9:57:43	5.12468	-0.432202	0	0	0	0
30.06.10	9:57:53	5.18642	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:58:03	5.06293	-0.246972	0	0	0	0
30.06.10	9:58:13	5.06293	-0.432202	0	0	0	0

Relative time
Absolute time

Graphics

Single plot

Choose x and y axis

x axis:

y axis:

Multiple plot

Choose variables to plot versus relative time

FI11

FI02

Fuel Power

FI22

FI03

FI09

Key figures

Maximum value

Choose variable

Variable:

Maximum value: g/s
kW

Relative time:

Average value

Choose variable and time limits (in seconds or in relative time)

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Average value: g/s
kW

Linear fit

Choose variable, time limits (in seconds or in relative time) and the fitting method

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Method:

Slope:

Residue:

SSE:

R-square:

RMSE:

H HIUKKAS-tiedostojen tarkastelun välilehti LabVIEW:n mittaustiedon-analysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Open data

Choose particle file to open

Raw data

Date	Time	AT62 mg/m ³
30.06.10	9:55:03	23
30.06.10	9:55:13	20.5
30.06.10	9:55:23	24.75
30.06.10	9:55:33	26.5
30.06.10	9:55:43	24.75
30.06.10	9:55:53	23.5
30.06.10	9:56:03	23.5
30.06.10	9:56:13	24.5
30.06.10	9:56:23	23.5
30.06.10	9:56:33	24.75
30.06.10	9:56:43	25.25
30.06.10	9:56:53	23.5
30.06.10	9:57:03	24.75
30.06.10	9:57:13	26.5
30.06.10	9:57:23	25.25
30.06.10	9:57:33	21.25
30.06.10	9:57:43	26
30.06.10	9:57:53	28
30.06.10	9:58:03	23
30.06.10	9:58:13	27.75

Relative time
Absolute time

Graphics

Single plot

Choose x and y axis

x axis:

y axis:

Multiple plot

Choose variables to plot versus relative time

AT62

Key figures

Maximum value

Choose variable

Variable:

Maximum value: mg/m³

Relative time:

Average value

Choose variable and time limits (in seconds or in relative time)

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Average value: mg/m³

Linear fit

Choose variable, time limits (in seconds or in relative time) and the fitting method

Variable:

Lower limit:

Upper limit:

Method:

Slope:

Residue:

SSE:

R-square:

RMSE:

I Taselaskennan välilehti LabVIEW:n mittaustiedonanalysoinnissa

STOP

Load data
View gas data
View pressure data
View cooling data
View flow data
View particle data
Balance calculations

Details for balance calculations

Time limits (in seconds or in relative time):
 Lower limit: 03:10:00 Upper limit: 03:55:00 Overall relative time: 45:00 (= 2700 s)

Energy content of wood pellets: (Note that this is hard coded to PLC so if this is changed PLC should be updated too)
 17500 kJ/kg

Specific heat constant of burning air: 1.01 kJ/kg K Specific heat constant of combustion gas: 1.24 kJ/kg K Specific heat constant of cooling water: 4.19 kJ/kg K

Variables used in the calculations given as average values (except sum values for flow meters FI02, FI03 and FI09)

— Cooling water
— Burning air / Combustion gas
— Wood pellets

Mass balance

Input

Wood pellets: 6.19705 kg Burning air: 53.7772 kg

Output

No data available, assumption that all incoming burning air exits the process by chimney

Energy balance

<i>Gas cycle, input</i>		Furnace: 108448 kJ		Luvo: 2327.24 kJ	
<i>Gas cycle, output</i>		Stirling: -15605.7 kJ	Luvo and Eko 1: -17888 kJ	Eko 2: 847.173 kJ	Eko 1 casing: "No data available"
<i>Open cooling water cycle, input</i>		Stirling: 40169.9 kJ	Heat exchanger: 14216.7 kJ	Eko 1 casing: "No data available"	
<i>Open cooling water cycle, output</i>					
No data available					
<i>Closed cooling water cycle, input</i>		Eko 1: -2114.06 kJ		Eko 2: 2657.96 kJ	
<i>Closed cooling water cycle, output</i>		Heat exchanger: -543.908 kJ			
<i>Delta = Output + Input</i>					
Stirling: 24564.2 kJ		Luvo and Eko 1: -17674.8 kJ		Heat exchanger: 13672.8 kJ	
				Eko 2: 3505.14 kJ	
				Eko 1 casing: "No data available"	

J Pellettipolttoaineesta muodostuneen savukaasun ominaislämpökapasiteetti

Oletetaan, että pellettipolttoaineen kuiva-aineen koostumus on massaprosentteina seuraava: hiiltä 50 %, vetyä 5 %, happea 42 %, typpeä 2 % ja tuhkaa loput 1 %. Oletetaan lisäksi polttoaineen vesipitoisuudeksi 10 m-%. Tällöin savukaasun komponenttien mooliosuuksille saadaan:

aine	lähtöaineet/kg				savukaasu/kg		
	M_x (g/mol)	m_x (g)	n_x (mol)	n_{O_2} (mol)	n_{CO_2} (mol)	n_{N_2} (mol)	n_{H_2O} (mol)
C	12,011	450	37,466	37,466	37,466		
H ₂	2,016	45	22,321	11,161			22,321
O ₂	31,999	378	11,813	-11,813			
N ₂	28,013	18	0,643	-	0,643		
H ₂ O	18,015	100,0	5,551	-			5,551
tuhka		9					
yhteensä:		1000		36,814			
typpeä ilmasta		$3,77 \times 36,814 =$		138,789		138,789	
kostea polttoilmaa				175,603			
savukaasun komponentteja					37,466	139,432	27,872

Kostea savukaasua saadaan yhteensä 204,77 mol, josta kuivaa savukaasua on $(204,77 - 27,872) \text{ mol} = 176,898 \text{ mol}$. Ainemäärän yhtälöä $n = \frac{m}{M}$ käyttäen voidaan laskea kunkin savukaasukomponentin massat, joille tulee $m_{CO_2} = 1648,879 \text{ g}$, $m_{N_2} = 3905,909 \text{ g}$ ja $m_{H_2O} = 502,114 \text{ g}$. Tällöin komponenttien muodostama kokonaismassa on $m_{TOT} = 6056,902 \text{ g}$. Komponenttien massaosuusiksi tulee $\frac{m_{CO_2}}{m_{TOT}} = 0,272$, $\frac{m_{N_2}}{m_{TOT}} = 0,645$ ja $\frac{m_{H_2O}}{m_{TOT}} = 0,083$. Savukaasun ominaislämpökapasiteetiksi komponenttien ominaisarvoja käyttäen saadaan lopulta:

$$\begin{aligned}
 c_{\text{savukaasu}} &= 0,272 \times 0,82 \text{ kJ}/(\text{kg K}) + \\
 &\quad 0,645 \times 1,04 \text{ kJ}/(\text{kg K}) + \\
 &\quad 0,083 \times 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \\
 &= 1,24161 \text{ kJ}/(\text{kg K}).
 \end{aligned}$$