



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# ENERGIATUTKIMUSKES- KUKSEN LEIJUPETIKATTI- LAN TESTAUKSET KÄYT- TÖÖNOTTOA VARTEN

TEKIJÄ/T: Mika Virtala

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Mika Virtala			
Työn nimi Energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan testaukset käyttöönottoa varten			
Päiväys	8.5.2018	Sivumäärä/Liitteet	57/30
Ohjaaja(t) Jukka Huttunen, Markku Huhtinen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa koepoltto Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilalla ja mahdollisuuksien mukaan korjata havaittuja puutteita. Koepoltolle asetettiin tavoitteeksi myös saavuttaa kattilalla normaali käyttölämpötila ja testata samalla jäännöshappianturin toiminta.</p> <p>Tämän opinnäytetyön aikana suoritettiin viisi koepolttopäivää, mutta koepolttopäiviä jatkettiin myös tämän työn päättymisen jälkeen. Ensimmäisen viiden koepolttopäivän osalta osa opinnäytetyön tavoitteista jäi saavuttamatta. Petilämpötilan voimakas vaihtelu ja hiekan sintraantumisen osoittautuivat isoiksi ongelmiksi ensimmäisissä koepoltoissa. Tämän opinnäytetyön piiriin kuuluvien koepolttopäivien aikana kattilan lämpötilat eivät nousseet niin korkeiksi, että jäännöshappianturi olisi toiminut, joskin riittävä lämpötila saavutettiin tämän opinnäytetyön jälkeen tehtyinä koepolttopäivinä.</p> <p>Esivalmisteluiden aikana havaittiin savukaasukanaviston 3-tieventtiileiden ohjauksissa ongelmia, jotka korjattiin. Takavedon happianturi konfiguroitiin käyttämään oikeita parametreja. Näkölasit asennettiin kahteen yhteeseen koepolttojen välissä. Esilämmitykseen käytettävät kuumailmapuhaltimet testattiin ja niiden ohjauksiin automaati-ossa tehtiin muutoksia.</p> <p>Tämän opinnäytetyön koeajopäivien jälkeen leijupetikattilan arinan hiekkatilaa laajennettiin ja petipaine anturin toinen impulssiputki siirrettiin ilmalaatikkoon petipainemittauksen rauhoittamiseksi. Lisäksi kattilan ajotapaan ja ylösajoon tuli parannuksia. Opinnäytetyössä ilmenneet ongelmat ratkesivat ajotapa parannusten myötä ja riittävän pitkän ajojakson aikana myös takavedon alussa oleva happianturi alkoi näyttämään mitta-arvoa kattilan saavuttaessa riittävän korkean lämpötilan. Petihiekan määrän lisäys myöhemmissä koeajoissa rauhoitti petilämpötilojen voimakkaan vaihtelun ja petihiekan riittävä vaihtaminen polton aikana ehkäisee sintraantumisen. Hiekan vaihtoa pystyy käyttämään myös jäähdyttävänä elementtinä verrattain pienen kattilan petilämpöjen hallinnassa.</p>			
Avainsanat Kuplapetikattila, Leijukerros poltto			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author(s) Mika Virtala			
Title of Thesis Testing the Bubbling Fluidized Bed Boiler in Energy Research Center for Commissioning			
Date	8.5.2018	Pages/Appendices	57/30
Supervisor(s) Jukka Huttunen, Markku Huhtinen			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The goal of this study was to plan and execute a test burning at the bubbling fluidized bed boiler at the Energy Research Center of Savonia University of Applied Science and repair malfunctioning devices and systems if possible. Reaching the normal operating temperature in the boiler was set as one of the goals, because it is possible to test the residual oxygen sensor at the normal operating temperature.</p> <p>During this thesis there were five test burning days. More test burning days were done after this thesis. Some of the goals of this thesis were not achieved during the first five test burning days. Strong variation in the fluidized bed temperatures was problematic in the five first test burnings. Also sintering of the bed sand was a big problem in the five first test burnings. During the five first tests, temperature did not rise high enough for the residual oxygen sensor to function, though the temperature that was sufficient for the sensor was achieved in the test burns after this thesis.</p> <p>Problems in the 3-way valves in the flue gas channel system were observed and they were fixed. The residual oxygen sensor was configured to use the right parameters. Two sight glasses were installed in between the tests. The hot-air guns that are used as a boiler preheater were tested and their controls were changed in the automation.</p> <p>After the test burning days of this thesis the size of the fire grate's sand space was enlarged inside the BFB-boiler and the impulse tube for the pressure sensor of the bed was attached to the wind box so that the measurement for the bed pressure was calmed down. Also the way that the boiler is operated and started up, was improved. The problems that emerged in this thesis were resolved with these changes in the ways the boiler is operated. During the later test burn period that was long enough, temperatures in the boiler rose so that the residual oxygen sensor began to show measurement value. Increasing the amount of sand in the sand bed calmed the temperature variation in the latter test burnings. Sintering can be prevented with changing the bed sand often enough during the burning. Changing the sand can also be used as a cooling element when controlling the sand bed temperatures of a small size boiler.</p>			
Keywords BFB-boiler, Bubbling Fluidized Bed			

## ESIPUHE

Haluan lämpimästi kiittää Savonia-ammattikorkeakoulua ja sen henkilöstöä ainutlaatuisesta mahdollisuudesta työskennellä pilot-kokoluokan leijupetikattilan käyttöönoton parissa. Kokemus on ollut erittäin kehittävä.

Eryityisesti haluan kiittää rakasta puolisoani, joka on tukenut minua ja koko ajan uskonut minuun vaikka itse en ole siihen pystynyt.

Toivon, että tämä raportti auttaa jatkamaan leijupetikattilaan liittyvien oheisjärjestelmien suunnittelussa, käyttöönotossa ja testauksessa ja toivottavasti säilyttää jotain käyttökelpoista tietoa tulevaisuuteen.

Joensuussa 8.5.2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mika Virtala', with a long horizontal stroke extending to the right.

Mika Virtala

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
1.1	Lyhenteet ja määritelmät.....	8
1.2	Tausta-aineistot .....	9
2	PALAMISEN TEORIA .....	10
2.1	Kiinteiden polttoaineiden palaminen .....	10
2.2	Palamisilmantarve ja savukaasujen koostumus .....	11
2.3	Savukaasujen ominaisuuksia.....	15
2.3.1	Adiabaattinen palamislämpötila .....	15
2.3.2	Ominaislämpö .....	16
2.3.3	Lämmönjohtavuus.....	16
2.3.4	Viskositeetti .....	17
2.3.5	Tiheys .....	17
3	LEIJUKERROSPOLTTOTEKNIikka .....	18
3.1	Leijukerroksen käyttäytyminen.....	18
3.2	Leijupetikattiloiden tyypillisiä toiminta-arvoja .....	19
3.3	Tuhkaongelmat leijukerros-poltossa .....	19
4	POLTTOAINEIDEN OMINAISUUksIA.....	21
4.1	Puupelletti .....	21
4.2	MDF-pöly.....	22
5	ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LAITTEISTO.....	23
5.1	Tutkimushallin leijupetikattilan ominaisuuksia .....	23
5.2	Tilanne energiatutkimushallilla syksyllä 2017 .....	26
5.2.1	Ammoniakinsyöttöjärjestelmä .....	26
5.2.2	Polttoaineensyöttöjärjestelmä .....	27
5.2.3	Savukaasukanavisto ja savukaasupellit .....	28
5.2.4	Pohjatuhkan poistojärjestelmä .....	30
5.2.5	Kalkin- ja hiekansyöttö .....	31
5.2.6	Kattilan esilämmitys-järjestelmä .....	31
5.2.7	Hätäsammutusjärjestelmä ja takapalotermostaatti .....	31
6	POLTTOKOEJÄRJESTELYT JA TULOKSET .....	33
6.1	Esivalmistelut .....	33

6.2	Ensimmäinen polttokoe 8.11.2017 .....	36
6.2.1	Kuvaus ensimmäisen polttokokeen vaiheista .....	36
6.2.2	Ensimmäisen polttokokeen tulokset .....	36
6.2.3	Ensimmäisen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet .....	39
6.3	Toinen polttokoe 15.12.2017 .....	41
6.3.1	Toimenpiteet ennen toista polttokoetta .....	41
6.3.2	Kuvaus toisen polttokokeen vaiheista .....	44
6.3.3	Toisen polttokokeen tulokset .....	44
6.3.4	Toisen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet.....	45
6.4	Kolmas polttokoe 24.1.2018 .....	47
6.4.1	Toimenpiteet ennen kolmatta polttokoetta.....	47
6.4.2	Kuvaus kolmannen polttokokeen vaiheista .....	48
6.4.3	Kolmannen polttokokeen tulokset.....	48
6.4.4	Kolmannen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet.....	50
6.5	Neljäs polttokoe 25.1.2018 .....	51
6.5.1	Neljättä polttokoetta edeltäneet toimenpiteet.....	51
6.5.2	Kuvaus neljännen polttokokeen vaiheista .....	51
6.5.3	Neljännen polttokokeen tulokset .....	51
6.5.4	Neljännen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet .....	52
6.6	Viides polttokoe 26.1.2018 .....	52
6.6.1	Viidettä polttokoetta edeltäneet toimenpiteet .....	52
6.6.2	Kuvaus viidennen polttokokeen vaiheista .....	52
6.6.3	Viidennen polttokokeen tulokset.....	53
6.6.4	Viidennen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet.....	53
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	56
7.1	Opinnäytetyön jälkeen tehdyt muutokset kattilaan ja 5.4.2018 suoritettu polttokoe.....	56
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT .....	58
	LIITE 1: LAADITTU TARKISTUSLISTA KOEPOLTTOA VARTEN.....	60
	LIITE 2: PYTHONOHJELMAN TALLENNETTAVIEN MUUTTUJIEN LISTA .....	63
	LIITE 3: LEISTER VULCAN SYSTEM KUUMAILMAPUHALTIMIEN TESTAUKSET .....	72
	LIITE 4: KUVIO 25.1.2018 POLTTOKOKEEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN MITTATULOKSET .....	75
	LIITE 5: KUVIO 26.1.2018 POLTTOKOKEEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN MITTATULOKSET .....	78

LIITE 6: MINIMILEIJUTUSNOPEUS- JA LENTOONLÄHTÖNOPEUSLASKUT .....	79
LIITE 7: OPINNÄYTETYÖN JÄLKEEN 5.4.2018 SUORITETUN KOEPOLTTON KATTILALÄMMÖT.....	82

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaaja oli Savonia-ammattikorkeakoulu Oy. Sillä on Varkauden kampuksen välittömässä läheisyydessä energiatutkimuskeskus. Keskus tarjoaa energiatutkimuspalveluita alan yrityksille ja muille yhteisöille (Savonia, Polttoainetestaus).

Keskuksen testilaitteistoon kuuluu leijupetikattila ja arinakattila oheisjärjestelmineen. Lämpöä voidaan siirtää arinakattilalta monitoimivaraajaan ja siitä radiaattorille ja maalämpökaivoihin. Myös leijupetikattilalta tulevista savukaasuista voidaan siirtää lämpöä edellä mainittuihin vesipiireihin ja glykolipiiriin ohjaamalla savukaasut arinakattilan kautta. Arinakattilalle on myös mahdollista asentaa pyrolyysiöljypoltin. Materiaalitestauskammioon voidaan ohjata savukaasuja ja tehdä korroosio- ja likaantumistestejä. (Savonia, Tilat ja laitteet.)

Jenna Lysinen kertoo opinnäytetyössään (Lysinen, 2014, 9) energiatutkimushalliprojektin alkaneen 2012 tarvekartoituksella ja suunnittelulla ja laitehankintojen aloitusajankohdaksi syksyn 2013. Energiatutkimuskeskuksena toimiva halli, jonne laitteistot on sijoitettu, rakennettiin kesän 2014 aikana (Tukiainen, 2014-08-13).

Energiatutkimuskeskukseen sijoitettuun leijupetikattilaan saatiin puupellettipolttaine palamaan ensimmäisen kerran kesäkuussa 2017. Ensimmäiset polttokokeet tehtiin ilman takavedon eristeitä. Kattilan ja savukaasukanaviston lämpötila ei noussut lyhyiden polttojaksojen aikana kovinkaan kuumiksi. Myös tervaantumista havaittiin savukaasukanavistossa polttojen jälkeen. Kesällä 2017 eristeet asennettiin paikoilleen ja savukaasukanaviston ja kiertokaasukanaviston vuotokohtia korjailtiin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli leijupetikattilan testaaminen käyttölämpötilassa maksimitilalla. Tällöin jäännöshappianturi saavuttaa toimintalämpötilansa ja sen toimivuus voidaan varmistaa. Myös mahdolliset ilmenevät ongelmakohtat saadaan kartoitettua ja korjaustoimenpiteet aloitettua. Työn tarkoituksena oli siis testata leijupetikattilan toiminnan kannalta kriittisten laitteistojen ja laitekokonaisuuksien toiminta ja korjata havaitut puutteet, sekä dokumentoida testi- ja korjaustoimenpiteiden aikana tehdyt havainnot.

### 1.1 Lyhenteet ja määritelmät

Asennoitin = toimielin, joka kääntää esimerkiksi venttiilin haluttuun asentoon.

Eksoterminen = kemiallinen reaktio, joka vapauttaa lämpöä.

Endoterminen = kemiallinen reaktio, joka sitoo lämpöä.

Heterogeeninen = epäyhtenäinen, sekakoosteinen.

Ilmakerroin = kerroin, jolla kerrotaan teoreettinen palamisilman tarve.



Joule = energian yksikkö [J].

MDF = Lyhenne englanninkielisestä termistä Medium density fiberboard. Puolikova kuitulevy.

Näkölasi = lasi, jonka läpi voidaan katsoa säiliön tai prosessitilan sisälle.

Leijukerrospoltto = polttotekniikka, jossa palaminen tapahtuu leijuvassa hiekkakerroksessa.

LUVO = lyhenne saksankielisestä termistä Luftvorwärmer, ks. palamisilman esilämmitin.

PI-kaavio = Putki- ja instrumentointikaavio, antaa toiminnallisen kokonaiskuvan laitteistosta.

Tehollinen lämpöarvo = arvo, joka ilmaisee täydellisessä palamisessa kehittyvän lämpöenergiämäärän aineen massayksikköä kohden. [MJ/kg].

Palamisilman esilämmitin = usein takavetoon asennettu lämmönvaihdin, jolla palamisilma kuumentaan savukaasujen lämmöllä ennen palotilaan syöttöä.

Viskositeetti = suure, joka kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtaamista. [Pa·s]

## 1.2 Tausta-aineistot

Tarkastukset\_2017\_10\_13 [pdf-tiedosto]. Sijainti: Savonia-ammattikorkeakoulu. Intranet

Ruuvikoeraportti\_20170518 [pdf-tiedosto]. Sijainti: Savonia Ammattikorkeakoulu. Intranet.

Ruuvikoe2\_20170519 [pdf-tiedosto]. Sijainti: Savonia Ammattikorkeakoulu. Intranet

Ruuvisyklikoe2\_20170523 [pdf-tiedosto]. Sijainti: Savonia Ammattikorkeakoulu. Intranet.

## 2 PALAMISEN TEORIA

Palaminen on aineen kemiallista yhtymistä happeen. Polttoaineissa hapen kanssa reagoivia aineita ovat hiili, vety, rikki ja typpi. Palamisreaktiot ovat pääosin eksotermisiä. Typen ja hapen välinen reaktio on endoterminen. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen ja Pakkanen, 2000, 79.)

Kun reaktio kiihtyy niin, että se pitää itse itseään yllä, polttoaine syttyy (Huhtinen ym. 2000, 79). Termisen syttymisteorian mukaan polttoaineen ja ilman seos syttyy, kun lämpötila on noussut riittävän korkeaksi. Seos syttyy itse, jos se saa riittävästi lämpöä palamisreaktiosta. Seos voidaan myös pakottaa syttymään lämmittämällä sitä ulkopuolisella energialla kuten kipinällä tai sytytysliekillä. (Huhtinen ym. 2000, 80.)

Arrheniuksen yhtälön mukaisesti lämpötilan kasvaessa reaktionopeus kasvaa jyrkästi. Reaktionopeutta kuvataan yleensä jommankumman lähtöainepitoisuuden aikaderivaattana. Yhtälö on esitetty kaavassa 1.

$$w = \frac{dn_p}{dt} = k n_p n_i e^{\frac{-E}{RT}} \quad (1)$$

Kaavassa 1  $w$  on reaktionopeus,  $n_p$  on komponentin  $p$  pitoisuus,  $n_i$  on komponentin  $i$  pitoisuus,  $k$  on reaktionopeusvakio,  $E$  on aktivoitumisenergia,  $R$  on yleinen kaasuvakio,  $T$  on lämpötila ja  $t$  on aika. (Huhtinen ym. 2000, 79.)

Kuten kaavasta 1 voidaan havaita, riippuu reaktionopeus myös aineiden pitoisuuksista ja aktivoitumisenergiasta. Aktivoitumisenergialla tarkoitetaan energiaa, joka tarvitaan lähtöaineiden sidosten rikkomiseksi. (Huhtinen ym. 2000, 79.)

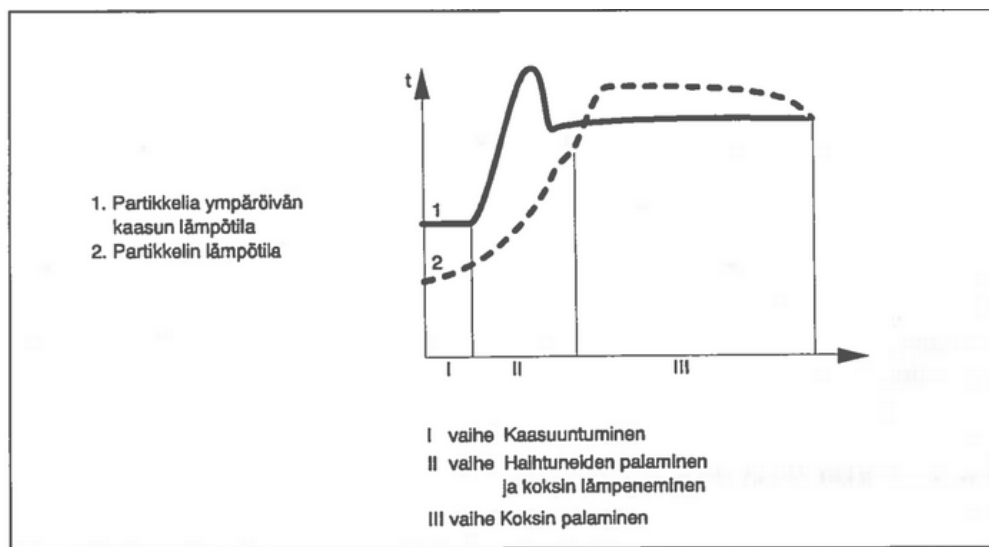
Palamisreaktion lämmöntuotto ei kasva loputtomiin lämpötilan kasvaessa. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuvan lämmöntuoton hidastumisen selitetään johtuvan hapen ja polttoaineen sekoituksen reaktionopeutta hidastavasta vaikutuksesta. (Huhtinen ym. 2000, 80.)

Käytännössä on todettu, että terminen syttymisteoria ei ole yleispätevästi voimassa. Jotkin polttoaineet palavat hyvin paljon nopeammin kuin kaavasta 1 voisi päätellä. Selitykseksi on tarjottu sitä, että lähtöaineiden (happi ja polttoaine) muutos palamistuotteiksi ei tapahdu suoraan vaan perättäisten nopeasti haarautuvien reaktioketjujen kautta. Näkemys on, että tavallisten polttoaineiden syttyminen sisältää sekä termisen että ketjureaktioteorian mukaisia ilmiöitä. (Huhtinen ym. 2000, 79 - 80.)

### 2.1 Kiinteiden polttoaineiden palaminen

Kosteus ja haihtuvat aineet poistuvat ensimmäisessä palamisvaiheessa. Jäännöskosteus poistuu juuri ennen polttoa, kun partikkeli lämpenee 400 – 600 °C sekunnin murto-osassa. Tällöin myös

kaasuuntuvat komponentit haihtuvat. Toisessa palamisvaiheessa kaasuuntuvat komponentit syttyvät palamaan polttoainehiukkasen ympärillä ja polttoainehiukkasen lämpötila kohoaa. Kaasuuntuvien komponenttien palaminen kestää 0,2 – 0,5 sekuntia. Jos polttoaine sisältää runsaasti kaasuuntuvia komponentteja, näiden palamisen tuottama lämpö riittää sytyttämään jäljelle jääneen koksipartikkelin. Kolmannen palamisvaiheen alussa koksipartikkeli syttyy palamaan ja sen lämpötila nousee ympäristön lämpötilaa korkeammaksi, jolloin se luovuttaa lämpöä ympäristöön. Paloajasta 50 – 70 % kuluu koksipartikkelin palamiseen. Tyypillisessä poltinpoltossa koksipartikkelin palaminen kestää polttoainehiukkasen koosta ja laadusta riippuen 1 – 2,5 sekuntia. (Huhtinen ym. 2000, 83.)



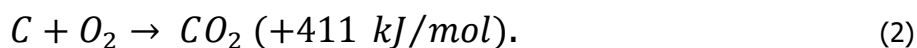
KUVA 1. Lämpötilat palamisen eri vaiheissa (Huhtinen ym., 2000, 82).

Koksipartikkeli palaa heterogeenisesti. Alemmissa palamislämpötiloissa happi absorboituu ympäröivästä kaasuista koksien pintaan, jossa se reagoi hiilen kanssa. Reaktiossa syntyy hiilimonoksidia ja hiilidioksidia. Palamislämpötilan noustessa hapen osuus hiilen pinnassa pienenee ja tapahtuu reaktio, jossa hiilidioksidi muuttuu hiilimonoksidiksi. Myöhemmin hiilimonoksidi siirtyy kiinteään partikkelin läheltä runsashappiseen kaasuun ja oksidoiduu hapen vaikutuksesta hiilidioksidiksi. (Huhtinen ym. 2000, 83.)

## 2.2 Palamisilmantarve ja savukaasujen koostumus

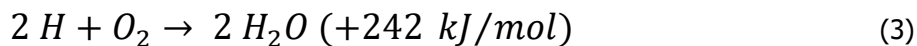
Palamisilman tarve voidaan laskea, kun polttoaineen koostumus tiedetään. Palamisilmantarve- ja savukaasulaskujen kannalta on tunnettava hiilen, vedyn ja rikin reaktiot hapen kanssa. Höyrykattilatekniikka –kirjassa on esitetty palamisreaktiot nettoreaktioina. Todellisuudessa reaktiot tapahtuvat monimutkaisten, eri välivaiheita sisältävien reaktioketjujen kautta. Nettoreaktiokaavat antavat kuitenkin riittävät tiedot palamisilmantarpeesta ja muodostuvista savukaasuista. (Huhtinen ym. 2000, 83 - 84.)

Yleisimpien polttoaineiden eniten energiaa palamisreaktiossa luovuttava komponentti on hiili. Hiilen palamista kuvaa nettoreaktiokaava

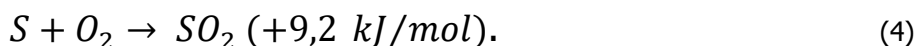


Hiilen reagoiessa hapen kanssa syntyy hiilidioksidia ja lämpöä vapautuu 411 kJ/mol. Yhtälö kertoo myös reaktion määrasuhteet mooleina. Yksi mooli hiiltä vaatii täydellisesti palaakseen yhden moolin happea. (Huhtinen ym. 2000, 84.)

Nettoreaktiokaava vedyn palamiselle on



ja nettoreaktiokaava rikille on



Rikin palamistuotteista pieni osa hapettuu edelleen ja reagoi savukaasuissa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa. Mikäli polttoaine on rikki-pitoista, kattilan lämpöpintojen syöpymistä rikkihapon vaikutuksesta estetään pitämällä savukaasujen lämpötila happokastepistettä korkeampana. (Huhtinen ym. 2000, 84, 92.) Rikinpoisto on yleensä toteutettu kerrosleiju- ja kierto-leijupetikattiloissa syöttämällä kalkkipohjaista ainetta tulipesään. Myös savukaasupesureilla voidaan rikkiyhdisteitä vähentää savukaasuista. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä ja Urpalainen, 2008, 170-171.)

Polttoaineet sisältävät myös palamattomia komponentteja, jotka kuitenkin vaikuttavat palamistapahumaan. Tällaisia ovat polttoaineen sisältämä happi, typpi, kosteus ja tuhka. Polttoaineessa itsessään oleva happi vähentää palamisilman tarvetta. Kosteus höyrystyy ennen palamista pienentäen polttoaineen lämpöarvoa. Osa typestä muodostaa ympäristölle haitallisia typpioksideja. (Huhtinen ym. 2000, 84.) Typen oksidien muodostumiseen voidaan vaikuttaa palamislämpötilalla, primääri- ja sekundääri-ilman suhteella, ilmakertoimella ja vähentää savukaasuista syöttämällä ammoniakkaa takavedon yläosaan (Huhtinen ym. 2008, 171). Tuhkan tietyt komponentit toimivat palamisreaktion katalyytteinä nopeuttaen palamista. Tuhka myös lisää savukaasujen pölypitoisuutta ja näin savukaasujen puhdistustarvetta (Huhtinen ym. 2000, 84).

Palamisilmamäärän laskentaan tarvitaan tietoa polttoaineen koostumuksesta ja polttoaineen komponenttien ja hapen väliset reaktioyhtälöt. Yleensä tunnetaan polttoaineen koostumus painoprosentteina. Polttoaineen komponenttimäärät pitää muuttaa mooleiksi, koska palamisreaktioyhtälöt kuvaavat reaktioihin osallistuvien komponenttien määriä mooleina. Tämä saadaan laskettua kaavalla 5.

$$n = \frac{m}{M} \quad (5)$$

missä  $n$  on ainemäärä mooleissa,  $m$  on aineen massa ja  $M$  on moolimassa. Teoreettisen palamisen tarvitsema happimäärä saadaan laskemalla yhteen hapen tarve polttoaineen eri komponenteille ja vähentämällä siitä polttoaineen itsensä sisältämä happi. (Huhtinen ym. 2000, 84-85.)

Palamisilmasta saadaan palamisen tarvitsema happi. Ilma sisältää hapen lisäksi muitakin kaasuja.

TAULUKKO 1. Kuivan ilman koostumus (Huhtinen ym. 2000, 85, muokattu).

Aine	Pitoisuus til.-%	Molekyylipaino [kg/kmol]	Moolitilavuus [dm <sup>3</sup> /mol]
Typpi (N <sub>2</sub> )	78,08	28,02	22,42
Happi (O <sub>2</sub> )	20,95	32,00	22,38
Argon (Ar)	0,934	39,95	22,56
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	0,033	44,01	22,23
Vety (H <sub>2</sub> )	0,000050	2,016	22,42
Yhteensä	100,00	28,97	22,41

Ilma sisältää pääosin happea ja typpeä. Argon sisällytetään usein typen osuuteen, jolloin ilmassa on happea noin 21 % ja typpeä noin 79 %. Teoreettinen kuiva ilmamäärä voidaan laskea kaavalla 6.

$$\frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} = \frac{N_{O_2(teor)}}{0,21 m_{pa}}, \quad (6)$$

missä  $N_{i(teor)}$  on teoreettinen ilmamäärä mooleina,  $m_{pa}$  on polttoaineen massa kilogrammoina ja  $N_{O_2(teor)}$  on teoreettinen happimäärä mooleina. Tulos saadaan muutettua grammoiksi per kilogrammaa palamisilmaa kertomalla saatu tulos ilman molekyylipainolla 28,97 g/mol. Jos halutaan ilmoittaa ilmamäärä litroina per kilogramma palamisilmaa, on ilman massavirta kerrottava ilman moolitilavuudella 22,41 dm<sup>3</sup>/mol. (Huhtinen ym. 2000, 85.)

Todellisessa ilmassa on myös kosteutta. Kylläisen ilman sisältämä vesimäärä riippuu ilman lämpötilasta. Taulukossa 2 on esitetty eri lämpötiloissa ilman sisältämä vesimäärä.

TAULUKKO 2. Vesimäärä kylläisessä ilmassa (Huhtinen ym. 2000, 86).

Ilman lämpötila	- 20 °C	- 10 °C	0 °C	+ 10 °C	+ 20 °C
Kylläisen ilman vesimäärä [kg/kgki]	0,0015	0,0025	0,0035	0,0075	0,015

Palamisilma ei yleensä ole kylläistä, vaan suhteellinen kosteus vaihtelee 40 % ja 60 % välillä. Tarjoissa laskelmissa kosteus otetaan huomioon, mutta käytännössä useimmiten kosteutta ei oteta huomioon. (Huhtinen ym. 2000, 86.)

Käytännössä täydellistä palamista ei saavuteta teoreettisella ilmamäärällä, vaan tulipesään syötetään ilmaa jonkin verran enemmän. Käytetyn todellisen ilmamäärän suhdetta teoreettiseen ilmamäärään

kutsutaan ilmakertoimeksi. Se merkitään tavallisesti kaavoihin kreikkalaisen kirjaimiston pienellä lamda kirjaimella ( $\lambda$ ). Todellinen ilmamäärä saadaan kertomalla teoreettinen ilmamäärä ilmakertomella. (Huhtinen ym. 2000, 86.)

Savukaasujen koostumus ja määrä saadaan reaktioyhtälöistä. Palamistuotteiden lisäksi savukaasuissa on ilman mukana tullut typpi, jota tulee 3,76-kertainen määrä hapen tarpeeseen verrattuna. Myös muut palamattomat komponentit polttoaineesta siirtyvät savukaasuihin, esimerkiksi vesi. Savukaasujen määrä saadaan laskettua moolimääräisenä kaavalla

$$\frac{N_{sk}}{m_{pa}} = n_C + n_{H_2} + n_S + 3,76 \frac{N_{O_2}}{m_{pa}} + n_N + n_{H_2O} , \quad (7)$$

missä  $N_{sk}$  on savukaasun määrä mooleina,  $n_C$  hiilen määrä mooleina,  $n_{H_2}$  vedyn määrä mooleina,  $n_S$  rikin määrä mooleina,  $3,76 N_{O_2}/m_{pa}$  on palamisaman mukana tulevan typen määrä,  $n_N$  polttoaineessa oleva typpi ja  $n_{H_2O}$  veden määrä. Jos halutaan savukaasumäärät kiloina, kerrotaan komponenttien moolimäärät niiden molekyylipainolla ja jos halutaan savukaasumäärä tilavuusyksiköinä, kerrotaan komponentit moolitilavuuksilla. Useimpien kaasujen tilavuudeksi riittää  $22,4 \text{ dm}^3/\text{mol}$ . Käsite kuiva savukaasu tarkoittaa savukaasua ilman vesihöyryä ja vastaavasti kostea savukaasu sisältää myös savukaasun veden. (Huhtinen ym. 2000, 87.)

Kun laskentaan otetaan ilmakerroin mukaan, saadaan todellinen savukaasumäärä laskettua kaavalla

$$\frac{N_{sk(tod)}}{m_{pa}} = \frac{N_{sk(teor)}}{m_{pa}} + (\lambda - 1) \frac{N_{i(teor)}}{m_{pa}} , \quad (8)$$

missä  $N_{sk(tod)}$  on savukaasujen todellinen määrä,  $N_{sk(teor)}$  savukaasujen teoreettinen määrä,  $\lambda$  ilmakerroin ja  $N_{i(teor)}$  palamisilman teoreettinen määrä. Kaava perustuu siihen, että ilmakerrointa suurennettaessa savukaasuvirta pysyy samana, mutta teoreettisen ilman tarpeen ylittävä ilmamäärä siirtyy savukaasuihin sellaisenaan. (Huhtinen ym. 2000, 87.)

Palaessa syntyy myös haitallisia päästöjä. Pääasiallisena palamistuotteena syntyy hiilidioksidia, joka on kasvihuonekaasu. Palamisen muita päästöjä ovat hiilimonoksidi, hiilivedyt ja typen oksidit.

Häkäpitoisuutta voidaan laskea käyttämällä riittävän suurta ilmaylimäärää. Suurempi ilmavirta kattilan läpi lisää savukaasuhäviöitä. Hyvin toimivien polttolaitteiden savukaasujen häkäpitoisuudet ovat 30-100 ppm. (Huhtinen ym. 2000, 91.)

Hiilivedyt ovat palamatta jäänyttä polttoainetta. Syy hiilivetypäästöihin on sama kuin häkäpäästöillä: polttoaineen ja palamisilman huono sekoittuminen. Tulipesän alhainen lämpö edistää hiilivetypäästöjen muodostumista. Haitallisimpia hiilivetypäästöistä ovat polyaromaattiset hiilivedyt eli ns. PAH - yhdisteet.

Kiintoainepäästöt muodostuvat polttoaineen sisältämästä palamattomasta tuhkasta ja palamatta jääneistä hiukkasista. Pohjatuhkasta voidaan analysoida palamattoman polttoaineen määrää ja saada tietoa kattilan polttimien tai polttoainejauhatuslaitteiden tilasta. (Huhtinen ym. 2000 92.)

Rikkidioksidia syntyy polttoaineen sisältämästä rikistä. Osa hapettuu edelleen rikkiatrioksidiksi, joka muodostaa veden kanssa rikkihappoa. Typen oksideista pääasiassa typpimonoksidia syntyy palamisessa kun typpi ja happi reagoivat keskenään. Typpioksidipäästöjä voidaan vähentää savukaasua puhdistamalla tai pienentämällä kattilan ja liekin lämpötilaa. (Huhtinen ym. 2000, 92-94.)

### 2.3 Savukaasujen ominaisuuksia

Palamisreaktiossa syntyvä lämpö siirtyy savukaasuihin ja lämmönsiirtimien välityksellä savukaasuista höyry- tai vesipiiriin. Savukaasujen ominaislämpö, lämmönjohtavuus, tiheys ja viskositeetti on tunnettava, jotta voidaan laskea siirtyviä lämpömääriä. (Huhtinen ym. 2000, 95.) Savukaasut koostuvat useista toisiinsa sekoittuneista kaasuista. Laskelmia varten täytyy selvittää eri kaasujen aineominaisuudet. (Huhtinen ym. 2000, 96.)

#### 2.3.1 Adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan polttoaineen palaessa teoreettisesti korkeinta saavutettavissa olevaa lämpötilaa, mikäli liekistä ei siirry lämpöä ympäristöön. Jos näin olisi, kaikki vapautuva lämpö kuluu savukaasujen lämmittämiseen. Adiabaattisen palamislämpötilan määräytymistä voidaan tarkastella laatimalla kuvan 10 mukainen energiatase palotilan ympärille. (Huhtinen ym. 2000, 95.)



KUVA 2. Palotilan energiatase (Huhtinen ym. 2000, 95).

Voidaan muodostaa energiataseyhtälö adiabaattiselle palamislämpötilalle:

$$\dot{m}_{pa}H_u + \dot{m}_i c_{pi} T_i = \dot{m}_{sk} c_{psk} T_{sk}, \quad (9)$$

missä	$\dot{m}_{pa}$	= polttoainevirta [kgpa/s],
	$H_u$	= polttoaineen tehollinen lämpöarvo [kJ/kgpa],
	$\dot{m}_i$	= palamisilmavirta [kg/s],
	$c_{pi}$	= ilman keskimääräinen ominaislämpö [kJ/kgK],
	$T_i$	= ilman sisäänmenolämpö [K],
	$\dot{m}_{sk}$	= savukaasuvirta [kg/s],

$$c_{psk} = \text{savukaasun keskimääräinen ominaislämpö lämpötilavälillä } 0 - T_{sk} \text{ [K],}$$

$$T_{sk} = \text{savukaasun lähtölämpötila [K].}$$

Jakamalla yhtälön molemmat puolet polttoaineen massavirralla saadaan yhtälö muotoon:

$$H_u + \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}} c_{pi} T_i = \frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}} c_{psk} T_{sk}, \quad (10)$$

missä  $\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{pa}}$  = todellinen ilmavirta polttoainekiloa kohti ja

$\frac{\dot{m}_{sk}}{\dot{m}_{pa}}$  = todellinen savukaasuvirta polttoainekiloa kohti.

Nämä saadaan laskettua teoreettisista arvoista kertomalla polttoaineen teoreettinen palamisilma-  
tarve lamdalla ja lisäämällä lisäilma teoreettiseen savukaasumäärään. (Huhtinen ym. 2000, 96.)

### 2.3.2 Ominaislämpö

Keskimääräinen ominaislämpö määritellään lämmittämällä kaasua yleensä 0 °C:sta loppulämpötilaan ja mittaamalla lämmitykseen kulunut energia. Tietyn kaasujen koostumuksen omaavan savukaasun ominaislämpö saadaan laskemalla keskiarvo painottamalla massaosuuksia. (Huhtinen ym. 2000, 97.)

$$c_{psk} = \sum x_j c_{pj}, \quad (11)$$

missä  $c_{psk}$  = savukaasun ominaislämpö kJ/kgK,  
 $x_j$  = tietyn kaasukomponentin  $j$  massaosuus ja  
 $c_{pj}$  = tietyn kaasukomponentin  $j$  ominaislämpö. (Huhtinen ym. 2000, 97.)

### 2.3.3 Lämmönjohtavuus

Savukaasun muodostavien kaasujen lämmönjohtavuus huoneenlämmössä on 0,15 – 0,25 W/mK. Savukaasun lämmön noustessa lämmönjohtavuus paranee. 500 °C lämpötilassa se on n. 0,55 W/mK. Kaasuseoksen lämmönjohtavuus saadaan laskettua kaavalla 12:

$$\lambda = 0,5 \left( \sum x_n \lambda_n + \frac{1}{\sum \frac{x_n}{\lambda_n}} \right), \quad (12)$$

missä  $x_n$  = komponentin  $n$  osuus ja  
 $\lambda_n$  = komponentin  $n$  lämmönjohtavuus.



Lämmönsiirtopintojen ja savukaasun välisiä tarkkoja lämmönjohtavuuden lukuja tarvitaan mikäli halutaan laskea lämmönsiirtokertoimia. (Huhtinen ym. 2000, 97-98.)

#### 2.3.4 Viskositeetti

Savukaasujen viskositeettia tarvitaan virtaus- ja lämpöteknisten laskemien tekemiseen. Kaasujen viskositeetit kasvavat lämpötilan noustessa. Kaasukomponenttien viskositeettien avulla savukaasun viskositeetti saadaan lasketuksi kaavalla 13:

$$\eta = \frac{\sum \eta_n \frac{x_n}{\sqrt{M_n}}}{\sum \frac{x_n}{\sqrt{M_n}}}, \quad (13)$$

missä  $x_n$  = kaasukomponentin osuus,  
 $\eta_n$  = kaasukomponentin viskositeetti ja  
 $M_n$  = kaasukomponentin molekyylipaino. (Huhtinen ym. 2000, 98.)

#### 2.3.5 Tiheys

Savukaasun tiheys saadaan lasketuksi osakaasujen tiheyksien ja mooliosuuksien mukaan kaavalla 14:

$$\rho = \sum x_n \rho_n, \quad (14)$$

missä  $x_n$  = komponentin osuus ja  
 $\rho_n$  = kaasukomponentin tiheys. (Huhtinen ym. 2000, 99.)

Savukaasun tiheys muuttuu kääntäen verrannollisesti absoluuttiseen lämpötilaan nähden:

$$\rho_x = \rho_0 \frac{T_0}{T_x}, \quad (15)$$

missä  $\rho_x$  = tiheys lämpötilassa  $T_x$  ja  
 $\rho_0$  = tiheys normaalitilassa ( $T = 273,15 \text{ K}$ ). (Huhtinen ym. 2000, 99.)

### 3 LEIJUKERROSPOLTTOTEKNIikka

Leijukerrospolttotekniikalla voidaan monia erilaisia polttoaineita polttaa samassa kattilassa hyvällä palamishyötysuhteella. Alhainen palamislämpötila parantaa typenoksidipäästöjä ja rikkiä voidaan puhdistaa syöttämällä kalkkia tulipesään. (Huhtinen ym. 2000, 153; Khan A.A., DE Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H. 2008, 31.)

#### 3.1 Leijukerroksen käyttäytyminen

Leijukerros toimii siten, että ilmavirta johdetaan kattilan pohjalla olevan hiekkakerroksen läpi. Aluksi kun ilmavirran vauhti on hidas, ilmavirtauksen painehäviö on suoraan verrannollinen ilman nopeuteen ja hiekkakerros muodostaa liikkumattoman kerroksen. Kun ilmavirran nopeutta kasvatetaan tiettyyn vauhtiin, ilmavirran painehäviö kasvaa hiekkakerroksen hydrostaattisen paineen suuruiseksi. Tällöin ilmavirtauksen hiekkapartikkeleihin aiheuttama voima on yhtä suuri kuin painovoima ja hiekkakerros alkaa leijua. Huhtinen ym. 2000, 154.)

Hiekkakerros alkaa leijua kun ilmannopeus on saavuttanut minimileijutusnopeuden. Nopeus voidaan laskea kaavalla 16:

$$U_{mf} = \frac{\mu_g}{d_p \rho_g} \left[ \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}} - 33,7 \right], \quad (16)$$

missä  $\mu_g$  = kaasun dynaaminen viskositeetti  
 $d_p$  = partikkelin halkaisija  
 $\rho_g$  = kaasun tiheys  
 $\rho_p$  = partikkelin tiheys  
 $g$  = maan vetovoiman kiihtyvyys. (Huhtinen ym. 2000, 154.)

Leijukerrospolttotekniikassa leijutusnopeus pidetään alle hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeuden. Hiekkapartikkelien lentoonlähtönopeus voidaan laskea kaavalla 17:

$$U_t = \sqrt{\frac{4 d_p (\rho_p - \rho_g)}{3 \rho_g C_d}}, \quad (17)$$

missä  $d_p$  = partikkelin halkaisija  
 $\rho_g$  = kaasun tiheys  
 $\rho_p$  = partikkelin tiheys. (Huhtinen ym. 2000, 156.)

Kun leijutusnopeutta kasvatetaan, peti laajenee. Tällöin ns. tyhjän tilan osuus kasvaa. Tyhjällä tilalla tarkoitetaan tässä yhteydessä hiekkapartikkelien väliin jäävän leijutusväliaineen täyttämän tilavuuden suhdetta leijukerroksen tilavuuteen. Kiinteällä hiekkapatjalla suhde on 0,4. Leijupetissä suhde on 0,5 ja kiertopetikattilassa 1. (Huhtinen ym. 2000, 154-155.)

### 3.2 Leijupetikattiloiden tyypillisiä toiminta-arvoja

Taulukossa 3 on esitetty tyypillisiä leijupetikattilan toiminta-arvoja.

TAULUKKO 3. Tyypillisiä leijupetikattilan toiminta-arvoja (Huhtinen ym. 2000, 159).

Tilavuusrasitus	0,1 – 0,5 MW/m <sup>3</sup>
Poikkipintarasitus	0,7 – 3 MW/m <sup>2</sup>
Petin painehäviö	6,0 – 12 kPa
Leijutusnopeus	0,7 – 2 m/s
Petin korkeus	0,4 – 0,8 m
Primääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Sekundääri-ilman lämpötila	20 – 400 °C
Petin lämpötila	700 – 1000 °C
Kaasutilan lämpötila	700 – 1200 °C
Sekundääri-ilman osuus	30 – 70 %
Ilmakerroin	1,1 – 1,4
Petin tiheys	1000 – 1500 kg/m <sup>3</sup>

Leijupetin suuren lämpökapasiteetti tekee mahdolliseksi kosteiden polttoaineiden polton ilman erillistä kuivatusta. Polttoaine kuivuu ja syttyy nopeasti sekoituttuaan kuumaan hiekkapetiin. (Huhtinen ym. 2000, 157.)

Jotta pääpolttoaine saadaan syttymään hyvin, hiekkapeti alkulämmitetään 500 – 600 °C lämpötilaan. Yleisesti on käytössä öljy- tai kaasupolttimia. (Huhtinen ym. 2000, 158.)

Petin lämpötila pyritään pitämään niin alhaisena, ettei polttoaineen tuhka sula tai pehmene. Hiekkapetin lämpötila pidetään noin 100 °C tuhkan pehmenemispisteen alapuolella. Poltettaessa kuivaa polttoainetta voidaan petiä jäähdyttää vesiruiskutuksella tai savukaasun kierrätyksellä. (Huhtinen ym. 2000, 158.)

Leijupetikattilan minimitehoa rajoittaa minimileijutusnopeus ja hiekkapetin lämpötila, joka tulisi olla vähintään 700 °C. (Huhtinen ym. 2000, 158.)

### 3.3 Tuhkaongelmat leijukerrospoltossa

Leijukerrospoltossa käytetään matalampaa tulipesän lämpötilaa kuin esimerkiksi pölypoltossa. Tämä vähentää selvästi muodostuvien tuhkapartikkelien sulamistaipumusta. Sulan faasin muodostuminen

aiheuttaa sintraantumista. Pahimmassa tapauksessa leijutettava materiaali sintraantuu täysin ja katila pitää ajaa alas. Paakkuuntunut materiaali on kovaa ja sen rikkominen on työlästä. (Skrifvars & Hupa 2002, 287; Huhtinen ym. 2000, 41.)

Sula voi olla peräisin pelkästään tuhkasta tai tuhkan ja leijutusmateriaalin seoksesta. Jälkimmäinen tilanne voi muodostua kun poltetaan biomassaa käyttäen kvartsihiekkaa leijutusmateriaalina. Tällaisessa tapauksessa alkaliyhdisteet reagoivat kvartsihiekan kanssa muodostaen matalassa lämpötilassa sulavia alkalisilikaatteja. (Skrifvars & Hupa 2002, 287.)

## 4 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

Tässä jaksossa käsitellään lyhyesti koepoltoissa käytettyjä polttoaineita ja niiden ominaisuuksia. Ko-  
keissa käytetyille polttoaineille ei ole tehty polttoaineanalyysyjä. Tässä on esitetty vastaavien poltto-  
aineiden kirjallisuudessa annettuja tietoja. Koepoltoissa käytettiin puupellettejä ja mdf-pölyä.

### 4.1 Puupelletti

Puupelletit ja -brikitit valmistetaan yleensä mekaanisen metsäteollisuuden sivuvirroista. Raaka-ai-  
neena on useimmiten kuiva puru, hiontapöly ja kutterilastut. Myös tuoreesta biomassasta, kuten  
kuori ja metsähake, voidaan tehdä pellettejä tai briquettejä. Tällöin raaka-aine täytyy kuivata ennen  
pelletöintiä. (Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. ja Korhonen, J. 2016, 95.)

Yleensä Suomessa valmistettujen pellettien halkaisijat ovat 8 mm ja pituudet 10-30 mm. Puupellet-  
tien kosteus on alhainen ja tuhkapitoisuus pieni. (Alakangas ym. 2016, 96.) Taulukossa 4 on poimit-  
tuna palamisen kannalta tärkeimpiä puupellettien ominaisuuksia.

TAULUKKO 4. Suomalaisten puupellettien keskimääräisiä ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 97,  
muokattu).

Suomalaisten pellettien keskimääräisiä ominaisuuksia					
	Tuote 1	Tuote 2	Tuote 3	Tuote 4	Tuote 5
Kosteus [p-%]	5,2	6,6	9,1	8,5	9,7
Kuiva-aineessa [p-%]					
Tuhka	0,28	0,30	0,25	0,24	0,37
Hiili,C	49,80	49,70	49,72	49,39	49,12
Vety,H	6,12	6,11	6,13	6,10	6,03
Typpi,N	0,16	0,16	0,05	0,07	0,08
Rikki,S	0,005	0,006	0,004	0,005	0,007
Irtotiheys [kg/irto-m <sup>3</sup> ]					
Saapumistilassa	690	680	630	600	560
Kuivana	655	635	575	550	505
Tehollinen lämpöarvo [MJ/kg]					
Kuiva-aineessa	19,0	18,9	19,0	18,8	18,7
Saapumistilassa	17,9	17,5	17,0	17,0	16,7

Taulukossa 4 listattujen tuotteiden keskimääräinen lämpöarvo on noin 17,2 MJ/kg, keskimääräinen  
kosteus noin 7,8 p-% ja tuhkapitoisuus noin 0,29 p-%.

## 4.2 MDF-pöly

Kirjainlyhennelmä MDF tulee englanninkielen termistä Medium Density Fiberboard. Materiaali on puolikovaa kuitulevyä. MDF-pöly on jätettä, joka syntyy MDF-levyjä työstäessä. MDF-materiaalin lämpöarvo on lähellä lastulevyn lämpöarvoa.

TAULUKKO 5. Kierrätyspuun ominaisuuksia (Alakangas ym. 2016, 107, muokattu).

Ominaisuus	Kierrätyspuun ominaisuuksia	
	Lastulevy	MDF-levy
Kosteus [p-%]	5,8	4,7
Tehollinen lämpöarvo, k.a. [MJ/kg]	18,6	18,7
Pitoisuus kuiva-aineessa [p-%]		
Tuhka	1,6	0,3
Hiili, C	48,6	
Vety, H	5,9	
Typpi, N	0,31	
Rikki, S	0,02	0,03

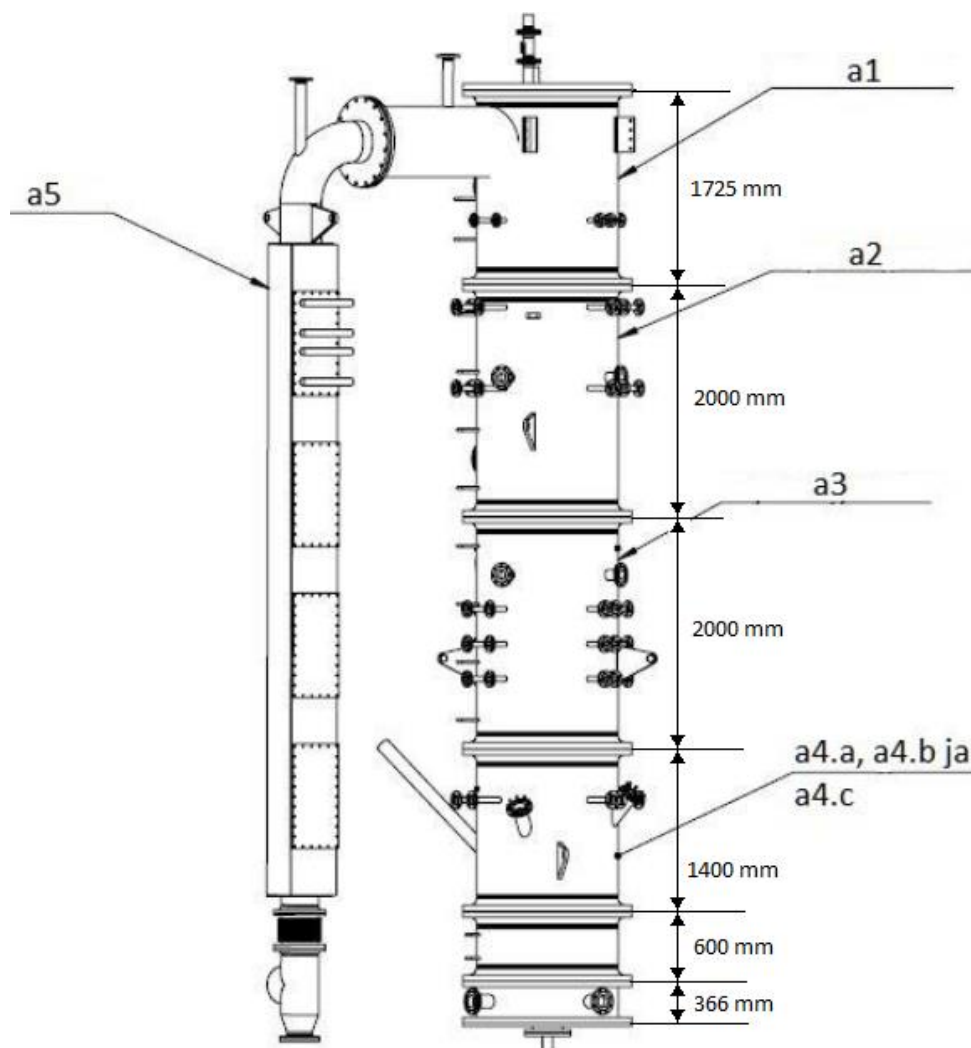
Tiedot vuodelta 1992 ja 1995, nykyisten lastulevyjen arvioidaan sis. kymmenkertaisen määrän tyypeä.

## 5 ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN LAITTEISTO

Energiatutkimuskeskuksen leijupetikattila on kasattu, savukaasukanavisto eristeinen paikoillaan ja sen oheislaitteisto on pääpiirteissään toimintakunnossa. Kohdassa 5.2 käsitellään tarkemmin oheislaitteita ja niiden tilaa syksyllä 2017.

### 5.1 Tutkimushallin leijupetikattilan ominaisuuksia

Tutkimuskeskuksen leijupetikattilan runko on tehty 4 segmentistä, jotka ovat pulttatut toisiinsa. Teräsrunгон sisähalkaisija on 1204 mm (Juutilainen 2015, Liite 6).



KUVA 3. Tutkimushallin leijupetikattilan segmentit (Juutilainen 2015, 23, muokattu: segmenttien mitat lisätty).

Kattilan palotila on sylinterimäinen. Teräsrunгон sisällä ovat lämpöä eristävät keraamit ja sisimpänä tulenkestävät keraamit. Palotilan sisähalkaisija on leijupetin kohdalta 350 mm. Palotilan halkaisija levenee segmentin a4.a yläosassa ja on 494 mm siitä ylös asti. (Juutilainen 2015, 23-27.) Primääri-ilma syötetään a4.c segmenttiin, jota kutsutaan myös ilmalaatikoksi.

Arinarakenteessa on 9 ilmansyöttösuutinta, joissa jokaisessa on 6 reikää. Reikien halkaisija on 6 mm. (Juutilainen 2015, 33, 34.) Mitta varmistettu työntömitalla huollon yhteydessä.



KUVA 4. Endoskoopilla otettu kuva arinasta ylhäältäpäin tyhjänä.



KUVA 5. Arina kuvattuna ylhäältäpäin. Arinan pohja hiekalla täytetty.



KUVA 6. Arina alhaaltapäin kuvattuna ilmalaatikon huoltoluukulta.

Polttoainesyöttö on toteutettu siten, että kiinteä polttoaine puretaan tankopurkaimilla polttoainekonteista kolakuljettimille, mikä kuljettaa polttoainemassan välisiiloon. Välisiilossa on purkuruuvit, jotka

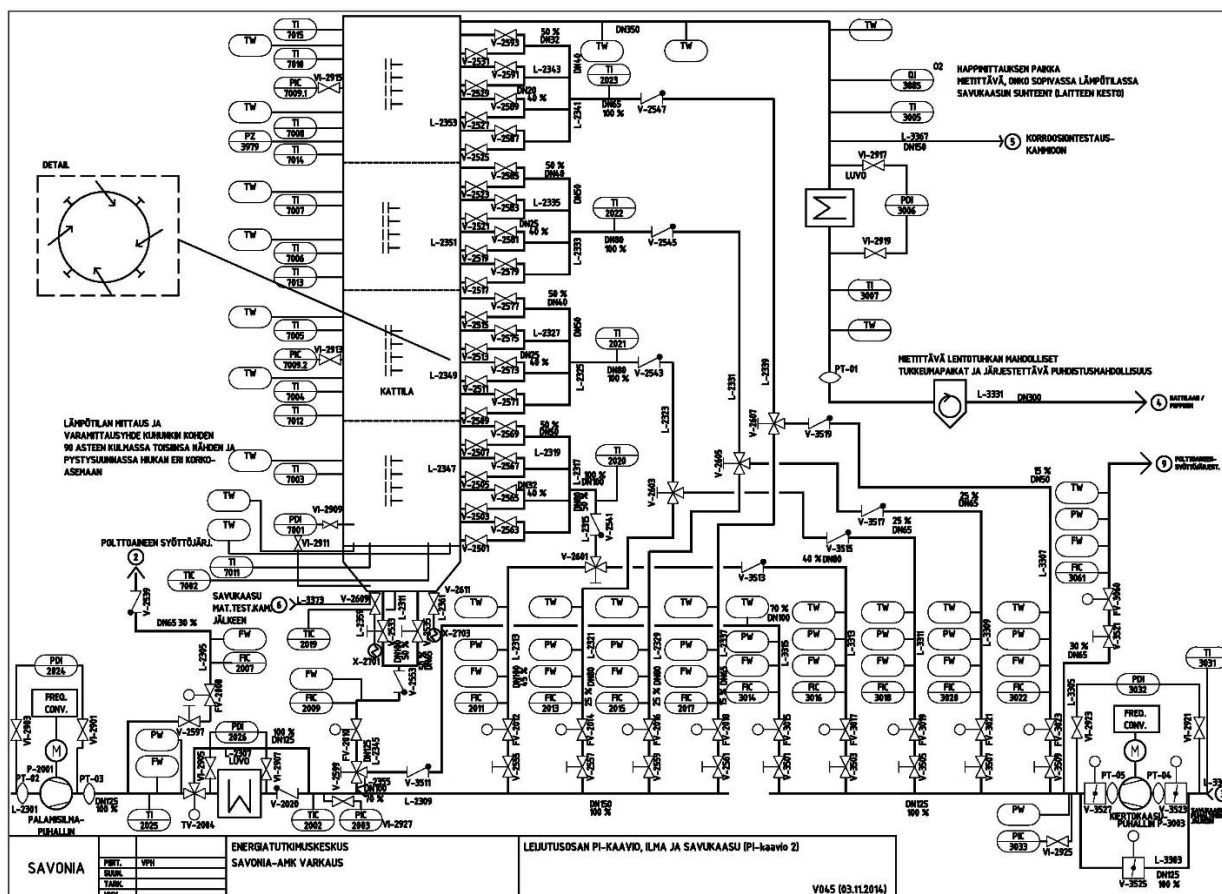


työntävät polttoainetta sulkusyöttimeen. Sulkusyötin tiputtaa polttoaineen torveen, joka johtaa palotilaan.



KUVA 7. Polttoainekontit energiatutkimuskeskuksen vieressä.

Palamisilmaa säädellään säätöventtiileillä FV-2008, FV-2010, FV-2012, FV-2014, FV-2016 ja FV-2018. Lisäksi säätöventtiilit FV-3015, FV-3017, FV-3019, FV-3021, FV-3023 ja FV-3060 säätelevät kiertokaasun määrää. Näiden säätöventtiilien säätelemissä linjoissa virtaavia kaasuvirtoja mitataan kuristulaippojen kohdilta paine-eroantureilla. Mittausten positiot ovat FIC-2009, FIC-2011, FIC-2013, FIC-2015 ja FIC-2017 palamisilmalinjoille ja FIC-3014, FIC-3016, FIC-3018, FIC-3020, FIC-3022 ja FIC-3061 kiertokaasulinjoille. Tuotetulla mittaustiedolla automaatio säätää palamisilman määrää. Kuvassa 10 on esitetty leijupetikattilan palamisilma- ja kiertokaasukanavisto PI-kaaviossa.



KUVA 8. ilma- ja savukaasukanaviston PI-kaavio leijupetikattilalle (Savonia, 2015).

Palamisilmamäärää säädellään myös jäännöshappianturin antaman lukeman perusteella. Mittaustulos kertoo palamisen täydellisyydestä. Happianturi on ABB Endura AZ25 ja se on asennettu leijupetikattilan takavedon yhteeseen (Räihä, 2017,20).

Palamisilman sekaan voidaan syöttää myös ns. kiertokaasua, joka otetaan HV-3080 savukaasupellin jälkeen ennen savupiippua ja syötetään aiemmin mainittujen kiertokaasutukista lähtevien linjojen säätöventtiilien läpi eri kohtiin palamisilmalinjastoon.

## 5.2 Tilanne energiatutkimushallilla syksyllä 2017

Energiatutkimushallilla tehtiin kesällä 2017 opiskelijaryhmätöinä ja opinnäytteinä eri projekteja leijupetikattilan käyttöönoton edistämiseksi. Kesän aikana ammoniakisäiliö ja ammoniakin syöttöputkisto ja pumppu asennettiin leijupetikattilan taakse opinnäytetyönä (Lahti, 2017). Ammoniakkijärjestelmän ruiskutuslaitteet jäivät tämän opinnäytetyön ulkopuolelle, joten ammoniakkijärjestelmä ei ole käytettävissä kirjoitushetkellä (Lahti, 2017, 2). Hallilla suoritettiin myös polttoainesyöttöjärjestelmän testejä ja pienimuotoisia polttokokeita pelletillä kesällä 2017.

### 5.2.1 Ammoniaksyöttöjärjestelmä

Ammoniakkisäiliössä ja sen putkissa havaittiin kesällä 2017 testien yhteydessä vuotokohtia. Nämä korjattiin hitsaamalla. Korjaustoimenpiteiden jälkeen säiliö asennettiin takaisin arkkupakastimeen,

joka toimii ammoniakkisäiliön jäähdyttimenä. Laitteisto testattiin syöttämällä vesijohtoverkosta vettä noin 6 bar paineella. Syöttölinjastossa ei havaittu korjausten jälkeen vuotoja.



KUVA 9. Ammoniakkisäiliö korjaustöiden kohteena kesällä 2017.

Pakastearkun läpiviennit olisi syytä tiivistää, muutoin ilman kosteus pääsee tiivistymään pakastimen sisäpinnoille. Mikäli ammoniakki vesi seoksen virtaus on hyvin pieni, on mahdollista, että seos kuumenee liikaa putkistossa. Opinnäytetyössään Lahti (2017, 17) toteaa: ”Lämpötilatietoja tarvitaan jo ennakkoon, onko ammoniakkiruiskutusjärjestelmä vaarassa lämmitä lähelle sen kiehumispistettä - +37,7 °C astetta. Jos lämpötila on lähellä tätä, niin helpompi ratkaisu olisi eristää ammoniakkiruiskutusjärjestelmän putkisto. Jos sekään ei auta, varmempi, mutta työläämpi vaihtoehto olisi laajentaa ammoniakkiveden ruiskutusjärjestelmän pumpun hullunkierro koskemaan koko järjestelmää.”

### 5.2.2 Polttoaineensyöttöjärjestelmä

Kesän aikana suoritettiin useita mittauksia polttoainevälisiilon purkuruuvin ja sulkusyöttimen säätämisen selvittämiseksi. Pellettien käyttäytyminen ruuvipurkaimella oli haasteellista hallita. Pellettejä romahti välillä isojakin kerta-annoksia sulkusyöttimeen. Testien perusteella ruuvipurkainta päädyttiin ajamaan sykleissä. Testaukset tehtiin asettamalla juoksevasti numeroitu muovipussi tuhkanpoistoaukon suulle ja syklin jälkeen pussi vaihdettiin. Kerätyt annokset punnittiin. Kokeillut syklit olivat 8 s käynti, 10 sekunnin käynti ja 12 sekunnin käynti 120 sekunnin mittaisen syklin aikana ja 6 sekunnin käynti 60 sekunnin syklin aikana. Syklejä toistettiin useita ja näyteannoksia punnittiin 109 kappaletta yhteensä.



KUVA 10. Polttoainesyöttöjärjestelmän testausta.

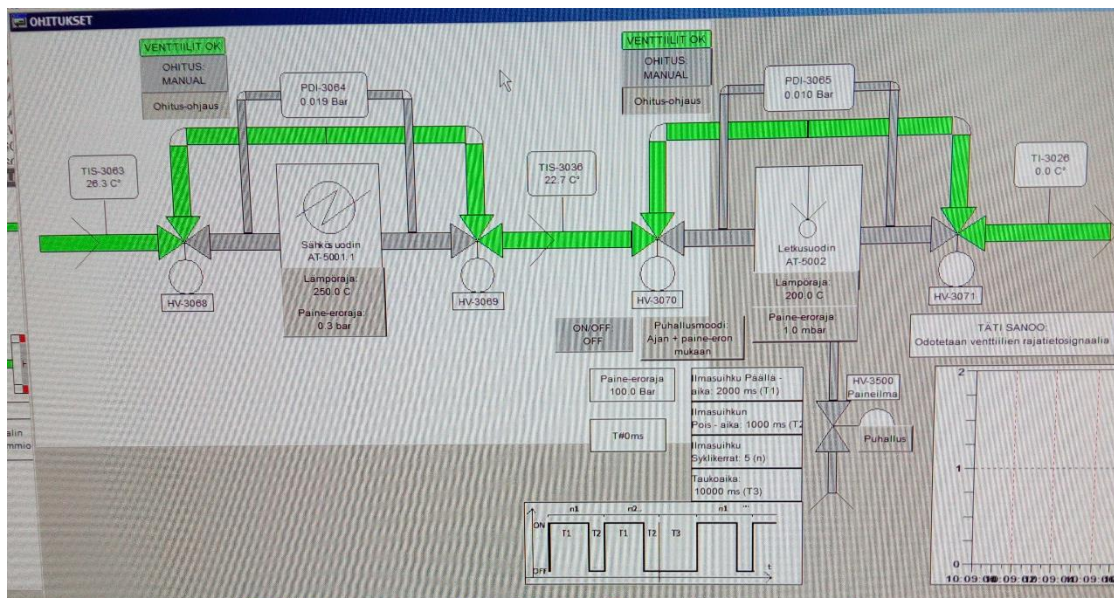
Vaikka polttoainevälisiilon purkuruuvia ajetaan hyvin varovaisin asetuksin sykleissä, pellettiä saattaa kerralla tipahtaa yli 2 kg kattilaan. Lämpöarvon pelletillä ollessa noin 17 MJ/kg myös teho heittelee voimakkaasti.

Kolakuljettimella polttoaine tuodaan polttoainevälisiiloon. Järjestelmän käyttöönotosta vuodelta 2016 on kuvaus Markus Piironen opinnäytetyössä Polttoaineensyöttölaitteiston käyttöönotto, 2017.

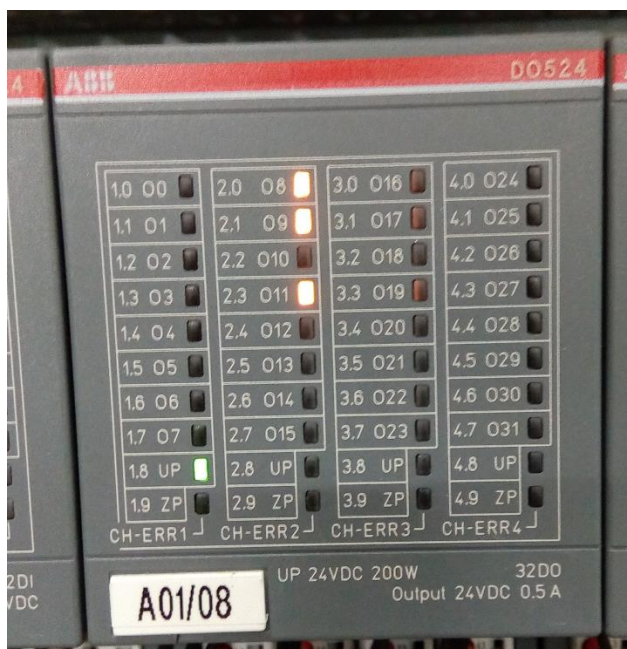
### 5.2.3 Savukaasukanavisto ja savukaasupellit

Savukaasukanaviston tehtävänä on johtaa savukaasut savupiippuun. Kanaviston tulisi pysyä auki, vaikka apuvoima ja ohjaussignaalit katoavat, jotta savukaasut eivät pääse hallitilaan. Kesän 2017 aikana savukaasukanaviston läppäventtiileiden toimintaa tarkasteltiin. Kuvassa 11 on PI-kaavio savukaasukanavistosta.





KUVA 12. Savukaasusuodattimien ohitukset. Linjat kytketty ohitukselle.



KUVA 13. Ristiinkytkentätallassa sijaitseva logiikan I/O-kortti. Kanavat 8, 9, 10 ja 11 ohjaavat savukaasusuodattimien ohituspeltejä. Linjat kytketty ohitukselle.

Kanavalla 10 ja 11 olevat savukaasupelteinä toimivat läppäventtiilit HV-3070 ja HV-3071 olivat ohjauksiltaan käänteiset, kuten kuvasta 13 voidaan havaita. Ohituslinja oli auki, kun kanava 10 oli "False" ja kanava 11 "True". Mikäli logiikan sähköt katkeavat jostain syystä, kääntyy savukaasusuodattimien kautta menevä linjasto kiinni johtuen siitä, että kaikki muut edellä mainitut pellit kääntyvät HV-3070 pysyessä asennossaan.

#### 5.2.4 Pohjatuhkan poistojärjestelmä

Pohjatuhkan ja hiekan seosta voidaan poistaa leijupetikattilan alaosassa sijaitsevan tuhkanpoistoyhteen läpi. Poistoyhteessä on kaksi giljotiinipeltiä, joiden väliin jää tasku, johon pohjatuhkan ja hiekan

seos tipahtaa. Kun ylempi giljotiinipelti on suljettu, alemman giljotiinipellin avaamalla saa taskun tyhjennettyä ulos. Pohjatuhkalle on myös ilmajäähdytyslinja. (Juutilainen, 2015, 44.) Se on piirretty menemään ulos, mutta kirjoitushetkellä linja ulos puuttuu ja mahdollinen jäähdytysilma tulee hallin ilmatilaan. Giljotiinipeltien paineilmat saatiin asennettua ja rajatilatietokytkimet saatiin toimimaan kesän 2017 aikana.

Tuhkanpoistoyhteen alle olisi hyvä saada keräysastia tuhkalle. Astian muotoa tulisi miettiä. Kuvasta 14 voi havaita, että tilaa ei ole kovin korkealataiselle astialle. Opinnäytetyössään Juutilainen (2015, 41) mainitsee laskennallisen kattilan lämpölaajenemisen olevan noin 10 mm.



KUVA 14. Tuhkanpoistoyhde leijupetikattilan alaosassa.

### 5.2.5 Kalkin- ja hiekansyöttö

Kalkin- ja hiekansyöttö tapahtuu varastosiilojen alaosassa olevien giljotiinipeltien ja niiden väliin jäävien taskujen kautta. Paineilmalla ammutaan pudotustorvea pitkin materiaali palotilaan. Hiekkasiiloon on täytetty hiekkaa ja se on testattu ja todettu toimivaksi.

### 5.2.6 Kattilan esilämmitysjärjestelmä

Leijupetikattilan esilämmitys tapahtuu kahdella Leister Vulcan System kuumailmapuhaltimella. Kummankin teho on 11 kW, eli yhteensä 22 kW. Puhaltimet puhaltavat kattilan alaosassa olevaan ilma-laatikkoon. Lämmityskokeissa havaittiin, että lämmön siirtäminen kattilan sisälle vaatii savukaasupuhaltimien käyttöä. Täyttä tehoa ei voi käyttää, koska ilmavirta ei riitä pitämään laitteiden lämmitysvastuksia riittävän viileinä.

### 5.2.7 Häätösammutusjärjestelmä ja takapalotermostaatti

Leijupetikattilan polttoainesyöttötorveen on asennettu vesilinja. Samasta linjasta menee myös putki polttoainevälisiiloon. Linjassa on magneettiventtiili, jonka avaamalla vettä saadaan syötettyä sulkusyöttimen jälkeiseen suppiloon ja polttoainevälisiilon sisään. Kirjoitushetkellä ei ole tiedossa, onko

visualisoinnissa nappia, millä magneettiventtiiliä voi helposti ohjata. Takapalotilanteessa hätäsammutusjärjestelmä on viimeinen keino yrittää saada tilanne haltuun. Järjestelmää testattiin kesällä 2017 avaamalla magneettiventtiili ja johtamalla vesi siilon puolen linjasta letkulla saaviin. Testin aikana sulkusyöttimen käsiventtiili oli kiinni, joten aivan täyttä varmuutta sulkusyöttimen alle menevän linjan avoimuudesta ei ole.

Kirjoitushetkellä takapalotermostaattia ei ole vielä asennettu. Alustavien suunnitelmien mukaan se tulee polttoainetorven yläosaan lähelle sulkusyötintä putken ulkopintaan. Hankittu termostaatti tulee asennetuksi koteloon. Ajatuksena on, että kotelo olisi kirkaskantinen, jolloin laitteen pystyy näkemään avaamatta koteloa. Sen tarkistaminen on yksi seikka, joka tulisi lisätä ylösajotarkistuslistaan.

Polttoainesyöttötorveen on asennettu lämpöanturi pintaan (TIC-4028). Sen avulla pystyy seuraamaan putken ulkopinnan lämpötilaa. Visualisointiin on lisätty mitta-arvon ilmaiseva laatikko.

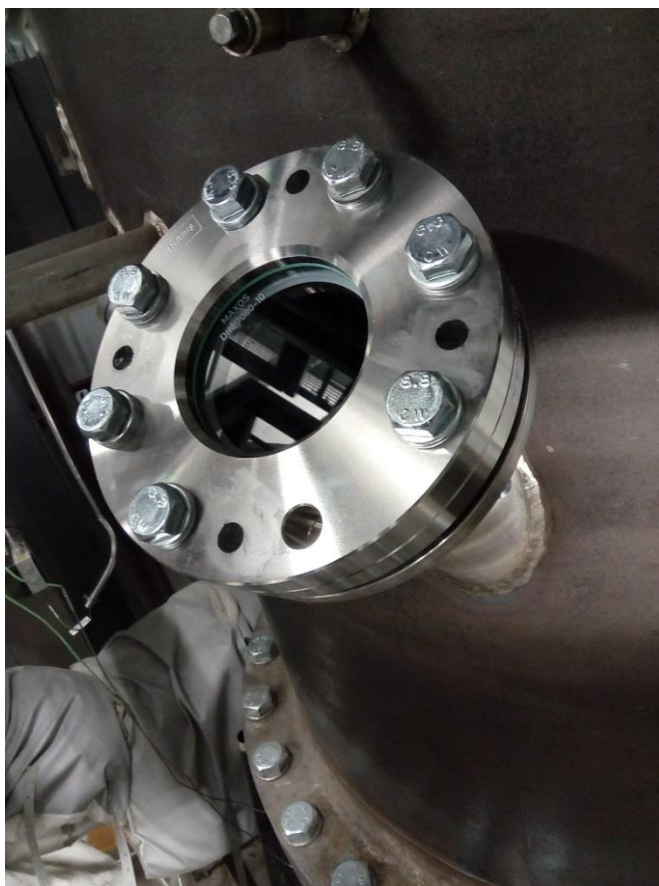


## 6 POLTTOKOEJÄRJESTELYT JA TULOKSET

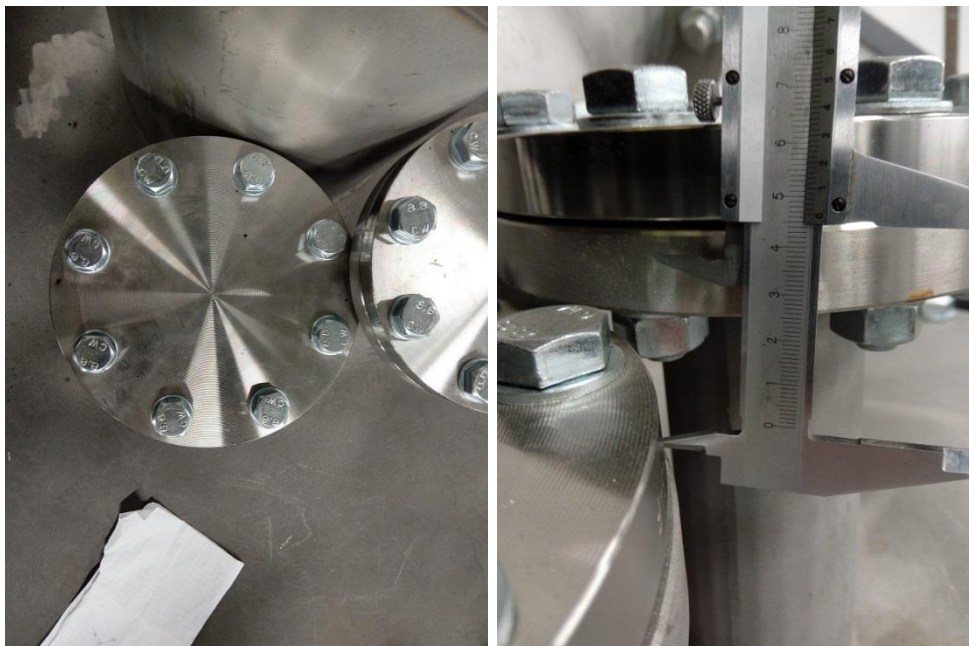
### 6.1 Esivalmistelut

Polttokoejärjestelyt aloitettiin laatimalla laitelistauksen avulla leijupetikattilan ja sen oheisjärjestelmien laitteiden ja instrumentoinnin tarkistuslista. Edellä mainittu listaus löytyy liitteestä 1. Oheisjärjestelmät jaettiin 4 ryhmään: apujärjestelmät, palamisilmajärjestelmä, savukaasujärjestelmä ja vesipiirit. Lista käytiin tärkeimmiltä osin läpi. Savukaasukanaviston peltien asennoittimet testattiin kääntelemällä peltejä auki ja kiinni.

Valmisteluihin alun perin oli suunnitteilla etävalvonnan laajentamisen toteutusta. Tarkoituksena oli lisätä web-kameroita kuvaamaan tulipesän polttoprosessia näkölasien kautta. Etävalvontalaajennus ja web-kameroiden asennus jäivät toteutumatta. Näkölasit hankittiin ja asennettiin kahteen yhteen 17.1.2018. Ensimmäiset polttokokeet tehtiin ilman näkölasia. Palotilaa tarkkailtiin avaamalla näkölasiyhteiden umpilaipat. Ylimmän näkölasiyhteen viereinen yhde kattilan päällä vaatii muokkaamista, että kolmas näkölasi mahtuu paikoilleen ja se jäi asentamatta tämän opinnäytetyön puitteissa.



KUVA 15. Näkölasi Arimaxin puoleisessa näkölasiyhteessä. Yksi pultti jätetty asentamatta. Suunnitelmissa oli, että näkölasin yhteyteen asennetaan web-kamera kuvaamaan palotilaan. Kiinnitykseksi alustavasti suunniteltiin kierretankoa, mihin kameran kiinnikkeet tulisivat kiinni.



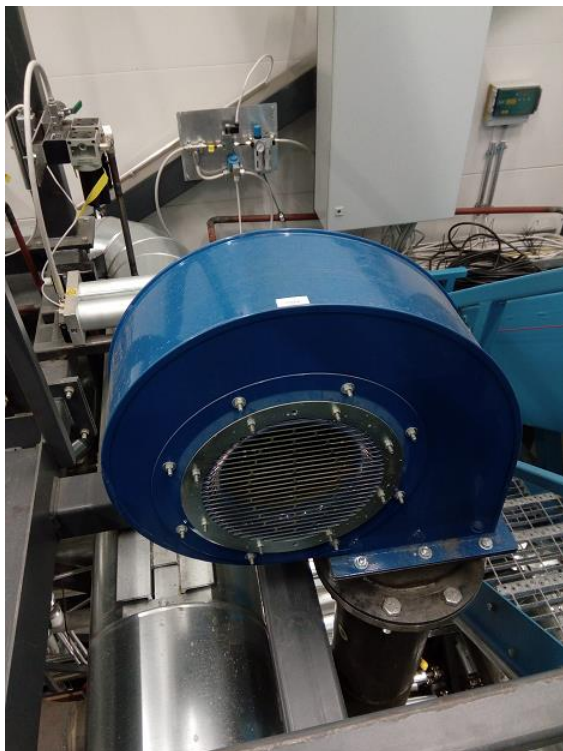
KUVAT 16 ja 17. Näkölasisyhde kattilan päällä. Osittain näkölasin päälle jäävän yhteen laippaa pitää muokata, jotta näkölasi mahtuu paikoilleen.

HV-3071 3-tieventtiin paineilmaventtiili käännettiin ympäri. Muutostyö muutti savukaasupeltinä toimivaa 3-tieläppäventtiiliä siten, että sen ohjaus on samoin päin kuin letkusuotimen ohituslinjan toinen 3-tieventtiili HV-3070 (ks. kohta 5.2.3).



KUVA 18. HV-3071:n asennoitin ja rajatilakytkin. Magneettiventtiili käännetty fyysisesti toisinpäin ohjauksen muuttamiseksi.

Testausten edetessä huomattiin, että hätäjähdytyspuhallin P-3004 toimii vain paikallisohjauksella. Positiivinen pyörimisnopeusasetus pyöritti puhallinta väärään suuntaan. Puhaltimen ohjelma otettiin käyttöön automaatioissa ja sen parametrit säädettiin vastaamaan pyörimissuunnan poikkeamaa.

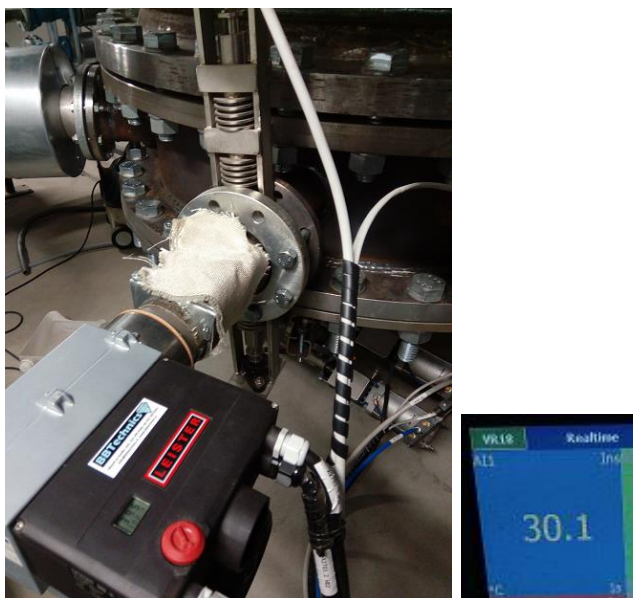


KUVA 19. Hätäjäähdytyspuhallin. Moottori toisella puolella. Pyöriessään myötäpäivään pyörittää moottori puhallinta kuvan katsontasuunnasta nähden vastapäivään. Automaatiolta säädetty niin, että asetusarvo tuo taajuusmuuntajalle negatiivisen pyörimisnopeuden.

Kiertokaasupuhaltimen P-3003 ohjelmaa ei otettu käyttöön. Se toimii vain paikallisella ohjauksella. Taajuusmuuntajat ovat ketjutettu ja P-3003 edeltävää taajuusmuuntajaa ei ole otettu käyttöön.

Polttoainekontti 2 ei ole täysin säänpitävä. Sinne varastoitu MDF-pöly oli päässyt kastumaan. Pölykasa oli osittain hylkinyt kontin sisälle valunutta vettä, mutta vesi oli lopulta mennyt pölykasan pinnasta sisään. Myös lattialle kertynyt vesi oli imeytynyt lattiaa pitkin pölykasan alle. MDF-pölyä ajettiin tankopurkaimilla ja kolakuljettimella välisiiloon ja kolakuljettimen kouruun kuivumaan 27.10.2017 ennen ensimmäistä polttokoetta.

Päätetty ensimmäinen polttokoepäivä oli 8.11.2017. Maanantaina 6.11.2017 tehtiin siivous kattilan ympäristössä ja tiistaiaamupäivällä 7.11.2017 aloitettiin leijupetikattilan esilämmitys, kytkettiin sähkösuotimen lämmitys ja Arimax –kattila ilmattiin. Datan keruuseen tarkoitettu python-ohjelma testattiin ja muuttujalista käytiin läpi. Liitteessä 2 on käytetty listaus tallennettavista muuttuja-arvoista. Tarkoituksena oli saada mahdollisimman kattava datapaketti, josta pystyy poimimaan tarvittavat mitta- ja asetusarvot data-analysejä varten.



KUVAT 20 ja 21. Leister-puhaltimen X-2703 liitoksesta havaittiin pientä ilmapuotoa, joka virtasi kaapeleita kohti. Vuoto tukittiin tilapäisesti tulenkestävällä kankaanpalalla. Lämpötilalukema 7.11.2017 kello 18:34 mitattuna erillisellä alempaan kattilakeraamiin asennetulla anturilla.

## 6.2 Ensimmäinen polttokoe 8.11.2017

### 6.2.1 Kuvaus ensimmäisen polttokokeen vaiheista

Syöttämistä yritettiin noin kello 8:15 kattilan alakeraamien ollessa noin 205 °C syöttämällä aloituspanos pellettiä ja sanomalehtipaperia kattilaan sulkusyöttimen läpi. Muutaman sytytysyrityksen jälkeen epäiltiin polttoainepudotustorven tukkeutumista. Pudotustorvea kolisteltiin ja sille lopulta vedettiin tilapäinen paineilmaletku ja torveen puhallettiin paineilmaa.

Noin kello 8:48 (datapaketissa aikaleimalla 8:41) TI-7003 lämpöanturi segmentissä a4.a reagoi ensimmäisen kerran. Myös segmentin a3 TI-7012 lukema ylittää mittauksen alarajan. Sulkusyöttimeen syötettiin käsin pellettiä. Palaminen oli heikkoa. Havaitaan, että edes 165 % palamisilmapuhaltimen tehoasetuksella hiekkapeti ei kupli.

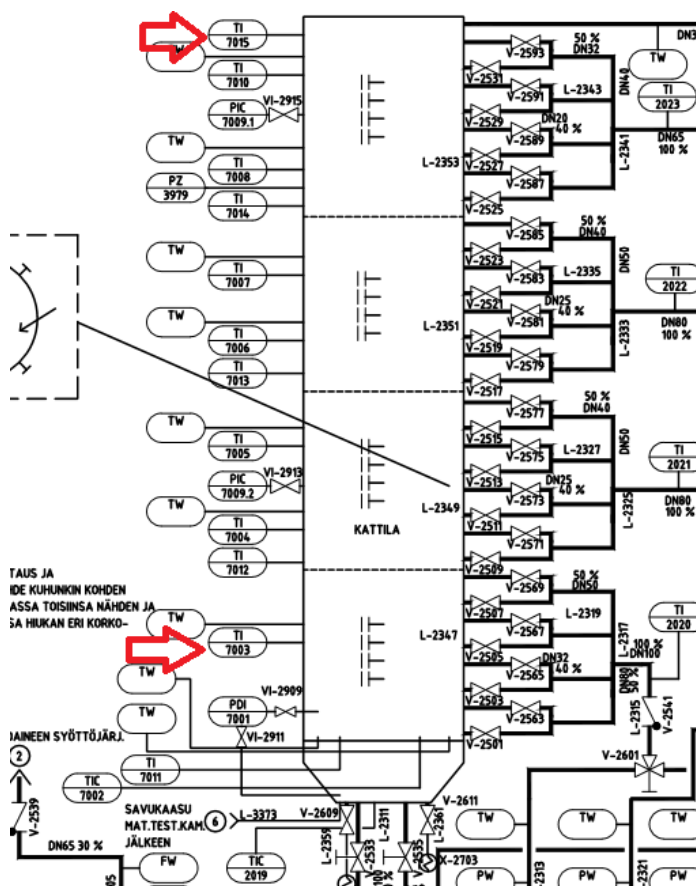
Hiekkaa poistettiin ensimmäisen kerran noin kello 12. Myöhemmin tuli ilmi, että hiekkaa tippui kattilan alaosan yhteestä vain hyvin pieniä määriä ensimmäisten hiekan poistojen jälkeen. Tuli ilmeiseksi, että kattilan arina oli tukkeutunut. Kattila päätettiin tyhjentää seuraavana työpäivänä.

### 6.2.2 Ensimmäisen polttokokeen tulokset

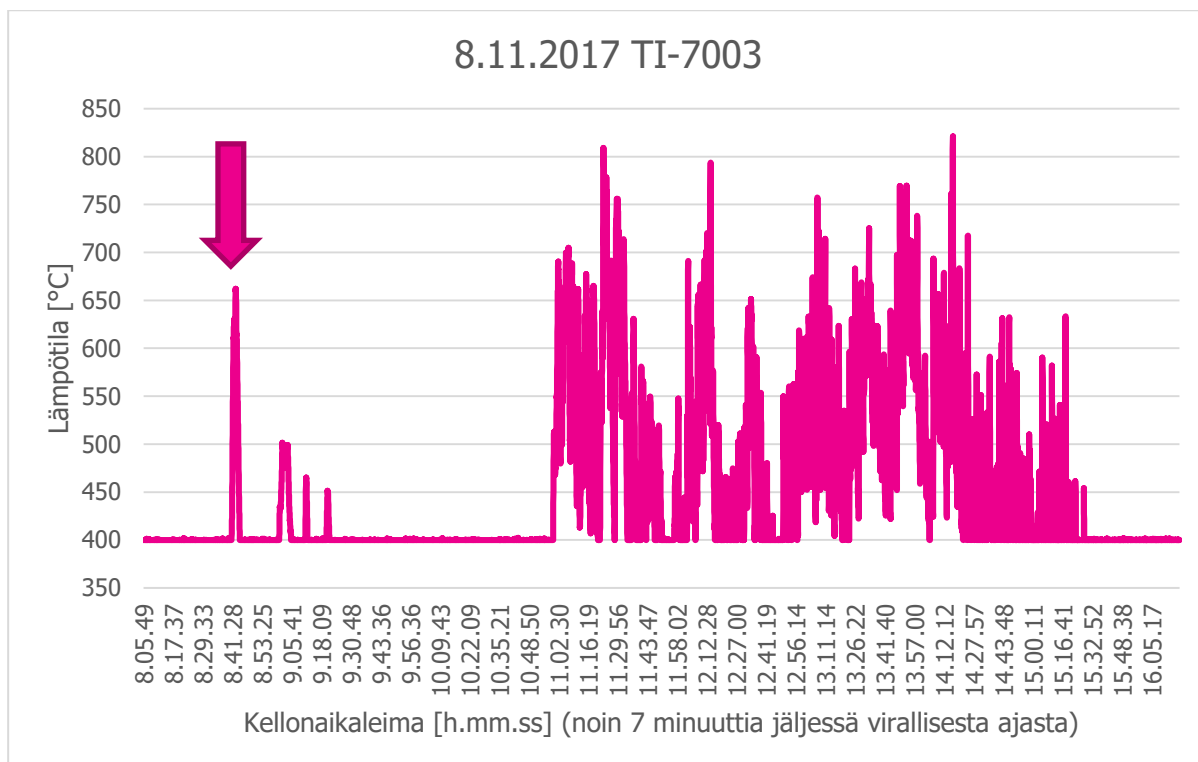
Kiinteän polttoaineen syöttäminen oli hankalaa johtuen alhaisesta petilämpötilasta. Palaminen oli heikkoa, mutta voimistui kun näkölasiyhdettä avattiin. Edellinen havainto johti siihen johtopäätelmään, että primääripalamisilmalinja on tukossa.

Lämpöanturi TIC-7002, joka oli taivutettu kaksin kerroin ja ilmeisesti kiinni kattilakeraameissa näytti koepolton lopuksi noin 274 °C. Erillinen kattilakeraameihin asennettu anturi näytti kello 15:50 noin 343 °C.

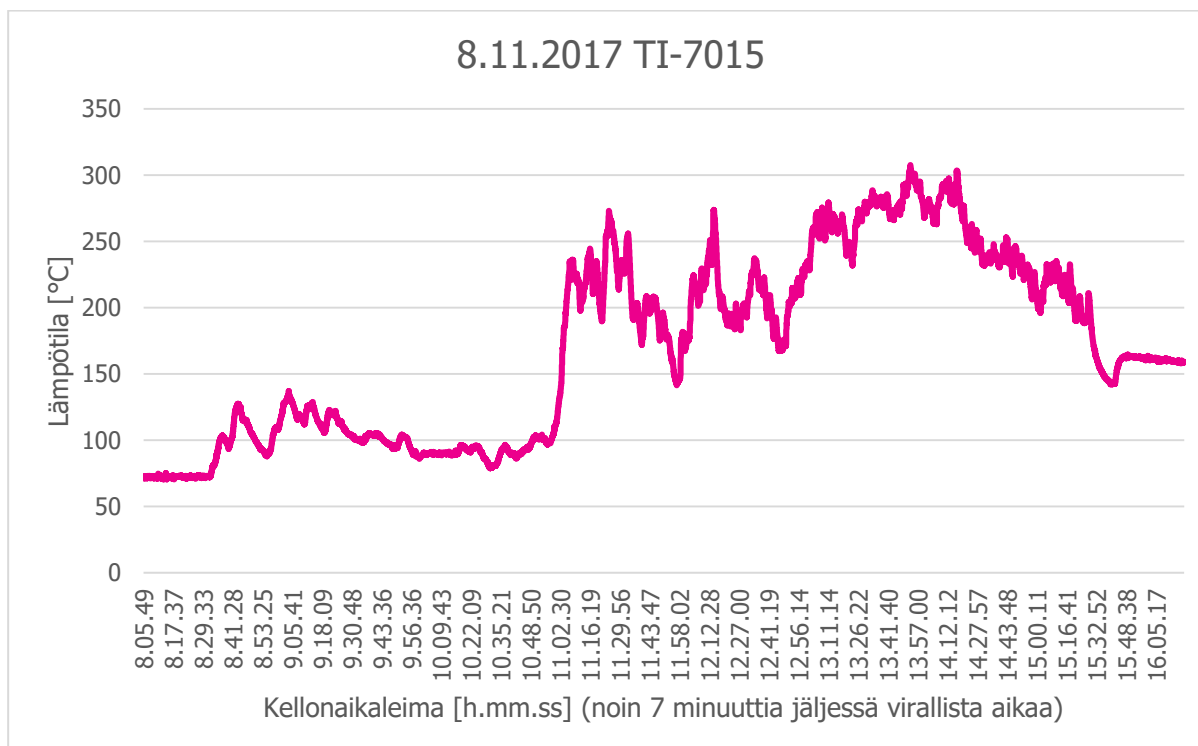
Kuvassa 22 on nuolin merkitty anturit TI-7015 ja TI-7003, jotka näyttivät jotain arvoa koepolton aikana. Myös muut anturit näyttivät välillä jotain arvoja. TI-7008, TI-7010, TI-7011 ja TI-7014 eivät nousseet mittadatan perusteella yli mittauksen alkupisteen 400 °C koepolton aikana. Havaittavissa oli vain pientä huojuntaa.



KUVA 22. Nuolella osoitettuna PI-kaaviosta anturit TI-7015 kattilan ensimmäisessä a1-segmentissä ylhäällä ja TI-7003 alimman a4-segmentin ylemmässä a4.a osassa. Jäljempänä ko. antureiden tulokset esitettyinä kuvioissa. (Savonia, 2015, muokattu.)



KUVIO 1. TI-7003 anturin mittatulokset automaatiosta. Nuoli osoittaa ensimmäistä kohtaa, missä anturin mittaustulos ylittää skaalauksen pienimmän arvon 400 °C.



KUVIO 2. Ylimmän segmentin lämpöanturin TI-7015 mittatulokset automaatiosta. Kattilan ylimmässä osassa lämpötila saavuttaa huippunsa noin 307 °C noin kello 14 (13:53 aikaleimalla). Alkuperäinen suunnittelulämpö savukaasuille savukaasukanaviston alussa on yli 800 °C ja happianturi QI-3085 anturityyppi valittu sen mukaisesti. Happianturi ei reagoi, koska se vaatii yli 690 °C lämpötilan.

Ensimmäisen koepolton tuloksista ei ole paljoa tulkittavissa. Hiekkapetiin sintraantunut kappale on saattanut tulla aikaisemmin kesällä 2017. Koska kattilaa ei tyhjennetty ennen koetta, täyttä varmuutta asian suhteen ei ole. Koska primääri-ilmakanavasta ei tullut ilmavirtaa, ei myöskään hiekkapatjan läpi ollut ilmavirtaa. TI-7011 lämpöanturi oli hiekkapatjan sisällä ja varsinainen palaminen tapahtui staattisen hiekkapatjan päällä.

### 6.2.3 Ensimmäisen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet

Tukkeumaa hiekkapetissä yritettiin polttokoepäivää seuraavana päivänä poistaa puhaltamalla tuhkanpoistoyhteestä paineilmaa kattilan sisään. Huomattiin, että arinasuutinten päällä oli sintraantunut kappale. Sitä yritettiin lyödä palasiksi rautatangolla jätelämpökattilan puoleisesta näkölasiyhteestä. Kappale ei hajonnut ja arinarakenne jouduttiin laskemaan alas ilmalaatikon sisällä. Sintraantunut möhkäle hajotettiin iskuporakoneella ja kappaleet otettiin pois arinan päältä. Arinan tyhjennyksen yhteydessä löytyi myös pienen vatupassin jäänteet.



KUVA 23. Kuvissa mittasuhteena käytetyn sytyttimen mitta oli noin 61,23 mm.



KUVA 24. Alas laskettu arina. Suutinten päällä näkyy harmaa sintraantunut kappale, joka porattiin iskuorakoneella kappaleiksi, jotta sen pystyi poistamaan kattilasta.



KUVAT 25 ja 26. Sintraantuneita kappaleita.



KUVA 27. Kattilakeraamin palanen.





KUVA 28. Vatupassin jäänteet.

Osassa sintraantuneista kappaleista oli havaittavissa lasittumista. Isossa suutinten päällä olleessa kappaleessa oli enemmän merkkejä lasittumisesta. Lämpötila oli käynyt niin korkealla, että hiekkaa oli lasittunut. Palaminen oli tapahtunut staattisen hiekkapetin päällä.



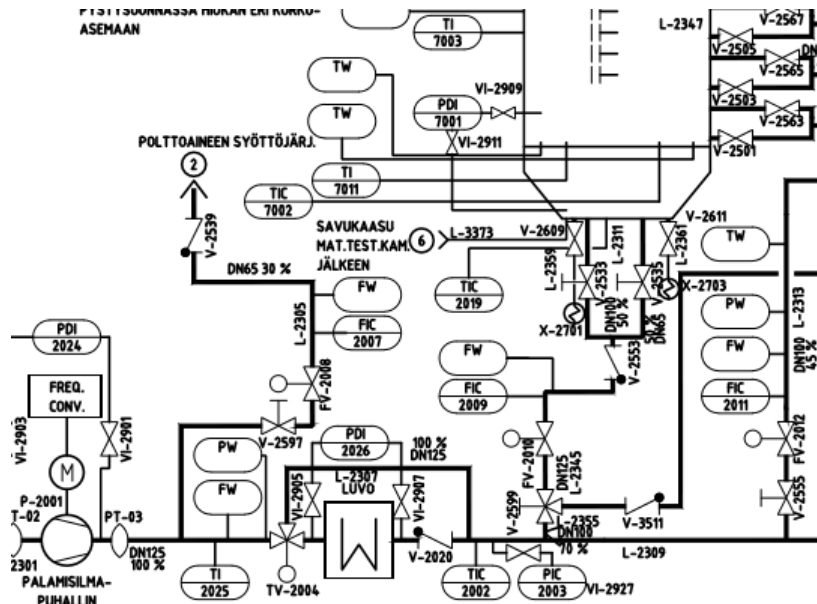
KUVAT 29 ja 30. Paloja isosta arinan ilmasuutinten päällä olleesta sintraantuneesta kappaleesta. Osa hiekasta oli sulanut.

### 6.3 Toinen polttokoe 15.12.2017

#### 6.3.1 Toimenpiteet ennen toista polttokoetta

Ennen toista polttokoetta edelsi ajanjakso, jonka aikana yritettiin leijuttaa hiekkaa kattilassa. Tulosten perusteella saatiin vahvistus arvelulle, että palamisilmalinja oli tukossa. Leijutuskoetta epäonnistui.

Primääri-ilmalinjaa purettiin ja yritettiin etsiä tukoskohtaa. Osoittautui, että palamisilmapuhaltimen jälkeinen 3-tieventtiili TV-2004 oli sellaisessa asennossa, että virtauskanava oli ummessa. TV-2004 tarkoitus on säätää palamisilman esilämmittimelle menevän ilmavirran määrää, mutta palamisilman esilämmitintä ei ole asennettu, vaan linja päättyy umpilaippaan. TV-2004 käännettiin käsin sellaiseen asentoon, että ilma virtaa ilman esilämmittimen ohituskanavaa pitkin, koska sen ohjaus logiikalta ei onnistunut.



KUVA 31. Leike leijupedin PI-kaaviosta. TV-2004 3-tieventtiili näkyy palamisilmalinjassa ennen palamisilman esilämmitintä (LUVO). (Savonia, 2015.)



KUVA 32. TV-2004 3-tieventtiili. Asennoitin käännetty käsin sellaiseen asentoon, että ilmavirta pääsee kulkemaan ilmanjakotukkiin.

Leijutuskoetta ennen pidetyssä palaverissa nousi esiin saatu tieto käytössä olleen hiekan toimivuudesta leijupetipoltossa. Päätettiin hankkia toisen laatuista hiekkaa käytettäväksi toisessa polttokoekassa. Hiekat vaihdettiin hiekkasiilon ennen toista koepoltoa.



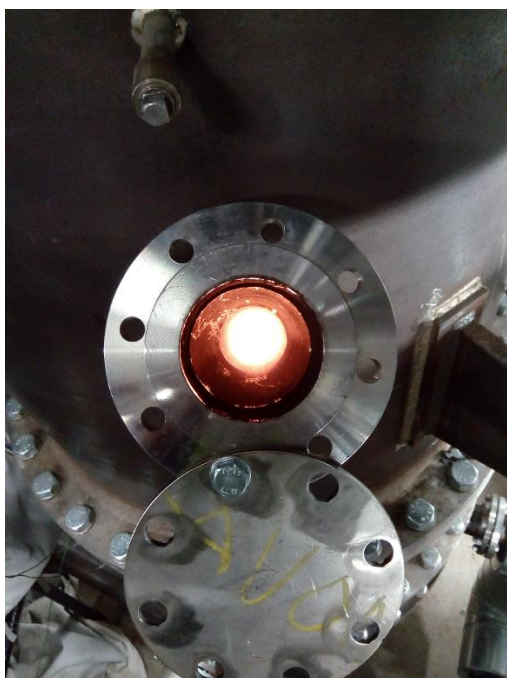
KUVA 33. Ensimmäisessä polttokoekassa käytetyn hiekan tuotepakkaus.

### 6.3.2 Kuvaus toisen polttokokeen vaiheista

Sytytystä yritetään aamulla 15.12.2017. Sytyttäminen on hankalaa. Alemman kattilakeraamit ovat erillisen mittarin mukaan noin 60 °C alkupanoksen syöttämisen alkaessa. Yritettäessä siirtyä leijutukseen, tuli sammuu 2 kertaa. Palaminen saadaan kunnolla käyntiin vasta noin kello 11. Kattilaan syötetään käsin pellettiä sulkusyöttimen läpi. Yritettäessä polttaa MDF-pölyä, se palaa räjähdysnomaisesti polttoainepudotustorven suulla ennen kuin se kerkeää hiekkapetille. Todetaan, että MDF-pölyn palamisesta syntyy paineiskuja ja riskinä on räjähdystorven kalvon puhkeaminen. Alaosan kattilakeraamit saavuttavat erillisen mittauksen mukaan n. 300 - 350 °C lämpötilan kello 15:30.

### 6.3.3 Toisen polttokokeen tulokset

15.12. koepolton aikana datankeruuohjelma ei ollut tallentamassa anturi- ja asetusarvoja. Koepoltto vahvisti jo aiemman havainnon, että Leister-puhaltimet eivät jaksa puhaltaa hiekkapatjan läpi tehokkaasti. Tämä aiheuttaa puhaltimien lämpövastuksen ylikuumenemisen ja sen sisäisen suojauksen laukeamisen. Esilämmitys oli tapahtunut yön yli pienillä tehoilla ja kattilan alkulämpö oli alhainen, mistä viitteitä antoi erillinen lämpötilamittaus kattilan alaosan keraameissa.



KUVA 34. Palamista havaittavissa näkölasisyhteestä. Kuva on otettu kello 9:12.

Sintraantumisen oli ongelmana myös toisessa polttokokeessa, vaikka hiekkalaatua oli vaihdettu. Kattilan lämpötiloista ei ole mittatietoa, koska automaation tietokone ei tallentanut anturitietoja.

#### 6.3.4 Toisen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet

Polttokoea seuranneessa palaverissa päätettiin hankkia endoskooppi, jolla kattilan sisälle pystyisi näkemään paremmin ja räjähdystorven kalvon eheys pystyttäisiin myös tarkistamaan. Syklonin laatikko puhdistettiin lentohiekasta ja tuhkasta.

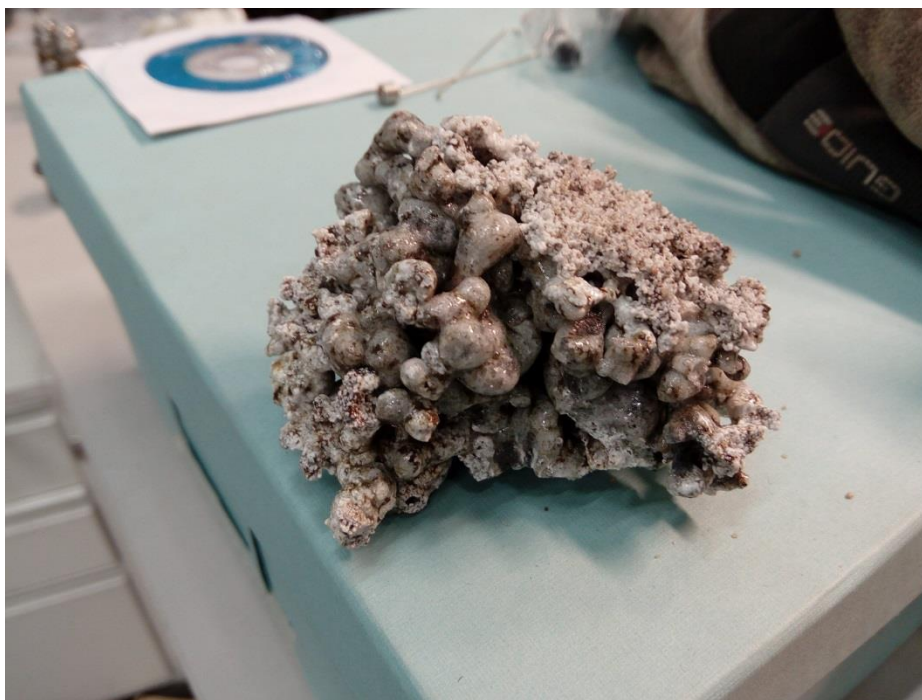


KUVA 35. Näkölasisyhteen putki. Havaittavissa tervaantumista.

Kattilan arinaa kuvattiin kännykän kameralla työntämällä putken päähän teipattu kännykkä kattilan sisään ja havaittiin sintraantunut kappale.



KUVA 36. Sintraantuneita kappaleita.

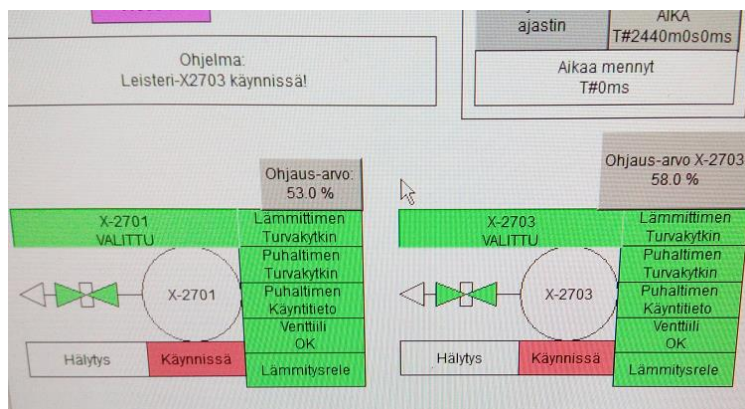


KUVA 37. Palanen sintraantumasta. Osa hiekasta lasittunut.

Kun endoskooppi saatiin, tarkastettiin räjähdystorven kalvo. Endoskoopilla ei pystynyt kunnolla näkemään kalvon eheyttä, koska kalvon edessä oli eristevillaa. Räjähdystorvessa ei ole yhdettä, mistä pääsisi tähyttämään kalvoa toiselta puolelta. Kalvoa lopulta tökittiin putkella ja todettiin ettei siinä ollut reikiä tai repeämiä havaittavissa.

Polttoainepudotustorvi tutkittiin myös endoskoopilla. Yhdeputken kohdalla oli pakkautunutta MDF-pölyä, jonka joutui työntämään putkenpätkällä pois, mutta kuvattaessa polttoainepudotustorvea ei havaittu tukkeumia. Rakenteesta johtuen polttoainepudotustorven yhdeputkien koloihin kertyy materiaalia. Leijupetikattilan petin paine-eroa mittaavan anturin yhdeputket avattiin ja niiden läpi työnnettiin metallipuikko. Tukoksia ei ilmennyt ja puikko meni kattilan palotilaan asti.

Esilämmitykseen käytettyjen Leister-puhaltimien toimintaa myös tarkasteltiin. Ne irrotettiin ja niiden toimintaa testattiin irrallaan ilmalaatikosta. Samansuuntaiset havainnot toiminnasta tehtiin myös irrallaan olevien Leister-puhaltimien suhteen. Päädyttiin eriyttämään tehoasetus automaatiassa siten, että kummallekin Leister-puhaltimelle on oma tehoasetus. Puhallin X-2701:lle noin 5 % pienempi asetus kuin X-2703:lle tuottaa suunnilleen saman lämpötilan vastukseen. Tarkemmin mittatuloksista liitteessä 3.



KUVA 38. Leisterien ohjaukset visualisoinnissa. Logiikan ohjelmaan piti lisätä yksi muuttuja lisää toiselle kuumailmapuhaltimelle ja visualisointiin tehonsäätöpainike, jolla annetaan muuttujaan kirjoitettava asetusarvo.

Tuhkanpoistoyhteen taskun koko testattiin ottamalla 3 taskullista hiekkaa ulos tuhkaoyhteestä ja punnitsemalla ne. Kaikkien kolmen näytteen painoksi saatiin 1,35 kg. Hiekka oli uutta, marraskuussa toimitetusta erästä. Aiemmin mitattu hiekkataskun koko hiekan syöttöjärjestelmän toimittamana oli 3,4 – 3,5 kg / tasku (Lännen hiekkatuote). Hiekan syötön giljotiinipeltien väliksi mitattiin 25,5 cm ja putkikooksi todettiin DN100. Tuhkanpoistoyhteen giljotiinipeltien väliksi mitattiin 16 cm ja putkikoon todettiin olevan DN80. Tämä havainto täytyy ottaa huomioon, kun hiekan poistoa suunnitellaan automaatioon.



KUVA 39. Puhtaan tuhkanpoistoyhteen kautta otetun hiekkataskun paino.

## 6.4 Kolmas polttokoe 24.1.2018

### 6.4.1 Toimenpiteet ennen kolmatta polttokoetta

Arinan pohjalle oli aiemmin pudotettu hiekkaa. Hiekkapinta oli muutama senttimetri suuttimien reikien alapuolella. Sulkusyötin tarkastettiin ja siellä oli edellisen polton jäljiltä ilmeisesti haketta.

Kattilan esilämmitys aloitettiin kuumailmapuhaltimilla noin kello 7:35 edellisenä päivänä. Puhaltimien tehoja nostettiin päivän aikana ja ne jätettiin yön yli puhaltamaan leijupetikattilan ilmalaatikkoon.



KUVA 40. Sulkusyötin ylhäältäpäin huoltoluukun kautta kuvattuna. Sulkusyöttimessä oli ilmeisesti haketta edellisen polton jäljiltä.

Aamulla 24.1.2018 kello 7:10 Leister-kuumailmapuhaltimien tehoja nostettiin. Kuumailmapuhaltimien tehoja laskettiin ja kattilaan lisättiin hiekkaa kaksi kertaa noin kello 9:27 ja 9:29. Pohjimmaisena ajatuksena oli lämmittää kattilaan lisättävää hiekkaa niin paljon kuin kuumailmapuhaltimilla mahdollista.

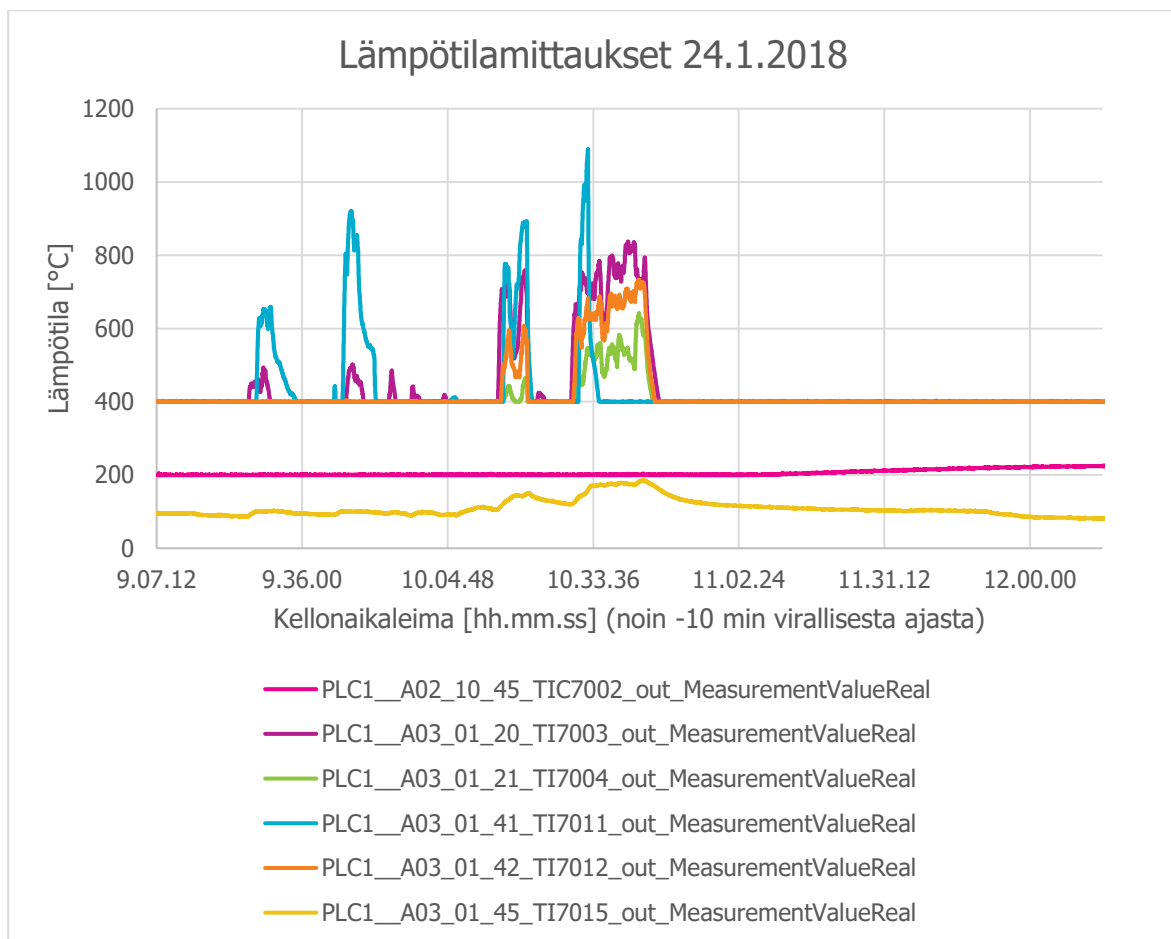
#### 6.4.2 Kuvaus kolmannen polttokokeen vaiheista

Sulkusyöttimen päällä ollut hake jumitti sulkusyöttimen. Sulkusyöttintä ajettiin edestakaisin samalla kepillä rullaa työntäen. Lopulta tukkeuma hellitti ja hakkeen ja MDF-pölyn sekoitus tippui kattilaan. Kello 9:34 liekkiä havaittavissa näkölasin kautta. Noin kello 11 koepoltto päätetään lopettaa, koska lämpötila hiekkapetissä käynyt yli 1000 °C.

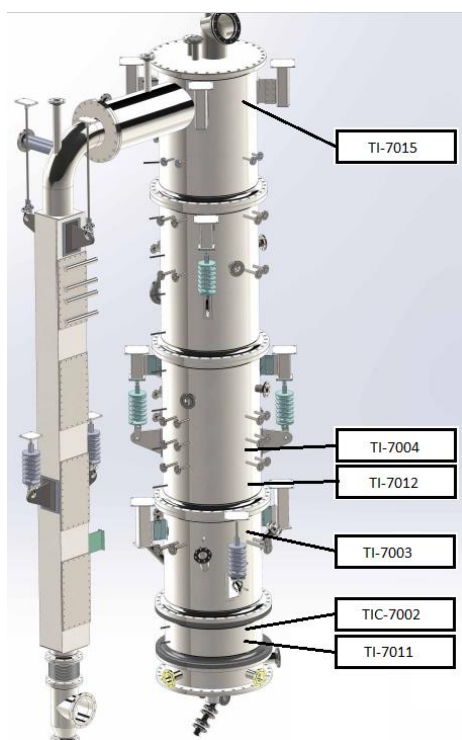
#### 6.4.3 Kolmannen polttokokeen tulokset

Kuviossa 3 on lämpöanturien mitta-arvoja. Huomion arvoista on, että TIC-7002 on kattilakeraamin sisällä. Kuvaan 41 on merkitty viitteellisesti lämpöanturien sijainti kattilassa.





KUVIO 3. Anturien mittatiedot. TIC-7002 keraamissa. Noin kello 10:42 (aikaleimalla 10:32) kattilan alaosassa oleva anturi TI-7011 näyttää 1090 °C lämpötilaa. Koe päätetään lopettaa pian tämän havainnon jälkeen.



KUVA 41. Lämpöanturien sijainnit kattilassa. TIC-7002 keraamissa (Juutilainen, 2015, 11, muokattu.)

Lämpötilamittauksista voidaan päätellä, että palaminen on epätasaista. Esimerkiksi TI-7011, joka on hiekkapetissä, mittatulos romahtaa huippuarvostaan 1090 °C noin 10 sekunnissa arvoon 701 °C. Tämä johtuneee polttoaineen syötöstä. Polttoaine ja sen haihtuva kosteus imee petin lämpöä. Kuivuttuaan ja kuumennuttuaan polttoaine lopulta syttyy ja lämpötila ampaisee ylös. Polttoainesyöttö tehtiin käsin ilman kirjanpitoa ja näin ollen syöttöannoksia ei pysty sen enempää tarkasti synkronoimaan lämpökäyriin kuin arvioimaan syötettyä polttoainemäärääkään.

Palamisen epätasaisuudesta kertoo myös näkölasien tervaantuminen, joka on havaittavissa kuvasta 42.



KUVA 42. Näkölaseihin kertyi terva-aineita.

#### 6.4.4 Kolmannen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet

Koska kattilan petilämpötila kävi yli 1000 °C lämpötilassa, pelättiin sintraantumista. Arina tarkistettiin endoskoopilla ja todettiin, että yhtään kappaletta ei jäänyt jumiin arinan suutinten päälle. Kattilasta poistetun hiekan mukana tuli pienehköjä sintraantuneita kappaleita.



KUVAT 43 ja 44. Sintraantunutta hiekkaa. Kappaleet pysyivät pieninä ja tulivat hiekan mukana ulos kattilasta tuhkanpoistoyhteen kautta.

Kattilasegmentissä a4.b olevat lämpöanturit TIC-7002 ja TI-7011 otettiin irti ja niiden paikat vaihdettiin keskenään. TIC-7002, joka oli taitettu ja keraamin sisällä, oikaistiin ja asennettiin segmentin alemman yhteen läpi palotilaan. Sen pää vietiin noin 5 cm kattilakeraamista palotilan puolelle.

## 6.5 Neljäs polttokoe 25.1.2018

### 6.5.1 Neljättä polttokoetta edeltäneet toimenpiteet

Hiekan lisäämisen jälkeen esilämmitys jätettiin yön yli päälle. 25.1.2018 kello 9:42 alaosan keraameihin sijoitettu erillinen lämpöanturi näytti 236,2 °C.

### 6.5.2 Kuvaus neljännen polttokokeen vaiheista

Kattilaan syötettiin vaihtelevia määriä pellettiä ja vähän kosteaa MDF-pölyä käsin. Lämpötilat eivät nousseet ja hiekka loppui kesken polttokokeen. Koe päätettiin iltapäivästä lopettaa tuloksettomana.

### 6.5.3 Neljännen polttokokeen tulokset

Palaminen oli vaihtelevaa. Kattilan alaosassa hiekkapetissä lämpötila jäi alle 1000 °C. Liitteessä 4 on kuvio, missä näkyy sellaisten kattilan lämpöanturien arvot, jotka nousivat yli mitta-alueen minimi lämpötilan. Jostain syystä anturi TIC-7002 lakkaa näyttämästä mitta-arvoa ajankohdassa 13:06 (virallinen aika noin 13:16). Syyksi voisi arvella leijutuksen lakkaaminen anturin kohdalla, jolloin anturi jää staattiseen hiekkapetiin. Tarkasteltaessa ilmansyötön asetuksia ja palamisilmavirtauksen asetuksia kyseisellä hetkellä, ei löydy selkeää syytä miksi anturi yhtäkkiä lakkaa näyttämästä arvoa. Liitteessä 4 on myös kuvio, missä näkyy TIC-7002:n arvot samoihin aikoihin palamisilmavirtauksen ja palamisilmavirtauksen asetusnopeuden kanssa.

#### 6.5.4 Neljännen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet

Kattila tyhjennettiin polttokokeen jälkeen ja todettiin, että hiekan seassa oli paljon palamatonta polttoainetta.



KUVA 45. Pohjatuhkayhteen kautta tyhjennetyssä kattilahiekassa oli paljon palamatonta polttoainetta seassa.

#### 6.6 Viides polttokoe 26.1.2018

##### 6.6.1 Viidettä polttokoetta edeltäneet toimenpiteet

Aamulla 26.1.2018 käytiin hakemassa lisää hiekkaa. Kattilaan ei kuitenkaan täytetty kuin pohjahiekka suutinten tasalle. Poltto tapahtui ilman hiekkapatjan leijutusta pohjahiekan päällä.

##### 6.6.2 Kuvaus viidennen polttokokeen vaiheista

Syttyminen saadaan kunnolla aikaiseksi noin kello 10:48. Palaminen on vaihtelevaa. Polttoainetta syötetään myös siilosta ruuvipurkaimella. Noin kello 12:20 todettiin, että MDF-pölyä oli jumiutunut polttoainevälisiiloon.



KUVA 46. Polttoainevälisiilon huoltoluukku. Lievää pakkaantumista havaittavissa.

MDF-pölyä poltetaan kattilassa myöhäiseen iltaan asti hävitystarkoituksessa.

### 6.6.3 Viidennen polttokokeen tulokset

Polton aikainen teho jää pieneksi ja kattilan ylimmän segmentin lämmöt jäävät alhaiseksi. Liitteessä 5 on kuvio, missä on lämpötilakäyrät kattilan alaosaan ja yläosaan. Jostain tuntemattomasta syystä python-ohjelma on lakannut tallentamasta instrumentoinnin asetus- ja mitta-arvoja noin kello 19:18. On mahdollista, että ohjelmakoodiin on unohtunut syklimäärä, joka on katkaissut ohjelman ajamisen.

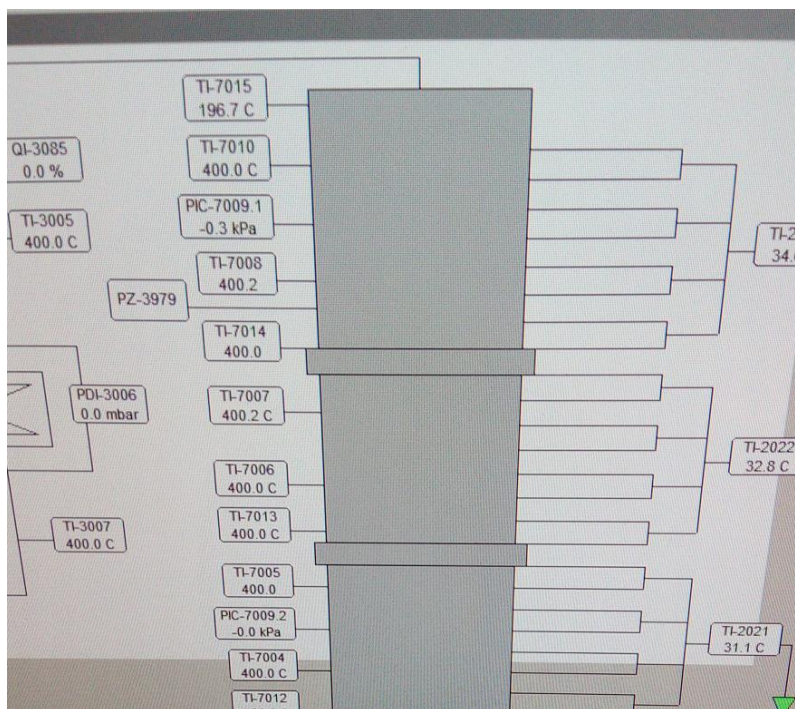
### 6.6.4 Viidennen polttokokeen jälkeiset toimenpiteet

29.1.2018 kello 7:26 maanantaina lämpötilat tarkastettiin. Viikonlopun jäljiltä kattilan alempaan osaan asennettu erillinen lämpötilamittaus näyttää arvoa 91,7 °C.



KUVA 47. Erillinen lämpötilamittaus kattilakeraamissa segmentissä a4.b.

Kattilan yläosassa lämpötilan voidaan samoihin aikoihin todeta olevan vielä 196,7 °C.



KUVA 48. Valvomokoneen visualisoinnissa kattilan yläosa. Lämpöanturi antaa lukemaksi 196,7 °C.

Leijupetikattila tyhjenetään. Havaitaan, että pohjatuhkan ja -hiekan mukana tulee jonkin verran palamatonta polttoainetta.



KUVA 49. Pohjahiekan seassa tuli jonkin verran palamatonta polttoainetta.



KUVA 50. Sintraantunutta hiiltä ja hiekkaa.

Arinan suutinten päälle jäi paakku sintraantunutta materiaalia. Se oli mahdollista hajottaa pienemmiksi palasiksi lyömällä niitä kevyesti avaimella ja ne tulivat lopulta tuhkayhteestä ulos. Sintraantuneet kappaleet olivat hauraita.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön puitteissa suoritettujen polttokokeiden tuloksista voidaan havaita, että hankitulla teollisuuskuumailmapuhaltimiin perustuvalla esilämmitysjärjestelmällä ei pysty saavuttamaan 500 °C lämpötilaa hiekkapetissä sen alitehoisuuden vuoksi. Loppu lämmitys pitää tehdä polttamalla kuivaa polttoainetta, kuten esim. pellettiä. Havainnot tukevat aiempia havaintoja (Kukkonen, 2017, 61).

Polttoaineensyöttöruuvit välisiilossa on ylimitoitettu. Polttoainetta myös romahtaa ruuvien asennosta ja polttoaineen koostumuksesta riippuen suuriakin määriä kerralla sulkusyöttöimeen, joka aiheuttaa varsinkin märällä polttoaineella heiluntaa. Opinnäytetyön aikana tehtynä viidessä polttokokeessa hiekkaa oli kattilan leijukerroksessa hyvin vähän. Neljännessä polttokokeessa hiekka loppui kesken ja viidennessä polttokokeessa ei ollut ilmasuutinten yläpuolella yhtään hiekkaa. Petilämmön rajua heittäly johtui liian pienestä petin lämpökapasiteetista, joka todennettiin opinnäytetyön jälkeisten lisäkoeajopäivien aikana.

Havaituista puutteista opinnäytetyön aikana saatiin korjattua savukaasukanavan letkusuoitimen 3-tieventtiilien ohjaus. Happianturi konfiguroitiin näyttämään oikeita parametreja. Näkölasit asennettiin kahteen alempaan näkölasiyhteeseen. Kattilan päällä olevan yhteen muokkaaminen ja näkölasin asentaminen jäi tekemättä. Kattilan esilämmitykseen käytettävien kuumailmapuhaltimien toimintaa testattiin ja niiden ohjausta muutettiin, jotta kummankin puhaltimen lämmitysvastusten lämmöt saatiin pysymään samalla tasolla ja lämpösuojan laukeaminen vältettyä lämmityksen aikana. Häätäjähdytysilmapuhallin saatiin myös pyörimään valvomon koneelta ohjattuna.

### 7.1 Opinnäytetyön jälkeen tehdyt muutokset kattilaan ja 5.4.2018 suoritettu polttokoe

Opinnäytetyön viiden koepolttopäivän jälkeen helmikuussa 2018 leijupetikattilaan tehtiin muunnostyö, jossa kattilan hiekkatilan halkaisijaa laajennettiin 470 mm:iin arinan alueelta. Polttoainerorven paineilmaputkille tuotiin letkulla paineilma ja leijukerroksen paine-eroa mittaava PDI-7001:n alempi impulssiputki siirrettiin ilmalaatikkoon. Tämä vakautti leijupetin paine-eromittauksen, joka aiemmin heilui. Leijupetin kohdalla oleville lämpöantureille asennettiin suojaputkitus kattilan palotilaan asti, sillä alkuperäiset palotilassa "roikkuvat" anturit kokivat vaurioita hiekan sintraantumisen yhteydessä. Leijukerroksen toiminta on näkölasista todettu toimivaksi. Polttoainepudotustorven lämpötilamittaus TIC-4028 on näyttänyt kattilan ollessa normaalilämmöissä noin 75 °C. (Opinnäytetyö 2018-04-23 - 2018-04-27.) Petilämpötilaa mittaavat TIC-7002 ja TI-7011 lämpöanturit hajosivat sintraantuvan hiekan tarttuessa niiden ympärille ja taivuttavan niitä painollaan liikaa. Kyseiset anturit korvattiin myöhemmissä koeajoissa TI-3005 ja TI-7005 antureilla (Huttunen 2018-04-29).

Kattilan käynnistystapaa ja huoltotoimenpiteitä on myös muutettu opinnäytetyön jälkeen. Kattilan ilmalaatikko lasketaan polton jälkeen aina alas ja arina tarkistetaan sintraantumien varalta. Esilämmitys tehdään siten, että hiekkaa on vain arinan pohjalla, jotta leister-puhaltimet pystyvät tehokkaasti puhaltamaan suuttimista leijupetikattilan sisälle. Polttoainetta aletaan syöttämään suutinten



päälle ja hiekkaa lisätään mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Aika-ajoin primääri-ilmaa puhalletaan hieman kovempaa, jotta peti sekoittuu kunnolla. Ilmaa puhalletaan reippaammin kattilaan, kuin mitä opinnäytetyön viidessä koepoltossa. Petilämmöt saadaan tehokkaasti alas lisäämällä hiekkaa. Sintraantumisen ei ole ongelma, kun petihiekkaa vaihdetaan ja alkalipitoisuus petissä pysyy riittävän alhaisena. Mahdollinen käsin syötetty polttoaine punnitaan vaa'alla 50 g tarkkuudella ja kirjataan ylös. (Opinnäytetyö 2018-04-23 - 2018-04-27.)

5.4.2018 suoritettussa polttokokeessa poltettiin onnistuneesti MDF-pölyn ja kuorilietteen sekoitusta. Hiekkapetin lämpötila ei heilahdellut tai karannut liian kuumaksi kuten opinnäytetyön puitteissa tehdyissä poltoissa. Polttoaineen keskimääräinen kosteus oli noin 40 p-%. Petihiekan leijuminen ei tapahtunut koko leveydellä vaan arviolta 350 – 400 mm:n halkaisijalla. Tämä puute on korjattu 5.4.2018 koepolton jälkeen muuttamalla arinan suutinten reikiä, jotta ilma ohjautuisi paremmin palotilan reunoille. Jäännöshappianturi QI-3085 saatiin näyttämään mitta-arvoa savukaasujen ja kattilan lämpöjen kohottua tarpeeksi. (Opinnäytetyö 2018-04-23 - 2018-04-27.) Leijupetissä oli koepolton aikana 105,9 kg hiekkaa (Huttunen 2018-04-30), kun opinnäytetyön koeajopäivien aikana hiekkaa oli parhaimmillaan 40 – 60 kg. Koepolton aikaisesta datasta verrokkilämpökäyriä liitteessä 7. Huomion arvoista on kuten aiemmin todettiin, TI-7005 mittaa tässä polttokokeessa leijupetin lämpötilaa. TI-3005 ei ollut python -ohjelman käyttämällä tallennettavien anturien ja asetusten listalla.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

ALAKANGAS, Eija, HURSKAINEN, Markus, LAATIKAINEN-LUNTAMA, Jaana ja KORHONEN, Jaana 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. [Noudettu 2018-01-23.] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

HUHTINEN, Markku, KETTUNEN, Arto, NURMINEN, Pasi ja PAKKANEN, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.

HUHTINEN, Markku, KORHONEN, Risto, PIMIÄ, Tuomo, URPALAINEN, Samu 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

HUTTUNEN, Jukka 2018-04-29. Oma testiajo / data [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Mika Virtala. Saatavissa: Varkaus: JH:n kokoelmat.

HUTTUNEN, Jukka 2018-04-30. Eilen lähetetystä datasta [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja Mika Virtala. Saatavissa: Varkaus: JH:n kokoelmat.

JUUTILAINEN, Olli 2015. Tutkimusleijupetikattilan suunnittelu, kilpailutus ja käyttöönotto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-10-31] Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen\\_Olli.pdf](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen_Olli.pdf)

KHAN, A.A., DE JONG, W., JANSENS, P.J. ja SPLIETHOFF H. 2008. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology. Volume 90, Issue 1, January 2009, Pages 21-50. [Viitattu: 22.1.2018.] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008001963>

KUKKONEN, Ville 2017. Haastavien polttoaineiden palaminen pienen kokoluokan kattiloissa. Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2018-03-19] Saatavissa: [http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/143259/Diplomity%C3%B6\\_Ville\\_Kukkonen.pdf](http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/143259/Diplomity%C3%B6_Ville_Kukkonen.pdf)

LAHTI, Niko 2017. Ammoniakinsyöttöjärjestelmä leijupetikattilaan. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 9.10.2017] Saatavissa: [https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/131996/Lahti\\_Niko.pdf](https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/131996/Lahti_Niko.pdf)

LYSINEN, Jenna 2014. Energiatutkimushallin laitteistojen hankinnan ja asennustöiden vaiheistaminen sekä valvonta ja ongelma-kohtien kartoitus. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-09-29] Saatavissa: [http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/84724/Jenna\\_Lysin.pdf](http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/84724/Jenna_Lysin.pdf)

OPINNÄYTETYÖ 2018-04-23 – 2018-04-27. [oppilaan ja ohjaajien sähköpostikeskustelu.] Saatavissa: Varkaus: JH:n kokoelmat.

PIIROINEN, Markus 2017. Polttoaineensyöttölaitteiston käyttöönotto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-10-31] Saatavissa: [http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/123879/Piironen\\_Markus.pdf](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/123879/Piironen_Markus.pdf)

RÄIHÄ, Joonas 2017. Kaasuanturien käyttöönotto energiatutkimuskeskuksessa. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2017-10-11.] Saatavissa: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/122960/Raiha\\_Joonas.pdf](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/122960/Raiha_Joonas.pdf)

SAVONIA 2015. PI-kaaviot koottu. [PDF - tiedosto]. [Viitattu 2017-09-07]. Sijainti: Savonia-ammattikorkeakoulu. Intranet.

SAVONIA, Polttoainetestaus. Verkkosivu. [Viitattu 2017-09-29] Saatavissa: <http://energiatutkimus.savonia.fi/index.php/palvelut/polttoainetestaus>

SAVONIA, Tilat ja laitteet. Verkkosivu. [Viitattu 2017-09-29] Saatavissa: <http://energiatutkimus.savonia.fi/index.php/tilat-ja-laitteet>

SKRIFVARS, Bengt-Johan, HUPA, Mikko 2002. Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa Raikko, Risto, Saastamoinen, Jaakko, Hupa, Mikko, Kurki-Suonio, Ilmari (toim.). *Poltto ja palaminen*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy, 269-299.

TUKIAINEN, Kirsi 2014-08-13. Energiatutkimushalli on noussut kesän aikana [verkkoaineisto]. Energiatutkimuskeskusta luomassa. [Viitattu 2017-09-29.] Saatavissa: <https://uusiutuvaenergia.savonia.fi/blogi/79-energiatutkimushalli-on-noussut-kesan-aikana>

## LIITE 1: LAADITTU TARKISTUSLISTA KOEPOLTTOA VARTEN

järjestelmä	tun- nus	posi- tio	laitekuvaus	ok
Apu	V	5508	kalkkisiilon giljotiinipelti	
Apu	V	5509	kalkkisiilon giljotiinipelti	
Apu	V	5510	hiekkasiilon giljotiinipelti	
Apu	V	5511	hiekkasiilon giljotiinipelti	
Apu	HS	8012	kalkkisiilon paineilmapuhallus	
Apu	HS	6006	kalkkisiilon paineilmapuhallus	
Apu	HS	6002	hiekkasiilon paineilmapuhallus	
Apu	HS	6003	hiekkasiilon paineilmapuhallus	
Apu	HS	6004	kalkki- ja hiekkasiilon pudotustorven puhallus	
Apu	V	5505	tuhkanpoistoyhteen giljotiinipelti	
Apu	V	5507	tuhkanpoistoyhteen giljotiinipelti	
Apu	QI	3085	jäännöshappianturi	
Apu	WS	8011	kalkkisiilon puntari	
Apu	WS	6001	hiekkasiilon puntari	
Apu	TI	9003	ULKOILMAN LÄMPÖTILA	
Apu	TI	9002	HALLIN LÄMPÖTILA	
Palamisilma	P	2001	Palamisilmapuhallin	
Palamisilma	P	3003	Kiertokaasupuhallin	
Palamisilma	FIC	2009	Prim.ilma virtausmittaus	
Palamisilma	FIC	2011	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 1 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	2013	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 2 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	2015	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 3 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	2017	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 4 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3014	KIERTOKAASU ARINALLE VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3016	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 1 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3018	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 2 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3020	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 3 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3022	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 4 VIRTAUS	
Palamisilma	FIC	3061	KIERTOKAASU POLTTOAINEENSYÖTTÖÖN	
Palamisilma	FV	3015	KIERTOKAASU ARINALLE HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	3017	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 1 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	3019	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 2 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	3021	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 3 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	3023	KIERTOKAASU SEK.ILMATASOLLE 4 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	3060	KIERTOKAASU POLTTOAINEENSYÖTTÖÖN HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	2008	PALAMISILMA POLTTOAINEEN SYÖTTÖJÄRJ. SÄÄTÖV.	
Palamisilma	FV	2010	PALAMISILMA ARINALLE SÄÄTÖV.	
Palamisilma	FV	2012	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 1 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	2014	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 2 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	FV	2016	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 3 HIENOSÄÄTÖ	

Palamisilma	FV	2018	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 4 HIENOSÄÄTÖ	
Palamisilma	P	3003	kiertokaasupuhallin	
Palamisilma	PIC	2003	PALAMIS-ILMAN PAINE	
Palamisilma	TIC	2002	PALAMIS-ILMAN LÄMPÖTILA LUVON JÄLKEEN	
Palamisilma	TI	2020	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 1 LÄMPÖTILA	
Palamisilma	TI	2021	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 2 LÄMPÖTILA	
Palamisilma	TI	2022	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 3 LÄMPÖTILA	
Palamisilma	TI	2023	PALAMISILMA SEK.ILMATASOLLE 4 LÄMPÖTILA	
Palamisilma	TI	3031	KIERTOKAASUN LÄMPÖTILA ENNEN KIERTOK.PUH.	
PA-syöttö	C	4017	Siilon purkain kontti 2	
PA-syöttö	C	4015	Kolakuljetin	
PA-syöttö	C	4001	Siilon purkain kontti 1	
PA-syöttö	C	4019	POLTTOAINEKONTIN 1 REPIJÄRULLAN MOOTTORI	
PA-syöttö	C	4023	POLTTOAINEKONTIN 2 REPIJÄRULLAN MOOTTORI	
PA-syöttö	C	8010	Välisiilo sekoitus	
PA-syöttö	C	4005	Sulkusyötin	
PA-syöttö	C	8009	Välisiilon ruuvipurkain	
PA-syöttö	TI	4028	PA-pudotustorven lämpötila-anturi	
PA-syöttö	TZ	4027	Takapalotermostaatti	
PA-syöttö	HS	4025	PA-pudotustorven paineilmapuhallus	
PA-syöttö	WS	4009	Välisiilon punnitusanturi	
PA-syöttö	WS	8014	Kontin 1 punnitus	
PA-syöttö	WS	8016	Kontin 2 punnitus	
Savukaasu	FI	3067	SAVUKAASUN VIRTAUS ENNEN PIIPPUA	
Savukaasu	HV	3038	SAVUKAASUPELTI VESIKATTILALTA SÄÄTÖPELTI	
Savukaasu	HV	3039	SAVUKAASUPELTI LEIJUPETIKATTILALTA, VESIKATTILAN OHITUS, SÄÄTÖ-PELTI	
Savukaasu	HV	3041	SAVUKAASUPELTI LEIJUPETIKATTILALTA, VESIKATTILAN OHITUS, SÄÄTÖ-PELTI	
Savukaasu	HV	3040	SAVUKAASUPELTI LEIJUPETIKATTILALTA, ARINAN LÄMMITYS, SÄÄTÖPELTI	
Savukaasu	HV	3042	SAVUKAASUPELTI LEIJUPETIKATTILALTA, ARINAN LÄMMITYS, SÄÄTÖPELTI	
Savukaasu	HV	3042	???	
Savukaasu	HV	3072	SAVUKAASUPELTILEIJUPETIKATTILALTA	
Savukaasu	HV	3074	SAVUKAASUPELTI SAVUKAASUKIERROLLE	
Savukaasu	HV	3076	SAVUKAASUPELTI LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILALTA	
Savukaasu	HV	3078	SAVUKAASUPELTI SAVUKAASUKIERROLLE	
Savukaasu	HV	3080	SAVUKAASUPELTI ENNEN PIIPPUA	
Savukaasu	HV	3082	SAVUKAASUPELTI SAVUKAASUN JAOLLE ENNEN PIIPPUA	
Savukaasu	HV	3084	SAVUKAASUPELTI ENNEN SAVUKAASUPUHALLINTA	
Savukaasu	HV	3086	SAVUKAASUPELTI SAVUKAASUPUHALTIMEN JÄLKEEN	
Savukaasu	HV	3068	SAVUKAASUPELTI ENNEN SÄHKÖSUODINTA	
Savukaasu	HV	3069	SAVUKAASUPELTI SÄHKÖSUODATTIMEN JÄLKEEN	
Savukaasu	HV	3070	SAVUKAASUPELTI ENNEN LETKUSUODATINTA	
Savukaasu	HV	3071	SAVUKAASUPELTI LETKUSUODATTIMEN JÄLKEEN	

Savukaasu	P	3004	hätäjäähdytysilmapuhallin	
Savukaasu	HV	3529	materiaalitestauskammioista?	
Savukaasu	PDI	3024	materiaalitestauskammion paine-ero	
Savukaasu	PDI	3064	Paine-ero sähkösuodin	
Savukaasu	PDI	3065	paine-ero letkusuodin	
Savukaasu	TI	3013	SAVUKAASUN LÄMPÖTILA KATTILAN JÄLKEEN	
Savukaasu	TI	3026	SAVUKAASUN LÄMPÖTILA SUODATTIMIEN JÄLKEEN	
Savukaasu	TIS	3036	SAVUKAASUN LÄMPÖTILA SÄHKÖSUODATTIMEN JÄLKEEN	
Savukaasu	TIS	3063	SAVUKAASUN LÄMPÖTILA ENNEN SUODATTIMIA	
Vesipiirit	P	1021	JÄTELÄMPÖKATTILAN KIERTOYESIPUMPPU 1	
Vesipiirit	P	1022	JÄTELÄMPÖKATTILAN KIERTOYESIPUMPPU 2	
Vesipiirit	P	1007	Kiertovesipumppu	
Vesipiirit	P	1009	GLYKOLIPIIRIN PUMPPU	
Vesipiirit	QI	3987	FI3987.3, TIC3987.2, TIC3987.1 (jätelämpökattilalta)	
Vesipiirit	QI	10003	FI1034, TI1031, TI1032 (varaajaan)	
Vesipiirit	QI	10000	FI1004, TIC1005, TI1006 (lämmönsiirtimeen)	
Vesipiirit	QI	10001	FI1010, TIC1011, TI1012 (radiaattorille)	

## LIITE 2: PYTHONOHJELMAN TALLENNETTAVIEN MUUTTUJIEN LISTA

Alla lista automaation muuttujista, mitkä ohjelmallisesti tallennettiin noin sekunnin aikavälillä. Ohjelmakoodiin on asetettu sekunnin odotusaika. Ohjelman pyöriminen kuitenkin hieman viivästyttää tallennusta, jolloin intervalli on hieman yli sekunnin. Python-koodi oli valmiina ja siihen tehtiin vain muutoksia kohdetiedostonimen ja muuttujalistauksen osalta. Pyöriessään ohjelma kirjoittaa joka kierroksella muuttujat tiedoston loppuun. Tällä toimenpiteellä varmistetaan, että jos palvelinkone kaatuu, kaikkea dataa ei menetetä.

20171108\_Tags.txt:

PLC1.P3004.ACTSPD  
PLC1.P2001.ACTSPD  
PLC1.P3001.ACTSPD  
PLC1..A01\_01\_20\_V2609\_open  
PLC1..A01\_01\_21\_V2609\_closed  
PLC1..A01\_01\_22\_V2611\_open  
PLC1..A01\_01\_23\_V2611\_closed  
PLC1..A01\_01\_42\_HV3038\_open  
PLC1..A01\_01\_43\_HV3038\_closed  
PLC1..A01\_02\_10\_HV3068\_open  
PLC1..A01\_02\_11\_HV3068\_closed  
PLC1..A01\_02\_12\_HV3069\_open  
PLC1..A01\_02\_13\_HV3069\_closed  
PLC1..A01\_02\_14\_HV3070\_open  
PLC1..A01\_02\_15\_HV3070\_closed  
PLC1..A01\_02\_16\_HV3071\_open  
PLC1..A01\_02\_17\_HV3071\_closed  
PLC1..A01\_02\_20\_HV3072\_open  
PLC1..A01\_02\_21\_HV3072\_closed  
PLC1..A01\_02\_22\_HV3074\_open  
PLC1..A01\_02\_23\_HV3074\_closed  
PLC1..A01\_02\_24\_HV3076\_open  
PLC1..A01\_02\_25\_HV3076\_closed  
PLC1..A01\_02\_26\_HV3078\_open  
PLC1..A01\_02\_27\_HV3078\_closed  
PLC1..A01\_02\_30\_HV3080\_open  
PLC1..A01\_02\_31\_HV3080\_closed  
PLC1..A01\_02\_32\_R001\_alarm  
PLC1..A01\_02\_33\_R001\_freqconv\_passed  
PLC1..A01\_02\_42\_L4635\_1\_rearlimit  
PLC1..A01\_02\_43\_L4635\_2\_frontlimit

PLC1..A01\_02\_44\_LS8450\_lowlimit  
PLC1..A01\_02\_45\_LS8451\_highlimit  
PLC1..A01\_03\_10\_HV3082\_open  
PLC1..A01\_03\_11\_HV3082\_closed  
PLC1..A01\_03\_12\_HV3084\_open  
PLC1..A01\_03\_13\_HV3084\_closed  
PLC1..A01\_03\_14\_HV3086\_open  
PLC1..A01\_03\_15\_HV3086\_closed  
PLC1..A01\_03\_16\_V3523\_open  
PLC1..A01\_03\_17\_V3523\_closed  
PLC1..A01\_03\_20\_V3525\_open  
PLC1..A01\_03\_21\_V3525\_closed  
PLC1..A01\_03\_22\_V3527\_open  
PLC1..A01\_03\_23\_V3527\_closed  
PLC1..A01\_03\_24\_V3529\_open  
PLC1..A01\_03\_25\_V3529\_closed  
PLC1..A01\_03\_26\_V3531\_open  
PLC1..A01\_03\_27\_V3531\_closed  
PLC1..A01\_04\_33\_GS4011\_digital  
PLC1..A01\_06\_10\_HS4026\_manual  
PLC1..A01\_06\_11\_HS4026\_auto  
PLC1..A01\_06\_12\_V5505\_open  
PLC1..A01\_06\_13\_V5505\_closed  
PLC1..A01\_06\_14\_V5505\_auto  
PLC1..A01\_06\_15\_V5505\_manualopen  
PLC1..A01\_06\_16\_V5507\_open  
PLC1..A01\_06\_17\_V5507\_closed  
PLC1..A01\_06\_20\_V5507\_manualopen  
PLC1..A01\_06\_21\_V5508\_open  
PLC1..A01\_06\_22\_V5508\_closed  
PLC1..A01\_06\_23\_V5508\_auto  
PLC1..A01\_06\_24\_V5508\_manualopen  
PLC1..A01\_06\_25\_V5509\_open  
PLC1..A01\_06\_26\_V5509\_closed  
PLC1..A01\_06\_27\_V5509\_manualopen  
PLC1..A01\_06\_30\_V5510\_open  
PLC1..A01\_06\_31\_V5510\_closed  
PLC1..A01\_06\_32\_V5510\_auto  
PLC1..A01\_06\_33\_V5510\_manualopen  
PLC1..A01\_06\_34\_V5511\_open  
PLC1..A01\_06\_35\_V5511\_closed  
PLC1..A01\_06\_36\_V5511\_manualopen



PLC1..A01\_06\_41\_P8001\_safety  
PLC1..A01\_06\_44\_C8009\_safety  
PLC1..A01\_06\_45\_C8009\_auto  
PLC1..A01\_07\_10\_C8009\_forward  
PLC1..A01\_07\_11\_C8009\_backward  
PLC1..A01\_07\_13\_C8010\_preok  
PLC1..A01\_07\_14\_C8010\_safety  
PLC1..A01\_07\_15\_C8010\_forward  
PLC1..A01\_07\_16\_C8010\_backward  
PLC1..A01\_07\_17\_X9001\_startready  
PLC1..A01\_07\_20\_X9010\_startready  
PLC1..A01\_07\_21\_X9010\_position  
PLC1..A01\_07\_22\_P10005\_safety  
PLC1..A01\_07\_23\_P10006\_safety  
PLC1..A01\_07\_24\_P10007\_safety  
PLC1..A01\_07\_25\_P10008\_error  
PLC1..A01\_07\_26\_P10009\_on  
PLC1..A01\_07\_27\_P10009\_safety  
PLC1..A01\_07\_30\_elecboiler\_error  
PLC1..A01\_07\_31\_elecboiler\_startready  
PLC1..A01\_07\_32\_TV1024\_open  
PLC1..A01\_07\_33\_TV1024\_closed  
PLC1..A01\_07\_34\_TV1030\_open  
PLC1..A01\_07\_35\_TV1030\_closed  
PLC1..A01\_07\_36\_FV8006\_open  
PLC1..A01\_07\_37\_FV8006\_closed  
PLC1..A01\_07\_40\_FV8008\_open  
PLC1..A01\_07\_41\_FV8008\_closed  
PLC1..A01\_07\_42\_TV2004\_open  
PLC1..A01\_07\_43\_TV2004\_closed  
PLC1..A01\_08\_10\_TV1719\_control  
PLC1..A01\_08\_11\_TV2004\_open  
PLC1..A01\_08\_12\_TV2004\_closed  
PLC1..A01\_08\_13\_X2701\_heater\_startok  
PLC1..A01\_08\_15\_X2703\_heater\_startok  
PLC1..A01\_08\_20\_HV3068\_control  
PLC1..A01\_08\_21\_HV3069\_control  
PLC1..A01\_08\_22\_HV3070\_control  
PLC1..A01\_08\_23\_HV3071\_control  
PLC1..A01\_08\_24\_HV3072\_control  
PLC1..A01\_08\_34\_V3523\_control  
PLC1..A01\_08\_35\_V3525\_control

PLC1..A01\_08\_36\_V3527\_control  
PLC1..A01\_08\_40\_V3531\_control  
PLC1..A01\_08\_41\_X3967\_startok  
PLC1..A01\_08\_42\_C4001\_hydraulicson  
PLC1..A01\_08\_43\_C4001\_freevalve  
PLC1..A01\_08\_44\_C4001\_forward  
PLC1..A01\_08\_46\_R001\_onoff  
PLC1..A01\_09\_16\_C4019\_startok  
PLC1..A01\_09\_17\_C4023\_startok  
PLC1..A01\_09\_20\_HS4025\_valve  
PLC1..A01\_09\_21\_V5505\_control  
PLC1..A01\_09\_22\_V5507\_control  
PLC1..A01\_09\_23\_V5508\_control  
PLC1..A01\_09\_24\_V5509\_control  
PLC1..A01\_09\_25\_V5510\_control  
PLC1..A01\_09\_26\_V5511\_control  
PLC1..A01\_09\_27\_HS6002\_valve  
PLC1..A01\_09\_30\_HS6003\_valve  
PLC1..A01\_09\_31\_HS6004\_valve  
PLC1..A01\_09\_32\_HS6005\_valve  
PLC1..A01\_09\_33\_HS6006\_valve  
PLC1..A01\_09\_34\_HS6007\_valve  
PLC1..A01\_09\_36\_C8010\_startok  
PLC1..A01\_09\_37\_HS8012\_valve  
PLC1..A01\_09\_40\_X9001\_startok  
PLC1..A01\_09\_41\_X9010\_startok  
PLC1..A01\_09\_42\_P10006\_startok  
PLC1..A01\_09\_44\_P10009\_control  
PLC1..A02\_01\_20\_FI1004\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_21\_TIC1005\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_22\_TIC1006\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_23\_PI1008\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_24\_FI1010\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_25\_TIC1011\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_26\_TI1012\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_27\_PI1013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_40\_TI1014\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_41\_TV1015\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_42\_TI1016\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_43\_TI1017\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_44\_TV1018\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_01\_45\_TI1019\_out.MeasurementValueReal

PLC1..A02\_02\_20\_TI1020\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_22\_TV1024\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_23\_TI1025\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_24\_TI1026\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_25\_PI1027\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_40\_TV1030\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_41\_TI1031\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_42\_TI1032\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_43\_PI1033\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_44\_FI1034\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_02\_45\_TIC1035\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_20\_TI1036\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_21\_TI1037\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_22\_TI1038\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_23\_TI1039\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_24\_PI1040\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_25\_LI1041\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_03\_42\_TI1049\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_21\_TI1704\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_22\_TI1705\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_23\_TV1706\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_24\_TV1707\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_25\_TI1708\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_26\_TI1709\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_27\_TI1710\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_40\_TV1711\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_41\_TV1712\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_42\_TI1713\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_43\_PIZA1714\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_44\_TIC1715\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_04\_45\_TI1716\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_20\_TI1717\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_21\_TI1718\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_22\_TIC2002\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_23\_PIC2003\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_24\_TV2004\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_25\_FIC2005\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_05\_26\_FIC2007\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV2008\_VAL  
PLC1..A02\_05\_40\_FIC2009\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV2010\_VAL  
PLC1..A02\_05\_42\_FIC2011\_out.MeasurementValueReal

PLC1..FV2012\_VAL  
PLC1..A02\_05\_44\_FIC2013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV2014\_VAL  
PLC1..A02\_05\_46\_FIC2015\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV2016\_VAL  
PLC1..A02\_06\_21\_FIC2017\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV2018\_VAL  
PLC1..A02\_06\_23\_TIC2019\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_24\_TI2020\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_25\_TI2021\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_26\_TI2022\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_27\_TI2023\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_40\_PDI2024\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_41\_TI2025\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_42\_PDI2026\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_06\_43\_QI3085\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_20\_PDI3006\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_21\_TI3007\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_22\_TI3008\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_23\_TI3009\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_24\_PDI3010\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_25\_PDI3011\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_26\_PDI3012\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_27\_TI3013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_07\_40\_FIC3014\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3015\_VAL  
PLC1..A02\_07\_42\_FIC3016\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3017\_VAL  
PLC1..A02\_07\_44\_FIC3018\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3019\_VAL  
PLC1..A02\_07\_46\_FIC3020\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3021\_VAL  
PLC1..A02\_08\_21\_FIC3022\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3023\_VAL  
PLC1..A02\_08\_23\_PDI3024\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_24\_TI3025\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_25\_TI3026\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_26\_PDI3027\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_27\_PDI3028\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_40\_TI3031\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_41\_PDI3032\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_42\_PIC3033\_out.MeasurementValueReal

PLC1..A02\_08\_43\_TIS3036\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_45\_HV3039\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_46\_HV3040\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_08\_47\_HV3041\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_20\_HV3042\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_21\_TIC3059\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..FV3060\_VAL  
PLC1..A02\_09\_23\_FIC3061\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_24\_QI3062\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_25\_TIS3063\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_26\_PDI3064\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_27\_PDI3065\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_40\_PDI3066\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_09\_41\_FI3067\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_20\_V3807\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_21\_V3809\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_22\_V3811\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_23\_WS4009\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_24\_TIS4012\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_25\_TI4013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_26\_PI4014\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_27\_TI4021\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_40\_PI4022\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_41\_TIC4028\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_42\_TI5003\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_43\_WS6001\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_44\_PDI7001\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A02\_10\_45\_TIC7002\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_20\_TI7003\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_21\_TI7004\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_22\_TI7005\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_23\_TI7006\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_24\_TI7007\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_25\_TI7008\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_26\_PIC7009\_1\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_27\_PIC7009\_2\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_40\_TI7010\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_41\_TI7011\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_42\_TI7012\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_43\_TI7013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_44\_TI7014\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_01\_45\_TI7015\_out.MeasurementValueReal

PLC1..A03\_01\_46\_FIC8004\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_20\_FIC8005\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_21\_FV8006\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_22\_PI8007\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_23\_FV8008\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_24\_WS8011\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_25\_PI8013\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_26\_WI8014\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_02\_27\_WI8016\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_03\_24\_TI8211\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_03\_25\_TI8212\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_03\_40\_TI8215\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_20\_PI8220\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_21\_TIC8221\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_22\_PI8400\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_23\_TI8401\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_24\_TI8402\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_25\_TI8403\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_26\_PI8404\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_27\_TI9001\_1\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_40\_TI9003\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_41\_TI9002\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_42\_P10008\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_43\_P10009\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_44\_elecboiler\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_45\_gratefluegasoxygen\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_45\_QI3935\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_46\_TIC3092\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_04\_47\_PIC3093\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_05\_20\_PIC3094\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_05\_42\_LI8002\_out.MeasurementValueReal  
PLC1..A03\_06\_20\_HV3078\_AO  
PLC1..A03\_06\_21\_HV3086\_AO  
PLC1..A03\_06\_22\_HV3080\_AO  
PLC1..A03\_06\_23\_HV3082\_AO  
PLC1..A03\_06\_40\_HV3084\_AO  
PLC1..A04\_02\_23\_FV2008\_AO  
PLC1..A04\_02\_40\_FV2010\_AO  
PLC1..A04\_02\_41\_FV2012\_AO  
PLC1..A04\_02\_42\_FV2014\_AO  
PLC1..A04\_03\_20\_FV2016\_AO  
PLC1..A04\_03\_21\_FV2018\_AO

PLC1..A04\_03\_40\_FV3015\_AO  
PLC1..A04\_03\_41\_FV3017\_AO  
PLC1..A04\_03\_42\_FV3019\_AO  
PLC1..A04\_04\_20\_FV3021\_AO  
PLC1..A04\_04\_21\_FV3023\_AO  
PLC1..A04\_04\_42\_FV3060\_AO  
PLC1..A04\_04\_22\_HV3038\_AO  
PLC1..A04\_04\_23\_V3529\_AO  
PLC1..A04\_04\_40\_HV3076\_AO  
PLC1..A04\_04\_41\_HV3074\_AO  
PLC1.P3001.C4005\_speed2  
PLC1.P3001.C4005coaststop  
PLC1.P3001.C4005start  
PLC1.P3001.C4015\_speed2  
PLC1.P3001.C4015coaststop  
PLC1.P3001.C4015start  
PLC1.P3001.C8009\_speed2  
PLC1.P3001.C8009coaststop  
PLC1.P3001.C8009start  
PLC1.P3001.P1022start  
PLC1.P3001.P2001\_truespeed  
PLC1.P3001.P2001coaststop  
PLC1.P3001.P2001start  
PLC1.P3001.P3001\_truespeed  
PLC1.P3001.P3001coaststop  
PLC1.P3001.P3001start  
PLC1.P3001.P3002\_truespeed  
PLC1.P3001.P3002coaststop  
PLC1.P3001.P3002start  
PLC1.P3001.PID\_start1  
PLC1.P3001.PID\_start2  
PLC1.P3001.PID\_start3

## LIITE 3: LEISTER VULCAN SYSTEM KUUMAILMAPUHALTIMIEN TESTAUKSET



Leijupetikattilan esilämmitykseen käytetään kahta Leister Vulcan System 11 kW puhallinta. Ne ovat merkitty PI-kaavioihin positiolla X-2701 ja X-2703. Jätelämpökattilan puoleisen puhaltimen X-2701 lämpövastus lämpenee enemmän samalla tehoasetuksella kuin X-2703:n. Alla on kirjattuna mittaus- tulokset suoritetuissa testeissä.

X-2701, mitattu erillisellä anturilla puhaltimen suulta, puhaltaa vapaana	
Tehoasetus [%]	Lämpötila [°C]
77	648
78	654
79	661
82	680
83	684
84	693
85	694
	( pian virheilmoitus ja vikasuoja kyt.)

X-2703, mitattu erillisellä anturilla puhaltimen suulta, puhaltaa vapaana	
Tehoasetus [%]	Lämpötila [°C]
10	113
60	477
75	595
77	610
79	621



82	643
84	656
87	677
88	685
89	691
90	694 (pian virheilmoitus ja vikasuoja kytkeytyy)

Kuten mittatuloksista voidaan havaita, ei täyttä tehoasetusta voida käyttää edes vapaasti ilmaan puhaltavien kuumailmapuhaltimien kanssa.

Leisterit kiinni ilmalaatikossa, savukaasukanavan pellit auki lyhyintä reittiä piippuun, savukaasuimurit pois päältä (luonnollinen veto), lämpötila luettu puhaltimien omilta näytöiltä (5 °C tarkkuus)			
X-2701		X-2703	
Tehoasetus [%]	T [°C]	Tehoasetus [%]	T [°C]
15	170	20	195
30	300	35	310
50	485	55	485
60	575	65	580
65	635	70	630
70	680	75	675

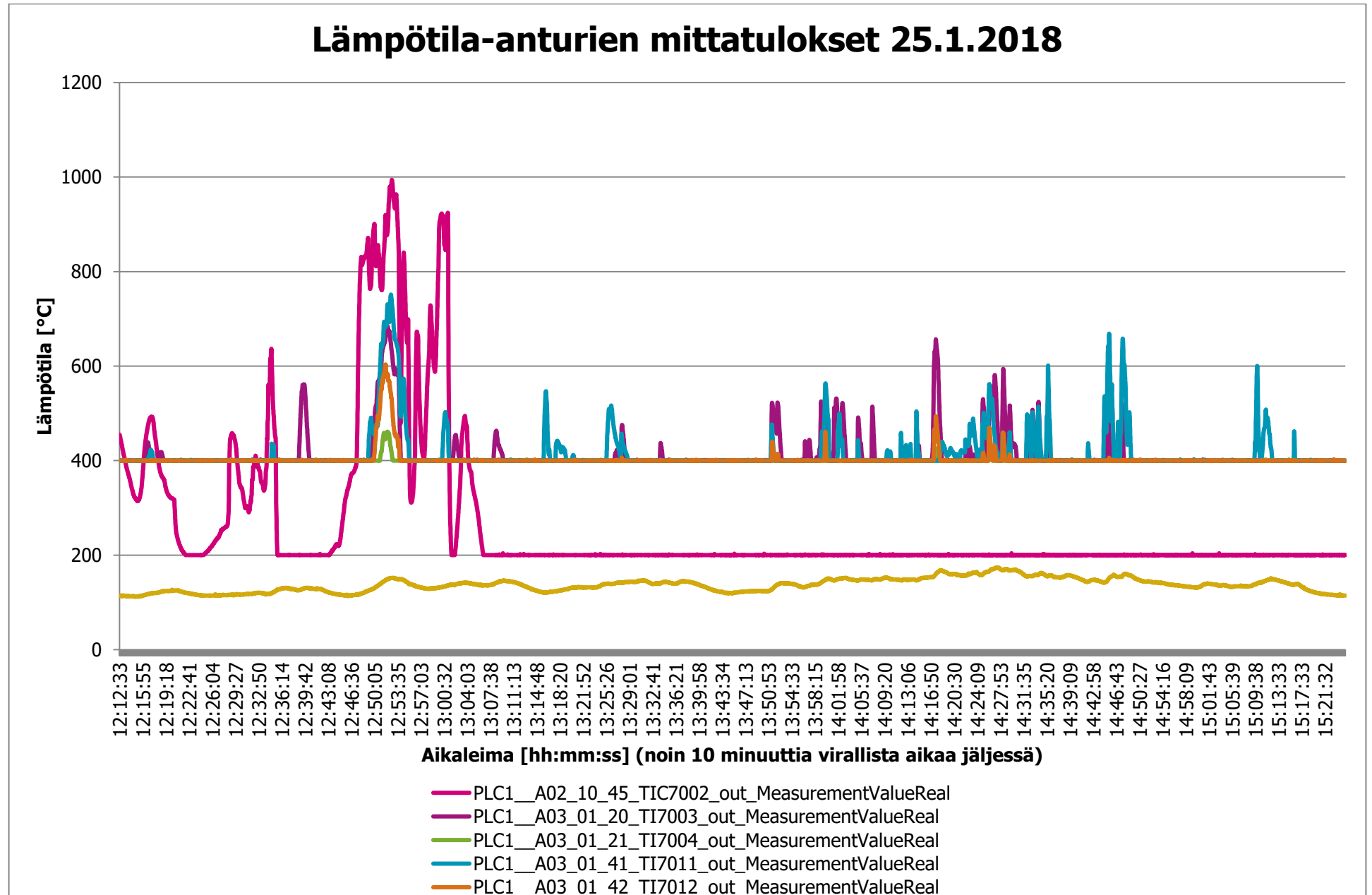
Viiden prosentin säätöerolla päästään suunnilleen samoihin lämpötiloihin. Seuraavassa taulukossa on esitettyä 24.1.2018 polttokoetta varten tehdyn esilämmityksen kerättyjä mittatietoja.

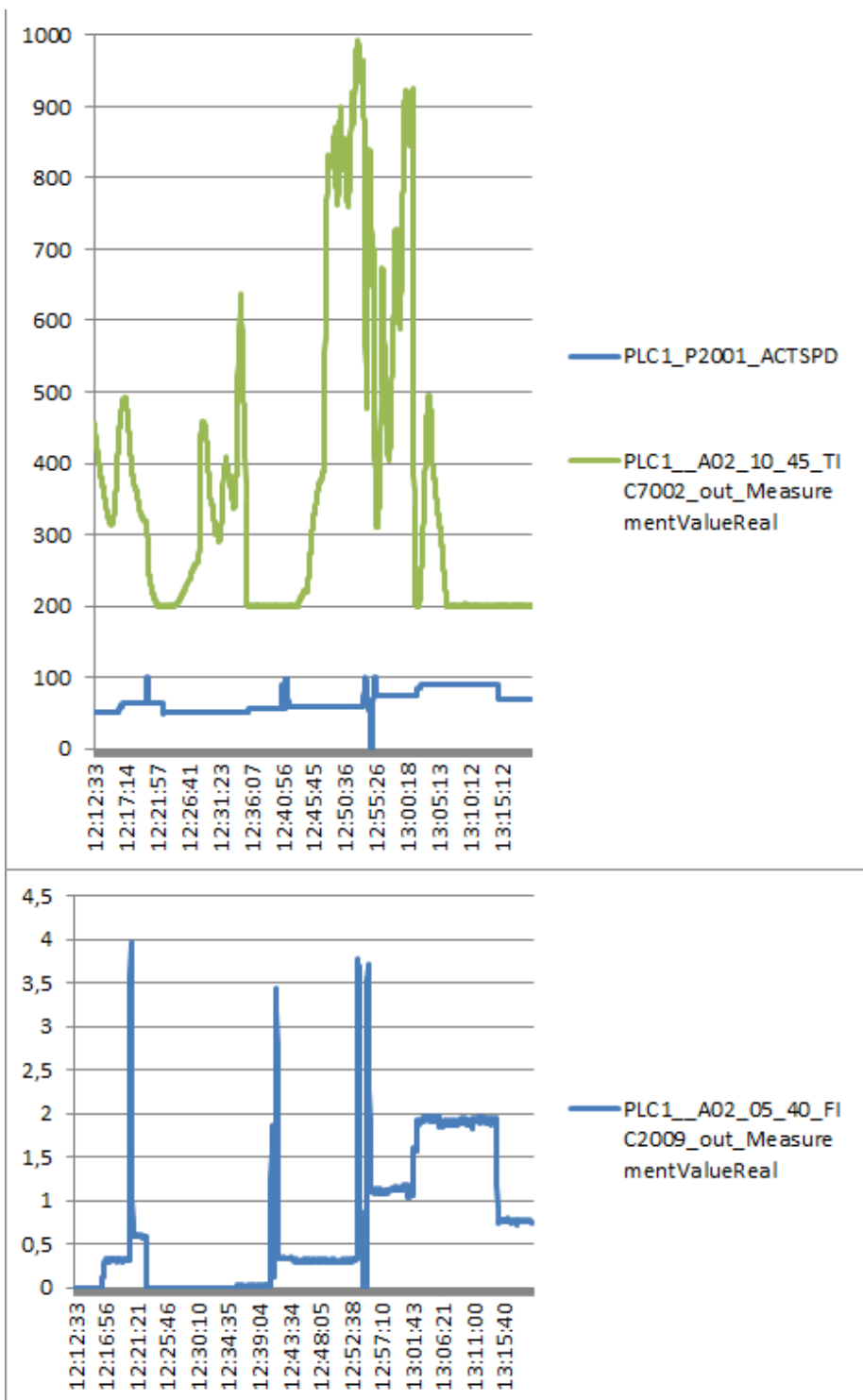
23.-24.1.2018 leijupetikattilan esilämmitys, HV-3080 säädetty ~28%, savukaasupuhaltimet ei päällä							
h.mm (± 1 min)	T <sub>keraami</sub> [°C]	X-2701 [°C]	X-2701 tehoas. [%]	X-2703 [°C]	X-2703 tehoas. [%]	TIC-2019 [°C]	TI-7015 [°C]
7.22	46,7						
8.14	46,1	345	34	355	39	143,6	36,9
8.23	46,5	440	44	435	49	159	38,3
8.34	47,1	490	49	480	54	179,7	39,6
9.47	56,1	500	49	490	54	217,5	44,3
10.28	63,0	500	49	490	54	223,8	46,3
11.33	74,5	500	49	495	54	229,7	49,2
13.31	95,0	500	49	500	55	238,0	54,2
14.31	104,9	505	49	505	55	238,2	56,6
15.23	113,0	535	52	535	58	249,5	59,2

6.59	203,2	540	52	535	58	256,6	89,9
7.09	203,7	605	59	600	65	265,5	90,8

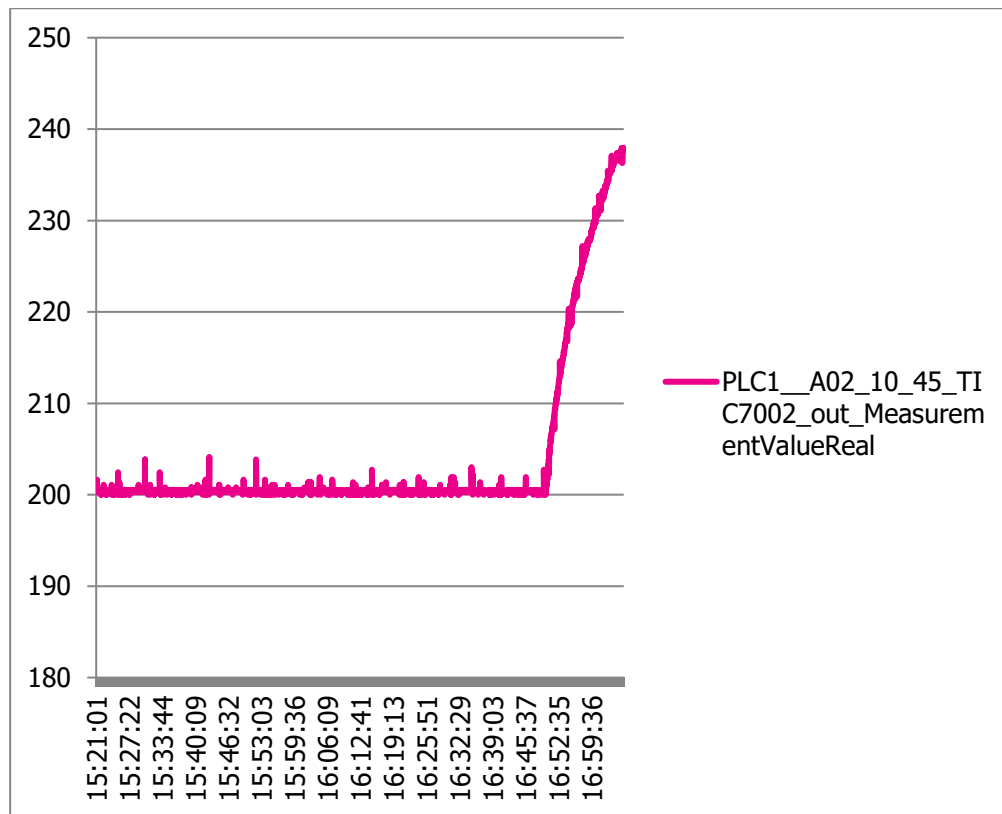
Mittauksista voidaan havaita, että lämpeneminen on hidasta. Keraamien valmistajan ilmoittama 1,2 °C/min ei ole vaarassa ylittyä.

## LIITE 4: KUVIO 25.1.2018 POLTTOKOKEEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN MITTATULOKSET



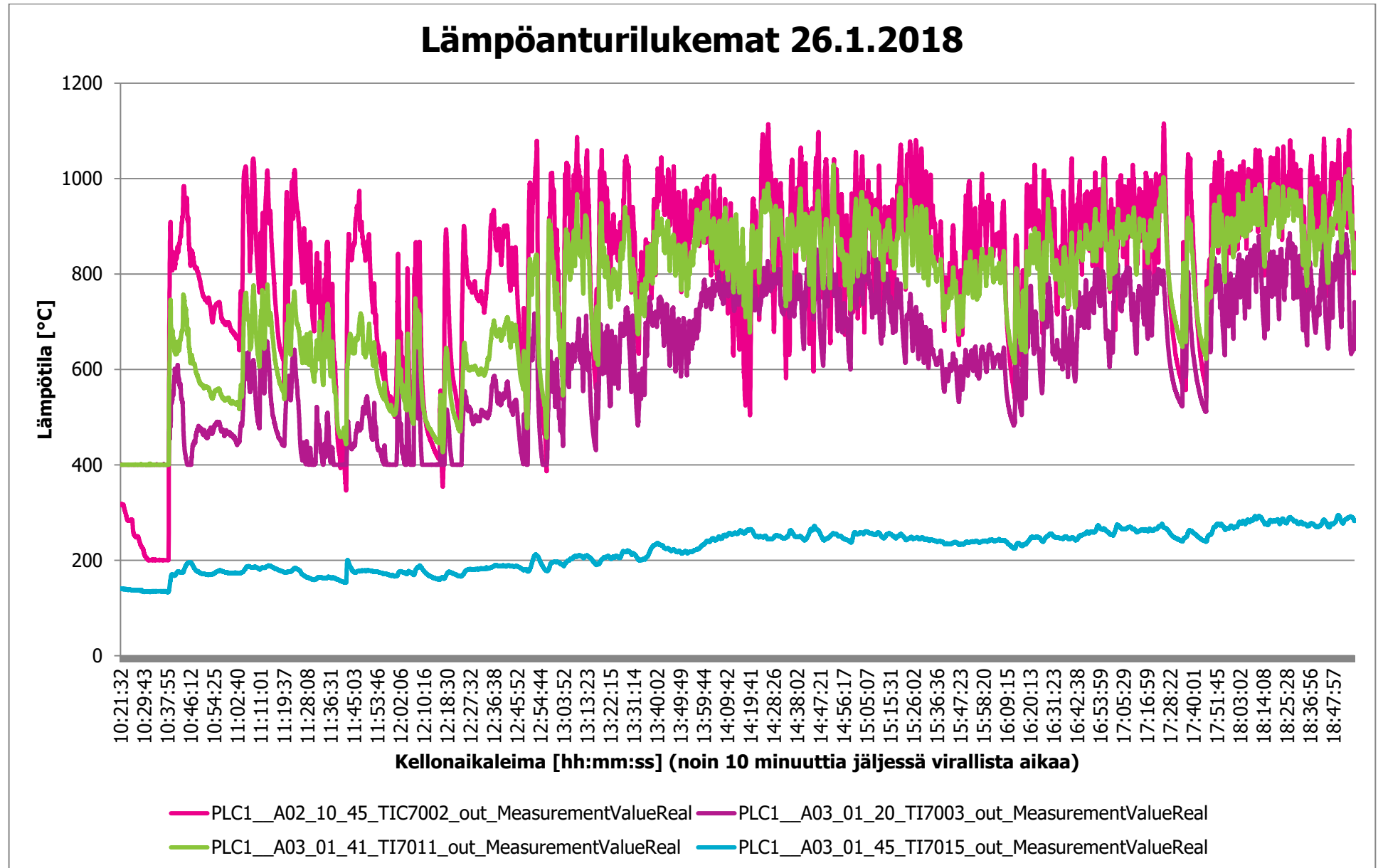


Selkeää korrelaatiota ei ole havaittavissa palamisilman virtausmittauksen, palamisilmapuhaltimen ja TIC-7002 anturin mitta-arvojen välillä.



TIC-7002 anturi kuitenkin alkaa näyttää jotain mittatulosta, kun kattilaa aletaan tyhjentämisen jälkeen uudelleen lämmittämään.

## LIITE 5: KUVIO 26.1.2018 POLTTOKOKEEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN MITTATULOKSET



## LIITE 6: MINIMILEIJUTUSNOPEUS- JA LENTOONLÄHTÖNOPEUSLASKUT

Alla on laskettuna minimileijutusnopeus Lännen hiekkatuote hiekan pienimmälle partikkelille. Ilman viskositeettiarvona on käytetty  $18,1 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$  (normaali ilmanpaineessa  $101,325 \text{ kPa}$  ja  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa). Ilmantiheytenä käytetty  $1,2 \text{ kg/m}^3$  ( $\rho = M_p/(RT) = 28,966 \text{ g/mol} \cdot 101,325 \text{ kPa} / (8,31446 \text{ J/Kmol} \cdot 293,15 \text{ K}) = 1,204 \text{ kg/m}^3$ ). Hiekkapartikkelin tiheydeksi on arvioitu  $2300 \text{ kg/m}^3$  (staattisen hiekkapetin tyhjän tilan osuus  $0,4 \rightarrow 1400 \text{ kg/m}^3 / 0,6 = 2333 \text{ kg/m}^3 =$  hiekkapartikkelin tiheys).

$$U_{mf1} = \frac{\mu_g}{d_p \rho_g} \left[ \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}} - 33,7 \right]$$

$$= \frac{18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}}{0,5 \text{ mm} \cdot \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}} \left[ \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{(0,5 \text{ mm})^3 \cdot \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}}{(18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s})^2}} - 33,7 \right]$$

$$= 0,1737 \text{ m/s}$$

Kun lasketaan hiekan tuottajan ilmoittaman raekoon  $0,5 \text{ mm} - 1,2 \text{ mm}$  isoimmalla luvulla saadaan tulokseksi:

$$U_{mf2} = \frac{\mu_g}{d_p \rho_g} \left[ \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2}} - 33,7 \right]$$

$$= \frac{18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}}{1,2 \text{ mm} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3} \left[ \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \frac{(1,2 \text{ mm})^3 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \left(2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{(18,1 \mu\text{Pa} \cdot \text{s})^2}} - 33,7 \right]$$

$$= 0,6250 \text{ m/s}$$

Lentoönlähtönopeudet pienimmälle raekoolle ja isoimmalle ovat laskettuna alla. Vastuskertoimena käytetty pallonmuotoisen kappaleen vastuskerrointa  $0,5$ .

$$U_{t1} = \sqrt{\frac{4 d_p (\rho_p - \rho_g) g}{3 \rho_g C_d}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot \left(\frac{2300 \text{ kg}}{\text{m}^3} - \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{3 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5}}$$

$$= 5,006 \text{ m/s}$$

$$U_{t2} = \sqrt{\frac{4 d_p (\rho_p - \rho_g) g}{3 \rho_g C_d}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 1,2 \text{ mm} \cdot \left( \frac{2300 \text{ kg}}{\text{m}^3} - \frac{1,2 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{3 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,5}}$$

$$= 7,7548 \text{ m/s}$$

Kuten edellä olevista laskelmista voidaan todeta, on leijutusnopeudeksi valittava 0,7 m/s ja 5 m/s väliltä, muutoin hiekkapeti ei leiju tai toisessa ääripäässä pienimmät partikkelit lentävät ilman mukana. Myös polttoaineen jauhautuminen pieniksi partikkeleiksi rajoittaa maksimileijutusnopeutta.

Käytettäessä polttoaineena puupellettiä, on laskennallinen teoreettinen palamisilmantarve 5,644 kg ilmaa / kg polttoainetta ja lamdakertoimella 1,2 kerrottuna 6,77 kg ilmaa / kg polttoainetta.

Kattilan leijupetiosan halkaisijan ollessa 350 mm saadaan laskettua sen poikkipinta-ala.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,350 \text{ m})^2}{4} = 0,096211275 \text{ m}^2 \approx 0,096 \text{ m}^2$$

Kertomalla poikkipinta-ala leijutusnopeudella saadaan ilman tilavuusvirta ja massavirta laskettua.

$$AU_{mf2} = 0,096211 \text{ m}^2 \cdot 0,625 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,060132 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_i = 0,060132 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,07216 \text{ kg/s}$$

Kertomalla leijutusilman massavirta palamisilman käänteisarvolla saadaan laskettua polttoaineteho minimileijutusnopeudella.

$$\frac{m_{pa}}{m_i} \cdot \dot{m}_i = \frac{1 \text{ kg polttoainetta}}{6,77 \text{ kg ilmaa}} \cdot 0,07216 \frac{\text{kg ilmaa}}{\text{s}} = 0,010659 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ polttoainetta}$$

Polttoaineteho saadaan kertomalla polttoainemassavirta tehollisella lämpöarvolla saapumistilassa:

$$P = LHV \cdot \dot{m}_{pa} = 17,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 0,010659 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,1833 \text{ MW}$$

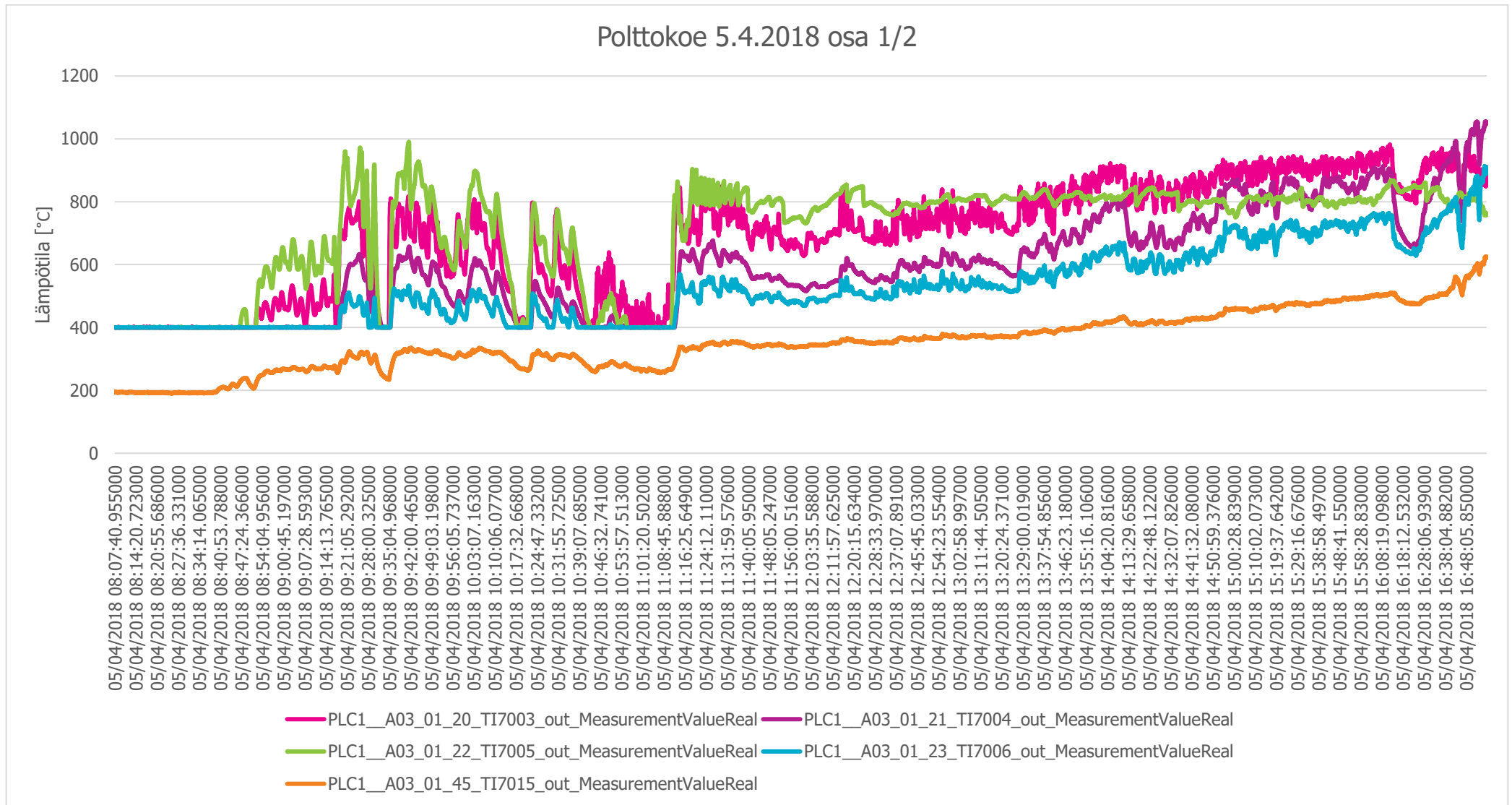
Seuraavalla sivulla on taulukoituna lento- ja minimileijutusnopeuksia eri lämpötiloissa. Dynaaminen viskositeetti kuivalle ilmalle, ilmantiheys ideaalikaasun tilanyhtälöllä.



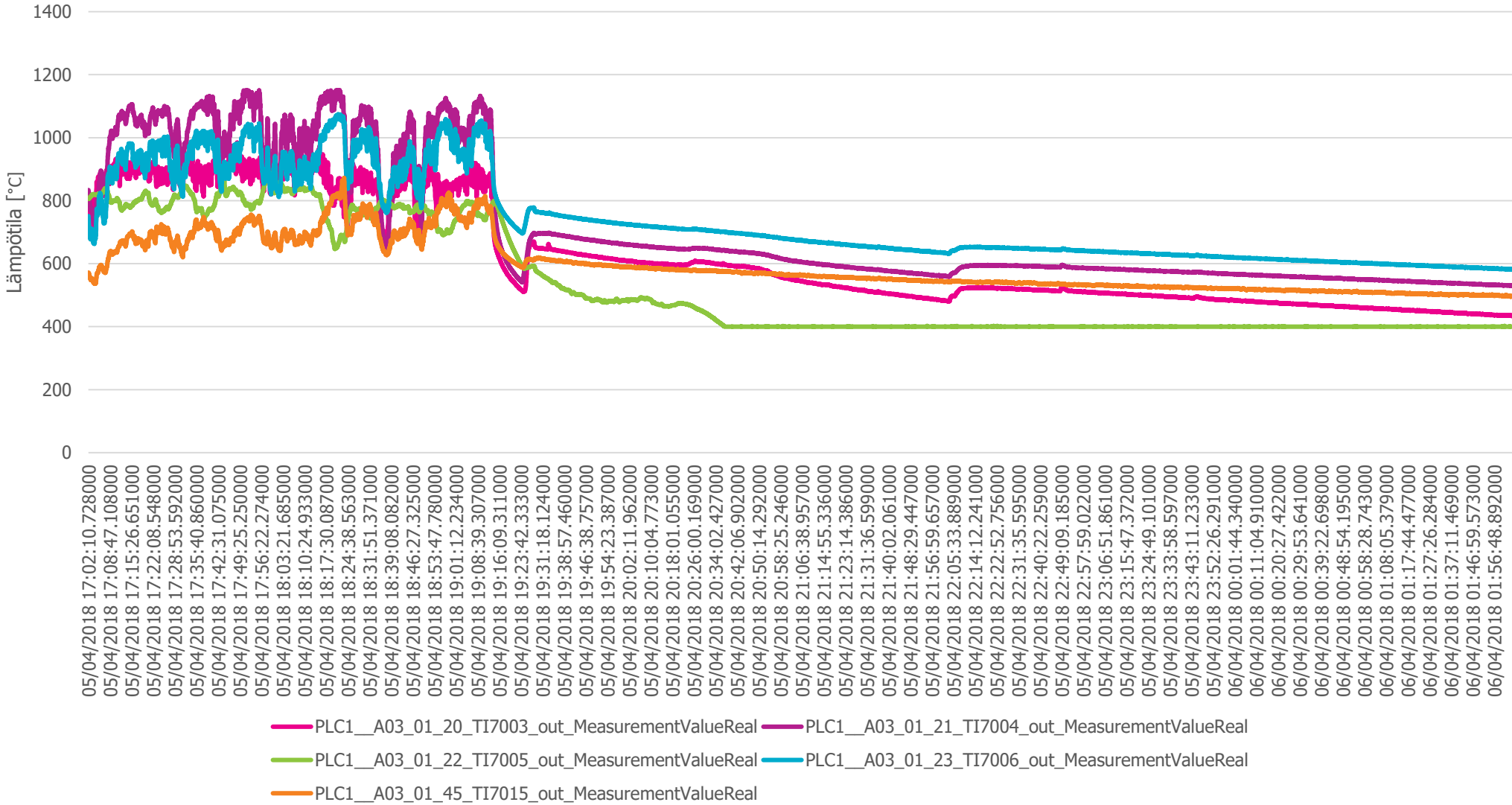
$T_{ilma}$ [°C]	$p$ [kPa]	$\mu_g$ [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]	$d_p$ [mm]	$\rho_g$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_p$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$U_{mf}$ [m/s]	$U_t$ [m/s]
0	101,325	17,15	0,5	1,292319465	2300	0,180729959	4,82348356
15	101,325	17,89	0,5	1,225046197	2300	0,175175282	4,9542266
20	101,325	18,13	0,5	1,204151669	2300	0,17342163	4,9970475
25	101,325	18,37	0,5	1,183957946	2300	0,17168874	5,03950457
30	101,325	18,6	0,5	1,164430354	2300	0,170055983	5,08160691
35	101,325	18,84	0,5	1,145536465	2300	0,168364503	5,12336328
40	101,325	19,07	0,5	1,127245926	2300	0,16677116	5,16478207
45	101,325	19,3	0,5	1,10953029	2300	0,165197302	5,20587134
50	101,325	19,53	0,5	1,092362871	2300	0,163643137	5,24663882
55	101,325	19,76	0,5	1,07571861	2300	0,162108816	5,28709197
60	101,325	19,99	0,5	1,059573951	2300	0,160594441	5,32723793
65	101,325	20,21	0,5	1,043906733	2300	0,159170234	5,36708361
70	101,325	20,44	0,5	1,028696086	2300	0,157694704	5,40663565
75	101,325	20,66	0,5	1,013922337	2300	0,156307087	5,44590044
80	101,325	20,88	0,5	0,999566931	2300	0,15493722	5,48488415
85	101,325	21,1	0,5	0,985612346	2300	0,153585076	5,52359273
90	101,325	21,31	0,5	0,972042026	2300	0,152315376	5,56203193
95	101,325	21,53	0,5	0,958840314	2300	0,150997478	5,60020729
100	101,325	21,74	0,5	0,945992394	2300	0,149759889	5,63812417
200	101,325	25,73	0,5	0,746057406	2300	0,129081028	6,34908613
300	101,325	29,28	0,5	0,615889491	2300	0,114539724	6,98808595
400	101,325	32,5	0,5	0,524395843	2300	0,103751532	7,57336093

$T_{ilma}$ [°C]	$p$ [kPa]	$\mu_g$ [ $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]	$d_p$ [mm]	$\rho_g$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\rho_p$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$U_{mf}$ [m/s]	$U_t$ [m/s]
0	101,325	17,15	1,2	1,292319465	2300	0,623919408	7,4725086
15	101,325	17,89	1,2	1,225046197	2300	0,624033068	7,67505485
20	101,325	18,13	1,2	1,204151669	2300	0,623927857	7,74139271
25	101,325	18,37	1,2	1,183957946	2300	0,62371274	7,80716691
30	101,325	18,6	1,2	1,164430354	2300	0,623531976	7,87239158
35	101,325	18,84	1,2	1,145536465	2300	0,623109516	7,93708027
40	101,325	19,07	1,2	1,127245926	2300	0,622730127	8,00124598
45	101,325	19,3	1,2	1,10953029	2300	0,622257122	8,0649012
50	101,325	19,53	1,2	1,092362871	2300	0,621693966	8,12805791
55	101,325	19,76	1,2	1,07571861	2300	0,62104403	8,19072765
60	101,325	19,99	1,2	1,059573951	2300	0,620310594	8,25292152
65	101,325	20,21	1,2	1,043906733	2300	0,619640119	8,31465018
70	101,325	20,44	1,2	1,028696086	2300	0,61874943	8,37592393
75	101,325	20,66	1,2	1,013922337	2300	0,617928305	8,43675268
80	101,325	20,88	1,2	0,999566931	2300	0,617036295	8,49714598
85	101,325	21,1	1,2	0,985612346	2300	0,616076145	8,55711306
90	101,325	21,31	1,2	0,972042026	2300	0,6151949	8,61666281
95	101,325	21,53	1,2	0,958840314	2300	0,614106514	8,67580382
100	101,325	21,74	1,2	0,945992394	2300	0,613102347	8,73454441
200	101,325	25,73	1,2	0,746057406	2300	0,586545001	9,83596194
300	101,325	29,28	1,2	0,615889491	2300	0,555836732	10,8258962
400	101,325	32,5	1,2	0,524395843	2300	0,525653205	11,7326003

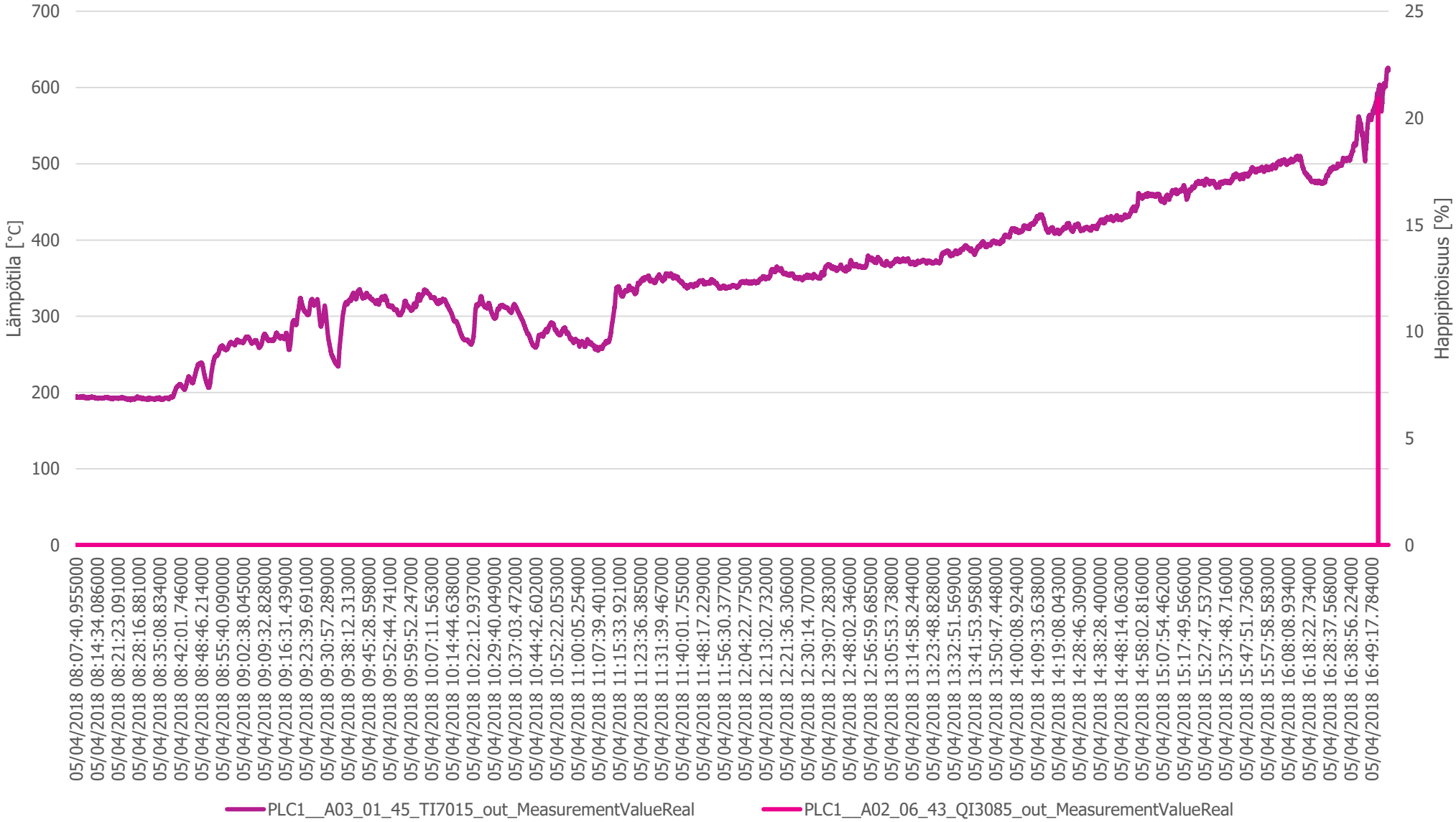
## LIITE 7: OPINNÄYTETYÖN JÄLKEEN 5.4.2018 SUORITETUN KOEPOLTTON KATTILALÄMMÖT



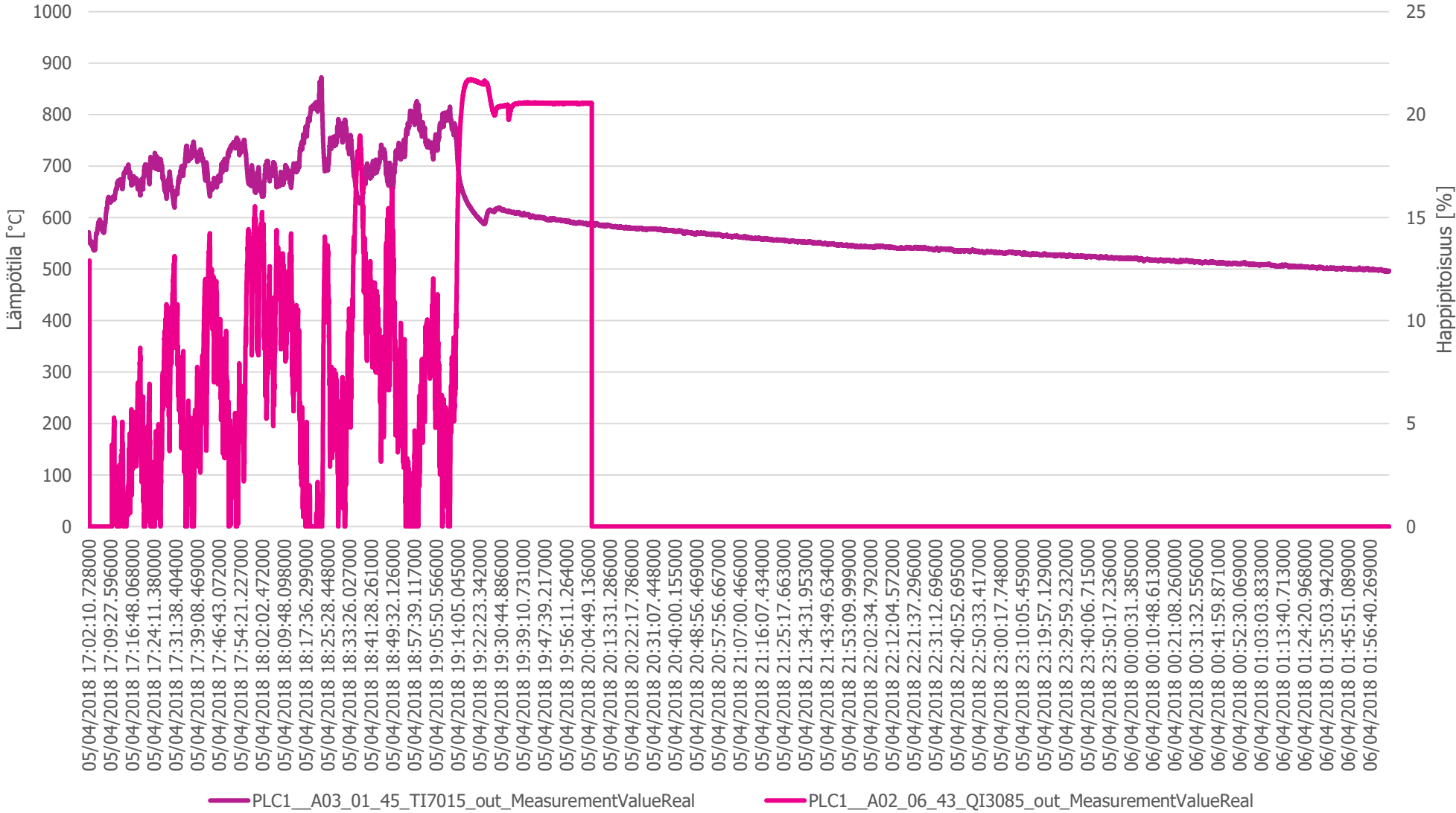
### Polttokoe 5.4.2018 osa 2/2



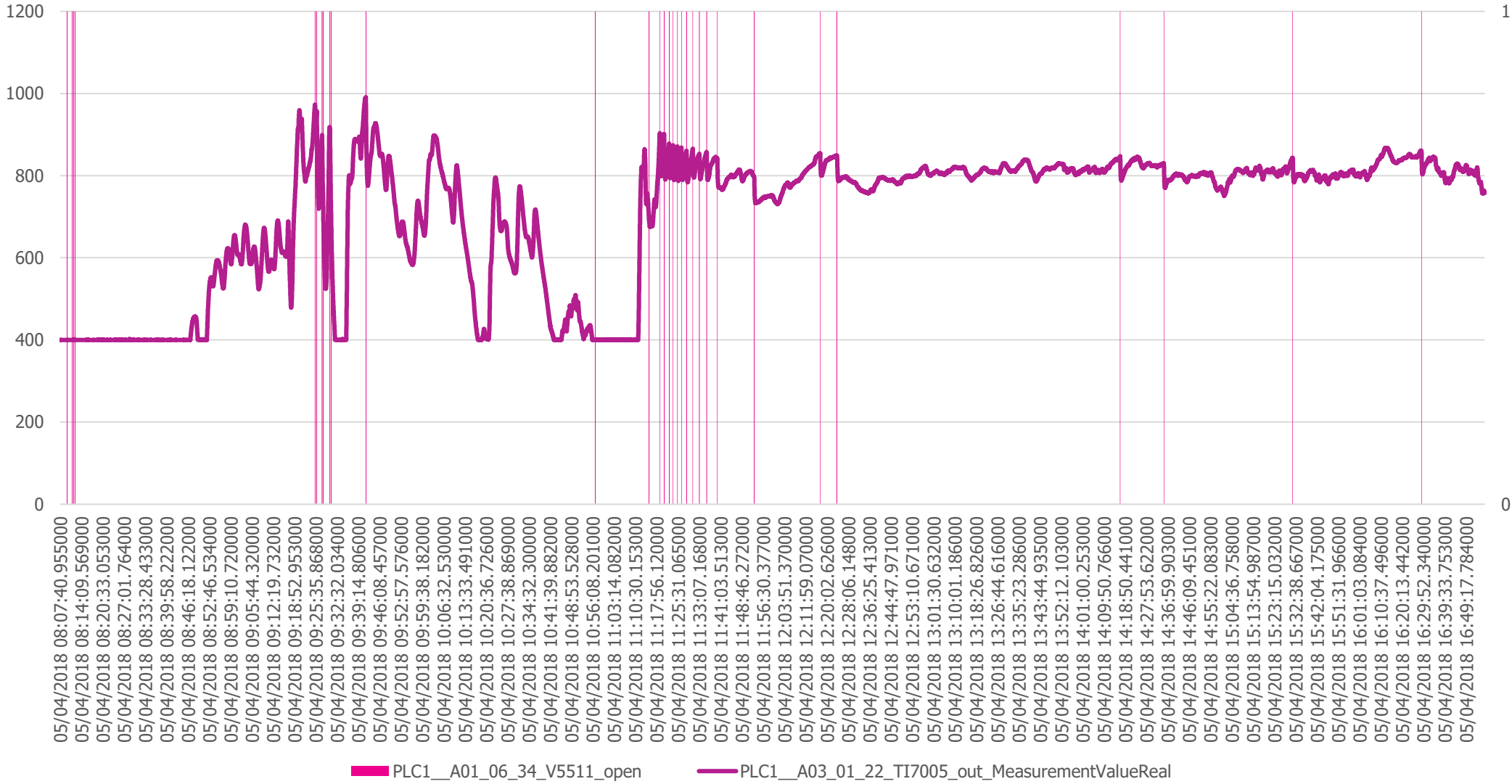
### Happianturi QI-3085 ja TI-7015 (polttokoe 5.4.2018 osa 1/2)



### Happianturi QI-3085 ja TI-7015 (koepoltto 5.4.2018 osa 2/2)



### Petilämpötila TI-7005 ja Hiekkasiilon giljotiinipelti V-5511 (hiekan lisäys) osa 1/2



### Petilämpötila TI-7005 ja Hiekkasiilon giljotiinipelti V-5511 (hiekan lisäys) osa 2/2

