

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# ENERGIATUTKIMUSKESKUKSEN STARTTIPOLTTIMEN KÄYTTÖÖN- OTTO

TEKIJÄ: Pasi Hämäläinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Pasi Hämäläinen	
Työn nimi Energiatutkimuskeskuksen starttipolttimen käyttöönotto	
Päiväys 8.5.2023	Sivumäärä/Liitteet 44/3
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä <p>Työn tarkoituksena oli ottaa käyttöön Savonia ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan uusi nestekaasukäyttöinen starttipoltin, ja testiajon avulla selvittää polttimen soveltuvuus pedin esilämmittämiseen lämpötilaan, jolla varmistetaan kiinteän polttoaineen turvallinen syttyminen. Myös testiajon aikana syntyneitä savukaasuja ja niiden koostumukseen mahdollisesti vaikuttaneita toimia tarkasteltiin laitosdataa ja savukaasujen mittausdataa vertailemalla. Työn toimeksiantajana oli Savonia ammattikorkeakoulu. Työssä tarkasteltiin starttipolttimia sekä niiden käyttösovelluksia myös yleisellä tasolla.</p> <p>Työ oli kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa starttipolttimen komponentit asennettiin paikalleen poltintomittajan toimesta ja siihen teetettiin tarvittavat sähkötyöt. Toisessa vaiheessa suoritettiin yksipäiväinen testiajo, jossa kattila ajettiin ylös ja laitosdata sekä savukaasujen mittausdata otettiin talteen myöhempiä tarkasteluja varten. Kolmannessa vaiheessa testiajon aikaista dataa tutkittiin ja työstä kirjoitettiin kirjallinen raportti.</p> <p>Tutkimusten perusteella voitiin todeta, että starttipoltin on soveltuva energiatutkimuskeskuksen käyttöön, koska kiinteä polttoaine saatiin turvallisesti syttymään ja kattila ajettua ylös. Testiajo sekä datan tulkitseminen oli haasteellista, koska propaani jäähtyi kaasupullon höyrystymiskapasiteetin riittämättömyyden vuoksi, ja sen takia sytytyskertoja tarvittiin useita. Yhden testiajon perusteella ei voida määrittää polttimen optimaalisinta käyttötapaa ja pedin lämmittämiseen tarvittavaa aikaa vaan havaittujen ongelmien korjaamisen jälkeen pitäisi suorittaa uusi testiajo.</p>	
Avainsanat Starttipoltin, Propaani, Energiatutkimuskeskus, Leijukerros poltto	

Field of Study Technology, Communication and Transport		
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering		
Author(s) Pasi Hämäläinen		
Title of Thesis Commissioning of the Energy Research Centre's Start-Up Burner		
Date	8 May 2023	Pages/Appendices 44/3
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences		
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of the work was to introduce a new LPG-fueled starter burner for the fluidized bed boiler of the Energy Research Centre of Savonia University of Applied Sciences and, during the trial run, to determine the suitability of the burner for preheating the bed to a temperature that ensures the safe ignition of solid fuel. In addition, flue gases generated during the pilot run and the measures that may have affected their composition were studied by comparing plant data and flue gas measurement data. The work was commissioned by Savonia University of Applied Sciences. Also, startup burners and their applications at a general level were also looked at in the thesis.</p> <p>The work was completed in three stages. At the first stage, the burner supplier installed the components of the starter burner in place and the necessary electrical work was carried out on it. In the second phase, a one-day trial run was carried out, in which the boiler was driven up and plant data and flue gas measurement data were collected for later review. In the third stage, the data from the test drive were studied and a written report on the work was written.</p> <p>Based on the thesis, it was concluded that the starter burner is suitable for use by the Energy Research Center, since solid fuel can be safely ignited and the boiler up. The test drive and interpretation of the data was challenging because the propane cooled down due to the insufficient vaporization capacity of the gas cylinder, and therefore several ignition cycles were required. Based on one test run, it is not possible to determine the optimal operating mode of the burner and the time required for preheating the bed. After correcting the identified problems, a new test run should be carried out.</p>		
<p><b>Keywords</b> Start-up burner, Propane, Energy research center, Fluidized bed combustion</p>		

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	STARTTIPOLTTIMET .....	7
2.1	Yleistä starttipolttimista .....	7
2.2	Starttipoltintyypit .....	7
2.3	Riikinvoiman starttipolttimien ja petilanssien huolto.....	9
2.4	Poltinvalmistajia .....	9
2.5	Starttipolttimien sytyttäminen .....	10
3	SAVONIAN STARTTIPOLTIN .....	12
3.1	Taustatietoa .....	12
3.2	Polttimen asennus.....	13
3.3	Savonian starttipolttimen toimintaperiaate.....	14
3.4	Huolto.....	15
4	LEIJUKERROSPOLTTO.....	18
4.1	Leijutuksen vaiheet eri ilmannopeuksilla .....	18
4.2	Kupliva leijukerros.....	18
5	ENERGIATUTKIMUSKESKUS .....	20
6	STARTTIPOLTTIMEN TESTIAJO .....	23
6.1	Testiajon aikataulu, tavoitteet ja esivalmistelut .....	23
6.1.1	Aikataulu.....	23
6.1.2	Tavoitteet .....	23
6.1.3	Esivalmistelut .....	23
6.2	Kuvaus testiajon kulusta.....	24
7	TESTIAJON TULOKSET.....	30
7.1	Petilämpötila.....	30
7.2	Yhteenveto.....	33
7.3	Savukaasut.....	34
8	HAVAITUT ONGELMAT JA PARANNUSEHDOTUKSET SEKÄ KEHITYSEHDOTUKSET.....	38
8.1	Ongelma, syy ja parannusehdotus .....	38
8.2	Kehitysehdotus .....	38
9	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	39
	LÄHTEET .....	40

LIITE 1: PROPAANIN FYSIKAALISET OMINAISUUDET .....	42
LIITE 2: VALVOMOPÖYTÄKIRJA.....	43

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä asennettiin ja otettiin käyttöön Savonia ammattikorkeakoulun energiatutkimuskeskuksen nestekaasulla toimiva starttipoltin. Polttimen tarkoituksena on esilämmittää hiekka-  
peti tarpeeksi kuumaksi, jotta kiinteä polttoaine saadaan turvallisesti syttymään. Työn tilaajana oli Savonia ammattikorkeakoulu. Starttipolttimen hankkiminen tuli ajankohtaiseksi, koska aiemmin kattilan esilämmittämiseen käytetyt sähkökäyttöiset kuumailmapuhaltimet olivat toiminnaltaan tehottomia ja epäluotettavia. Kattilan varsinainen sytyttäminen jouduttiin tekemään käsin sytytysnesteellä käsiteltyä pellettiä ja palavaa paperia apuna käyttäen. Starttipoltin ratkaisun toimitti Varkautelainen energiateknologia yritys Clean Flame Oy ja se on räätälöity juuri tähän kattilaan sopivaksi. Poltin on teholtaan 250 kW. Työssä on myös perehdytty starttipolttimiin ja starttipolttimien käyttösovelluksiin yleisellä tasolla haastattelemalla poltinasiantuntijoita ja käymällä tutustumassa käytössä oleviin poltintarkeisiin, sekä alan kirjallisuutta ja luotettavia sähköisiä lähteitä hyväksi käyttäen. Myös Savonia ammattikorkeakoulun opettajien sekä työntekijöiden ammattitaitoa ja kontakteja on hyödynnetty työssä.

## 2 STARTTIPOLTTIMET

### 2.1 Yleistä starttipolttimista

Starttipolttimia käytetään voimalaitoskattiloiden, kuten kerrosleijukattiloiden (BFB), kiertoleijukattiloiden (CFB) ja erityyppisten arinakattiloiden tulipesän esilämmitykseen sekä soodakattilan lämpötilan hallittuun nostamiseen ennen varsinaisen pääpolttoaineen syötön aloittamista. Starttipolttimia voidaan käyttää myös tuki- ja kuormapolttimina häiriötilanteissa, jolloin ei saada pidettyä tasaista polttoprosessia yllä. Pääpolttoaine on yleensä kiinteää polttoainetta, kuten kierrätyspolttoainetta, biopolttoainetta, kivihiiltä tai turvetta sekä soodakattilassa mustalipeää, jota saadaan sellunkeiton sivutuotteena. Kiinteät polttoaineet voidaan jakaa fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin. Fossiilisia polttoaineita ovat kivihiili sekä turve ja uusiutuvia biomassapohjaiset polttoaineet, kuten puu, olki, lipeä ja metsätähteet, sekä energiakäyttöä varten viljellyt kasvit. Kierrätyspolttoaineella tarkoitetaan yhdyskuntien ja yritysten polttokelpoisista, kuivista, kiinteistä ja syntypaikoilla lajitelluista jätteistä valmistettua polttoainetta. Leijupetikattiloiden hiekkapeti täytyy esilämmittää tasolle, jolla varmistetaan pääpolttoaineen turvallinen syttyminen, eli lämpötilatasolle 400–600 °C voimakattilan polttoaineen syttymispisteen mukaan. Esilämmitys toteutetaan joko petiin tai sen päälle sijoitetuilla öljy tai kaasulämmitteisillä starttipolttimilla. (Huhtinen & muut, 2008), (Karvonen, 2013), (Raiko & muut, 2002), (Vuorinen, 2012)

Yleensä starttipolttimet sijaitsevat tulipesässä noin 1,5–2 metrin korkeudella arinasta, mutta myös arinan alapuolisia niin sanottuja kanavapolttimia on käytetty starttipolttimina. Nämä sijaitsevat primääri-ilmakanavassa kattilan arinan alapuolella. Pääpolttoaineen ollessa kierrätyspolttoaine esimerkiksi yhdyskuntajäte, niin lämpötila täytyy nostaa esilämmityksellä paljon korkeammaksi, koska yhdyskuntajätteen kosteusprosentti on niin korkea, että se vaatii syttyäkseen korkeamman lämpötilan. Soodakattilaa ylös ajaessa starttipolttimia käytetään lämpötilan hallittuun nostoon ennen lipeäruiskujen käyttöönottoa ja lipeän polton aloittamista. Polttimia voidaan käyttää myös keon loppuun polttamiseksi soodakattilan alasarjoissa. Starttipolttin voi sijaita kattilan sivuseinällä tai pedin alapuolella olevassa ilmakanavassa ja niitä voi olla useita. Petimateriaalin alapuolinen lämmittäminen on tehokkaampaa, mutta se ei sovellu kaikkiin tilanteisiin, sillä tulipesän pohjassa oleva ilmalaatikko täytyy olla tässä tapauksessa muurattuna. (Holopainen, 2022), (Kauppinen, 2023), (Kulju, 2020)

### 2.2 Starttipolttintyytit

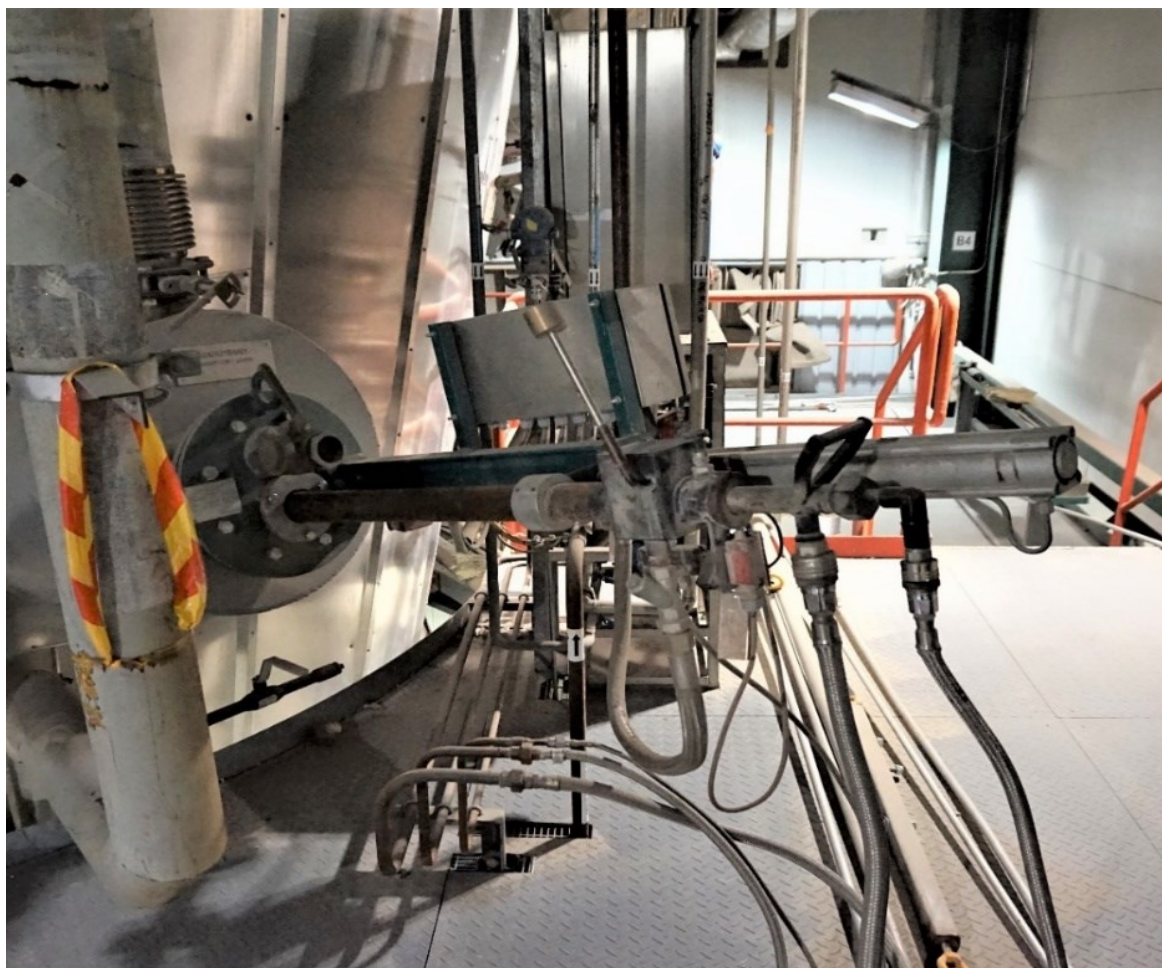
Starttipolttimien polttoaineena on tyypillisesti kevytöljy, raskasöljy, maakaasu tai nestekaasu mutta myös erikoisempia polttoaineita on käytetty, esimerkiksi häkäkaasua. Nykyään polttoainevalikoimaan on tulossa erilaiset bio-öljyt ja biokaasut. Jos starttipolttimen pääpolttoaine on kevyt tai raskas polttoöljy, niin usein öljy sytytetään erillisen kaasusytyttimen avulla. Kuvassa 1 on toinen Riikinvoima Oy:n jätteenpolttolaitoksen kiertopetikattilan öljykäyttöisistä starttipolttimista, joissa on erillinen kaasusytytin, jolla öljy sumu sytytetään. Riikinvoima Oy:n starttipolttimet ovat Clean Flame Oy:n toimittamia ja niiden kaasusytytin ratkaisu on hyvin samankaltainen, kuin Savonian starttipolttinratkaisu. Kattilan polttoaineteho on 54 MW ja starttipolttimien teho on 12 MW/polttin. Starttipolttimet mitoiteetaan yleensä kattilan polttoainetehon mukaan. Esimerkiksi Sumitomo SHI FW:n mitoitusohje starttipolttimille CFB ja BFB kattiloissa on 40 % kattilan polttoainetehosta. (Kauppinen, 2023)

Riikinvoima Oy:n kattilassa on lisäksi 3 kpl petilansseja (kuva 2), jotka ovat teholtaan 21 MW/lanssi ja niitä käytetään kattilan ylösajossa starttipolttimien tukena, kun starttipolttimien teho ei enää riitä nostamaan lämpötilaa tarpeeksi, sekä tukena mahdollisissa häiriötilanteissa milloin polttoprosessi ei ole tasainen. Petilanssit ovat tehokkaampia petilämpötilan ylläpidossa, kuin pedin yläpuolelle sijoitetut starttipolttimet, koska petilansseja käytettäessä lisäpolttoaine palaa pedin sisällä eikä sen päällä. (Holopainen, 2023) (Ojanen, 2001)



KUVA 1. Riikinvoima Oy:n jätteenpolttokattilan starttipoltin. (Hämäläinen, 2023)





KUVA 2. Riikinvoima Oy:n jätteenpolttokattilan petilanssi (Hämäläinen, 2023)

### 2.3 Riikinvoiman starttipolttimien ja petilanssien huolto

Kattilan ylösajon jälkeen polttimien lanssit irrotetaan ja puhdistetaan sekä tarkistetaan öljyputken päässä olevat suuttimet. Lanssit jätetään puhdistettuina odottamaan seuraavaa starttia. Seisakissa, ennen kattilan luukkujen sulkemista polttimien impellerit eli ilman ohjaus puhdistetaan kaikesta epäpuhtaudesta ja samalla liekinvartijat tarkastetaan, etteivät ne ole likaisia. (Holopainen, 2023)

### 2.4 Poltinvalmistajia

Suomalaisia tunnettuja starttipoltinvalmistajia ovat Clean Flame, Oilon ja Andritz. Ulkomaisia valmistajia ovat ainakin Zeeko, Saacke ja Hamworthy. (Kauppinen, 2023)

Kuvassa 3 on Oilonin valmistama GP-50-90 sarjan käynnistyspoltin. Oilonin polttimissa voidaan käyttää erilaisia nestemäisiä ja kaasupolttoaineita. Sopivia polttoaineita ovat esimerkiksi kevyt tai raskas polttoöljy, sekä maa- tai nestekaasu. Poltinta voidaan käyttää useimmissa lämmitysjärjestelmissä, kuten lämmin- ja kuumavesikattiloissa, höyrykattiloissa, kuumailmakehittimissä sekä erilaisissa prosessilämmitysjärjestelmissä. Poltin on myös suunniteltu korkeille tulipesän vastapaineille. (Oilon, 2022)

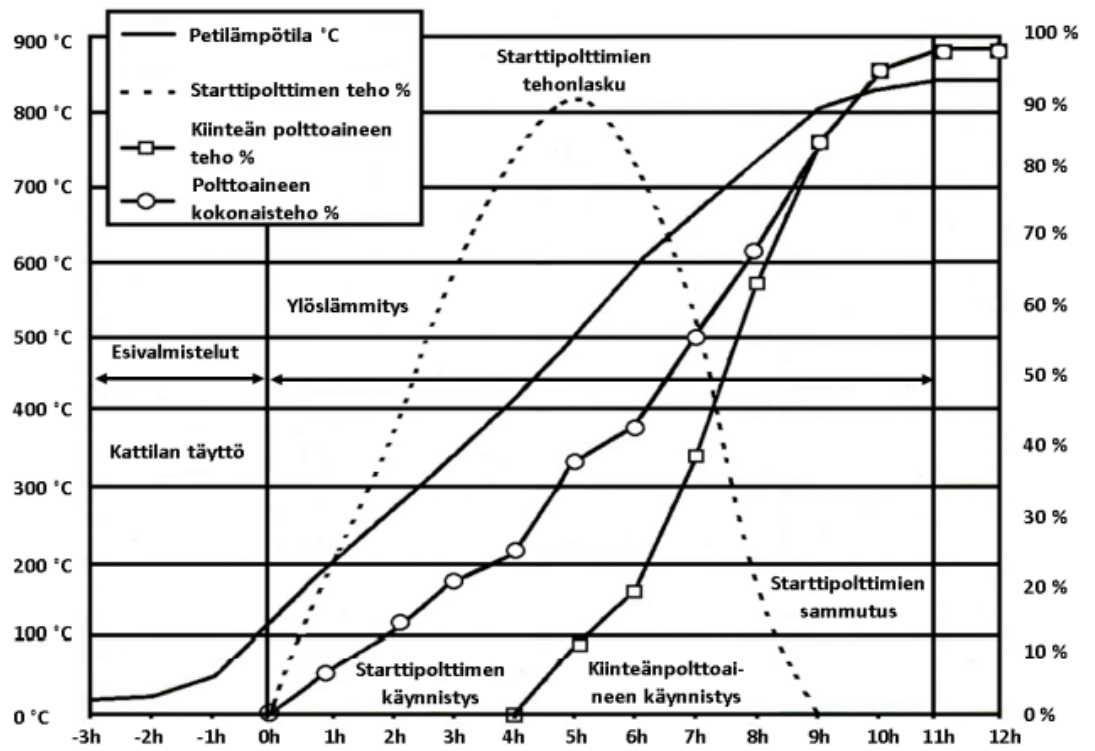


KUVA 3. Oilon GB-50 käynnistyspoltin (Oilon, 2022)

## 2.5 Starttipolttimien sytyttäminen

Starttipolttimet voidaan voimalaitosprosesseissa tavallisesti sytyttää valvomosta käsin operointijärjestelmän avulla. Polttimet voidaan sytyttää myös paikallishauskaapeista, jotka sijaitsevat polttimien välittömässä läheisyydessä. Ennen kuin starttipolttimet voidaan turvallisesti sytyttää, kattila täytyy tuulettaa, sekä sytytysaikaa on oltava tarpeeksi jäljellä. Mikäli starttipoltinta ei saada syttymään tietyn ajan kuluessa kattilan tuuletuksen päättymisestä, poltin menee lukitustilaan ja uudelleen sytyttäminen voidaan tehdä häiriön kuittauksen jälkeen. Polttimet käynnistetään ryhmäkäynnistyksen avulla, joka huolehtii myös polttoainepumppujen käynnistyksestä ja säätimien asettamisesta oikeisiin asetusarvoihin ja tiloihin. Mikäli ryhmäkäynnistys ei edellä mainittuja asioita tee, ne tulee tehdä manuaalisesti. Kuvassa 11 on Savonian starttipolttimen sytytysyksikkö, jota ei ole kytketty laitoksen automaatiojärjestelmään vaan se toimii itsenäisenä yksikkönä ja se täytyy käynnistää paikallisesti.

Polttimen käynnistyspolttoaineena käytetään usein nestekaasua. Käynnistyspolttimilla kattilaa lämmitetään siihen asti, että kiinteän polttoaineen syöttö voidaan turvallisesti aloittaa. Kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan yleensä petilämpötilan ollessa välillä 400–500 °C. Käynnistyspoltinta pidetään kiinteän polttoaineen syötön rinnalla päällä, kunnes petilämpötila saavuttaa noin 600 °C. Kattilan ylös ajossa on tärkeää seurata paineiden ja lämpötilojen kehittymistä. Yleensä kattilan valmistaja on ohjeistanut ylöslämmitys nopeuden. Tyypillisesti petihiekan lämpötilan nostonopeus on noin 1–1,2° minuutissa. Liian nopea ylöslämmitys saattaa aiheuttaa lämpöjännityksiä sekä vaurioittaa tulipesän suojamuurauksia. Kuvassa 4 on esitetty leijupetikattilan lämpötilojen kehittyminen ylösajon aikana. (Huhtinen & muut, 2008) (Huttunen, 2020)



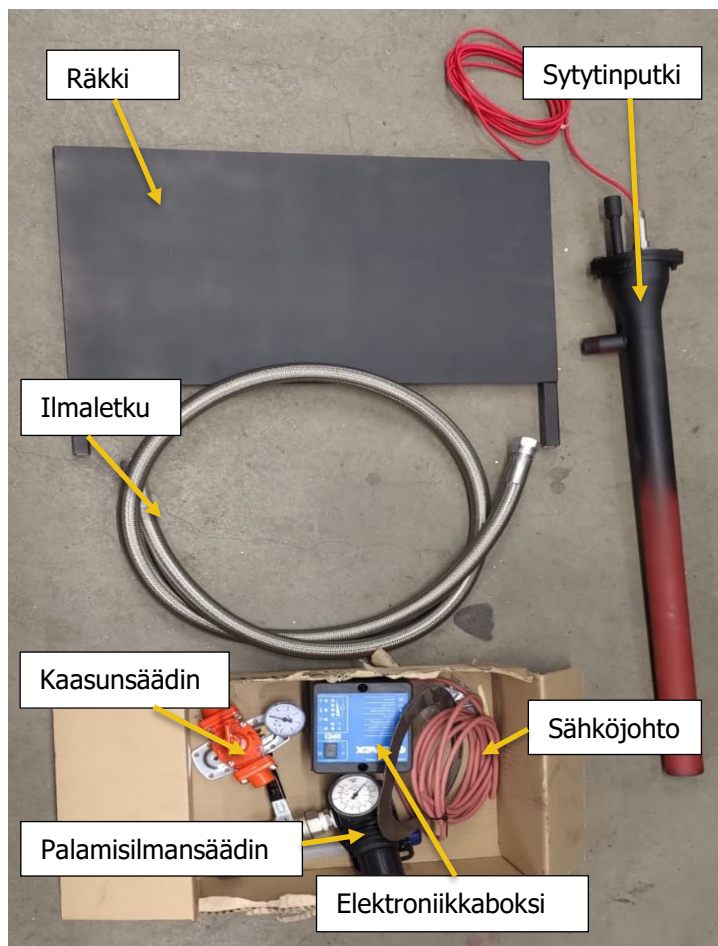
KUVA 4. Esimerkkikäyrästä leijupetikattilan tyypillisestä ylös lämmityksestä (Huhtinen & muut, 2008)

### 3 SAVONIAN STARTTIPOLTIN

#### 3.1 Taustatietoa

Savonian energiantutkimuskeskuksen leijupetikattilaan asennettu uusi starttipoltin on Varkautelaisen Clean Flame Oy:n valmistama nestekaasulla toimiva poltin, joka on teholtaan 250kW ja se on räätälöity juuri tähän kattilaan sopivaksi. Poltin on käytännössä Clean Flame Oy:n kaasusytyttimestä modifioitu versio. Clean Flame Oy oli joitakin vuosia sitten löytänyt heidän komponenttitoimittajaltaan ratkaisun, jossa kipinäsauva ja ionisaatioliekinvalvonta on samassa, ja niille löytyy myös valmis elektroniikkaboksi. Kun Savonialta oltiin heihin yhteydessä, ja kysyttiin, olisiko heillä ratkaisua leijupetikattilaan tarvittavaan starttipolttimeen, niin he lupasivat selvittää asiaa lisää, koska valmistajan poltintarvikkeita ei löytynyt heidän valikoimastaan. Poltinasiat selvitellessä kävi ilmi, että joitakin vuosia sitten heidän komponenttitoimittajaltansa löydetyn ratkaisun komponentit ovat edelleen saatavilla ja he alkoivat suunnittelemaan toimivaa ratkaisua, kuinka systeemit saadaan rakennettua heidän sytyttimeensä. (Räsänen, 2022)

Kuvassa 5 on starttipoltinratkaisun toimitussisältö, johon kuului sytytyspoltin, poltinohjausboksi liekinvalvonnalla, kaasunsäädin, palamisilmansäädin, palamisilmansäätimen ja sytyttimen välinen letku, sähköjohto, räkki johon komponentit asennettiin kiinni sekä kiinnityslaippa pallonivelellä (kuva 6) jolla liekkiä voidaan hiukan suunnata.

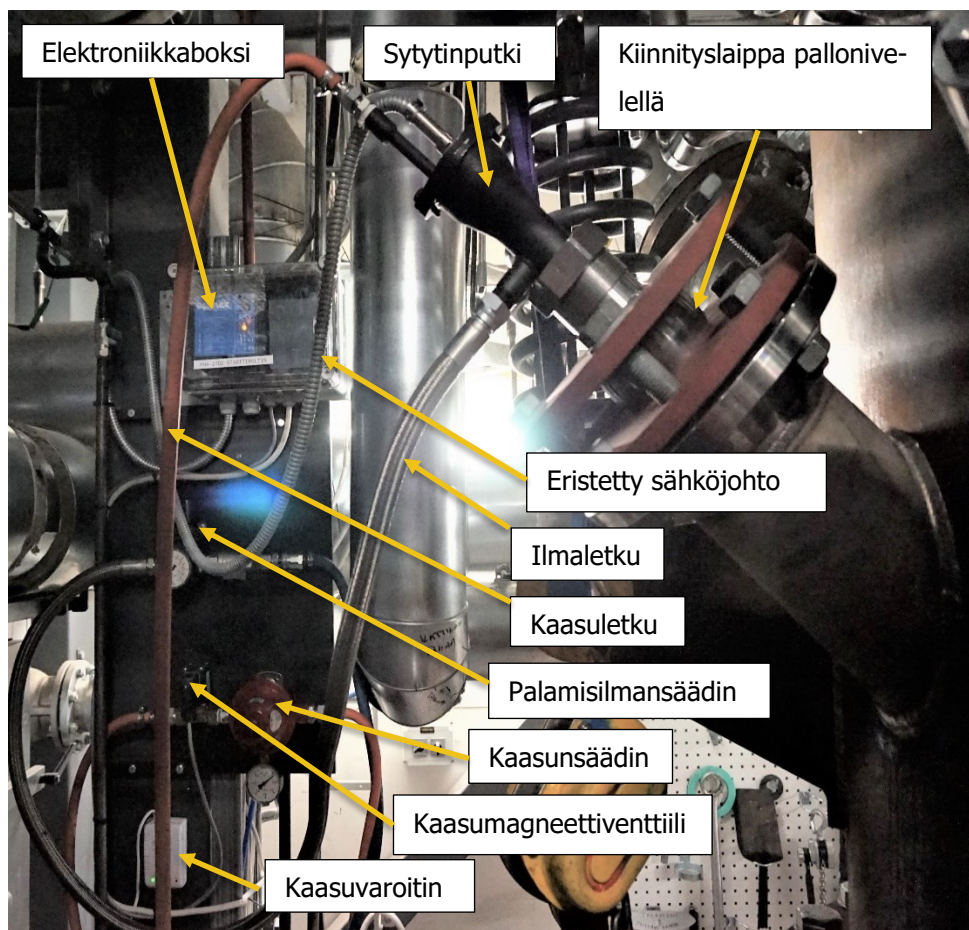


KUVA 5. Starttipoltinratkaisun toimitussisältö (Luukkonen, Valokuva, 2022)



### 3.2 Polttimen asennus

Starttipolttimen asennus kattilaan tehtiin joulukuussa 2022. Polttimen toimittaja asensi kiinnityslai-pan kattilaan, johon sytytinputki kiinnitetään. Seuraava työvaihe oli rakin paikalleen asentaminen ja polttimen ohjauskomponenttien kiinnittäminen rakkiiin. Seuraavaksi teetimme kymmenen metriä pit- kän kaasuletkun liittimeen paikallisessa teollisuuspalveluja tarjoavassa yrityksessä, jotta kaasupullo saataisiin tarpeeksi etäälle kattilasta lämpösäteilyn vuoksi. Paineilmalinjan ja säätimen välisen ilma- letkun teimme varastokontista löytyneestä paineilmaletkusta, jonka jälkeen kaasu- ja palamisilmalet- kut asennettiin paikalleen omatoimisesti ja päästiin teettämään polttimen sähköistys tarvittavat luvat omaavalla yrityksellä. Pienien vaikeuksien jälkeen löysimme yrityksen, jolla on tarvittavat luvat ja joka ehtisi homman hoitamaan. Sähköistyksen teki Varkautelainen Elpro Oy. Polttimen sähköistyksen yhteydessä eristettiin sytytysyksikön ja sytyttimen välinen sähköjohto (kuva 6) mahdollisten sähköis- kujen eliminoinemiseksi. Asensimme myös kaksi kappaletta kaasuvaroittimia poltinohjauskomponent- tien (kuva 6) ja kaasupullon (kuva 7) välittömään läheisyyteen mahdollisten kaasuvuotojen varalta. Hälyttimet alkavat pitämään kovaa ääntä, jos ne havaitsevat kaasuvuodon ja ne todettiin toimiviksi kaasuletkujen asennuksen yhteydessä.



KUVA 6. Starttipoltin paikalleen asennettuna (Hämäläinen, 2023)



KUVA 7. Kaasupullo ja toinen kaasuvaroittimista (Hämäläinen, 2023)

### 3.3 Savonian starttipolttimen toimintaperiaate

Sytyttimessä on ulkoputki, johon palamisilma johdetaan (kuva 8). Sisällä menee pienempi putki, johon nestekaasu johdetaan (kuva 8). Ulkoputken sisällä menee myös kipinäsauva, jossa on ruostumaton putki ulkovaippana, keraaminen eriste ja ruostumaton lanka eristeen sisällä (kuva 8). Sauvan päässä on aluslevyn tyyppinen pieni metallilevy, joka on eristeen avulla erotettu ulkoputkesta noin 2–3 mm. Tähän väliin syntyy kipinä, joka sytyttää kaasun. Ruostumattoman langan päässä on erikoislankaa, joka osuessaan liekkiin antaa ionisaatiotiedon, että liekki on päällä.

Yhtä ainoaa johtoa pitkin kulkee muuntajalta sähkö kipinää varten ja ionisaatiotieto takaisin elektronikkaboksille. Elektronikkaboksissa (kuva 9) on vain yksi, on/off kytkin, jonka avulla käynnistys tapahtuu ja se on asennettu erilliseen muovikoteloon turvallisuussyistä, ettei tule vahinko sytytyksiä tai sammutuksia. Muovikoteloon on porattu noin 6 mm reikä on/off kytkimen kohdalle, josta sytyttämisen voi suorittaa esimerkiksi ohutta ruuvimeisseliä apuna käyttäen

Palamisilma laitetaan päälle ja säädetään sopivaksi palamisilmansäätimellä (kuva 10). Kaasu laitetaan päälle ja säädetään kaasunsäätimestä (kuva 11) sopivaksi.

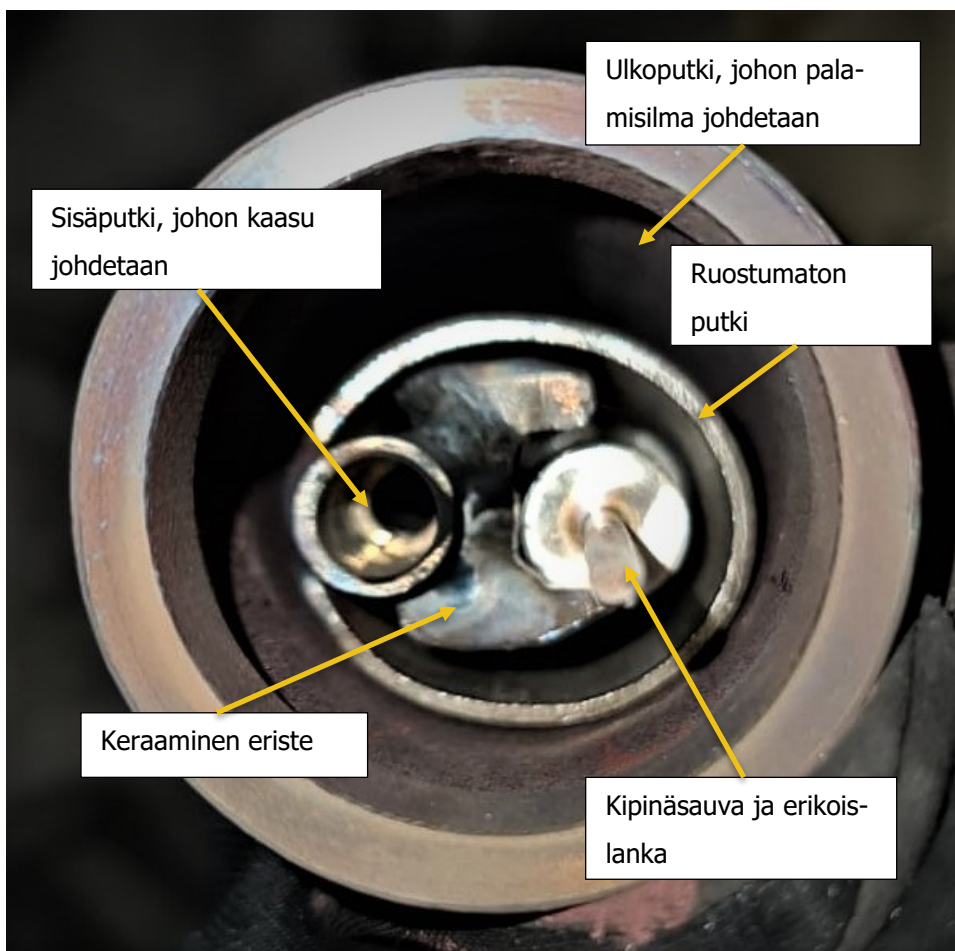
Kun elektronikkaboksin kytkin kytketään ON-asentoon, kaasumagneettiventtiili (kuva 11) avautuu, kipinä alkaa sytyttämään ja poltin syttyy. Kun poltin on syttynyt, niin elektronikkaboksi saa ionisaatiotiedon syttymisestä. Liekin intensiteettiä pystyy seuraamaan elektronikkaboksissa olevien neljän led- valon avustuksella. Kun kaikki neljä valoa palaa, niin liekki palaa täydellä intensiteetillä.

Jos poltin ei syty, niin kaasumagneettiventtiili sulkeutuu ja sytytys alkaa automaattisesti uudestaan pienen viiveen jälkeen. Kun kytkin kytketään OFF-asentoon, kaasun magneettiventtiili sulkeutuu ja liekki sammuu.

Palamisilma on hyvä säätää paineensäätimellä sopivaksi. Tällöin säätimeen ei tarvitse enää koskea, kun ilman laittaa kiinni. Mikäli tämän haluaisi automatisoiduksi, niin se vaatisi toisen ns. ohituslinjan ilmalle ja sille myös magneettiventtiilin ja oman paineenalentimen. Elektoniikkaboksi pystyy ohjaamaan kahta magneettiventtiiliä tarvittaessa. Koska polttimelle ei tule erillistä jäähdytysilmavirtaa, palamisilma toimii myös polttimen jäähdytysilmana. Palamisilman tulee virrata koko ajan kattilan ollessa käynnissä, ettei sytytin/poltin pala rikki tai likaannu. (Räsänen, 2022)

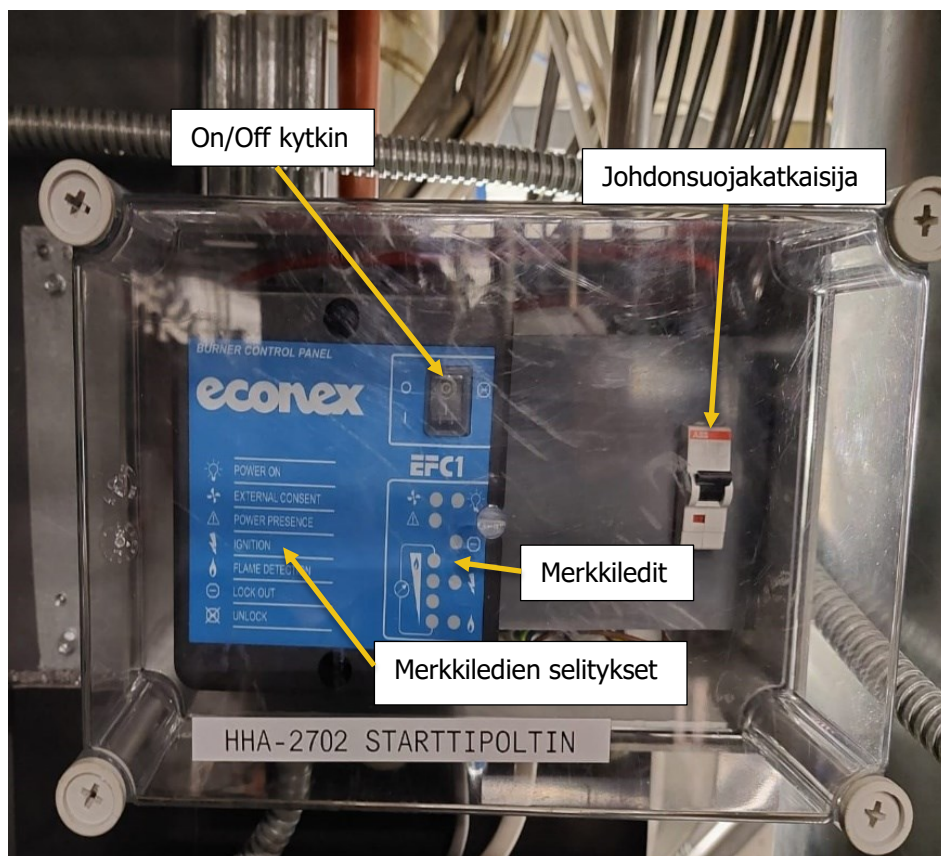
### 3.4 Huolto

Starttipoltin on lähestulkoon huoltovapaa. Käytön jälkeen kannatta kuitenkin tarkistaa ja tarvittaessa puhdistaa palopää suuttimen tukkeutumisen varalta.

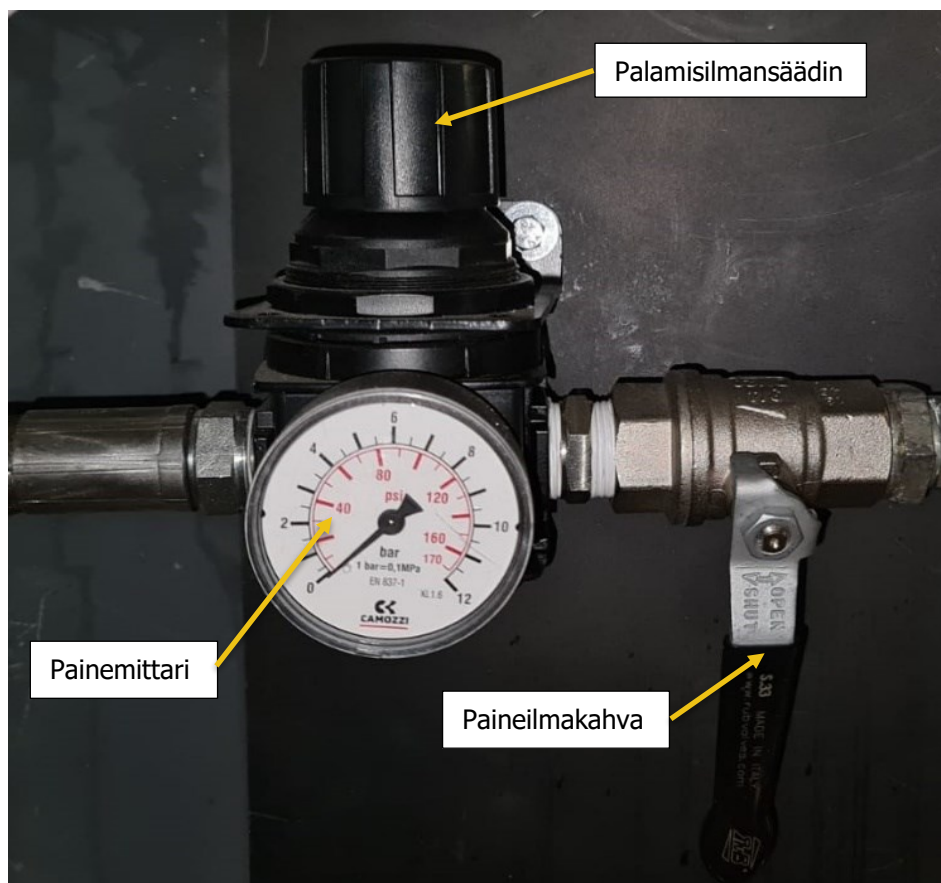


KUVA 8. Sytyttimen palopää (Lohi, 2023)



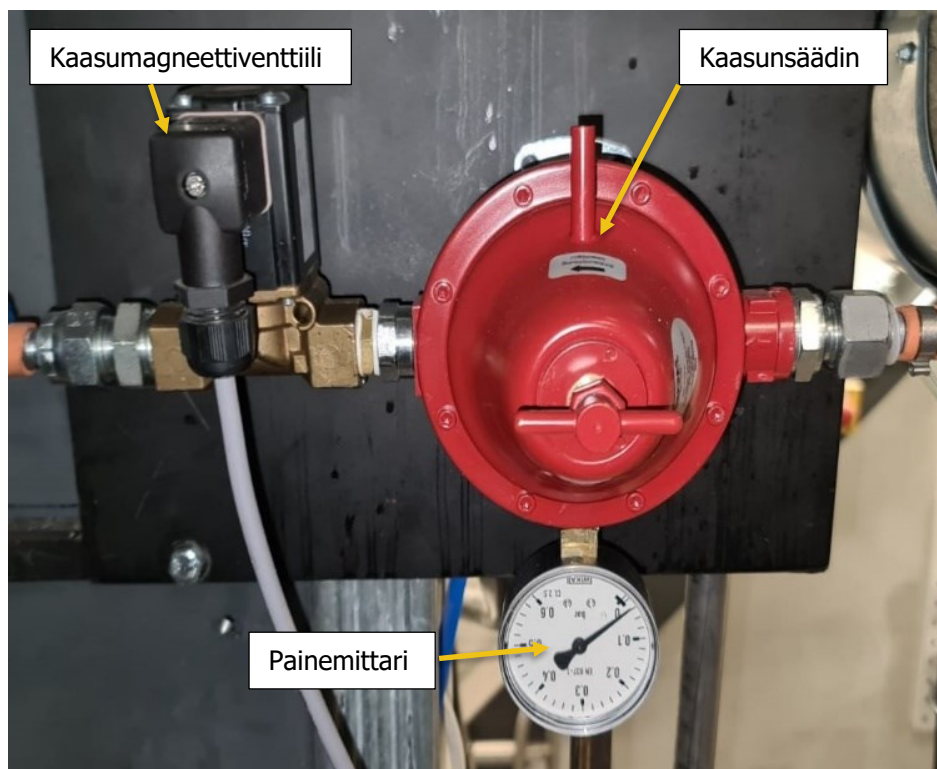


KUVA 9. Starttipolttimen ohjausyksikkö (Hämäläinen, 2023)



KUVA 10. Palamisilmansäädin (Hämäläinen, 2023)





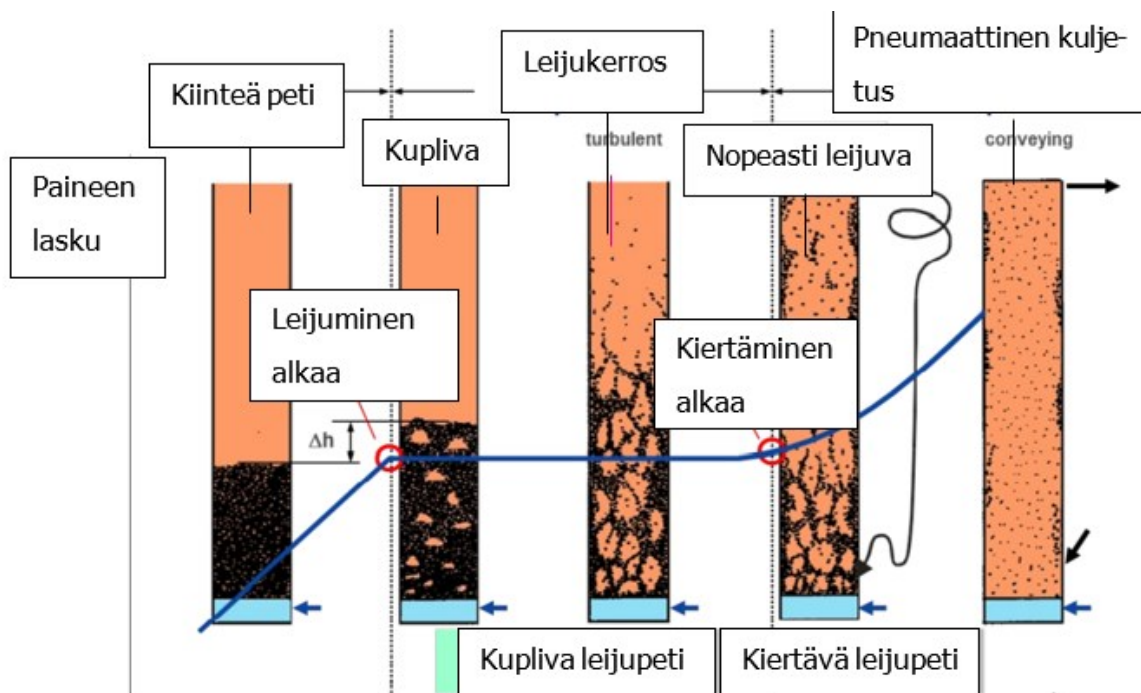
KUVA 11. Kaasunsäädin ja kaasumagneettiventtiili (Hämäläinen, 2023)

## 4 LEIJUKERROSPOLTTO

Leijukerros poltto voidaan toteuttaa joko kuplivassa leijukerrossa (kerrosleiju) tai kiertoleijukerrossa (kiertoleiju). Kerrosleijussa leijukerros hiukkaset pysyvät leijukerrossa, kun taas kiertoleijussa kiintoainehiukkaset kulkevat leijutuskaasun mukana pois leijutustilasta ja ne palautetaan takaisin jatkuvuustilan aikaansaamiseksi. Leijupoltossa leijukerros lämpötila vaihtelee 750...950°C. Lämpötilan ylärajan on oltava polttoaineen tuhkan pehmenemisrajan alapuolella, jottei tapahtuisi hiekan sintraantumista tuhkan vaikutuksesta. (Raiko & muut, 2002)

### 4.1 Leijutuksen vaiheet eri ilmannopeuksilla

Hyvin pienellä ilman nopeudella puhutaan kiinteästä leijukerroksesta (fixed bed), jolloin petimateriaalissa ja pedin pinnalla ei näy olennaisia muutoksia. Tietty ilman nopeus, jota kutsutaan minimileijutusnopeudeksi leijukerros alkaa elämään voimakkaasti (bubbling bed) ja siinä havaitaan selviä kuplia ja se alkaa käyttäytymään kiehuvan nesteen tavoin. Kun ilman virtausnopeutta kasvatetaan edelleen voimakkaasti, petimateriaali alkaa karata kaasuvirran mukana ja siirtyään kiertopetialueelle (circulating bed). Alla olevassa kuvassa (kuva 12) on havainnollistettu leijupedin käyttäytyminen eri ilmannopeuksilla. (Holopainen, 2022)



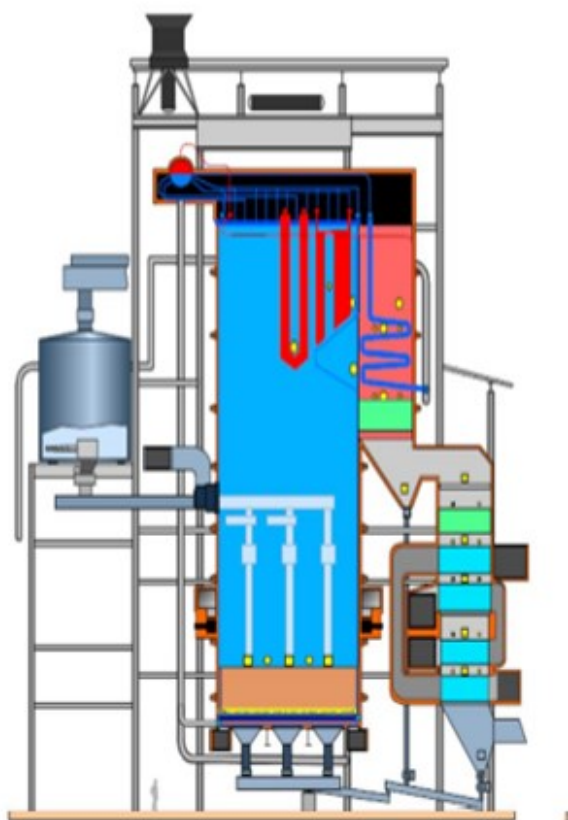
KUVA 12. Leijupedin käyttäytyminen erilaisilla ilmannopeuksilla. (Holopainen, 2022)

### 4.2 Kupliva leijukerros

Tietyillä polttotekniikoilla, kuten leijukerros poltolla voidaan vähentää ympäristölle aiheutuvaa kuormitusta ja lisätä lämmön energiatehokkuutta. Leijupetikattilassa polttoaine palaa leijuvassa petimassassa, joka koostuu kalkkikivipartikkeleista. Leijupedin lämpötilaa säätämällä voidaan hallita voima-

kattilan typpi- ja rikkipäästöjä. Lisäksi ne soveltuvat hyvin eri polttoaineille. Pedin suuren lämpökapasiteetin ansiosta kosteat polttoaineet, kuten biomassa tai yhdyskuntajäte, joilla on matalammat lämpöarvot, voidaan polttaa leijupetiteknikalla hyvällä hyötysuhteella. (Kulju, 2020)

Kosteaa polttoainetta sekoitetaan kuumaan hiikkakerrokseen ja kuivuu nopeasti ja lämpenee syttymislämpötilaan. Suuri lämpökapasiteetti tasaa myös polttoaineen laatuheilahteluja tehokkaasti. Leijupetiteknikassa leijutetaan raekooltaan pieniä hiikkapartikkeleita (keskiraekoko 1–3 mm) ja ne muodostavat tulipesään hiikkapedin. Hiikkapetiä leijutetaan tulipesän pohjasta kohdistuvan ilmavirran avulla ja kun ilmavirtauksen aiheuttama hiikkapartikkeleihin kohdistuva voima on yhtä suuri kuin maan vetovoima, alkaa hiikkakerros leijua. Nopeutta, jolla kerros alkaa leijua kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Kun ilmavirran nopeus on minimileijutusnopeutta suurempi, leiju kerros alkaa kuplia. Tätä kutsutaan kuplivaksi leijukerrokseksi (Bubbling Fluidized Bed, BFB). Leijukerroksen lämpötilaa säädetään kattilaan tuotavan palamisilman, eli primääri- ja sekundääri-ilman avulla. Primääri-ilma tuodaan pohjasuuttimen kautta. Sekundääri-ilma tuodaan leijukerroksen päälle muutamalle eri tasolle muutamia metrin arinan yläpuolelle. Palamisilmaa voi säätää leijukerroskattiloissa hyvin laajasti ja kaiken kaikkiaan säätöalue kattilalle on laaja minimitehon ollen n. 30 %. Kuvassa 13 on kuplapetikattilan leikkauskuva. (Huhtinen & muut, 2000)



KUVA 13. Kuplapetikattilan leikkauskuva (Hanski, 2018)

## 5 ENERGIATUTKIMUSKESKUS

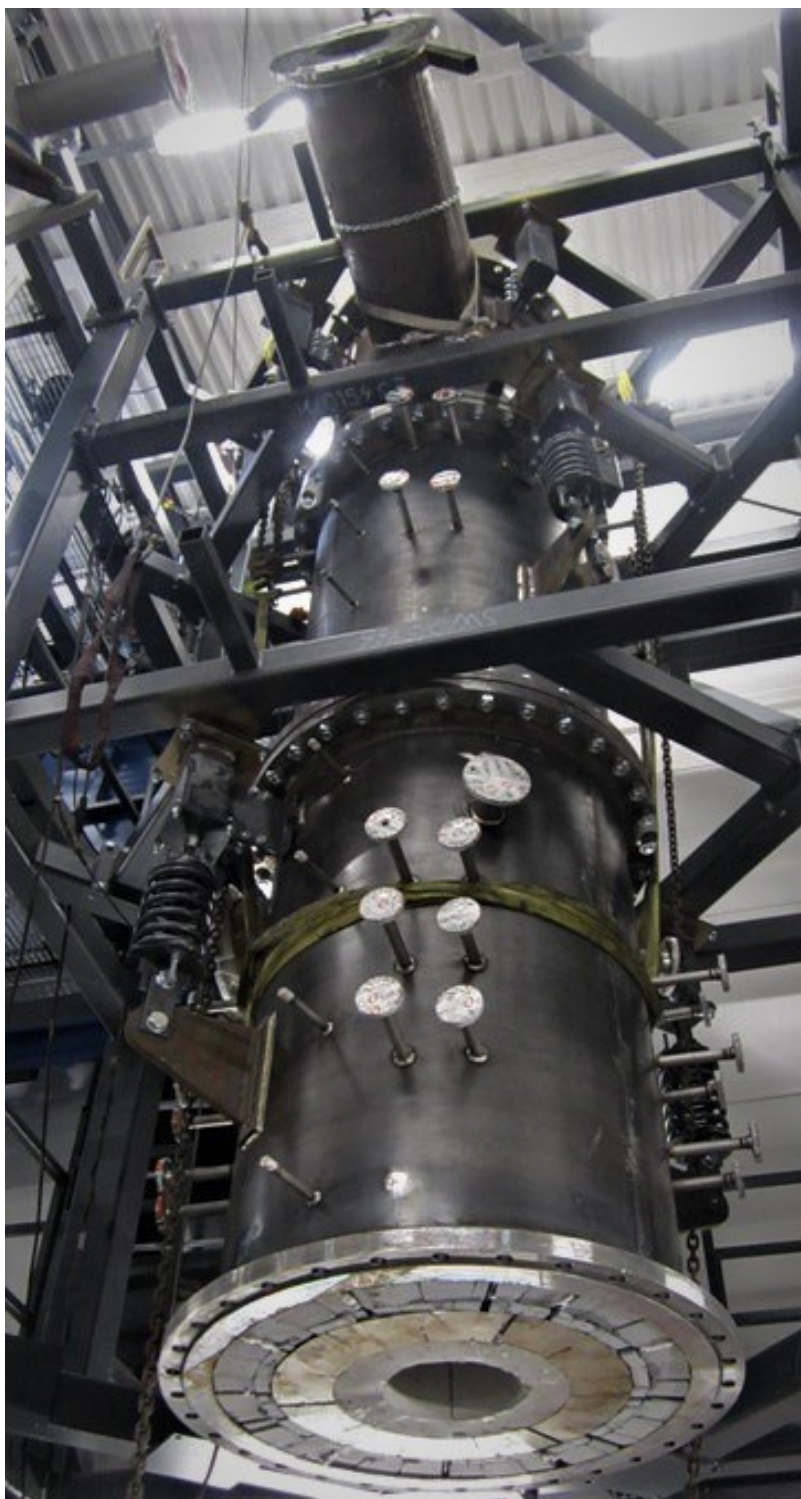
Savonian energiatutkimuskeskus tarjoaa tuotekehitys- ja testaus- sekä koulutuspalveluja energiantuotannon, siirron ja jakelun sekä energiavarastoinnin osa-alueilla teknologia-alan yrityksille ja muille yhteisöille.

Kuvassa 14 on Savonian energiantutkimuskeskus, jonka sydän on neljästä eri segmentistä ja takavedosta koostuva kupliva leijupetikattila (kuva 15). Kattilan korkeus on 8 metriä ja teho korkeintaan 300 kW. Tulipesän halkaisija on 494 mm, savukaasumäärä 600 nm<sup>3</sup>/h ja hiekkapatjan korkeus arinalla 500 mm. Leijupedillä pystytään tutkimaan muun muassa polttoaineen vaihtelun ja sekoitussuhteen vaikutuksia palamiseen sekä kiertokaasun syötön vaikutuksia kattilaan. Kattilassa on myös suuri määrä mittaussyhteitä, joilla voidaan tutkia polton aikana tapahtuvaa lämpötilakäyttäytymistä kattilan eri vyöhykkeissä. Kattilasta poistuva savukaasu voidaan ohjata suodattimien kautta piippuun tai korroosiotestauskammioon, jossa voidaan testata savukaasujen korroosio-ominaisuuksia ja tarkastella kuinka erilaiset polttoaineet vaikuttavat savukaasujen korroosio-ominaisuuksiin. Järjestelmässä on erillinen sisäpiippu sekä savukaasupuhallin sivuvirrälle, jolle voidaan tehdä erilaisia testejä kuten katalyytin syöttö ja puhdistustestaukset ja verrata saatuja arvoja päävirrasta saataviin arvoihin. Leijupetikattilan rinnalla on lisäksi arinakattila, jolla otetaan talteen leijupediltä tulevien savukaasujen energia. Arinakattila on teholtaan 500 kW. Tulipesän halkaisija on 1,2x1 m ja syvyys 2,3 m. Arinakattilalla on myös oma biopoltin, jolla voidaan polttaa pellettiä, haketta ja turvetta. (Savonia, energiatutkimuskeskus, 2022)



KUVA 14. Energiatutkimuskeskus (Hämäläinen, 2023)





KUVA 15. Leijupetikattila (Savonia, energiatutkimuskeskus, 2022)

## 6 STARTTIPOLTTIMEN TESTIAJO

### 6.1 Testiajon aikataulu, tavoitteet ja esivalmistelut

#### 6.1.1 Aikataulu

Koeajopäiväksi valikoitui keskiviikko 1.3.2023 klo: 8 alkaen. Koeajolle oli varattu aikaa yksi työpäivä eli noin kahdeksan tuntia. Koeajo loppuisi siihen, kun tavoitteeksi asetetut asiat olisi saatu selvitettyä ja paikat laitettua järjestykseen sekä hiekkapeti poistettua kattilasta. Jos ongelmia ilmenisi, niin olimme valmiita jatkamaan hiukan myöhempään. Varapäiväksi oli varattu torstai 2.3.2023, jos jostain syystä joutuisimme siirtämään ennalta sovittua päivää.

#### 6.1.2 Tavoitteet

Koeajon tavoitteena oli starttipolttimen testiajoin avulla tutkia polttimen soveltuvuutta energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilan esilämmittämiseksi lämpötilaan, jolla varmistetaan pääpolttoaineen turvallinen syttyminen, eli lämpötilaan noin 400°C pääpolttoaineen syttymispisteen mukaan. Pääpolttoaineena tutkimusleijupetikattilassa on pääsääntöisesti erilaiset hakkeet. Tavoitteena oli myös selvittää starttipolttimen käyttöönottoon ja käyttämiseen liittyviä seikkoja sekä polttimen optimaalisinta toimintatapaa ja lämmityksen aikana syntyviä päästöjä.

#### 6.1.3 Esivalmistelut

Esivalmistelut aloitettiin 20.2.2023 tarkoituksena testata poltinta sen verran, että liekki saadaan varmasti syttymään ja varsinaisena testiajopäivänä voidaan keskittyä itse testaamiseen. Onneksemme, näin päätettiin toimia, koska emme saaneet liekkiä kuin hetkellisesti palamaan, kunnes kaasupullon takaiskuventtiili sulkeutui ja kaasun tulo lakkasi. Kokeilimme muutaman kerran sytyttää uudestaan, mutta sama toistui jokaisella sytytyskerralla. Lisäksi havaitsimme kaasun hajua ja päätimme tuulettaa kattilan ja lopettaa testaamisen.

Soitimme poltintoimittajalle ja sovimme, että hän tulisi 23.2 aamulla katsomaan, josko poltin saataisiin toimimaan niin kuin kuuluu. Aloitimme noin klo 9 testaamaan poltintoimittajan johdolla starttipoltinta mutta sama toistui, kuin aikaisemmin. Poltin ei suostunut jäämään päälle. Vedimme sytyttimen pois kattilasta ja kokeilimme sytyttää poltinta sen maatesa huoltotason päällä, jotta näkisimme, millainen liekki siihen tulee, kun kokeilemme sytyttää. Sytytettyämme polttimen selvisi, että poltintoimittajan mukaan liekki on aivan liian suuri, ja hän ei ole omissa kokeiluissaan saanut koskaan yhtä suurta liekkiä aikaiseksi.

Jätimme asian hautumaan, ja poltintoimittaja lupasi vielä iltapäivällä palata selvittämään asiaa. Jatkoimme asian selvittämistä ja poltintoimittaja päätti soittaa kaasusäätimen toimittajalle ja varmistaa onko meillä oikeanlainen säädin. Puhelusta selvisi, että kaasusäädin, jonka toimittaja oli tilannut, on erilainen mikä on toimitettu ja asennettu meille paikalleen. Säädin on mitoitettu suuremmalle kaasunkulutukselle, eikä sitä voi säätää meille sopivaksi.

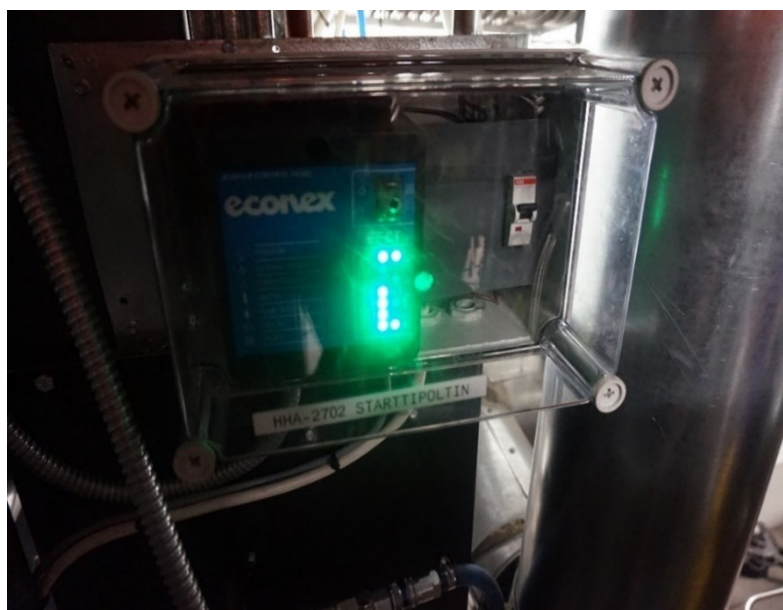
Säätimen toimittaja lupasi toimittaa oikean säätimen seuraavana maanantaina ja poltintoimittaja lupasi käydä vaihtamassa oikeanlaisen säätimen paikalleen tiistaina, eli päivä ennen sovittua testiajoa. Ja näin myös tapahtui. Kun säädin oli vaihdettu oikeanlaiseen niin poltin saatiin syttymään ja polttimen toimittaja teki optimaaliset säädöt kaasun- ja ilmanvirtauksille.

Varsinaisen koeajon esivalmistelut aloitettiin koeajoa edeltävänä päivänä varmuuden vuoksi siksi, että esivalmisteluihin kuuluva aika voidaan hyödyntää varsinaiseen koeajoon. Esivalmisteluun kuului kaasupullojen 5x 11 kg hommaaminen ja tuominen sisätiloihin lämpiämään, petihiekkojen 120 kg punnitseminen ja kantaminen yläkertaan valmiiksi sekä kaasuvaroittimien asentaminen ja niiden toiminnan testaaminen. Savonian TKI- osaston työntekijät tekivät esivalmistelut muiden töiden ohessa.

## 6.2 Kuvaus testiajon kulusta

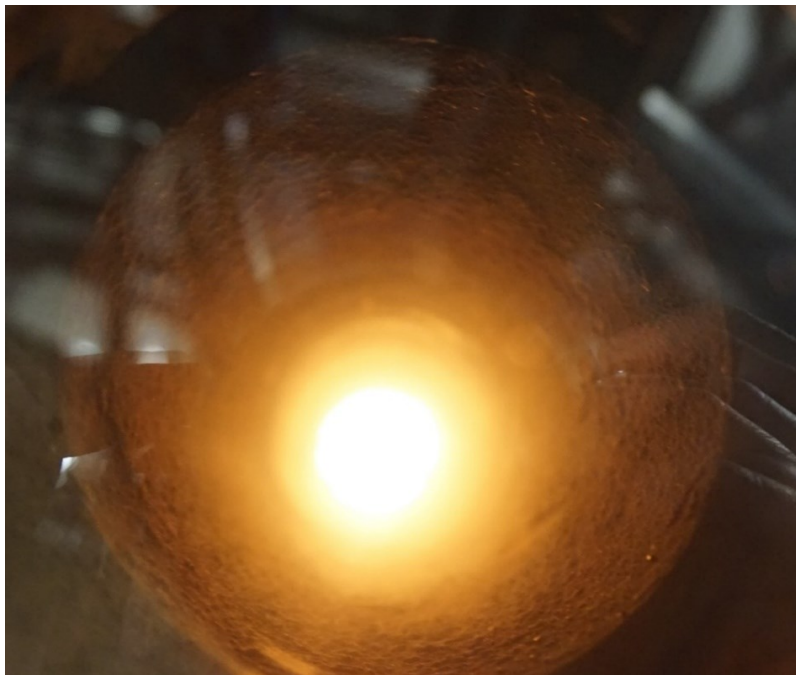
Saavuimme sovitus koululle keskiviikkona 1.3.2023 klo 8. Aamukahvien jälkeen sekä päivän agendasta keskusteltuamme siirryimme Energiatutkimuskeskukselle. Aloitimme hommat laittamalla ilmakompressorin päälle, kiinnittämällä letkun kaasupulloon sekä asentamalla FTIR- savukaasuanalysointitorin kanavaan. Seuraavaksi varmistimme vielä mahdolliset kaasuvuodot letkujen liitännöistä vuotosprayn avulla. Vaikka kaasuvaroittimet olivatkin käytössä, niin tuplavarmistus on hyvä tehdä, kun käsitellään räjähdysherkkiä aineita.

Seuraavaksi käynnistettiin savukaasu- ja palamis-ilmapuhaltimet, joiden nopeutta säädetään tajuusmuuttajilla, joilla puhaltimen kierroslukua säädetään prosentteina. Laitoimme petiin 80 kg hiekkaa. Kello 9.04 päätimme kokeilla starttipolttimen sytyttämistä. Ensimmäisellä sytytyskerralla liekki syttyi mutta ei jäänyt palamaan ja kaasupullon takaiskuventtiili lukittui, jonka seurauksena kaasun tulo sytyttimelle lakkasi. Takaiskun lukituksen poisto tehtiin kaasupullost ja uuden sytytysyrityksen jälkeen liekki jäi palamaan. Myös elektroniikkaboksissa olevat palamisen intensiteettiä kuvaavat led valot alkoivat palamaan. (kuvat 16 ja 17)



KUVA 16. Liekki palaa täydellä intensiteetillä (Hämäläinen, 2023)





KUVA 17. Palamista havaittavissa näkölasisyhteessä (Hämäläinen, 2023)

Kun liekki jäi palamaan, aloimme seuraamaan liekin käyttäytymistä näkölasista, pedin lämpenemistä sekä päästöjä. Noin 20 minuutin testiajon jälkeen liekki alkoi hiipumaan ja luulimme, että kaasu alkaa loppumaan pullostasta, joten päätimme vaihtaa pullon. Pullon vaihdon jälkeen tehtiin uusi sytytys ja lisäsimme hiekkaa petiin. Pedin lämpötila mittaus näytti tässä vaiheessa 249°C ja kattilan ylemmissä kerroksissa oli myös alkanut tapahtumaan lämpenemistä.

Jatkoimme lämmittämistä, kunnes noin 40 minuuttia edellisestä pullonvaihdosta havaitsimme, että liekki alkaa taas hiipua ja oletimme pullon olevan taas tyhjä. Lisäsimme uuden pullon paikalleen, sytytimme polttimen ja lisäsimme hiekkaa petiin. Liekkiä näkölaseista tarkasteltuamme päätelimme, että liekki nuolee kattilan takaseinää ja suuntasimme sitä enemmän alaviistoon kohti hiekkapetiä niin paljon kuin pallonivel mahdollisti, sekä hiukan vasemmalle sytyttimestä katsottuna. Jätimme sytyttimen tähän asentoon ja jatkoimme lämmittämistä.

Noin puoli tuntia edellisestä pullon vaihdosta liekki hiipui taas ja vaihdoimme uuden kaasupullon. Samalla huomasimme, että pullo on myös todella kylmä ja päätimme punnita aikaisemmin tyhjiksi luulemamme pullot. Huomasimme pullot punnittuamme, ja verrattuamme niiden painoa täyteen kaasupulloon, että kaasua oli kulunut vain muutamia kiloja. Pullossa oleva propaani oli ilmeisesti päässyt jäätymään eikä painetta enää ollut ja siksi kaasun tulo oli hiipunut. Kun vertaa kuvia 18 ja 19 voi todeta miten liekki käyttäytyy, kun propaani alkaa jäätymään ja paine pullossa alkaa pudota.



KUVA 18. Liekki ennen propaanin jäätymistä (Hämäläinen, 2023)

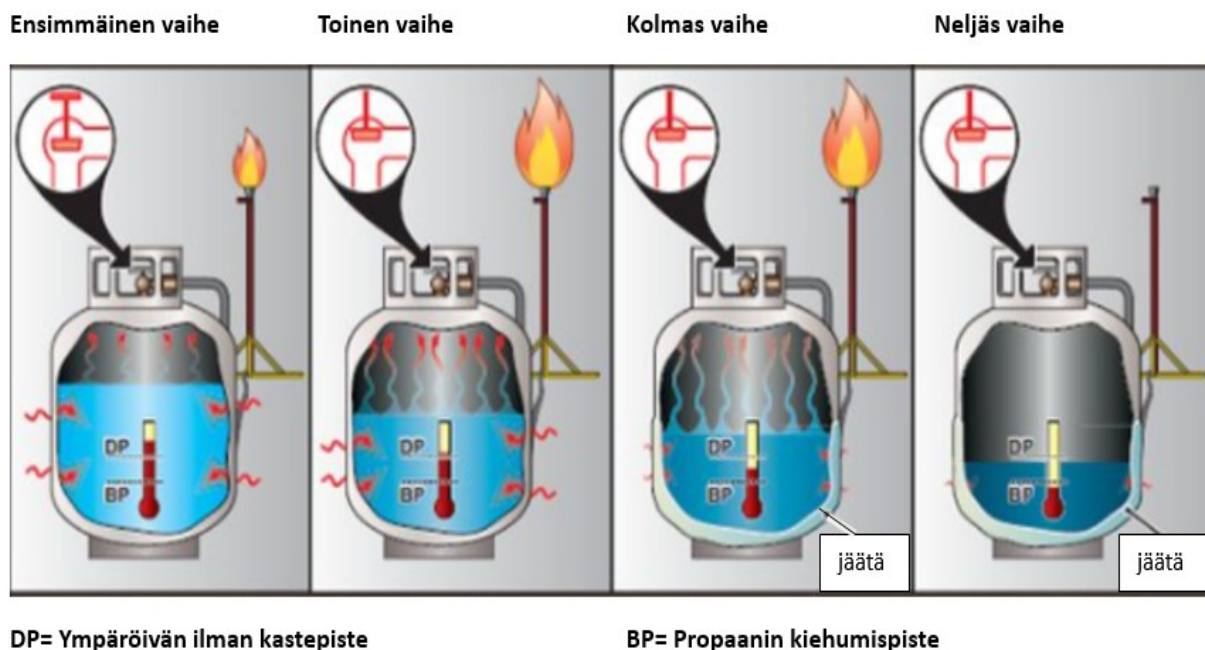


KUVA 19. Liekki kun propaani jäätyy ja kaasun tulo heikkenee (Hämäläinen, 2023)

Asiaa selviteltyämme tulimme siihen tulokseen, että starttipoltin kuluttaa niin paljon kaasua, että 11 kilon teräspullon höyrystymiskyky ei riitä. Alla olevassa animaatioissa (kuva 20) on kuvattu propaanin käyttäytyminen, silloin kun kaasun kulutus ylittää pullossa olevan nestekaasun höyrystymiskyvyn.

Ensimmäisessä vaiheessa kaasun kulutus on maltillista ja lämpöhäviö on yhtä suurta kuin absorboitunut lämpö. Propaanin lämpötila pysyy vakaana. Toisessa vaiheessa kulutusta kasvatetaan ja höyrystymisnopeus lisääntyy. Jäähdytys ylittää absorboituneen lämmön ja propaani alkaa jäätyä. Kolmannessa vaiheessa nestekaasun lämpötila alittaa ympäröivän ilman kastepisteen rajan ja pullon seinämiin alkaa muodostua huurretta, mikä vähentää lämmön imeytymistä merkittävästi. Kastepiste on se ilman lämpötila, jossa ilman sisältämän vesihöyryn tiivistyminen alkaa ja se on riippuvainen

lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Neljännessä vaiheessa lämpötila laskee alle propanin kiehumispisteen ( $-42^{\circ}\text{C}$ ). Höyrystyminen pysähtyy kokonaan ja liekki sammuu.



KUVA 20. Propanin käyttäytyminen, kun kaasun kulutus ylittää pullon höyrystymiskyvyn (Linde, 2021)

Liitteessä 1 on esitetty propanin fysikaaliset ominaisuudet ja höyrinpaineen kuvaaja lämpötilan funktiona. Liitteessä olevia tietoja apuna käyttäen voi laskea starttipolttimen teoreettisen kaasun kulutuksen (kaava 1). Starttipolttimen teho on  $250\text{ kW}$  eli se kuluttaa täydellä teholla energiaa tunnin aikana  $250\text{ kWh}$ . Propanin hyötylämpöarvo on  $12,8\text{ kW/kg}$ . Oletetaan että starttipoltinta täy-tyä ajaa 3 tuntia ( $h$ ) täydellä teholla riittävän petilämpötilan saavuttamiseksi.

$$3\text{ h} * \frac{250\text{ kWh}}{12,8\frac{\text{kW}}{\text{kg}}} = 58,5\text{ kg} \quad (1)$$

Teoreettinen kaasunkulutus kolmen tunnin ylös lämmityksen aikana on  $58,5\text{ kg}$ .

Höyrinpaineen kuvaajasta selviää sama kuin yllä olevasta animaatiosta, eli kun pullossa olevan propanin lämpötila laskee, niin myös paine laskee ja lopulta propani saavuttaa kiehumispisteen, jolloin paine on  $0\text{ bar}$ . Tästä voidaan päätellä, että  $11\text{ kg}$  teräksisen kaasupullon höyrystymiskyky ei riitä tuottamaan tarpeeksi kaasua starttipolttimen tarpeisiin. Pullossa olevan nestekaasun märkäpinta-ala on liian pieni, jonka seurauksena nestekaasun lämpötila ja höyrinpaine alkaa nopeasti laskea ja kaasun tuotto loppuu.

Päätimme, että tilaamme yhden suuremman pullon ( $33\text{ kg}$ ) koekäyttöön. Uutta pulloa odotellessamme laitoimme lämpöpuhaltimen lämmittämään kaasupulloa, joka on ajovuorossa, että propanin

jäähtyminen hidastuisi ja saisimme hiukan pidempään ajoaikaa. Laitoimme myös toisen lämmittimen sulattamaan jäätyneitä vajaita pulloja.

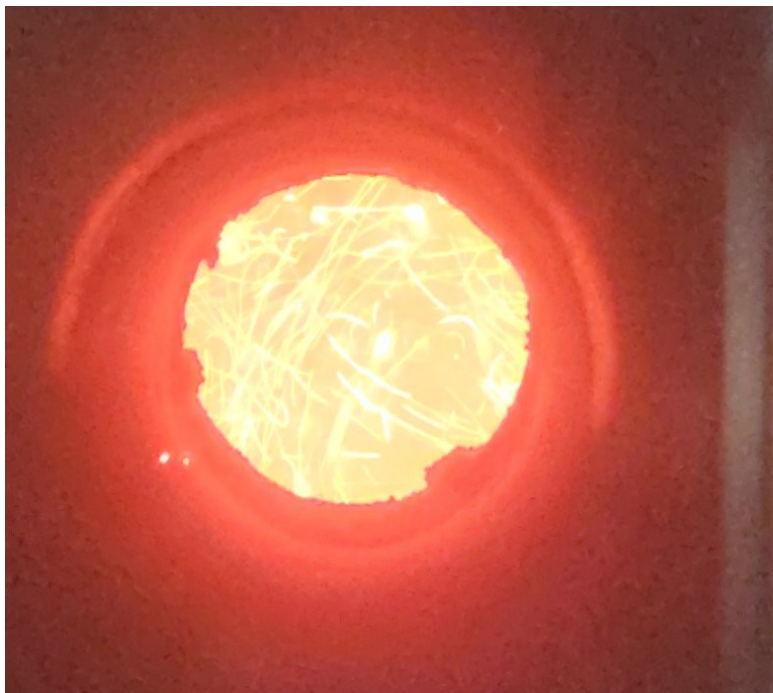
Suuremman pullon saatuamme (kuva 21) vaihdoimme sen heti ajoon ja jatkoimme kattilan lämmittämistä. Lisäsimme myös palamisilma puhaltimen kierroksia, että petihiekka saataisiin liikkeelle. Starttipolttimen liekki ei aivan näyttänyt tavoittavan paikallaan olevan hiekkapedin pintaa, joten olettimme, että hiekan saaminen tarpeeksi kuumaksi vaatii sen liikkeelle laittamisen palamisilmapuhaltimen kierroksia lisäämällä, jotta hiekka sekoittuu polttimen liekin kanssa ja kuumenee.

Tässä vaiheessa pystyimme jo toteamaan, että starttipoltin kykenee lämmittämään pedin kiinteän polttoaineen syöttämisen aloittamisen vaatimaan lämpötilaan. Päätimme kuitenkin vastoin alkupeleistä suunnitelmaa kokeilla syöttää kiinteää polttoainetta kattilaan, jotta varmistuisimme sen turvallisuudesta syttymisestä. Aloitimme pelletin syöttämisen kattilaan ja pidimme starttipolttimen edelleen pelletin tukena. Pedin lämpötila alkoi kohota ja otimme FTIR- savukaasuanalysointorin pois kanavasta, ettei se vahingoitu.

Sammutimme starttipolttimen ja totesimme, että kattila on ylösajettu ja voimme lopettaa testaamisen. Näkölasisyhteestä katsomalla (kuva 22) pystyimme toteamaan, että hiekka kuplii kattilassa niin kuin sen pitääkin silloin kun se on tarpeeksi kuumaa. Testiajo päättyi, kun saimme paikat järjestykseen ja hiekkapedin poistettua kattilasta. Totesimme myös, että suurempi pullo oli alkanut mennä jäähän (kuva 21), mutta kaasun tulo ei ehtinyt loppua ennen kuin lopetimme ajon.



KUVA 21. Kokeilussa suurempi kaasupullo, joka on myös alkanut keräämään huurretta (Hämäläinen, 2023)



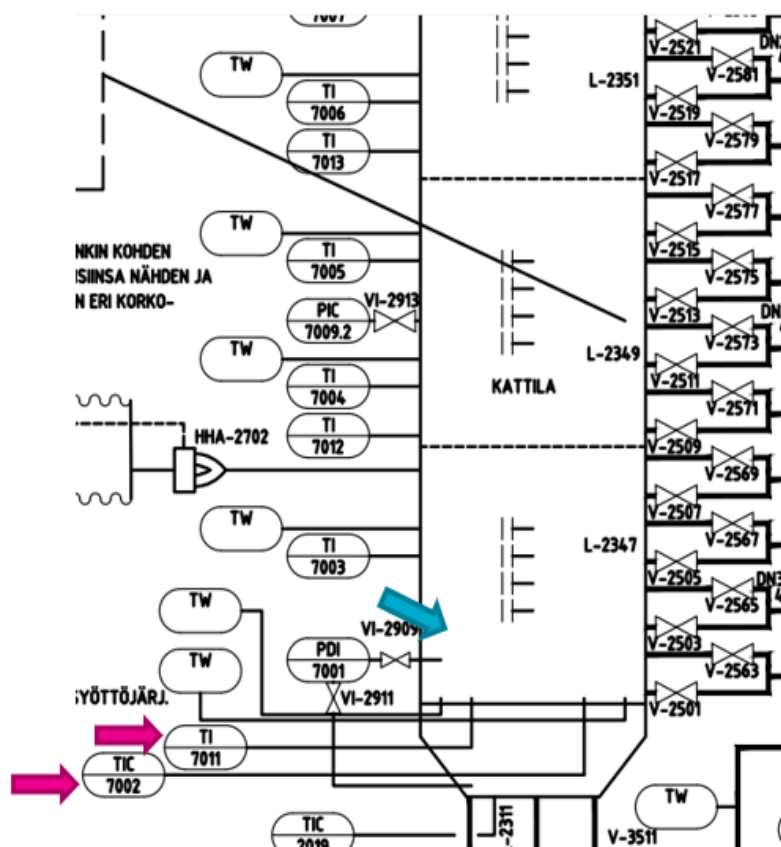
KUVA 22. Lopputilanne näkölasisyhteydestä katsottuna (Hämäläinen, 2023)



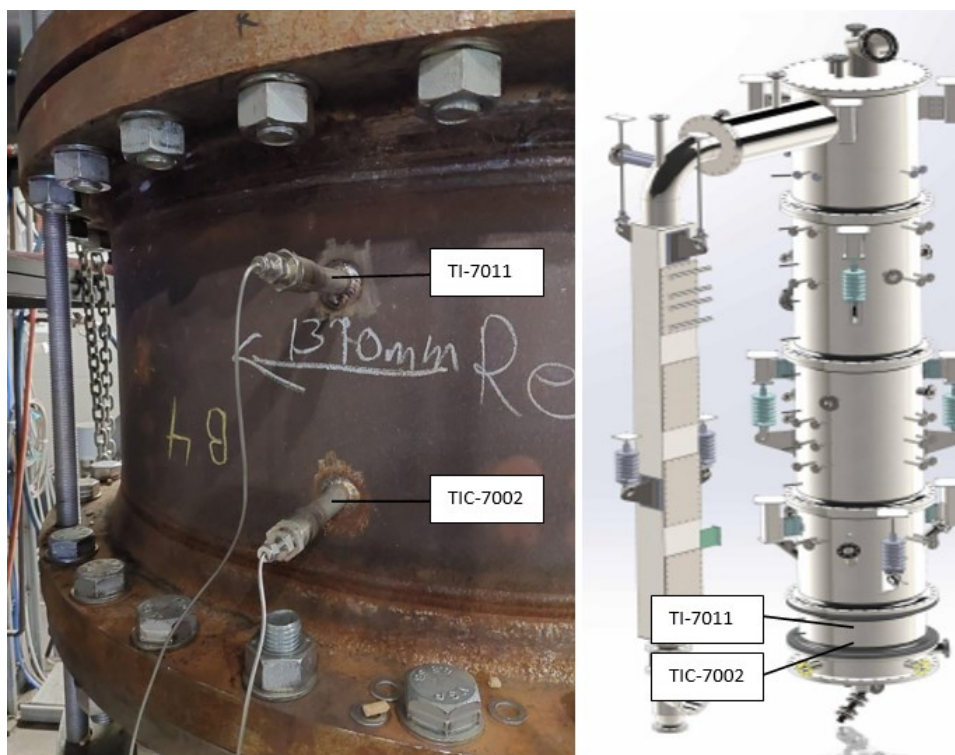
## 7 TESTIAJON TULOKSET

### 7.1 Petilämpötila

Testiajon pääasiallinen tavoite oli selvittää, pystyykö starttipolttimella esilämmittämään petihiekan kiinteän polttoaineen syttymispisteen vaatimaan lämpötilaan ja missä ajassa se tapahtuu sekä millaisia päästöjä starttipolttimen käynnistysvaiheessa sekä lämmittämisen aikana syntyy. Tulokset tulkittiin jälkikäteen laitosdataa ja savukaasujen mittausdataa tutkimalla. Petilämpötilan muutoksia tarkasteltiin lämpötila-anturi TIC-7002:n ja TIC-7011:n (kuvat 23 ja 24) mittausdatasta, koska ne sijaitsevat hiekkapedissä. Anturit on merkitty kuvaan 23 punaisella nuolella ja starttipolttimen sijainti sinisellä nuolella. Myös koeajopäivänä tehdyt muistiinpanot, ja valvomopöytäkirja (Liite 2) olivat apuna tulosten tulkinnassa. Tulosten tarkastelussa on keskitytty pedin esilämmittämisen kannalta asioihin ja toimiin, jotka voivat vaikuttaa petilämpötilaan. Koeajon aikainen lämpötilan mittausdatan voimakas vaihtelu vaikeutti tulosten tulkintaa.



KUVA 23. Kuvaleike tutkimuskattilan ilma- ja savukaasu PI- kaaviosta (Hämäläinen, 2023)



KUVA 24. Lämpötila-anturien TIC-7002 ja TI-7011 sijainnit kattilassa (YLönen, 2023, muokattu) (Juutilainen, 2015, muokattu)

Kuvassa 25 on laitosdataa starttivaiheesta. Kuvasta selviää, että, lämpötila-anturit reagoivat heti kun starttipoltin on sytytetty. Poltin startattiin valvomopöytäkirjan mukaan klo 9.04 jolloin lämpötila-anturi TIC-7002 näytti lukemaa 25°C ja TIC-7011 lukemaa 26,7 °C. Palamisilmapuhallin oli sytytysvaiheessa 50 % nopeudella.

Aika	TIC-7002	TI-7011
09:05:00	30,90277672	38,8888855
09:05:01	31,59722137	40,97222137
09:05:02	31,94444275	42,70833206
09:05:03	34,72222137	44,09722137
09:05:04	36,45833206	46,18055344
09:05:05	34,72222137	49,65277481
09:05:06	36,11111069	50,34722137

KUVA 25. Kuvaleike laitosdatasta noin minuutti starttipolttimen sytyttämisen jälkeen. Molemmat petin lämpötilan mittausanturit reagoivat nopeasti (Hämäläinen, 2023)

Lämpötila pedissä kohosi nopeasti ollen mittausdatan mukaan viidentoista minuutin lämmittämisen jälkeen jo noin TIC-7002 310°C ja TI-7011 noin 520°C. Palamisilmapuhaltimen nopeutta oli nostettu 50 % -> 80 %. Tämän jälkeen lämpötila alkoi nopeasti laskea, koska kaasun tulo starttipolttimelle heikkeni propaanin jäätyminen vuoksi. Lisäksi kattilaan syötettävä palamisilma jäädyttää petiä tehokkaasti, kun polttoaineteho ei ole riittävä. Pullon vaihdon jälkeen petin lämpötila alkoi taas nopeasti kohoamaan ollen aikaleimalla 9.38:36 TIC-7002 373°C ja TI-7011 645°C. Palamisilmapuhaltimen nopeus oli tässä vaiheessa 90 %.

Tämän jälkeen anturi TIC-7002:n mittaustulos romahtaa ollen aikaleimalla 10:00:00 enää 28°C. Syytä tähän voi vain arvailla. Mitään toimenpiteitä ei tehty, joka voisi vaikuttaa mittaustulokseen. TIC-7002 sijaitsee alempana pedissä, kuin TI-7011 joten yksi mahdollinen syy voisi olla leijutuksen lakkaaminen mittausanturin kohdalla, jolloin anturi jää niin sanottuun staattiseen hiekkapetiin. Hiekka pysyy paikallaan eikä starttipolttimen liekki tavoita sitä. Palamisilmapuhaltimen ja ilman syötön asetuksia tutkimalla ei löydy mitään selkeää syytä miksi anturi lopettaa mittaamisen. Myös anturi TI-7011 mittaustulos laskee mutta syy siihen on kaasun tulon heikkeneminen polttimelle.

Kaasupullo vaihdettiin uuteen klo 10:08 ja poltin startattiin taas klo 10:13. Mittausanturi TIC-7002 ei reagoinut. Seuraava pullonvaihto ja uudelleen starttaaminen oli klo 10:50. Tämän jälkeen petiin lisättiin hiekkaa, kokonaismäärän ollen tässä vaiheessa 120 kg. Mittausanturi TI-7011 reagoi tähän ja lämpötila tippui hiukan alkaen kuitenkin nopeasti nousemaan uudestaan. Seuraava pullon vaihto ja uudelleen sytytys oli 11:20, jolloin huomasimme käytettyjen pullojen olevan jäässä. Klo 12:00 teimme seuraavan pullon vaihdon tällä kertaa suurempaan pulloon. Käytimme palamisilmapuhallinta noin minuutin ajan 150 % nopeudella petihiekan liikkeelle laittamiseksi ja mittausanturi TIC-7002:n mittaustulos nousikin hetkellisesti, käyden parhaimmillaan 296°C kunnes alkoi taas nopeasti pudota ollen klo 12:15 enää 25°C. Mittausanturi TI-7011 tulos näytti siinä vaiheessa yli 750°C lämpötilaa. Palamisilmapuhaltimen nopeus oli tässä vaiheessa 101 %.

Klo 13:02 lisäsimme palamisilmapuhaltimen nopeuden 118 % ja teimme päätöksen kokeilla kiinteän polttoaineen syttymistä. Klo 13.52 aloitimme pelletin syöttämisen kattilaan TIC-7002 mittaustuloksen ollessa datan mukaan 25°C. Sammutimme starttipolttimen ja nostimme sekä laskimme palamisilmapuhaltimen nopeutta portaittain 118 % ->120 % ->125 %->130 %->135 %->160 %->130 %->135 % ja samalla seurasimme näkölasista pelletin ja petihiekan käyttäytymistä. Sytytimme starttipolttimen uudelleen niin sanotuksi tukipolttimeksi ja huomasimme, että pelletti alkoi palamaan sekä petilämpötila nousta. Myös mittausanturi TIC-7002 alkoi reagoimaan palamisilmapuhaltimen ollessa 135 % nopeudella. TI-7011 mittaustulos näytti hetkellisesti jopa yli 1000°C lämpötilaa, mutta alkoi laskea hiljalleen. Petihiekka alkoi myös selvästi kuplimaan, mikä osaltaan viittasi siihen, että pedin lämpötila on saavuttanut kiinteän polttoaineen syttymisen vaativan lämpötilan. Lisäsimme polttoaineruuvien nopeutta 12 %->15 % jolloin polttoaineen syöttö kattilaan kasvaa ja samalla pienensimme palamisilmapuhaltimen nopeutta. Noin klo 14:40 molemmat anturit näyttivät lähes saman mittaustuloksen. Sammutimme starttipolttimen klo 14.49 jolloin mittaustulos näytti TIC-7002 600°C ja TI-7011 601°C lämpötilan olleen edelleen nousussa.

Klo 15:07 tulimme tulokseen, että kattila on ajettu ylös petilämpötilan ollessa 860°C ja lopetimme polttoaineen syötön kattilaan (kuva 26).

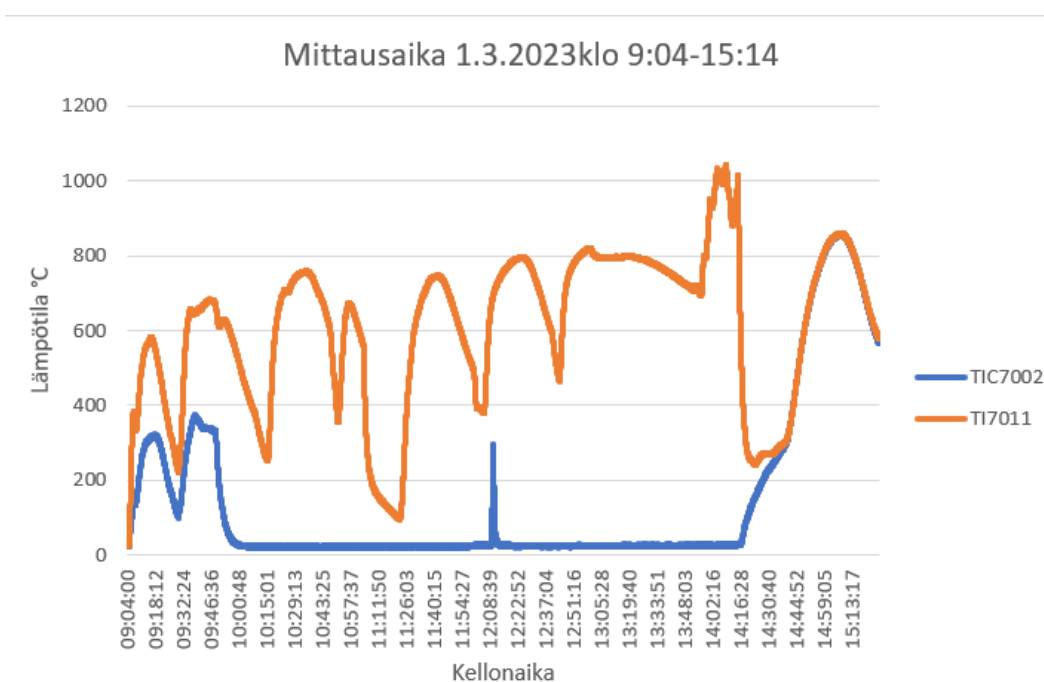


Aika	TIC-7002	TI-7011
15:07:02	856,249939	860,069397
15:07:03	858,333313	858,333313
15:07:04	857,291626	860,416626
15:07:05	855,902771	858,680542
15:07:06	856,597168	860,069397
15:07:07	857,291626	858,333313
15:07:08	860,069397	859,027771

KUVA 26. Kuvaleike laitosdatasta testiajon lopussa (Hämäläinen, 2023)

## 7.2 Yhteenveto

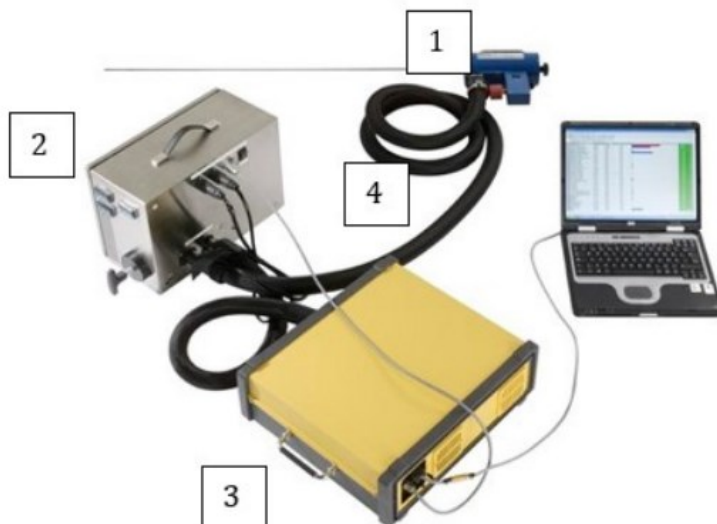
Testiajon perusteella pystyimme toteamaan, että starttipolttimella pystyy esilämmittämään kattilan petimateriaalin kiinteän polttoaineen syttymispisteen vaatimaan lämpötilaan, koska pelletti saatiin syttymään ja kattila ajettua ylös. Lämpötilan mittausdatasta (kuva 27) ei sen sijaan pysty päättelemään missä ajassa tämä tapahtuu, koska mittausanturi TIC-7002:n dataan ei ole luottamista. TI-7011 sen sijaan vaikutti mittaavan luotettavasti, mutta koska anturi sijaitsee hieman ylempänä hiekkapedissä niin pelkästään sen mittausdatan perusteella ei voi tehdä varmoja johtopäätöksiä. Testiajon loppuvaiheessa tehdyt toimet petihiekan liikkeelle saamiseksi vaikuttivat suotuisasti petilämpötilan nousuun. Tämä tehtiin palamisilmapuhaltimen pyörimisnopeutta vaihtelemalla. Kun hiekka saatiin kunnolla liikkeelle ja sekoittumaan polttimen liekin kanssa niin myös mittausanturi TIC-7002:n lämpötilamittaus alkoi toimimaan.



KUVA 27. Lämpötila-antureiden TIC-7002 ja TI-7011 mittausulos automaatiosta (Hämäläinen, 2023)

### 7.3 Savukaasut

Testiajon aikaisen savukaasujen päästömittauksen teimme Gaset DX4000 FTIR (kuva 28) savukaasuanalysointilaitteella. Laitteisto muodostuu näytteenotto-sondista (1), näytteenottojärjestelmästä (2), FTIR analysointilaitteesta (3), näytteenotto-putkista (4)



KUVA 28. FTIR savukaasuanalysointilaitteisto (Luukkonen, 2022)

Voimalaitospöytäkirjan mukaan näytteenotto-sondi laitettiin kanavaan klo 8:32. Mittausdata alkaa klo 9:06 ja starttipoltin sytytettiin ensimmäisen kerran klo 9:04.

Starttipoltin polttoaineena käytetty nestekaasu koostuu pääosin propaanista (95 %) sekä butaanista (5 %). Nestekaasu kuuluu niihin fossiilisiin polttoaineisiin, joilla on vähiten vahingollinen vaikutus ympäristöön. Nestekaasun polttamisesta syntyy propaanin (kaava 2) ja butaanin (kaava 3) palamisyhtälöiden mukaan ensisijaisesti vesihöyryä ja hiilidioksidia. Verrattuna muihin fossiilisiin polttoaineisiin, kuten öljyyn ja kivihiileen nestekaasu sisältää vain vähän terveydelle haitallisia hiukkasia kuten rikkiä.

Propaanin palamisyhtälö on



josta selviää, että 1 mooli propaania ( $C_3H_8$ ) tarvitsee täydelliseen palamiseen 5 moolia happea ( $O_2$ ). Palamisreaktion seurauksena syntyy 3 moolia hiilidioksidia ( $CO_2$ ) ja 4 moolia vettä ( $H_2O$ ).

Butaanin palamisyhtälö on



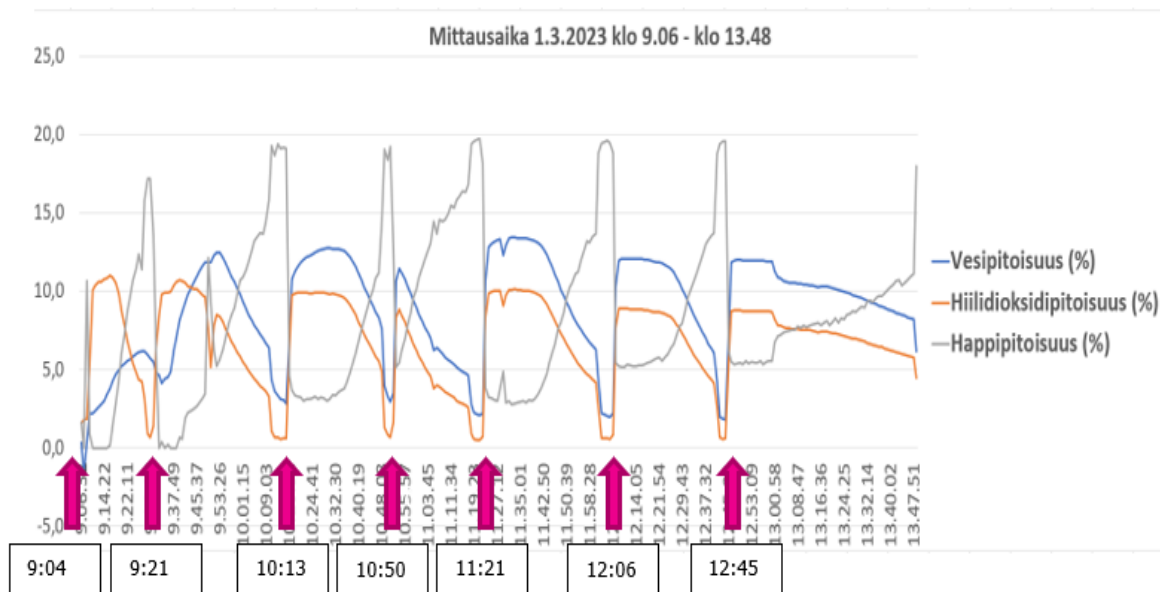
H

josta selviää, että 1 mooli butaania ( $C_4H_{10}$ ) tarvitsee täydelliseen palamiseen 6,5 moolia happea ( $O_2$ ). Palamisreaktion seurauksena syntyy 4 moolia hiilidioksidia ( $CO_2$ ) ja 5 moolia vettä ( $H_2O$ ).

Palaminen tapahtuu täydellisesti silloin, kun palamisreaktioihin käytetään happea vain se määrä, mitä polttoaineen palamisreaktiot vaativat. Käytännössä kuitenkin täydellistä palamista ei saavuteta teoreettisella hapen minimi-ilmamäärällä, vaan palamiseen käytetään normaalisti hieman enemmän happea eli yli-ilmamäärää. Mikäli savukaasut sisältävät reagoimatonta happea, käyttää lämmönlähde palamiseen enemmän ilmaa, kuin mitä palamisreaktiot tarvitsevat. (Puikkonen, 2020)

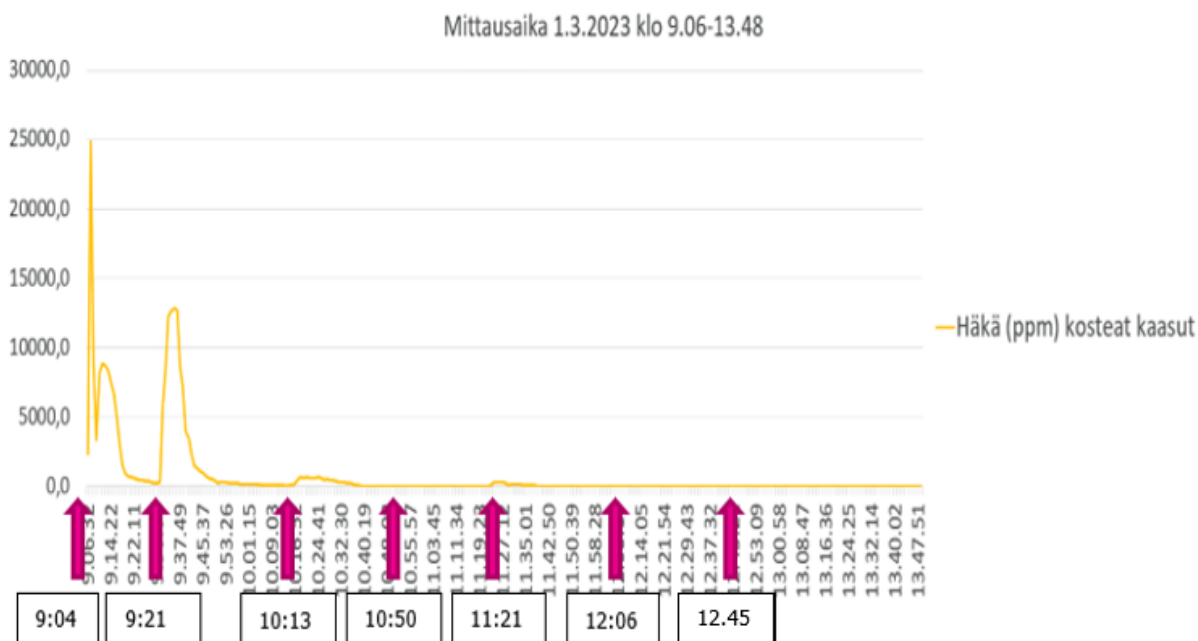
Alla olevassa kuvaajassa (kuva 29) on veden, hiilidioksidin ja hapen määrä savukaasuissa testiajon aikana. Kuvaajaan on nuolilla merkitty starttipolttimen sytytys ajankohdat. Kuvaajasta ilmenee, että jäännöshapen määrä savukaasuissa alkaa voimakkaasti kasvamaan, pian starttipolttimen sytyttämisen jälkeen. 11 kg kaasupullon höyrystymiskyky on liian matala tuottamaan starttipolttimen tehon vaatimaa kaasumäärää. Kaasu alkaa jäätymään ja paine pullossa putoaa, jolloin jäännöshapen määrä lisääntyy ja palaminen on epätäydellistä. Starttipolttimen syttyessä uudestaan jäännöshapen määrä laskee ja hiilidioksidin sekä veden määrä nousee propanin ja butaanin palamisreaktioiden mukaan.

Yhdestä kilosta nestekaasua tulee noin 1,6 kg vettä ja 3 kg hiilidioksidia (Kosangas, 2023)



KUVA 29. Veden, hiilidioksidin ja hapen pitoisuudet savukaasuissa (Hämäläinen, 2023)

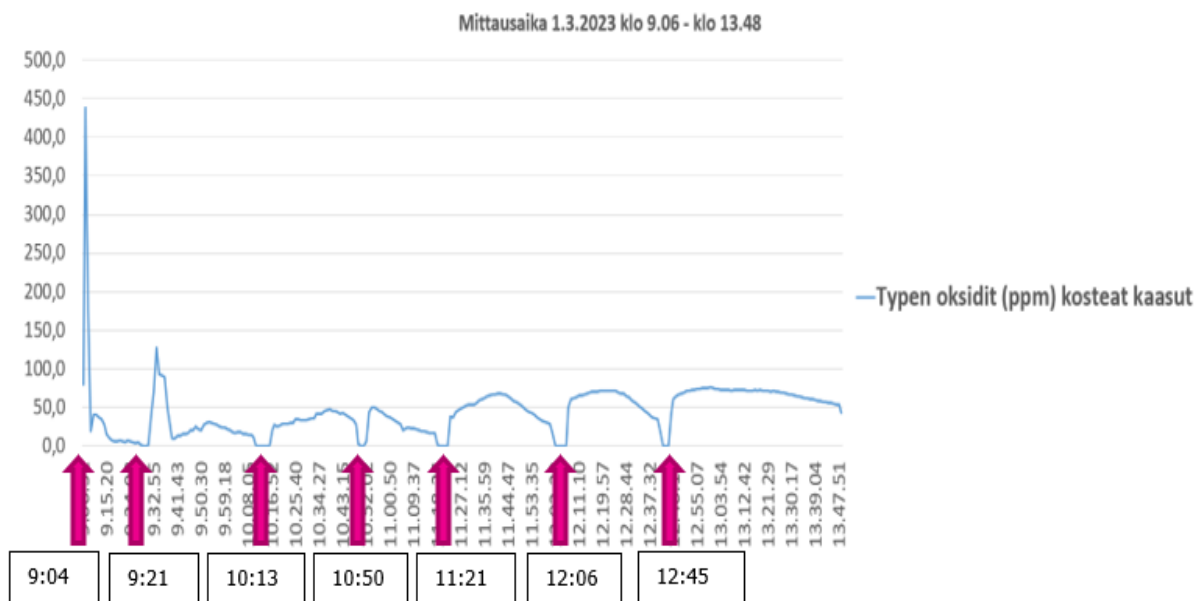
Hiilimonoksidia eli häkää syntyy aina hiilipitoisten aineiden palaessa, mutta jos happea on riittävästi, se palaa edelleen hiilidioksidiksi. Alla olevassa kuvaajassa (kuva 30) on hiilimonoksidin määrä (ppm) happiredusoimattomissa kosteissa savukaasuissa testiajon aikana. Kuvaajan alle on nuolilla merkitty starttipolttimen sytyttämisaikajankohdat. Kuvaajasta käy ilmi, että häkäpitoisuus on ollut varsin korkea polttimen ensimmäisen sytytyskerran klo 9:04 jälkeen. Kun valvomopöytäkirjan mukaan palamisilmapuhaltimen nopeutta on lisätty klo 9:07 niin pitoisuus on alkanut laskea. Sama toistuu toisen sytytyskerran klo 9:29 kohdalla, jolloin palamisilmaa on lisätty klo 9:36 ja häkäpitoisuus laskee lähes nolnaan. Testiajon loppuajana häkää ei enää juurikaan esiinny, eli palamisprosessissa on ollut happea riittävästi.



KUVA 30. Häkäpitoisuus kosteissa savukaasuissa (Hämäläinen, 2023)

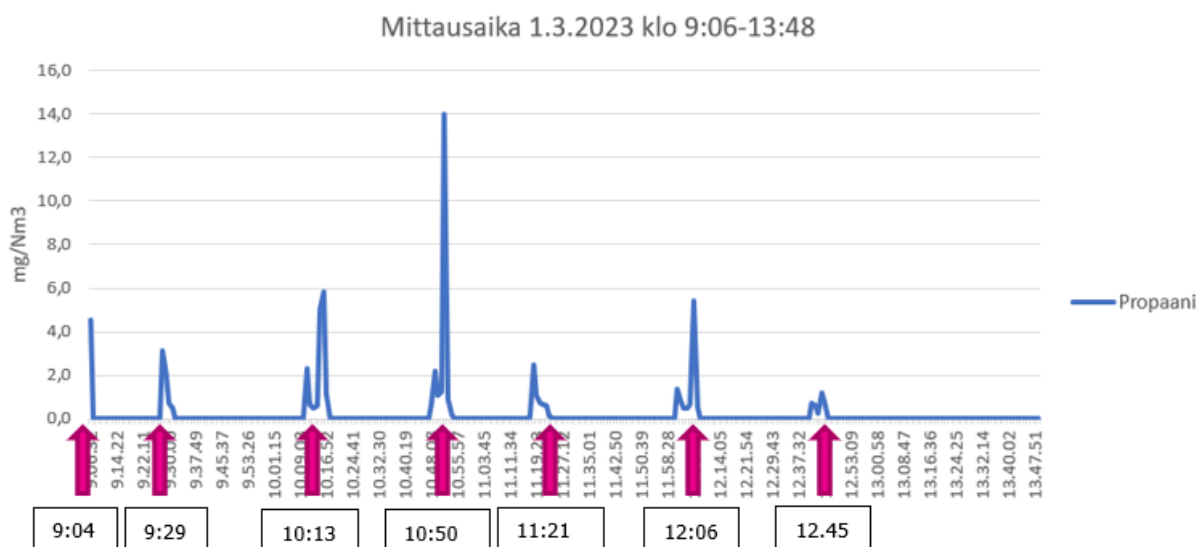
Palamisen yhteydessä muodostuu myös haitallisia typpiyhdisteitä, joista tärkeimmät ovat typpimonoksidi (NO) ja typpidioksidi (NO<sub>2</sub>). Yhdisteistä käytetään yhteisnimitystä NO<sub>x</sub>. Muodostuminen tapahtuu typen ja hapen reagoiessa keskenään. NO<sub>x</sub> yhdisteistä noin 95 % on peräisin NO:sta ja loput NO<sub>2</sub>:sta. Typpioksidipäästöjä mitatessa ei tehdä eroa monoksidien ja dioksidien välillä vaan käytetään yhteistä lyhennettä NO<sub>x</sub>, koska suuri osa typpimonoksidista hapettuu ilmakehässä suhteellisen nopeasti typpidioksidiksi. (Linde Stories, 2022)

Alla olevassa kuvaajassa (kuva 31) on typen oksidien määrä (ppm) happiredusoimattomissa kosteissa savukaasuissa testiajon aikana. Kuvaajan alle on nuolin merkitty starttipolttimen sytyttämisaikankohdat. Kuvaajasta käy ilmi, että myös typen oksidit reagoivat starttipolttimen sytytykseen ja palamiseen. Pitoisuudet nousevat sytytyksen jälkeen, jääden saastuttamaan ja alkavat laskea vasta, kun kaasun tulo starttipolttimelle vähenee.



KUVA 31. NOx pitoisuus savukaasuissa (Hämäläinen, 2023)

Aina kun jokin lämmönlähde sytytetään, niin osa siinä käytettävästä polttoaineesta ehtii mennä niin sanotusti läpi ennen syttymistä. Toisinsanoen pieni määrä polttoaineesta ei ehdi reagoida. Alla olevassa kuvaajasta (kuva 32) käy ilmi, että jokaisen sytytyskerran kohdalla, pieni määrä propania ei ehdi reagoida kipinään, vaan menee savukaasujen joukkoon.



KUVA 32. Propanin pitoisuus savukaasuissa (Hämäläinen, 2023)

## 8 HAVAITUT ONGELMAT JA PARANNUSEHDOTUKSET SEKÄ KEHITYSEHDOTUKSET

### 8.1 Ongelma, syy ja parannusehdotus

Ongelma: Kaasun jäätyminen jonka seurauksena kaasunpaine laskee ja kaasun tulo starttipolttimelle pysähtyy.

Syy: Kun pullosta otetaan kaasua, nestemäisestä kaasusta höyrystyy tilalle uutta kaasumaista kaasua. Tähän tarvitaan lämpöä, mistä seuraa, että pullo ja pullossa oleva nestemäinen kaasu jäähtyy. Starttipoltin kuluttaa niin paljon kaasua, että 11 kilon kaasupullon höyrystymisnopeus ei riitä.

Parannusehdotus: Nestekaasun höyrystymiseen vaikuttavat kaasupaine, lämpötila ja nestekaasun märkäpinta-ala eli nestekaasumäärä. Testiajon aikana kokeilimme suurempaa 33 kilon kaasupulloa, jonka märkäpinta-ala on kolminkertainen verrattuna 11 kilon pulloon, jollaisella aloitimme testiajon. Huomasimme kuitenkin pian, että myös suurempi pullo alkoi jäätymään eli märkäpinta-ala ei riitä. Yhtenä ratkaisuna olisi rakentaa erillinen höyrystin, jonka kautta kaasu kulkee polttimelle. Kustannustehokkain parannusehdotus kuitenkin on, että koska starttipolttimen käyttäminen on satunnaista, niin yhdistetään kaksi 33 kilon kaasupulloa toisiinsa jakotukin avulla. Tällöin märkä-pinta-ala kasvaa riittävän suureksi eikä kesken lämmittämisen tarvitse vaihtaa uutta pulloa. Pulloja voi tarvittaessa yhdistää myös useamman.

Ongelma: Petilämpötilan mittausanturi TIC-7002:n mittaus on epäluotettava

Syy: Todennäköinen syy tähän on, että leijutus on heikkoa anturin kohdalla ja anturi jää staattiseen hiekkapetiin, kun hiekka pysyy paikallaan.

Parannusehdotus: Palamisilmapuhaltimen nopeutta vaihtelemalla hiekka saadaan pysymään liikkeessä. Puhaltimen nopeutta kannattaa vaihdella jo lämmittämisen alusta alkaen, että peti ei joudu staattiseen tilaan.

### 8.2 Kehitysehdotus

Starttipolttimen saaminen laitosautomaation piiriin tulevaisuudessa olisi aimo harppaus eteenpäin. Polttimen voisi tällöin sytyttää valvomosta käsin, mikä olisi helpompaa ja turvallisempaa. Lisäksi tulipesäkameran hommaaminen toisi lisää käyttömukavuutta. Reaaliaikaisen kuvan saaminen mahdollistaisi useampien henkilöiden yhtäaikaisten tulipesän tapahtumien tulkitsemisen. Kuvaa pystyisi käyttämään myös opetustilanteissa esimerkiksi etäyhteyden päässä oleviin oppilaisiin. Lisäksi palamisilman syöttö tulisi tehdä polttimen yhteeseen, jolloin palaminen edistyisi ja turvallisuus paranisi, koska silloin yhteeseen ei pääsisi muodostumaan kaasutaskua.

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan havaita, että energiatutkimuskeskuksen leijupetikattilaan hankitulla nestekaasukäyttöisellä starttipolttimella pystytään esilämmittämään petihiekka kiinteän polttoaineen syttymispisteen vaatimaan lämpötilaan. Kiinteä polttoaine saatiin turvallisesti syttymään ja kattila ajettua ylös. Lämmitykseen tarvittavaa aikaa ei sen sijaan pysty määrittämään testiajon perusteella, koska petilämpötilan mittausanturi TIC-7002:n mittausdata romahti kesken lämmittämisen. Myös propanin jäätyminen starttipolttimen suuren kaasunkulutuksen ja kaasupullon höyrystymiskyvyn riittämättömyyden vuoksi toi haastetta testiajona ja mittausdatan tulkitsemiseen. Sytytyskertoja jouduttiin tekemään useita ja se näkyy mittausdatassa niin, että lämpötila sahaa edestakaisin.

Starttipoltinratkaisu on testiajon perusteella todettu toimivaksi kokonaisuudeksi energiatutkimuskeskuksen käyttöön mutta jos haluaisi tarkemmin selvittää petin lämmittämiseen kuluvaa aikaa ja starttipolttimen optimaalisinta käyttötapaa niin testiajon aikana havaitut ongelmat pitäisi korjata ja suorittaa uusi testiajo.

## LÄHTEET

- Hanski, T. (2018). *Lutpub*. Haettu 28. 1. 2023 osoitteesta Metsä Board Simpele, kattila K6 ajettavuus ja päästöjen hallinta: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153120/DI-ty%c3%b6\\_Hanski\\_Tuomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/153120/DI-ty%c3%b6_Hanski_Tuomas.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Holopainen, P. (7. Helmikuu 2023). (P. Hämäläinen, Haastattelija) Haettu 18. 2. 2023
- Huhtinen, Markku;Korhonen, Risto;Pimiä, Tuomo,Urpalainen, Samu (2008). *Voimalaitostekniikka*. Haettu 24. 1. 2023
- Huhtinen, Markku;Kettunen, Arto;Nurminen, Pasi;Pakkanen, Heikki (2000). *Höyrykattilatekniikka*. Haettu 26. 2. 2023
- Huttunen, K. (2020). *Poltinohjaukset*. Haettu 8. 5. 2023 osoitteesta Theseus: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/291141/Huttunen\\_Kimmo.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/291141/Huttunen_Kimmo.pdf?sequence=2).
- Hämäläinen, P. (2023). Pasi Hämäläisen opinnäytetyön kuvakokoelma.
- Juutilainen, O. (2015, muokattu). *Theseus*. Haettu 27. 3. 2023 osoitteesta Tutkimusleijupetikattilan suunnittelu, kilpailutus ja käyttöönotto: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen\\_Olli.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93584/Juutilainen_Olli.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Karvonen, H. (2013). *Voimalaitospolttimien mitoitusohjelman kehittäminen*. Haettu 14. 2. 2023 osoitteesta Theseus: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53781/Karvonen\\_Henri.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53781/Karvonen_Henri.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Kauppinen, H. (9. Tammikuu 2023). Equipment Engineer, Sumitomo SHI FW. (P. Hämäläinen, Haastattelija) Varkaus. Haettu 4. 3. 2023
- Kosangas. (2023). Haettu 21. 3. 2023 osoitteesta <https://www.kosangas.fi/miksi-nestekaasu/miksi-kannattaa-valita-nestekaasu/ympaeristoe/kosan-gas-ja-ympaeristoe/>.
- Kulju, E. (2020). *CFB-Kattilan starttipolttimen suunnittelualueen modulaarisuusmäärittely*. Haettu 21. 2. 2023 osoitteesta Trepo: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122628/KuljuEsko.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Linde. (2021). *Teollisuuskaasut*. Haettu 12. 3. 2023 osoitteesta [https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde\\_AGA%20nestekaasu\\_tcm634-153756.pdf](https://www.linde-gas.fi/fi/images/Linde_AGA%20nestekaasu_tcm634-153756.pdf).
- Linde Stories. (2022). Haettu 22. 3. 2023 osoitteesta <https://linde-stories.com/fi/osaatko-tulkita-nox-tuloksiasi/>.
- Lohi, J. (2023). Valokuva 2.3.2023. *Sytyttimen palopää*. Savonia ammattikorkeakoulu, Varkaus.
- Luukkonen, A. (2022). Valokuva. *Starttipoltinratkaisun toimitussisältö*. Savonia ammattikorkeakoulu, Varkaus.
- Oilon. (2022). *Polttimet*. Haettu 4. 3. 2023 osoitteesta <https://oilon.com/fi/tuotteet/polttimet/>.
- Ojanen, P. (2001). *Doria*. Haettu 7. 3. 2023 osoitteesta Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät: <https://www.doria.fi/handle/10024/113719>



- Puikkonen, J. (2020). *Savukaasujen lämmöntalteenoton toimintaperiaate sekä kannattavuus kotileipomo Siiskosella*. Haettu 24. 3. 2023 osoitteesta Theseus:  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335684/Puikkonen\\_Joona.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335684/Puikkonen_Joona.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
- Raiko, Risto;Saastamoinen, Jaakko;Hupa, Mikko;Kurki-Suonio, Ilmari (2002). *Poltto ja palaminen*. Haettu 26. 2.
- Räsänen, P. (Joulukuu 2022). Part owner, Clean Flame Oy Ltd. (P. Hämäläinen, Haastattelija)
- Savonia. (2022). *energiatutkimuskeskus*. Haettu 9. 3. 2023 osoitteesta Leijupetikattilaympäristö:  
<https://energiatutkimus.savonia.fi/fi/tilat-ja-laitteet/leijupetikattilaympaeristoe>.
- Vuorinen, I. (2012). *Soodakattilan käynnistyspolttimien käynnistys- ja toimintavarmuuden kehittäminen*. Haettu 26. 2. 2023 osoitteesta Theseus:  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53781/Karvonen\\_Henri.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53781/Karvonen_Henri.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Ylönen, J. (2023). Valokuva 27.3.2023. *TIC-7002 ja TI-7011 anturit*. Savonia ammattikorkeakoulu, Varkaus.

## LIITE 1: PROPAANIN FYSIKAALISET OMINAISUUDET

## Propanin fysikaaliset

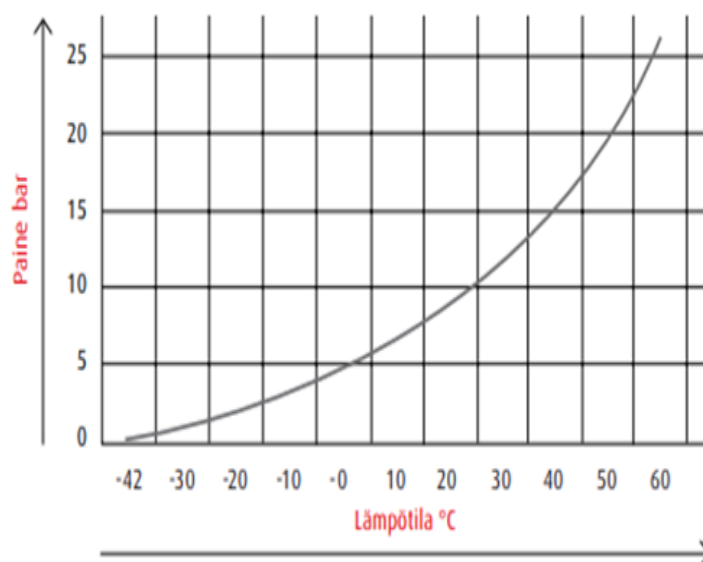
## Yksikkö

## Arvo

ominaisuudet (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)

Kiehumispiste	°C	-42
Tiheys	kg/Nm <sup>3</sup> /15°C	1,88
Hyötylämpöarvo	kW/kg	12,8
Hyötylämpöarvo	MJ/kg	46,4
1 kg nestekaasua sisältää energiaa	kcal	11.070
Liekin lämpö määrä	MJ/Nm <sup>3</sup>	96
Liekin lämpötila ilmassa	°C	2000
Liekin lämpötila hapessa	°C	2850
Liekin palamisnopeus	cm/s	331
Räjähdyksrajat ilmassa	til %	1,5-9,5
Palamisilman tarve (0°C, 1013 mbar)	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	24
Palamisilman tarve (0°C, 1013 mbar)	m <sup>3</sup> /kg	12,1
1 kg nestekaasua tuottaa palaessa CO <sup>2</sup> n.	kg	3
1 kg nestekaasua tuottaa palaessa H <sup>2</sup> O n.	kg	1,6

## Propanin höyrynpaine



## LIITE 2: VALVOMOPÖYTÄKIRJA

Vesimäärä alussa:

Sähkölukema alussa:

PVM Kello Mittim. P-2001 %

PA:n tyyppi

PA-tyyppi

PA-kuusi %

PA-Silon paino kg

Hiekkaa peristis kg

Sivibienijäte kg

Hiekkaa pötiin kg

Muu toimenpide

Sivunro: 1

Nimi:

ONT-AD0 (Pasi Hämäläinen)

Proj.: 13797

Näytteenotto (HY/HA/PT/SNK/SS/PA)

## Valvomopöytäkirja

PVM	Kello	Mittim.	P-2001 %	PA:n tyyppi	PA-tyyppi	PA-kuusi %	PA-Silon paino kg	Hiekkaa peristis kg	Sivibienijäte kg	Hiekkaa pötiin kg	Muu toimenpide
1.3	8:32	JL				37,6	40	40			ETIR kannuun
4.6	8:35	AL									SILON TYHJÄ
1.6	8:45	AL									
1.6	8:46	AL				0,5					
1.6	8:48	AL				26,7	40	40			Kiukaan reorissa 80 kg
1.6	8:49	AL				0,9					
1.6	08:57	AL	50								syötys
1.6	09:04	JL		Kansu							
1.6	9:09	AL	80								
1.6	09:17	JL				7,5	10	10			Pullon vaihto Uudelleen syötys
1.6	09:26	JL	85								
1.6	09:31	JL	90								
1.6	09:40	JL	95								
1.6	09:45	JL	97								
1.6	09:50	JL									Silto tyhjä. Pellissä 90 kg hiekkaa
1.6	09:58	JL				7,5	10	10			Pullon vaihto (100 kg hiekkaa pellissä)
1.6	10:08	JL									Uudelleen syötys
1.6	10:13	JL									Uudelleen syötys
1.6	10:28	JL				7,5	10	10			Uudelleen syötys
1.6	10:41	JL									Uudelleen syötys
1.6	10:46	JL									Silto tyhjä. Pellissä 110 kg hiekkaa
1.6	10:50	JL									Uudelleen syötys
1.6	11:03	JL									Silto tyhjä. Pellissä 120 kg hiekkaa
1.6	11:11	JL	102								
1.6	11:15	JL									Pullon vaihto
1.6	11:21	JL									Uudelleen syötys

Vesimäärä alussa:  
Sähkölukema alussa:

Nimi: **OMT-AJ (Pys. Hämäläinen)**  
Proj.: **33797**

Sivunro: **2**  
Näytteenotto (HY/HA/PT/SYKT/SST/PA)  
Muu toimenpide

Nimim. P-2001 % PA:n tyyppi PA-lisäty kolalle kg PA-ruuvi % PA-sillon paino kg Hiekkaa paino kg Hiekkaa silloon kg Hiekkaa pedistä kg Sivilöintijäte kg Hiekkaa peltiin kg

PVM	Kello	Nimim.	P-2001 %	PA:n tyyppi	PA-lisäty kolalle kg	PA-ruuvi %	PA-sillon paino kg	Hiekkaa paino kg	Hiekkaa silloon kg	Hiekkaa peltiin kg	Muu toimenpide
-13	11:30										Pullonväätty *
-11	12:00	AL									Pullonväätty
-11	12:00	AL			2.0L C → 150						
-11	13:02	JHU			102 → 118						
-11	13:43	JHU			Relatit Polg						
-11	13:47	JL									
-11	13:52	JL									FTIR Pois kannaalta
-11	14:07	JL									Käynnistetty liikkain alusen sätö
-11	14:08	JL			125 → 130 → 160 → 135						
-11	14:19	JL			125						
-11	14:24	JL			130						
-11	14:33	JL			128 → 126						
-11	14:44	JL			126 → 115 → 110						
-11	14:49	JL			108						
-11	14:50	JL									
-11	15:09	JL									
-11	15:25	JL									
-11	16:07	AL									

\* LIIAN PIENET PULLOT VERRATTUNA PÖLTTIMEN TÄHOON. 33kg PULLON TÄYLLIS: FOIMIN (INNOVATION CENTER)