

Tuomas Kokkonen

**LÄMPÖSYKLITESTIT PAKOKAASUJEN  
JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMILLE**

# **LÄMPÖSYKLITESTIT PAKOKAASUJEN JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMILLE**

Tuomas Kokkonen  
Opinnäytetyö  
Syksy 2021  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, auto- ja työkonetekniikka

---

Tekijä: Tuomas Kokkonen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Lämpösyklitestit pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmille

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Thermal cycle testing for exhaust aftertreatment systems

Työn ohjaajat: Esa Väisänen, Hannu Heikkilä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2021

Sivumäärä: 47 + 3 liitettä

---

Opinnäytetyössä suunniteltiin lämpösyklitestit kahdelle Proventia Oy:n kehityksessä olevalle pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmälle. Jälkikäsittelyjärjestelmät on suunniteltu vähentämään Proventian asiakkaiden valmistamien dieselmoottorien päästöjä. Lämpösyklitestien suorittaminen on osa jälkikäsittelyjärjestelmien kestävyysvaatimuksia. Vaatimukset tulivat asiakkailta, ja lämpösyklitestien suoritustavat sovittiin asiakkaiden kanssa. Testien suorittaminen vaatii automaattisesti toimivan lämpösyklityslaitteen, jolla aiheutetaan lämmönvaihtelu jälkikäsittelyjärjestelmään.

Lämpösyklityslaitteelle määritettiin tekniset vaatimukset kuten tarvittava lämpötila ja ilman massavirta asiakkaiden testivaatimusten pohjalta. Teknisten vaatimusten pohjalta pohdittiin erilaisia käyttövoimia, kuten sähköä, polttoöljyä ja kaasua, ja kysyttiin tarjouksia tarvittavista laitteista. Proventian aiemmin valmistaman kuumakaasupuhaltimen suorituskyky testattiin ja sen käyttöä testeihin alettiin suunnitella. Kuumakaasupuhaltimen suorituskyky ei riittänyt alkuperäisiin testivaatimuksiin, mutta asiakkaat suostuivat sen käyttöön testeissä. Kuumakaasupuhallin automatisoitiin lämpösyklitesteihin soveltuvaksi. Lisäksi ensimmäisenä suoritettavaan testiin suunniteltiin tuettu kotelointi testattavalle SCR-manttelille.

Työn tuloksena ensimmäinen suunniteltu lämpösyklitesti saatiin käynnistettyä toukokuun alkupuolella 2021. Työn avulla saatiin lisää tietoa lämpösyklitestienärkevästä toteutuksesta ja erilaisista lämpösyklityslaitteista. Proventian kuumakaasupuhaltimen ominaisuudet dokumentoitiin graafiseen muotoon testaamalla sitä käytännössä. Lämpösyklitestit mallinnettiin ja havainnollistettiin asiakasyrityksille, jotka hyväksyivät käytettävät testimenetelmät. Lämpösyklitestit voitaisiin tilata alihankintatyönä muualta, mutta niiden suorittaminen Proventian omilla resursseilla on testien ostoa edullisempaa. Opinnäytetyö tuki Proventia Oy:tä testien läpiviennissä suunnittelusta toteutukseen.

---

Asiasanat: jälkikäsittelyjärjestelmä, päästöt, diesel, työkone, testaus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Mechanical Engineering, Option of Automotive Engineering

---

Author: Tuomas Kokkonen

Title of thesis: Thermal cycle testing for exhaust aftertreatment systems

Supervisors: Esa Väisänen, Hannu Heikkilä

Term and year when the thesis was submitted: autumn 2021

Pages: 47 + 3 appendices

---

Proventia Oy is a Finnish company specialized in exhaust aftertreatment systems for heavy duty diesel engines. The purpose of this thesis was to plan and implement thermal cycle testing for two different exhaust aftertreatment systems in the development process. Thermal cycle tests are part of the engine manufacturers' requirements of durability testing. Test procedures were mutually agreed between Proventia Oy and the engine manufacturers. Thermal cycle tests have long run times, so an automated thermal cycling device was required.

Thesis work included studying the feasibility of different fuel oil- and electrical process heaters in the thermal cycling application and creating the test plans based on the chosen test measures. Proventia Oy's previously manufactured hot gas blower was chosen to be automated for the thermal cycle tests, when it was clear that it was not reasonable to build a new device for testing. The limiting factors were mostly related to available power resources. Based on the performance of the hot gas blower, test plans were created and sent out to clients for their approval.

As a result of this thesis work, firstly scheduled thermal cycle test was carried out in May 2021. Proventia's hot gas blower's properties are now documented due to practical testing of the device. Future thermal cycle testing possibilities are now recognized and examined. With the help of this thesis Proventia Oy is now able to better plan further test methods for future test requests.

---

Keywords: diesel, exhaust, emission, testing, thermal, durability, dpf, scr

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää Proventia Oy:tä innostavasta ja kehittävästä opinnäytetyöprojektistä. Erityiskiitokset työn ohjaamisesta Proventian laboratorioinsinööri Esa Väisäselle, Proventian teknologiajohtaja Arno Amberlalle ja Oulun ammattikorkeakoulun konetekniikan lehtori Hannu Heikkilälle. Kiitokset työpanoksesta myös Proventian sähkö- ja automaatioasiantuntija Tapio Irvankoskelle ja Proventian protopajalle. Tästä on hyvä jatkaa kohti uusia haasteita.

28.11.2021 Tuomas Kokkonen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 PROVENTIA YRITYKSENÄ	10
3 JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄ	11
3.1 Jälkikäsitteilyjärjestelmän komponentit ja lainsäädäntö	11
3.1.1 Päästölainsäädäntö	12
3.1.2 DOC	12
3.1.3 DPF	13
3.1.4 SCR	13
3.2 Mekaanisen kestävyden testaus	14
4 LÄMPÖSYKLITESTIEN TEKNISET VAATIMUKSET	16
4.1 Alkuperäiset testivaatimukset	16
4.2 Asiakkaiden testit	16
4.2.1 Asiakas X	17
4.2.2 Asiakas Y	17
4.3 Lämpösyklittäjä	18
4.3.1 Massavirta ja lämmitysteho	18
4.3.2 Käyttövoiman valinta	19
5 KUUMAKAASUPUHALTIMEN OMINAISUUDET	22
5.1 Komponentit	22
5.2 Vastapainetestit kuumakaasupuhaltimelle	23
5.2.1 Vastapaine	24
5.2.2 Testin suoritus	24
5.2.3 Tulokset	27
5.3 Melutason mittaus	30
6 KUUMAKAASUPUHALTIMEN AUTOMATISOINTI	34
6.1 Tiedonkeruu	34

6.2 Ohjaus	35
6.3 Anturit	37
7 LÄMPÖSYKLITESTIEN TOTEUTUS	39
7.1 Testikokoonpanot	39
7.2 Testialue	41
8 YHTEENVETO	43
LÄHTEET	45
LIITTEET	
Liite 1 Testisuunnitelma asiakkaalle X	
Liite 2 Testisuunnitelma asiakkaalle Y	
Liite 3 Kuumakaasupuhaltimen tekniset tiedot	

## SANASTO

$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	urealiuoksen kemiallinen kaava
CO	hiilimonoksidi eli häkä, haitallinen yhdiste
DOC	diesel oxidation catalyst, hapettava katalysaattori
DPF	diesel particle filter, dieselin hiukkassuodatin
EAT	exhaust aftertreatment, pakokaasujen jälkikäsittely
HC	hiilivety
HNCO	isosyaanihapon kemiallinen kaava
$\text{NH}_3$	ammoniakin kemiallinen kaava
$\text{NO}_x$	typenoksidien lyhenne
PLC	programmable logic controller, ohjelmoitava logiikkaohjain
PM	particle matter, pienhiukkaset
SCR	selective catalytic reduction, valikoitu katalyyttinen pelkistys



# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmiä valmistavalle Proventia Oy:lle. Nykyaikaiset pakokaasunpuhdistusjärjestelmät ovat hyvin pitkälle kehitettyjä ja vaativat huolellisia testausmenetelmiä. Yksi pakokaasunpuhdistimelle suoritettava mekaanisen kestävyys testi on lämpösyklitestit. Lämpösyklitestissä pakokaasunpuhdistinta vuoroin lämmitetään ja jäädytetään, jolloin saadaan tietoa rakenteen lujuudesta lämpörasituksessa. Proventian asiakkaat vaativat lämpösyklitestejä tilaamilleen pakokaasunpuhdistimille. Opinnäytetyössä tutkitaan erilaisia lämpösyklittäjän kehitysvaihtoehtoja Proventian asiakkaiden vaatimusten pohjalta, selvitetään Proventian kuumakaasupuhaltimen soveltuvuus lämpösyklitesteihin, suunnitellaan lämpösyklitestien toteutus asiakkaille ja rakennetaan kuumakaasupuhaltimelle automaattiohjaus lämpösykliä toteutukseen. Testialueen sijainti valitaan työturvallisuus, energiantarve ja ulkoisen ympäristön häiriötekijät huomioiden.

Testit voitaisiin suorittaa myös polttomoottorilla, mutta pitkät testiajat haittaisivat pakokaasunpuhdistimien muuta kehitystyötä. Asiakkaat määrittelevät testien laajuudet, testiolosuhteet ja testattavat kappaleet. Testeillä selvitetään testattavien pakolinjojen soveltuvuutta niille suunniteltuun käyttöön ja saadaan tietoa parannuskohteista. Onnistuneen testin jälkeen pakolinjassa ei ole näkyviä murtumia. Pakolinjan tiiviys todetaan vuototestillä. Vuototestin tuloksen ollessa hyväksytty testi hyväksytään.

Lähtötilanteessa työn sisältö oli melko avoin ja päätavoitteena oli kehittää, rakentaa ja testata kuumakaasupuhallin, jolla lämpösyklitestit voitaisiin suorittaa. Lämpösyklitestien toteutusta tutkittaessa työn sisältö rajautui lopulliseen muotoonsa. Ennen kuumakaasupuhaltimen kehitystä päästöjärjestelmien toimintaa tutkittiin tarkemmin ymmärtääksemme paremmin lämpösyklitestien suoritus tärkeyttä.

## 2 PROVENTIA YRITYKSENÄ

Proventia Oy on vuonna 1994 perustettu oululainen päästöjen vähentämiseen erikoistunut yritys. Proventia Oy:n pääkonttori sijaitsee Oulussa, ja sillä on kaksi tehdasta Suomessa ja yksi Tšekin tasavallassa. Työntekijöitä on noin 150. Vuonna 2019 Proventian liikevaihto oli 42,4 miljoonaa euroa ja se valittiin vuoden oululaiseksi vientiyritykseksi. Proventia Oy suunnittelee ja valmistaa pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä työkoneisiin ja raskaan liikenteen tarpeisiin. Jälkikäsittelyjärjestelmät räätälöidään asiakkaiden toiveiden mukaan. Järjestelmiä kehitetään sopimaan nykyisiin ja tuleviin Stage-, Tier- ja Euro-päästö määräyksiin. Työkonemarkkinoilla Proventia keskittyy EU:n Stage V -päästöstandardin mukaisiin järjestelmiin. Raskaalle liikenteelle Proventia tarjoaa jälkiasennusratkaisuja, joilla päästään jopa Euro VI -päästöluokkaan asti. (1; 2; 3.)

Yhtiönä Proventia keskittyy kahteen liiketoiminta-alueeseen. Liiketoiminta-alueet ovat testausjärjestelmät ja voimalinjojen järjestelmät sekä komponentit. Testausjärjestelmiin sisältyy Proventian kehittämät modulaariset testauskeskukset sähkö- ja hybridiajoneuvojen, niiden voimalinjojen ja akustojen tuotekehitystarpeisiin. Voimalinjojen järjestelmät ja komponentit sisältävät Proventian tarjoamat päästöjen puhdistusjärjestelmät, lämpöeristekomponentit ja sähköiset voimalinjakomponentit ja akustot. (4.)

Yhtiön tavoitteena on olla johtava teknologiatoimittaja moottori-, työkone- ja ajoneuvoteollisuuden valikoiduilla markkinoilla. Strategian keskiössä on teknologinen osaaminen. Yhtiö tavoittelee liiketoiminta-alueidensa hallittua ja kannattavaa kasvua vastaten samalla tehokkaasti laajenevan asiakaskunnan tarpeisiin. (4.)

### 3 JÄLKIKÄSITTELYJÄRJESTELMÄ

Polttomootoreista aiheutuu monenlaisia ympäristölle ja ihmisille haitallisia päästöjä, jotka aiheuttavat ympäristöön päästessään huomattavaa vahinkoa. Näitä päästöjä hillitään käsittelemällä niitä pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmässä (kuva 1). Alati tiukentuvien päästönormien ja lakien takia jälkikäsitteily on välttämätöntä. Yleisin ajoneuvoissa nähtävä päästöjenkäsittelykomponentti on hapettava katalysaattori (DOC). Nykyaikaisissa jälkikäsitteilyjärjestelmissä tarvitaan kuitenkin muitakin komponentteja tehokkaan puhdistuksen aikaansaamiseksi. (5.)



*KUVA 1. Pakokaasun kulku jälkikäsitteilyjärjestelmässä (6)*

#### 3.1 Jälkikäsitteilyjärjestelmän komponentit ja lainsäädäntö

Jälkikäsitteilyjärjestelmän tehtävä on joko hapettaa tai pelkistää pakokaasuja harmittomiksi yhdisteiksi tai kerätä niitä talteen. Seuraavissa tekstikappaleissa esitellään pakokaasujärjestelmissä käytettävät komponentit ja niiden toimintaperiaatteet, sekä päästöjen vähentämiseen liittyvää lainsäädäntöä.

### 3.1.1 Päästölainsäädäntö

Kalifornian osavaltio esitteli ensimmäisenä maailmassa lainsäädännön polttomoottorin päästöjen vähentämiseen. Nykyään monella maalla on omat kansalliset säädöksensä, joiden lisäksi on olemassa kansainvälisiä päästöluokituksia kuten Euroopassa Euro-päästöluokitukset henkilöautoissa sekä raskaassa kalustossa ja Stage-päästöluokitukset työkoneissa. (7, s. 488.)

Liikenteen päästöistä säännellään laeilla hiilimonoksidia (CO), hiilivetyä (HC), typenoksideja (NO<sub>x</sub>) ja pienhiukkasia (PM). Hiilidioksidipäästöille (CO<sub>2</sub>) ei ole olemassa lainsäädännöllistä ylärajaa, mutta Euroopassa niiden määrää säännellään valmistajille asetetuilla päästötavoitteilla. Euroopassa hiilidioksidipäästövaatimukset ovat muita maanosia suuremmat, kun taas Yhdysvalloissa on maailman tiukimmat säänneltyjen päästöjen vaatimukset. (8.)

Proventia valmistaa ja kehittää työkoneisiin Stage V -päästöluokituksen mukaisia pakokaasujärjestelmiä. Stage V astui voimaan alle 56 kW:n ja yli 130 kW:n moottoreille vuonna 2019 ja 56–130 kW:n moottoreille vuonna 2020 (9). Käytännössä Stage V -päästöluokituksen vaatimuksiin pääseminen vaatii DOC:n, DPF:n ja SCR:n jälkikäsittelyjärjestelmään (10).

### 3.1.2 DOC

DOC eli hapettava katalysaattori on yleisimpiä käytettäviä komponentteja. Sen tehtävä on hapettaa moottorin tuottamia myrkyllisiä kaasuja harmittomaan muotoon. Dieselmoottorissa hapetus tapahtuu pakokaasun sisältämän runsaan happimäärän avulla, jolloin hiilimonoksidista (CO) ja hiilivedyistä (HC) muodostuu hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>) ja vettä (H<sub>2</sub>O). Nykyaikaisissa pakokaasun jälkikäsittelyjärjestelmässä hapettavalla katalysaattorilla on tärkeä tehtävä lisätä pakokaasun typpidioksidipitoisuutta. Hapettamalla typpioksidia (NO) typpidioksidiksi (NO<sub>2</sub>) tuetaan hiukkassuodattimen ja valikoivan katalyyttisen pelkistyksen toimintaa (11). Hapettava katalysaattori sijoitetaan mahdollisimman lähelle moottoria, jotta se saavuttaisi toimintalämpötilansa nopeasti ja olisi näin tehokas myös urbaanissa ajossa (7, s. 480).

### 3.1.3 DPF

DPF eli hiukkassuodatin suodattaa pienhiukkasia eli nokea. Pienhiukkaset (PM) koostuvat dieselmootorissa palamattomasta polttoaineesta. Hiukkassuodattimesta käytetään toisinaan myös nimitystä hiukkasloukku. Suodattimen toiminta perustuu keraamiseen kennoon, joka kerää nokihiukkaset talteen. Noen keräytyminen suodattimeen kasvattaa virtausvastusta, minkä takia puhdistuspoltto eli regenerointi on välttämätöntä. (7, s. 483, 643.)

Regenerointi toteutetaan joko passiivisena tai aktiivisena. Passiivinen regenerointi tapahtuu itsestään, kun pakokaasun lämpötila nousee riittävän korkealle. Lyhyessä kaupunkiajossa näin ei välttämättä tapahdu ja ajan mittaan suodatin tukkeutuu. Tukkeutumisesta lisääntyneen vastapaineen seurauksena auton moottorinohjaus käynnistää aktiivisen regeneroinnin. Aktiivisessa regeneroinnissa jälkiruiskutetaan polttoainetta, jolloin polttoaine etenee palamattomana katalysaattoriin, jossa se hapettuu ja nostaa lämpötilaa. (7, s. 483, 643.)

### 3.1.4 SCR

SCR eli valikoiva katalyyttinen pelkistys perustuu typenoksidien pelkistymisreaktioon hapen läsnä ollessa käyttäen ammoniakkia pelkistimenä. Valikoiva pelkistys tarkoittaa, että pelkistimenä toimiva aine hapettuu ensin happea sisältävien typenoksidien kanssa kuin pakokaasun molekyyllisen hapen, jota esiintyy paljon runsaammin. (7, s. 640.)

Ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) on osoittautunut erinomaiseksi pelkistimeksi. Ammoniakkia saadaan kennolle ruiskuttamalla urealiuosta  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  pakokaasun sekaan. Urea liukenee hyvin veteen, joten se voidaan lisätä pakokaasun sekaan helposti mitattavana ureavesiliuoksena. Ensin kuuma pakokaasu hajottaa seoksen urean höyrystymisreaktiossa ammoniakiksi ja isosyaanihapoksi  $\text{HNCO}$ . Sitten isosyaanihappo hajoaa hydrolyysireaktiossa vesihöyryn kanssa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi. Saostumisen välttämiseksi reaktioiden täytyy tapahtua välittömästi peräkkäin. (7, s. 640.)

Urea-vesiseos tunnetaan paremmin markkinanimellä AdBlue®. AdBlue®:n optimaalinen ureapitoisuus on 32,5 %, jolloin se saavuttaa alhaisimman jäätymispisteensä  $-11\text{ °C}$  (7, s. 640). Ureavesiliuos ruiskutetaan tasaisesti pakokaasuvirran sekaan ennen höyrystymisreaktiota, ettei se muodosta saostumia järjestelmään ja ammoniakki pääsee levittymään katalyyttikennolle tasaisesti. (12.)

### **3.2 Mekaanisen kestävyuden testaus**

Lämpösyklitestien lisäksi pakolinjoja voidaan testata muilla menetelmillä. Muita mekaanisen kestävyuden testausmenetelmiä ovat esimerkiksi värinätestaus, suolasumutustestaus ja vuototestaus. Testien tarkoituksena on saada tietoa testattavan tuotteen tai materiaalin ominaisuuksista ja liitoksien sekä rakenteen rasituskestävyydestä. Työkoneiden pakolinjoille kestävyystestit ovat tärkeitä, koska niiden täytyy kestää jatkuvaa raskasta käyttöä vaihtelevissa olosuhteissa.

Värinätestissä pakolinja asetetaan laitteistoon, jolla sitä voidaan värähtellä tietyllä taajuudella. Samanaikaisesti voidaan myös syöttää kuumaa ilmaa pakolinjaan kuumakaasupuhaltimella. Värinätesti on oivallinen simuloimaan polttomoottorin värähtelyä ja sen vaikutuksia polttomoottoriin liitettyyn pakolinjaan. Värinätestissä nähdään komponenttien välisten liitosten kestävyys. Luotettavimman testituloksen saamiseksi pakolinja "ikäytetään" lämpösyklitestillä ennen värinätestiä, jotta nähdään pitkäaikaisen lämpörasituksen vaikutukset rakenteeseen yhdessä värähtelyn kanssa.

Suolasumutustestillä testataan pakolinjan korroosionkestävyyttä. Pakolinjalle luodaan kosteat olosuhteet ja suolaliuosta suihkutetaan testattavan materiaalin pinnalle. Suolasumutustestin seurauksena nähdään korroosioherkimmät kohdat materiaalissa. Jos korroosiota ei ilmene, testi katsotaan hyväksytyksi. Suolasumutustesteille on olemassa ISO 9227 -standardi. ISO 9227 -standardi on korroosiotesteille keinotekoisessa ympäristössä. Standardin mukaista suolasumutustestiä ei ole tarkoitettu arvioimaan materiaalin korroosionkestoa pitkällä aikavälillä, vaan sillä selvitetään enemmän materiaalin laadun säilyvyyttä riippumatta korroosion määrästä. (13.)

Vuototestissä pakolinja paineistetaan sisäpuolelta ja tarkkaillaan paineen poistumista mahdollisista murtumakohtista. Vuototesti suoritetaan vuototesterillä (kuva 2). Vuototestillä todetaan pakolinjan tiivysvaatimuksen täyttyminen. Tiivysvaatimuksen pitää täytyä myös lämpösyklitestin suorituksen jälkeen.



KUVA 2. Fortest T9000 Series -vuototesteri ja paineilmatulppa

## **4 LÄMPÖSYKLITESTIEN TEKNISET VAATIMUKSET**

Opinnäytetyö aloitettiin tutkimalla asiakkaiden pakokaasunpuhdistimien kehittämiseen liittyviä teknisiä asiakirjoja. Asiakirjoista poimittiin asiakkaiden toivotat testimenetelmät. Asiakirjojen perusteella testien kulkua pyrittiin tarkentamaan yhdessä asiakkaiden kanssa. Lopuksi arvioitiin lämpösyklitestien tilan tarve, suunniteltiin kokoonpano ja valittiin sopiva paikka testien suoritukselle.

Lämpösyklitestien suorituspaikka Proventian tiloissa valittiin niin, että ulkoiset tekijät, kuten sade tai tuuli eivät voi vaikuttaa syklien toimintaan. Ulkoisella lämpötilalla ei ole huomattavaa merkitystä, koska molemmat lämpösyklitestit on tarkoitus tehdä keväällä tai kesällä. Lämpösyklejä ajetaan automatisoidusti ilman jatkuvaa valvontaa. Proventian Oulunsalon toimipisteessä ei ole ympärivuorokautista henkilökuntaa ja testien suoritus pelkästään päivätyöaikana pitkittäisi testejä huomattavasti.

### **4.1 Alkuperäiset testivaatimukset**

Asiakkaiden vaatimukset ja testien toteutustavat muuttuivat opinnäytetyön edessä. Alkuperäisiin vaatimuksiin kuului samankaltaiset massavirrat kuin asiakkaiden moottoreissa. Asiakkaiden moottorien tuottamat massavirrat ovat huomattavasti suurempia kuin kuumakaasupuhaltimen, joten alkuperäisiä vaatimuksia pyrittiin madaltamaan vastaamaan kuumakaasupuhaltimen ominaisuuksia. Näin testit voitaisiin suorittaa rakentamatta kokonaan uutta kuumakaasupuhallinta.

### **4.2 Asiakkaiden testit**

Luottamuksellisista syistä asiakasyritysten nimiä ei julkaista tässä työssä, vaan käytetään heistä nimityksiä X ja Y. Lämpösyklitestit koostuvat lämpösykleistä. Lämpösykleissä testattavaa tuotetta lämmitetään ja jäähdytetään vuorotellen, jolloin tuotteeseen kohdistuu mekaanista rasitusta. Yhdellä syklillä tarkoitetaan aikaväliä lämmityksen aloituksesta jäähtymisen päättymiseen asti.

Kuumakaasupuhaltimelle suoritettujen testien perusteella luotiin molemmille asiakkaille yksilölliset testisuunnitelmat. Liitteessä 1 on esitetty asiakas X:lle luotu



testisuunnitelma ja liitteessä 2 asiakas Y:lle luotu testisuunnitelma. Asiakas Y:n testissä osa kuumasta ilmasta suunniteltiin ohjattavan testattavan kappaleen ulkopinnalle, jotta myös kappaleen pintalämpötila saataisiin vakaaksi mahdollisimman nopeasti.

#### **4.2.1 Asiakas X**

Asiakas X:n lämpösyklitestissä on 1 500 lämpösykliä ilman vesijäähdytystä sekä 50 sykliä vesijäähdytyksellä. Syklien nopeudet ja lämpötila-alueet määritellään asiakkaan kanssa. Testin kohteena on kokonainen pakolinja sisältäen kaikki jälkikäsitelyjärjestelmän komponentit. Testi suoritetaan vaiheittain, vesijäähdytetyt syklit viimeisenä. Ennen lämpösyklitestiä mitataan pakolinjan vuoto ja varmistetaan, ettei pakolinjassa tai sen liitosputkissa ole murtumia. Lämpösyklitestin jälkeen suoritetaan toinen vuototesti tiiviuden varmistamiseksi. Vuototesteissä käytetään paineena 350 mbar.

1 500 syklin lämmitysvaiheessa pakokaasunpuhdistimeen menevä ilma lämmitetään 530 °C:seen asti 400 kg/h massavirralla ja pidetään lämpötila kolmen minuutin ajan. Jäähdytysvaiheessa lämmittimet sammutetaan ja puhallin laitetaan täysille. Jäähdytetään 120 °C:seen asti ja pidetään lämpötila 3 minuutin ajan.

50 sykliä vesijäähdytyksellä toteutetaan pitämällä lämpötila 530 °C:ssa ja massavirta 400 kg/h:ssa. Vesijäähdytettyihin sykleihin vuokrataan vaatimukset täyttävä kylmävesipainepesuri konevuokraamosta. Viiden minuutin välein suihkuteetaan kylmää vettä kovalla paineella 30 sekunnin ajan. Tässä testivaiheessa yksi sykli kestää 5 minuuttia ja 30 sekuntia.

#### **4.2.2 Asiakas Y**

Asiakas Y:n vaatimuksena on 500 lämpösykliä. Testin kohteena on pelkästään pakokaasulinjan yksittäiset mantteloidut kennot. Pakokaasunpuhdistimeen menevä ilma lämmitetään 530 °C:seen asti 400 kg/h massavirralla. Jäähdytysvaiheessa lämmittimet sammutetaan ja puhallin laitetaan täysille. Annetaan jäähtyä niin, että testattavan manttelin pintalämpötila laskee alle 100 °C:seen. Lämpösyklitestillä halutaan ikäyttää manttelointi eli tehdä sen rakenteesta mekaanisesti hei-

kompi, minkä jälkeen mantteloinnille suoritetaan kuumatärinätesti. Kuumatärinätestiä ajetaan kasvavalla kuormituksella, kunnes kappale ei enää kestä kuormitusta. Asiakas Y:n pakolinjan vuototesti suoritetaan erikseen ja siinä käytetään 300 mbar:n painetta.

### **4.3 Lämpösyklittäjä**

Lämpösyklittäjällä tarkoitetaan laitetta, joka puhaltaa ulos kuumaa ilmaa automatisoiduissa sykleissä. Alkuperäisille testivaatimuksille soveltuvaa lämpösyklityslaitetta suunniteltiin laskemalla tarvittava lämmitysteho. Lämpösyklittäjästä suunniteltiin joko sähkö- tai polttoöljykäyttöistä ja kysyttiin tarjouksia öljypolttimista sekä isoista puhaltimista.

Tekniset vaatimukset lämpösyklittäjälle määräytyivät vaadittujen massavirtojen ja lämpötilojen mukaan. Alkuperäiset vaatimukset poikkesivat merkittävästi lopullisista suoritusmenetelmistä. Suunnitteluvaiheessa laskettiin tarvittava lämmitysteho tarvittavasta lämpötilan noususta ja vakiona pysyvistä massavirrasta käyttäen alkuperäisiä vaatimuksia.

#### **4.3.1 Massavirta ja lämmitysteho**

Massavirtaa käytetään määrittämään aineen virtausta. Sen yksikkö on yleensä kilogrammaa per tunti, mutta myös kilogrammaa per sekunti käytetään, jos massavirta on riittävän suuri. Massavirta saadaan, kun tilavuusvirta kerrotaan virtaavan aineen tiheydellä. Massavirran kasvaessa lämpötila laskee, jos lämmitykseen käytettävä teho pysyy samana. Suuret lämpötila- sekä massavirtavaatimukset vaativat paljon lämmitystehoa.

Lämmitysteho laskettiin käyttäen asiakkaiden alkuperäisiä testivaatimuksia, joista poimittiin suurin haluttu massavirta ja lämpötila. Suurin haluttu massavirta oli 0,42 kg/s ja lämpötila 550 °C. Lämmitystehon laskennassa lämpötilan lähtöarvona käytettiin varmuudeksi 20 °C, jotta saatiin suurin mahdollinen tehon tarve laskettua. Todellisuudessa puhallin lämmittää ilmaa jo vähän, ennen kuin se kulkeutuu lämmittimille.

Ilman lämmitykseen tarvittava teho saatiin laskettua, kun tiedettiin ilman massa-  
virta, ominaislämpökapasiteetti ja haluttu lämpötilan muutos. Tarvittava teho  $P$   
laskettiin kaavalla 1 (14, s. 195).

$$P = c_{ilma} \times Q_m \times \Delta T = 223,7 \text{ kW}$$

KAAVA 1

$c_{ilma}$  = ilman ominaislämpökapasiteetti, 1005 J/(kg\*K)

$Q_m$  = ilman massavirta, 0,42 kg/s

$\Delta T$  = lämpötilan muutos Kelvineinä, 530 K

Alkuperäisillä lämpösyklitestien vaatimuksilla laskettuna lämmitystehoa tarvittai-  
siin 223 kW. Verrokkina testattavan dieselmoottorin akseliteho on suuruusluokal-  
taan 250–350 kW. Selvityksessä ilmeni, että 223 kW:n tuottamiseen sähköllä ei  
ole mahdollista saada tarpeeksi sähkövirtaa ilman suhteellisen kalliita lisäinves-  
tointeja sähkökeskukseen. Laskelmien seurauksena asiakkaille ehdotettiin tes-  
tien suorittamista Proventian nykyisellä kuumakaasupuhaltimella. Jos kuuma-  
kaasupuhaltimen teho ei olisi kelvannut asiakkaiden testeihin, olisi ollut välttämä-  
töntä valita käyttövoimaksi polttoöljy ja rakentaa uusi kuumakaasupuhallin saa-  
vuttaaksemme 223 kW:n tehon mahdollisimman edullisesti.

#### 4.3.2 Käyttövoiman valinta

Käyttövoiman valinnassa otetaan huomioon kustannukset yritykselle tekemällä  
käyttövoimista kustannusvertailu. Käyttövoimavaihtoehtoina on sähkö ja poltto-  
öljy. Kaasuakin harkittiin, mutta sen säilytys olisi haasteellista. Säilytykseen pi-  
täisi rakentaa oma erillinen tila ja kaasulaitteistoon investointi pelkästään läm-  
pösyklitestejä varten ei ole järkevää. Kaasu otettiin kuitenkin mukaan käyttökus-  
tannusvertailuun, että sen käytön hintaa voitiin vertailla polttoöljyn ja sähkön  
kanssa.

Käyttökustannusvertailussa vertailtiin lämmöntuoton hintaa sähköllä, polttoöljyllä  
ja nestekaasulla. Vertailtavia lämmöntuottolaitteita olivat Proventian kuumakaa-  
supuhallin, 223 kW:n tehoinen sähkölämmitin, Oilon KP-26 H -öljypoltin, Master  
B 230 -öljylämmitin ja Master BLP 73 ET -kaasulämmitin. Master-tuotteet ovat  
tilalämmittämiä ja niiden soveltuvuus lämpösyklitesteihin on huono, koska niitä ei

ole suunniteltu tuottamaan kohdennettua äärimmäisen korkealämpöistä ilmapvirtaa.

Vertailu tehtiin Excel-tilukkolaskentaohjelmalla. Vertailuun selvitettiin sähkön ja polttoöljyn hinnat Proventialta. Sähkön hinta on arvioitu ja vertailussa ei huomioidu Proventian omaa sähkön tuottoa. Nestekaasulle käytettiin karkeaa hinta-arviota, koska ajantasaisen hintatiedon löytäminen on haastavaa. Testien suoritusajat arvioitiin käyttökustannusvertailuun testisuunnitelmien pohjalta. Käyttökustannusvertailu antaa hyvän käsityksen testien suoritushinnoista.

Vaadittava polttoöljyn kulutus 223 kW:n tuottamiseksi laskettiin kaavalla 2 (15, s. 19) käyttökustannusvertailuun (kuva 3). Kevyen polttoöljyn lämpöarvo H on 11,86 kWh/kg ja tiheys 0,835 kg/dm<sup>3</sup> (15, s. 18). P on haluttu teho eli 223 kW.

$$Kulutus = \frac{P}{H} = 18,8 \frac{kg}{h} = 22,57 \text{ l/h}$$

KAAVA 2

		Sähkö	Sähkö	Polttoöljy	Polttoöljy	Kaasu	
<b>Laite</b>	<b>Hinta</b>	2 x LHS 91 SYSTEM		Oilon KP-26H @ 223kW	MASTER B 230 65kW	MASTER BLP 73 ET 49-73 kW	
Sähkö	0,12 €/kWh	64	223		0,4	0,8	0,23 kW
Polttoöljy	0,627 €/litra			22,57		6,2	l/h
Nestekaasu	1,5 €/kg						5,02 kg/h
Puhallin	9,8 kW						
<b>Käyttöhinta €/h</b>		8,86	27,94	15,38	5,16		8,73
<b>Käyttöaika (h)</b>							
Asiakas Y		167	167	167	167		167
Asiakas X		500	500	500	500		500
<b>Yhteensä</b>		667	667	667	667		667
<b>Testi €</b>							
Asiakas Y		1479,0	4665,3	2567,7	861,6		1458,5
Asiakas X		4428,0	13968,0	7687,7	2579,7		4366,8
<b>Yhteensä €</b>		5907,0	18633,3	10255,4	3441,3		5825,3 €

KUVA 3. Käyttökustannusvertailu

Käyttökustannusten selvityksen jälkeen tehtiin lopullinen käyttövoiman valinta sähkön ja polttoöljyn välillä (taulukko 1). Näkökulmien perusteella käyttövoimaksi valikoitui sähkö. Sähkölaitteen etu nestepolttoaineisiin verrattuna on myös sen helppo liikuteltavuus.

### TAULUKKO 1. Käyttövoiman valintaperusteet

Ominaisuudet	Käyttövoima	
	Sähkö (64kW)	Polttoöljy (223kW)
Hankintahinta		X
Koko	X	
Käyttökustannus	X	
Suorituskyky		X
Turvallisuus	X	
Ympäristöystävällisyys	X	

Vaikka polttoöljy onkin kustannustehokkaampaa kuin sähkö, sen käytön turvallisuus ja käyttökustannukset häviävät sähkölle. Hankintahinnaltaan 223 kW polttoöljykäyttöinen kuumakaasupuhallin on jopa 64 kW sähkökäyttöistä halvempi. Jos hankittaisiin 223 kW sähkökäyttöinen laite, projektin budjetti ylittyisi huomattavasti.

Turvallisuusnäkökulmasta polttoöljyn syttyminen on paljon vaarallisempaa kuin sähköjohdon. Ympäristötietoisena yrityksenä on myös kannattavampaa valita käyttövoimaksi sähkö, koska polttoöljyä jouduttaisiin polttamaan yli 20 litraa tunnissa, jos sillä haluttaisiin tuottaa 223 kW tehoa. Sähkön valintaa puoltaa myös sen tuottaminen Proventian testisoluissa, mikä osaltaan pienentää kustannuksia. Projektin budjetti, käyttöturvallisuus sekä päästöt huomioiden, päättyttiin sähkökäyttöisessä 64 kW:n kuumakaasupuhaltimessa, koska sen tarjoama suorituskyky kelpaa asiakkaille.

## 5 KUUMAKAASUPUHALTIMEN OMINAISUUDET

Alun perin opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa kokonaan uusi lämpösyklittäjä, joka olisi korvannut kuumakaasupuhaltimen käytön tulevissa lämpösykliteissä. Työn edetessä sisältö muuttui asiakaskeskustelujen seurauksena ja tavoitteeksi otettiin kuumakaasupuhaltimen päivittäminen testeihin käyttökelpoiseksi laitteeksi. Tämä sisältää ohjauksen suunnittelun ja toteuttamisen automatisoitujen testien mahdollistamiseksi.

Kuumakaasupuhaltimen automaattinen ohjaus suunniteltiin turvallisesti käyttä. Sykleissä käytettävät massavirrat ja lämpötilat valittiin niin, ettei lämmittimien ylikuumeneminen ole vaarana missään vaiheessa testejä. Kuumakaasupuhallin pystyy tuottamaan korkean lämpötilan suurella massavirralla, joten paloturvallisuus ja käyttäjän turvallisuus otetaan erityisesti huomioon.

### 5.1 Komponentit

Kuumakaasupuhallin on CE-merkitty, joten isoja muutoksia johdotuksiin tai laitteen toimintoihin ei tehdä. Toimintoja muutetaan hieman testien ajaksi, mutta laite palautetaan alkuperäiseen kuntoon testien jälkeen.

Kuumakaasupuhallin kuvassa 4 koostuu kahdesta Leister LHS 91 SYSTEM -lämmityselementistä ja Elektror 1SD 810 -puhaltimesta. Puhaltimen nopeutta ohjataan taajuusmuuttajalla ja lämmittimien ohjaukseen käytetään Leister CSS Easy -ohjainlaitetta. Kuumakaasupuhaltimen kokonaismitat ovat 1050x850x2000 mm ja massa 370 kg. Lämmittimien teho on yhteensä 64 kW ja puhaltimen 9,8 kW. Teoreettinen enimmäistilavuusvirta on 10,33 kuutiometriä minuutissa. Kuumakaasupuhallin käyttää 400 voltin vaihtovirtajännitettä. (Liite 3.)



*KUVA 4. Kuumakaasupuhallin*

## **5.2 Vastapainetesti kuumakaasupuhaltimelle**

Olemassa olevan kuumakaasupuhaltimen suorituskykyä testattiin säätämällä ilman virtausvastusta, jolloin saatiin järjestelmään vastapaine. Eri paineilla järjestelmästä mitattiin massavirtaa ja lämpötilaa. Valmistaja on ilmoittanut lämmittimille vähimmäistilavuusvirran. Vastapainetesteissä käytettiin vähimmäistilavuusvirtana yhdelle lämmittimelle 3 100 litraa minuutissa. Ilman lämmitystä testamalla selvitettiin, että puhallin ei kykene tuottamaan yli 3 100 litraa minuutissa, jos vastapaine nousee yli 140 mbar:n. Myöhemmin varmistettiin jälleenmyyjän kautta lämmittimien valmistajalta, että vähimmäistilavuusvirraksi riittää 2 430 litraa minuutissa (16).

### **5.2.1 Vastapaine**

Mootoriajoneuvon pakolinjasto aiheuttaa moottorille aina jonkinasteisen vastapaineen. Paine on skalaarinen suure eli sillä ei ole suuntaa. Vastapaine tarkoittaa sitä painetta, joka moottorin täytyy tuottaa nujertaakseen pakokaasujärjestelmän hydraulisen resistanssin ja siirtääkseen pakokaasut ympäristöön. Vaikka pakokaasujärjestelmien suunnittelijat ovat aina tiedostaneet vastapaineen olemassaolon, vasta monimutkaisempien päästöjärjestelmien ja DPF:n yleistyessä siihen alettiin kiinnittää enemmän huomiota. Moottorinvalmistaja määrittää sen pakolinjalle sallitun enimmäisvastapaineen. (17.)

DPF ei yleensä kasvata vastapainetta järjestelmässä merkittävästi. Noen kerääntyminen DPF:ään epäonnistuneen regeneraation seurauksena sen sijaan lisää vastapainetta, joka kuormittaa moottoria ja kasvattaa polttoaineenkulutusta (17). Vaikka regenerointi olisikin säännöllistä, noen palamisesta palamistuotteeksi jäänyt tuhka tukkii DPF:n ajan myötä ja lisää vastapainetta. Tällöin ainoa vaihtoehto on tuhkahuolto tai vaihtaa DPF. DPF voidaan myös mitoittaa riittävän isoksi, jolloin huoltoa ei moottorin elinikänä tarvita (10).

### **5.2.2 Testin suoritus**

Testi aloitettiin puhaltamalla ilmaa ilman lämmitystä. Vastapainetta säädettiin kuvassa 5 olevalla säädettävällä kuristinläpällä. Vastapainetta kasvatettiin 20 mbar kerrallaan 20 mbar:sta 240 mbar:iin.





*KUVA 5. Säädettävä kuristin*

Massavirta mitattiin Boschin ilmamassamittarilla 0 280 218 008 imuilmaputkesta (kuva 6). Ilmamassamittari ei varsinaisesti mittaa ilman määrää, vaan sen toiminta perustuu sähköllä lämmitettävään vastuslankaan, jonka jäähtyminen ilmavirrassa aiheuttaa jännite-eron sen ja toisen lämmitettävän vastuslangan välillä. Mitattu jännite voidaan muuttaa massavirraksi ilmamassamittarin valmistajan taulukon avulla (18).



*KUVA 6. Massavirran mittaus*

Paine saatiin mitattua valmiista liitännästä lämmittimien ulostuloputkesta (kuva 7). Testi suoritettiin myös lämmittimet päälle kytkettynä, mutta sillä ei ollut huomattavaa vaikutusta saatuihin massavirta-arvoihin.



*KUVA 7. Painemittaus*

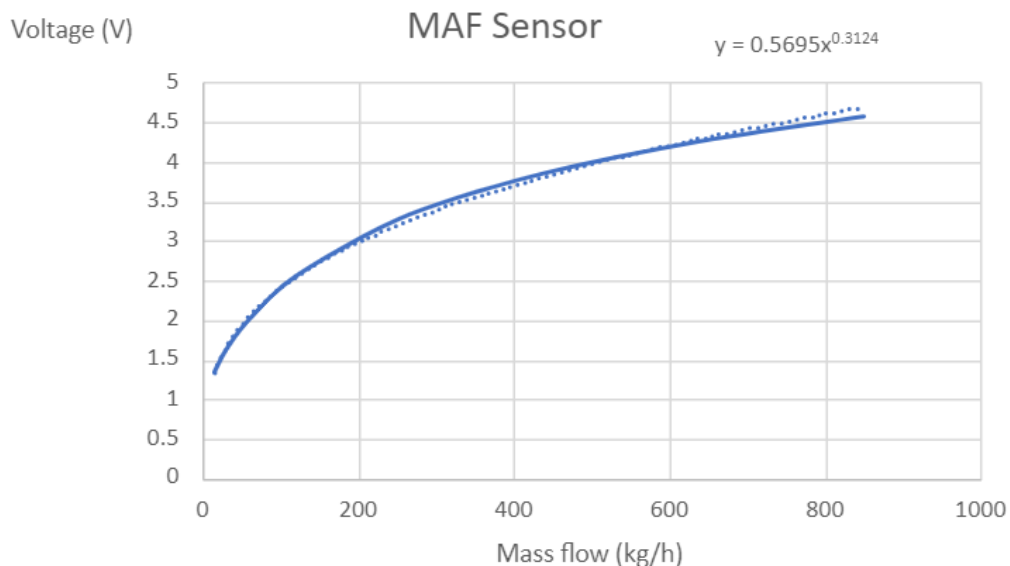
### **5.2.3 Tulokset**

Testistä ilmassamittarilta saadut jännitearvot kirjattiin muistiin. Jännitteen muuttaminen massavirraksi onnistui käyttäen Boschin ilmassamittareilleen julkaisemaa taulukkoa (taulukko 2). Käytetylle ilmassamittarille massavirtaa vastaava jännite näkyy taulukossa 2 sarakkeessa 4.

TAULUKKO 2. Massavirtaa vastaavat jännitearvot (18)

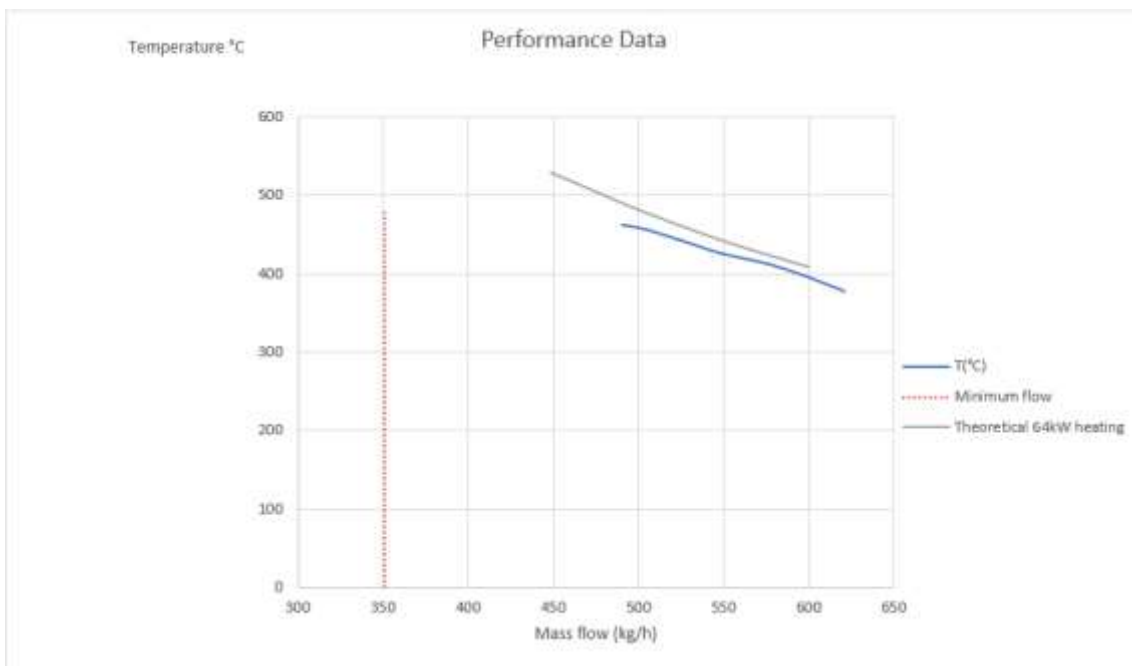
Output voltage $U_A = f(Q_m)$ of the air-mass meter					
Part number	0 280 217 123	0 280 218 019	0 280 217 531	0 280 218 008	0 280 002 421
Characteristic curve	1	2	3	4	5
$Q_m$ /kg/h	$U_A$ /V	$U_A$ /V	$U_A$ /V	$U_A$ /V	$U_A$ /V
8	1.4837	1.2390	-	-	-
10	1.5819	1.3644	1.2695	-	-
15	1.7898	1.5241	1.4060	1.3395	1.2315
30	2.2739	1.8748	1.7100	1.6251	1.4758
60	2.8868	2.3710	2.1563	2.0109	1.8310
120	3.6255	2.9998	2.7522	2.5564	2.3074
250	4.4727	3.7494	3.5070	3.2655	2.9212
370	4.9406	4.1695	3.9393	3.6717	3.2874
480	-	4.4578	4.2349	3.9490	3.5461
640	-	-	4.5669	4.2600	3.8432
850	-	-	-	4.5727	4.1499
1000	-	-	-	-	4.3312

Taulukon 2 tietojen perusteella tehtiin Excelissä ilmassamittarille ominaisuuskuvaaja (kuva 8), josta saatiin kaava massavirtojen selvittämiseen. Kun jännitearvot pystyttiin konvertoimaan massavirran yksiköksi, saatiin määritettyä lämpösykliin eri vaiheissa käytettävät massavirta-arvot kuumakaasupuhaltimen ohjaukseen.



KUVA 8. Ilmassamittarin mittausalue

Tuloksista selvisi kuumakaasupuhaltimen massavirran vaikutus lämpötilan tuot-  
toon. Kuvassa 9 näkyvä sininen kuvaaja ja saadut arvot olivat odotettavissa ja  
vastasivat hyvin teoreettisesti laskettuja arvoja. Lämmitinvalmistajan ilmoittama  
vähimmäismassavirta kahdelle täydellä teholla toimivalle lämmittimelle on mer-  
kitty punaisella pisteiviivalla. Sininen kuvaaja näyttää mitattuja lämpötiloja ja mas-  
savirtoja puhalluksen ollessa täysillä ja harmaa kuvaaja kertoo teoreettisen läm-  
mityksen 64 kW:n teholla.



*KUVA 9. Kuumakaasupuhaltimen suorituskyky*

Myöhemmin testattiin pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän kanssa, miten kor-  
kealla massavirralla päästään vielä 530 °C:seen ja saadaan lämpötila pidettyä  
vakaana. Testin tulokset näkyvät taulukossa 3. Tulokset lisättiin testisuunnitel-  
miin, joita tarjottiin asiakkaille.

TAULUKKO 3. Mitattuja enimmäislämpötila ja -massavirta-arvoja

Qm (kg/h)	P (mbar)	Temp (°C)
511,08	125,5	482
507,00	128,5	491
504,96	129	495
386,84	88	530
386,16	88,4	533
397,41	90	532
403,64	95	531
407,84	96,8	529

### 5.3 Melutason mittaus

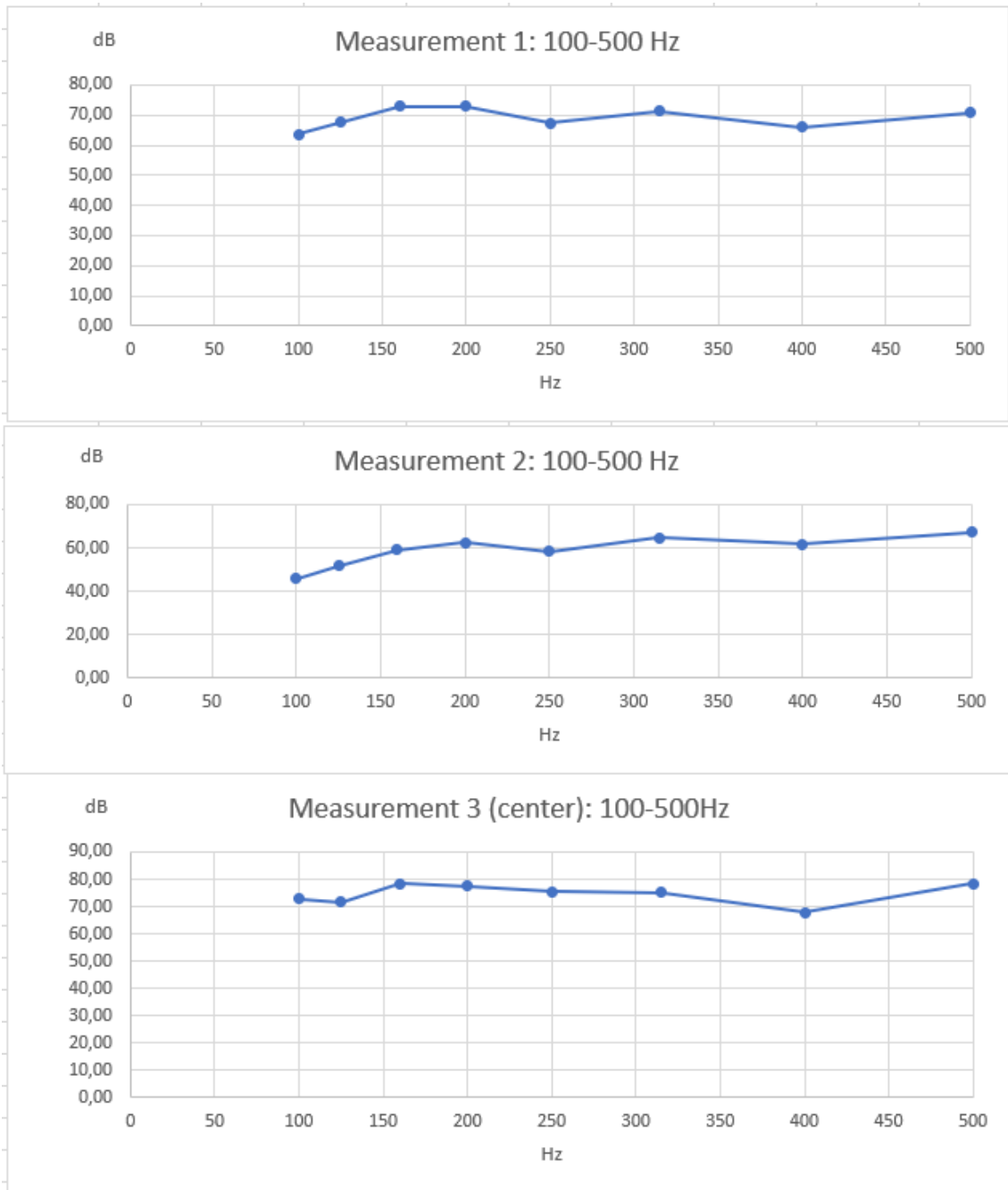
Työnantajan velvollisuuksista melun vähentämiseksi on kerrottu Työsuojeluhallinnon verkkopalvelussa seuraavasti: ”Työturvallisuuslain mukaan työntekijän altistuminen melulle on rajoitettava niin vähäiseksi, ettei siitä aiheudu haittaa tai vaaraa työntekijän turvallisuudelle tai terveydelle. Työnantajan on tunnistettava melua aiheuttavat tekijät ja selvitettävä työntekijöiden mahdollinen altistuminen melulle. Työnantajan on arvioinnin perusteella poistettava melun vaarat ja haitat tai vähennettävä niitä niin paljon kuin mahdollista.” (19.)

Suoritettavat testit kestävät keskimäärin 2–3 viikkoa. Pitkät ympärivuorokautiset testit tuottavat jatkuvaa ääntä, mikä voi olla haitaksi lähialueen asukkaille. Kuumakaasupuhaltimen melutaso mitattiin Proventian lastauslaiturilla. Mittaukseen käytettiin Rion NL-22 desibelimittaria (kuva 10).



*KUVA 10. Rion NL-22 -desibelimittari*

Mittauksen tulokset löytyvät Excel-taulukkolaskentaohjelmalla muodostetuista kuvaajista kuvasta 11. Kaksi ensimmäistä kuvaajaa ovat kuumakaasupuhaltimen käyttöetäisyydeltä mitatuista äänenvoimakkuusarvoista koottuja. Kolmannen kuvaajan arvot ovat mitattu kuumakaasupuhaltimen kehikon keskeltä. Kuvaajat rajattiin taajuusalueelle 100–500 Hz, koska korkeimmat äänenvoimakkuudet mitattiin tältä taajuusalueelta. Matalalla 16 Hz:n taajuudella mitattiin myös korkeita äänenvoimakkuuksia, jotka eivät käytännössä kuulu ihmiselle meluna, joten ne jätettiin huomiotta. Korkein mitattu äänenvoimakkuus 78,5 dB saatiin laitteen keskeltä taajuudella 160 Hz. Laitteen käyttöetäisyydeltä korkein huomioitava äänenvoimakkuus on 73 dB 200 Hz:n taajuudella.



*KUVA 11. Melusomittaukset*

Kuumakaasupuhaltimessa on kaksi melusta varoittavaa tarraa (kuva 12). Ei ole tarpeen miettiä toimenpiteitä melun vähentämiseksi, koska kuumakaasupuhallin sijoitetaan lastauslaiturille, jossa ei jatkuvasti työskennellä, ja sillä ei ole aktiivista käyttäjää, joka altistuisi melulle päivittäin. Melutaso arvioitiin harmittomaksi lähi-alueen asukkaiden kannalta.





*KUVA 12. Melusta varoittava tarra*

## 6 KUUMAKAASUPUHALTIMEN AUTOMATISOINTI

Jo opinnäytetyön varhaisessa vaiheessa automaatio nousi esille yhtenä tärkeimmistä kriteereistä lämpösyklitestejä ajavalle laitteelle. Yksi lämmitys- tai jäähdytysvaihe kestää vain muutamia minutteja, joten automaatio nopeuttaa testien suoritusaikaa huomattavasti testien ollessa käynnissä ympärivuorokautisesti. Automatoitu lämpösykli toteutettiin yhdistämällä tiedonkeruulaitteen hälytinulostuloja kuumakaasupuhaltimen logiikkaohjaimeen releiden välityksellä.

### 6.1 Tiedonkeruu

Tiedonkeruuseen käytetään Omega OM-DAQXL-tiedonkeruulaitetta (kuva 13). Tärkein mitattava suure on lämpötila, koska kuumakaasupuhallinta pitää pystyä ohjaamaan lämpötilatietojen perusteella. Kyseisellä tiedonkeruulaitteella pystyy kirjaamaan myös jännitettä, sähkövirtaa, venymää, taajuutta ja pulssia. Testien lämpötilat ja massavirrat kirjataan tiedonkeruulaitteen muistiin viiden sekunnin välein. Massavirtatiedot saadaan kirjaamalla ilmamassa-anturilta ulostuleva jännite, koska tiedonkeruulaitteeseen ei voida asettaa ilmamassa-anturin ominaiskäyrää, jolla saataisiin massavirran yksikkö.



*KUVA 13. Omega OM-DAQXL*

Koska Omega OM-DAQXL-tiedonkeruulaite pystyy antamaan ulostulovirtaa määritettyjen raja-arvojen ylittyessä tai alittuessa, oli sillä keskeinen rooli automatisoidun ohjauksen toteutuksessa. Termopareilla mitattujen ja tiedonkeruulaitteella kirjattujen lämpötilojen perusteella saatiin lämpösykliä lämpötila-alue rajoitettua. Lämpötilatietoja kerätään useasta eri pisteestä, jotta nähdään, miten lämpö levittäytyy testattavassa kappaleessa ja mihin arvoihin se nousee. Testejä ohjataan korkeintaan kahdesta eri pisteestä mitattujen lämpötilatietojen perusteella.

## **6.2 Ohjaus**

Kuumakaasupuhaltimen lämpösykliohjaus toteutetaan PLC:llä eli ohjelmoitavalla logiikkaohjaimella sekä vaihtoreleillä. Ohjelmoitavia logiikkaohjaimia käytetään nykyään laajasti teollisuuden tarpeisiin. PLC korvaa perinteisen releohjauksen monien monimutkaisten toimintojen ohjaamisessa. PLC:lle kirjoitetaan ajettava ohjelma siihen suunnitellulla tietokoneohjelmalla. Yleisimpiä logiikkaohjelmissa

käytettyjä ohjelmointikieliä ovat tikapuulogiikka ja FBD (Function Block Diagram). PLC-logiikka tarkkailee tuloihin liitettyjen laitteiden tilaa, tekee päätöksiä perustuen logiikkaan asetettuun ohjelmaan ja ohjaa lähtöihin liitettyjen laitteiden toimintoja. PLC:n käytön etuna on sen modulaarisuus. Sen tuloihin ja lähtöihin voidaan liittää useita erityyppisiä laitteita, joilla saadaan haluttu käyttötarkoitus. (20.)

Kuumakaasupuhaltimessa on Omronin valmistama täysin digitaalinen logiikkaohjain, joten analogisten anturitietojen tuonti suoraan logiikalle ei ole mahdollista. Antureiden lämpötilatiedot viedään ensin tiedonkeruulaitteeseen, mistä saadaan hälytinulostulona digitaalisia signaaleja. Hälytinulostulolla tarkoitetaan, että signaali lähtee, kun ylitetään määritetty raja-arvo esimerkiksi kirjatuissa lämpötilatiedoissa. Tiedonkeruulaitteen digitaalisia ulostuloja käytetään yhdessä releiden ja logiikkaohjaimen kanssa käynnistys/pysäytys -komentoina kuumakaasupuhaltimen komponenteille. Kuvassa 14 on kytkettynä termopari tiedonkeruulaitteen vihreään sisääntuloliitäntään ja tiedonkeruulaitteen vasemmasta kyljestä lähtee hälytinulostulot releille.



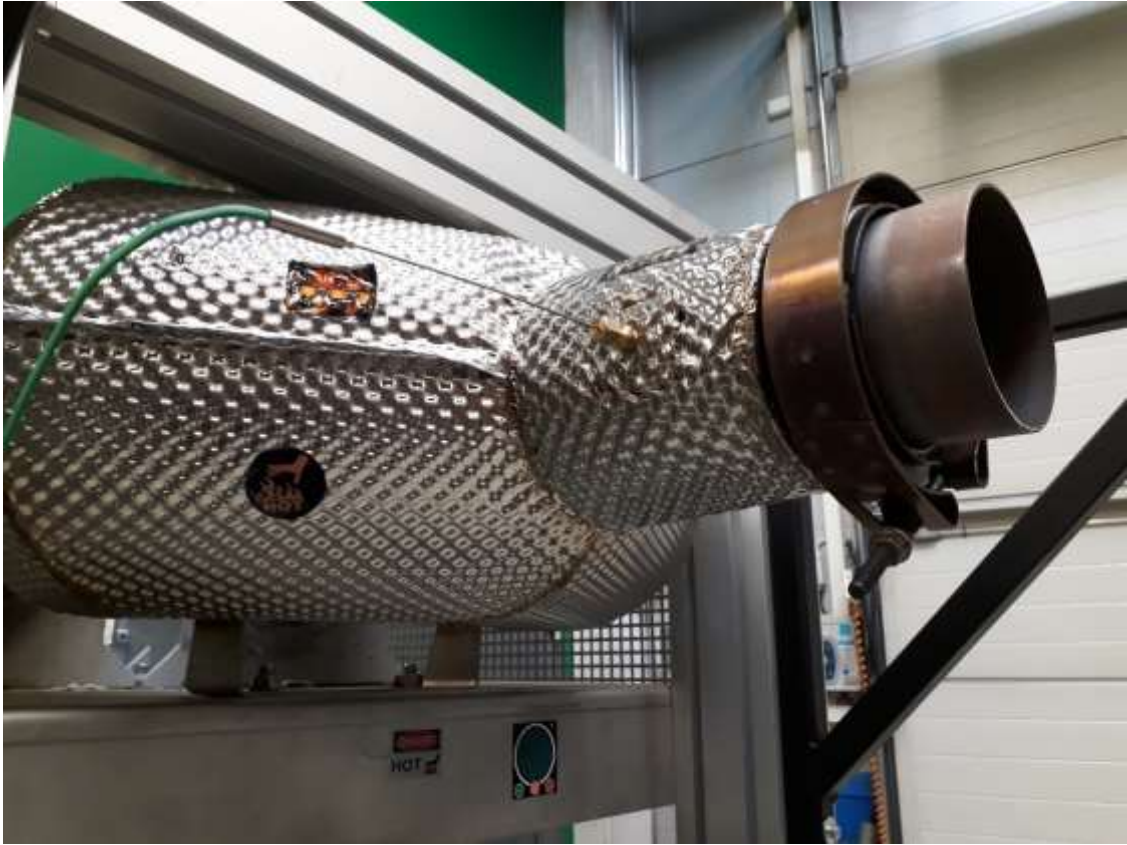
*KUVA 14. Tiedonkeruulaitteen ensimmäiset kytkennät*

Yhdessä lämpösyklissä nostetaan lämpötila 530 °C:seen ja pidetään se kolme minuuttia, jonka jälkeen lämpötila lasketaan 120 °C:seen ja pidetään kolme minuuttia. Ohjaukseen suunniteltiin kolme vaihetta. Ensimmäinen vaihe nostaa lämpötilan 530 °C:seen. Kun 530 °C on saavutettu, PLC odottaa 3 minuuttia, minkä jälkeen puhallin kytketään täysille ja lämmittimet sammutetaan. Lämpötilan las-  
kiessa 120 °C:seen lämmittimet ohjataan toimimaan rajoitetulla teholla ja puhallin kytketään puhaltamaan 400 kg/h. Rajoitettu lämmitysteho 120 °C pitämiseen tes-  
tin massavirralla on laskennallisesti noin 9 kW. Ohjaus hienosäädetään loppuun ennen asiakas Y:n testin varsinaista aloitusta.

### **6.3 Anturit**

Testeissä tarvitaan useita anturitietoja, joiden perusteella lämpösyklittäjää ohja-  
taan. Asiakas X:n testissä mitataan ilman lämpötila kuumakaasupuhaltimen ulos-  
tulolta, lämpötilat kahdesta eri kohdasta pakokaasunpuhdistimen sisältä, lämpö-  
tila pakokaasunpuhdistimen ulostulolta ja lämmittimille menevä massavirta. Asia-  
kas Y:n testissä mitataan kuumakaasupuhaltimelta tulevan ilman lämpötilan li-  
säksi lämpötilaa kappaleen sisällä ja testattavan kappaleen pintalämpötilaa. Uusi  
sykli alkaa, kun pintalämpötila on laskenut riittävän alas.

Massavirta-anturina käytetään jo aiemmin vastapainetestissä käytettyä anturia ja  
lämpötilaa mitataan K-tyyppin termoelementeillä (kuva 15), jotka ovat yleisesti käy-  
tettyjä laboratoriomittauksissa. K-tyyppin termoelementeillä pystytään mittaamaan  
lämpötilaa väliltä -200...1260 °C (21).



*KUVA 15. K-tyyppin termoelementti*

## 7 LÄMPÖSYKLITESTIEN TOTEUTUS

Testeissä käytettävät osat mallinnettiin SolidWorks-3D-mallinnusohjelmalla. SolidWorksilla testeistä koottiin testikokoonpanot, joissa näkyvät kuumakaasupuhallin ja testeissä käytettävät lisäosat sekä testattavat pakokaasunpuhdistimet. Lisäosilla tarkoitetaan testien suoritukseen tarvittavia tuentoja, koteloita ja putkia. Malleista lähetettiin havainnollistavat kuvat asiakkaille osana testisuunnitelmia.

Testeille rajattiin riittävän laaja testialue. Koska testit kestävät ajallisesti usean viikon, testialue aidattiin varmistaaksemme testin häiriöttömän kulun. Lämpösyklitestit käynnistettiin, kun syklien automaatio sekä tiedonkeruu todettiin toimivaksi ja testiolosuhteet olivat kunnossa.

### 7.1 Testikokoonpanot

Mallintamalla testikokoonpanot saadaan käsitys osien mittasuhteista ja pystytään arvioimaan alustava tilan tarve. 3D-mallit ovat myös hyviä havainnollistamaan testejä asiakkaille. Asiakkaat näkevät kuumakaasupuhaltimen ja pakokaasunpuhdistimen sijoittelun ja varmistuvat, että testit suoritetaan asianmukaisella tavalla. Testien kokoonpanomallit löytyvät testisuunnitelmista.

Asiakas Y:n testiin tehtiin kotelo (kuva 16) testattavalle manttelille ja teline, jolla kotelo tuetaan. Teline suunniteltiin kannattelemaan kotelon ja testattavan manttelin massa. Kotelon putkiosa on DN300 -standardikokoinen. DN300-putken molempiin päihin kiinnitettiin suppilot, jotta lämpö saadaan hallitusti kotelon läpi. Materiaalina käytettiin terästä. Kotelo lämpöeristettiin ja siihen tehtiin paikat ruuveille, joilla mantteli saadaan tuettua kotelon sisällä. Kotelon ulompi pääty on irrotettava, jolloin mantteli on nopea asettaa sisään ja ottaa ulos ilman kotelon vaurioittamista.



*KUVA 16. Testikotelo*

Varsinaisen telineen tekoon annettiin Proventian protopajalle melko vapaat kädet. Protopajalla valmistettiin kuumakaasupuhaltimeen kiinnitettävä ja helposti korkeussäädettävä teline (kuva 17). Poikittainen neliöputkipalkki liikkuu myös telineen pituussuunnassa, joten kotelo saadaan tuettua halutusta kohdasta.





*KUVA 17. Teline*

## **7.2 Testialue**

Lämpösyklittäjä sijoitetaan Proventian Tietotien toimipisteen ulkotiloihin. Lastauslaiturille raivataan tilaa testialueelle. Testialueen koko on noin 2 x 3 metriä ja se aidataan kaksi metriä korkealla verkkoaidalla. Toimistoajan ulkopuolella lastauslaituri saadaan suljettua verkko-ovella, joten itse testialueen aitaus voi olla kevyt ja helposti siirrettävä. Aitauksella halutaan varmistaa testin häiriötön kulku ja estää lastauslaiturilla liikkuvien työntekijöiden kulku kuuman ilmavirran eteen.

Aitaustarvikkeet tilattiin paikallisesta liikkeestä. Kuumakaasupuhaltimelle raivattiin tarvittava tila lastauslaiturilta ja sen automatisoitu toiminta testattiin ilman aitausta huhtikuun loppupuolella. Proventian hallin seinään porattiin reikä, jonka kautta saatiin tarvittava virta tuotua kuumakaasupuhaltimelle. Kuvassa 18 kokoonpano asiakas Y:n testin suorittamiseen on valmis ja testattavana.



*KUVA 18. Valmiin testikokoonpanon testaus*

## 8 YHTEENVETO

Työssä pohdittiin vaihtoehtoja pakokaasunpuhdistimien lämpösyklitestien toteutukselle. Lisäksi selvitettiin eri käyttövoimilla toimivien lämpösyklittäjien rakennus- ja käyttökustannuksia. Työn perusteella lämpösyklitestien energiantuotto olisi halvinta polttoöljyllä. Polttoöljykäyttöisen lämpösyklittäjän rakentaminen olisi myös halvempaa kuin sähkökäyttöisen. Polttoöljytoimisen lämpösyklittäjän huonoja puolia ovat sen huono liikuteltavuus, polttoainelinjojen pituus ja paloturvallisuus. Kun selvisi, ettei uuden sähkötoimisen lämpösyklittäjän rakentaminen ole taloudellisesti kannattavaa ja lämpösyklitestit voitaisiin suorittaa Proventian vanhalla kuumakaasupuhaltimella, alettiin testisuunnitelmia rakentaa sen suorituskyvyn pohjalta. Suorituskykyä testattiin mittaamalla enimmäismassavirtaa ja -lämpötilaa vastapaineen kasvaessa.

Työkoneiden pakolinjat ovat alttiita korkeille lämpötiloille ja värähtelyille. Lämpösyklitestien tarkoituksena on väsyttää pakokaasunpuhdistimien rakennetta. Kun rakenne on väsytetty, sille voidaan suorittaa tärinätesti. Tärinätestissä nähdään, miten hyvin rakenne pysyy kasassa kovan ravistavan voiman alaisena.

Lämpösyklitestit ja muut mekaanista kestävyyttä mittaavat testit ovat tärkeässä roolissa työkoneiden jälkikäsitteilyjärjestelmien kehitystyössä. Suomessa kuten muuallakin maailmassa tilakokojen kasvaminen nostaa työkoneiden vaatimuksia maatiloilla. Etenkin sesonkiaikoihin työkoneet ovat jatkuvassa käytössä ja pitkät yhtäjaksoiset käyttöajat aiheuttavat suurta lämpörasitusta pakolinjoihin.

Testien suorituspaikan valinnassa arvioitiin kuumakaasupuhaltimesta aiheutuvia melu- ja estehaittoja. Testialueen sijaintiin vaikutti myös kuumakaasupuhaltimelle tarvittavan 63 ampeerisen syöttövirran saatavuus. Testialue eristettiin verkkoaidalla.

Testisuunnitelmat hyväksyttiin asiakkailta ennen testien muuta valmistelua. Asiakas Y:n testin suorittamiseen tarvittavat osat valmistettiin Proventian protopajalla.

Kehitysehdotuksena on asentaa kuumakaasupuhaltimeen yksi lämmitin lisää, jolloin lämmitysteho lisääntyisi 50 %. Puhaltimen alhainen teho olisi edelleen rajoittava tekijä, joten kaikkien lämmittimien toimiessa täydellä teholla pitäisi puhaltimenkin toimia lähes täydellä teholla lämmittimien ylikuumenemisen välttämiseksi. Tällä päivityksellä ei vielä päästäisi ison työkonemoottorin massavirtalukemiin, mikä vaatisi vielä noin kaksi kertaa enemmän tehoa. Myös riittävä sähkövirran saanti olisi edelleen ongelmana. Päivitys voisi kuitenkin toimia tulevaisuuden lämpösyklitesteissä, jos virtaa saataisiin enemmän. Sähkötoimisista vaihtoehtoista tämä olisi järkevin ratkaisu kokonsa ja hintansa puolesta.

## LÄHTEET

1. Proventia lyhyesti. Proventia Oy. Saatavissa: [https://www.proventia.com/yrittys/proventia\\_lyhyesti](https://www.proventia.com/yrittys/proventia_lyhyesti). Hakupäivä 13.4.2021.
2. Päästöjen hallintaa OEM työkoneisiin. Proventia Oy. Saatavissa: [https://www.proventia.com/paastojen\\_hallinta/oem\\_paastojen\\_hallinta\\_tyokoneet](https://www.proventia.com/paastojen_hallinta/oem_paastojen_hallinta_tyokoneet). Hakupäivä 4.1.2021.
3. Raskaan liikenteen jälkiasennukset. Proventia Oy. Saatavissa: [https://www.proventia.com/paastojen\\_hallinta/raskaan\\_liikenteen\\_jalkiasennukset](https://www.proventia.com/paastojen_hallinta/raskaan_liikenteen_jalkiasennukset). Hakupäivä 4.1.2021.
4. Strategia. Proventia Oy. Saatavissa: <https://www.proventia.com/yrittys/strategia>. Hakupäivä 23.9.2021.
5. DOC – Hapettava katalysaattori. EKO DPF. Saatavissa: <https://www.ekodpf.fi/jalkikasittelyjarjestelmat-yleisesti/>. Hakupäivä 23.9.2021.
6. Päästöjärjestelmät ja -teknologiat. Proventia Oy. Saatavissa: [https://www.proventia.com/paastojen\\_hallinta/oem\\_paastojen\\_hallinta\\_tyokoneet/paastojarjestelmat](https://www.proventia.com/paastojen_hallinta/oem_paastojen_hallinta_tyokoneet/paastojarjestelmat). Hakupäivä 14.4.2021.
7. Dietsche, Karl-Heinz – Reif, Konrad 2011. Automotive Handbook 8th Edition. Plochingen: Robert Bosch GmbH.
8. Autoliikenteen päästöt. Autoalan tiedotuskeskus. Saatavissa: [https://www.aut.fi/ymparisto/autojen\\_paastot\\_ja\\_niiden\\_mittaus](https://www.aut.fi/ymparisto/autojen_paastot_ja_niiden_mittaus). Hakupäivä 24.1.2021.
9. EU: Nonroad Engines. 2016. Dieselnet. Saatavissa: <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>. Hakupäivä 22.3.2021.
10. Väisänen, Esa maaliskuu 2021. Kommentit opinnäytetyöhön. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Tuomas Kokkonen.

11. Majewski, W. Addy 2018. Diesel Oxidation Catalyst. Dieselnet. Saatavissa: [https://dieselnet.com/tech/cat\\_doc.php](https://dieselnet.com/tech/cat_doc.php). Hakupäivä 24.1.2021.
12. SCR ja urean sekoitus. Proventia Oy. Saatavissa: [https://www.proventia.com/paastojen\\_hallinta/oem\\_paastojen\\_hallinta\\_tyokoneet/paastojarjestelmat/scr\\_ja\\_urean\\_sekoitus](https://www.proventia.com/paastojen_hallinta/oem_paastojen_hallinta_tyokoneet/paastojarjestelmat/scr_ja_urean_sekoitus). Hakupäivä 25.3.2021.
13. Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. ISO 9227:2017. Maaliskuu 2017. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/63543.html>. Hakupäivä 30.3.2021.
14. Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.
15. Kevytöljypolttimien käyttö- ja huolto-ohjeet. Oilon. Saatavissa: [https://harrikone.fi/wp-content/uploads/2016/11/Oilon\\_oljypoltin\\_kayttoohje.pdf](https://harrikone.fi/wp-content/uploads/2016/11/Oilon_oljypoltin_kayttoohje.pdf). Hakupäivä 31.3.2021.
16. Bbtechnics. Helmikuu 2021. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Tuomas Kokkonen.
17. Jääskeläinen, Hannu 2007. Engine Exhaust Back Pressure. Dieselnet. Saatavissa: [https://dieselnet.com/tech/diesel\\_exh\\_pres.php](https://dieselnet.com/tech/diesel_exh_pres.php). Hakupäivä 1.4.2021.
18. Bosch HFM 5 Sensors. 2014. Bosch. Saatavissa: <https://vdocuments.site/bosch-hfm5-sensors.html>. Hakupäivä 6.4.2021.
19. Työsuojeluhallinnon verkkopalvelu. Melu 2020. Saatavissa: <https://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/fysikaaliset-tekijat/melu>. Hakupäivä 6.4.2021.
20. Advanced Micro Controls Inc (AMCI). What is a PLC? Saatavissa: <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-plc/>. Hakupäivä 19.4.2021.
21. Omega. What is a type K Thermocouple? 2020. Saatavissa: <https://www.omega.com/en-us/resources/k-type-thermocouples>. Hakupäivä 22.4.2021.

22.Proventia SharePoint. PEC-024. 2021. Proventia Oy.



# X: thermal shock test plan

Version 2.0

Tuomas Kokkonen

9.3.2021





Contents

1. Test equipment..... 3

    Hot gas blower..... 3

    Additional equipment..... 3

    Sensors ..... 3

    Performance ..... 3

2. Heat Cycling ..... 4

    Test setup ..... 4

    Test Procedure ..... 4

    Phase 1: Without water quench..... 4

    Phase 2: With water quench ..... 5

        Water spray ..... 5

3. Datalogging..... 5

4. Reporting..... 5

CONFIDENTIAL



## 1. Test equipment

### Hot gas blower

Heater type: Leister LHS 91 SYSTEM 32 kW

Number of heaters: 2

Side channel blower: Elektror 1SD 810

Number of blowers: 1

Maximum heating power: 64 kW

### Additional equipment

Platform for the EAT system

### Sensors

4 x Thermocouple K-type

1 x Mass air flow

### Performance

Measured performance values of the hot gas blower are shown in Figure 1. Qm = mass flow, P = back pressure, Temp = temperature at heater outlet.

Qm (kg/h)	P (mbar)	Temp (°C)
511,08	125,5	482
507,00	128,5	491
504,96	129	495
386,84	88	530
386,16	88,4	533
397,41	90	532
403,64	95	531
407,84	96,8	529

Figure 1. Maximum performance of the hot gas blower



## 2. Heat Cycling

### Test setup

3D-model of the thermal shock test setup is shown in Figure 2. EAT is directly connected to the hot gas blower and supported underneath. Temperature data used to control the test is obtained from the heater outlet.

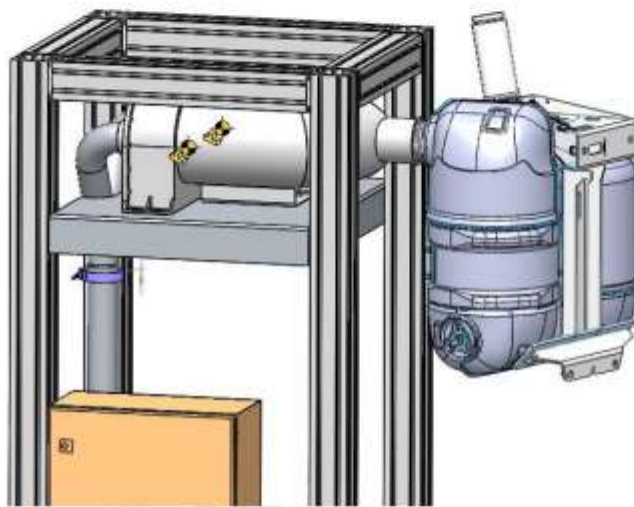


Figure 2. Thermal shock test setup (NOTE: Not the actual EAT system to be tested)

### Test Procedure

**Before test start: Gas leakage measurement. Verification there is no fractures in EAT component or connections!**

**After test: Leak rate test. If a leak is found cut apart the AIO to find the failure location.**

Phase 1: Without water quench

#### **1500 cycles**

Heating step: EAT is heated with the mass flow of 400 kg/h from 120 °C to 530 °C (7-10 minutes)

Stabilization (3 minutes)

Cooldown step: From 530 °C to 120 °C. Heaters off. Mass flow maximum blower capacity (3-4 minutes)

Stabilization (3 minutes)



Cycle time: 16-20 minutes

Phase duration: 400-500 hours, 16-21 days

**Inspection at the end of Phase 1**

Phase 2: With water quench

**50 cycles**

Mass flow: 400 kg/h

Temperature: 530 °C

Mass flow and temperature remain at given values throughout the test.

Cycle duration: 330 seconds

One cycle consists of 300 seconds of stabilization and 30 seconds of high-pressure water spraying.

Phase duration: 4,6 hours

Water spray

Water flow rate: 3 litres per minute

Water pressure: 180 bar

Water temperature: +10 °C

Water spraying distance: 18 – 24 inches (457 – 609 mm)

Nozzle: 25°

**Inspection at the end of Phase 2**

**Overall estimated thermal shock testing duration: 3 weeks**

### 3. Datalogging

Datalogger: Omega OM-DAQXL

Temperature inputs: heater outlet air, after DOC, before SCR, EAT outlet

Temperature data sampling rate: 0,2 Hz

### 4. Reporting

Test report includes temperature and mass flow records from tests, possible leak rates, after-phase inspection results, documented test conditions, documented water spraying conditions and technical specifications of a high-pressure washer equipment.



# Y: EAT thermal ageing testplan

Version 1.0

Tuomas Kokkonen

2.3.2021



## Contents

1. Test equipment.....	3
Hot gas blower.....	3
Additional equipment.....	3
Sensors .....	3
Test setup .....	3
Performance .....	4
2. Heat Cycling.....	5
Test Course .....	5
Cycle times.....	5
3. Datalogging.....	5
4. Reporting.....	5
Attachments .....	5

CONFIDENTIAL

## 1. Test equipment

### Hot gas blower

Heater type: Leister LHS 91 SYSTEM 32 kW

Number of heaters: 2

Side channel blower: Elektror 1SD 810

Number of blowers: 1

Maximum heating power: 64 kW

### Additional equipment

Cylindrical casing

Support rack for casing

### Sensors

3 x Thermocouple K-type

1 x Mass air flow

### Test setup

3D-model of the test setup is shown in Figure 1. Test specimen is placed inside a cylindrical casing to which the hot air is blown. This way the heat will be distributed between inner and outer surfaces of the specimen.

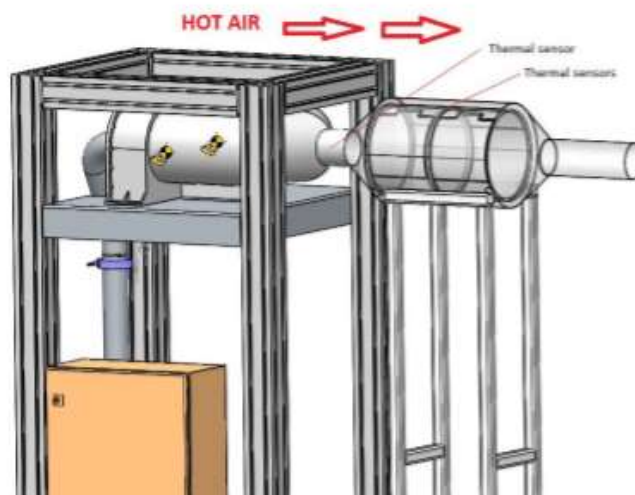


Figure 1. Test setup





Cylindrical casing has supports inside, so the test specimen will be centered (Figure 2). Gap between the sleeve and casing is approximately 20mm.

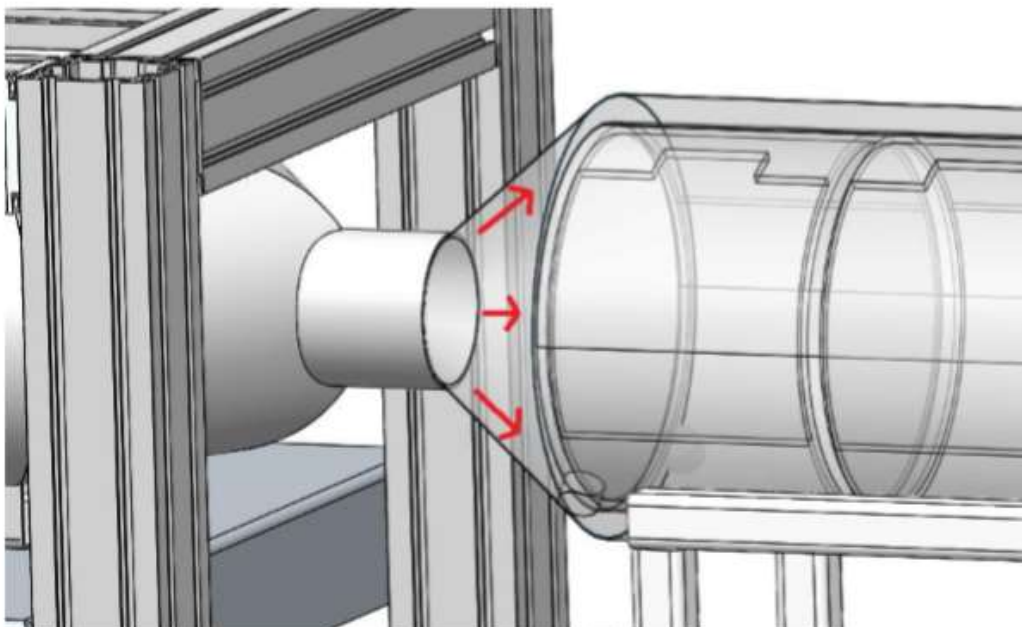


Figure 2. Heat distribution

#### Performance

Measured performance values of the hot gas blower are shown in Figure 3.  $Q_m$  = mass flow,  $P$  = back pressure, Temp = temperature at heater outlet.

$Q_m$ (kg/h)	$P$ (mbar)	Temp ( $^{\circ}C$ )
511,08	125,5	482
507,00	128,5	491
504,96	129	495
386,84	88	530
386,16	88,4	533
397,41	90	532
403,64	95	531
407,84	96,8	529

Figure 3. Maximum performance of the hot gas blower





## 2. Heat Cycling

### Test Course

500 cycles

Heating phase: Exhaust aftertreatment system is heated with the mass flow of 400 kg/h up to 530 °C.

Cooldown phase: Heaters are turned off until sleeve surface temperature drops below 100 °C. Mass flow increased to maximum blower capacity.

### Cycle times

Heating phase: Until stable sleeve surface temperature. Maximum air temperature during phase: TBD (530 °C)

Cooldown phase: From stable sleeve surface temperature to 100 °C

Overall estimated test duration: 2-3 weeks

## 3. Datalogging

Datalogger: Omega OM-DAQXL

Temperature inputs: heater outlet air, surface temperature of a sleeve, inner temperature of the sleeve, air mass flow

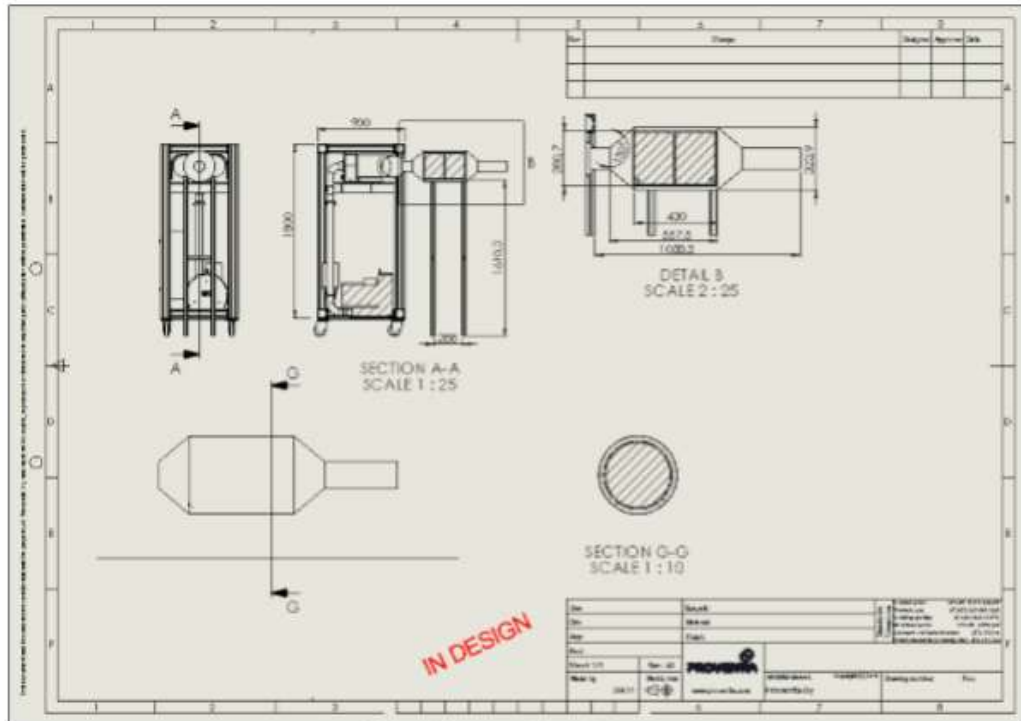
Temperature data sampling rate: 0,2 Hz

## 4. Reporting

Test report includes temperature records from heater outlet, surface of a sleeve and inner air of a sleeve, mass air flow records, and any fractures that occur in the test specimen after the test is performed.

## Attachments

1 thermal ageing test setup drawing



Attachment 1

CONFIDENTIAL

Heating		Blowing		Hot gas blower 64kW (PEC-024)	
2x Leister LHS 91 SYSTEM		Elektror 1SD 810		Width	900 + power cable hook 150mm
Max. air outlet temperature	650 C	Max. gas mass flow	10,33 m3/min	Length	850
Max. air inlet temperature	50 C	Max. pressure out	400 mbar	Height	2000
Max. ambient air temperature	60 C	Motor max Power	9,80 kW	Weight	370 kg
Weight	13,5 kg	Voltage	480 V	Power feed	2x63A
Voltage	3x 400 V	Power feed	18,2 A	Voltage	400 VAC
Current	46 A	Ambient noise level	74 dB		
Power	32 kW	Weight	66 kg		
		IP- classification	IP 55		

(22.)