Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2019

Aku Mäntynen

KERAAMISET PINNOITTEET LÄMPÖSÄTEILYN VÄHENTÄJINÄ

TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Kesäkuu 2019 | 38 sivua, 2 liitesivua

Aku Mäntynen

KERAAMISET PINNOITTEET LÄMPÖSÄTEILYN VÄHENTÄJINÄ

Tässä työssä käsitellään kahden kaupallisen pinnoitteen, VHT Flameproofin ja Tech Line Black Satinin vaikutusta termiseen lämpökuormaan ja lämpösäteilyyn ympäröivässä ilmassa ja kappaleissa. Tutkimus kohdistuu turboahtimen pakopesän tarkasteluun, jolloin saadaan selkeä käsitys pinnoitteiden mahdollisesta toimivuudesta. Pinnoittaminen tapahtuu kappaleiden ulkopinnalle. Testaaminen suoritetaan testipenkissä ohjaamalla lämmitettyä ilmavirtaa pakopesän läpi.

Mittausalueen ympäristön vaikutus itse mittaukseen pyritään minimoimaan. Työssä käsitellään lämpösäteilyn vaikutusta moottoritilaan kohdistuvaan lämpökuormaan, sekä sen alentumisesta aiheutuvaan hyötysuhteen paranemiseen. Yksinkertaisimpia kohteita pinnoituksen hyödyntämiseen ovat pakosarja ja turboahtimen pakopesä. Tässä työssä myös vertaillaan pinnoitteita perinteisiin lämpölevyihin ja kääreisiin sekä pohditaan parasta pinnoitusmenetelmää. Lämpötilamittaukset suoritetaan vakioiduista pisteistä lämpökameralla kuvaten sekä termoparimittauksilla sisään- ja ulostulevaa lämpövirtaa analysoiden.

Tehtyjen testien mittaustulosten perusteella pinnoitteiden merkitys lämpösäteilyn vähentämiseksi jäi oletettua vähäisemmäksi. Merkittäviä eroja ei pystytty havaitsemaan suorien lämpökamerakuvien eikä välillisten heijastusmittausten kautta.

ASIASANAT:

Lämpösäteily, lämpökuorma, keraaminen pinnoite, lämpökuvaus

BACHELOR´S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

June 2019 | 38 pages, 2 pages in appendices

Aku Mäntynen

CERAMIC COATINGS FOR REDUCING HEAT RADIATION

This thesis discusses the effect of two commercial coatings, VHT Flameproof and Tech Line Black Satin, on the thermal air and thermal radiation surrounding the thermal load and heat. The research focuses on the inspection of the turbochargers hot side housing, which gives a clear idea of the possible functioning of the coatings. The coating takes place on the outer surface of the pieces. Testing is performed on a test bench by controlling the heated air flow through the hot side housing.

The effect of the measurement area environment on the measurement itself is minimized. The work deals with the effect of thermal radiation on the heat load on the engine compartment, as well as the improvement in efficiency resulting from its reduction. The simplest items to utilize the coating are the exhaust manifold and the turbocharger hot side components. This work also compares coatings to conventional heat plates and wrappers and considers the best coating method. Temperature measurements are performed from standardized points with a thermal camera and by thermocouple analyzing inlet and outlet heat.

Based on the results of the tests carried out, the significance of coatings for reducing heat radiation was less than expected. Significant differences could not be detected through direct thermal imaging or indirect reflection measurements.

KEYWORDS:

Ceramic coating, thermal heat, thermal radiation, thermal imaging

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO **7**

2 LÄMPÖSÄTEILY JA LÄMPÖKUORMAN VAIKUTUKSET **8**

2.1 Konduktio 8

2.2 Konvektio 8

2.3 Lämpösäteily 9

2.4 Lämpökuorman vaikutukset komponentteihin, lämpövanheneminen 9

2.5 Lämpötilan vaikutus polttomoottorin hyötysuhteeseen 10

3 KEINOJA LÄMPÖSÄTEILYN VÄHENTÄMISEEN **11**

3.1 Lämpökääreet ja peitteet 11

3.2 Lämpöpellit 12

3.3 Pinnoitteet 12

4 KERAAMISET PINNOITTEET **14**

4.1 VHT Flameproof 14

4.2 Tech Line Black Satin 14

4.3 Pinnoittaminen 15

4.3.1 Pohjustus 15

4.3.2 Esilämmitys 16

4.3.3 Ruiskutus 16

4.3.4 Pinnoitteen kovetus 17

5 MITTAUSTEN SUORITUS **18**

5.1 Mittalaitteet 18

5.1.1 Lämpökamera 18

5.1.2 Dataloggeri termopareilla 19

5.2 Mittausten valmistelut 20

5.3 Mittauspisteiden valinta 20

5.4 Emissiokerroin ja sen määrittäminen 21

5.5 Lämpökameran asemointi 23

6 MITTAUSTULOKSET **24**

6.1 Ensimmäinen mittausten sarja 24

6.2 Toinen mittausten sarja 26

6.3 Kolmas mittaus, heijastuksien tarkastelu 29
6.4 Neljäs mittaus, pintojen yhtenäistäminen mattamustaksi 31
6.5 Virhetarkastelu 34

7 TULOKSIEN ANALYSOINTI 36

8 LOPUKSI 37

LÄHTEET 38

LIITTEET

Liite 1. Dataloggerin mittaustulokset.

KUVAT

Kuva 1. Lasikuituinen lämpönauha downpipen ympärillä. 11
Kuva 2. Lasikuitukerrosteinen lämpösuoja katkaistuna. 12
Kuva 3. Pakopesän hiekkapuhallus. 15
Kuva 4. Black Satinin ruiskutus. 16
Kuva 5. VHT-pinnoitettu vasemmalla ja Tech Line oikealla. 17
Kuva 6. ThermaCAM P65 lämpökamera. 19
Kuva 7. Dataloggeri mittakortilla ja kahdella k-tyypin termoparilla. 19
Kuva 8. Testipenkin valmistusta. 20
Kuva 9. Lämpöparien asemointi testipenkissä. 21
Kuva 10. Emissiokertoimen määritys. 22
Kuva 11. Lämpökameran asemointi. 23
Kuva 12. Pinnoittamaton pakopesä, ensimmäinen testi. 25
Kuva 13. VHT, ensimmäinen testi. 25
Kuva 14. Tech Line, ensimmäinen testi. 25
Kuva 15. Varmistusmittaus viimeiseksi pinnoittamattomalla. 26
Kuva 16. Pinnoitettu Tech Line, ε = 0,78. 27
Kuva 17. Pinnoitettu Tech Line, ε = 1,00. 27
Kuva 18. Pinnoitettu VHT ε = 0,68. 28
Kuva 19. Pinnoitettu VHT ε = 1,00. 28
Kuva 20. Pinnoittamaton ε = 0,83. 28
Kuva 21. Pinnoittamaton ε = 1,00. 29
Kuva 22. Lämpökääreverrokki. Harmaalla lasikuitunauhalla kiedottu pakopesä. 29
Kuva 23. Alumiinilevyn kuvaus. 30
Kuva 24. Pinnoittamaton. 30
Kuva 25. VHT. 31
Kuva 26. Tech Line. 31
Kuva 27. Pakopesien pintaväri yhtenäistettynä. 32
Kuva 28. Pinnoittamaton mattamustana, ε = 0,90. 32
Kuva 29. Tech Line mattamustana, ε = 0,90. 33

Kuva 30. VHT mattamustana, ε = 0,90. 33
Kuva 31. Pinnoittamaton mattamustana, ε = 0,90, referenssimittaus. 33

TAULUKOT

Taulukko 1. Määritetyt emissiokertoimet. 23

1 JOHDANTO

Polttomoottori tuottaa käydessään runsaasti hukkalämpöä. Hukkalämpö pyritään johtamaan jäähdytysnestekierrolla pois moottorin kriittisistä osista usein moottoritilan etuosassa sijaitsevan jäähdytyskennon ja sisätilan lämmityskennon kautta. Turboahdetussa moottorissa moottorin hyötysuhdetta pyritään nostamaan ilman tiheyttä kasvattamalla ja imuilman lämpötilaa alentamalla. Usein imuilmaa jäähdytetään ahtimen ja moottorin väliin asetetulla, joko vesi- tai ilmajäähdytteisellä kennolla, josta käytetään nimeä välijäähdytin.

Kaikkea hukkalämpöä ei kuitenkaan kyetä johdattamaan jäähdytysjärjestelmään ja hyvin suuri osa palotapahtumassa syntyneestä lämmöstä jääkin palokaasuihin. Palokaasut kulkevat moottoritilassa pakosarjan kautta turboahtimelle. Turboahtimelta kaasut johdetaan pakoputken alkuosaan (eng. downpipe) ajoneuvon alle, missä pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmät usein sijaitsevat. Putkistossa kulkiessaan pakokaasut lämmittävät voimakkaasti ympäröiviä komponentteja ja moottoritilan ilmaa. Moottoritilan lämpötilaa pyritään minimoimaan usein eri keinoin, joko eristämällä lämpeneviä komponentteja tai lisäämällä niihin omaa nestejäähdytyskiertoa.

Usein tehdastekoisessa eristyksessä ja lämpösäteilyn vähennyksessä näkyy käytettävän erilaisia teräksestä tai alumiinista valmistettuja suojalevyjä; useissa sovelluksissa myös lasikuitumatolla kerrostettuna. Markkinoilla on kuitenkin pinnoitteita, joiden luvataan vähentävän lämpösäteilyä ja lämpökuormaa entisestään. Autoteollisuus ei juurikaan käytä keraamisia pinnoitteita, mutta kilpa-autoilussa suositaan etenkin kahden tässä työssä käsitellyn valmistajan tuotteita. Erilaisia riippumattomia mittaustuloksia on kuitenkin kovin vähän löydettävissä kyseisistä tuotteista. Onkin syytä vertailla näitä tuotteita keskenään ja ottaa selvää, onko lupauksille katetta.

2 LÄMPÖSÄTEILY JA LÄMPÖKUORMAN VAIKUTUKSET

Lämpöenergialla on luontainen pyrkimys levitä ympäristöön aina korkeammasta lämpötilasta alhaisempaan päin. Lämmönsiirto on itsestään tapahtuva, palautumaton prosessi. Lämpöenergia voi siirtyä paikasta toiseen kolmella eri mekanismilla: johtumalla (konduktio), kuljettamalla (konvektio) ja säteilemällä. Käytännössä kaikki kolme lämmönsiirron muotoa esiintyvät yleensä samanaikaisesti, mutta kuitenkin yksi muoto on vahvimmin määräävä ja lämmönsiirron tarkastelu tapahtuu tämän mukaisesti. (Krannila 1975, 101.)

2.1 Konduktio

Konduktiolla tarkoitetaan lämmön johtumista kiinteän aineen tai levossa olevan kaasun tai nesteen sisällä. Lämmön johtuminen tapahtuu suoraan molekyylien keskinäisten törmäysten välityksellä ilman aineen siirtoa. Johtumisen mekanismi on erilainen kiinteässä aineessa kuin kaasuissa tai nesteissä. Kaasuissa ja jossakin määrin nesteissä lämmön johtuminen tapahtuu siten, että lämpimät nopeat molekyylit törmäävät kylmiin hitaampiin molekyyleihin ja näin lovuttavat osan liike-energiastaan näille. Kiinteässä aineessa lämmön johtumisen mekanismi on monimutkaisempi. Siinä molekyylit eivät pääse liikkumaan samalla tavalla toistensa ohitse, vaan ne värähtelevät lämmön vaikutuksesta ja energia siirtyy värähtelynä aineen läpi. (Hokajärvi 1986, 8.)

Aineen lämmönjohtavuus on fysikaalinen ominaisuus, joka kuvastaa aineen kykyä johtaa lämpöä. Lämmönjohtuminen on analoginen sähkönjohtumisen kanssa, joten samoja käsitteitä ja laskumenetelmiä voidaan käyttää. Aineet jaotellaan lämmönjohtavuuden mukaan lämmönjohteisiin ja -eristeisiin. (Andersson 1998, 3-4.)

2.2 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämpövirtausta liikkuvassa nesteessä tai kaasussa. Jos virtaus on saatu aikaan ulkoisista syistä, kuten pumpun tai puhaltimen avulla, kyseessä on pakkokonvektio. Vapaassa eli luonnollisessa konvektiossa virtaus tapahtuu itsestään, siinä virtauksen aiheuttaa nesteen tai kaasun sisäisistä lämpötilaeroista johtuvat tiheyserot.

Veden kiehuminen kattilassa on esimerkki vapaasta konvektiosta ja pullon jäähdyttäminen virtaavassa vedessä pakotetusta konvektiosta. (Fagerholm 1986, 256.)

2.3 Lämpösäteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka syntyy aineessa olevien varattujen hiukkasten lämpöliikkeestä. Lämpösäteilyä sanotaan myös infrapunasäteilyksi siltä osin kuin sen aallonpituus ylittää näkyvän valon aallonpituuden (aallonpituus $\lambda > 0{,}8\mu m$).

Sähkömagneettiset aallot etenevät suoraviivaisesti valonnopeudella ja muuttuvat takaisin lämmöksi osuessaan johonkin säteilyä absorboivaan aineeseen, samalla osan energiasta heijastuessa ja osan saattaessa mennä läpi. Tällöin puhutaan absorptio-, heijastumis- ja läpäisysuhteista. Vain absorboitunut energia lisää kappaleen energiaa ja se ilmenee yleensä lämpötilan nousuna, jollei se samanaikaisesti luovuta samaa energiamäärää ympäristöönsä. Lämpötilan nousu vaikuttaa kappaleen ympäristöönsä säteilevään energian määrään. (Andersson 1998, 3-4.)

Lämpösäteilyn periaatteelinen ero konduktioon ja konvektioon verrattuna on, että konduktio ja konvektio tapahtuvat väliaineessa, jossa lämpötilakenttä on jatkuva. Lämpösäteily siirtyy kappaleesta toiseen ilman väliainetta esimerkiksi auringonsäteily maahan. Säteily ei vaikuta mitenkään sen aineen lämpötilaan, jossa se etenee. Konduktiolla ja konvektiolla siirtyvä lämpöteho riippuu lämpötilojen erosta, ei lämpötilatasosta. Säteilyn määrä riippuu lämpötilatasosta. Huoneen lämpötilassa säteily voidaan usein jättää huomiotta, mutta sen osuus kasvaa nopeasti lämpötilan noustessa. (Fagerholm 1986, 256.)

2.4 Lämpökuorman vaikutukset komponentteihin, lämpövanheneminen

Korkeat lämpötilat rasittavat moottoritilan eri komponentteja kuten sähkölaitteita ja lyhentää mahdollisesti näiden elinikää. Lämpötila aiheuttaa eristemateriaalin sähköisten, kemiallisten ja erityisesti mekaanisten ominaisuuksien heikentymistä kuten haurastumista. Ilmiötä kutsutaan lämpövanhenemiseksi. Alttiita kohteita ovat muun muassa eristemateriaalit, läpiviennit, muoviosat ja liittimet. (Stuklex 2019.)

2.5 Lämpötilan vaikutus polttomoottorin hyötysuhteeseen

Ilman tiheys vaihtelee paineen ja lämpötilan mukaan. Normaalipaineessa ja merenpinnan tasolla ilman lämpötilan ollessa 0 °C, ilman tiheys on 1,293 kg/m³. Lämpötilan noustessa ilman tiheys laskee, esimerkiksi 20 °C lämpötilassa tiheys on 1,205 kg/m³. Esimerkiksi imuilman lämpötilan noustessa 80 °C:sta (353K) 100 °C:een (373K), laskisi ilman tiheys yli 5 prosenttia samassa paineessa.

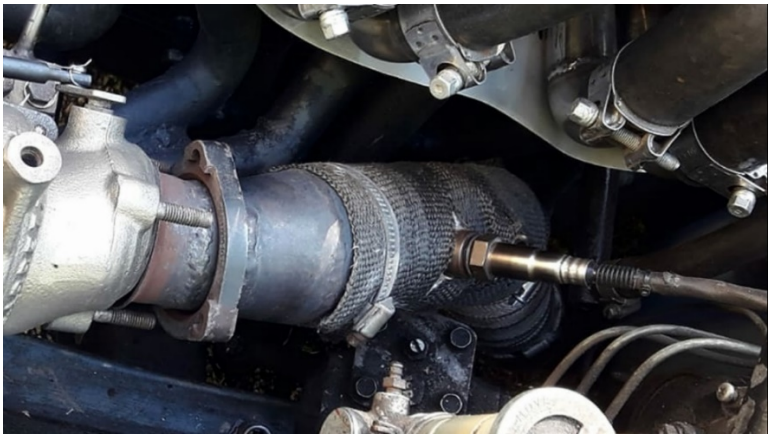
Mitä viileämpänä sylintereihin palotapahtumassa tarvittava ilma saadaan johdettua, sitä suurempi määrä ilmaa saadaan palotapahtuman osaksi samassa tilavuudessa ja paineessa ja hyötysuhde paranee. Ahtoilman jäähdyttimen toiminta perustuu ajoviiman jäähdyttävään vaikutukseen, mutta pienemmillä ajonopeuksilla moottoritilan sisäinen lämpökuorman vaikutus imuilman lämpötilaan korostuu. Välijäähdytin onkin tämän vuoksi useimmissa tapauksissa sijoitettu ajoneuvon etuosaan ajoviiman hyödyn maksimoimiseksi ja samalla mahdollisimman kauas lämpöä säteilevistä komponenteista. (Autospeed 2008.)

3 KEINOJA LÄMPÖSÄTEILYN VÄHENTÄMISEEN

Lämpösäteilyn vähentämiseen on useita tapoja: lämpökääreet, lämpöpellit, lasikuitutäytteiset lämpösuojat sekä erilaiset pinnoitteet. Myös käytetyllä seossuhteella ja sytytyksen ajoituksella pystytään vaikuttamaan palokaasuihin sitoutuvan lämpöenergian määrään. Silloin kun moottorin käyttötarkoituksen vuoksi tärkein moottorikonstruktion suunnitteluperuste on maksimoida sen tuottama suorituskyky, on moottorin käydessä syntyvä hukkalämpö ja sen haitalliset vaikutukset pyrittävä minimoimaan muilla, toissijaisilla keinoilla. Syntyvän lämpökuorman vähennystarve on syytä kartoittaa tapauskohtaisesti ennen toimenpiteisiin ryhtymistä, sillä kaikissa variaatioissa syntyvä lämpö ei ole merkittävästi haitaksi komponenttien kestävyyden tai käyttöasteen kannalta.

3.1 Lämpökääreet ja peitteet

Lämpökääreiden etuna on helppo jälkiasennettavuus; jopa ilman kohdekappaleen irroitusta. Lämpökääreet tosin imevät itseensä kosteutta, joka haurastuttaa etenkin ruostuvia teräslaatuja erittäin tehokkaasti. Lämpö jää myös hautumaan pinnoitteen ja metallipinnan väliin, joka haurastuttaa materiaalia. Ruostumattomille materiaaleille käärintä on toimiva ratkaisu eristää lämpöä, mutta muille kuin ruostumattomille teräksille lämpökääreiden pitkäaikaista käyttöä ei voi suositella voimakkaan korroosion vuoksi. Kuvassa 1 lasikuituinen lämpönauha eristämässä lämpösäteilyä yhdestä moottoritilan kuumasta lämmönlähteestä.



Kuva 1. Lasikuituinen lämpönauha downpipen ympärillä.

Lasikuidusta valmistettuja huppuja käytetään myös eristämään turboahtimien pakopesien lämpösäteilyä, mutta nämä ovat lähes poikkeuksetta jälkiasenteisia. Tehdasasenteisissa pakokaasuahtimissa on usein integroidut hukkaportit, jolloin lämpöpeitteiden asennus tuo lisäksi haasteita hukkaportin tangon esteettömän liikkeen turvaamiseksi. Hukkaportittomalle pakokaasuahtimelle huppu on turvallisempi valinta.

3.2 Lämpöpellit

Lämpöpellit ovat usein monikerroksisia peltilevyjä, joissa käyttökohteesta riippuen voi olla myös ohut lasikuitumatto peltien välissä (Kuva 2). Lämpöpeltejä käytetään usein tehdasasenteisina suojina turboahtimien, pakoputkien ja katalysaattoreiden ympärillä. Lämpöpelti suojaa takanaan olevat kohteet lämpösäteilyltä tehokkaasti ja haihdutaa itseensä imeytyneen lämpöenergian säteilevää kohdetta usein laajemman haihdutuspinnan ansiosta. Haittapuolina tässä eristämismuodossa ovat epätäydellinen lämmöneristys sekä usein myös syntyvät kustannukset. Lämpöpelti vaatii lisäksi aina omat kiinnikkeensä ja ajan kuluessa meluhaittoja saattaa syntyä resonoivien lämpösuojien myötä.

Kuva 2. Lasikuitukerrosteinen lämpösuoja katkaistuna.

3.3 Pinnoitteet

Markkinoilla on useita lämmönkestäviä maaleja, mutta lämmönkestoa luvataan maksimissaan 650 °C. Pakosarjaan liittyvien komponenttien maksimilämpötila on kuitenkin usein huomattavasti kuumempi, jopa +1000 °C, jolloin perinteiset maalit eivät näillä pinnoilla tule pitkäaikaisesti kestämään. Lämmönkestäviä maaleja käytetään pääasiassa

suojaamaan tuote korroosiolta tai luomaan pinnalle haluttu ulkonäkö sekä väritys. Maaleja on useille eri lämpötiloille aina +650 °C asti ja saatavilla oleva väriskaala kattaa useat perusvärit. Lämpösäteilyn eristämistarkoituksessa lämpömaaleja ei markkinoida. Maalin kaltaisia, keraamisia pinnoitteita on saatavilla tähän tarkoitukseen. Keraamisten pinnoitteiden haittapuolena muihin lämpösuojauksen muotoihin verrattaessa voidaan pitää pinnoitteiden hintaa ja lisääntyviä työvaiheita. Kasvavat kustannukset voisivat myös autojen jälkimarkkinoilla (varaosamyynti) nostaa merkittävästi varaosien hintoja.

Keraamiset pinnoitteet puolestaan sisältävät nimensä mukaisesti keraameja. Keraamien koko vaikuttaa tuotteiden ruiskutusominaisuuksiin ja levittäytymiseen. Keraamisia pinnoitteita on saatavilla suppealla värivalikoimalla ponneainepulloissa sekä maaliruiskuun sopivana tuotteena. Monet keraamit ovat kiteisiä aineita, mutta keraameihin kuuluu myös amorfisia aineita (lasit). Keraamit voivat sisältää metalli-ioneja, mutta metallien ja puolimetallien molekyyliyhdisteitäkin esiintyy. Yhdisteiden kirjo on laaja; mukana on mm. silikaatteja, oksideja, karbideja, nitridejä, sulfideja ja borideja. (Opetushallitus 2019.)

Keraami on yleisnimitys keraamiselle materiaalille, joka valmistetaan polttoprosessilla epäorgaanisista lähtöaineista. Keramiikan lähtöaineina ovat savipohjaiset raaka-aineet. Savi on pääosin alumiinisilikaattia. Arkikielen ’keraami’-termillä viitataan usein niin sanottuihin ’Hi-tech’-keraameihin, joihin kuuluu erittäin lujia materiaaleja. Osa Hi-tech-keraameista korvaa joissain sovelluksissa metalleja sen paremman keveyden, korroosionkeston ja kuumudenkestonsa vuoksi. (Opetushallitus 2019.)

4 KERAAMISET PINNOITTEET

Kuluttajakäyttöön markkinoitavia keraamisia pinnoitteita on Suomessa saatavilla ainakin kahdelta eri valmistajalta. Tässä työssä tutkitaan kahden kilpailevan merkin tuotteen ominaisuuksia ja verrataan niitä täysin käsittelemättömään pintaan. Saatavilla on myös päällikeraamien alle ruiskutettavaa aluskeraamia. Kahden keraamikerroksen yhdistelmällä luvataan tehokkaampi lämpösäteilyä vähentävä vaikutus. Pinnoitteita on saatavilla myös pintojen sisäpuolelle.

Vertailuun valitut tuotteet ovat Tech Linen Black Satin -tuotenimellä tunnettu pinnoite, sekä VHT -brändin tuotenimellä Flameproof kulkeva pinnoite. VHT:n tuote on ponnepakkauksessa ja Tech Linen tuote on saatavilla siveltävänä/ruiskutettavana. Helposti sakkautuvana Tech Linen tuote ei ole saatavilla ponnepakkauksessa, vaan tuote vaatii erillisen ruiskutuslaitteiston käytön. (Martelius 2019.)

4.1 VHT Flameproof

VHT Flameproof -pinnoitteen mainostetaan lisäävän ”äärimmäisen korkeille lämpötiloille alttiiden pintojen” käyttöikää. Pinnoitetta kutsutaan ainutlaatuiseksi ja käyttökohteiksi mainitaan autoteollisuuden pakokaasujärjestelmät sekä ilmailu- ja avaruusteollisuuden suihkumoottorit. Luvattu lämpötilankesto on 704 °C - 1093 °C. Tuote vaatii uunituksen kolmessa eri vaiheessa. Testiä varten ostetun tuotteen väri on harmaa. VHT:n tuoteselosteen mukaan aine sisältää ketoneita, tolueenia ja ksyleeniä. Hinta 400ml painepakkaukselle on 25 euroa. (KKD Motorsport 2019.)

4.2 Tech Line Black Satin

Tech Line puolestaan mainostaa pinnoitettaan edistyneimmäksi pakosarjapinnoitteeksi, jolla on markkinoiden paras lämmöneristyskyky. Tuote on helppokäyttöinen, keraameilla vahvistettu pinnoite, jota käyttävät niin kilpatiimit kuin autovalmistajatkin. Black Satinin luvataan kestävän 1100 ºC metallin lämpötilan säröilemättä ja hilseilemättä sekä estävän tehokkaasti lämpösäteilyn. Black Satin ei vaadi uunitusta, vaan kovettuu asennettuna. Uunitus on kuitenkin suositeltavaa. Mainospuheessa mainitaan Comp Camsin testissä konehuoneen lämpötilan pudonneen keskimäärin 64 °C pinnoittamattomiin sarjoihin ver-

rattuna. Tuotteen väri on musta. Black Satinin tuoteselosteessa mainitaan tuotteen sisältävän seuraavia ainesosia: ksyleeni, kiteinen pii, isobutylialkoholi, metanoli, molybdeenisulfidi, kuparikromaattispinelli. 100ml ainetta maksaa 36 euroa. (Martelius Exhaust 2019.)

4.3 Pinnoittaminen

Pinnoitteiden valmistaja toimittaa yksityiskohtaiset ohjeet tuotteen oikeaoppiselle käytölle. Tuotteiden oikeasta pinnoitusmetodista haluttiin olla varma, joten tämän työn puitteissa annettuja ohjeita seurattiin tarkasti. Tarkoitus oli saada tuotteet toimimaan niin kuin valmistaja on ne tarkoittanut. Ohjeiden seuraamisen tavoitteena oli myös saada mahdollisimman vertailukelpoinen tulos tuotteiden ominaisuuksista.

Vertailtavilla tuotteilla pohjatyöt ovat keskenään vastaavia, mutta uunitus- ja maalausohjeista löytyy eroavaisuuksia.

4.3.1 Pohjustus

Pinnoitteiden pohjatyönä on ehdottoman puhdas ja rasvaton pinta. Metallipinnat suositellaan myös rae- tai hiekkapuhallettavan, jotta huokoset aukeavat riittävästi pinnoitteen tarttumista silmällä pitäen (Kuva 3). Lasikuulapuhallus ei välttämättä takaa tarpeeksi rosoista pintaa. Käsiteltävät pinnat tulee puhdistaa huolellisesti rasvaa poistavalla liuottimella ennen puhallusta ja uudelleen ennen pinnoitteen ruiskutusta. Rasvanpoistoon sopii tehokkaat liuottimet kuten asetoni.

Kuva 3. Pakopesän hiekkapuhallus.

4.3.2 Esilämmitys

Pinnoitettava kohde on hyvä esilämmittää vajaaseen +40 °C:een lämpötilaan ennen ruiskutuksen aloitusta. Oikealla esilämmityksellä saadaan ehkäistyä valumia sekä taataan parempi tartunta pinnoitettavaan kappaleeseen.

4.3.3 Ruiskutus

Jotta ruiskutettava aine pysyy homogeenisena, on purkkia ravistettava säännöllisesti työskentelyn aikana. Black Satinin ruiskutusohjeissa mainitaan, että kyseessä ei ole maalaus vaan tavoiteltava kerrosvahvuus pinnoitteelle on 0,025-0,04mm. Kerroksen ollessa liian paksu, voi pinnoite lohkeilla, säröillä tai kuplia. Suositeltava suutinkoko liuotinohenteiselle on 1,2mm ja ruiskutuspaine noin 2-2,5 bar. (Tech Line Coatings Inc 2018.)

Kuva 4. Black Satinin ruiskutus.

VHT:n pinnoite ruiskutetaan painepakkauksesta ensin ohuina harsoina kahteen kertaan ja lopuksi ruiskutetaan paksumpi kerros. Kerroksien ruiskutuksen aikaväli tulee olla noin 10 minuuttia ja kaiken on tapahduttava yhden tunnin sisällä aloituksesta. Tunnin aikaikkunan ylittyessä tulee tuotteen antaa kuivua välissä seitsemän vuorokautta. (VHT Paints 2019.)

4.3.4 Pinnoitteen kovetus

Osa pinnoitteista vaatii uunituksen tai tuotteen lämpötilan pitämisen tietyssä lämpötilassa tietyn ajanjakson, jotta pinnoitteesta tulisi kestävä. Black Satinia markkinoidaan ilmakuivuvana, mutta valmistaja kuitenkin suosittelee uunitusta. Yleisesti liuotinpohjaisille pinnoitteille suositellaan uunitusta noin 260 °C lämpötilassa noin tunnin ajan. Vaihtoehtona on myös pakopuolen komponenttien lämmityksessä käyttää moottoria tyhjäkäynnillä, mutta uunituksella saadaan varmemmin pidettyä toivottu lämpötila. Pinnoite saavuttaa lopullisen kemiallisen lujuutensa noin 400 °C:n lämpötilassa, jossa pitoajan suositus on yksi tunti. Ohjeistuksena on olla ylittämättä annettua lämpötilaa pinnoitteen niin sanotun sisäänajon aikana, koska täysin kovettumaton pinnoite saattaa palaa pois suuremmissa lämpötiloissa. (Tech Line Coatings Inc 2018.)

VHT Flameproof puolestaan vaatii monivaiheisen kovettamisen. Pinnoitteen kuivumisen jälkeen tehtävä uunitusprosessi on ohjeen mukaan seuraavanlainen:

1. Kuumennetaan 121 °C:n lämpötilaan, jossa pidetään 30 minuuttia
2. Jäähdytetään 30 minuuttia
3. Kuumennetaan 204 °C lämpötilaan, jossa pidetään 30 minuuttia
4. Jäähdytetään 30 minuuttia
5. Kuumennetaan 343 °C lämpötilaan, jossa pidetään 30 minuuttia (VHT Paints 2019.)

Pinnoitteiden uunituksen ja jäähtymisen jälkeen pakopesät ovat suorittamista varten valmiina kuvassa 5.

Kuva 5. VHT-pinnoitettu vasemmalla ja Tech Line oikealla.

5 MITTAUSTEN SUORITUS

Lämpötiloja mitataan lämpökameralla ja termopareilla testipenkkiin kiinnitetystä pakopesästä muutamasta eri mittauspisteestä. Pakopesän tulopuolta lämmitetään kuumailmapuhaltimella puhallin putken päähän kytkettynä. Testipenkissä mitataan lämpötilat tulo- ja lähtöpuolelta, turboahtimen pinnan läheisyydestä sekä referenssiarvo ympäröivästä tilasta. Mittaaminen lopetetaan kun lämpötilat eivät enää nouse tai nousevat hyvin hitaasti. Muutaman testilämmityksen jälkeen aikaikkunaksi testauksille päätettiin ottaa 20 minuuttia. Mittauksen vakioimiseen rakennettiin testipenkki, johon testattavat kappaleet pystyttiin vaihtamaan olosuhteiden pysyessä mahdollisimman muuttumattomina.

5.1 Mittalaitteet

Mittauksen suorittamiseksi tarvittiin mittalaite, johon saatiin kiinnitettyä kaikki tarvittavat termoparit samanaikaisesti. Pinnan lämpötilojen seurantaan tarvittiin myös käyttöalueelle soveltuva lämpökamera, jolla otetut kuvat saatiin tallennettua digitaaliseen muotoon. Mittalaitteita ei erikseen mittausta varten kalibroitu, mutta kaikki mittaukseen käytetyt anturit näyttivät samaa lämpötilaa ennen testipisteisiin asennusta. Virheen merkitystä minimoitiin käyttämällä jokaisessa mittauksessa samoja antureita samoissa testipisteissä, jolloin absoluuttisen mittatarkkuuden merkitys vertailutestissä vähenee.

5.1.1 Lämpökamera

Pinnoitettujen pakopesien säteilylämmön mittaamiseen FLIR-systemsin ThermaCAM P65 -lämpökameraa (Kuva 6). Lämpötila-alue riittää tällä laitteella +1500 °C asti. Kameran käyttämän mittaspektrin aallonpituus on 7,5um - 13 um. Kamera löytää kuvasta automaattisesti kuumimman ja kylmimmän pisteen. Mittauksiin on mahdollista valita lisäksi useita mittapisteitä, joista jokaisesta saadaan myös oma arvonsa näyttöön. Lämpökameran kanssa käytettiin jalustaa, jolloin kuvauspiste pystyttiin pitämään etäisyyden ja positioinnin kannalta muuttumattomana mittausten välillä. Mittauksissa käytetty lämpötila-alue oli 0-500 °C.

Kuva 6. ThermaCAM P65 lämpökamera.

5.1.2 Dataloggeri termopareilla

Lämpötilojen mittaukseen käytettiin Keysight 34972A dataloggeria 34901A mittakortilla (Kuva 7). Mittakorttiin voi kytkeä useita antureita ja K-tyypin termopareilla mittausalue riittää +900 °C yläpuolelle. Tällä dataloggerilla mittaukset saadaan suoritettua 0,1 °C tarkkuudella. Antureita tarvittiin mittaukseen neljä kappaletta, jotka sijoitettiin mittaamaan ahtimen tulo- ja lähtöpuolen ilmavirtojen lämpötilaa, ahdinta ympäröivää ilmatilaa sekä mittaustilan lämpötilaa. Dataloggerilla olisi ollut mahdollista seurata ja tallentaa mittausdataa tietokoneelle USB-yhteydellä tai vastaavasti USB-muistitikulla siirtämällä, mutta näitä ominaisuuksia ei useidenkaan yritysten jälkeen saatu toimimaan. Kiinnostavinta työn kannalta oli kuitenkin lopulliset arvot, joten mittaustulokset tyydyttiin dokumentoimaan dataloggerin näytöltä käsin.

Kuva 7. Dataloggeri mittakortilla ja kahdella k-tyypin termoparilla.

5.2 Mittausten valmistelut

Jokaisen mittauksen kohdalla pakopesä kiinnitetään 4-pulttiseen laippaan, johon lämmönlähde ja yksi termopari kiinnittyvät yhdysputkella (Kuva 8). Termoparille tulee oma kierrenippansa lähelle pakopesän sisääntuloa. Anturin asettelu kohdistuu aivan pakopesän suulle ja lämpöanturin asemointi putken keskelle. Ahtimen pakopuolella käytetään hyväksi ajoneuvoon rakennettua downpipea, johon lambda-anturin paikalle kierreadapterilla liitetään toinen termopari. Hitsaukset suoritetaan MIG- ja TIG-hitsausmenetelmillä.

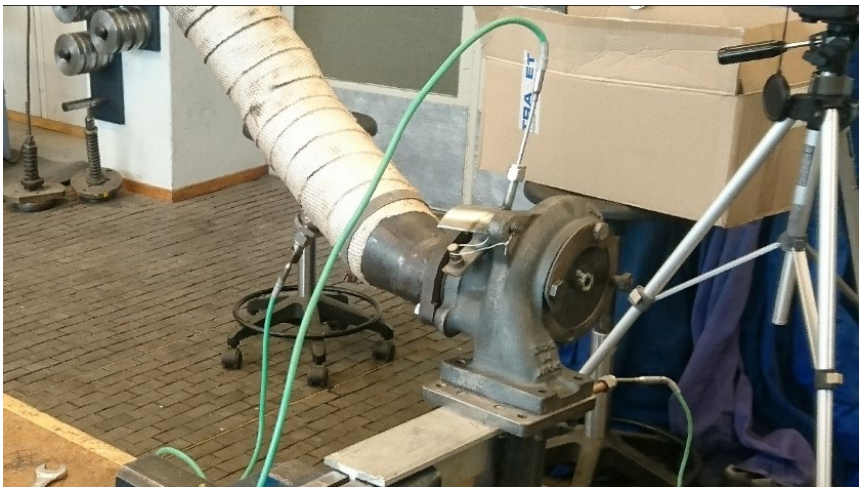
Kuva 8. Testipenkin valmistusta.

Pakopesän siipipyörän puoli tulpataan teräksisellä levyllä, jotta pystytään tarkastelemaan pelkän pakopesän pinnan lämpötilakäyttäytymistä ilman ohihengitystä. Myös ahtimen hukkaportin läppä lukitaan rautalangalla suljettuun asentoon, jotta ilmavirta kiertää koko ahtimen läpi eikä vain hukkaportin kautta suorinta reittiä. Näin taataan tasaisempi ja hallitumpi ilmavirtaus pakopesän lävitse.

5.3 Mittauspisteiden valinta

Termoparien sijoittelussa oli syytä huomioida mahdollinen lämpötilan tasaantuminen. Pakopuolella päädyttiin käyttämään autosta irroitetun downpipen lambdalle tarkoitettua kierrettä, sillä termoparia varten ei haluttu tehdä lisää reikiä putkeen. Lambdakierteen etäisyys pakopesän suulta oli noin 190mm.

Lämpötilaerojen mittaukseen käytettävät termoparit sijoitettiin lähelle pakopesän suuta sekä hieman pakopesän lähdön jälkeen. Lämmönlähteiden ja pakopesän kiinnitykseen tulevan putken pituus oli 260mm ja termopari oli kiinnitetty noin 30mm päähän putken suulta keskitetysti. Tällä tavoin pyrittiin saamaan mahdollisimman todenmukainen mittaarvo sisään menevälle lämpötilalle.



Kuva 9. Lämpöparien asemointi testipenkissä.

Itse pakopesän päälle kiinnittyy vaippa, jossa kiinnitettynä yksi pinnan läheisyydessä oleva termopari (Kuva 9). Neljäs termopari mittasi mittauspaikan ympäristöstä referenssilämpötilaa. Polttomoottoriin rinnastettavaa virtausta ei testiolosuhteissa kyetty tuottamaan, joten lämpötilaerojen tasoittumiseen vaadittava aika oli tavanomaista pidempi suurista kappaleiden massoista johtuen. Toisaalta suuremmissa massoissa lämpötilat pysyvät tasoittuessaan vakaampina, eivätkä ne ole niin herkkiä ympäristön pienille lämpötilan vaihteluille.

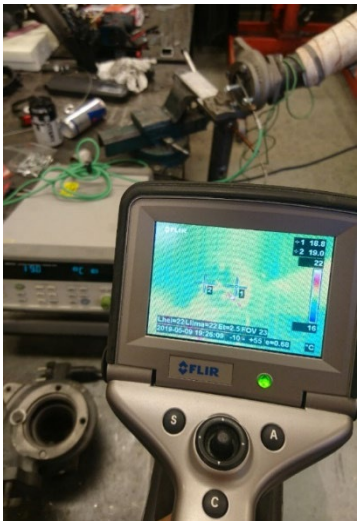
5.4 Emissiokerroin ja sen määrittäminen

Emissiokerroin tarkoittaa sitä osuutta lämpösäteilystä, joka on peräisin kohteesta itsestään. Emissiokertoimesta käytetään symbolia ε (epsilon). Jos kerroin on 1, se tarkoittaa, että kaikki kohteen infrapunalämpösäteily on peräisin kohteen omasta lämmöstä. Jos emissiokerroin on alle 1, osa lämpösäteilystä on lähtöisin viereisistä kohteista heijastumalla. Emissiokertoimella on siis vaikutusta lämpökameran näyttämään lukemaan.

Useimpien pintojen emissiokerroin on välillä 0.8 - 0.98. Yleisesti ottaen mitä tummempi ja mattapintaisempi kohde on, sitä suurempi on emissiokerroin. Jos kohteen emissiokerroin on suurempi kuin 0.95, näytetty lämpötila on suurempi kuin todellinen lämpötila. Jos kohteen emissiokerroin on pienempi kuin 0.95, näytetty lämpötila on pienempi kuin todellinen lämpötila. Kiillotetuilla metalleilla on hyvin pieni emissiokerroin, jolloin mittausta helpottavana tekijänä voidaan käyttää suuremman, ennalta tiedetyn emissiokertoimen omaavia tarroja tai pinnoitteita lämpötilaa määritettäessä.

Kappaleen emissiokertoimeen vaikuttaa paljolti kappaleen materiaali, pinta ja pinnoite. Useimmissa tapauksissa emissiokerroin on varminta määrittää tapauskohtaisesti. Kappaleen emissiokerrointa ei tarvitse määrittää, jos mitataan lämpötilaeroja kahden pinnaltaan samanlaisen kappaleen välillä.

Emissiokertoimen määritykseen on useita tapoja. Yksi tapa on etsiä taulukosta tunnetulle materiaalille annettu emissiokerroin. Mikäli emissiokerrointa ei ole lämpökamerakuvauksessa huomioitu, lämpökameran kuvasta saatava lämpötila-arvo saattaa poiketa merkittävästikin todelliseen lämpötilaan nähden. (SAMK automation tutkimusryhmä 2019.)



Kuva 10. Emissiokertoimen määritys.

Emissiokerroin määritetään tässä työssä seuraavasti: Kappaleen annetaan olla huoneen lämpötilassa yksi vuorokausi, jonka jälkeen lämpötila mitataan termoparilla ja lämpökameralla (Kuva 10). Emissiokerroin määritellään kameran näyttämän lämpötilan mukaan

anturilämpötilaa vastaavaksi. Emissiokertoimen määrittelyn jälkeen saatu arvo asetetaan lämpökameraan ja näyttämän pitäisi olla melko lähellä todellista lämpötilaa. Määritetyt kertoimet nähtävillä taulukossa 1. (SAMK automation tutkimusryhmä 2019.)

Taulukko 1. Määritetyt emissiokertoimet.

Määritetyt emissiokertoimet eri pinnotteille:	
VHT	ε = 0,68
TechLine	ε = 0,78
Pinnoittamaton	ε = 0,83

5.5 Lämpökameran asemointi

Lämpökameralla kuvattaessa tulisi päästä esteettömästi mahdollisimman lähelle tutkittavaa kohdetta, jotta ympäristön aiheuttamat häiriöt saataisiin minimoitua ja mittaustuloksesta tulisi näin tarkempi. Häiriöitä ovat muun muassa ilman epäpuhtaudet, kosteus ja kameran itsensä aiheuttamat rajoitukset. Lämpökamera asemoitiin omalla jalustallaan sellaisen etäisyyden päähän, josta tutkimuksessa tarvittava tieto saatiin kerättyä (Kuva 11).

Kuva 11. Lämpökameran asemointi.

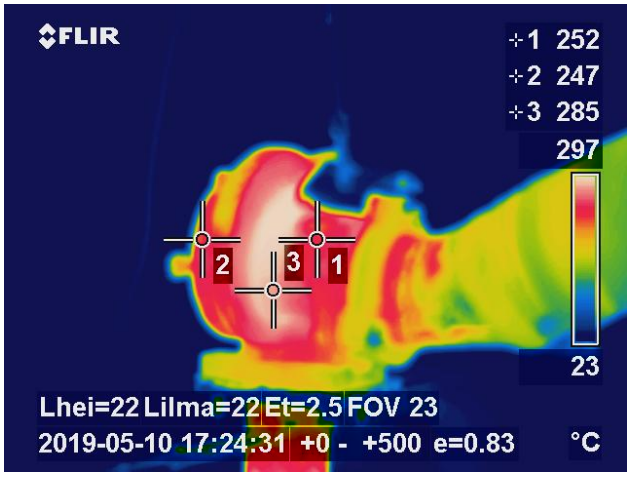
6 MITTAUSTULOKSET

Testijärjestelyiden jälkeen aloitettiin ensimmäinen mittausten sarja kylmillä komponenteilla ja pinnoittamattomalla pakopesällä. Mittaussarjoissa käytetty lämmönlähde oli Boschin 600 W:n kuumailmapuhallin, jolla puhallettiin laitteen antamalla maksimi puhallusteholla. Suulake tiivistettiin sisääntulevaan putkeen lasikuituisella lämpönauhalla, jolloin ohipuhallus saatiin minimoitua. Kello käynnistettiin puhaltimen käynnistyttyä ja lämpötilojen kehittymistä seurattiin dataloggerista. Yhden testiajon pituudeksi määritettiin ensimmäisen lämmityksen perusteella 20 minuuttia, koska huomattiin, etteivät lämpötilat enää merkittävästi muuttuneet tämän lämmitysajan jälkeen.

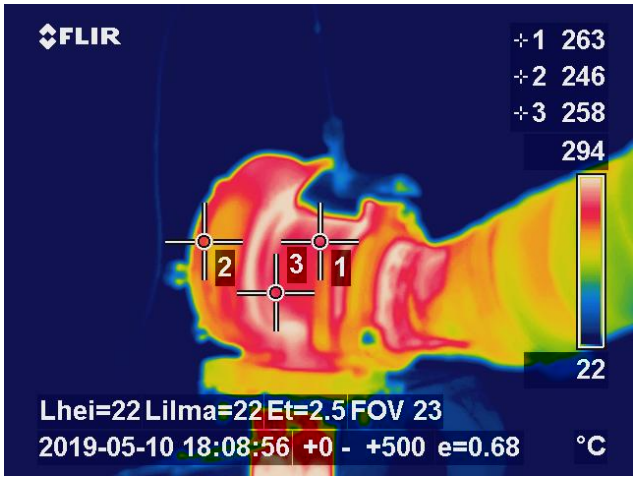
6.1 Ensimmäinen mittausten sarja

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin pinnoitteisiin määritetyillä emissiokertoimilla. Ensimmäisissä mittauksissa tarkoitus oli huomata mahdolliset selkeät erot lämpökuvakäyttäytymisessä ja anturidatassa. Tärkeää oli myös löytää tutkimuksen kannalta paremmat havainnointitavat, jotta seuraavissa mittauksissa päästiin keskittymään tarkemmin olennaisiin asioihin. Anturidatassa ei ensimmäisissä mittauksissa saatu näkyville selkeitä eroja mittausten välillä.

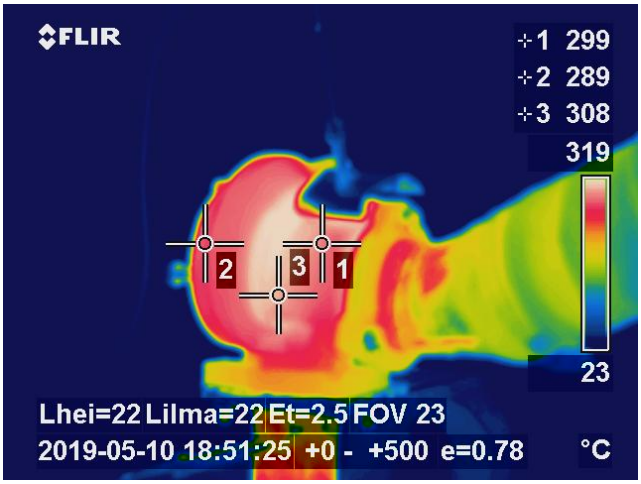
Mittaukset aloitettiin kylmällä (noin 20 °C) testikokoonpanolla. Kuvan 12 ja kuvan 14 välillä voi huomata, että testipenkin komponenttien lämmittämiseen on kulunut verrattain paljon energiaa, joten lopulliset lämpötilat ovat pysyneet hieman alempina kylmällä aloituksella kuin jo lämpimillä komponenteilla. Osien vaihtoaikaa ei tässä mittauksessa otettu huomioon. Tästä seuraa virhettä, vaikka vaihtotyö olikin fyysisesti sama jokaisen testikappaleen välillä. Jokaisen testin aloituksessa testattavat kappaleet olivat asettuneet vallitsevaan huonelämpötilaan.



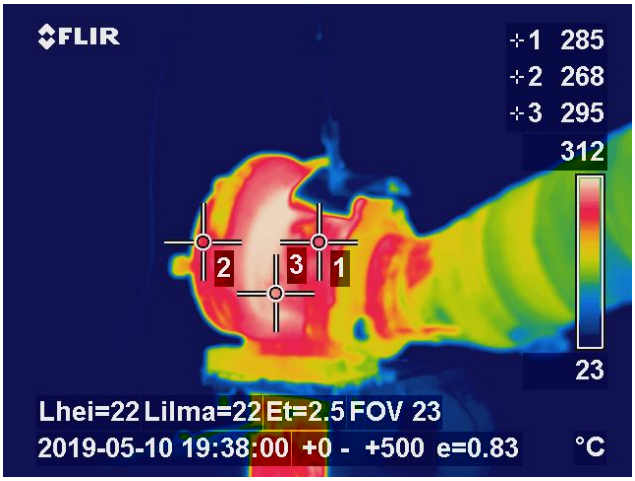
Kuva 12. Pinnoittamaton pakopesä, ensimmäinen testi.



Kuva 13. VHT, ensimmäinen testi.



Kuva 14. Tech Line, ensimmäinen testi.



Kuva 15. Varmistusmittaus viimeiseksi pinnoittamattomalla.

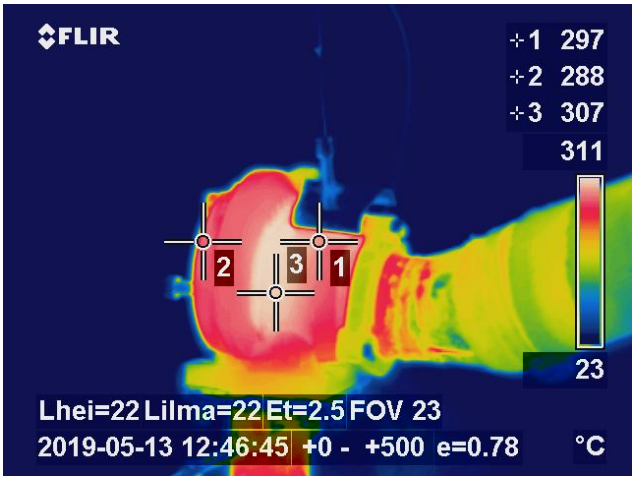
6.2 Toinen mittausten sarja

Mittaukset suoritettiin uudelleen samalla kokoonpanolla vastaavin metodein mitä ensimmäinenkin mittausten sarja. Erona ensimmäisiin mittauksiin oli lisäksi kaikkien lämpökuvien otto emissiokertoimella 1, jolloin kertoimista syntyvien erojen ajateltiin eliminoituvan testipenkin komponenttien lämpökuvia vertailtaessa. Ensimmäinen lämmitys suoritettiin pinnoittamattomalla pakopesällä testipenkin komponenttien testauslämpötilaan saattamiseksi, mutta mittaukset aloitettiin vasta seuraavan pakopesän kohdalla.

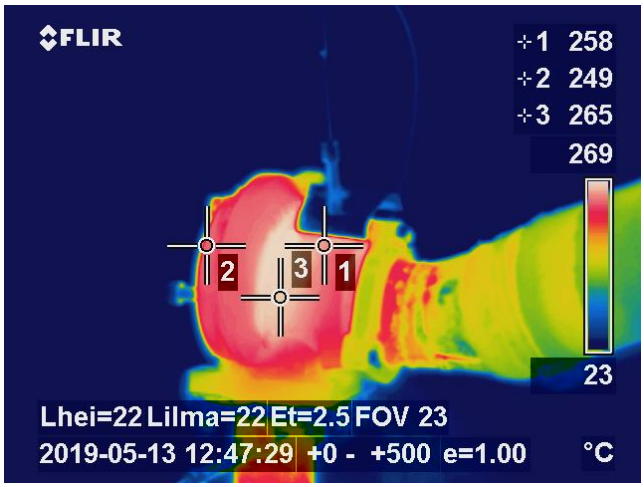
Tässä mittausten sarjassa otettiin vertailuun lisäksi mukaan pinnoittamaton pakopesä lasikuituiseen lämpönauhaan löyhästi käärittynä (Kuva 22). Lämpökamerakuvien mukaan lämpönauhalla ei olisi ollut ratkaisevaa eroa downpipen lämpötilakäyttäytymisessä, mutta anturidatassa sisään- ja ulostulevan ilmavirran lämpötilaero oli peräti 4 astetta matalampi verrattaessa mittauksen toiseksi parhaimpaan, VHT:n pinnoitteen arvoihin (Liite 1).

Yhtenevän emissiokertoimen lämpökuvista 17, 19 ja 21 ei voida suoraan tehdä johtopäätöksiä kuvien perusteella, sillä eri pinnoitteiden heijastusominaisuudet ovat keskenään poikkeavia ja muodostavat vääristymää kuviin. Lämpökuvan kuumin piste on aina vaalein, lämpötilasta riippumatta, jolloin VHT:n todellisen emissiokertoimen ollessa testin pienin, aiheuttaa se mitattavan kappaleen pintakuvaan tummemman värin vaikka todellisuudessa ero ei olisi merkittävä. Tässä mittausten sarjassa anturidata kuitenkin puhuu kuvien puolesta, sillä VHT:n downpipessa vallitseva lämpötila oli anturidatan mukaan testatuista pesistä korkein, pois lukien lämpökääreesen peitetty pesä.

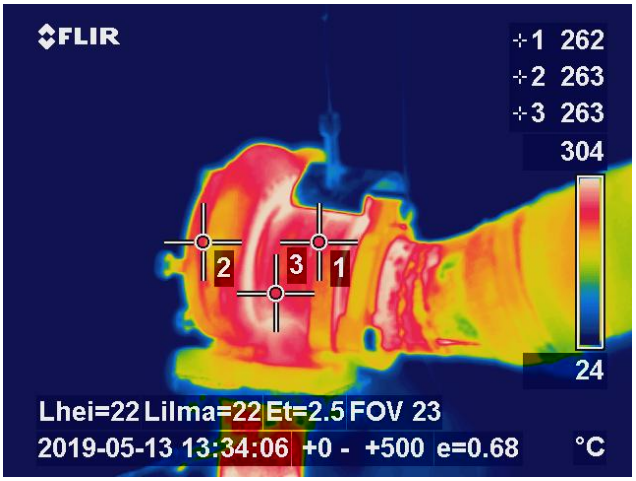
Kuvissa 16, 18 ja 20 emissiomääritettyjen kuvien lämpötiloja vertailtaessa emissiokertoimella yhtenäistettyjen kuvien 17, 19 ja 21 lämpötiloihin ei voida juuri pitää vertailukelpoisina eri mittausten välillä emissiokertoimen muodostamasta virheestä johtuen. Tämän vuoksi tarvitaan lisätestejä yhtenevän värisillä pinnoilla ja emissiokertoimilla.



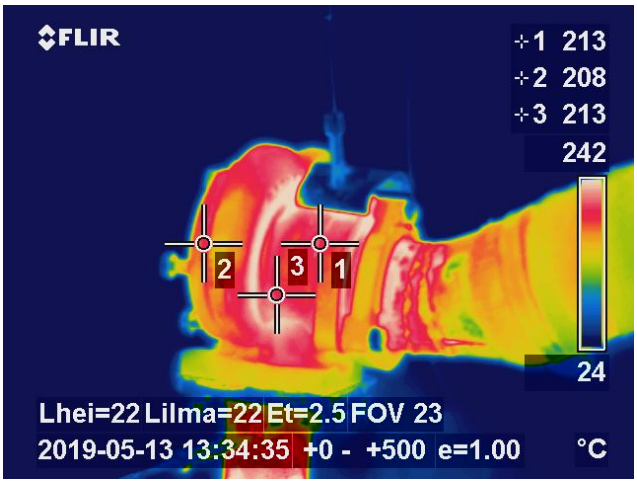
Kuva 16. Pinnoitettu Tech Line, ε = 0,78.



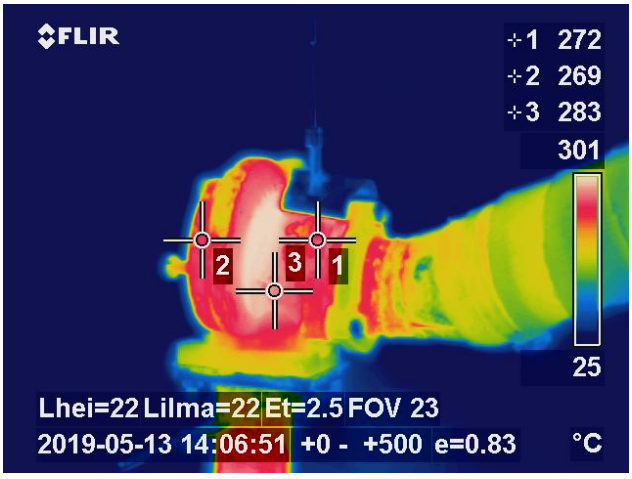
Kuva 17. Pinnoitettu Tech Line, ε = 1,00.



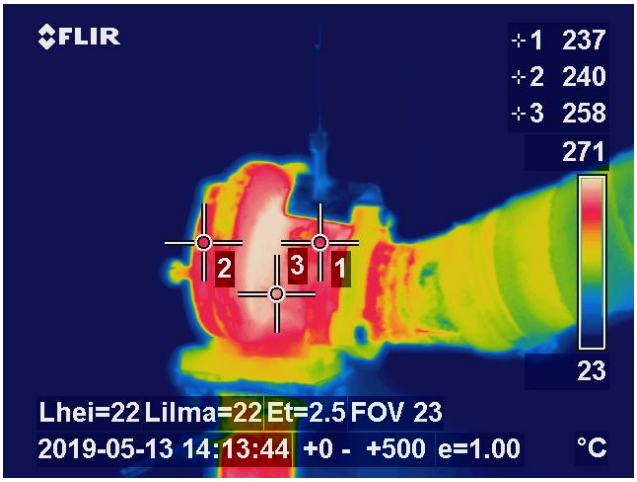
Kuva 18. Pinnoitettu VHT ε = 0,68.



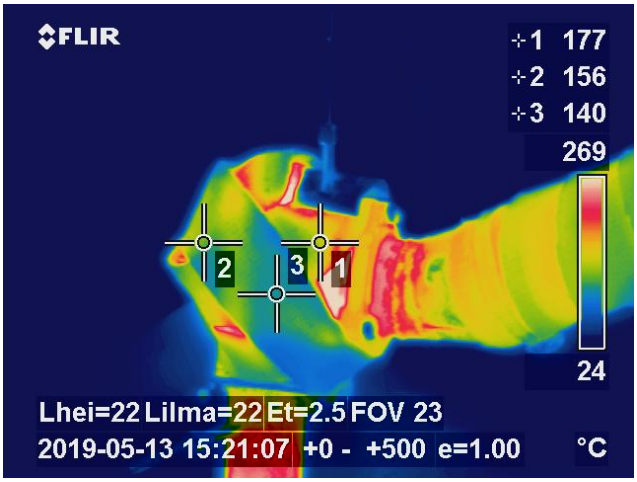
Kuva 19. Pinnoitettu VHT ε = 1,00.



Kuva 20. Pinnoittamaton ε = 0,83.



Kuva 21. Pinnoittamaton ε = 1,00.



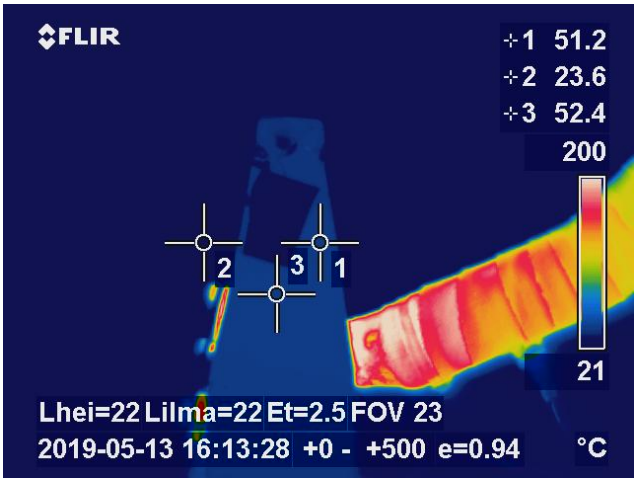
Kuva 22. Lämpökääreverrokki. Harmaalla lasikuitunauhalla kiedottu pakopesä.

6.3 Kolmas mittaus, heijastuksien tarkastelu

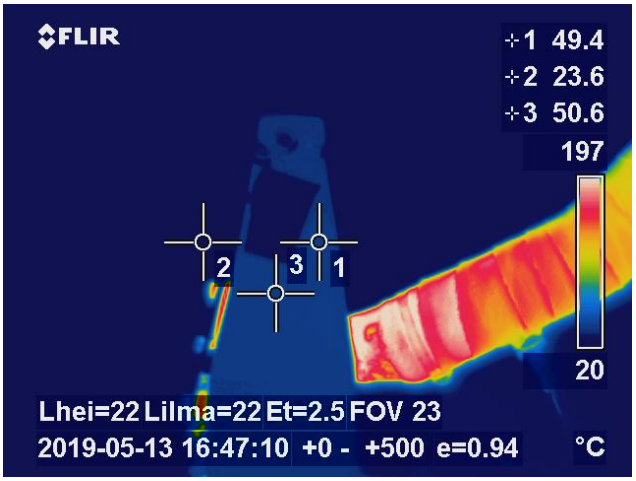
Kolmas mittausten sarja suoritettiin mittaamalla lämpökameralla pelkästään ahtimen viereen pystyyn aseteltua, mustaksi maalattua alumiinilevyä ja kuvaamalla sen lämpötilakäyttäytymistä (Kuva 23). Levyn emissiokertoimeksi määriteltiin 0,94 ja levyn sijoittelu sekä lämpökameran asetukset pidettiin muuttumattomana mittausten ajan. Mittauksen ajatus oli tuoda pelkän heijastuksena syntyvän säteilyn erot selville poistamalla mahdolliset emissiokerroin erot ja heijastukset käyttämällä täysin samaa mittausasetelmaa jokaisen mittauksen kohdalla. Ohuen alumiinilevyn etuna mittauksessa oli nopea jäähtyminen, sillä jokainen testaus aloitettiin likimain samasta lämpötilasta.

Kuva 23. Alumiinilevyn kuvaus.

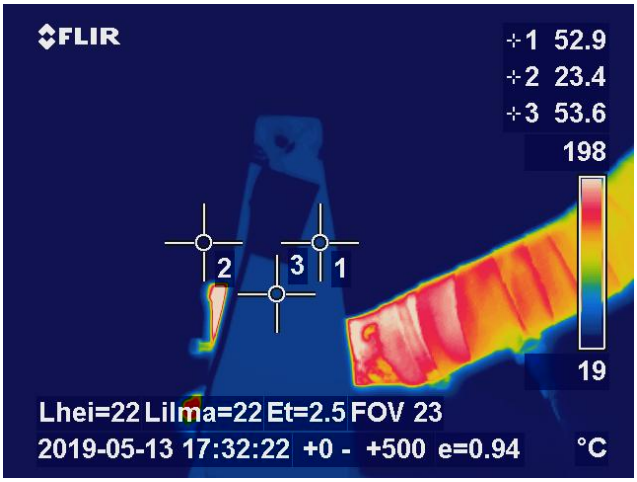
Saaduista tuloksista pystytään toteamaan, että VHT:n tuote sai aikaan hieman alhaisemman lämpötilan mitattavaan kappaleeseen. Kameran mittapisteen 2 dataa ei käytetty tässä mittauksessa, vaan se pidettiin referenssinä ympäröiviä pintoja seuraten. Mittapisteet 1 ja 3 paljastavat säteilylämpöjen eroavaisuudet VHT:n hyväksi (Kuva 25 ja 26). Pinnoittamaton asettui tässä testauksessa pinnoittettujen keskelle ja antoi jopa alhaisemmat lukemat kuin Tech Line (Kuva 24 ja 26). Lämpökameran mittapisteiden yläpuolelle asetettiin yksi termopari mittaamaan levyn pintaa, mutta pinnoitettujen pakopesien kesken eroa ei juuri saatu aikaan. Pinnoittamattoman pesän kohdalla lämpötila oli hieman korkeampi pinnoitettuihin verrattaessa (Liite 1).



Kuva 24. Pinnoittamaton.



Kuva 25. VHT.



Kuva 26. Tech Line.

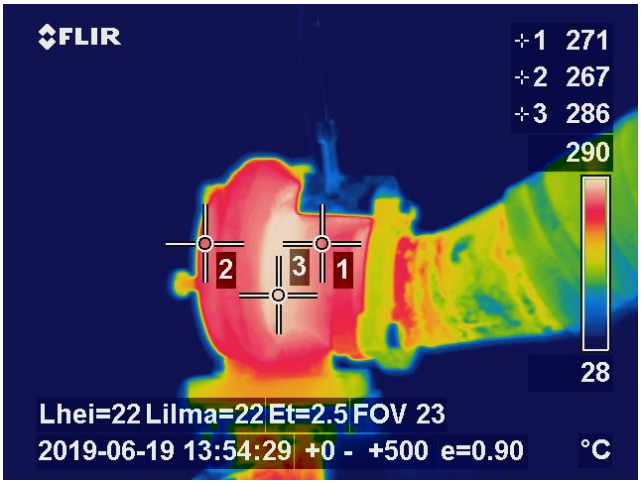
6.4 Neljäs mittaus, pintojen yhtenäistäminen mattamustaksi

Neljännessä mittausten sarjassa pyrittiin poistamaan suorissa lämpökuvamittauksissa emissiokertoimista ja pinnoitteiden erilaisista heijastusominaisuuksista aiheutuvat virheet. Kaikkien kolmen pakopesän pintaväri yhtenäistettiin Car-Rep -maalivalmistajan mattamustalla 600 °C kuumankestomaalilla (Kuva 27).

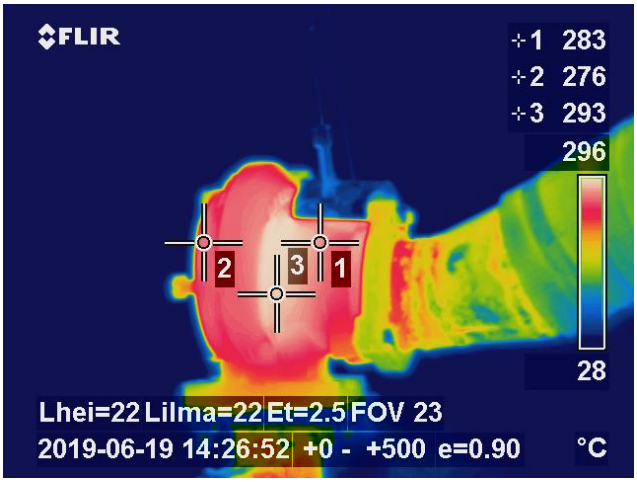
Kuva 27. Pakopesien pintaväri yhtenäistettynä.

Emissiokertoimeksi mittauksille valittiin ε = 0,90. Ensimmäinen, kuvan 28, mittaus aloitettiin jälleen kylmillä komponenteilla ja viimeinen testaus tehtiin myös pinnoittamattomalla pesällä, jotta kaikista pesistä saatiin vertailukelpoinen tulos. Pakopesien välinen vaihtoaika yhtenäistettiin ensimmäisen vaihdon mukaisesti 11 minuuttiin ja 50 sekuntiin testin ollessa vakio 20 minuuttia. Tämän testin yhteydessä myös mittausten aloituslämpötilat dokumentoitiin, jotka ovat nähtävissä liitteessä 1.

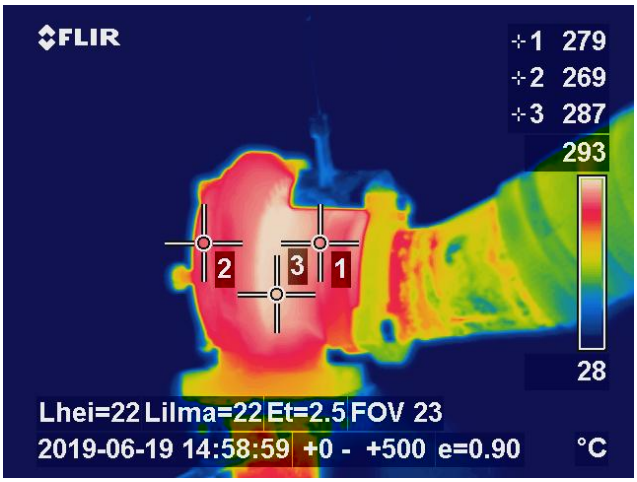
Tämän mittauksen kuvia 29, 30 ja 31 vertailtaessa kuvassa 30 oleva VHT:n pinnoite erottui jälleen edukseen, vaikka lämpötilaerot olivatkin maltillisia. Anturidata mittauksista on nähtävissä liitteessä 1.



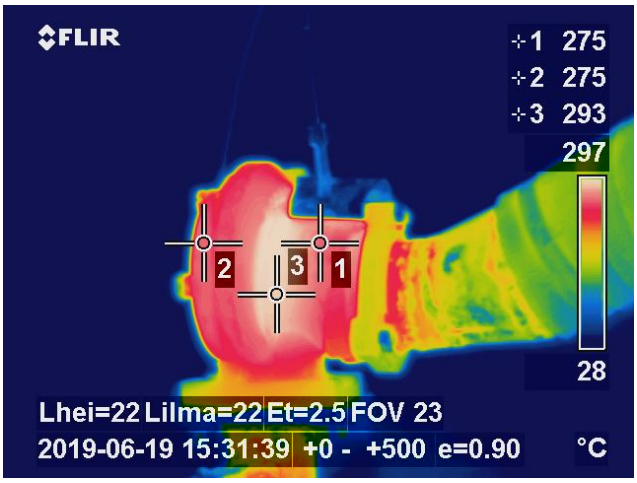
Kuva 28. Pinnoittamaton mattamustana, ε = 0,90.



Kuva 29. Tech Line mattamustana, ε = 0,90.



Kuva 30. VHT mattamustana, ε = 0,90.



Kuva 31. Pinnoittamaton mattamustana, ε = 0,90, referenssimittaus.

6.5 Virhetarkastelu

Virhetarkastelussa esiin voidaan nostaa monia itse mittauksen suorituksessa, että esivalmisteluissa esille tulleita epäkohtia. Tässä virhetarkastelukappaleessa on listattu muuttujia, jotka mahdollisesti voivat merkittävästikin vaikuttaa saatuihin tuloksiin.

Pinnoitteen paksuuden määritys puuttuu

Molemmat kappaleet maalattiin ohjeistuksen mukaan, eikä pinnan paksuutta kyetty varmentamaan ilman pinnoitteen paksuutta ilmoittavaa mittalaitetta.

Emissiokertoimen virheet

Emissiokerroin saattaa käytännössä vaikuttaa paljonkin lämpökamerakuvien tuloksiin. Emissiokertoimet pyrittiin määrittämään työssä jo käydyn ohjeistuksen mukaan, mutta virhemarginaali on suuri, sillä määritystapa on hyvin tulkinnanvarainen.

Ajoitus

Vaikka ajoitus otettiin käytännössä sekuntikellolla aina lämmitysjakson alusta alkaen 20 minuutin jaksoissa, on tässä kuitenkin ajanottotavasta syntyvän inhimillisen virheen mahdollisuus. Mittaustulokset pyrittiin kirjaamaan muistiin kun puhallin oli vielä päällä, sillä lämpötilat laskivat radikaalisti puhaltimen sammuttua. Mitä kauemmin aikaa arvojen keräämiseen kului, sitä enemmän tuloksilla oli mahdollista vääristyä. Vaikka dataloggerin tallenusominaisuutta oltaisiin saatu hyödynnettyä, ei lämpökameraa oltaisi saatu ajastettua samaan sykliin. Erot ovat tällä virheen mahdollisuudella pieniä, sillä suurta heiluntaa ei arvoissa viimeisten minuuttien aikana juuri esiintynyt.

Aloituslämpötilojen erot

Mittauksessa käytettyjen komponenttien lämpötiloja ei ollut käytännössä mahdollista tarkasti tasata, sillä mittausten suoritus olisi kestänyt kohtuuttoman kauan. Kuitenkin mittauksia tehdessä huomattiin, ettei kylmälläkään aloituksella saatu merkittäviä eroja aikaan anturi- eikä lämpökameradatassa.

Anturien asemointi

Vaipan lämpötila-anturi oli ainoa anturi, joka sijoitettiin paikalleen vasta jokaisen pakopesän kiinnityksen jälkeen. Anturin korkeudessa ja positioinnissa on virhemarginaalia tästä irroitus-kiinnitys -työstä johtuen. Anturi ei myöskään ollut kokonaan suojattu, joten tämä anturi altistui eniten mahdollisen ympäröivän ilmamassan liikkeen jäähdyttävälle vaikutukselle.

Anturien erot/kalibrointi

Kaikki anturit näyttivät samaa arvoa huoneenlämmössä. Verrattaessa absoluuttisia arvoja pelkästään antureiden välillä käyttäen jokaista anturia vain yhdessä tietyssä pisteessä, ei mahdollisella virheellä ole merkitystä arvoja tarkastellessa.

Testikappaleiden eroavaisuudet

Mittauksessa käytetyt pakopesät olivat kaikki käytettyjä, keskenään saman mallisen ahtimen (Garrett T25) pakopesiä. Pakopesissä saattaa kuitenkin olla eroavaisuuksia valussa, materiaalin paksuudessa ja muodossa, joita ei tässä vertailussa pystytty toteamaan tai saamaan esille.

7 TULOKSIEN ANALYSOINTI

Pinnoitteiden odotukset olivat korkeammalla mittaustuloksiin nähden. Mittaustuloksista ja lämpökamerakuvista pystyi havaitsemaan pieniä eroavaisuuksia, mutta virhetarkastelun jälkeen pinnoitettujen ja pinnoittamattoman kappaleiden eroavaisuudet olivat lähes olemattomat. Joissain testeissä edukseen erottui VHT:n tuote, jolla sekä lämpökameran arvot, että heijastumismittausten lämpötilat pysyivät matalimpana. Tuotteiden hinnoittelua mittaustuloksiin verrattaessa rahalle saatavaa vastinetta ei voinut pitää perusteltuna kummankaan tuotteen kohdalla.

Anturidatan perusteella vertailu ei ollut helppoa, sillä muun muassa testipenkin muut komponentit luovuttivat enemmän lämpöä ulkoilmaan pinnoitteen mahdollisesti sitä eristäessä. Kuitenkin yhtenevän emissiokertoimen lämpökameramittauksissa mustan heijastusmittauslevyn ja yhtenevän tumman pinnan mittaukset viestivät VHT:n pinnoitteen eristävän parhaiten pakopesästä johtuvaa ja heijastuvaa lämpöä. Merkittävää eroa Tech Linen, VHT:n ja pinnoittamattoman pakosarjan välillä ei näissä mittauksissa pystytty havaitsemaan. Kummatkin pinnoitteet pysyivät testauksien ajan hyvin kappaleissaan kiinni, eikä halkeilua tai hilseilyä ollut havaittavissa.

Lämpötilojen kasvaessa erot pinnoitteiden käyttäytymisessä todennäköisesti kuitenkin korostuvat. Kuumailmapuhaltimen lämpövirran lämpötilan arvot olivat keskimäärin +450 °C:ssa, joka on luokkaa puolet maksimaalisen kuormituksen alaisena olevaan luonnolliseen toimintaympäristöön nähden. Tutkimuksia voisikin jatkaa korkeampia lämpötiloja sekä eri pinnoitepaksuuksia kokeilemalla.

8 LOPUKSI

Tämän opinnäytetyön mittaussarjojen puitteissa keraamisten pinnoitteiden hyötyä lämpösäteilyn vähentäjinä voi pitää melko vähäisenä, muttei merkityksettömänä. Pinnoitteiden käyttö kuitenkin esimerkiksi esteettisessä mielessä ja korroosiosuojana on hyvinkin perusteltua. Mittausten perusteella lasikuitunauhasta tehty lämpökääre tuottaa parhaan lämmön eristyskyvyn. Maksimaalista moottoritilan lämpötilan laskua tavoiteltaessa voisi keraamista pinnoitetta käyttää yhdessä lämpökääreen kanssa.

LÄHTEET

Andersson, J. 1998. Lämpöoppi. Espoo: Edita.

Autospeed 2008. Ilman tiheyden ja hyötysuhteiden laskukaavoja. Viitattu 15.5.2019 http://www.autospeed.com/cms/article.html?&title=Intercooler-Maths&A=109789.

Fagerholm, N-E. 1986. Termodynamiikka. Jyväskylä: Otakustantamo.

Hokajärvi, E. 1986. Lämmön siirtyminen. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

KKD Motorsport 2019. VHT-pinnoitteen tuotesivu. Viitattu 10.5.2019 https://www.kkdmotorsport.com/VHT-Flameproof-Maal.

Krannila, M. 1975. Termodynamiikka 2. osa. Tampere: Sonator.

Martelius A. Puhelinhaastattelu, tehty 21.3.2019.

Martelius Exhaust Oy 2019. Tech Line Black Satinin tuotesivu. Viitattu 12.5.2019 https://martelius.com/nesteet-ja-oljyt/techlinekeraamipinnoitteet/tech-line-black-satin-100-ml.

Opetushallitus 2019. Tietoa keraameista. Viitattu 10.6.2019 http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/kemia/kemia3/keraami.html.

SAMK automation tutkimusryhmä 2019. Lämpökuvaus. Viitattu 1.5.2019 https://automaatio.samk.fi/testi-sivu/silmalle-nakymattomat-aallonpituudet/lampokuvaus/.

Stuklex 2019. Tyypillisiä ikääntymismekanismeja. Viitattu 10.6.2019 https://www.stuklex.fi/fi/ohje/YVLA-8.

Tech Line Coatings Inc 2018. Tietoa Tech Linen pinnoitteista. Viitattu 12.5.2019 https://techlinecoatings.com/tech-line-coatings/hi-performance-coatings/exhaust-system-coatings/.

VHT Paints 2019. VHT maalivalmistajan tuotesivu. Viitattu 14.5.2019 https://www.vhtpaint.com/high-heat/vht-flameproof-coating.

Dataloggerin mittaustulokset

Kaikki lukemat °C

Mittaukset 1

Kanava	Tech Line	VHT	Pinnoittamaton	Pinnoittamaton 2
Channel 2 heat in	446,6	446,4	446,1	449,6
Channel 3 downpipe	284,6	282,3	278	286,4
Channel 4 ref	20,6	20,6	20,4	20,8
Channel 5 vaippa	182,1	179,2	176,4	179,9

Mittaukset 2

Kanava	Tech Line	VHT	Pinnoittamaton	Lasikuitunauhoitettu
Channel 2 heat in	451,8	451,4	451,9	454,8
Channel 3 downpipe	281,5	287,9	282,5	298,2
Channel 4 ref	21,8	22	22,1	22,3
Channel 5 vaippa	179,1	186,8	175,5	206,3

Heijastumislämpömittaus

Kanava	Tech Line	VHT	Pinnoittamaton	
Channel 2 heat in	457,1	456,9	456,4	
Channel 3 downpipe	282,5	288,9	288	
Channel 4 ref				
Channel 5 alumiini-levyn pintalämpö	34,4	34,3	35,1	

Yhtenäistettyjen pintojen mittaus

Kanava	Tech Line	VHT	Pinnoittamaton	Pinnoittamaton 2
Channel 2 heat in	454,0	455,1	451,5	459,1
Channel 3 downpipe	288,2	290,9	285,4	292,0
Channel 4 ref	24,7	24,8	24,4	24,9
Channel 5 vaippa	178,1	181,0	171,8	182,1

Yhtenäistettyjen pintojen mittaus, aloituslämpötilat

Kanava	Tech Line	VHT	Pinnoittamaton	Pinnoittamaton 2
Channel 2 heat in	100,5	102,4	24,7	101,3
Channel 3 downpipe	81,6	83,1	24,8	82,3