

Kaisa Kiuru

JÄÄNPOISTO LENTOKONEMATERIAA- LEISTA LÄMMITYKSEN AVULLA

Alumiini, teräs ja termisesti ruiskutetut pinnoitteet

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Maaliskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kaisa Kiuru: Jäänpoisto lentokonemateriaaleista lämmityksen avulla –Alumiini, teräs ja termisesti ruiskutetut pinnoitteet

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Materiaalitekniikka

Maaliskuu 2023

Ilmailualalla turvallisuus on merkittävä tekijä, minkä parantamisen eteen tehdään jatkuvasti töitä. Ilma-alukseen kertyvä jää on merkittävä turvallisuusriski ja jää on aiheuttanut useita ihmishenkiä vaatineita onnettomuuksia. Jään muodostuminen on voitava estää ja kertynyttä jäätä täytyy voida poistaa kriittisiltä pinoilta. Tässä työssä käsittelen tällä hetkellä käytössä olevia jäänesto- ja jäänpoistomenetelmiä sekä niiden käyttökohteita. Lisäksi vertailen eri materiaaleja lämmityksen avulla tapahtuvassa jäänpoistossa.

Jäänestoa käytetään kohteissa, joihin jäätä ei haluta muodostuvan lainkaan. Näitä kohteita ovat esimerkiksi moottorin ilmanottoaukot ja erilaiset mittarit ja sensorit. Jäänpoistoa käytetään kohteissa, joista kertynyt jää on kyettävä poistamaan. Tällaisia ovat esimerkiksi siiven ja vakaimien johtoreunat, tuulilasi ja ohjaamon sivuikkunat sekä potkurit. Jäänpoistoon ja -estoon käytetään paineilmaalla toimivia poistokumeja, moottorien vuodatusilmaa, sähkövastuksia ja jäänpoistonesteitä.

Lämmitys moottorin vuodatusilmalla tai sähkövastuksilla on yleinen jäänpoisto- ja jäänestomenetelmä, mitä käytetään useissa kriittisissä kohteissa. Tämän vuoksi kokeellisessa osassa tutkin alumiinin 2017A-T4, ruostumattoman teräksen 304L sekä termisesti ruiskutettujen polyeteenipinnoitteiden jäänpoistokyvyn eroja lämmityksen avulla. Kokeet suoritettiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen jäälaboratoriossa. Näytteille kerrytettiin jääkerros, joka sulatettiin irti testattavasta pinnasta lämmityslevyn avulla. Sulamiseen kulunut aika suhteutettiin jään massaan ja eri materiaalien tuloksia verrattiin keskenään. Kokeiden aikana jäälaboratorion kylmähuoneen lämpötila oli -10 °C ja mittauksissa käytetyt lämmityslevyn sulatuslämpötilat olivat 20 °C ja 10 °C .

Jää irtosi parhaiten alumiinin pinnalta, koska alumiinilla on teräkseen verrattuna huomattavasti korkeampi lämmönjohtavuus. Pinnoittamattomien ja pinnoitettujen näytteiden välillä pinnoitettujen tulokset olivat heikompia. Polyeteenin lämmönjohtavuus on selkeästi metalleja huonompi, mutta pinnoitteen alhaisempi jäänadheesio vaikuttaa positiivisesti sen jäänpoist ominaisuuksiin. Eri lämpötiloissa materiaalien järjestys pysyi samana, mutta erot tasaantuivat. Näytteen ja lämmityslevyn välinen lämpötilaero on pienempi matalammalla mittauslämpötilalla. Tällöin näytteet saavuttavat nopeammin tavoitelämpötilan ja sulattavat jäätä pidemmän aikaa samalla lämpötilalla.

Avainsanat: jäänpoisto, lentokone, alumiini, ruostumaton teräs, polyeteenipinnoite, jäälaboratorio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Kaisa Kiuru: Thermal Deicing of Aircraft Materials –Aluminum, Steel, and Thermally Sprayed Coatings
Bachelor's thesis
Tampere University
Materials Science and Engineering
March 2023

In the aviation industry safety is a major factor and it is constantly improved. Icing is a significant safety risk and therefore ice protection systems are important. From the critical surfaces ice accretion must be prevented or the already accreted ice must be removed. This work focuses on the most common anti-icing and deicing methods that are used on aircrafts, and the different material performances in thermal deicing are compared.

Anti-icing is used on areas where icing is not allowed whereas deicing is used on areas where accreted ice must be removable. Anti-icing can be done thermally on for example engine air inlets and different sensors. Pneumatic boots can be used as deicing method on leading edges, windshields, and propellers.

One of the most common ice protection methods is thermal ice protection. It is used on many critical areas of the aircraft and was therefore chosen to be used as the deicing method of this work. Deicing abilities of aluminum 2017A-T4, stainless steel 304L and thermally sprayed polyethylene coatings were studied and compared in this work. Ice layer was accreted on the sample and then melted with a heating plate. Ice detaching time was measured and later set to proportion with the mass of the accreted ice and the results between materials were compared. The experiments were conducted in Tampere University's ice laboratory in Hervanta campus. The temperature of the ice laboratory was $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the temperature of the heating plate was either $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ or $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aluminum had the best deicing results due to its high thermal conductivity. Between bulk and coated samples, coated samples had lower performance in these tests. Polyethylene has considerably lower thermal conductivity than metals, but it has better icephobic properties. The latter affects positively to the results. Between $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatures the order of the materials remained the same, but the differences decreased. When the temperature difference between the heating plate and the samples was smaller, all the materials reached the target temperature faster and the ice melted longer in that temperature.

Keywords: deicing, aircraft, aluminum, stainless steel, polyethylene coating, ice laboratory

This work has been done as a part of SOUNDofICE project (EU/H2020, GA 899352, FETOPEN-01-2018-2019-2020).

ALKUSANAT

Tämän työn valmistuttua on aika siirtyä seuraaviin haasteisiin. Haluan kuitenkin ensin kiittää työn tekemiseen osallistuneita ihmisiä, jotka olivat suuri apu kokeellisen osan suorituksessa. Kiitos Anssi Metsähonkala ja Jarkko Lehti näytteiden valmistuksesta ja pinnoituksesta sekä testilaitteiston rakentamisesta. Kiitos DI Raul Kanter ja DI Niklas Kandelin avustanne jäälaboratoriossa kokeellisen osan suorituksessa. Erittäin suuri kiitos ohjaajalleni TKT Heli Koivuluodolle mielekkästä aiheesta, jossa oli mahdollisuus toteuttaa mielenkiintoinen kokeellinen osuus. Kiitos myös ohjauskeskusteluista sekä tuestasi.

Kiitos myös perheelleni sekä ystäväilleni tuestanne opintojeni aikana.

Tämä työ on tehty osana SOUNDofICE -projektia (EU/H2020, GA 899352, FETOPEN-01-2018-2019-2020).

Tampereella, 10.3.2023

Kaisa Kiuru

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LENTOKONEIDEN JÄÄNPOISTO JA -ESTO	4
2.1 Jäänpoiston ja -eston syyt ja kohteet	5
2.2 Jäänpoisto- ja jäänestomenetelmät	7
3. KOKEELLINEN OSUUS JÄÄLABORATORIOSSA	10
3.1 Näytteenvalmistus	11
3.2 Koejärjestelyt	13
3.3 Kokeen suorittaminen	15
4. TULOKSET JA VIRHELÄHTEET	19
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	22
6. YHTEENVETO	25
LÄHTEET	27
LIITE A: NÄYTTEET HETI JÄÄDYTYKSEN JÄLKEEN	29
LIITE B: YÖN YLI JÄÄTYNEET NÄYTTEET	30
LIITE C: TESTIEN ARVOT JA TULOKSET TAULUKOITUNA	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AISI	American Iron and Steel Institute
Al	engl. aluminun, alumiini
FS Al	engl. flame sprayed aluminum, pinnoitettu alumiini
FS SS	engl. flame sprayed stainless steel, pinnoitettu ruostumaton teräs
LDPE	engl. low density polyethylene, pienitiheksinen polyeteeni
LOC-1	engl. loss of control in flight, ilma-aluksen hallinnan menetys lennon aikana
PE	polyeteeni
SS	engl. stainless steel, ruostumaton teräs
<i>A</i>	sekunnissa sulavan jään massa grammoissa
<i>B</i>	yhden gramman jäätä sulamiseen kulunut aika sekunneissa
<i>ka</i>	keskiarvo
<i>m₁</i>	näytteen massa ennen sulatusta
<i>m₂</i>	näytteen massa sulatuksen jälkeen
<i>m_j</i>	kerrytetyn jään massa
<i>sd</i>	keskihajonta
<i>slm</i>	standardi litraa minuutissa
<i>t</i>	aika
<i>λ</i>	lämmönjohtavuus

1. JOHDANTO

Suomessa Liikenne ja Viestintäviraston Traficom in ylläpitämässä tilastossa lentoalusten hallinnan menetyksistä lennon aikana (engl. Loss of Control in flight, LOC-1) tilastoidaan tilanteita, joissa ilmassa olevalle ilma-alukselle tapahtuu merkittävä poikkeama suunnitellusta lentoradasta. Hallinnan menetys voi olla hetkellinen tai totaalinen. [1] Vuoden 2021 LOC-1 raportissa poikkeamailmoituksia jäänpoiston ja -ehkäisyn puutteista raportoitiin 27. Tämä on huomattavasti suurempi luku verrattuna vuosien 2013–2020 keskiarvoon, joka oli 12,6 tapausta vuodessa. [2] LOC-1 tilastoissa mukana ovat onnettomuuksiin johtavien tapausten lisäksi vaaratilanteet, joiden määrää voidaan pitää huomattavana ottaen huomioon ilmailussa olevat erittäin korkeat turvallisuusvaatimukset. Joitakin Suomessa jäätymisen vuoksi tapahtuneita onnettomuuksia ovat esimerkiksi Urjalassa 14.11.2009 Cessna 150 –lentokoneelle tapahtunut onnettomuus ja Helsinki-Vantaan lentoasemalla tapahtunut rahtikoneen onnettomuus 31.1.2005.

Urjalassa yksinlennolla ollut lento-oppilas joutui kääntymään lentoreitiltään takaisin huonon sään takia ja päätyi tekemään pakkolaskun pellolle. Kuvassa 1 olevan turmakoneen rakenteisiin syntyi merkittävät vauriot, mutta ohjaaja selvisi onnettomuudesta yhden sairaalavuorokauden vaatineilla ruhjeilla ja murtuneella ranteella.



Kuva 1. Urjalan onnettomuuskone. [3]

Urjalan onnettomuuden syynä oli kaasuttimen jäätymisen aiheuttama moottorin käyntihäiriön vuoksi tehty epäonnistunut pakkolasku. Jäättyessään kaasuttimen kurkku osit-

tain tukkeutuu ja tämä aiheuttaa ilma-polttoaineseoksen rikastumisen. Kaasuttimen jää-
tymisen ennalta ehkäisemiseen käytetään imuilman lämmitystä, mutta ohjaaja ei kyt-
kenyt lämmitystä riittävän ajoissa, koska ei tunnistanut kaasuttimen jäätyksen aiheut-
tamaa tehohäviötä moottorissa. [3]

Urjalan onnettomuuden syynä oli alan ulkopuolisille henkilöille hieman tuntematto-
mampi jäätymiseen liittyvä ongelma, mutta Helsinki-Vantaalla 31.1.2005 tapahtunutta
rahtikoneen onnettomuuden aiheutti monille tutumpi ongelma eli lentokoneen siiville
kertynyt jää. Ruotsalainen Cessna 208B –tyypin lentokone syöksyi pian lentoonlähdön
jälkeen lentokenttäalueelle. Kone oli saapunut Helsinki-Vantaalle edellisenä yönä noin
kello kahden aikaan ja lähti paluulennolle Ruotsiin seuraavana iltapäivänä. Yön ja aa-
mun aikana oli satanut lunta ja lämpötila oli vaihdellut nollan molemmin puolin. Ohjaaja
suoritti jään- ja lumenpoiston harjaamalla koneen yläpinnat. Pian lentoonlähdön jäl-
keen, ohjaajan vedettyä laskusiivekkeet sisään, hän menetti lentokoneen hallinnan ja
kone syöksyi tuhoutuen maahan. Kuvassa 2 on turmakone tuhoutuneena maassa. Mieh-
histönä koneessa oli vain ohjaaja, joka sai lieviä vammoja. Kone tuhoutui täysin. [4]



Kuva 2. Cessna 208B turmakoneen jäännökset. [5]

Ennen lentoa ohjaajan tekemä jäänpoisto oli epäonnistunut ja tutkijat löysivät koneen
pinnoilta 0,5–1,5 cm:n paksun jään, lumen ja jäätyneen sohjon kerroksen. Onnetto-
muuden syyksi raportoitiin ohjaajan tekemä lentoonlähtö koneella, jonka aerodynaami-
set ominaisuudet olivat heikentyneet siivellä olevan jään ja lumen takia. Laskusiivek-
keiden sisäänotto irrotti virtauksen siiven pinnalta ja ohjaaja menetti koneen hallinnan.
[4]

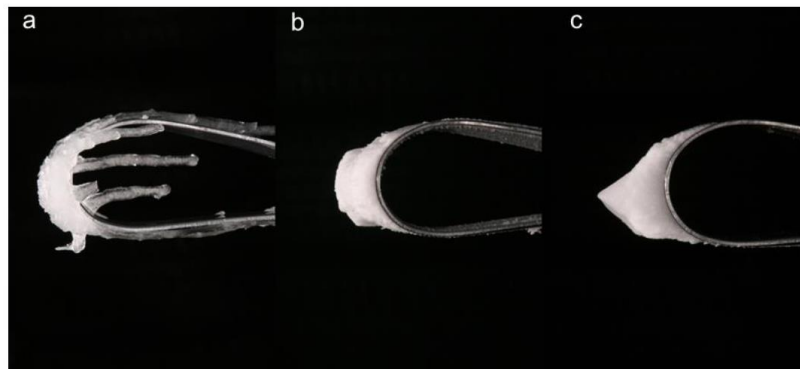
Jää vaikuttaa lentolaitteissa usealla eri tavoilla ja kuten voimme huomata jo Urjalan len-
to-onnettomuudesta, että pelkkä koneen rungon suojaaminen jäätymiseltä ei poista
jäätyksen aiheuttamaa turvallisuusriskiä. Tämän vuoksi kaikissa mittarilentoon hyväk-
sytyissä koneissa on oltava jäänesto- ja poistolaitteet, jotka mahdollistavat turvallisen

lentämisen myös jäätävissä olosuhteissa. Tässä työssä käsitellään kiinteäsiipisten lentokoneiden jäänpoistoa ja -estoa. Jäänpoisto voidaan jakaa ilmassa lennonaikana tapahtuvaan jäänpoistoon tai maassa tapahtuvaan jäänpoistoon ennen lentoa lähtöä. Tässä työssä tarkastellaan lennonaikaista jäänpoistoa ja -estoa, joka tapahtuu erilaisten järjestelmien avulla. Lämmitys on yleisesti ja monipuolisesti eri kokoisissa lentokoneissa käytetty menetelmä jäänpoistoon ja -estoon. Sen vuoksi kokeelliseen osaan jäänpoistomenetelmänä käytettiin lämmitystä.

Lentokonemateriaaleilta vaaditaan tiettyjä ominaisuuksia kuten riittävää lujuutta sekä jäykkyyttä, eivätkä niiden ominaisuudet saa heikentyä käyttöiän tai olosuhteiden vaikutuksesta. Materiaalien tulee myös olla viranomaisvaatimusten mukaan hyväksytyjä lentokonekäyttöön. Metallit ovat pitkään olleet lentokoneiden päävalmistusmateriaaleja, ennen kuin komposiitit ovat alkaneet korvata etenkin alumiinia. [6, s. 113–114] Tämän vuoksi vertailtaviksi materiaaleiksi valittiin alumiini ja ruostumaton teräs. Yleisimmät lentokoneteollisuudessa käytetyt alumiiniseokset ovat 2000- ja 7000-sarjan alumiinia ja niistä 2024 ja 7075 ovat pisimpään käytössä olleita [6, s. 116]. Testeissä käytetty alumiini 2017A-T4 on kemialliselta koostumukseltaan samankaltainen alumiini 2024 kanssa ja se oli helpommin saatavilla, joten se valikoitui testeihin [7]. Teräksestä valikoitui niin ikään ilmailukäytössä oleva AISI (engl. American Iron and Steel Institute) 304L. Materiaalierojen lisäksi vertailtiin polyeteenipinnoitteen vaikutusta jäänpoistokykyyn. Koivuluoto et al. [8,9] ovat todenneet polyeteenipinnoitteella (PE) olevan alhainen jäänadheesioarvo ja sillä on saatu lupaavia tuloksia jäänpoistokohteissa.

2. LENTOKONEIDEN JÄÄNPOISTO JA -ESTO

Tässä työssä tarkastellaan lennonaikaista jäätymistä. Tutkimuksen kohteena ei ole maassa tapahtuva jäänkertyminen tai -poisto. Jäätä muodostuu lentokoneen pintoihin erilaisissa olosuhteissa ja olosuhteet vaikuttavat myös muodostuvaan jäätyyppiin. Erilaisia jäätyyppejä ovat huurre, rosojää, silojää ja sekajää. [6, s. 180] Rosojää muodostuu pienistä pisaroista tyypillisesti alle $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa ja pisara jäätyy välittömästi osuessaan pinnalle. Rosojää on huokoista, väriltään valkoista sekä pehmeämpää kuin muut jäätyypit. Silojäätä taas muodostuu rosojäästä suuremmista pisaroista lämpimämmässä olosuhteissa, noin $-6 - 0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa. Pisarat eivät jäädy välittömästi osuessaan siiven pinnalle vaan vierivät hetken ennen jäätymistä. Tästä syntyy tasainen ja kova pinnanmuotoinen jääkerros sekä silojälle tyypillisiä jääpuikkoja. Silojää on yleensä kirkasta, tiivistä ja kovaa. Jäätyypin muodostumiseen vaikuttaa lämpötilan lisäksi esimerkiksi tuulen nopeus sekä pisarankoko. Sekajää on roso- ja silojään välimuoto. [10,11] Nämä kolme eri jäämuotoa on esitetty kuvassa 3.



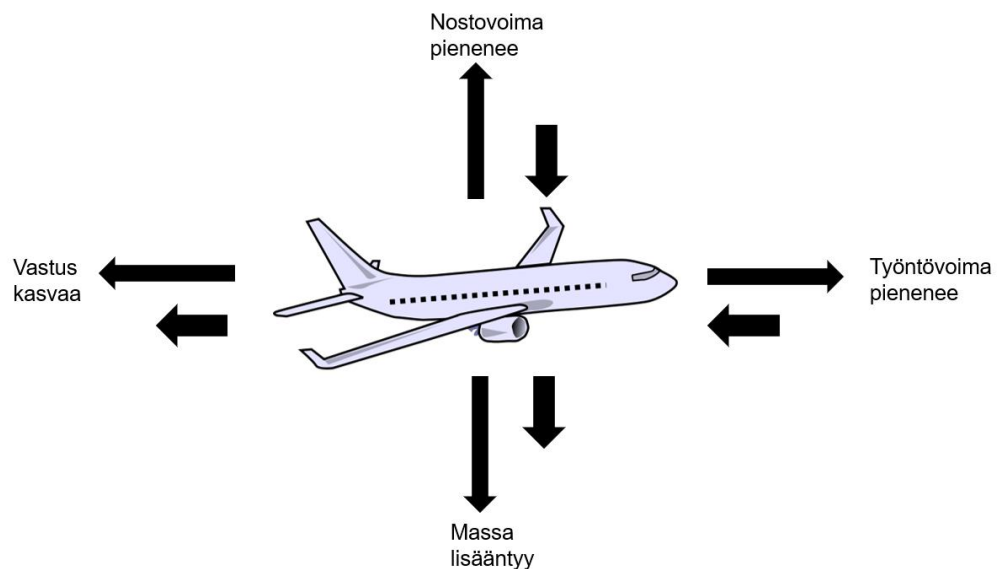
Kuva 3. Kolme eri jäätyyppeä johtoreunan geometrialle kerrytettynä. a) silojää, b) rosojää c) sekajää. [10]

Stenroos [10] tutki diplomityössään eri jäätyyppien vaikutusta jäänadheesioon. Hän vertaili silo-, roso- ja sekajään jäänadheesioita eri olosuhteissa sekä materiaaleilla. Hänen tuloksissaan rosojäällä on suurin jäänadheesio ja se on vaikein poistaa kokonaan pinnalta jään koheesiivisen käyttäytymisen vuoksi. Sekajäällä $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa jäänadheesio oli pienempi kuin muilla. Ero seka- ja silojään välillä syntyy silojään suuremmasta pinnan kostumisesta. Jäätyypin lisäksi jäänadheesioon vaikuttaa muitakin seikkoja. Kandelin [12] sai omassa diplomityössään Stenroosin tuloksia tukevia tuloksia hänen vertaillessa kolmen eri jäätyypin adheesioita alumiini- sekä PE-pinnoitteilla. Molemmilla materiaaleilla jäänadheesio oli pienin sekajäällä.

Lentojen huolellinen suunnittelu on tärkeä osa lentoturvallisuuden parantamista, mutta aina jäätyviltä olosuhteilta ei voida välttyä. Jo vähäiselläkin jään kertymisellä on suuria vaikutuksia lentokoneeseen operaatiokykyyn ja siksi jään kertyminen tulee kyetä estämään tai jo kertynyt jää täytyy voida poistaa. Jäätä tunnistetaan erilaisilla sensoreilla sekä silmin havaitsemalla. [6, s. 180]

2.1 Jäänpoiston ja -eston syyt ja kohteet

Lennettäessä jäätävissä olosuhteissa jäätä kertyy koneen etupinnoille, jolloin se muuttaa koneen massaa ja aerodynaamisia ominaisuuksia. Menetetyn nostovoiman korvaamiseksi ohjaaja yleisesti korjaa koneen kohtauskulmaa tuottaakseen lisää nostetta. Tämä johtaa jäänkertymiseen pinnoille, joissa ei ole järjestelmiä jäänpoistoon- tai estoon. Esimerkiksi siivessä jäänpoisto- ja estojärjestelmät sijaitsevat johtoreunalla siiven etuosassa. Kohtauskulmaa kasvatettaessa siiven alapintaan pääsee kertymään jäätä, jota ei kyetä poistamaan. Kertynyt jää heikentää jo koneen muuttuneita aerodynaamisia ominaisuuksia pienentäen sakkauskulmaa. Kun tähän lisätään pinnoille kertyneen jään massan kasvattama koneen kokonaismassa, on tilanne erittäin vaarallinen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4. Tämän tapahtumaketjun estämiseksi jään muodostumista on kyettävä hallitsemaan kriittisillä pinnoilla. [13]

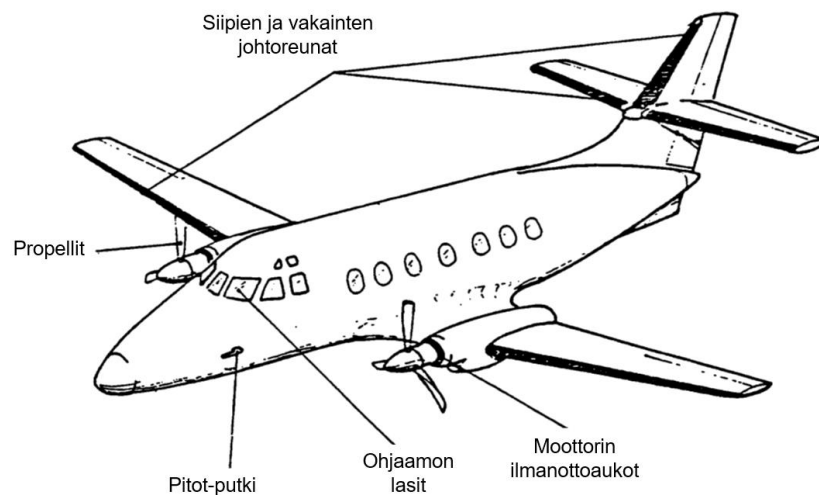


Kuva 4. Jään vaikutus lentokoneeseen. (Kuva muokattu lähteestä [14, s. 249])

Siiville ja peräsimelle kerääntynyt jää kasvattaa koneen massaa ja muuttaa sen aerodynaamista profiilia kasvattaen vastusta. Tämä laskee sakkauskohtauskulmaa ja voi aiheuttaa sakkaamista. [6, s. 180] Potkureissa kertynyt jää alentaa työntövoimaa ja tuulilaseissa jää heikentää näkyvyyttä. Mittareissa ja antureissa jää aiheuttaa virhelukemia

ja tätä kautta toimintahäiriöitä eri järjestelmissä. [6, s. 180] Esimerkiksi pitot-putkien ja staattisten paineenaukkojen tukkeutuminen aiheuttaa nopeusmittarin, variometrin sekä korkeusmittarin virhelukemia, jotka puolestaan vaikuttavat autopilotin ja korkeusnäytön toimintaan [14, s. 263].

Jäänpoistojärjestelmiä käytetään lentokoneen osissa, joihin saa muodostua jäätä, mutta se on tarvittaessa voitava poistaa. Tällaisia ovat esimerkiksi siiven ja vakaimien johtoreunat, tuulilasi ja ohjaamon sivuikkunat, potkurit ja mahdollisesti myös tutkakuvut. [14, s. 248–249] Jäänpoistoa voidaan käyttää vain kohteissa, joista irtoava jää ei aiheuta vahinkoa koneen muille osille. Mahdollisia irtoavasta jäädä aiheutuvia vaurioita ovat esimerkiksi koneen rakenne- ja moottorivauriot. [6, s. 180] Kuvassa 5 on esimerkki jäänesto ja -poistokohteista.

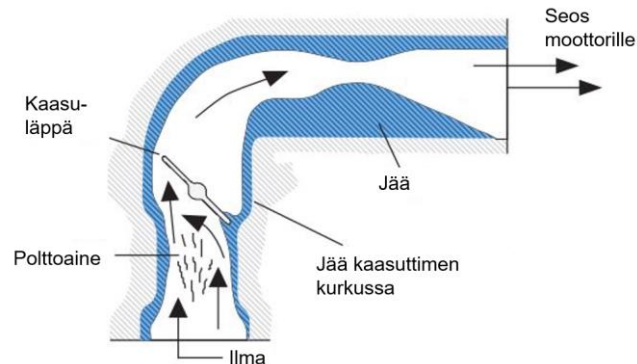


Kuva 5. Esimerkki jäänpoisto ja -esto kohteista lentokoneissa. (Kuva muokattu lähteestä [15])

Jäänestojärjestelmiä käytetään osissa, joihin jäätä ei saa muodostua lainkaan, esimerkiksi moottorin ilmanottoaukoissa, erilaisissa mittareissa ja sensoreissa, kuten pitot-putkissa, staattisen paineen aukoissa, kohtauskulmamittarissa, ulkoisissa lämpötilamittareissa, sakkkausvaroittimissa ja polttoainesäiliön huohottimissa. [14, s. 248–249]

Ulkopinnoille kertymisen lisäksi jää on vaaraksi myös koneen järjestelmien sisällä. Tästä hyvänä esimerkkinä moottorin kaasuttimen jäätyminen, kuten Urjalan onnettomuudessa tapahtui. Kaasuttimien jäätyminen on yleisintä mäntämoottorikoneissa, joissa on kaasutin ja jäätyminen lisääntyy mitä kauempana kaasutin sijaitsee moottorin lämpimistä osista. Polttoaineen höyrystyminen sitoo energiaa ympäröivästä ilmasta, mikä laskee kaasuttimen ilman lämpötilaa. Kaasuttimen venturiputkessa ja kaasuläpän kohdalla ilmanvirran nopeus kiihtyy, mikä laskee painetta ja lämpötilaa. Jos ilman suhteellinen

kosteus on kyllin suuri, niin siitä tiivistyy lämpötilan laskiessa pisaroita, jotka jäävät kaasuttimen seinämille sekä kaasuläppään lämpötilan ollessa pakkasella. Kaasutin voi jäättyä myös lämpöisissä olosuhteissa ilmankosteuden ollessa riittävän suuri. Jää tukkii kaasuttimen kuristuskohdan tai polttoaineaukkoja tai se voi kertyä imusarjan mutkaan kaasuttimen jälkeen. Tämä aiheuttaa liian rikasta tai laihaa polttoaineseosta, mikä johtaa moottorin toiminnanhäiriöihin. Yleisin moottorihäiriön aiheuttaja on kaasuttimen jäätyminen. [16] Jäätymistä on havainnollistettu kuvassa 6.



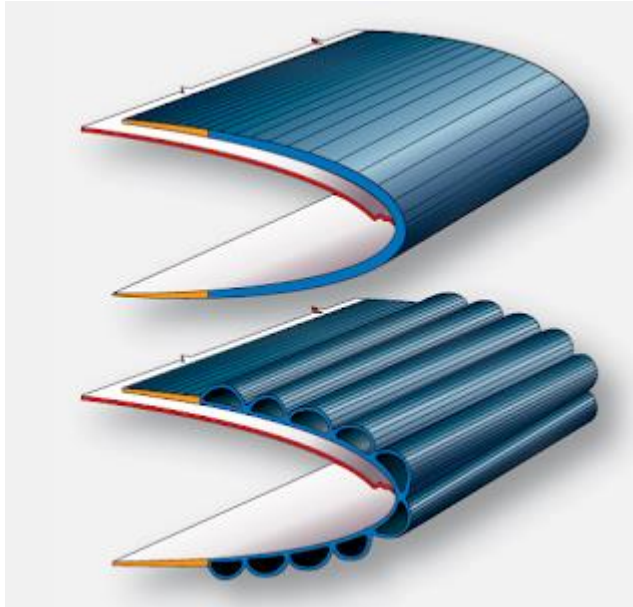
Kuva 6. Kaasuttimen jäätyminen. (Kuva muokattu lähteestä [16])

Kaasuttimen jäätymistä ehkäistään imuilman lämmityksellä, joka on pakollinen kaikissa koneissa, joissa on kaasutin. Ruiskutusmoottoreissa jään muodostumisen todennäköisyydet ovat pienemmät, joten niissä ei yleisesti ole etuilmän lämmitystä. Ne on kuitenkin varustettu varailmanottoaukolla, joka voidaan ottaa käyttöön päälmanoton tukkeutuessa. [16]

2.2 Jäänpoisto- ja jäänestomenetelmät

Jäänpoistoon ja -estoon käytetään paineilmalla toimivia poistokumeja, moottorien vuodatusilmaa, sähkövastuksia ja jäänpoistonestettä. Siipien ja vakaimien johtoreunalla on monipuolisimmin käytössä erilaisia jäänpoistomenetelmiä verrattuna koneen muihin osiin. Siivissä käytössä ovat paisuntakumit, sähkö, kuumailma sekä jäänpoistonesteet. [6, s. 180]

Paisuntakumeja käytetään hitaasti lentävissä koneissa siipien ja vakaimien johtoreunoilla jäänpoistoon. Paineilmalla toimivat paisuntakumit ovat liimattu johtoreunan pintaan. Kumilevyssä on pitkittäis- ja poikittaissuuntaisia ilmakehanavia, joihin ohjataan paineilmaa, joka laajentaa kanavan ja siten rikkoen ja irrottaen päälle kertyneen jään. Mäntämoottorikoneissa paineilma tuotetaan paineilmapumpulla ja kaasuturbiinikoneissa se saadaan moottorin ahtimesta. [6, s. 180] Paisuntakumin toiminta on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Paisuntakumi tyhjänä sekä täyteen puhallettuna. [17]

Kanavat tyhjennetään alipaineen avulla, jolloin kumit muotoutuvat takaisin siipiprofiilin muotoiseksi. Paisunta- ja imuvaiheet ovat usein automatisoituja tietyin määräväleihin, esimerkiksi paisuntavaihe voi kestää 6 sekuntia, jonka jälkeen automaattisesti tulee alipaineella tuotettu imuvaihe. [6, s. 180]

Jäänestoon käytetään lämmitystä useissa kohteissa. Lämpö tuotetaan suihkumootorikoneissa moottorin vuodatusilmalla tai erillisillä sähkövastuksilla. Vuodatusilmalla lämmitetään siipien johtoreunoja sekä moottorin imuaukkoja. Kuuma ilma virtaa siipien ja vakaimien etuosassa oleviin ilmakehisiin lämmittäen johtoreunaa. Mikäli siipien etureunassa on liikkuvat solat, niin niihin lämmin ilma ohjataan taipuisilla teleskooppiputkilla. Siipien johtoreunojen lämmitykseen voidaan käyttää myös sähkövastuksia. Esimerkiksi pienissä suihkumootorikoneissa, joissa moottori on koneen takaosassa, voidaan siiven etureuna lämmittää moottorin kohdalla sähkövastuksilla ja muuten siiven jäänpoistoon käyttää paisuntakumeja. Lämmitysvastuksilla estetään irtoavan jään aiheuttamat moottorivahingot, kun jäätä ei kerry moottorin kohdalle lainkaan. Lämmitysjärjestelmissä on myös johtoreunan materiaalivaurioiden estämiseksi lämpötilan säätö. [14, s. 253–255] Lisäksi sähkövastuksia käytetään potkureiden lavoissa, ohjaamon laseissa, polttoaineen huohotusaukkoissa sekä mittareissa ja antureissa. Erilaisia sähköllä lämmitettäviä antureita ovat esimerkiksi pitot-putket, staattisen paineenaukot, kohtauskulmamittarit sekä sakkkausvaroittimet. Potkurin lavoista lämmitetään vain tyviosaa, koska lapojen kärkien suuremman nopeuden vuoksi kärkiin ei kerry jäätä. [6, s. 180–181] Ohjaamonlaseissa on lasin kerrosten väliin asennettu vastuslankaverkko tai vastuskalvo [14, s. 255].

Lämmitystä tai tarkemmin lämmintä ilmaa käytetään myös kaasuttimien jäänestoon ja -poistoon. Kaasuttimen jäätymistä voidaan ehkäistä, tai jo kertynyttä jäätä sulattaa, tehokkaalla imuilman etulämmityksellä. Lämmin ilma tuotetaan lämpimistä pakokaasuista lämmönvaihtimen avulla. Ohjaaja pystyy kytkemään etuilman lämmityksen päälle lennettäessä olosuhteissa, joissa kaasuttimen jäätyminen on todennäköistä tai havaitsee merkkejä jo jäätyneestä kaasuttimesta. [16]

Osassa koneista käytetään lennon aikana jäänpoistonesteitä, maassa tapahtuvan jäänpoiston tapaan. Koneessa olevista säiliöistä ruiskutetaan tai vuodatetaan jäänpoistonestettä siipien johtoreunoille, tuulilasiin tai potkureihin. Jäänpoistonestettä voidaan käyttää sekä jäänpoistoon että -estoon. [6, s. 181]

Jäänpoistoa ja -estoa voidaan tehostaa lentokoneissa myös erilaisilla jäätä hylkivillä pinnoitteilla. Pinnoitteet voivat hylkiä vesipisaroita, hidastaa jään ydintymistä tai pienentää jäänadheesiota. Pinnoitteita voidaan valmistaa usealla eri tavalla ja niiden jään hylkivyyksi voi perustua useampaan eri mekanismiin. Ominaisuudet voidaan tehdä pinnoittamalla materiaali (esimerkiksi polymeeripinnoitteet), muuttamalla pinnan topografiaa ja lisäämällä voiteluaineita (esimerkiksi nanopartikkelipinnoitteet ja jäänestoaineet) tai muuttamalla pinnan fysikaalisia ominaisuuksia kuten polaarisuutta. Lentokoneiden jäänpoistoa ajatellen pinnoitteet ovat parhaimmillaan hybridimenetelmissä, joissa ne toimivat yhdessä aktiivisen jäänpoiston kanssa. Esimerkiksi jäätä hylkivä pinnoite johtoreunalla, jossa on lämmitys, vähentää jäänpoistoon tarvittavaa lämmitysenergiaa. Lämmitys voi parantaa myös pinnoitteen jäänesto-ominaisuuksia, jolloin suurempia jääkertymiä ei pääse syntymään. Kriittisissä osissa pinnoitteet eivät yksinään sovellu lentokoneen jäänestomenetelmäksi, koska se menettää jäänesto-ominaisuutensa pieninkin jääkerroksen myötä. Myös pinnoitteiden kuluminen vaikuttaa sen ominaisuuksiin. [18]

3. KOKEELLINEN OSUUS JÄÄLABORATORIOSSA

Työn kokeellisessa osassa verrattiin kahden eri materiaalin sekä pinnoituksen vaikutusta jään irtoamiseen näytteestä lämmityksen avulla. Mittaukset tehtiin kahdessa eri lämpötilassa, 20 °C:ssa sekä 10 °C:ssa. Molemmissa testeissä näytteet oli asetettu 30°:n kulmaan. Materiaaleina olivat alumiini 2017A-T4 ja ruostumaton teräs AISI 304L, joista molemmista oli pinnoittamattomat sekä polyeteenillä liekkiruiskutuksessa pinnoitetut näytteet. Alumiini ja teräs ovat lentokonealueissa käytettyjä materiaaleja ja siksi ne valittiin tutkimukseen. Pinnoitteelle Koivuluoto et al. [9] ovat aiemmassa tutkimuksessa todenneet alhaisia jäänadheesioarvoja ja tässä tutkimuksessa haluttiin vertailla jään irtoamista pinnoitteiden ja pinnoittamattomien materiaalien välillä. Materiaalien kemiallinen koostumus sekä materiaaliominaisuuksia on esitetty alla olevissa taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Materiaalien kemiallinen koostumus. Alumiini 2017A-T4 [19], ruostumaton teräs 304L [20].

	Alkuaine [W%]								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2017A-T4	0,46	0,12	4,31	0,68	0,72	0,01	0,04	0,03	Jäännösmäärä
	Si	C	P	Mn	S	Cr	Ni	N	Fe
304L	0,75	0,03	0,045	2	0,03	18,0-20,0	8,0-12,0	0,1	Jäännösmäärä

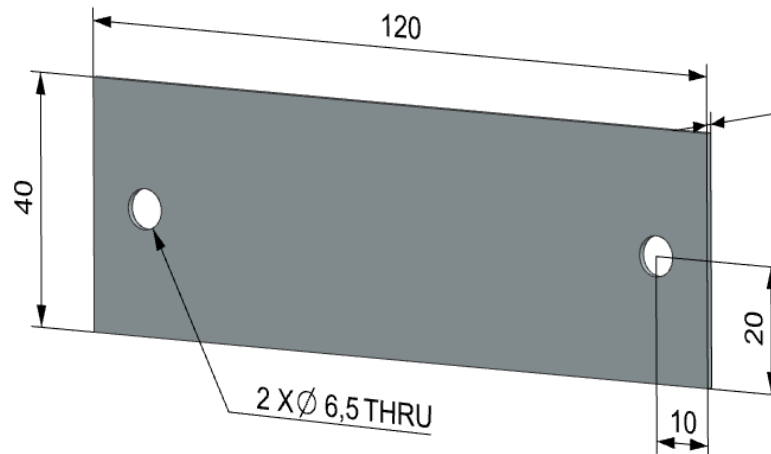
Taulukko 2. Materiaalien materiaaliominaisuuksia. Alumiini 2017A-T4 [21], ruostumaton teräs 304L [22].

	Myötölujuus [MPa]	Venymä A50mm [%]	Kimmokerroin [GPa]	Lämmönjohtavuus λ [W/mK]
2017A-T4	390	15	72	140
304L	170	40	200	16

Testien kannalta suurin ero materiaaleissa on lämmönjohtavuudessa λ . Näytteiden pinnoitus suoritettiin Tampereen yliopiston, Hervannan kampuksen raskaassa hallissa neljä ja varsinainen testaus Tampereen yliopiston, Hervannan kampuksen jäälaboratoriossa.

3.1 Näytteenvalmistus

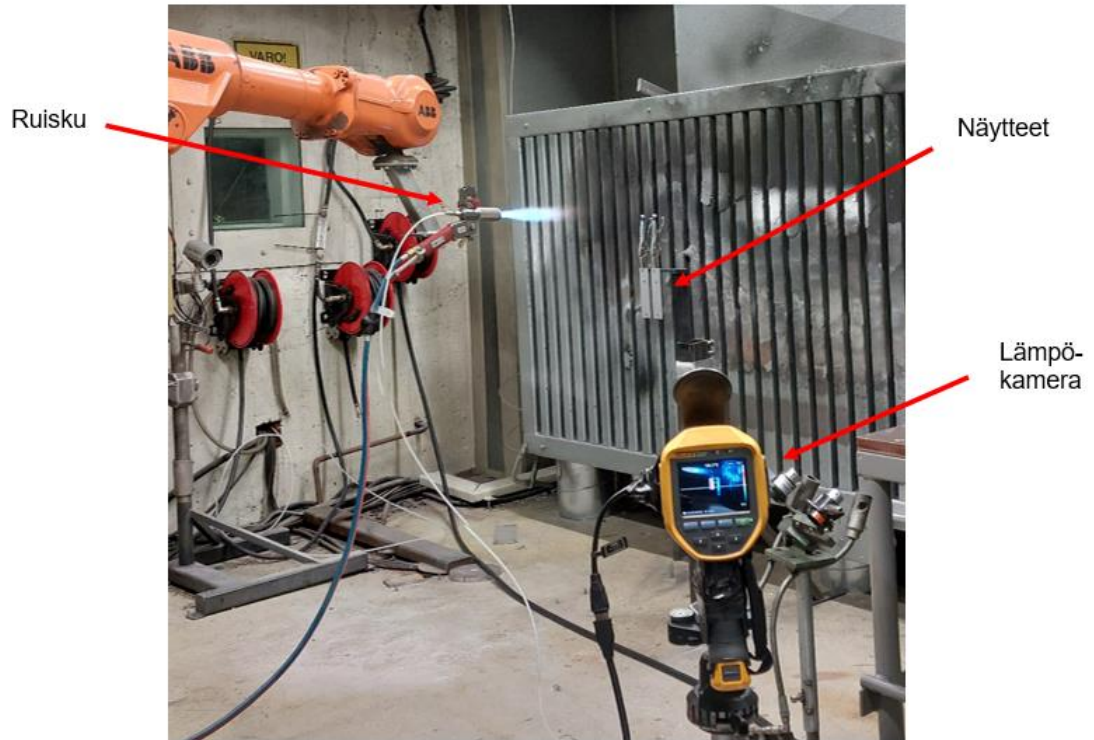
Näytteenvalmistus aloitettiin leikkaamalla alumiini- ja teräslevyistä näyteaihoita. Pinnoittamattomat aihiot leikattiin suoraan lopulliseen mittaansa 120 x 40 x 1 mm (pituus x leveys x paksuus) ja pinnoitettaviin aihioihin jätettiin kiinnitysvara eli niistä tehtiin kooltaan 150 x 40 x 1 mm. Molempiin aihioihin porattiin 6,5 mm:n kokoiset reiät kuvan 8 mukaisiin kohtiin jäädytyksessä käytettävää näytteenpidintä varten.



Kuva 8. Valmis näyte [mm].

Molemmista materiaaleista kymmeneen näytteeseen liekkiruiskutettiin polyeteenipinnoite. Ennen ruiskutusta näytteet hiekkapuhallettiin alumiinioksidirakeella, jonka koko oli Mesh 40. Tällä parannetaan pinnoitteen tarttumista. Hiekkapuhallus on tehtävä molemmin puolin näytettä, jotta siihen ei synny jännityksiä. Ruiskutusta varten näytteet kiinnitettiin puristimien avulla kiinni tankoon. Ruiskutuksen järjestelyt on esitetty kuvassa 9.

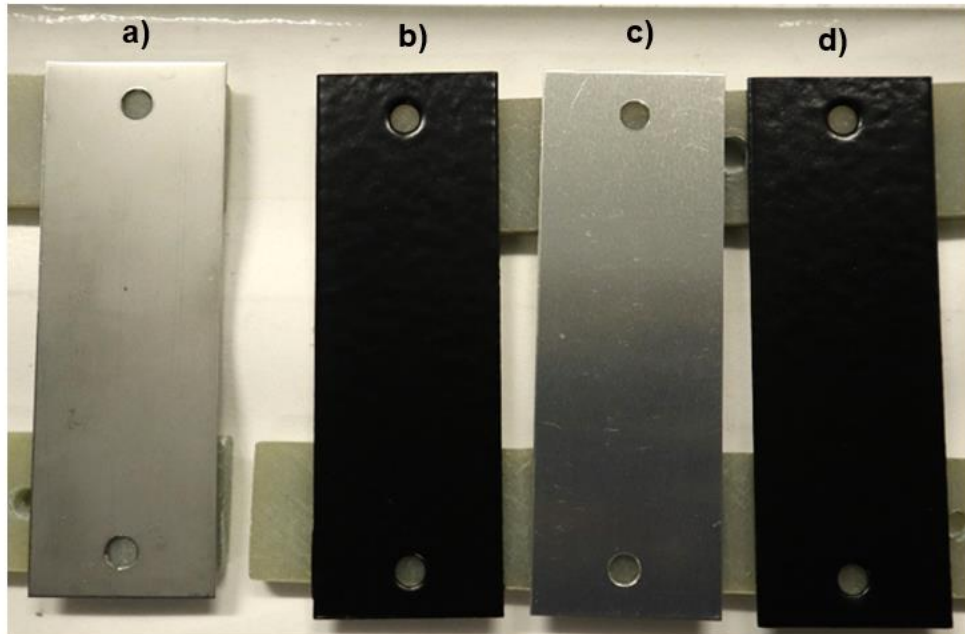
Pinnoituksessa jauheena oli pienitiheksinen polyeteeni (LDPE), Plascoat, Alankomaat, jossa partikkelin keskikoko on 150 µm. Jauheensyötön parametrit olivat kanta-kaasun virtaus 50 slm (ilma 5 bar) ja jauheensyöttöindikaattorina 90. Pinnoittamiseen käytetty ruisku oli Castolin ds 8000, M10 -suuttimella. Happikaasun paine oli 4 bar ja asetyleenin 0,7 bar. Muita ruiskutuksessa käytettyjä parametrejä olivat ruiskun liikeno-
peus 750 mm/s, step 5 mm (liike alaspäin) ja pinnoitusetäisyys 250 mm.



Kuva 9. Liekkiruiskutuksen järjestelyt.

Esilämmityksessä näytteet lämmitettiin noin 120 °C:seen, johon käytettiin 4 pyyhkäisyä liekillä. Näytteiden lämpötilaa seurattiin lämpökameralla, Fluke Ti200, joka näkyy kuvan 9 oikeassa alareunassa. Esilämmityksen jälkeen aloitettiin pinnoittaminen. Teräksessä pinnoitekerroksia tehtiin peräkkäin kaksi, minkä jälkeen näytteiden annettiin hetki jäähtyä 230 °C:seen. Tämä toistettiin 3 kertaa, jolloin pinnoitekerroksia oli yhteensä kuusi. Lopuksi näytteet lämmitettiin vielä pelkällä liekillä 250 °C:seen kahdesti. Alumiinin pinnoituksessa alkulämmitys oli kuten teräsnäytteissä, mutta pinnoitus tehtiin yksi kerros kerrallaan 250 °C:n lämpötilasta ja jälkilämmitys 270 °C:n lämpötilassa. Kerroksia tehtiin kokonaisuudessaan yhtä paljon eli kuusi.

Lopuksi pinnoitetut näytteet lyhennettiin samankokoisiksi kuin pinnoittamattomat näytteet. Tämä tehtiin Struersin Discotom-10 -laikkaleikkurilla. Kaikkien näytteiden lopullinen koko oli siis 120 x 40 x 1 mm (pituus x leveys x paksuus). Pinnoittamattomien näytteiden pinta jätettiin toimitustilaiseksi eli niitä ei esimerkiksi hiottu. Valmiit näytteet on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Näytteet: a) teräs 304L b) PE-pinnoitettu teräs 304L c) alumiini 2017A-T4 d) PE-pinnoitettu alumiini 2017A-T4.

Pintojen puhtauden varmistamiseksi näytteet vielä puhdistettiin etanolilla ultraäänipe-surissa. Lopuksi näytteet merkattiin ja pakattiin rasioihin kuljettamista varten.

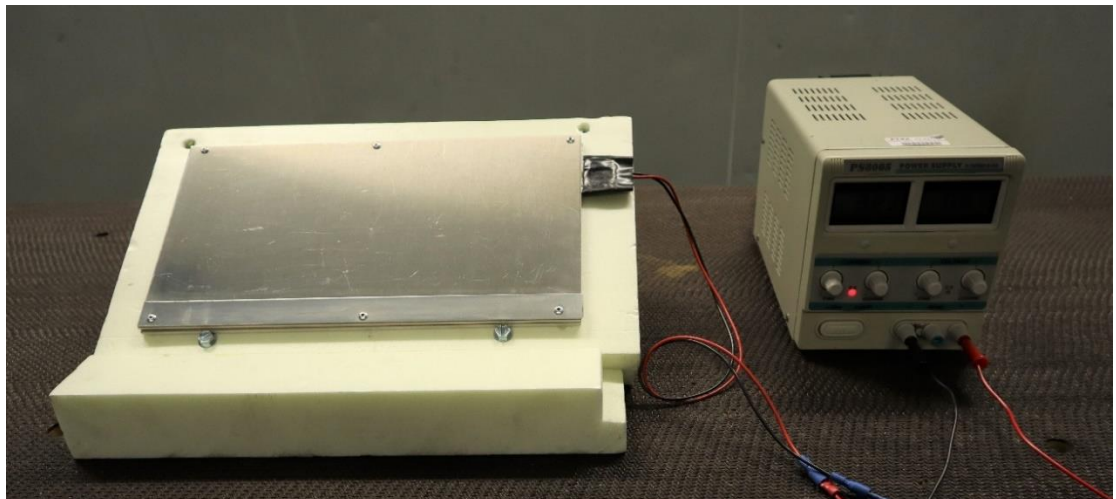
3.2 Koejärjestelyt

Testit suoritettiin Hervannan kampuksen jäälaboratoriossa. Kylmähuoneen lämpötila oli koko testien ajan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$:tta. Jäälaboratoriossa olevista laitteista jäänkerrytykseen käytettiin tuulitunnelia [11] nopeudella 25 m/s ja näytteiden punnitsemiseen tarkkuusvaa-kaa Pioneer PA2102:ta. Testeissä käytetty vesi oli puhdistettu Milli-DI vedenpuhdistus-järjestelmällä. Näytteelle kerrytettävän jään pinta-alasta haluttiin mahdollisimman suuri ja yhtenäinen, joten näytteitä ei voitu kiinnittää puristimilla tai käyttää maskipaloja ruu-vikiinnityksen peittämiseen. Lopulta päädyttiin kuvan 11 mukaiseen näytteenpitimeen, jossa näytteissä olevat reiät kohdistettiin pitimessä oleviin pinneihin. Pinnit estivät näytteen liikkumisen jään kerrytyksen aikana, jolloin puristimia tai ruuveja ei tarvittu.



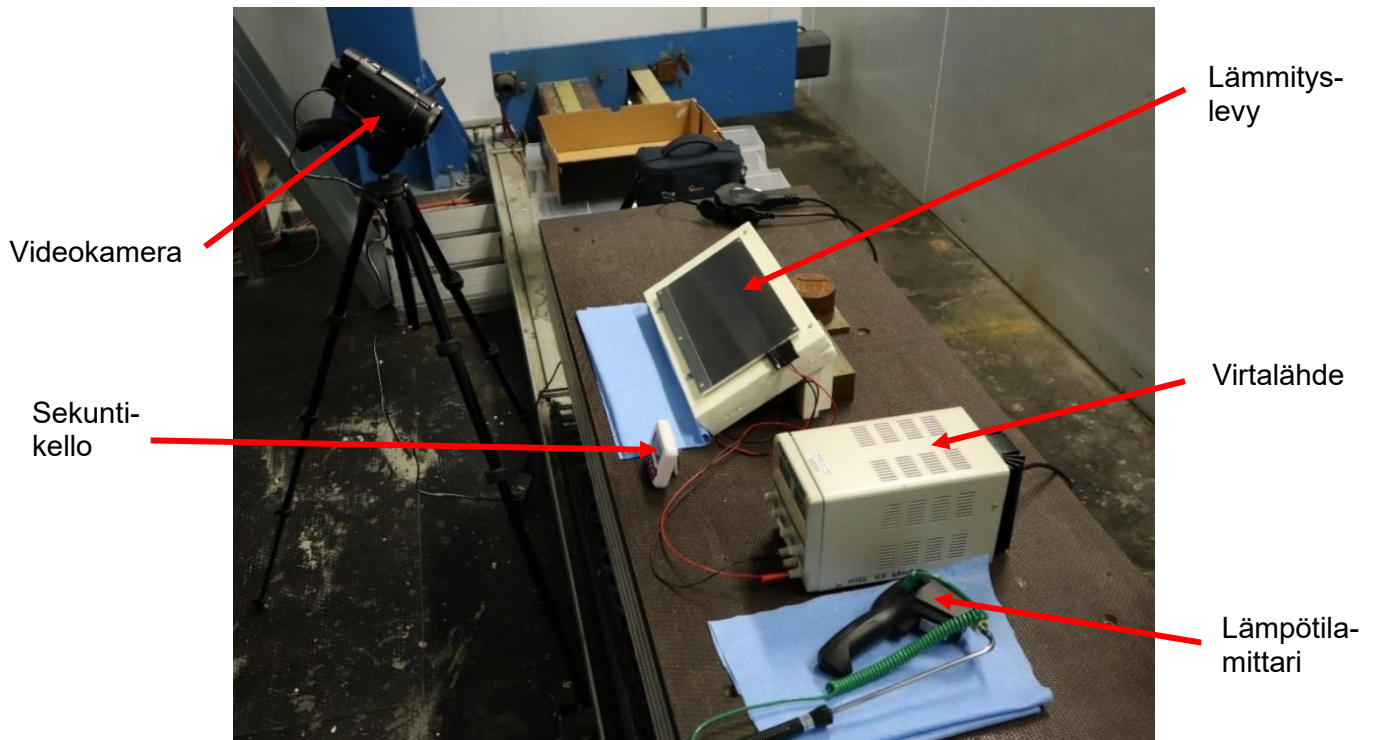
Kuva 11. Näytteenpidin.

Näytteitä lämmitettiin lämmityslevyn avulla, joka oli toteutettu kahden alumiinilevyn välissä olevalla lämmitysvastuksella. Levyssä käytetty alumiini oli samaa kuin näytteissä ja sen kemiallinen koostumus ja materiaaliominaisuudet löytyvät taulukoista 1 ja 2. Levyn alareunaan kiinnitettiin vasteeksi noin 1 cm:n levyinen suikale, jotta testattavat näytteet pysyivät paikoillaan. Kuvassa 12 vasemmalla oleva lämmityslevy on laitettu eristävän uretaanilevyn päälle, jotta lämpöä ei katoaisi alakautta. Levyn toisen pään alla on korokepala, jotta lämmityslevy saatiin 30 °:n kulmaan. Lämmitysvastusta ohjattiin erillisellä virtalähteellä ELFA PS-3005:llä (30V, 5A), kuvassa 12 oikealla.



Kuva 12. Vasemmalla lämmityslevy ja oikealla virtalähde.

Kuvassa 13 on esillä koko sulatustestaukseen käytetty laitteisto, mukaan lukien mitaamiseen käytetty välineistö.



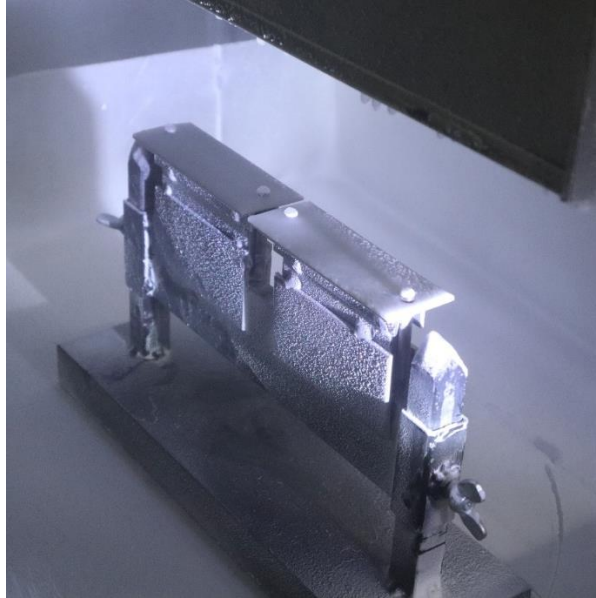
Kuva 13. Sulatuksen koejärjestelyt

Kuvan 13 oikeassa alanurkassa on infrapunalämpötilamittari Trifitek TR-47, johon on kiinnitetty K-tyyppin kosketusanturi Trifitek TR-602. Pinnoittamattomat näytteet sekä lämmityslevy olivat erittäin heijastavia, joten lämpökameraa tai etälämpötilamittaria ei voitu luotettavasti käyttää. Kosketuslämpötilamittarin tulos oli luotettavin mittaamaan lämpölevyn lämpötiloja. Lämmityslevyn edessä pöydällä on sekuntikello, jolla otettiin käsiaikaa ja kuvassa vasemmalla olevalla 4k videokameralla Sony FDR-AX53:lla kuvattiin sulatusta. Videolta määritettiin lopulta jään irtoamiseen kulunut aika.

3.3 Kokeen suorittaminen

Testit suoritettiin kahdessa osassa erillisinä päivinä. Ensimmäisenä päivänä näytteet jäädytettiin ja seuraavana päivänä sulatettiin. Näytteitä oli neljä erilaista, joista kaikista oli 10 rinnakkaista näytettä. Lisäksi kaksi teräsnäytettä jäädytettiin lämmityslevyn testaamista varten eli yhteensä näytteitä oli 42. Etukäteen puhdistetut ja merkatut näytteet vietiin edellisenä päivänä ennen jäädytystä kylmähuoneeseen tasaantumaan kylmähuoneen lämpötilaan. Kokeet aloitettiin käynnistämällä tuulitunneli ja sen ohjaamiseen liittyvä laitteisto. Tunnelissa ilmavirtaukseen ruiskutettavat vesipisarot ohjattiin näytteelle, johon pisarat jäätyivät muodostaen jääkerroksen. Ennen varsinaisten testinäytteiden aloittamista kerrytettiin jäätä testisauvoihin, jotta voitiin varmistua jään laadusta ja tarpeen vaatiessa säätää testiparametreja halutun jään saavuttamiseksi. Tässä testissä

jään haluttiin olevan sekajäätä (engl. mixed glaze ice) [10]. Kun haluttu jäänlaatu oli saavutettu, voitiin varsinaisten näytteiden jäänkerrytys aloittaa. Näytteisiin kerrytettiin kaksi kerrallaan noin 2–3 mm:n paksuinen sekajää kerros. Näytteenpidintä harjattiin tarvittaessa näytteiden vaihdon aikana messinkiharjalla, jotta siihen kerääntynyt jää ja lumi saatiin poistettua. Kuvassa 14 on esitetty näytteiden jäänkerrytystä.



Kuva 14. Näytteet tuulitunnelin alla jäänkerrytyksessä.

Kun haluttu jäänpaksuus oli saavutettu, näytteenpidin vedettiin pois tuulitunnelin alta ja näytteet irrotettiin näytteenpitimestä varovasti sivuilta nostamalla. Jäädetyt näytteet asetettiin pöydälle siten, että näytteissä olevat reiät olivat pöydälle asetettujen komposiittitankojen päällä, kuten liitteessä A olevassa kuvassa on esitetty. Tällä pyrittiin estämään rei'istä valuneen veden jäätyminen epätasaiseksi pohjan puolelta. Näytteet jätettiin yön yli kylmähuoneeseen.

Seuraavana päivänä näytteet olivat jäätyneet lopullisesti ja niiden testaaminen voitiin aloittaa. Ensimmäisenä jää tarkastettiin ja kirjattiin ylös jäässä mahdollisesti olevat viat, kuten säröt tai epätasainen jään kertymä. Tämän jälkeen näytteet valokuvattiin. Yön yli jäätyneet näytteet on esitetty liitteessä B. Seuraavaksi näytteet punnittiin. Punnitus oli tehtävä kontrollihuoneessa, jossa on normaali huonelämpötila, koska vaaka ei toimi pakkasessa. Punnitusta varten näytteet laitettiin eristelaatikoihin kuvan 15 mukaisesti. Laatikolla estettiin jään sulaminen punnituksen aikana.



Kuva 15. Punnituksessa käytetty eristelaatikko ilman kantta.

Kuvassa 15 näkyvien laatikon pohjaan teipattujen korokepalojen tehtävänä oli rajoittaa näytteen liikkumista laatikossa ja täten vähentää mahdollisuutta jään vaurioitumiselle.

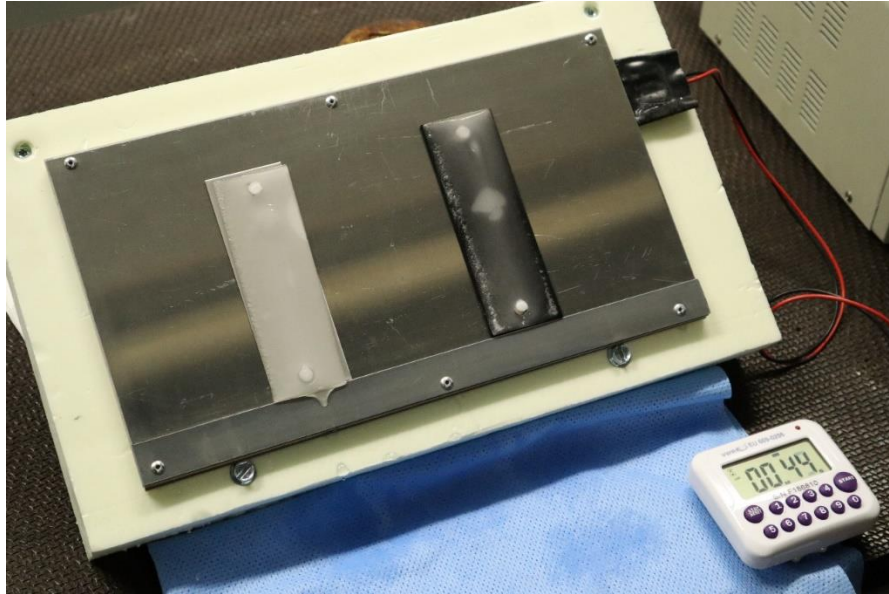
Punnituksen ja kirjaamisen jälkeen näytteet olivat valmiit jään sulattamista varten. Jokaista näytettä oli 10 rinnakkaista eli niistä puolet sulatettiin 20 °C:n lämpötilassa ja puolet 10 °C:n lämpötilassa. Lämmitysvastuksen haluttiin tuottavan tarpeeksi lämpöä pitääkseen lämpötilan sulatuksen aikana tasaisena, mutta se ei kuitenkaan saanut lämmetä liikaa mittausten välissä. Lämmityslevyn varsinainen lämpötila mitattiin ennen jokaista testiä kosketuslämpötilamittarin termoelementillä kuvan 16 mukaisesti. Lämpötila mitattiin useammasta pisteestä, joista myöhemmin laskettiin keskiarvo. Testien aikana huomattiin lämpötilan olevan melko tasainen koko lämmityslevyn alueella.



Kuva 16. Lämpötilan mittaaminen K-tyyppin kosketusanturin avulla.

Kaksi näytettä asetettiin lämmityslevyn päälle ja sekuntikello laitettiin käyntiin. Näytteet sulatettiin kaksi kerrallaan, jotta testiä oli helpompi seurata. Jään liikahtaessa katsottiin sen irronneen näytteen pinnasta ja tähän kulunut aika kirjattiin ylös. Näyte poistettiin lämmityslevyltä, kuivattiin ja asetettiin takaisin pöydälle. Kuvassa 17 vasemmanpuolei-

sen näytteen jään voidaan arvioida irronneen, koska se on selkeästi liikkunut. Sulatus kuvattiin videokameralla ja lopullisissa tuloksissa käytettävät arvot määritettiin näiltä videoilta. Usean näytteen tapauksessa jää ei irrottuaan liikkunut merkittävästi, joten laboratorioissa ajan määrittäminen tarkasti oli haastavaa.



Kuva 17. Kaksi näytettä lämmityslevyllä sulatustesteissä. Vasemmalla pinnoittamaton ja oikealla pinnoitettu.

Testien viimeisenä vaiheena oli näytteiden uudelleen punnitus. Tämä tehtiin kuten aiemmin eli tarkkuusvaa'alla eristelaatikoissa. Tulokset kirjattiin ylös myöhempää käsittelyä varten. Lopuksi näytteet pakattiin takaisin kuljetusrasioihin, laboratorio siivottiin sekä kylmähuone sammutettiin ja sulatettiin.

4. TULOKSET JA VIRHELÄHTEET

Tulosten käsittely alkoi tarkastelemalla lämmityslevystä mitattuja lämpötiloja. Jo testien aikana havaittiin levyn lämpötilan olleen melko tasainen koko levyn pinta-alalla, vaihtelua maksimissaan 2 °C:ta. Oikeilla virtalähteen säädöillä lämpötila saatiin säilymään mittauksesta toiseen tasaisena. Ensimmäisessä sulatuksessa 20 °C:n tavoitelämpötilaan käytettiin virtalähteessä arvoja: virta 3,40 A ja jännite 8,2 V. Loput testeistä tehtiin arvoilla: virta 4,00 A ja jännite 10,0 V. 10 °C:n tavoitelämpötilaan virtalähteen arvoja jouduttiin säätämään useamman kerran mittausten aikana, mutta muutokset olivat pienempiä kuin 20 °C:n testeissä. Vastaavat arvot 10 °C:n mittauksille olivat: virta 3,35–3,45 A ja jännite 8,1–8,4 V. Mitatuista lämpötiloista laskettiin keskiarvot (\bar{ka}) sekä keskihajonnat (sd) lämpötiloittain, jotka koottiin taulukkoon 3 virtalähteen arvojen kanssa.

Taulukko 3. Lämmityslevyn lämpötilat ja virtalähteessä käytetyt arvot.

Tavoite lämpötila	Lämpötila		Virtalähde	
	ka [°C]	sd [°C]	Virta [A]	Jännite [V]
20 °C	21,7	0,94	3,40–4,00	8,2–10,0
10 °C	11,3	0,91	3,35–3,45	8,1–8,4

Testeissä tulosten laskennan kannalta tärkeimmät mitatut suureet olivat jään irtoamiseen kulunut aika sekä jään massa. Jäälaboratoriossa tehtyjen testien jälkeen tarkistettiin jään irtoamiseen kulunut aika testeistä kuvatuista videoista. Epäselvissä tilanteissa määritettiin jään irronneen, kun näytteen alareunaan muodostui vesipisara. Jään massa laskettiin vähentämällä ennen sulatusta punnitusta massasta sulatuksen jälkeinen massa kaavan 1 mukaisesti.

$$m_j = m_1 - m_2, \quad (1)$$

jossa m_j (g) on näytteelle kerrytetyn jään massa, m_1 (g) on näytteen massa ennen sulatusta ja m_2 (g) on näytteen massa sulatuksen jälkeen. Jotta eri materiaalien tuloksia voidaan verrata keskenään, on sulatukseen kulunut aika suhteutettava näytteelle kerrytetyn jään massa. Tämä tehtiin kaavoilla 2 ja 3.

$$A = \frac{m_j}{t}, \quad (2)$$

jossa A ($\frac{g}{s}$) on sekunnissa sulavan jään massa, m_j (g) on näytteelle kerrytetyn jään massa ja t (s) on jään irtoamiseen kulunut aika.

$$B = \frac{t}{m_j}, \quad (3)$$

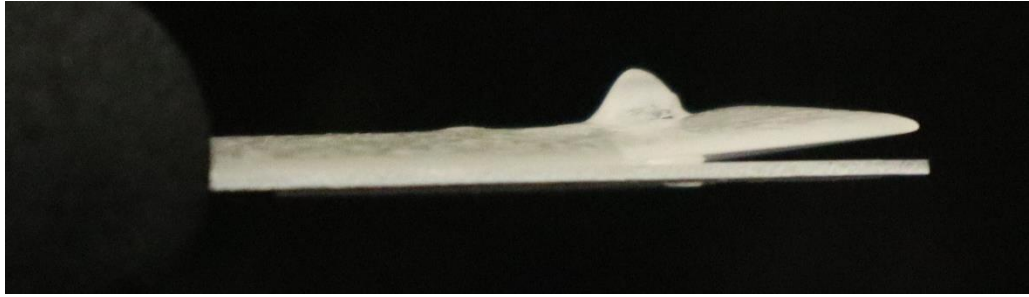
jossa B ($\frac{s}{g}$) on yhden gramman jäätä sulamiseen kulunut aika, t (s) on jään irtoamiseen kulunut aika ja m_j (g) on näytteelle kerrytetyn jään massa.

Rinnakkaisia näytteitä oli jokaisesta materiaalista viisi, joista tulosten laskennassa otettiin huomioon vain kolme. Näistä kolmesta tuloksesta laskettiin keskiarvo (ka) sekä keskihajonta (sd), jotka kirjattiin taulukkoon 4, jossa SS on ruostumaton teräs, FS SS on pinnoitettu ruostumaton teräs, Al on alumiini ja FS Al on pinnoitettu alumiini. Liitteessä C on esitetty yksittäisten näytteiden tiedot sekä tulokset välivaiheineen.

Taulukko 4. Sulatustestien tulosten keskiarvot sekä keskihajonnat 10 ja 20 °C:n sulatustilapötiloissa materiaaleittain.

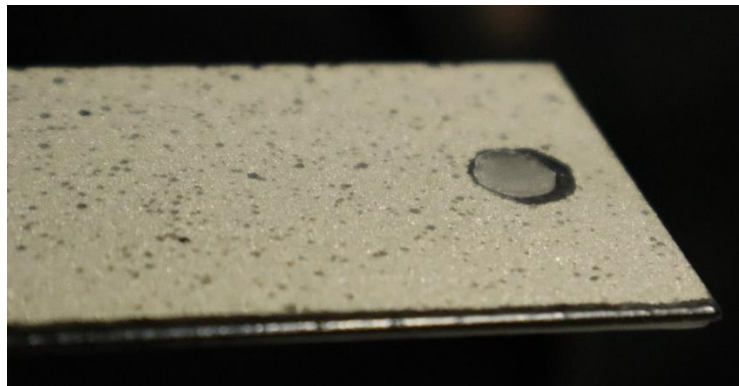
Näyte	20 °C		10 °C		20 °C		10 °C	
	A [g/s]	sd [g/s]	A [g/s]	sd [g/s]	B [s/g]	sd [g/s]	B [s/g]	sd [g/s]
SS	0,35	0,082	0,25	0,059	3,02	0,811	4,17	1,138
FS SS	0,25	0,035	0,14	0,007	4,08	0,581	7,35	0,350
Al	1,46	0,385	0,72	0,049	0,72	0,203	1,40	0,094
FS Al	0,38	0,026	0,34	0,080	2,64	0,173	3,03	0,623

Testeissä suurimmat virhelähteet tulevat jään erilaisista virheistä, lämmityslevyn epätarkkuudesta sekä jään irtoamishetken havainnoinnin inhimillisestä virheestä. Jäädymisen aikana osa näytteistä ehti jäätyä näytteenpitimen pinneihin kiinni. Näiden näytteiden jää vaurioitui, kun se nostettiin pois näytteenpitimestä. Vauriot havaittiin paremmin seuraavana aamuna yön yli jäätyneissä näytteissä. Osassa näytteissä jää oli irronnut näytteen pinnasta ylä- ja/tai alapäästä. Kuvasta 18 nähdään, kun jäähän on syntynyt kohouma näytteenpitimessä olleen pinnan kohdalle ja jää on irronnut näytteen pinnasta reunasta kohoumaan asti. Tällaisissa näytteissä irrotettavan jään pinta-ala on pienempi kuin tasaisesti pintaan jäätyneissä näytteissä. Tämä vaikuttaa jään irtoamiseen kuluvaa aikaa ja täten aiheuttaa virhettä tuloksiin.



Kuva 18. Näytteen kärjestä irronnut jää.

Osassa näytteissä näytteenpidintä varten olevat reiät jäättyivät yön aikana. Esimerkki tällaisesta jäätymisestä on kuvassa 19. Kerrytetty jää jäi tällaisissa tapauksissa roikkumaan reikään sulaneen jään varaan eikä tällöin päässyt liikkumaan vapaasti. Jää saattoikin pysyä lähes paikoillaan, vaikka olikin jo irti näytteen pinnasta. Reiän umpeen jäätyminen vuoksi niin videolta kuin laboratoriossa tarkkan ajan määrittäminen oli haasteellista. Ajan määrittämisen lisäksi reikään muodostunut jää muutti lämmitettävän alueen pinta-alaa.



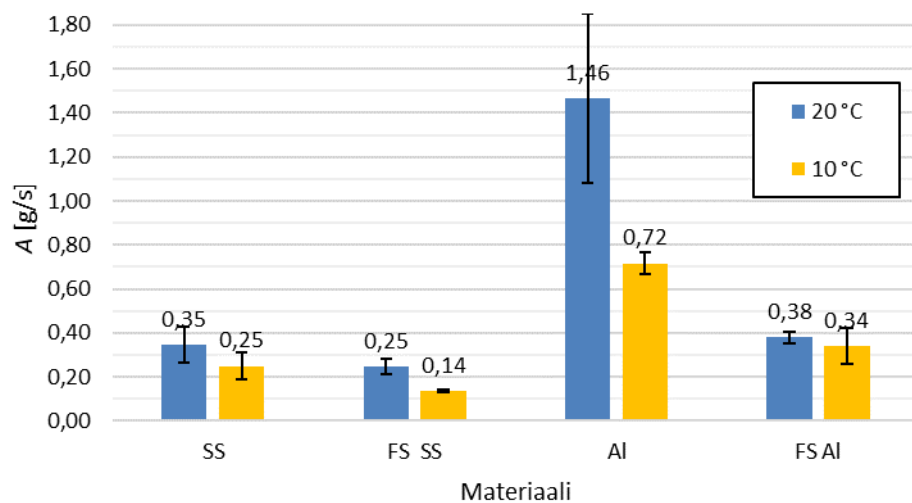
Kuva 19. Näytteen alapuolelta katsottuna umpeen jäänyt näytteenpidintä varten tehty reikä.

Lämmityslevy on yksi merkittävä virhelähde. Taulukon 3 perusteella sen lämpötilan voidaan sanoa olleen lähes sama kaikkien mittausten alussa, mutta lämpötila ei ole säilynyt vakiona mittauksen aikana. Lämpötilan lasku voitiin todentaa mittaamalla lämmityslevyn lämpötila heti, kun näyte oli poistettu. Lämpötila on siis hieman vaihdellut näytteiden välillä ja tämä luo virhelähdettä tuloksiin.

Edellä mainitut virhelähteet ovat tulosten kannalta oleellimmat. Lisäksi esimerkiksi mittalaitteiden, kuten tarkkuusvaa'an ja lämpötilamittarin tarkkuudet aiheuttavat yleisesti mittauksiin virhettä. Myös laboratorion olosuhteet vaihtelivat hieman testien aikana, esimerkiksi lämpötila ja ilmankosteus eivät olleet stabiilit.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

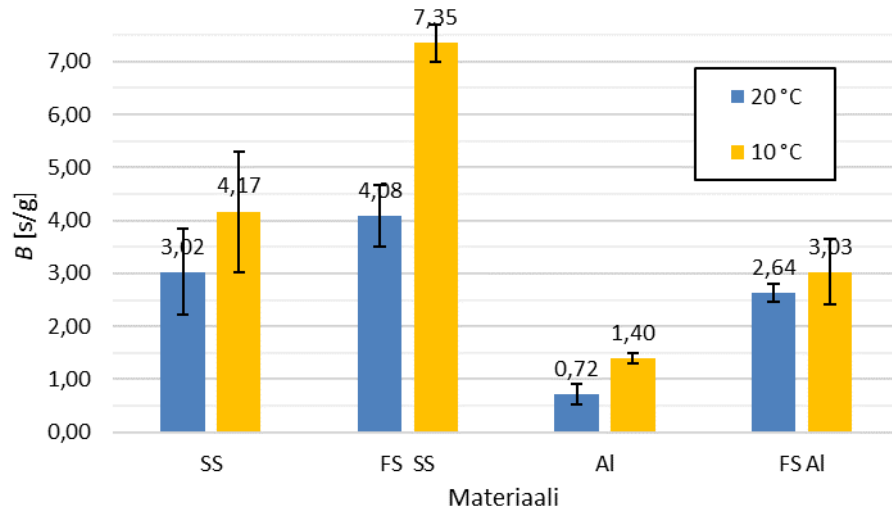
Taulukossa 4 esitettyjen tulosten havainnollistamiseksi tulokset koottiin kuvaajiksi, jotka on esitetty kuvissa 20 ja 21. Molemmissa kuvissa materiaaleista on käytetty samoja lyhenteitä kuin taulukossa 4. Kuvassa 20 esitetyt tulokset on laskettu kaavalla 2. Tuloksena saatu A kuvaa kuinka monta grammaa jäätä on sulanut sekunnissa eli siis mitä suurempi luku, sitä parempi tulos.



Kuva 20. Pylväsdiagrammi tuloksista A .

Kuvassa 20 havaitaan alumiinin tulosten hajonnan olevan selkeästi suurempi kuin muiden. Alumiinille kerrytetty jää irtosi nopeimmin, joten virhelähteet korostuvat tuloksissa. Esimerkiksi jään irtoaminen havaitaan myöhemmin, mikäli jää on tarttunut näytteenpitiimen reikään jäätyneestä osasta kiinni. Normaalissa tilanteessa jää olisi irronnut nopeasti, joten ero korostuu alumiinin kohdalla.

Kuvasta 21 esitetyt tulokset on laskettu kaavalla 3. B kuvaa kuinka monta sekuntia yhden gramman jäätä sulamiseen kuluu. Mitä pienempi luku, sitä nopeampaa jää sulaa ja sen parempi tulos on.



Kuva 21. Pylväsdiagrammi tuloksista B.

Molemmissa kuvissa 20 ja 21 alumiinin tulokset ovat parhaat. Tämä selittyy taulukossa 2 esitettyjen lämmönjohtavuuskertoimien erolla. Teräksellä lämmönjohtavuus λ on $16 \frac{W}{mK}$ ja alumiinilla se puolestaan on lähes yhdeksänkertainen eli $140 \frac{W}{mK}$. Alumiini siis johtaa paremmin lämpöä, jolloin -10 °C:ssa oleva näyte saavuttaa nopeammin lämmityslevyn lämpötilan ja jään sulaminen on nopeampaa korkean lämpötilan takia.

Molemmissa materiaaleissa sekä lämpötiloissa pinnoitettujen materiaalien tulos on pinnoittamaton heikompi. Pinnoitteessa käytetyn LDPE:n lämmönjohtavuus on metalleja huomattavasti pienempi $0,35 \frac{W}{mK}$ [23]. Tämä ei kuitenkaan merkittävästi huononna tuloksia, vaan pinnoitettujen materiaalien arvot ovat heikoimmillaan noin puolet pinnoittamattomien arvoista. Pinnoitteen etuna on metalleja alhaisempi jäänadheesio eli sen jään hylkivyyden on parempi. Koivuluoto et al. [9] ovat vertailleet PE-pinnoitteiden, teräksen ja alumiinin jäänadheesio arvoja artikkelissaan ”Anti-icing Behavior of Thermally Sprayed Polymer Coatings”. Alumiinin jäänadheesioarvot olivat vertailun korkeimmat eli 380 kPa, teräksellä noin 270 kPa ja PE-pinnoitteella selkeästi alhaisimmat eli 54 kPa. [8,9] Pinnoitteen edut ovat passiivisessa jäänpoistossa ilman lämmitystä.

Kuvista 20 ja 21 nähdään materiaalien järjestyksen pysyvän samana sekä 20 °C:n että 10 °C:n lämpötiloissa, joten niiden voidaan sanoa käyttäytyvän samoin molemmissa lämpötiloissa. Pylväiden korkeuden välisten erojen huomataan tasoittuvat 10 °C:n mitauksissa. Tämä johtuu pienemmästä lämpötilaerosta näytteiden ja lämmityslevyn välillä, joka pienentää eroja materiaalien välillä. Kuten jo aiemmin on todettu, alumiini lämpenee nopeammin suuremman lämmönjohtokertoimensa avulla ja saavuttaa lämmityslevyn lämpötilan ennen terästä. Lämmityslevyn lämpötilan ollessa alhaisempi teräs

saavuttaa nopeammin alumiinini kanssa saman lämpötilan, jolloin ne sulattavat jäätä kauemmin samassa lämpötilassa. Tämä tasoittaa alumiinin ja teräksen välisiä eroja 10 °C:n mittauksissa.

Memon et al. [24] ovat tutkineet artikkelissa ” Comparative study on the influence of surface characteristics on de-icing evaluation” pinnanlaadun vaikutusta jäänpoistoon. He käyttivät testeissään myös lämmön avulla tapahtuvaa jäänpoistoa materiaaleinaan ruostumaton teräs 303 sekä alumiini 2024-T4. Heidän tuloksensa tukevat tämän tutkimuksen päätelmiä, sillä myös heillä jää irtosi nopeammin alumiini näytteiltä kuin ruostumattomasta teräksestä.

Testit olivat onnistuneet ja tuloksia voidaan pitää luotettavina. Tuloksia tarkasteltaessa jouduttiin kuitenkin suurin ja pienin tulos poistamaan suuren hajonnan vuoksi. Suurimmat virhelähteet olivat lähtöisin näytteenpitimestä. Jatkossa toteuttaisin näytteiden kiinnityksen jäädytyksen aikana toisella tavalla ilmannäytteisiin tehtäviä reikiä. Testien suorittaminen jäälaboratoriossa eli jään kerrytys ja sulatus oli nopeaa. Testimenetelmä mahdollistaa myös suuret näytesarjat, koska itse testaaminen on nopeaa suorittaa.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin jäätyminen vaikutuksia lentokoneisiin. Työ rajattiin käsittelemään lennonaikaisia menetelmiä jäänpoistoon ja -estoon. Jäätymistä ei sääilmiönä voida kokonaan välttää, joten sen turvallisuusriskiä on pystyttävä minimoimaan. Ulkopinnoille kertynyt jää lisää lentokoneiden massaa sekä muuttaa aerodynaamisia ominaisuuksia. Mittareissa ja sensoreissa jäätyminen aiheuttaa virhelukemia ja kaasutimissa moottorin käyntihäiriöitä. Jäänestoa käytetään kohteissa, joihin jäätä ei haluta kertyvän lainkaan, kuten moottorien ilmanottoaukkoihin. Jäänpoistoa käytetään puolestaan kohteissa, joista jää on voitava poistaa, kuten siipien johtoreunat. Käytettävät menetelmät riippuvat konetyypistä. Pienemmissä koneissa siipien johtoreunoissa voidaan käyttää paineilmalla toimivaa paisuntakumia, kun taas suuremmissa koneissa johtoreunaa voidaan lämmittää moottorin vuodatusilmalla tai sähkövastuksilla. Lämmitys on kriittisissä kohteissa yleisesti käytetty jäänpoisto ja -esto menetelmä ja siksi se valittiin kokeelliseen osaan. Jäänestoa ja -poistoa tehostamaan voidaan käyttää myös erilaisia jäätä hylkiviä pinnoitteita.

Kokeellisessa osassa vertailtiin kahden eri lentokonemateriaalin sekä termisesti ruiskutetun polyeteenipinnoitteen jäänpoisto-ominaisuuksia lämmityksen avulla. Näytteille kerrytettiin muutaman millimetrin paksuinen sekajääkerros, joka sulatettiin irti lämmityslevyn avulla. Kokeessa vertailtiin alumiinin ja teräksen eroja sekä pinnoituksen vaikutusta jään irtoamiseen. Kokeet tehtiin kahdessa eri lämmityslevyn lämpötilassa, jolloin myös lämmityksen vaikutusta voitiin tarkastella, kun testiympäristön lämpötila oli -10 °C:ta. Testit tehtiin 10 °C:n ja 20 °C:n lämmityslevyn lämpötiloilla. Näytteet punnittiin ennen ja jälkeen jään sulatuksen, jolloin jään massa saatiin laskettua. Jään irtoamiseen kulunut aika määritettiin testeistä kuvatusta videosta. Jään massa suhteutettiin jään irtoamiseen kuluneeseen aikaan ja materiaalikohtaisista tuloksista laskettiin keskiarvot. Pinnoittamaton alumiini oli molemmissa lämpötiloissa paras, mutta erot hieman tasoittuvat lämmityslevyn lämpötilan laskiessa. Alumiinin lämmönjohtokerroin on suurempi kuin teräksellä, joten lämpö johtuu alumiinissa nopeammin ja täten se sulattaa jäätä nopeammin. Pinnoitettuja ja pinnoittamattomia näytteitä vertailtaessa pinnoitettujen tulokset olivat heikompia kuin saman materiaalin pinnoittamattomien. Pinnoitteen lämmönjohtokerroin on pieni eli se eristää lämpöä, mutta sen pieni jäänadheesio parantaa

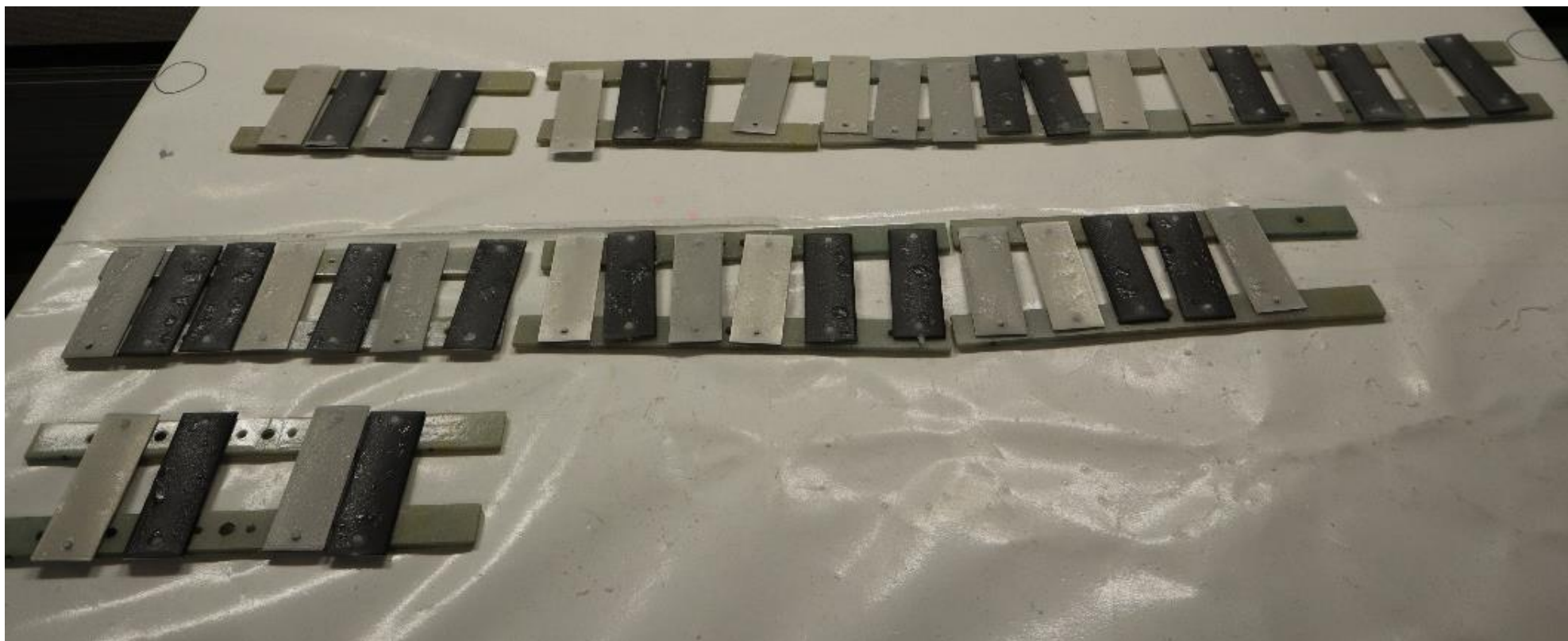
jäänpoisto ominaisuuksia. Esimerkiksi pinnoitettu alumiini oli näiden testien perusteella parempi kuin pinnoittamaton teräs eli pinnoite ei merkittävästi heikennä tuloksia.

LÄHTEET

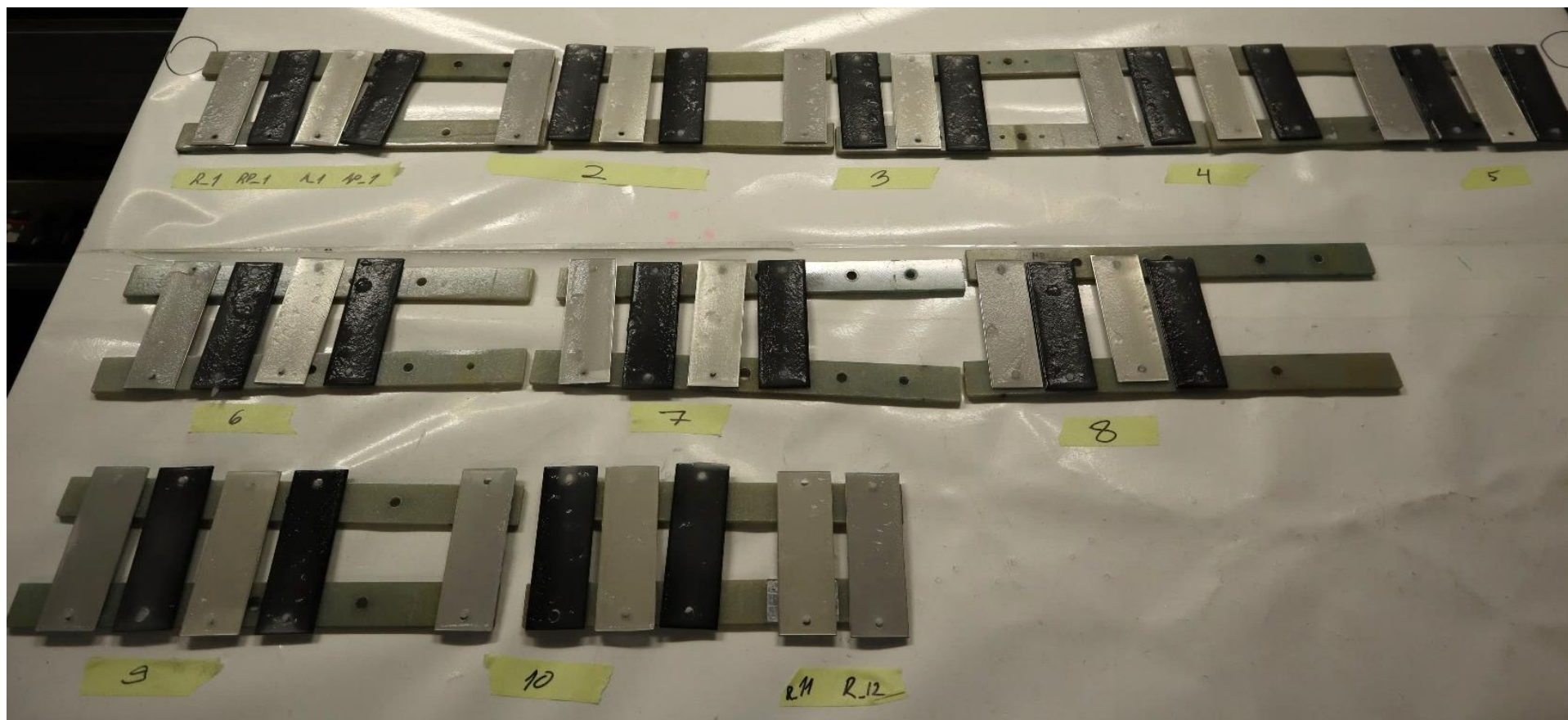
- [1] Sanasto ja määritelmät. verkkosivu. Liikennefakta. Saatavissa (viitattu 21.9.2022): <https://tieto.traficom.fi/fi/sanastot-ja-maaritelmat?toggle=Ilmailu>
- [2] Ilma-alusten hallinnan menetys lennon aikana (LOC-I). verkkosivu. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. 2022. Saatavissa (viitattu 21.9.2022): <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/ilma-alusten-hallinnan-menetys-lennon-aikana-loc-i>
- [3] D8/2009L Cessna 150 -lentokoneelle tapahtunut lento-onnettomuus Urjalassa 14.11.2009. Onnettomuustutkintakeskus. Saatavissa (viitattu 21.9.2022): <https://www.turvallisuustutkinta.fi/fi/index/tutkintaselostukset/ilmailuonnettomuuksientutkinta/tutkintaselostuksetvuosittain/ilmailu2009/d82009lcessna150-lentokoneelletapahtunut.html>
- [4] B2/2005L Lento-onnettomuus Helsinki-Vantaan lentoasemalla 31.1.2005 - Onnettomuustutkintakeskus. Saatavissa (viitattu 29.9.2022): <https://turvallisuustutkinta.fi/fi/index/tutkintaselostukset/ilmailuonnettomuuksientutkinta/tutkintaselostuksetvuosittain/ilmailu2005/b22005llento-onnettomuushelsinki-vantaan.html>
- [5] Lento-onnettomuus Helsinki-Vantaan lentoasemalla 31.1.2005: SE-KYH, C208B. Helsinki: Onnettomuustutkintakeskus; 2006. Saatavilla (viitattu 29.9.2022): https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/ilmailuonnettomuuksientutkinta/2005/b22005l_tutkintaselostus/b22005l_tutkintaselostus.pdf
- [6] Hoffren J., Saarela O. Lentotekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus; 2008.
- [7] 2017A Aluminum vs. 2024 Aluminum : MakeItFrom.com. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.9.2022): <https://www.makeitfrom.com/compare/2017A-AICu4MgSiA-3.1325-H14-Aluminum/2024-AICu4Mg1-3.1355-2L97-A92024-Aluminum>
- [8] Koivuluoto H., Hartikainen E., Niemelä-Anttonen H. Thermally sprayed coatings: Novel surface engineering strategy towards icephobic solutions. *Materials*. 2020;13(6):1434–.
- [9] Koivuluoto H., Stenroos C., Kylmälahti M., Apostol M., Kiilakoski J., Vuoristo P. Anti-icing Behavior of Thermally Sprayed Polymer Coatings. *Journal of thermal spray technology*. 2017;26(1-2):150–60.
- [10] Stenroos C. Properties of icephobic surfaces in different icing conditions. M.Sc thesis. Tampere University of Technology. 2015.
- [11] Koivuluoto H., Stenroos C., Ruohomaa R., Bolelli G., Lusvarghi L., Vuoristo P. Research on icing behavior and ice adhesion testing of icephobic surfaces. IWAI 2015 Upsala Sweden;6.

- [12] Kandelin N. Icing Factors Affecting Railway Traffic. M.Sc thesis. Tampere University of Technology. 2021.
- [13] Icing –Safety spotlight: precipitation ana icing. verkkosivu. AOPA Air Safety Foundation. Saatavissa (viitattu 19.10.2022): <https://www.aopa.org/training-and-safety/online-learning/safety-spotlights/weather-wise-precipitation-and-icing/icing>
- [14] Lähteenmäki E. Lentokonejärjestelmät. Helsinki: Valtion painatuskeskus; 1992.
- [15] Aircraft deicing and anti-icing equipment. verkkosivu. AOPA Air Safety Foundation. 2014. Saatavissa (viitattu 19.10.2022): <https://www.aopa.org/-/media/Files/AOPA/Home/Pilot%20Resources/ASI/Safety%20Advisors/sa22.pdf>
- [16] EGAST Leaflet GA 5 Piston Engine Icing. verkkosivu. EASA. Saatavissa (viitattu 18.10.2022): <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/egast-leaflet-ga-5-piston-engine-icing>
- [17] Aircraft Wing and Stabilizer Deicing Systems. verkkosivu. Aircraft Systems. Saatavissa (viitattu 15.9.2022): <http://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/wing-and-stabilizer-deicing-systems.html>
- [18] Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V., Budinger M., Bonaccorso E., Villedieu P, et al. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. Progress in aerospace sciences. 2019;105:74–97.
- [19] Alnan Aluminium Inc. Mill Test Certificate. EN 10204-3.1. 2020.
- [20] Alloy 304/304L Austenitic Stainless Steel Plate. verkkosivu. Sandmeyer Steel. Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.sandmeyersteel.com/304L.html>
- [21] 2017 / 2017A T4 / T451 - Aluminum - Referans Metal. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <http://www.referansmetal.com/alasimli-aluminyum/product/373/genel-endustri/en-aw-alcu4mgsi-2017-2017a-t4-t451?lang=en>
- [22] 304 Stainless and 304L Stainless Steel Sheet & Bar - AMS 5513, 5511. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.upmet.com/products/stainless-steel/304304l>
- [23] polymerdatabase.com. LDPE. verkkosivu. 2015 Saatavissa (viitattu 20.4.2022): <https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/LDPE.html>
- [24] Memon H., Mirshahidi K., Zarasvand K.A., Golovin K., De Focatiis D.S.A., Choi K.S., et al. Comparative study on the influence of surface characteristics on deicing evaluation. Journal of materials science. 2021;56(30):17337–52.

LIITE A: NÄYTTEET HETI JÄÄDYTYKSEN JÄLKEEN



LIITE B: YÖN YLI JÄÄTYNEET NÄYTTEET



LIITE C: TESTIEN ARVOT JA TULOKSET TAULUKOITUNA

Pvm: 2.3.2022			Massa			Aika		Lämpölevyn arvot		Lämpölevyn lämpötila	Ajan määrittäminen videolta			Massa/ajalla	Aika/massalla
No.	Näyte	Havainnot	m1 [g]	m2 [g]	m _j [g]	kello [s]	video [s]	virta [A]	jännite [V]	ka [°C]	aloitus	lopetus	aika [s]	A [g/s]	B [s/g]
1	SS_10	RB, JC	241,58	233,76	7,82	33	19	3,4	8,2	22,2	10	29	5	0,412	2,430
2	FS SS_10	JC	264,92	258,42	6,50	104	92	3,4	8,2	22,2	10	102	5	0,071	14,154
3	AI_10		221,45	211,63	9,82	17	14	4	10	21,7	9	23	6	0,701	1,426
4	FS AI_10	JC	244,25	236,17	8,08	30	25	4	10	21,7	8	33	6	0,323	3,094
5	SS_11		217,14	211,69	5,45	7	8	4	10	21,8	16	24	7	0,681	1,468
6	SS_12		263,81	256,25	7,56	45	45	4	10	21,8	16	61	7	0,168	5,952
7	SS_1		240,51	233,93	6,58	15	15	4	10	21,8	9	24	8	0,439	2,280
8	FS SS_1		265,69	258,46	7,23	34	34	4	10	21,8	9	43	8	0,213	4,703
9	AI_1	P	219,23	211,72	7,51	9	5	4	10	23,0	14	19	9	1,502	0,666
10	FS AI_1	UN, P	244,85	236,03	8,82	16	11	4	10	23,0	14	25	9	0,802	1,247
11	SS_2	P	243,54	234,31	9,23	34	29	4	10	21,2	7	36	10	0,318	3,142
12	FS SS_2		268,03	258,52	9,51	27	19	4	10	21,2	6	25	10	0,501	1,998
13	AI_2	UN	219,02	211,7	7,32	4	4	4	10	20,4	10	14	11	1,830	0,546
14	FS AI_2		243,98	236,18	7,80	24	19	4	10	20,4	9	28	11	0,411	2,436
15	SS_3		241,27	234,11	7,16	40	31	4	10	20,4	12	43	12	0,231	4,330
16	FS SS_3		266,93	258,68	8,25	37	33	4	10	20,4	12	45	12	0,250	4,000
17	AI_3	JC, UN	218,77	211,74	7,03	2	3	4	10	21,5	15	18	13	2,343	0,427
18	FS AI_3		245,44	236,27	9,17	29	25	4	10	21,5	15	40	13	0,367	2,726
19	SS_4		241,93	234,1	7,83	26	23	4	10	20,4	10	33	14	0,340	2,937
20	FS SS_4		266,7	258,81	7,89	30	28	4	10	20,4	11	39	14	0,282	3,549
21	AI_4	P, JC	221,27	211,71	9,56	10	9	4	10	21,0	19	28	15	1,062	0,941
22	FS AI_4		244,08	236,06	8,02	25	22	4	10	21,0	18	40	15	0,365	2,743
23	SS_9	P	243,57	234,2	9,37	31	29	3,4	8,4	11,5	21	50	16	0,323	3,095
24	FS SS_9	SC, P	266,54	258,37	8,17	68	62	3,4	8,4	11,5	21	83	16	0,132	7,589
25	AI_9	JC	220,41	211,68	8,73	15	13	3,4	8,4	10,9	13	26	17	0,672	1,489
26	FS AI_9	JC	240,82	236,08	4,74	24	16	3,4	8,4	10,9	12	28	17	0,296	3,376
27	SS_5	JC, P, SC	244,11	234,23	9,88	34	34	3,45	8,3	12,5	10	44	18	0,291	3,441
28	FS SS_5		267,45	258,4	9,05	75	68	3,45	8,3	12,5	10	78	18	0,133	7,514
29	AI_5	JC	218,87	211,76	7,11	10	10	3,45	8,3	12,0	26	36	19	0,711	1,406
30	FS AI_5	P	244,39	236,16	8,23	18	19	3,45	8,3	12,0	26	45	19	0,433	2,309
31	SS_6	JC, C	240,91	234,24	6,67	100	80	3,45	8,3	11,8	13	93	20	0,083	11,994
32	FS SS_6		266,46	258,32	8,14	100	96	3,45	8,3	11,8	12	108	20	0,085	11,794
33	AI_6	JC	218,3	211,74	6,56	9	7	3,35	8,1	11,5	10	17	21	0,937	1,067
34	FS AI_6		244,32	236,08	8,24	35	28	3,35	8,1	11,5	11	39	21	0,294	3,398
35	SS_7	JC	240,97	233,72	7,25	30	26	3,35	8,1	11,6	12	38	22	0,279	3,586
36	FS SS_7	RB	266,07	258,61	7,46	30	35	3,35	8,1	11,6	12	47	22	0,213	4,692
37	AI_7		220,17	211,72	8,45	14	11	3,35	8,1	10,8	10	21	23	0,768	1,302
38	FS AI_7	P	244,04	234,01	10,03	23	23	3,35	8,1	10,8	11	34	23	0,436	2,293
39	SS_8		241,56	234,08	7,48	70	41	3,35	8,1	10,6	12	53	24	0,182	5,481
40	FS SS_8	P	266,98	258,49	8,49	70	59	3,35	8,1	10,6	12	71	24	0,144	6,949
41	AI_8	P	218,82	211,67	7,15	19	14	3,35	8,1	10,1	13	27	25	0,511	1,958
42	FS AI_8		243,22	236,14	7,08	34	35	3,35	8,1	10,1	13	48	25	0,202	4,944