

Ronni Laaksonen

Pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhteen parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

8.3.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ronni Laaksonen Pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhteen parantaminen 46 sivua + 20 liitettä 8.3.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumismuutostohto	tuotantopainotteinen LVI
Ohjaajat	lehtori Aki Valkeapää diplomi-insinööri Tom Palmgren
<p>Insinöörityön tarkoituksena oli tutkimusten avulla selvittää, voidaanko pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhdetta parantaa kennon materiaalivalinnoilla. Lisäksi tutkimuksessa oli tarkoitus syventyä lämmöntalteenottokeinojen rypytyskuvioihin ja selvittää, voidaanko optimaalisella leikkausprofiililla parantaa siirtimen lämpötilahyötysuhdetta.</p> <p>Tutkimukset suoritettiin SFS EN 308 -standardin mukaisilla lämpötilahyötysuhdemittauksilla. Mittaukset suoritettiin luotettavien tuloksien aikaansaamiseksi sekä tutkittavalle että tuotannossa käytössä olevalle siirtimelle. Tutkittavat tapaukset valikoituivat selvitystyön perusteella, missä tarkasteltiin regeneratiiviselta lämmönsiirtimeltä vaadittavia ominaisuuksia. Poikkileikkausprofiilien muutokset perustuivat yrityksen aiemmin suorittamiin kanavaprofiilien CFD-simulointeihin.</p> <p>Projektissa tutkitut tapaukset eivät parantaneet pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhdetta. Muokatun kanavaprofiilin vaikutus lämmönsiirtoon havaittiin olevan merkityksetön. Myöskään lämmönjohtavuudeltaan paremman materiaalin hyödyntäminen ei havaittu tehostavan kennon lämmönsiirtoa.</p> <p>Projektin avulla saatiin hyödyllistä tietoa materiaalien soveltuvuuksista regeneratiivisiksi lämmönsiirtimiksi sekä kennon rainan erilaisista leikkausprofiileista. Lisäksi tutkimuksen avulla saatiin luotua kirjallinen dokumentaatio lämpötilahyötysuhdemittauksien mittausjärjestelyistä, jota voidaan hyödyntää yrityksen tuotekehityksessä. Näiden lisäksi materiaalien ja leikkausprofiilien selvitystyöstä saatiin aikaan runko tutkimusprosessille, jota voidaan hyödyntää uusien valmistusvaihtoehtojen kartoituksessa.</p>	
Avainsanat	ilmanvaihtokone, lämmönsiirto, pyörivä regeneraattori, lämpötilahyötysuhde

Author Title	Ronni Laaksonen Improving heat exchangers temperature efficiency
Number of Pages Date	46 pages + 20 appendices 8 March 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructors	Aki Valkeapää, Senior lecturer Tom Palmgren, Master of Science
<p>The purpose of this final year project was to find out whether or not it is possible to improve the temperature efficiency of rotary heat exchangers by different heat transfer element materials. Furthermore, this study investigated the optimization and modification of the cutting profile and how it could improve the heat exchange process.</p> <p>This study is based on measurements performed on selected products that were chosen through earlier research. Changes to the cross-cutting profiles were selected by previous simulations done by the company. An alternative option to aluminum, as material of the heat exchanger, was chosen according to the examination of the heat transfer capacity in different materials.</p> <p>According to the study, the modification of the cutting profile did not improve the efficiency of the heat transfer in a rotary heat exchanger. Neither did the changes in materials have a positive impact on the heat transfer.</p> <p>Due to this project, useful information was collected about the requirements of the heat transferring materials in regenerative heat exchange, and the different types of cutting profiles. The valuable information was summarized in this final year project, beneficial for further studies.</p>	
Keywords	HVAC, heat exchange, rotary heat exchanger, temperature efficiency

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämmöntalteenotto	2
2.1	Lämpötilahyötysuhde	2
2.2	Yleisimmät lämmöntalteenottomenetelmät	3
2.2.1	Pyörivä regeneraattori	3
2.2.2	Kiinteäkennoinen regeneraattori	3
2.2.3	Levylämmönsiirrin	4
2.2.4	Nestekiertoinen lämmönsiirrin	4
2.2.5	Lämpöputkipatteri	5
3	Pyörivät regeneraattorit	5
4	Kennon kuviointi	6
4.1	Virtaustarkastelu CFD-simuloinnilla	6
4.1.1	Virtaussimulointi	6
4.1.2	Kanavaprofiilien simulointi	8
4.1.3	Rei'itetyn kanavan simulointi	11
4.1.4	Simulointien analysointi	14
4.2	Kohoumakenno	15
4.3	Suorakaidekenno	17
5	Materiaalitarkastelu	20
5.1	Materiaalilta vaadittavat ominaisuudet	20
5.1.1	Paloturvallisuus	20
5.1.2	Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti	20
5.1.3	Lujuusominaisuudet	21
5.1.4	Kosteudensietokyky	21
5.2	Potentiaalisten materiaalien kartoitus	21
5.3	Alumiini-kupari-lämmönsiirrin	23
5.4	Sektorikenno	26
5.5	Pinnoitettu lämmönsiirrin	27

6	Mittaukset	28
6.1	Mittausjärjestelyt	28
6.2	Mitatut konstruktiot	31
6.2.1	Kohoumakennon lämpötilahyötysuhdemittaus	31
6.2.2	Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittaus	35
6.2.3	Yhdistelmäkennon lämpötilahyötysuhdemittaus	37
6.2.4	Sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus	39
6.2.5	Pinnoitettujen kennojen lämpötilahyötysuhdemittaukset	39
6.3	Mittaustulosten analysointi	40
7	Yhteenveto	43
	Lähteet	45
	Liitteet	
	Liite 1. Enerventin lämmönsiirtimien valmistus (vain yrityksen käyttöön)	
	Liite 2. Yhdistelmäkenno	
	Liite 3. Ilmanvaihtolaitteiden ohjaus	
	Liite 4. Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 8.9.2015	
	Liite 5. Kohoumakennon jatkomittaus	
	Liite 6. Alumiinikennon jatkomittaus	
	Liite 7. Suorakaidekennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa	
	Liite 8. Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 20.10.2015	
	Liite 9. Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittaus 30 l/s	
	Liite 10. Yhdistelmäkennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa	
	Liite 11. Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 25.9.2015	
	Liite 12. Yhdistelmäkennon lämmönjohtavuusmittaus	
	Liite 13. Alumiinikennon lämmönjohtavuusmittaus	
	Liite 14. Sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus	
	Liite 15. Sektorikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa	
	Liite 16. Pinnoitetun sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus	
	Liite 17. Pinnoitetun sektorikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa	
	Liite 18. Pinnoitetun alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus	
	Liite 19. Pinnoitetun alumiinikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa	
	Liite 20. Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 6.10.2015	

Lyhenteet

LTO Lämmöntalteenotto

IV-kone Ilmanvaihtokone

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aiheena on pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhteen parantaminen. Uudistuvat ilmanvaihtokoneiden ekosuunnitteluvaatimukset sekä markkinoiden kiristynyt kilpailutilanne ovat aikaansaaneet tarpeen kehittää ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottoa. Ilmanvaihtokoneiden ekosuunnitteluasetuksen mukaan muiden kuin nestekiertoisten lämmön talteenottojärjestelmien lämpötilahyötysuhteen on oltava vähintään 67 % vuonna 2016 ja 73 % vuonna 2018. [1]

Asuntoilmanvaihtokoneille tulee pakolliseksi vuoden 2016 alusta energiamerkintä, jossa esitetään ilmanvaihtokoneen energiatehokkuusluokka Euroopan keskimääräisessä ilmastossa. Ilmoitettava energiatehokkuusluokka määräytyy ilmanvaihtolaitteen ominaisenergiankulutuksen perusteella. Asetuksien on määrä astua Euroopassa voimaan kahdessa vaiheessa siten, että vuoden 2018 alussa energialuokkakriteerejä on tarkoitus kiristää vuoden 2016 tasosta. Voimaan astuvat Ecodesign-määräykset koskevat kaikki Euroopan Union alueella myytäviä ja käyttöön otettavia ilmanvaihtolaitteita. [2; 3.]

Insinööriyön tarkoituksena on selvittää, voidaanko pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhdetta parantaa kennon materiaalivalinnoilla siirtimen pinta-alaa kasvattamatta. Työssä on lisäksi tarkoitus syventyä lämmöntalteenottokeinojen rypytyksuviioihin ja kuviointien tuotantoprosessiin sekä tutkimusten avulla selvittää, voidaanko optimaalisella leikkausprofiililla parantaa kennon lämpötilahyötysuhdetta.

Tämä insinööriyö tehdään tutkimustyönä Ensto Enervent Oy:lle. Enervent on porvoollainen ilmanvaihtoon ja lämmön talteenottoon keskittynyt yritys, joka kehittää, valmistaa ja markkinoi pääasiassa pyörivällä energian talteenotolla varustettuja ilmanvaihtolaitteita. Yritys aloitti toimintansa reilut 30 vuotta sitten nimellä Oy Combinent Ab. Toimintansa kasvaessa yrityksen nimeksi vaihdettiin vuonna 2001 Enervent Oy Ab, jonka koettiin kuvaavan paremmin yrityksen ilmanvaihtoon keskittyvää toimintaperiaatetta. Vuonna 2009 Enervent liitettiin osaksi Enstoa yrityskaupalla, jossa Ensto muodosti ilmanvaihdosta, lämmityksestä ja näiden ohjaamisesta muodostavan kokonaisuuden. [4]

Yrityksessä työskentelee tällä hetkellä noin 50 henkilöä. Henkilöstö koostuu IV-laitteiden valmistus-, tuotekehitys- ja markkinointihenkilöstöstä. Yrityksen henkilökunta muodostuu

niin kokeneista kuin nuorista työntekijöistä. Yrityksen asiakunta koostuu pääasiassa lämmöntalteenottolaitteiden jälleenmyyjistä. Päämarkkina-alueena toimivat Suomi, Ruotsi, Norja, Puola sekä Venäjä. [4]

2 Lämmöntalteenotto

2.1 Lämpötilahyötysuhde

Lämmönsiirtimen tehokkuuden yleisimmin käytetty tunnusluku on tuloilman lämpötilahyötysuhde. Tuloilman lämpötilahyötysuhde voidaan laskea kaavalla 1.

$$n_t = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} * 100 \quad (1)$$

jossa n_t on tuloilman lämpötilahyötysuhde [%]
 t_1 on ulkoilman lämpötila [°C]
 t_2 on tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen [°C]
 t_3 on poistoilman lämpötila [°C]

Vastaavalla tavalla voidaan määrittää poistoilman lämpötilahyötysuhde, joka kuvaa kuinka suuri osa poistoilman lämmöstä saadaan otettua talteen.

$$n_p = \frac{t_3 - t_4}{t_3 - t_1} * 100 \quad (2)$$

jossa n_p on poistoilman lämpötilahyötysuhde [%]
 t_1 on ulkoilman lämpötila [°C]
 t_3 on poistoilman lämpötila [°C]
 t_4 on jäteilman lämpötila LTO:n jälkeen [°C]

2.2 Yleisimmät lämmöntalteenottomenetelmät

2.2.1 Pyörivä regeneraattori

Pyörivä regeneraattori eli lämpöä varaava lämmönsirriin rakentuu sylinterin muotoisesta, kennomaisesta kiekosta, joka pyörii ilmanvaihtolaitteen sisällä kahden aksiaalisuuntaisen ainevirran välillä. Kennon pyöriessä poistupuolen massaan varautunut lämpö siirtyy tuloilmapuolelle luovuttaen lämpöä tuloilmaan. Pyörivää lämmönsiirintä voidaan käyttää myös jäähtyksen talteenottoon, kun ulkoilman lämpötila on korkeampi kuin jäähdytettävästä tilasta poistettavan ilman lämpötila. Lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa johtumalla ja konvektiolla, jälkimmäisen ollessa määräävä. [5, s. 5.]

Pyörivät lämmönsiirtimet on perinteisesti valmistettu alumiinista, jolla on hyvä lämmönjohtavuus ja joka on helposti muokattavissa. Lämpöä siirtävä kennosto rakentuu 1,5–2,5 mm:n läpimittaisista virtauksen suuntaisista kanavista, joissa ilman sisältämä lämpöenergia pääsee varautumaan materiaalin massaan. Rakenteen ansiosta materiaalin lämmönsiirtopinta-ala saadaan kasvatettua suureksi ja siirtimen lämmöntalteenottokyky kasvatettua korkeaksi. Pyörivien regeneraattoreiden lämpötilahyötysuhteet ovat luokkaa 70–85 %. [1]

Pyörivien lämmönsiirtimien erikoisuutena on kyky siirtää materiaalin pintaan lauhtuneen tai absorboituneen veden ilmavirrasta toiseen. Kosteudensiirtoa voidaan tehostaa käyttämällä materiaalina pinnaltaan huokoista oksidoitua alumiinia tai pinnoittamalla roottorin pinta silicageelillä tai litiumkloridilla. Kosteudensiirron hyötysuhde on tämänkaltaisilla roottoreilla yleensä noin 5–10 % heikompi kuin kennon lämpötilahyötysuhde. [1]

2.2.2 Kiinteäkennoinen regeneraattori

Kiinteäkennoinen regeneraattori rakentuu kahdesta paikallaan pysyvästä lämmönsiirtimestä, joihin johdetaan vuorotellen tulo- ja poistoilma. Kennostoihin ohjattavien ilmavirtojen suuntia muutetaan ohjauspellin avulla. Järjestelmässä lämmin poistoilma lämmittelee kennoston, jonka jälkeen kennoon ohjataan viileä tuloilma, joka lämpenee kennostoon varautuneen lämpöenergian seurauksena. Lämmöntalteenoton tehonsäätö toteutetaan muuttamalla ilmavirran suunnanvaihtonopeutta. [1]

Erityisesti yleisilmastointiin tarkoitetut kiinteäkennoiset regeneraattorit valmistetaan usein metallisista levyistä tai kennoista. Laitteet tehdään pitkiksi, jolloin kennostojen lämmönsiirtopinta-ala saadaan kasvatettua suureksi. Ilmavirran suuntaa vaihdetaan riittävän usein, jotta tuloilman lämpötila ei pääse heilahtelemaan prosessissa liiaksi. Laitteiston erityispiirre on umpeen huurtumattomuus, jolloin laitteesta on kosteissa ja kylmissä olosuhteissakin saatavissa valmistajan mukainen tehokkuus. Kiinteäkennoisten regeneraattoreiden lämpötilahyötysuhteet ovat suuruudeltaan 70–90 %. [1]

2.2.3 Levylämmönsiirrin

Levylämmönsiirtimissä lämmönsiirto tapahtuu johtumalla ilmavirrasta toiseen. Levyt valmistetaan tavallisesti alumiinista mutta myös muovista valmistettuja levylämmönsiirtimiä on markkinoilla saatavilla. Rekuperatiivisessa lämmönsiirrossa tulo- ja poistoilmat eivät pääse sekoittumaan lainkaan, sillä kennossa ilmavirrat ovat erotettuina toisistaan väliseinillä. Toimintaperiaatteensa vuoksi kenno ei kykene siirtämään kosteutta tulo- ja poistoilman välillä. [1; 6, s. 13–14.]

Vastavirta levylämmönsiirtimissä ilmavirrat kulkevat samansuuntaisesti pidemmän matkan kuin ristivirtasiirtimissä, jolloin lämmönsiirtyminen on tehokkaampaa. Vastavirtaus on lämpötekniisesti edullisin virtausgeometria. Ristivirtalevylämmönsiirtimissä ilmavirrat kulkevat ristikkäin toisiinsa nähden. Kennot ovat muodoltaan vinoneliön muotoisia ja rakenteeltaan samankaltaisia kuin vastavirtalevylämmönsiirtimet. Kennossa tulo- ja poistoilmavirrat kulkevat lyhemmän matkan samansuuntaisesti kuin vastavirtakennoissa, jolloin kennosta saatu lämpöteho on pienempi. Levylämmönsiirtimien lämpötilahyötysuhteet ovat yleisimmin luokkaa 60–85 %. [1; 6, s. 13–14.]

2.2.4 Nestekiertoinen lämmönsiirrin

Nestekiertoinen lämmönsiirrin rakentuu tulo- ja poistoilmaan sijoitetuista pattereista sekä näiden välisestä kiertonesteputkistosta. Kiertonesteenä käytetään yleisimmin etyleeni-glykolivesiliuosta. Patterit valmistetaan tavallisimmin kupariputkista alumiinilamellein mutta käytännössä pattereiksi kelpaavat mitkä tahansa patterimallit. Nestekiertoisten lämmönsiirtimien tehonsäätö hoidetaan säätöventtiilillä. Tällaisten järjestelmien lämpötilahyötysuhde on 40–55 %. [1]

2.2.5 Lämpöputkipatteri

Lämpöputkipatterit koostuvat yksittäisistä tai yhdistetyistä lämpöputkista, joiden sisällä on helposti kiehuva ja lauhtuva nestettä. Toiminta perustuu faasimuutokseen, jossa lämpöputken lämpimässä poistoilmapäässä kiehuva neste kulkeutuu höyrynä kylmään tuloilmapäähän, jossa se lauhtuu. Tämän jälkeen lauhde kulkeutuu kapillaarikerrosta pitkän takaisin putken lämpimään päähän. [1]

Lämpöputkipatterit valmistetaan tavallisesti alumiinista ja kuparista. Järjestelmän tehonsäätö hoidetaan yleensä kallistuskoneistolla, jossa virtaavan nesteen kulkua helpotetaan putken kallistuskulmaa kasvattamalla. Laitteiston maksimiteho saavutetaan yleisimmin noin 8°:n kallistuskulmalla. Erikoissovelluksissa laitteiston lämpöputket ovat sijoitettuna siten, että maksimiteho saavutetaan putkien ollessa pystyasennossa. Tällöin järjestelmän säätö toteutetaan ohituspeltien avulla. Tyypillisesti lämpöputkipatterien lämpötilahyötysuhde on luokkaa 55–65 %. [1]

3 Pyörivät regeneraattorit

Suuria pyörivien lämmönsiirtimien valmistajia maailmalla ovat ruotsalaiset Enventus AB ja Heatex AB sekä saksalainen Klingenburg GmbH. Yrityksien valmistamat perusmalliset alumiiniroottorit ovat rakenteeltaan sekä ulkomuodoiltaan hyvin pitkälle Enerventin lämmönsiirtimien kaltaisia, joiden rakenne ja valmistusmenetelmä on esitetty liitteessä 1. Roottorit on valmistettu kokonaan ilman liima-aineita sileästä sekä rypytytystä alumiini-levystä. [7; 8; 9.]

Enventuksen kennot valmistetaan pääsääntöisesti yhdestä osasta aina halkaisijan kokoon 2600 mm asti. Tätä suuremmat kennot valmistetaan jakamalla lämpöä siirtävä massa lohkoihin siten, että sektorit ovat erikseen irrotettavissa sekä vaihdettavissa. Roottoreiden optimaalisen valmistusmenetelmän ansiosta sileä ja poimutettu alumiiniraina ovat kennossa samanlevyiset, jonka seurauksena siirtimen pinnasta tulee tasainen ja roottori saadaan tiivistettyä parhaalla mahdollisella tavalla. Enventuksen valmistamien roottoreiden rypytyskuvion korkeus on muokattavissa kennon käyttötarkoituksen sekä roottorin hyötysuhdevaatimuksen mukaan. Roottoreita on tilattavissa viidellä eri aallonkorkeudella, matalimman aallon ollessa 1,5 mm ja korkeimman profiilin 2,7 mm korkeita. Kuvioinnin aallonpituus on noin 25 % pienempi kuin Enerventin kennoissa,

jonka seurauksena siirtimien aiheuttama painehäviö on suurempi kuin dimensioiltaan ja aallonkorkeudeltaan vastaavassa Enerventin kennossa. [9]

Enventuksen perusmalliset alumiinilämmönsiirtimet valmistetaan 200 mm leveästä rainasta mutta erikseen tilattaessa on saatavilla myös 100 mm, 150 mm ja 250 mm leveitä lämmönsiirtimiä. Kennot valmistetaan sekä pysty- että vaakasuoraan asennettaviksi. Referenssiroottorin lämpötilahyötysuhteeksi ilmoitetaan 200 mm leveästä ja 1,5 mm korkeasta rypytysrainasta valmistetulle kennolle 85,9 %. [10]

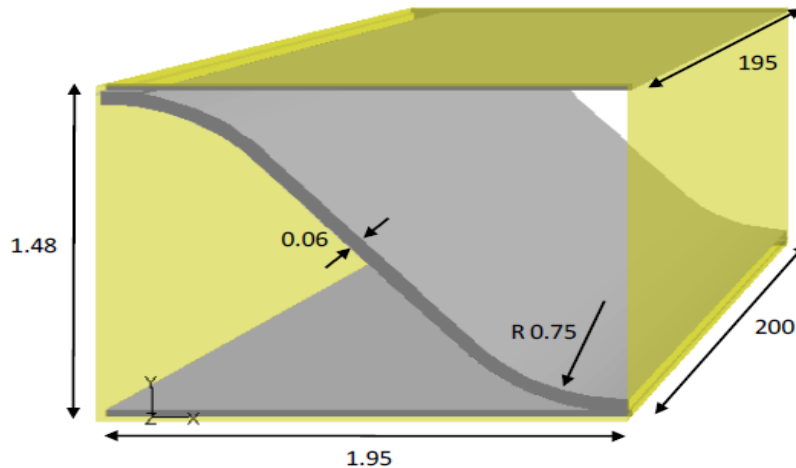
4 Kennon kuviointi

4.1 Virtaustarkastelu CFD-simuloinnilla

4.1.1 Virtaussimulointi

Ensto Enervent on teettänyt kesällä 2010 pyörivälle lämmönvaihtimelle CFD-simuloinnin, jossa tutkittiin regeneratiivisen lämmönvaihtimen ominaisuuksia virtauslaskennan avulla. Simuloinnin tarkoituksena oli selvittää, voitaisiinko laitteen tehoa parantaa tai lämmönvaihtimen kokoa pienentää tehokkuuden kärsimättä.

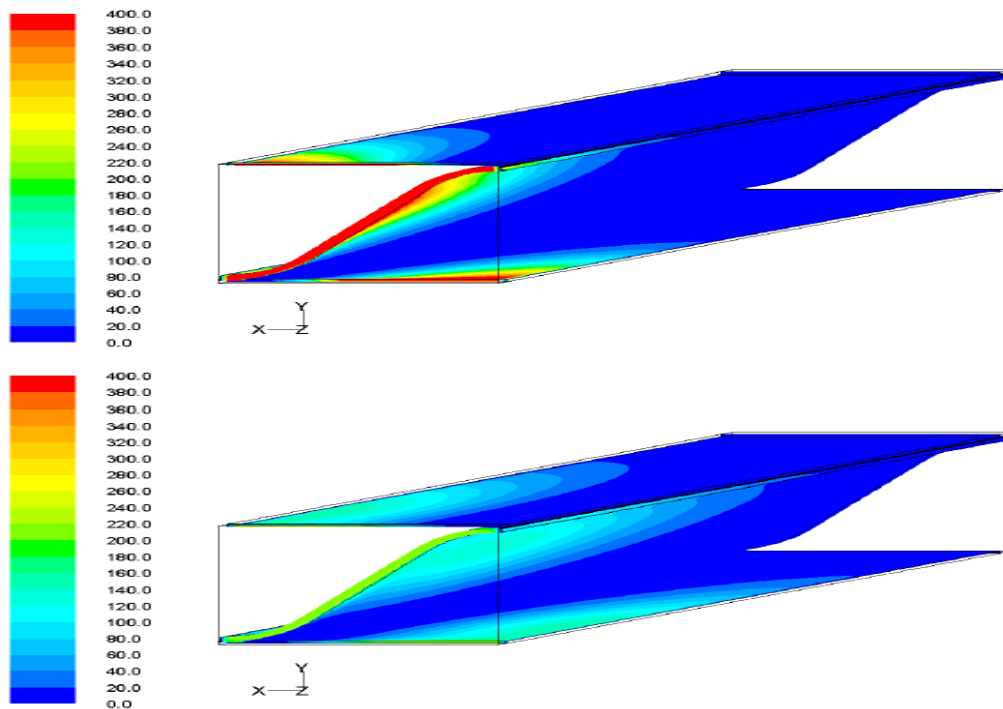
Simuloinnit suoritettiin kolmella eri ilmamäärällä siten, että laitteistolla saatiin tarkasteltua yhden rypytetyn alumiinilevyn aallonpituuden puolikasta. Sileästä levystä simuloinnissa oli mukana puolet sen paksuudesta eli 0,03 mm. Käytetyn laskenta-alueen dimensiot on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Simuloinneissa käytetyn laskenta-alueen dimensiot [11, s. 2].

Saatujen tuloksien mukaan virtaus kanavissa oli laminaarista kaikilla simuloituilla ilmamäärillä. Tämän seurauksena lämmönsiirtokerroin on suurimmalla osalla pinta-alasta noin $60 \text{ W/m}^2\text{K}$. Saatu lämmönsiirtokerroin on noin 25 % pienempi kuin samankokoiselle pyöreälle putkelle laskettu laminaarisen virtauksen teoreettinen maksimiarvo, $82 \text{ W/m}^2\text{K}$. [11, s.11–12.]

Mittausten mukaan lämmönsiirto on tehokkainta aivan kennon kanavien alkupäässä, jossa virtaus häiriintyy törmätessään alumiinilevyjen reunoihin. Tutkimuksissa havaittiin, että levyjen reunojen sekoittaessa virtauksia keskimääräinen lämmönsiirtokerroin ensimmäisen millimetrin alueella on noin $200 \text{ W/m}^2\text{K}$, mikä on yli kaksinkertainen verrattuna seuraavaan millimetriin. Virtauksien tasaantuessa railossa lämmönsiirtokerroin asettuu arvoon $56 \text{ W/m}^2\text{K}$ kaikissa kolmessa mittaustapauksessa. Tutkimuksen yhteydessä havaittiin myös, että suurin osa sileän levyn pinta-alasta jää lämmönsiirron kannalta hyödyntämättä. Tämä johtuu siitä, että rypytytyn ja sileän levyn muodostamassa terävässä yhtymäkohdassa ilmavirtaus on heikkoa ja lämmönsiirto jää siten varsin vähäiseksi. Tehollisen lämmönsiirtopinta-alan kannalta terävien kulmien muodostumista tulisi välttää optimaalisen kuvioinnin suunnittelussa. [11, s. 11–12.] Nämä asiat ilmenevät kuvasta 2, jossa on esitettyinä lämmönsiirtyminen metalliin kahdella eri ajanhetkellä.



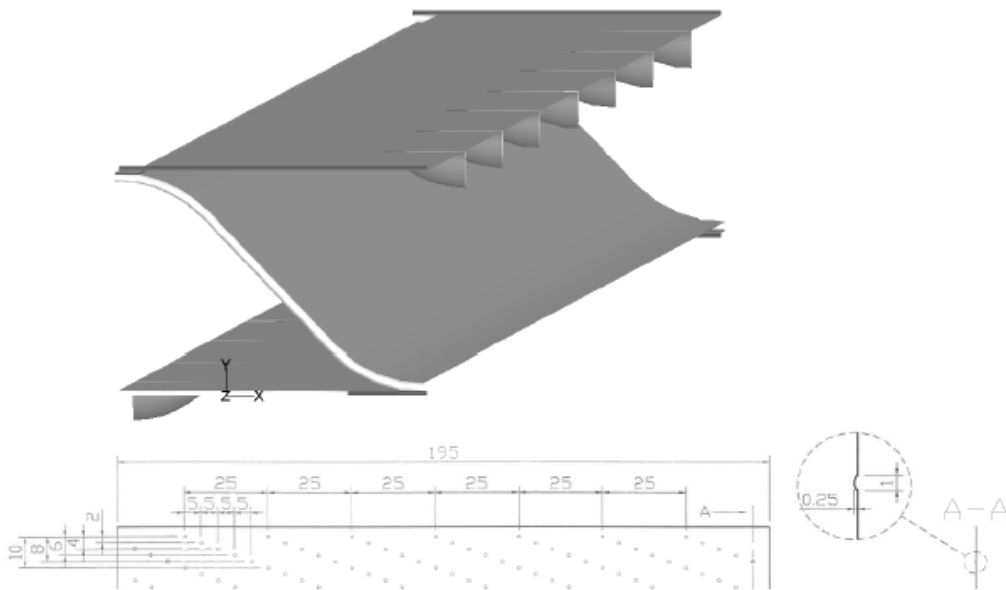
Kuva 2. Lämmönsiirtyminen metalliin (W/m^2K) ajanhetkellä $t = 0,84$ s (ylhällä) sekä ajanhetkellä $t = 4,28$ s (alhaalla). Simuloinnista havaitaan lämmönsiirtymisen olevan tehokkainta levyjen etupinnoilla, joissa ilmanvirtaussuunta muuttuu. Vastaavasti levyjen muodostamassa terävässä yhtymäkohdassa lämmönsiirtyminen on heikkoa. [11, s. 11.]

Virtaussimuloinnin tulosten perusteella lämmönvaihtimen toimintaa voidaan tehostaa parantamalla levyn ja ilman välistä lämmönsiirtokerrointa sekä kasvattamalla vaihtimen tehokasta lämmönsiirtopinta-alaa. Vaihtimen lämmönsiirtokerroin paranee, jos ilmavirtausta häiritään levyn lähellä ja virtausmalli saadaan muuttumaan turbulenttiseksi. Tehollista lämmönsiirtopinta-alaa voidaan pyrkiä parantamaan lisäämättä alumiinilevyn määrää kennossa esimerkiksi muotoilemalla kanavat siten, ettei terävistä kulmista johtuvia kuolleita alueita, joissa lämmönsiirto on vähäistä, pääse muodostumaan. Analyysin perusteella tehollisen lämmönsiirtopinta-alan kasvattamisen kannalta edullisimpia kanavien poikkileikkauksia olisivat tasasivuinen kolmio, neliö sekä kuusikulmio. [11, s. 12.]

4.1.2 Kanavaprofiilien simulointi

Kesällä 2010 saatujen virtaussimulointien perusteella Enervent teetti syksyllä 2010 uuden virtaussimuloinnin, jonka tarkoituksena oli selvittää, miten levyprofiiliin tehtävät muutokset vaikuttavat lämmönsiirron tehokkuuteen. Virtaussimulointi toteutettiin CFD-simulointina.

Levyprofiileihin tehdyt muutokset koskivat sekä alumiinilevyn sileää että rypyttettyä pintaa. Ensimmäinen simulointi suoritettiin kanavaprofiilille, jossa sileään levyyn oli tehty golfpallomaisia kohoumia 5 mm:n välein. Kohoumien syvyys simuloinnissa oli 0,25 mm ja halkaisija 1,0 mm. Rivissä kohoumien välien etäisyys oli 25 mm. Kohoumat oli sijoitettu profiilissa keskelle kanavaa siten, että symmetriatasot leikkasivat kohoumia keskeltä. Tämä edustaa kohoumien minimimäärää kanavassa. Vaihtoehtoisesti kohoumarivi olisi voitu sijoittaa keskilinjasta sivulle, jolloin kanavaan olisi mahtunut kaksinkertainen määrä kohoumia. Simuloitu kanavageometria on esitetty kuvassa 3. Toisessa simuloinnissa rypyttetty kanava oli profiloitu mutkittelemaan loivasti. Tehdyn aaltokuvioinnin amplitudi oli 1,95 mm, ja tehty aaltoprofiili kattoi 1,5 aallonpituutta 200 mm:n pituudella. Kolmannessa geometriassa rypyttetty kanava oli saatettu mutkittelemaan, kuten edellisessä mitauksessa, ja sileään pintaan oli tehty kohoumia, kuten ensimmäisessä simuloinnissa. [12]

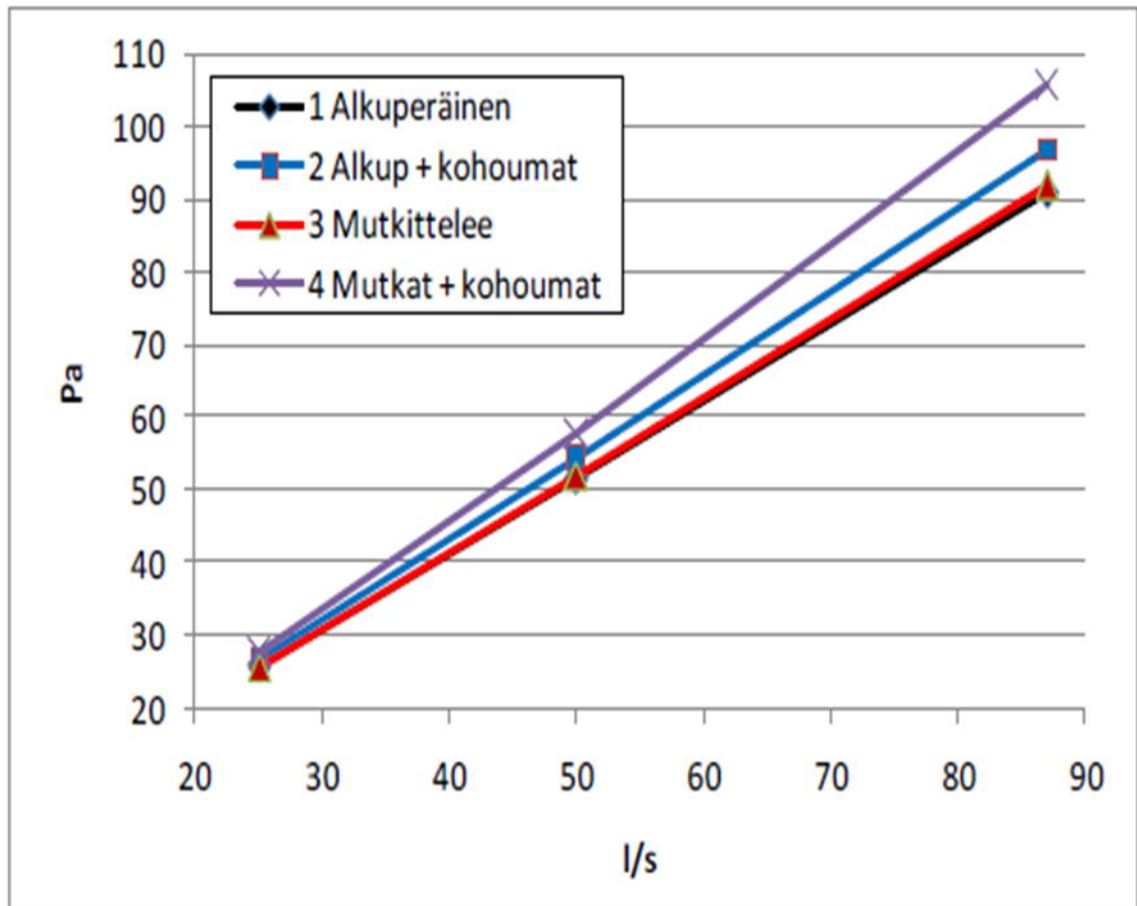


Kuva 3. Ensimmäisessä simuloitussa geometriassa sileään levyyn oli tehty golfpallomaisia kohoumia, joiden välien etäisyys yhdessä rivissä oli 25 mm [12, s. 2].

Simuloinnista saatujen tulosten perusteella ensimmäisessä simuloinnissa sileään pintaan tehdyt kohoumat tehostivat kanavan lämmönsiirtoa. Virtauksien ollessa vakiintuneita keskimääräiseksi lämmönsiirtokertoimeksi saatiin $64 \text{ W/m}^2\text{K}$ virtaaman ollessa 87 l/s, joka on noin 14 % parempi kuin sileälle pinnalle saatu keskimääräinen lämmönsiirtokerroin. Sen sijaan rypyttety kanavan mutkittelu ei tehostanut juurikaan lämmön-

siirtoa kanavassa. Kohoumien vaikutus lämmönsiirtoon oli suurempi kolmannessa, mutkittävän kanavan simuloinnissa. Tämä johtui siitä, että mutkittävassa kanavassa kohoumia oli 10–11 kappaletta, kun taas suorassa kanavassa vastaava luku oli 7 kappaletta, jossa oli pienin mahdollinen määrä kohoumia. Tarkasteltaessa tarkemmin lämmönsiirtoa metalliin havaitaan kohoumien lämmönsiirron rajoittuvan niiden välittömään läheisyyteen. Kohouman kuperalla puolella lämmönsiirto voimistuu merkittävästi tulopuolella mutta heikkenee luovutuspuolella. Koveralla puolella vuorostaan lämmönsiirto heikkenee virtauksen tulopuolella ja voimistuu jättöpuolella. Golfpallomaisten kohoumien nettovaikutusta on kuitenkin lämmönsiirtoa edistävä. [12, s. 17.]

Tutkittaessa muutoksien vaikutusta painehäviön nousuun kanavan yli havaittiin painehäviön kasvaneen lineaarisesti ilmamäärän lisääntyessä. Tämä osoittaa, että virtaus kaikissa tutkituissa tapauksissa oli laminaarista suurillakin ilmamäärillä. Tuloksien mukaan kanavan yli vaikuttava painehäviö kasvoi 4–8 % virtaamalla 87 l/s, kun levyyn lisättiin kohoumia. Sen sijaan rypytetyn kanavan mutkittelun vaikutus painehäviön nousuun oli merkityksetön. Simuloinnissa tehtyjen profiilimuutosten vaikutus painehäviöiden nousuun on esitetty kuvassa 4.



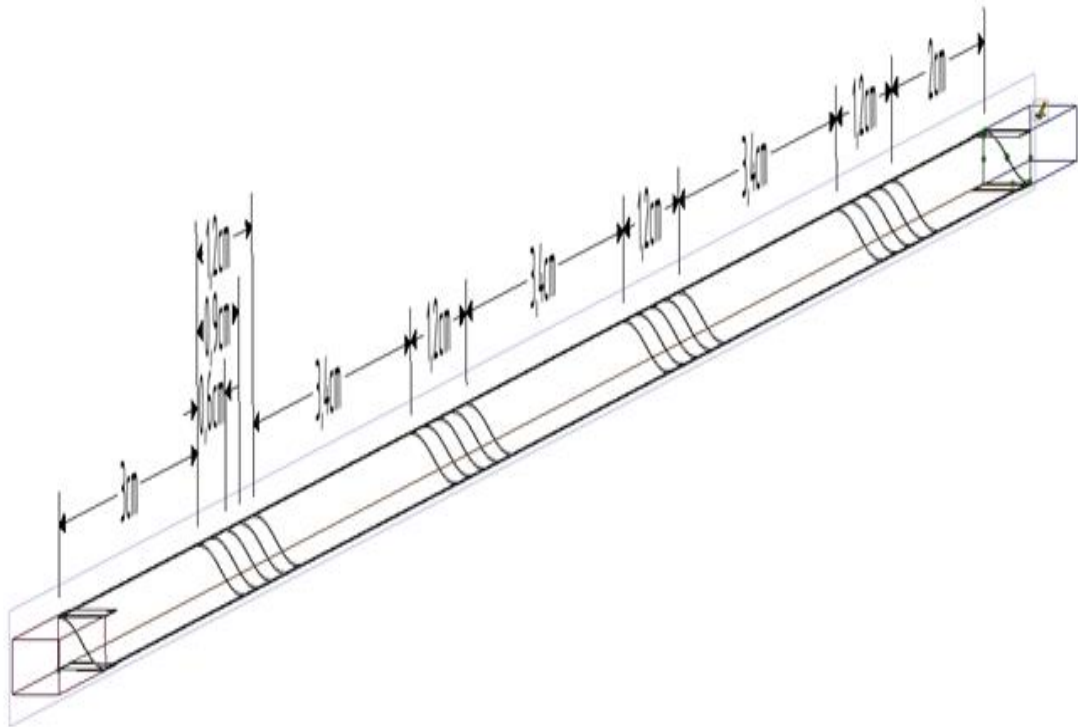
Kuva 4. Simuloinnissa tehtyjen profiilimuutosten vaikutus painehäviöön ilmamäärän funktiona [7, s. 4].

4.1.3 Rei'itetyn kanavan simulointi

Alkuvuodesta 2012 Enervent teetti aiempien simulointien kaltaisen CFD-laskennan, jossa tarkoituksena oli tarkastella rei'itetyn kanavan lämmönsiirto-ominaisuuksia. Tutkimuksissa käytetty geometria oli poikkiprofiililtaan ja pituudeltaan sama kuin aiemmissa mittauksissa.

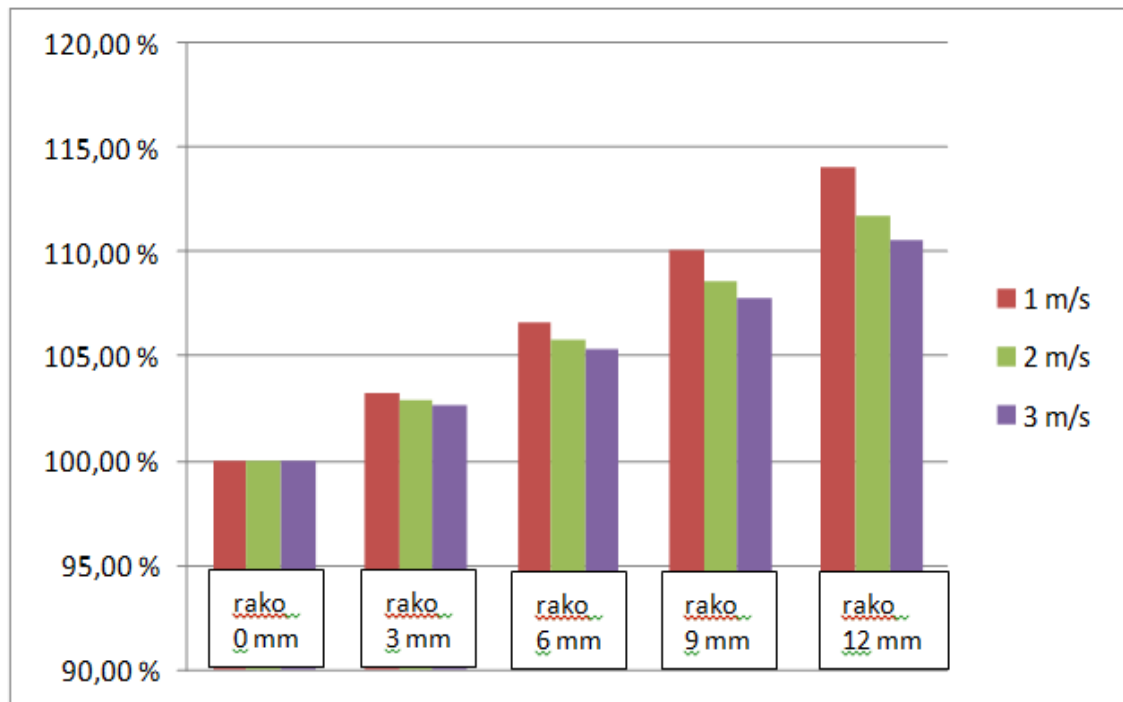
Testaukset toteutettiin 3 mm, 6 mm, 9 mm ja 12 mm korkeilla raoilla. Raot tehtiin rypyttettyyn alumiinilevyyn aallonpituuden puolikkaan pituudelta. Rakojen välinen etäisyys oli rakojen korkeudesta riippuen 43 mm–34 mm, ensimmäisen raon sijaitessa 20 mm:n etäisyydellä rypyttetyyn levyn alusta. Koska lämmönsiirto ilman ja levyn välillä perustuu lämpötilaeroon ja sen tasoittumiseen, laskennassa havaittavien vaikutusten korostamiseksi sisään tulevan ilman lämpötilaksi oli muutettu -20 °C levyn pintalämpötilan ollessa 25 °C. Näin kanavaan ajettava ilma saavuttaa myöhemmin korkeammassa lämpötilassa olevan

levyn lämpötilan ja eri tapauksien väliset erot lämmönsiirrossa ovat paremmin havaittavissa. Tehtyjen rakojen osuus tutkitun alueen pinta-alasta kasvoi lineaarisesti siten, että 3 mm korkeilla raoilla osuus oli 3,0 % ja 12 mm korkeilla 13,5 %. [13, s. 1–7.] Simuloidun kanavaprofiilin geometria on esitetty kuvassa 5.



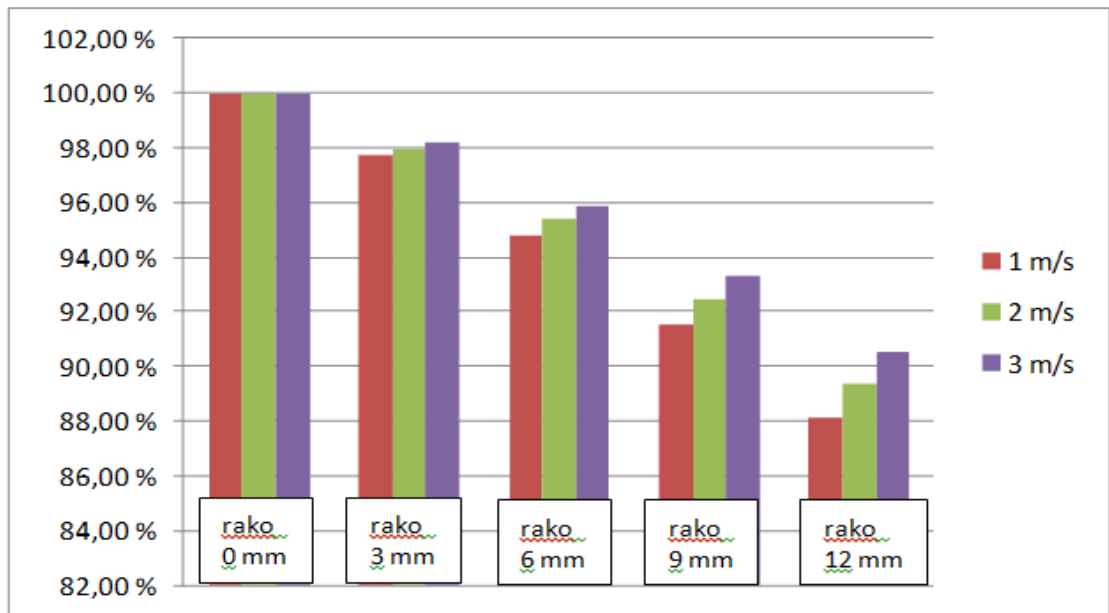
Kuva 5. Simuloinnissa tutkitun rei'itetyn kanavaprofiilin geometria.

Saatuja tuloksia analysoitaessa havaittiin keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen paranevan rei'itetyllä kanavalla. Raon edistävä vaikutus lämmönsiirtoon oli suurimmillaan pienellä ilman nopeudella ja korkeimmalla, 12 mm, rakokorkeudella. Rakojen vaikutus lämmönsiirtoon oli kaikissa mittaustapauksissa sitä parempi, mitä pienempi ilman liikenopeus oli sekä mitä korkeampaa rakoja levyssä käytettiin. Tätä havainnollistaa kuva 6, jossa on esitetty profiiliin tehtyjen rakojen ja ilman virtausnopeuden vaikutus kanavan lämmönsiirtokertoimeen. Rakojen edistävä vaikutus lämmönsiirtoon selittyy ilman virtaussuuntien muuttumisella sekä häiriintymisellä rakojen kohdalla, jolloin virtauskuvion laminaarisuutta saadaan muutettua ja lämmönsiirtoa tehostettua. Myös ilman rajakerroksen madaltuminen reikien kohdalla vaikuttavat myönteisesti lämmönjohtumiseen ilmasta. [13, s. 13.]



Kuva 6. Simuloinnissa tutkittujen rakojen ja ilman liikenopeuden prosentuaalinen vaikutus lämmönsiirtokertoimeen suhteessa perustilanteeseen [13, s. 9].

Tutkittaessa rakojen vaikutusta painehäviöön kanavan yli havaittiin painehäviöiden pienenevän sitä enemmän, mitä suurempaa rakoja käytettiin ja mitä pienempi kanavassa liikkuvan ilman nopeus oli. Kaikissa vertailutapauksissa rakojen vaikutus havaittiin olevan painehäviöitä pienentävä. Tätä asiaa havainnollistaa kuva 7, jossa on esitettyä rakojen ja ilman virtausnopeuksien prosentuaaliset vaikutukset kanavien painehäviöihin. Painehäviöiden pienentyminen selittyy ilman nopeuden hidastumisella aukkojen kohdassa sekä levy-pinta-alan pienentymisellä, jolloin osa levyn aiheuttamasta kitkapainehäviöstä jää pois. [13, s. 13.]



Kuva 7. Simuloinnissa tutkittujen rakojen ja ilman liikenopeuden vaikutus painehäviöön suhteessa perustapaukseen [13, s. 9].

4.1.4 Simulointien analysointi

Tuloksien valossa lämmönvaihtimen lämmönsiirtokerroin paranee, jos virtausta häiritään lähellä levyn pintaa ja virtauskuvioon saadaan aikaan pyörteitä, joissa lämmönsiirto on tehostunut. Virtauskuviota voitaisiin saada häirittyä esimerkiksi jakamalla lämmönvaihtimen peräkkäisiin elementteihin, joiden liitoskohtiin jätettäisiin pienet raot. Ilman virratessa elementistä toiseen ilmavirran laminaarista virtausta saataisi mahdollisesti häirittyä ja lämmönsiirtoa tehostettua. Myös osassa 4.1.3 kuvatun rei'itetyn kanavan avulla saatiin simuloinneissa ilmavirran laminaarista virtausta tehokkaasti häirittyä ja lämmönsiirtoa kanavassa tehostettua.

Ongelmaksi edellä mainituissa tapauksissa muodostuu kennon tiiveyden heikkeneminen ja ilmavirtojen sekoittuminen tulo- ja poistopuolen välillä. Ilmankäsittelylaitteiden suurin sallittu vuotoilmavirta tulo- ja poistopuolen välillä saa olla enintään 6 % ilmankäsittelykoneen nimellisilmavirrasta 300 Pa:n paineella. [14]

Ensiksi mainitussa elementtikennossa ilmavirrat pääsevät sekoittumaan tulo- ja poistopuolen välillä kennon liitoskohdissa olevista raoista. Jälkimmäisessä tapauksessa, jossa rypyttettyyn alumiiniin oli tehty reikiä, ilmavirrat pääsevät kulkemaan aukoista va-

paasti kennon sisällä olevista kanavista toiseen ja näin sekoittamaan ilmavirtoja. Tiiveyden saattaminen vaatimusten mukaisiksi edellä mainituissa tapauksissa vaatisi muutoksia ilmanvaihtokoneiden rakenteeseen sekä kennon tiivistämiseen. [15]

Tuloksien mukaan lämmönsiirtokerrointa voitaisiin parantaa lisäämällä kohoumien lukumäärää sileässä alumiinilevyssä, koska niiden myönteinen vaikutus lämmönsiirron kannalta havaittiin olevan hyvin paikallista. Kohoumien määrää voitaisiin lisätä sijoittamalla simuloinnin mukaisia kohoumia keskilinjasta sivulle, jolloin jokaiseen kanavaan saataisiin kaksinkertainen määrä kohoumia. Kohoumien optimaalinen hyödyntäminen vaatisi niiden sijoittamista siten, että aallonhuiput, joissa ilmanliike on hidasta ja lämmönsiirto heikkoa, jäisivät ilman kohoumia. Lisäksi kohoumien optimaalisen halkaisijan ja korkeuden löytäminen paine-erojen kasvamatta epäedullisen suureksi kennon yli, olisivat optimaalisen lämmönsiirtokertoimen ja siten myös hyötysuhteen maksimoinnin kannalta oleellisia tekijöitä.

4.2 Kohoumakenno

Lähtökohtana valmistetulle levyprofiilille toimi Process flow -simuloinnit, joista saatujen tuloksien ja johtopäätösten perusteella kennossa olevia lämmönsiirtokanavia alettiin muokata. Testattavaksi tapaukseksi valitsimme luvussa 4.1.2 kuvatun kanavasimuloinnin, jossa tarkasteltiin sileän levyn pinnassa olleiden kohoumien vaikutusta kanavan lämmönsiirtokertoimeen. Alumiinikennon kuvioinnin muokkaus toteutettiin projektia varten hankitulla mankelilla, jolla saatiin kuvioitua alumiinilevyn pintaa haluamallamme tavalla. Levyprofiilin muokkaus toteutettiin mankelilla kennonkoneessa sijaitsevan rypyttäjän sijaan, koska nykyistä kennonvalmistus tuotantoa ei haluttu pysäyttää testausprojektin ajaksi. Lisäksi nykyiseen kennokoneeseen rypytykuvioinnin tekevät telat oli hitsattu aisoistaan kiinni runkoon, jolloin niiden irrottaminen rungosta olisi ollut telojen ehjänä pysymisen kannalta varsin haastavaa.

Sileään levyyn tehdyt kohoumat toteutettiin kuulilla, jotka lyötiin kiinni metallitelaan porattuihin reikiin. Kohoumien syvyys telassa oli 0,25 mm ja kohoumien halkaisija 1,3 mm. Kohoumien väliseksi etäisyydeksi asetettiin sivuttaissuunnassa 5,0 mm ja korkeussuunnassa 2,0 mm. Kuularivien välinen etäisyys oli 10,0 mm. Mankelin toisen telan ympäri oli vedettynä kutistesukka, jonka tarkoituksena oli helpottaa vastakkaiseen telaan tehtyjen kohoumakuvioiden painautumista alumiinilevyyn. Tämän lisäksi poistimme mankelista

toisen telaa ohjaavan hammaspyörän, koska lisäämämme kutistesukka kasvatti kyseisen telan ympärysmittaa ja vaikeutti siten alumiinilevyn kelautumista mankelin läpi telojen pyörimisnopeuksien ollessa keskenään synkronoituja. Lisäksi poistimme mankelin mukana tulleen kolmannen telan keventääksemme mankeliä.

Kennon kelaamista varten rakensimme mankelille jalustan, jonka sijoitimme kennokoneen yhteyteen. Halutun kuvioinnin saattaminen alumiinikennoon toteutettiin ajamalla sileää levyä mankelin telojen välistä ennen kennon pyörittämistä rullalle. Kennon saattaminen riittävän kireäksi edellytti mankelin kammien sekä kennon pyörittämistä yhdenaikaisesti. Lisäksi alumiininauhan pitäminen kohtisuorassa teloihin nähden tasaisen kuvion aikaansaamiseksi oli varsin haasteellista. Kohoumakuvioinnin valmistus on esitetty kuvassa 8. Aikaansaadulle kohoumapintaiselle alumiinikennolle suoritimme lämpötilahyötysuhdemittauksen, jossa tarkasteltiin kennon lämmönsiirtokykyä verrattuna nykyisin käytössä olevaan alumiinikennoon. Suoritettuja mittauksia käsittelemme tarkemmin osassa 6.2.1.



Kuva 8. Kohoumien aikaansaamiseksi sileää alumiinilevyä ajettiin mankelin telojen lävitse ennen kennon rullaamista.

4.3 Suorakaidekenno

Optimaalisen virtauskuvion löytämiseksi projektissa päätettiin tutkia erilaisia kanavapoikkileikkauksia. Tarkastelun pohjana toimi osassa 4.1.2 kuvattu simulointi, jossa havaittiin ilmanvirtauksen olevan kennossa laminaarista kaikilla tarkastelluilla ilmamäärillä. Tarkastelu toteutettiin Nusseltin luvun avulla. Nusseltin luku kuvaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta lämmönsiirrossa. Nusseltin luku laminaarisessa virtauksessa voidaan laskea kaavalla 3 [16; 17, s. 274–275].

$$Nu = \frac{\alpha L}{k} \quad (3)$$

jossa Nu on Nusseltin luku

α on aineen lämmönsiirtokerroin [W/m^2K]











L on hydraulinen halkaisija [m] [$L = \frac{4A}{U}$]

k on virtaavan aineen lämmönjohtavuus [W/mK]

Pyrkiessämme tarkastelemaan kanavan lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavia tekijöitä, muokkasimme kaavan muotoon

$$\alpha = \frac{Nu * k}{L}$$

Kaavasta havaitaan, että kappaleen lämmönsiirtokerrointa voidaan pyrkiä parantamaan kasvattamalla konvektionaalisen lämmönsiirron osuutta prosessissa tai parantamalla aineen lämmönjohtavuutta. Kuvassa 9 on esitetty erilaisten leikkausprofiilileiden Nusseltin luku jatkuvassa aksiaalisuuntaisessa virtauksessa.

Cross Section	Constant Axial Wall Heat Flux
 Equilateral triangle	3.1
 Circle	4.364
 Square 1	3.6
 Rectangle 1 1.4	3.8
 Rectangle 1 2	4.1
 Rectangle 1 3	4.8
 Rectangle 1 4	5.3
 Rectangle 1 8	6.5
 Rectangle 1 ∞	8.235
 Heated 1 ∞ Insulated	5.385

Kuva 9. Nusseltin luku erilaisille leikkausprofiileille jatkuvassa aksiaalisuuntaisessa virtauksessa [17, s. 275]. Nykyinen kanavaprofiili on dimensioiltaan pitkälti kuvassa esitetyn tasasivuisen kolmion kaltainen.

Kertoimia tarkasteltaessa havaitaan nykyisen tasakylkistä kolmiota vastaavan leikkausprofiilin olevan lämmönsiirron kannalta ympyrää ja suorakaidetta heikompi kanavamuoto. Ympyrämuodon toteuttaminen kennorakenteessa koettiin hyvin haastavaksi, sillä muodon aikaansaaminen olisi vaatinut myös suoran levyn muotoilemista puoliympyräksi. Suoran levyn muotoilu olisi heikentänyt merkittävästi kennon rakenteen koossa pysyvyyttä. [15] Tämän seurauksena projektissa päätettiin keskittyä suoraidemuodon tarkasteluun.

Suorakaidemuodoista päätettiin toteuttaa profiili, jonka sivun pituus on nelinkertainen profiilin korkeuteen nähden. Tämän muodon Nusseltin luvuksi saadaan kuvan 10 mukaan 5,3. Leikkausprofiili toteutettiin painamalla kuviointia tutkimusta varten valmistetulla työkalulla rypytytyn rainan järjestyksessä joka kolmatta aallonhuippua. Tämän jälkeen raina käännettiin ympäri ja haluttu muoto viimeisteltiin painamalla työkalulla painettujen aallonhuippujen välistä suorakaidemuoto tasaiseksi. Valmistetun suorakaidekuvion korkeus oli 1,5 mm ja pituus 6 mm. Suorakaiderainaa painettiin 3 m:n matkalta, minkä jälkeen rainan muodon kestävyttä tarkasteltiin ajamalla rainaa kennomaiseen muotoon.

Syötettäessä rainaa pyörittävään kennorullaan, havaittiin suoran alumiinipellin kiristävän suorakaiderainaa siten, että muodon terävät kulmat pääsivät merkittävästi oikaistumaan.

Suorakaideprofiilin aikaansaamiseksi jouduimme vähentämään kennoon syötettävän suoran rainan kireyttä merkittävästi. Rainan hölläämisen seurauksena lämpöä siirtävän alumiinin massa kennossa väheni 1,7 kg verrattuna nykyisin käytössä olevaan, dimensioiltaan vastaavaan kokoiseen, kennoon. Tämä vastaa lähes kolmasosaa lämmönsiirtimen massasta. Tämän lisäksi valmistetun kennon ulkomuoto oli hieman soikea, joka aiheutui rainan epätasaisesta kireydestä kennon valmistusvaiheessa. Tätä ei kuitenkaan koettu tutkimuksessa ongelmalliseksi, sillä kennossa olevien tiivisteiden avulla siirrin saatiin muotoiltua riittävän tiiviiksi ja siten mittauksiin soveltuvaksi. Suorakaideprofiiliselle lämmönsiirtimelle suoritimme lämpötilahyötysuhdemittauksen, jota käsitellään tarkemmin osassa 6.2.2. Valmistettu suorakaidekenno on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Valmistettu suorakaideprofiilinen lämmönsiirrin.

5 Materiaalitarkastelu

5.1 Materiaalilta vaadittavat ominaisuudet

5.1.1 Paloturvallisuus

Suomen rakentamismääräyskokoelma E1 määrittää ilmanvaihtolaitteet rakennettavaksi siten, etteivät ne lisää palon tai savukaasujen leviämisvaaraa. Lisäksi rakentamismääräyskokoelma E7 määrittää ilmanvaihtolaitteiston suunniteltavan ja toteutettavan siten, että sen toiminta on varmistettu kaikissa ilmanvaihtokoneen käyttöolosuhteissa. Ilmanvaihtolaitteissa ja sen varusteissa voidaan asetuksen mukaan käyttää vähäisessä määrin myös muita kuin A2-s1, d0-luokan tarvikkeita, jollei niistä aiheudu vaaraa mahdollisessa palotilanteessa. [18]

5.1.2 Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti

Lämmönsiirtymisen edellytyksenä on aina lämpötilaero, sillä lämpöenergiaa pääsee siirtymään vain korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. LTO-laitteissa lämpö siirtyy pääasiassa konvektiolla ja johtumalla, näistä ensin mainitun ollessa määrävä. Pyörivässä regeneraattorissa lämmönsiirto tapahtuu kahdessa vaiheessa siten, että ensimmäisessä vaiheessa lämpöenergia siirtyy ilmasta kiinteään aineeseen ja toisessa vaiheessa kiinteästä aineesta ilmaan. Ilman ja kiinteän aineen välillä lämmönsiirto tapahtuu puhaltimien aikaansaaman pakotetun konvektion vaikutuksesta ja kiinteässä aineessa konduktiolla eli johtumalla. Tärkeimmät lämmönsiirrinmateriaalilta vaadittavat yksittäiset ominaisuudet ovat hyvä lämmönjohtokyky sekä lämpöenergian varastointikyky. [7] Näitä ominaisuuksia kuvataan termeillä lämmönjohtavuus sekä ominaislämpökapasiteetti. Lämmönjohtavuus ilmoittaa, kuinka suuri lämpöteho saadaan aineella siirretyksi poikkipinta-alaa ja materiaalissa vallitsevaa lämpötilagradienttia kohti. Lämmönjohtavuuden yksikkö on SI-järjestelmän mukaisesti $W/K\ m$. Ominaislämpökapasiteetti vastaavasti kuvaa, kuinka paljon lämpöenergiaa materiaaliin sitoutuu tiettyä lämpötilaeroa ja massaa kohti. Ominaislämpökapasiteetin yksikkö on SI-järjestelmän mukaisesti $J/K * kg$. [19, s. 112–115.]

5.1.3 Lujuusominaisuudet

Pyörivän regeneraattorin lämmönsiirrinmateriaalin tulee olla lujuusominaisuuksiltaan sellainen, että se kestää kennomaiseen muotoon kelaamisen repeämättä tai katkeamatta. Tämä edellyttää materiaalilta riittävää vetolujuutta, sillä maksimaalisen lämmönsiirtomassan aikaansaamiseksi kennokoneeseen syötettävä materiaalinauha saatetaan erittäin kireäksi ennen kennoksi kelaamista. Mikäli kelattavan materiaalin vetolujuus ei ole riittävä, syötettävä nauha repeää reunakohdasta ja lopulta katkeaa. [15]

5.1.4 Kosteudensietokyky

Käytettävän lämmönsiirrinmateriaalin tulee olla kosteudenkestävää, sillä otettaessa poistoilmasta lämpöä talteen tehokkaan lämmönsiirtimen seurauksena jäteilman lämpötila alittaa poistoilman kastepistelämpötilan, jolloin kosteutta pääsee tiivistymään lämmönsiirtimen lamellien pinnalle. Tämän lisäksi etenkin talvisin, jolloin ulkoilman lämpötila on alhainen, lämmönsiirtimen lamellien pinnalle pääsee muodostumaan huurretta, joka sulaessaan kastelee lämmönsiirtimen pintaa merkittävästi ja siten altistaa materiaalia korroosiolle. Metallien korroosionkestoa pyritään usein parantamaan materiaalin pintakäsittelyllä ja pinnoituksella.

5.2 Potentiaalisten materiaalien kartoitus

Kennon lämmönsiirtokyvyn parantamiseksi projektissa päätettiin tarkastella erilaisia materiaalivaihtoehtoja regeneratiiviseksi lämmönsiirtimeksi. Tutkimus keskittyi materiaaleihin, joiden fysikaaliset lämmönsiirto-ominaisuudet ovat alumiinia paremmat. Tutkimusprosessin lähtökohtana oli, että kennon lämpötilahyötysuhteen parantaminen nykyisestä edellyttää lämmönsiirrinmateriaalilta alumiinia parempia lämmönsiirto- sekä lämpöenergian varastointiominaisuuksia. Tutkimuksissa keskityttiin tarkastelemaan materiaalilta vaadittavia ominaisuuksia osassa 5.1.2 kuvatun lämmönsiirtoprosessin perusteella.

Kiinteiden aineiden lämmönjohtavuuskertoimia vertailtaessa, potentiaalliksi lämmönsiirrinvaihtoehtoiksi muodostuivat timantti, hopea, kupari sekä kulta. Lämmönjohtavuuskertoimien perusteella parhaat edellytykset pyöriväksi lämmönsiirtimeksi olivat timantilla,

jonka kyky johtaa lämpöä on muita aineita huomattavasti parempi. Timantin jälkeen parhaat lämmönjohtavuusominaisuudet olivat järjestyksessä hopealla, kuparilla ja kullalla. [20, s. 72–75.] Taulukossa 1 on esitetty tutkittujen alkuaineiden lämmönjohtavuusarvot.

Taulukko 1. Kiinteiden alkuaineiden lämmönjohtavuuksia [20, s. 72–75.]

Alkuaine	Lämmönjohtavuus $\frac{W}{m \cdot K}$
Timantti	1000–2600
Hopea	429
Kupari	400
Kulta	318
Alumiini	237

Kun tarkastelussa otettiin huomioon analysoitujen materiaalin markkinahinnat, havaittiin timantin, hopean ja kullan olevan tässä suhteessa lämmönsiirtimiksi sopimattomia. Esimerkiksi timantin ja kullan kilohinnat olivat yli 1000-kertaisia ja hopeankin yli 100-kertaisia alumiiniin nähden materiaalien tutkimuspäivänä. Markkinahinnan sopimattomuuden vuoksi edellä mainitut materiaalit jätettiin projektissa testaamatta. [21]

Kuparin markkinahintaa tutkittaessa havaittiin sen olevan varsin vertailukelpoinen alumiiniin nähden. Kuparintoimittajalta suoritettun hintatiedustelun perusteella alumiinin nykyisellä ostovolyymilla kuparin hinta oli noin 62 % kalliimpi kuin nykyisen alumiinin ostohinta. Vertailtaessa materiaalien kykyä varastoida lämpöä on vertailu edullista suorittaa lämpökapasiteetin avulla. Lämpökapasiteetti kuvaa, kuinka paljon kappaleeseen sitoutuu lämpöenergiaa lämpötilaeroa kohti [19, s. 115]. Lämpökapasiteetti voidaan laskea kaavalla 4, kun tunnetaan kappaleen massa sekä ominaislämpökapasiteetti.

$$C_l = cm \tag{4}$$

jossa C_l on lämpökapasiteetti [J/K]
 c on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
 m on kappaleen massa [kg]

Massa saadaan ratkaistua aineen tiheyden avulla, kun vertailtavien materiaalien tilavuudet ovat yhtä suuret.

$$m = \rho V \tag{5}$$

jossa m on kappaleen massa [kg]
 ρ on materiaalin tiheys [kg/m^3]
 V on materiaalin tilavuus [m^3]

5.3 Alumiini-kupari-lämmönsiirrin

Osassa 5.2 suoritetun materiaalikartoituksen perusteella kupari koettiin varteenotettavaksi vaihtoehtoehdoksi regeneratiiviseksi lämmönsiirtimeksi ja materiaalin ominaisuuksia haluttiin tarkastella lähemmin lämpötilahyötysuhdetesteissä. Laboratoriotestien mahdollistamiseksi markkinoilta tuli löytää ohutta kuparinauhaa, jonka lujuusominaisuudet vastaisivat mahdollisimman hyvin nykyisen alumiinin lujuusominaisuuksia. Selvitystyön tuloksena päädyttiin testeissä käyttämään R220-kuparia, jonka kovuusominaisuudet koettiin parhaiten vastaavan nykyisen alumiinin ominaisuuksia ja siten olevan toteuttamiskelpoinen lämmönsiirtimeksi materiaalin rikkoutumatta kennon valmistusvaiheessa.

Testien suorittamista varten ongelmaksi muodostui riittävän ohuen kuparinauhan löytäminen, sillä haluttua 0,06 mm paksua kuparirainaa olisi ollut saatavilla vain erikseen tilattaessa, jolloin toimitusaika olisi ylittänyt projektille varatun aikataulun. Tämän seurauksena testeissä päädyttiin käyttämään toimittajan tuotevalikoimasta löytynyttä 0,13 mm paksua kuparinauhaa. Siirtimen valmistamiseksi tarvittava materiaalmäärä saatiin selvitettyä nykyisen alumiinikennon lämmönsiirtopinta-alan avulla kaavalla 6 [5, s. 22].

$$A_{LS} = \frac{2m}{\rho_{ma} * \varphi_{ma}} \quad (6)$$

jossa A_{LS} on lämmönsiirtopinta-ala [m^2]
 m on lämpöä siirtävän materiaalin massa [kg]
 ρ_{ma} on materiaalin tiheys [kg/m^3]
 φ_{ma} on materiaalin paksuus [m]

Kun tunnetaan alumiinin tiheys, paksuus sekä massa kennossa, saadaan lämmönsiirtimen lämmönsiirtopinta-alaksi

$$A_{LS} = \frac{2 * 5,1kg}{2700 \frac{kg}{m^3} * 0,00006m} = 62,96 m^2$$

Tutkimukseen tarvittavan kuparin määrä saatiin selvitettyä vaadittavan lämmönsiirtopinta-alan sekä materiaalin tiheyden ja paksuuden avulla.

$$m_{kup.} = \frac{62,96m^2 * 8760 \frac{kg}{m^3} * 0,00013m}{2} = 35,85 kg$$

Laskujen tuloksista havaitaan, että kennon valmistamiseen olisi vaadittu yli 35 kg kuparia. Kun otetaan huomioon vielä kennokotelon sekä akselin massa, testattavan kuparikkennon yhteismassaksi olisi muodostunut yli 41 kg. Kennon käsiteltävyyden ja rakenteen kestävyuden varmistamiseksi tutkimukset päätettiin suorittaa kupari- ja alumiinikkennon yhdistelmällä, jossa lämmönsiirtimen rypytetty kerros oli valmistettu kuparista ja sileä kerros alumiinista. Jako rypytettävän ja sileän materiaalin välillä tehtiin osassa 4.1.1 kuvatus simuloinnin perusteella. Simuloinneissa havaittiin suurimman osan sileän levyn pinnasta jäävän lämmönsiirron kannalta hyödyntämättä. Taulukossa 2 on esitettyä projektia varten tilatun R220-kuparin aineominaisuudet. [22]

Taulukko 2. Testaukseen tilatun H040/R220-kuparin aineominaisuudet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Ominaislämpökapasiteetti [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]	Veto- murto- lujuus [$\frac{N}{mm^2}$]	Myötö- raja [$\frac{N}{mm^2}$]	Pak- suus [mm]	Tiheys (20°C) [$\frac{kg}{m^3}$]	Lämpö- kapasi- teetti [$\frac{kJ}{K}$]
R220-kupari	Min 339	0,387	220-260	Max 140	0,13	8960	3467

Yhdistelmäkkennon aikaansaamiseksi rypytettävän rainan syöttökiekkoa jouduttiin hieinan muokkaamaan, sillä tutkimukseen tilatun kuparirullan halkaisija oli 25 cm suurempi kuin kennokoneessa olevan puolan halkaisija. Rainaa syöttävän kiekon halkaisijaa saatiin kasvatettua asettamalla rypytettävä kupariraina kiekon kokoa kasvattavan alumiinirainan päälle. Rypytettävän kuparinauhan muotti kiinnitettiin ruuveilla alumiiniin, jotta materiaalikiekot saatiin pyörimään kiekossa yhdenaikaisesti. Muokkaukset on esitetty kuvassa 11.



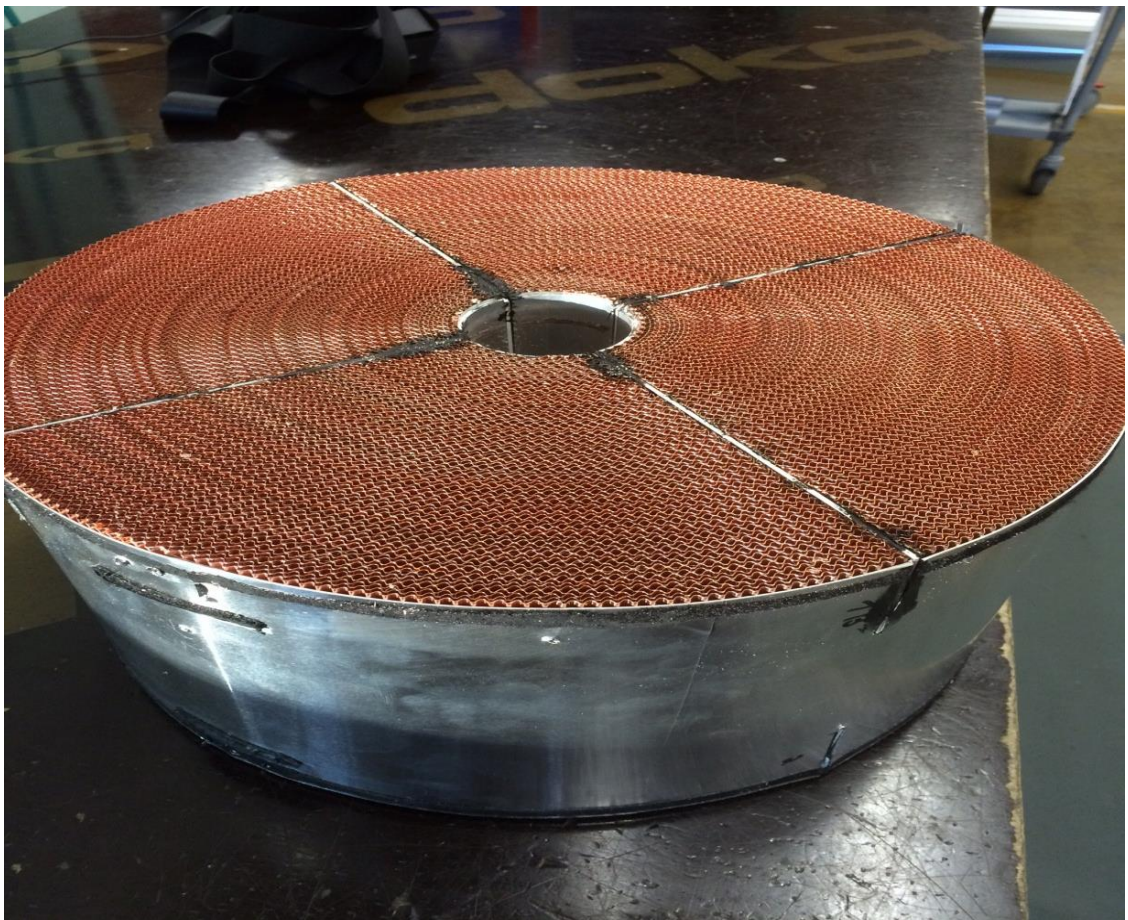
Kuva 11. Rypytettävä kupariraina kiinnitettiin ruuveilla alumiinirullan päälle kuparikennon valmistamiseksi.

Valmistetussa kennossa sileä kerros oli tehty 0,06 mm paksusta alumiinista ja rypytetty 0,13 mm paksusta kuparista. Valmistetussa lämmönsiirtimessä kuparin osuus oli noin 18,5 kg ja alumiinin noin 2,5 kg. Tutkittavan kennon kokonaismassa kennokotelon ja akselin kanssa oli 26,1 kg. Lämmönsiirtimen valmistaminen osaksi alumiinista pienensi siirtimen massaa yli 36 % verrattuna tilanteeseen, jossa kenno olisi valmistettu kokonaan kuparista. Tuloksien kannalta siirtimen valmistamista osaksi alumiinista ei koettu ongelmalliseksi, sillä tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella kuparin vaikutusta kennon lämpötilahyötysuhteeseen. Kuparin vaikutukset lämmönsiirtymiseen odotettiin tulevan riittävässä määrin esille valmistetussa yhdistelmäkennoissa. Lämmönsiirtimelle suoritettiin lämpötilahyötysuhdemittaukset, joita on käsitelty tarkemmin osassa 6.2.3. Yhdistelmäkenno on esitettyä liitteessä 2.

5.4 Sektorikunno

Yhdistelmäkuennon mittaustuloksien perusteella lämmönsiirrin muokattiin sektorikunnoksi, jossa kuennon lämpöä siirtävä pinta-ala jaettiin neljään osaan. Lohkotuksen tarkoituksena oli estää lämmönjohtuminen siirtimessä puolelta toiselle ja siten parantaa kuennon lämmönsiirtoa.

Lohkotus toteutettiin sirkkelillä, jolla leikattiin 55 mm syviä railoja molemmille puolille kuenna. Rakojen seurauksena railojen väliin jäi 90 mm ehyttä pintaa, jonka ansiosta kuennon rakenne saatiin pidettyä ehjänä. Tämän jälkeen railoihin asetettiin 3 mm paksut alumiinikaistat, jotka kiitettiin kiinni lämmönsiirtimeen. Tehtyjen toimenpiteiden seurauksena lämmönjohtuminen kuennossa puolelta toiselle saatiin estetyksi ja kuennon lämpöä vaava massa saatiin lohkotuksi alkuperäiseen nähden pienempiin osiin. Sektorikuennon lämpötilahyötysuhdetestin tuloksia käsittelen lähemmin osassa 6.2.4. Valmistettu sektorikunno on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Valmistettu sektorikunno.

5.5 Pinnoitettu lämmönsiirrin

Lämpösäteilyn osuuden selvittämiseksi projektissa päätettiin tarkastella materiaalin pinnan värin vaikutusta lämmönsiirtoon. Materiaalin lämpösäteily on riippuvainen pinnan emissiivisyydestä sekä ympäristön lämpötilasta. [23] Materiaalin emittoima säteilyteho saadaan laskettua kaavalla 7.

$$\Phi = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \quad (7)$$

jossa Φ on pinnan emittoima säteilyteho [W/m^2]

ε on emissiivisyys-kerroin

σ on Stefan-Bolzmännin vakio, [$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$]

A on kappaleen pinta-ala [m^2]

T on pinnan lämpötila [$^{\circ}C$]

Kirchhoffin lain mukaisesti kappaleen ympäristöönsä emittoima säteilyteho on samansuuruinen kuin kappaleen ympäristöstä absorboima säteilyteho. Kaavasta on syytä huomata, että pinnan emissiivisyys on merkittävästi riippuvainen pinnan lämpötilasta. Taulukossa 3 on esitettyä erilaisten alumiini- ja kuparipintojen keskimääräisiä emissiivisyys-kertoimia. Taulukossa on alimpana vertailun helpottamiseksi mustan spraymaalin emissiivisyys-kerroin. Taulukon arvoista havaitsemme, että pinnan tummetessa materiaalin emissiivisyys-kerroin kasvaa. Nykyisin lämmönsiirrinmateriaalina käytettävä alumiini on metalliseos, jonka emissiivisyys-kerroin on luokkaa 0,09.

Taulukko 3. Pintojen keskimääräisiä emissiivisyyskertoimia. [24]

Aine	Emissiivisyyskerroin
Kiillotettu kupari	0,018
Kiillotettu alumiini	0,039–0,057
Hapettunut alumiini	0,2–0,31
Hapettunut kupari, musta	0,65–0,79
Spraymaali, musta	0,83

Havaintojen perusteella päätimme pinnoittaa sekä kuparia sisältävän sektorikennon että tuotannon alumiinikennon mattamustalla RAL 9005 -spraymaalilla. Pinnoitteen vaikutus

lämmönsiirrinmateriaalin lämmönjohtavuuteen on käytännössä merkityksetön, sillä pinnoiteaineen osuus koko kennon varaavasta massasta on minimaalinen. [23] Pinnoittaminen toteutettiin ruiskuttamalla spraymaalia kelattujen kennojen lamellien sisään siirtimien molemmilta puolilta. Spraymaalin kulkeutuminen kennon kanaviin varmistettiin koekappaleella, jossa kennoksi kelatun lämmönsiirtimen kanaviin ruiskutettiin maalia. Tämän jälkeen koekappale kelattiin auki ja todettiin pinnoiteaineen päällystäneen lämmönsiirripinnan kauttaaltaan. Valmistetuille spraypinnoitteisille lämmönsiirtimille suoritettiin lämpötilahyötysuhdemittaukset, joita käsitellään tarkemmin osassa 6.2.5.

6 Mittaukset

6.1 Mittausjärjestelyt

Kennoille tehdyt mittaukset suoritettiin Ensto Enerventin laboratoriotiloissa Porvoossa. Tutkimukset toteutettiin syksyn 2015 aikana. Referenssikoneena käytettiin Enervent Pingvin -ilmanvaihtolaitetta, jolle halutut mittaukset suoritettiin. Enervent Pingvin on seinään tai kattoon asennettava pientaloihin tarkoitettu lämmön talteenottolaite, jonka maksimi-ilmavirta tuloilmapuolella on 87 l/s. Referenssikoneena käytetyssä IV-koneessa kanavalähdöt olivat koneen katolla siten, että tulo- ja poistoilmakanavat sijaitsivat huolto- luukusta katsottuna oikealla puolella. Raitis- ja jäteilmakanavat sijaitsivat koneessa pysytysuoraan asennetun regeneraattorin vastakkaisella puolella. Käytetyn ilmanvaihtolaitteen rungon korkeus oli 537 mm, leveys 580 mm, syvyys 500 mm ja laitteen kanavalähtöjen halkaisija 160 mm. Testeissä käytettyjen alumiinikennojen syvyys oli 200 mm.

Lämpötilahyötysuhdemittaukset suoritettiin SFS-EN 308 -standardin mukaisesti ilmanvaihtolaitteen toiminta-alueella tulo- ja poistoilman massavirtojen ollessa yhtä suuret. Standardi määrittää ilmanvaihtolaitteeseen virtaavan raitisilman lämpötilaksi 5 °C ja poistoilman lämpötilaksi 25 °C. Ilmankäsittelykoneiden tyyppihyväksyntäohjeiden mukaisesti standardissa esitetyistä lämpötiloista voidaan poiketa, mikäli se koetaan testauksen toteuttamisen kannalta tarkoituksenmukaiseksi. Lämmöntalteenottolaitteeseen virtaavan ulko- ja poistoilman välisen lämpötilaeron on oltava kuitenkin vähintään 18 °C ja lämmönsiirto tulee toteutua kuivana lämmönsiirtona, jossa poistoilmapuolelle ei pääse tiivistymään kosteutta. [14; 25.] Tämä edellytti poistoilman kosteuden sekä tulo- ja poistoilman lämpötilojen asettamista sellaisiksi, ettei prosessin aikana saavutettu poistoilman kastepistettä.

Asetuksen edellyttämät mittausolosuhteet saatiin luotua järjestelyllä, jossa tutkittava ilmanvaihtolaite oli kytkettynä raitis-ilmakanavastaan kylmäkoneeseen sekä poistoilmakanavastaan kaksi lämmönsiirintä sisältävään Pegasos Twin Tropic -ilmanvaihtolaitteeseen. Kylmäkoneen avulla ilmanvaihtolaitteeseen virtaavan ulkoilman lämpötila saatiin luotua riittävän alhaiseksi, jotta asetuksen mukainen 18 °C:n lämpötilaero ulko- ja poistoilman välillä saatiin aikaiseksi. Koneeseen virtaavan ilman lämpötilan säätö ja ohjaus toteutettiin Schneider Electric TAC Xenta OP -säätimen avulla. Laitteiden ohjaukseen käytetyt säätimet on esitettyinä liitteessä 3.

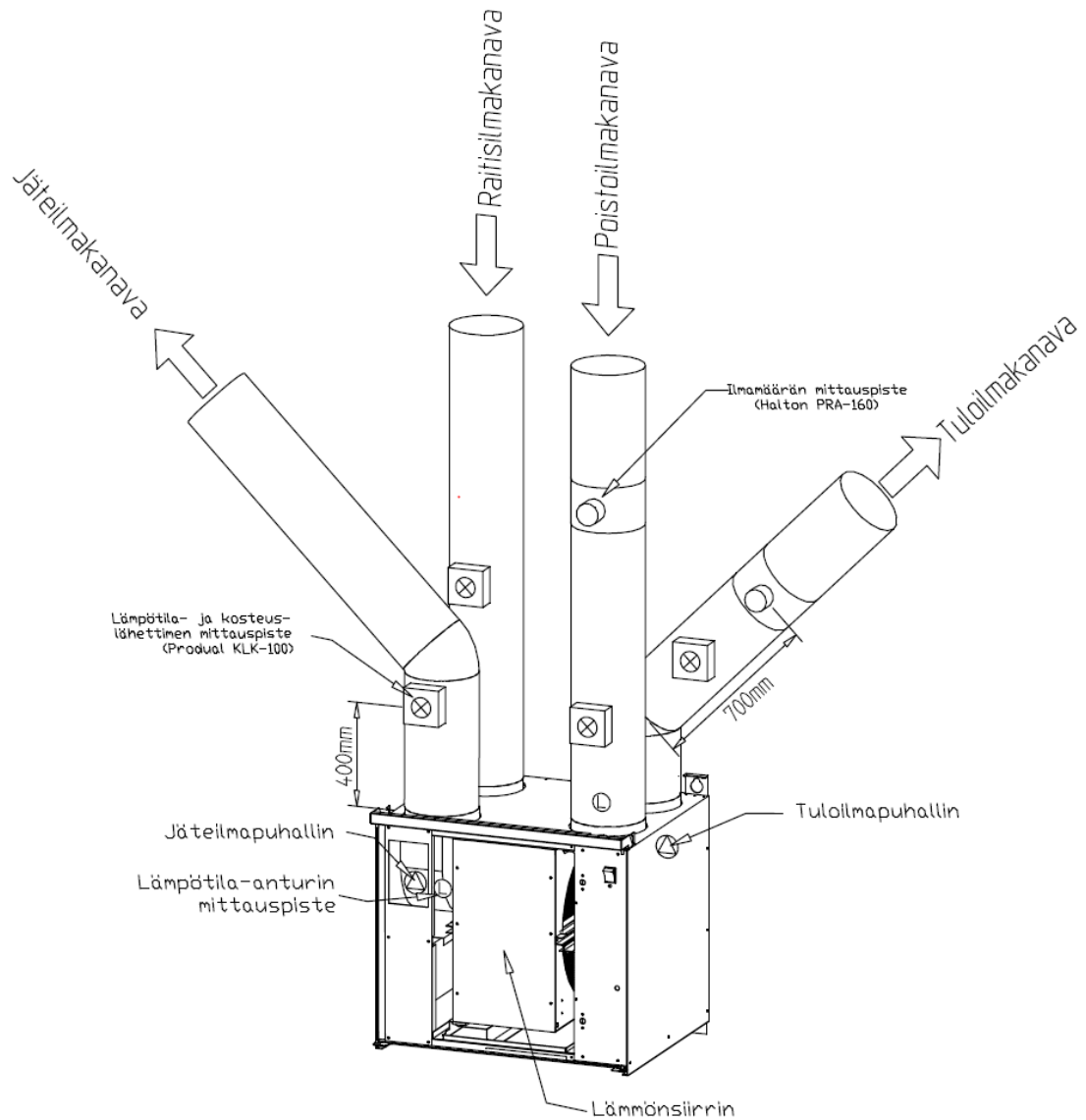
Poistoilman olosuhteet toteutettiin Pegasos Twin Tropic -mallisella ilmanvaihtolaitteella, jonka tuloilmakanavaan testattavan ilmanvaihtolaitteen poistoilmakanava kytkettiin. Kaksi lämmönsiirintä sisältävää Pegasos Twin Tropic -ilmanvaihtokonetta ohjattiin Enervent MD-ohjauspaneelilla, jolla asetettiin tutkittavalle IV-koneelle haluttu poistoilman lämpötila sekä kosteuspitoisuus. Pegasos Twin Tropic -ilmanvaihtolaitteen tehokkaasti kosteutta siirtävän sorptioroottorin ansiosta mittauksissa käytettävän IV-koneen poistoilman absoluuttinen kosteus saatiin pysymään alhaisena ja tutkimukset kyettiin siltä osin suorittamaan edellä kuvatun standardin mukaisesti.

Ilmamäärien mittaus toteutettiin Halton PRA-160- säädettävillä mittaus- ja säätömoduuleilla, jonka molemmilla puolilla olevat mittayhteet olivat kiinnitettynä Produal-paine-erolähtetimeen. Ilmamäärämittaukset suoritettiin ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmakanavista. Ilmanvaihtokoneen kanavisto oli rakennettu siten, että mittaus- ja säätömoduulivalmistajan määräämät suojaetäisyydet laitteen molemmilla puolilla täytyivät. [26, s. 9–12.]

Kanavissa vallitsevien lämpötilojen ja absoluuttisen kosteuden mittaaminen toteutettiin Produal KLK-100- kosteuslähettimien avulla. Produal- kosteus- ja lämpötilalähtetimelle annetaan mittaustarkkuudeksi absoluuttiselle kosteudelle +/- 2 % (0–90 % RH) ja lämpötilalle +/- 0,5 °C (25 °C). [27] Kosteus- ja lämpötilalähtettimien mittatarkkuuden perusteella lämpötilahyötysuhteiden mittatarkkuudeksi saadaan ulko- ja poistoilman 18 °C lämpötilaerolla +/- 11 %. Mittausepä-tarkkuuksien ollessa edellä kuvattujen kaltainen, luotettavien tuloksien aikaansaaminen käytössä olevalla laitteistolle koettiin haastavaksi.

Paine-ero- sekä kosteuslähettimien saamat mittaustulokset ohjattiin kaapeleilla CEM20 DataTakeriin, josta haluttu data siirrettiin tietokoneelle DeLogger5-ohjelmaan. Näiden li-

säksi tulostenkeruuohjelmaan syötettiin myös ilmanvaihtokoneen sisällä olevien lämpötila-antureiden mittaamat lämpötilatiedot. Laitteessa olevat lämpötila-anturit olivat sijoitettuna ilmanvaihtolaitteen tulo- ja jäteilmapuhaltimien imu puolille. Näiden anturien tarkoituksena oli mitata ilman todellinen lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen, sillä kanavissa sijaitsevat lämpötila-anturit eivät ota huomioon puhaltimien aikaansaamaa ilman lämpenemistä. Havainnekuva mittausjärjestelyistä on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Havainnekuva tutkimuksen mittausjärjestelystä.

Mittauksista saadut tulokset luettiin tietokoneelta DeLogger5-ohjelmasta, jonka asetuksia muokkaamalla saatiin halutut mittauksien tiedot näkyviin niin graafisena kuin numeraalisena esityksenä. Ohjelmaan oli syötettävissä kaikkiaan 12 eri mittauksien tietoa, joita kyettiin

seuraamaan tutkimuksessa reaaliajassa. Antureiden saamat mittaustulokset olivat yksilöityinä ohjelmaan mitattavaa suuretta kuvaavalla termillä. Kutakin lämpötilahyötysuhdetta kohti ohjelmaan oli syötetty perusteet hyötysuhteen muodostumisesta kaavojen 1 ja 2 avulla. Taulukossa 4 on esitetty tutkimuksissa käytettyjen suureiden lyhenteet sekä selitykset.

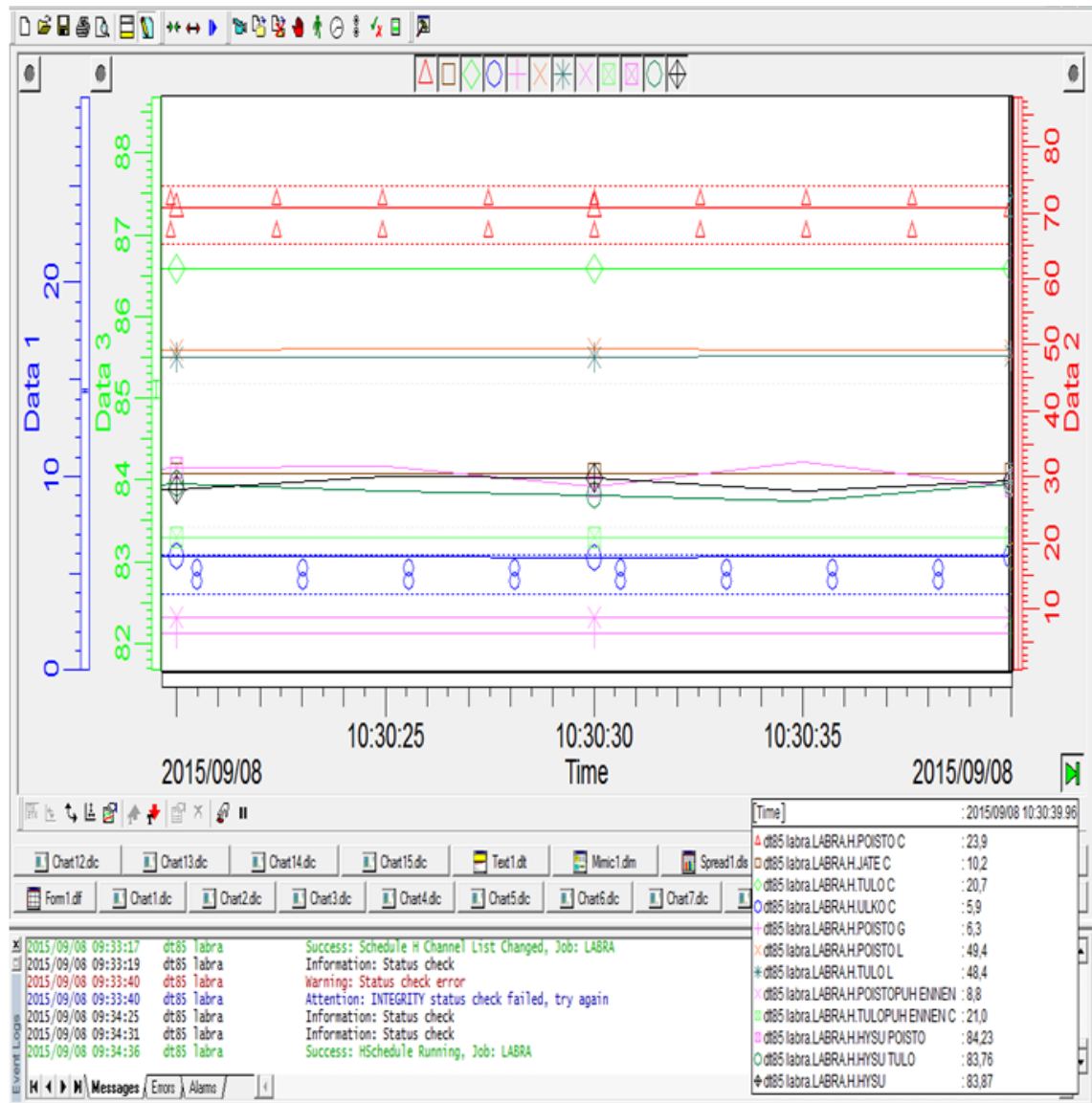
Taulukko 4. Taulukossa kuvattuna DeLogger5-ohjelmassa käytetyt lyhenteet ja lyhenteiden selitykset.

Lyhenne	Selite ja yksikkö
LABRA.H.POISTO C	Poistoilman lämpötila (°C)
LABRA.H.JÄTE C	Jäteilman lämpötila (°C)
LABRA.H.TULO C	Tuloilman lämpötila (°C)
LABRA.H.ULKO C	Ulkoilman lämpötila (°C)
LABRA.H.POISTO G	Poistoilman absoluuttinen kosteus (g/kg)
LABRA.H.POISTO L	Poistoilmavirta (l/s)
LABRA.H.TULO L	Tuloilmavirta (l/s)
LABRA.H.POISTO PUH ENNEN	Jäteilman lämpötila ennen jäteilmapuhallinta (°C)
LABRA.H.TULOPUH ENNEN C	Tuloilman lämpötila ennen tuloilmapuhallinta (°C)
LABRA.H.HYSU POISTO	Poistoilman lämpötilahyötysuhde (%)
LABRA.H.HYSU TULO	Tuloilman lämpötilahyötysuhde (%)
LABRA.H.HYSU	Tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteiden keskiarvo (%)

6.2 Mitatut konstruktiot

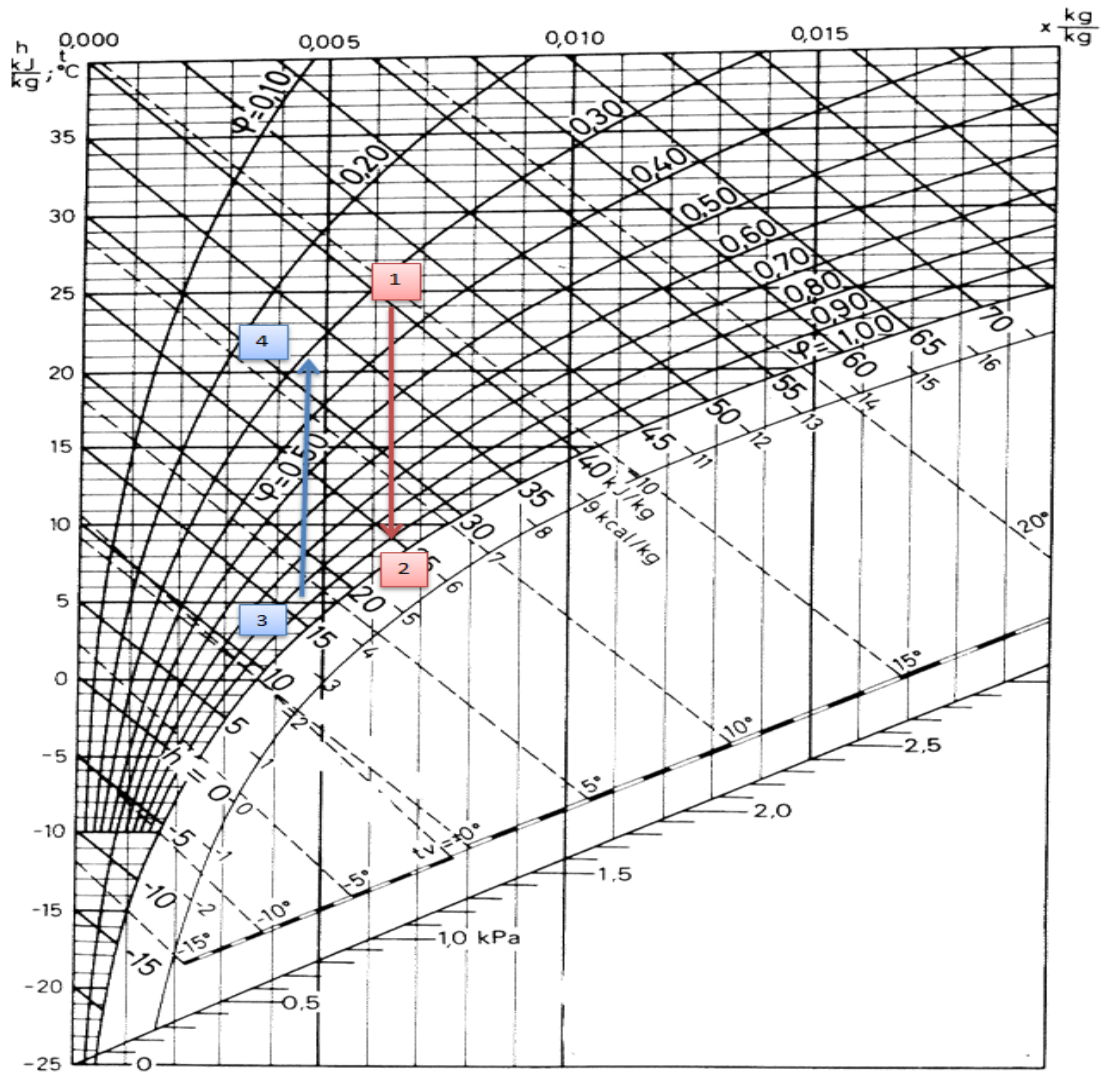
6.2.1 Kohoumakennon lämpötilahyötysuhdemittaus

Osassa 4.2 kuvatulle kohoumapintaiselle alumiinikennolle suoritettiin lämpötilahyötysuhdemittaus, jossa tarkasteltiin golfpallomaisen pintarakenteen vaikutusta kennon lämmönsiirtoon. Mittauksessa vertailtiin kohoumapintaisen kennon sekä tavallisen sileäpintaisen kennon lämpötilahyötysuhteita samoissa mittausolosuhteissa. Tutkimuksen mitausjärjestelyt on esitetty osassa 6.1. Tutkimuksesta saadut tulokset on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Kohoumakennon lämpötilahyötysuhdetestin tulokset.

Tuloksista havaitsemme, että ajanhetkellä t, mitattu tuloilmavirta oli 48,4 l/s ja poistoilmavirta 49,4 l/s. Ilmanvaihtokoneeseen ajatun ulkoilman lämpötila oli 5,9 °C ja poistoilman 23,9 °C. Ilmanvaihtokoneesta lähtevän tuloilman lämpötilaksi ennen tuloilmapuhallinta mitattiin 21,0 °C ja jäteilman lämpötilaksi ennen jäteilmapuhallinta 8,8 °C. Poistoilman absoluuttiseksi kosteudeksi mitattiin 6,3 g/kg. Tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi prosessissa saatiin 83,76 % ja poistoilman hyötysuhteeksi 84,23. Kuvassa 15 on esitetty lämmönsiirtymisprosessi Mollier-diagrammissa.



Kuva 15. Kohoumakennon lämmönsiirtoprosessi esitettyä Mollier-diagrammissa. Kuvassa punaisella on esitettyä poistoilman tilamuutos lämpöenergian varautuessa lämmönsiirtimeen. Sinisellä värillä on esitettyä tuloilman lämpeneminen poistoilman lämpöenergian vaikutuksesta. Kuvatut pisteet: (1) poistoilma, (2) jäteilma, (3) ulkoilma, (4) tuloilma.

Kuvasta nähdään, ettei prosessin aikana saavuteta poistoilman kastepistettä eikä prosessissa siten pääse tiivistymään kosteutta poistoilmapuolelle. Lämmönsiirtyminen havaitaan tapahtuneen kuivana lämmönsiirtona, sillä ilmavirtojen absoluuttiset kosteudet pysyvät prosessin aikana muuttumattomina.

Mittausvirheiden minimoimiseksi sekä vertailukelpoisten tuloksien aikaansaamiseksi hyötysuhdemittaukset toteutettiin myös nykyiselle alumiinikennolle samoissa mittausolosuhteissa. Tulokset on esitetty liitteessä 4.

Mittaushetkellä t, koneeseen virranneen poistoilman lämpötilaksi mitattiin 23,9 °C ja ilman vesisisällöksi 6,2 g/kg. Koneeseen tulevan ulkoilman lämpötilaksi saatiin 5,8 °C ja koneesta lähtevän tuloilman lämpötilaksi ennen tuloilmapuhallinta 20,8 °C. Jäteilman lämpötilaksi mitattiin puhaltimen imupuolelta 8,6 °C. Ilmanvaihtolaitteesta lähteväksi tuloilmavirraksi mitattiin 47,4 l/s ja poistoilmavirraksi 48,7 l/s.

Mitatuista lämpötiloista saadaan tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi 83,52 % ja poistoilmalle 84,52 %. Mittausvirhemarginaali oli edellisen mittauksen kaltainen, sillä käytetty mittauslaitteisto oli sama. Mittaustuloksia tarkasteltaessa havaitaan alumiinilevyn kohoumapintojen vaikutuksen kennon lämpötilahyötysuhteeseen olevan mitätön.

Vertailtaessa kennojen massoja keskenään havaittiin kohoumapintaisen kennon olevan 272 g kevyempi kuin nykyisin käytössä oleva alumiinikunno, vaikka kennojen halkaisijat olivat molemmissa tapauksissa 363 mm. Tämä vastaa noin 5 %:a kennoon pyöritetyn alumiinilevyn massasta. Massaero selittyy kohoumapintaisen alumiinikennon väljemmällä rakenteella, joka oli helposti havaittavissa kennojen lamelleja koskettamalla. Kennon väljempi rakenne aiheutui alumiinilevynauhan löystymisestä ajettaessa alumiininauhaa mankelin telojen läpi.

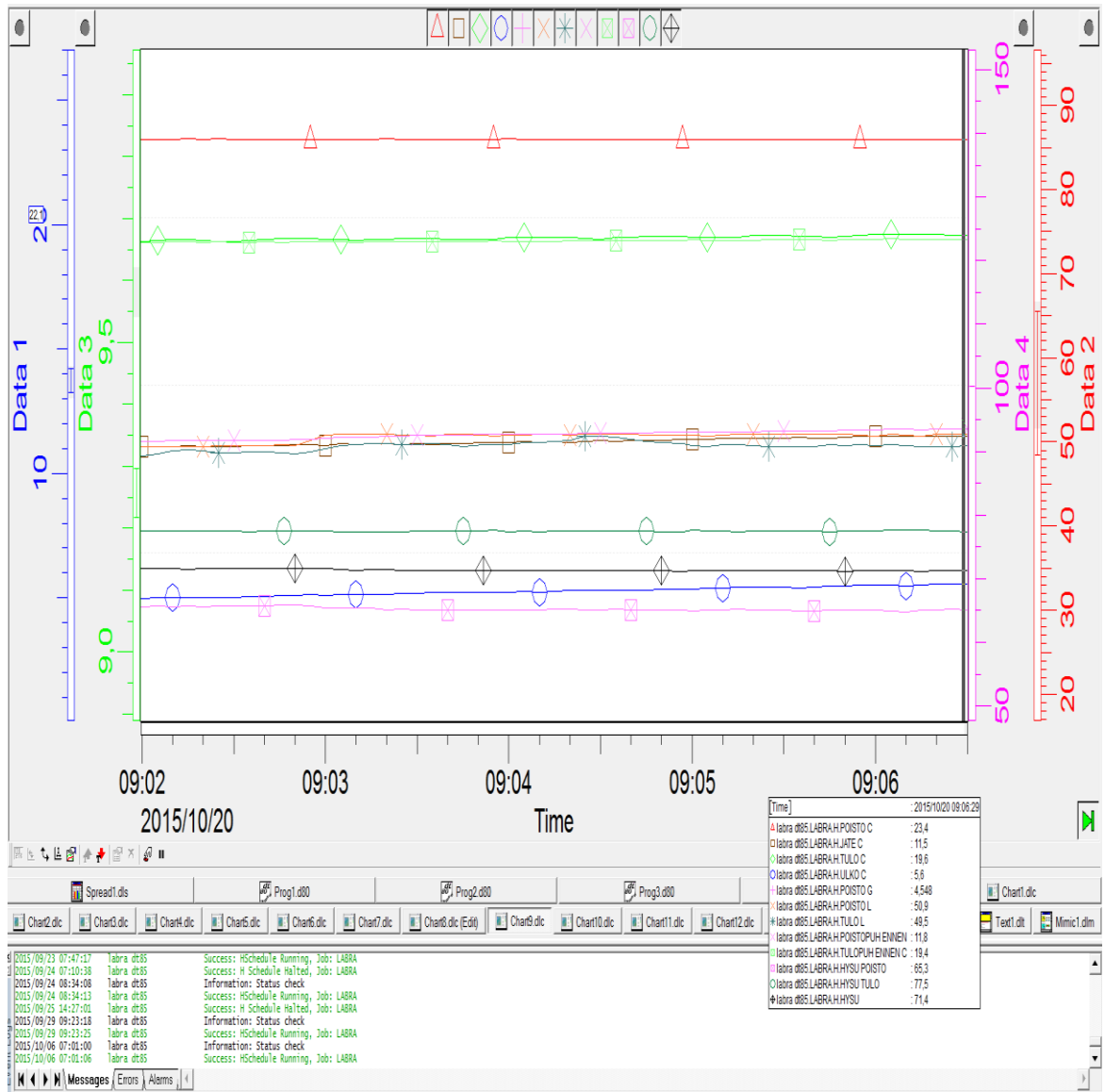
Luvussa 4.1.2 käsiteltyjen simulointien mukaan golfpallomaiset kuviot paransivat tutkitun kanavan lämmönsiirtokerrointa verrattuna sileään alumiininauhaan. Suoritettujen mittauksien perusteella golfpallomaiset kuviot eivät kuitenkaan parantaneet kennon lämpötilahyötysuhdetta. Lämmönsiirtymisen tehostumattomuus uskottiin selittyvän kennon liian alhaisena pyörimisnopeutena, jonka seurauksena paremmin lämpöä varastoiva rakenne ei päässyt siirtämään lämpöenergiaa optimaalisella tavalla ilmanvaihtokoneen puolelta toiselle. Analyysin perusteella päätimme suorittaa jatkomittauksen, jossa kennon pyörimisnopeutta kasvatettiin käytettävän lämmönsiirtimen nykyisestä pyörimisnopeudesta.

Kennon pyörimisnopeuden kasvattamista varten ilmanvaihtokoneeseen vaihdettiin nykyisin käytössä oleva piirikortti EM-239A- piirikorttiin. Piirikorttia ohjaavan paneelin avulla kohdelaitteen asetuksia ja parametreja kyettiin muuttamaan reaaliajassa laitteen ollessa toiminnassa. Liityntäyksikkö mahdollisti parametrien ohjelmoinnin 18-portaalla siten, että suurimmalla portaalla kennon pyörimisnopeutta saatiin kasvatettua 50 % alkuperäisestä pyörimisnopeudesta. Mittauksista saadut tulokset on esitetty liitteissä 5 ja 6.

Saaduista tuloksista havaitaan, ettei kennojen pyörimisnopeuden kasvattaminen auttanut parantamaan siirtimen lämpötilahyötysuhdetta. Kennojen pyörimisnopeuden kasvattaminen 50 % alkuperäisestä nopeudesta heikensi kennojen lämpötilahyötysuhdetta noin 4 prosenttiyksikköä kummassakin vertailutapauksessa.

6.2.2 Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittaus

Suorakaideprofiilisen alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaukset toteutettiin samoilla mittausjärjestelyillä kuin kohoumakennolle suoritetut mittaukset. Tutkimus toteutettiin vertailemalle suorakaidekennosta ja nykyisestä alumiinikennosta saatuja tuloksia. Osassa 4.3 kuvatun suorakaidekennon pienemmän lämpöä siirtävän massan vuoksi tarkastelut toteutettiin kahdessa vaiheessa siten, että ensimmäisessä mittauksessa laitteen ajettava ilmamäärä oli 50 l/s ja toisessa 30 l/s. Tarkoituksena oli tarkastella kennon läpi virtaavan ilmamäärän vaikutusta siirtimen lämmönsiirtokykyyn. Suorakaidekennon ensimmäisestä hyötysuhdemittauksesta saadut tulokset on esitettyä kuvassa 16. Lämmönsiirtymisprosessi Mollier-diagrammissa on esitettyä liitteessä 7.



Kuva 16. Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset.

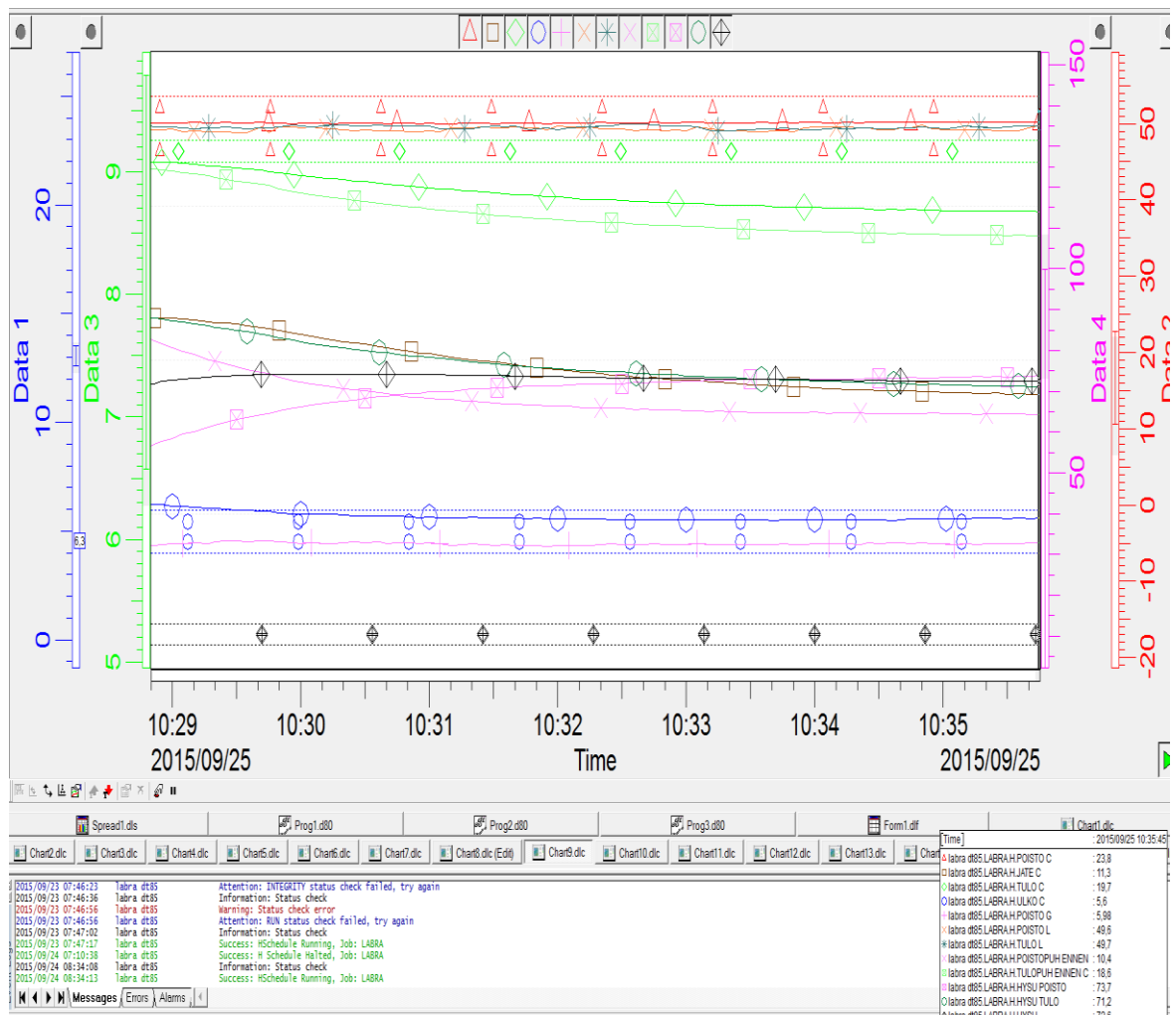
Ilman lämpötiloista saadaan kennon tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi 77,5 % ja poistoilmalle 65,3 %. Poistoilman absoluuttinen kosteus mittaushetkellä oli 4,55 g/kg ja lämpötila 23,4 °C. Nykyisen alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset vastaavissa olosuhteissa on kuvattuna liitteessä 8.

Tuloksia analysoidessa havaitsemme, että tulo- ja poistoilmamäärien ollessa noin 50 l/s valmistettu suorakaideprofiili heikensi kennon lämpötilahyötysuhdetta lähes 8 prosenttiyksikköä. Suorakaidekennon heikko lämmönsiirtokyky johtui osittain massaan suhteutetusta liian korkeasta ilmamäärästä, sillä siirtimen lämpöä varaava massa oli lähes kolmanneksen pienempi kuin vertailutapauksen. Pienennettäessä kennon läpi virtaava

ilmamäärä arvoon 30 l/s, tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi saatiin 74,4 %. Tutkimuksesta saadut mittaustulokset on esitettyä kokonaisuudessaan liitteessä 9.

6.2.3 Yhdistelmäkennon lämpötilahyötysuhdemittaus

Valmistetulle kupari- ja alumiinikennon yhdistelmälle suoritettiin lämpötilahyötysuhdemittaus osassa 6.1 kuvatuilla mittausjärjestelyillä. Mittaukset suoritettiin tulo- ja poistoilmavirtojen ollessa noin 50 l/s. Luotettavien mittaustuloksien aikaansaamiseksi, hyötysuhdemittaukset suoritettiin sekä yhdistelmäkennolle että alumiinikennolle samoissa olosuhteissa. Yhdistelmäkennolle saadut mittaustulokset on esitettyä kuvassa 17. Lämmönsiirtoprosessi on kuvattuna liitteen 10 Mollier-diagrammissa.



Kuva 17. Yhdistelmäkennon lämpötilahyötysuhdetestin mittaustulokset.

Kennon hyötysuhdetestin tuloksista havaitaan, että roottorin normaalilla pyörimisnopeudella tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi saatiin 71,2 % ja poistoilmalle 73,7 %. Poistoilman absoluuttinen kosteus oli mittaushetkellä 5,98 g/kg ja lämpötila 23,8 °C. Raitisilman lämpötilaksi mitattiin 5,6 °C. Vertailuun käytetyn alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset on esitetty liitteessä 11.

Tuloksista havaitaan kennon lämpötilahyötysuhteen heikentyneen yhdistelmäkennon tapauksessa suhteessa nykyiseen alumiinikennoon. Saatuja tuloksia pidettiin varsin merkittisinä, sillä lämmönjohtavuudeltaan alumiinia paremman kuparin hyödyntäminen lämmönsiirtimenä odotettiin parantavan lämmönsiirtymistä kennossa. Mittaukset suoritettiin vielä 50 % pienemmillä kennon pyörimisnopeuksilla, mutta saadut mittaustulokset pysyivät edellä kuvattujen kaltaisina.

Etsittäessä mahdollista syytä lämmönsiirtymisen heikentymiseen päätettiin kuparin ja alumiinin lämmönjohtavuutta tarkastella lämmittämällä niitä lämpöpuhaltimella. Lämpökameralla havaittiin kuparinauhan johtavan lämpöenergiaa huomattavasti paremmin kuin samanmittaisen alumiininauhan. Saadun tarkastelun perusteella päätimme vielä suorittaa kennoille hyötysuhdemittaukset lämmönsiirtimien pysyessä paikallaan. Tarkoituksena oli selvittää, johtaako kuparinen lämmönsiirrin paremmin lämpöä kennon puolelta toiselle kuin alumiinilämmönsiirrin. Mittaustulokset on esitetty liitteissä 12 ja 13.

Mittauksista saadaan yhdistelmäkennon tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi 32,4 % ja alumiinikennolle 25,5 %, tulo- ja poistoilmavirtojen ollessa noin 48 l/s. Raitis- ja poistoilmavirtojen välinen lämpötilaero oli mittaushetkellä 18 °C ja poistoilman absoluuttinen kosteus 5,9 g/kg kummassakin mittaustapauksessa. Tuloksia analysoitaessa havaitaan, että yhdistelmäkennon tapauksessa lämpö pääsee johtumaan lämmönsiirrinmateriaalissa paremmin puolelta toiselle kuin alumiinisessa lämmönsiirtimessä. Prosessissa lämmönsiirrinmateriaali johtaa varastoimansa lämpöenergian kennon vastakkaiselle puolelle pienentäen materiaalin ja ilman välistä lämpötilaeroa. [28] Lämmönjohtumisen estämiseksi lämmönsiirrin muokattiin sektorikennoksi, jossa lämpöä varaava materiaali lohkotettiin neljään osaan.

6.2.4 Sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus

Lohkotetulle yhdistelmäkennoille suoritettiin lämpötilahyötysuhdemittaukset osassa 6.1 kuvatuilla mittausjärjestelyillä. Tarkoituksena oli verrata saatuja tuloksia yhdistelmäkennon lämpötilahyötysuhdetestin tuloksiin ja pohtia, saadaanko kennon jakamisella lohkoihin parannettua siirtimen energiatehokkuutta. Sektorikennon hyötysuhdemittaukset on esitetty liitteessä 14 ja tilapiirros Mollier-diagrammissa liitteessä 15.

Mittaushetkellä poistoilman lämpötilaksi mitattiin 23,9 °C ja raitisilmalle 5,9 °C, lämpötilaeron ollessa 18,0 °C. Poistoilman absoluuttinen kosteus oli 5,55 g/kg. Tuloilmavirraksi mitattiin 49,2 l/s ja poistoilmavirraksi 50,2 l/s. Sektorikennon tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi saatiin 70,2 %.

Verrattaessa mittaustuloksia yhdistelmäkennon lämpötilahyötysuhdetestin tuloksiin, havaitaan kennon lohkomisen vaikutuksen lämpötilahyötysuhteeseen olevan mitätön. Lämmönjohtumisen estäminen kennomateriaalissa ei vaikuttanut siirtimen lämmönsiirto-omaisuuksiin juuri lainkaan, eikä siitä ollut selittämään kuparikennon heikkoa lämmönsiirtokykyä.

6.2.5 Pinnoitettujen kennojen lämpötilahyötysuhdemittaukset

Mattamustalla spraymaalilla pinnoitetuille lämmönsiirtimelle suoritettiin osassa 6.1 kuvatuilla mittausjärjestelyillä lämpötilahyötysuhdemittaukset. Mittaukset suoritettiin molemmille kennoille yhden vuorokauden aikana samoissa mittausolosuhteissa. Luotettavien tuloksien aikaansaamiseksi pinnoitetulle alumiinikennolle suoritettiin vielä vertailumittaus pinnoittamattomalla, kiiltäväpintaisella alumiinikennolla. Vastaavanlaista vertailumittausta ei kyetty sektorikennolle suorittamaan, sillä kuparia sisältäviä lämmönsiirtimiä ei testattavan kennon lisäksi ollut saatavilla.

Mattamustalla spraymaalilla pinnoitetun lohkotetun kennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset on esitetty liitteessä 16. Mittaustapauksen lämmönsiirtymisprosessi Mollier-diagrammissa on esitetty liitteessä 17. Verrattaessa tuloksia sektorikennon mittaustuloksiin havaitaan, ettei kennon pinnoittaminen mustalla spraymaalilla vaikuttanut siirtimen lämmönsiirtokykyyn. Tuloksien perusteella pinnan emittoiman säteilytehon kasvattaminen ei parantanut kuparia sisältävän kennon lämpötilahyötysuhdetta.

Spraymaalilla käsitellyn alumiinikennon mittaustulokset on esitetty liitteessä 18 ja vertailuun käytetyn kiiltäväpintaisen alumiinikennon liitteessä 20. Mattamustan alumiinikennon lämmönsiirtymisprosessi on esitetty liitteen 19 Mollier-diagrammissa. Tutkituissa tapauksissa raitisilman lämpötila oli 5,15 °C ja poistoilman lämpötila noin 23,2 °C. Ilmanvaihtokoneeseen ajettavan poistoilman absoluuttinen kosteus oli pinnoitetun kennon tapauksessa 5,58 g/kg ja pinnoittamattomassa kennossa 5,52 g/kg. Lämmönsiirtyminen toteutui kummassakin vertailutapauksessa kuivana lämmönsiirtona ja mittaustulokset ovat täten keskenään vertailukelpoisia.

Pinnoitetun lämmönsiirtimen tuloksia tarkastellessa havaitaan tuloilmakanavasta ilman lämpötilaa mittaavan lämpötila-anturin mittaustuloksen olevan epäluotettava. Tuloilman lämpötilaksi anturi mittasi 23,52 °C, kun virtaussuunnassa lämmönsiirtimen jälkeen lämpötilaa mittaava lämpötila-anturi antoi mittaustulokseksi 19,41 °C. Poistoilman lämpötilaksi saatiin kyseisellä hetkellä 23,15 °C. Kun tuloilma-anturin mittaamasta lämpötilasta vähennetään ilman keskimääräinen lämpeneminen puhaltimessa (1 °C), saadaan tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi lähes 95 %. Tämän tarkastelun perusteella voidaan todeta tuloilma-anturin mittaustiedon olleen virheellinen. Laitteiston mittausvirhe ei kuitenkaan vaikuttanut kennon lämpötilahyötysuhdemittauksesta saatuihin tuloksiin, sillä hyötysuhdelaskennassa käytetyt lämmönsiirtimen jälkeiset lämpötilat mitattiin koneen sisältä puhaltimien imupuolelta.

Tuloksia analysoitaessa havaitaan mattamustan alumiinikennon ja kiiltäväpintaisen kennon mittaustulosten olevan keskenään lähes identtisiä. Pinnoitetulle alumiinikennolle saatiin tuloilman lämpötilahyötysuhteeksi 79,2 % ja pinnoittamattomalle kennolle 77,9 %. Tulo- ja poistoilman hyötysuhteissa havaittiin muutaman prosenttiyksikön ero, nettovaiikutuksen ollessa kuitenkin minimaalinen. Tuloksien perusteella lämmönsiirtimen pinnoittaminen alumiinia paremmin lämpösäteilyä emittoivalla aineella ei parantanut alumiinisen kennon lämmönsiirtokykyä.

6.3 Mittaustulosten analysointi

Tulosten tarkastelemiseksi mitattujen konstruktioiden rakenteita sekä lämmönsiirto-ominaisuuksia verrattiin kustakin tapauksesta saatuihin mittaustuloksiin. Taulukossa 5 on esitetty mitattujen konstruktioiden materiaalit, massat sekä lämmönsiirto-ominaisuudet.

Taulukko 5. Mitattujen konstruktioiden ominaisuustaulukko.

Konstruktio	Materiaali	Massa [kg]	Lämpökapasiteetti [J/K]	Lämmönjohtavuus $[\frac{W}{m \cdot K}]$	Lämmönsiirtopinta-ala [m ²]
Nykyinen kenno	Alumiini	5,17	4653	237	63,8
Kohoumakenno	Alumiini	4,92	4428	237	60,7
Suorakaidekenno	Alumiini	3,47	3123	237	42,8
Yhdistelmäkenno	Alumiini/ R-220 kupari	21,07	9442	min 288	61,6
Sektorikenno	Alumiini/ R-220 kupari	21,07	9442	min 288	61,6
Pinnoitettu alumiinikenno	Alumiini	5,17	4653	237	63,8
Pinnoitettu sektorikenno	Alumiini/ R-220 kupari	21,07	9442	min 288	61,6

Mitatuista konstruktioista saadut mittaustulokset on esitettyinä taulukossa 6. Taulukossa on esitettyinä myös vertailumittauksista saadut tulokset.

Taulukko 6. Taulukossa on esitetty lämpötilahyötysuhdemittauksista saadut tulokset. Sarakkeissa esitettyinä alleviivattuna myös vertailuun käytetyn alumiinikennon mittaustulokset vastaavissa olosuhteissa.

Konstruktio	Kohoumakenno	Suorakaidekenno	Yhdistelmäkenno	Sektorikenno	Pinnoitettu sektorikenno	Pinnoitettu alumiinikenno
Lämpötilat [°C] (ulko/poisto)	5,9/23,9 <u>5,8/23,9</u>	5,6/23,4 <u>5,4/23,7</u>	5,6/23,8 <u>5,5/23,7</u>	5,9/23,9	5,0/22,9	5,1/23,1 <u>5,1/23,2</u>
Ilmavirrat [l/s] (tulo/poisto)	48,4/49,4 <u>47,4/48,4</u>	49,5/50,9 <u>50,0/50,3</u>	49,7/49,6 <u>49,6/49,7</u>	49,2/50,2	48,7/49,7	49,7/50,4 <u>49,6/49,9</u>
Tuloilman lämpötilahyötysuhde [%]	83,75 <u>83,52</u>	77,5 <u>78,3</u>	71,2 <u>77,5</u>	70,2	69,5	79,2 <u>77,9</u>
Poistoilman lämpötilahyötysuhde [%]	84,23 <u>84,52</u>	65,3 <u>80,3</u>	73,7 <u>79,6</u>	74,2	74,1	79,7 <u>80,6</u>
Ulkoilman vastaanottama teho [kW]	0,86 <u>0,86</u>	0,82 <u>0,84</u>	0,78 <u>0,84</u>	0,75	0,73	0,85 <u>0,84</u>
Poistoilman luovuttama teho [kW]	0,90 <u>0,89</u>	0,71 <u>0,87</u>	0,80 <u>0,86</u>	0,80	0,79	0,87 <u>0,88</u>

Vertailtaessa taulukossa 5 esitettyjä materiaalien massoja havaitaan kohouma- ja suorakaidekennojen tapauksessa massojen olleen nykyistä alumiinikennoa pienempiä. Kohoumakennon tapauksessa lämpöä siirtävää massaa ja siten lämmönsiirtopinta-alaa oli 5 % vähemmän kuin vertailutapauksessa. Vertailtaessa taulukossa 6 esitettyjä kennojen siirtämiä tehoja toisiinsa havaitaan erojen olevan varsin minimaalinen. Kun tarkasteluissa huomioidaan käytettyjen laitteistojen mahdolliset mittavirheet, voidaan valmistettujen kuvioiden vaikutuksen todeta jääneen lämmönsiirron kannalta varsin mitättömiksi.

Suorakaideprofiilisen lämmönsiirtimen tapauksessa valmistetun kennon massa oli lähes kolmanneksen pienempi kuin vertailuun käytetyn lämmönsiirtimen. Lämmönsiirtimen pienemmän massan vaikutusta tarkasteltiin myös pienemmällä ilmamäärällä suoritetuilla mittauksilla. Liitteessä 9 esitettyjen tuloksien mukaan siirtimen lämmönsiirto ei parantunut merkittävästi ilmamäärän muutoksen seurauksena.

Suorakaidekennon odotettua heikompi lämmönsiirtokyky selittyy alumiinin profiilikuvioinnilla, jonka seurauksena lämmönsiirtokanavan hydraulinen halkaisija kasvaa vertailutapaukseen nähden. Kanavaprofiilin hydraulisen halkaisijan kasvaessa materiaalin lämmönsiirtokerroin pienenee. Valmistetun suorakaideprofiilin hydraulinen halkaisija oli lähes kolminkertainen nykyiseen aaltokuviointiin verrattuna. Lisäksi valmistetussa profiilissa sileä- ja suorakaideraina olivat toisiaan vasten profiilin huipuissa. Tällöin rainat muodostavat kennoon alueita, joissa ilmanvirtaus on heikkoa ja lämmönsiirtyminen on vaatimatonta. Tuloksia tarkasteltaessa on myös syytä epäillä suorakaidekennon jäteilmän lämpötilamittauksessa tapahtuneen mittausvirhe, sillä saatujen tuloksien perusteella poistoilman luovuttama teho olisi merkittävästi heikompi kuin ulkoilman vastaanottama teho. Mittavirhe on todennäköisesti aiheutunut lämpötila-anturin epäedullisesta sijainnista jäteilmapuhaltimen imupuolella, jonka seurauksena anturin mittaama ilman lämpötila on ollut virheellinen.

Kuparia sisältävissä lämmönsiirtimissä lämpöä varaavaa massaa oli yli nelinkertainen määrä verrattuna tuotannon nykyiseen siirtimeen. Kuparisiirtimien lämpökapasiteetti oli kaksinkertainen ja lämmönsiirtopinta-ala noin 3 % pienempi kuin vertailutapauksen, johon käytetyn kuparin paksuudesta. Vertailtaessa kennojen lämmönsiirtokykyjä, havaitaan kuparisiirtimen tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteiden olleen noin 6 prosenttiyksikköä heikompi kuin vertailutapauksen. Lopullinen selitys kuparikennojen heikkoon lämmönsiirtokykyyn jäi projektissa selvittämättä.

Pinnoitettujen siirtimien tapauksessa lämmönsiirtymisen tehostumattomuus selittyy ilmanvaihtolaitteiden lämmönsiirtoprosessilla, jossa ei tapahdu lämmönsiirtymistä säteilyn vaikutuksesta. Mittaustulosten ollessa lähes identtisiä vertailtavaan alumiinikennoon nähden säteilylämmönsiirron osuuden voidaan todeta olevan regeneratiivisessa lämmönsiirtoprosessissa merkityksetön.

Vertailtaessa kohoumakennosta ja kohoumakennon vertailumittauksesta saatuja tuloksia muista konstruktioista saatuihin mittaustuloksiin, havaitaan tulo- ja poistoilman lämpötilahyötysuhteiden olleen ensimmäisessä vertailumittauksessa merkittävästi parempia kuin muissa mitatuissa tapauksissa. Tuloksien perusteella on syytä epäillä tutkimuksen aikana syntyneen mittausrvirhe, jonka seurauksena kohoumakennosta ja kohoumakennon vertailumittauksesta saadut tulokset eivät ole vertailukelpoisia muihin mittaustapauksiin. Mittavirhe on todennäköisesti aiheutunut ilmamäärien mittaamiseen käytettyjen mittaus- ja säätömoduulien virheellisistä paine-eromittaustuloksista, sillä puhaltimien imupuolilla sekä ilmanvaihtokanavissa olleiden lämpötila-antureiden mittaamat lämpötilat olivat yhdenmukaiset. Virheellisen paine-eromittauksen seurauksena koneella vaihdettava ilmamäärä on mahdollisesti ollut tutkimuksen aikana oletettua pienempi.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli tutkimusten avulla selvittää, voidaanko pyörivän regeneraattorin lämpötilahyötysuhdetta parantaa kennon materiaalivalinnoilla siirtimen pinta-alaa kasvattamatta. Lisäksi tavoitteena oli syventyä lämmöntalteenottokeinojen rypytyskuvioihin ja selvittää, voidaanko optimaalisella leikkausprofiililla parantaa siirtimen lämpötilahyötysuhdetta.

Mittauslaitteiston valinta sekä tehdyt mittaukset onnistuivat erittäin hyvin, ja tulokset saatiin kerättyä kustakin tutkittavasta tapauksesta halutulla tavalla. Referenssitapauksille saatiin luotua projektissa asianmukaiset olosuhteet, jotka onnistuttiin toistamaan vertailtaville kohteille realististen tuloksien aikaansaamiseksi. Tutkimuksissa tehtyjen kuviointimuokkauksien sekä kennomateriaalin vaihdon vaikutuksia kyettiin projektissa tarkastelemaan yksityiskohtaisesti.

Mittauksista saatujen tuloksien mukaan siirtimen lämpötilahyötysuhde ei parantunut lämpöä paremmin johtavalla materiaalilla eikä kennon leikkausprofiilia muokkaamalla. Lisäksi mittaustuloksien perusteella lämpösäteilyn osuuden regeneratiivisessa lämmönsiirrossa todettiin olevan mitätön.

Projektia on tarkoitus jatkaa valmistamalla lämmönsiirrin alumiinirainan paksuutta vastaavalla kuparilla, sillä tutkimuksessa jäi selvittämättä rainan paksuuden vaikutus materiaalin lämmönsiirtoon. Tutkimusta voisi myös jatkaa perehtymällä kennon erilaisiin valmistusmenetelmiin, jotta lämmönsiirron kannalta edulliset leikkausprofiilit sekä kennorakenteet saataisi toteutettua. Mittausjärjestelyitä voisi kehittää hankkimalla lämpötila- ja kosteuslähettimiksi nykyisiä tarkemmat anturit, sillä nykyisien antureiden antamat mittatarkkuudet ovat lämpötilalahyötysuhdemittauksien kannalta liian epätarkat.

Projektin avulla saatiin arvokasta tietoa materiaalien soveltuvuuksista regeneratiivisiksi lämmönsiirtimiksi sekä kennon rainan erilaisista leikkausprofiileista. Lisäksi tutkimuksen avulla saatiin luotua kirjallinen dokumentaatio lämpötilalahyötysuhdemittauksessa käytetävästä mittausjärjestelystä, jota voidaan jatkossa vastaavissa tutkimuksissa hyödyntää. Näiden lisäksi vartenotettavien materiaalien ja leikkausprofiilien selvitystyöstä saatiin aikaan runko tutkimusprosessille, jota voidaan tulevaisuudessa käyttää hyväksi uusien valmistusvaihtoehtojen kartoituksessa.

Lähteet

- 1 Innanen, Seppo. 2015. Lehtori, Metropolia ammattikorkeakoulu, Espoo. Teollisuusilmanvaihto. Luento. 10.4.2015.
- 2 Ilmanvaihtokoneiden CE-merkintä tulee pakolliseksi vuonna 2016. 4.6.2015. Verkkodokumentti. Vtt Expert Services Oy. <http://www.vttexpertservices.fi/ajankohtaista/uutiset/news201506_ilmanvaihtokoneiden-ce-merkint%C3%A4-tulee-pakolliseksi-vuonna-2016>. Luettu 25.8.2015.
- 3 Kuusinen, Teemu. 2015. Myyntipäällikkö, Ensto Enervent, Porvoo. Keskustelu 8.10.2015.
- 4 Ensto Enervent-energiatehokkaan ilmanvaihdon edelläkävijä. 2014. Verkkodokumentti. Ensto Enervent. <http://enervent.fi/main_wide.asp?menuid=90000&langid=1&countryid=100>. Luettu 28.8.2015.
- 5 Palmgren, Tom. 1991. Ilmanvaihdon regeneratiivisen lämmöntalteenottolaitteen kehittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.
- 6 Sivula, Laura. 2014. Omakotitalon ilmanvaihtojärjestelmän toiminta-Case Sivula 2011. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu.
- 7 Palmgren, Tom. 2015. Tuotekehityspäällikkö, Ensto Enervent, Porvoo. Keskustelu 28.8.2015.
- 8 Innanen, Seppo. 2015. Lehtori, Metropolia ammattikorkeakoulu, Espoo. Teollisuusilmanvaihto. Luento. 17.4.2015.
- 9 Rotary heat exchanger. 2015. Verkkodokumentti. Enventus Ab. <<http://enventus.com/en/products/rotary-heat-exchanger/rotor/>> Luettu 26.10.2015.
- 10 Calculation program ver 5.4.0. 2015. Roottoreiden mitoitusohjelma. Enventus AB.
- 11 Boström, Sture & Tanttari, Juha. 11.6.2010. Lämmönvaihtimen CFD-simulointi. Yrityksen sisäinen dokumentti. Process Flow Oy. Luettu 3.9.2015.
- 12 Boström, Sture & Tanttari, Juha. 25.11.2010. Lämmönvaihtimen CFD-simulointi. Yrityksen sisäinen dokumentti. Process Flow Oy. Luettu 4.9.2015.
- 13 Boström, Sture & Tanttari, Juha. 3.2.2012. Lämmönvaihtimen CFD-simulointi. Yrityksen sisäinen dokumentti. Process Flow Oy. 9.9.2015.
- 14 Ilmankäsittelykoneiden tyyppihyväksyntäohjeet. 2008. Helsinki: Ympäristöministeriö.

- 15 Tuutti, Jari. 2015. Mekaniikkasuunnittelija, Ensto Enervent, Porvoo. Keskustelu 5.10.2015.
- 16 Valkeapää, Aki. 2015. Yliopettaja, Metropolia ammattikorkeakoulu, Espoo. Keskustelu 9.10.2015.
- 17 Mills, A.F. 1999. Basic Heat & Mass Transfer. 2nd ed. London: Prentice Hall.
- 18 Ilmanvaihtolaitteistojen paloturvallisuusopas. 2012. Helsinki. Suomen LVI-liitto. Julkaisu 1.2012.
- 19 Hatakka, J., Saari, H., Sirviö, J., Viiri, J. & Yrjänäinen, S.2006.. Physica 2. 2.painos. WSOY
- 20 Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. 2005. MAOL taulukot. 2.painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
- 21 Metallien hinnat. Verkkodokumentti. Invensting.com. <<http://fi.investing.com/commodities/metallit>> Luettu 21.9.2015.
- 22 Physical properties, Tempers and mechanical properties. 2015. Verkkodokumentti. Aurubis Finland Oy.<[Aurubis_Industrial_products_Cu_DHP_2014.pdf](http://www.aurubis.com/Industrial_products/Cu_DHP_2014.pdf)> Luettu 18.9.2015.
- 23 Kauraala, Kalle. 2015. Yliopettaja, Metropolia ammattikorkeakoulu, Espoo. Keskustelu 1.10.2015.
- 24 Materiaalien emissiivisyys. 2015. Verkkodokumentti. Nokeval Oy. <http://www.nokeval.com/pdf/misc/Metallien_emissiivisyys.pdf> Luettu 9.10.2015
- 25 SFS EN 308. Heat exchangers. Test procedures for establishing performance of air to air and flue gases heat recovery devices. 1997. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 26 PRA-mittaus- ja säätömoduulit. 2015. Verkkodokumentti. Halton Group Ltd. <http://www.halton.com/hit/pdf/fi/pra_fi.pdf> Luettu 24.9.2015.
- 27 Kosteus- ja lämpötilalähetin KLK 100. Verkkodokumentti. Produal Oy. <[KLK100a.pdf](http://www.produal.com/klk100a.pdf)> Luettu 15.10.2015.
- 28 Pettersson, Jonas. 2015. Automaatiosuunnittelija, Ensto Enervent, Porvoo. Keskustelu 25.9.2015.

Enerventin lämmönsiirtimien valmistus (vain yrityksen käyttöön)

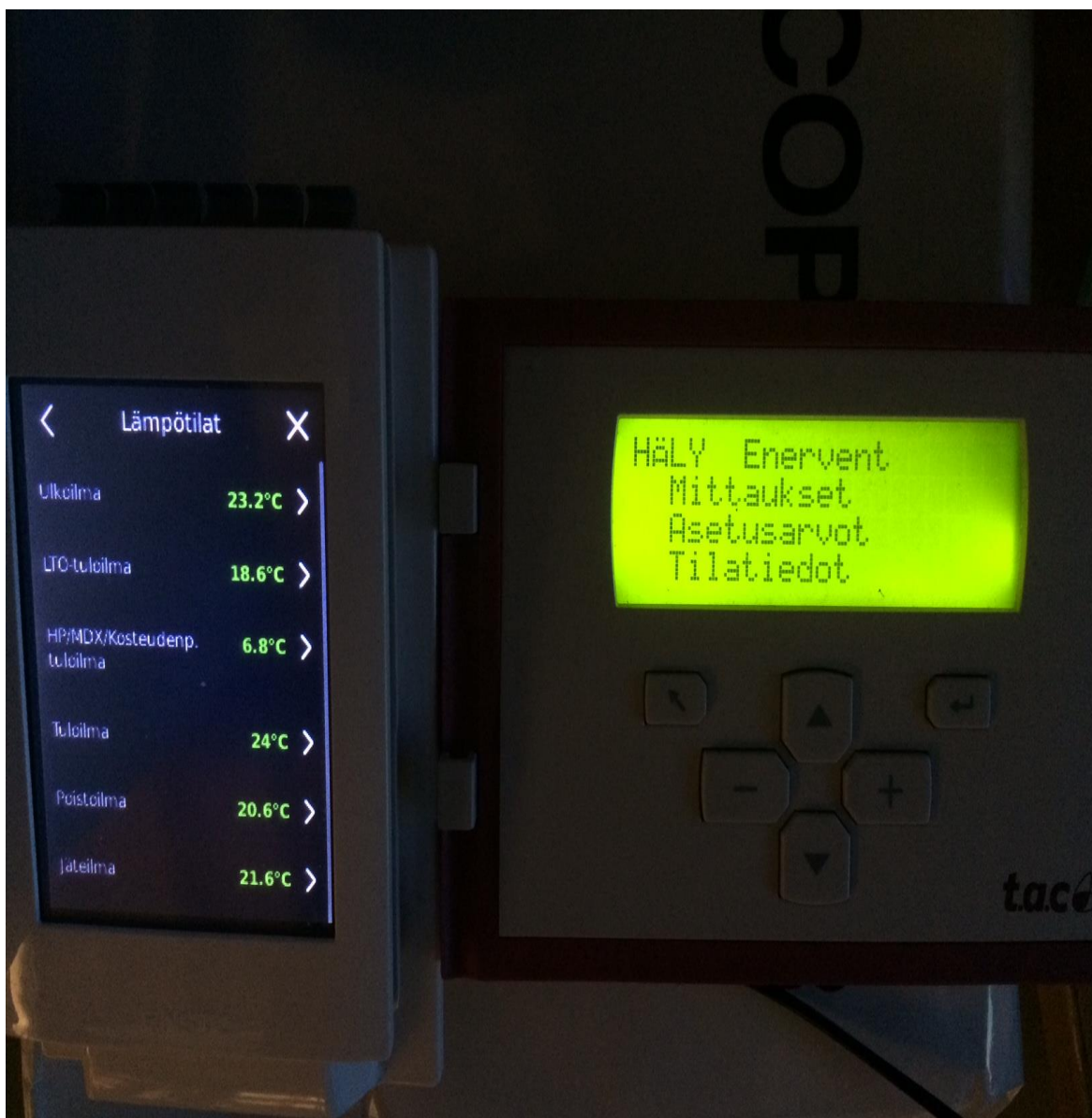
Yhdistelmäkenno

Rypytetystä kuparista ja sileästä alumiinirainasta valmistettu lämmönsiirrin.



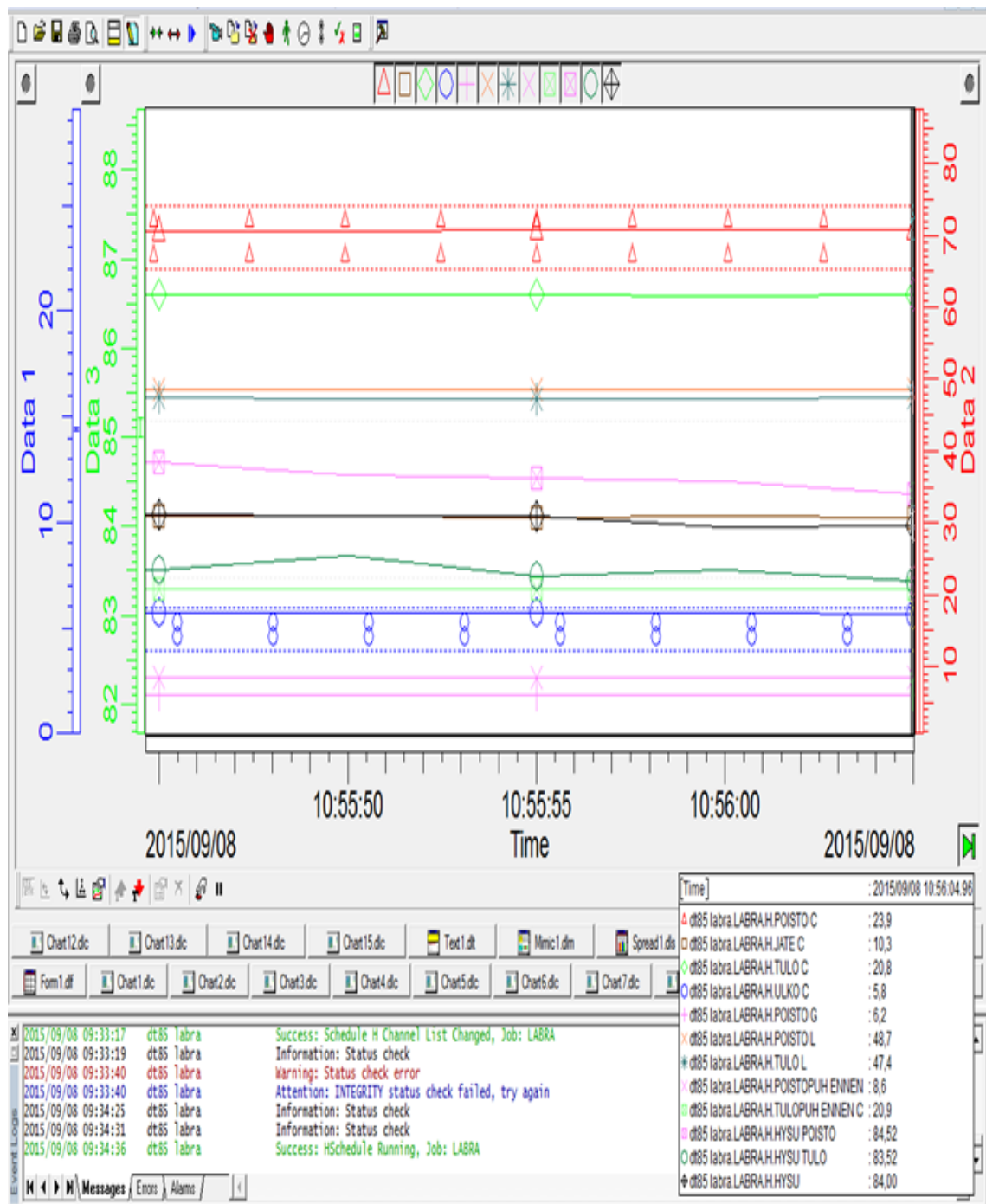
Ilmanvaihtolaitteiden ohjaus

Halutut poisto- ja ulkoilman mittausolosuhteet saatiin luotua MD-ohjauspaneelilla (kuvassa vasemmalla) ja TAC-säätimellä (kuvassa oikealla), joiden asetusarvoja muuttamalla ilmanvaihtokoneelle tulevien ilmavirtojen lämpötiloja saatiin muokattua.



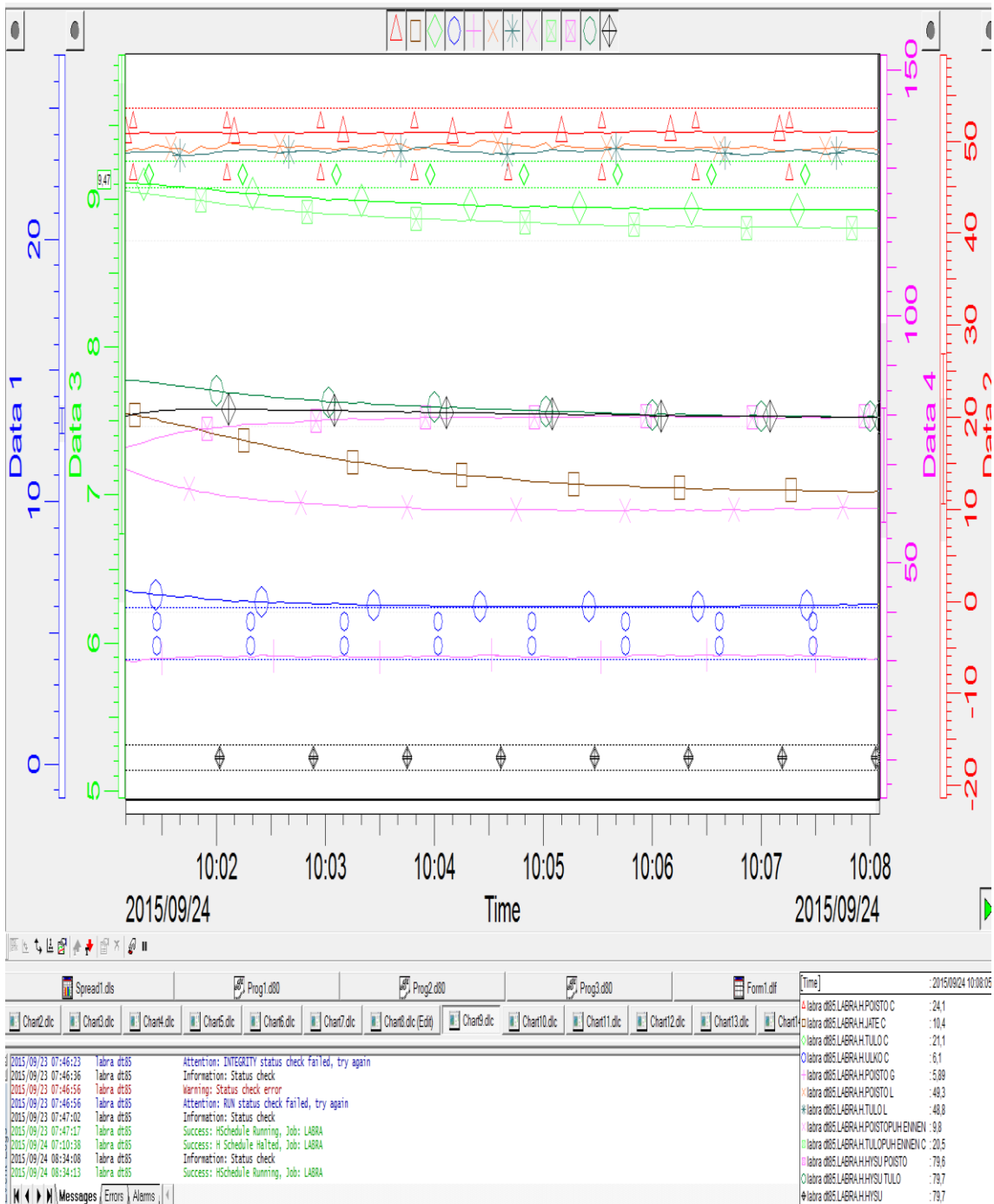
Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 8.9.2015

Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset, joita käytettiin kohoumakanonosta saatujen tuloksien vertailuun.



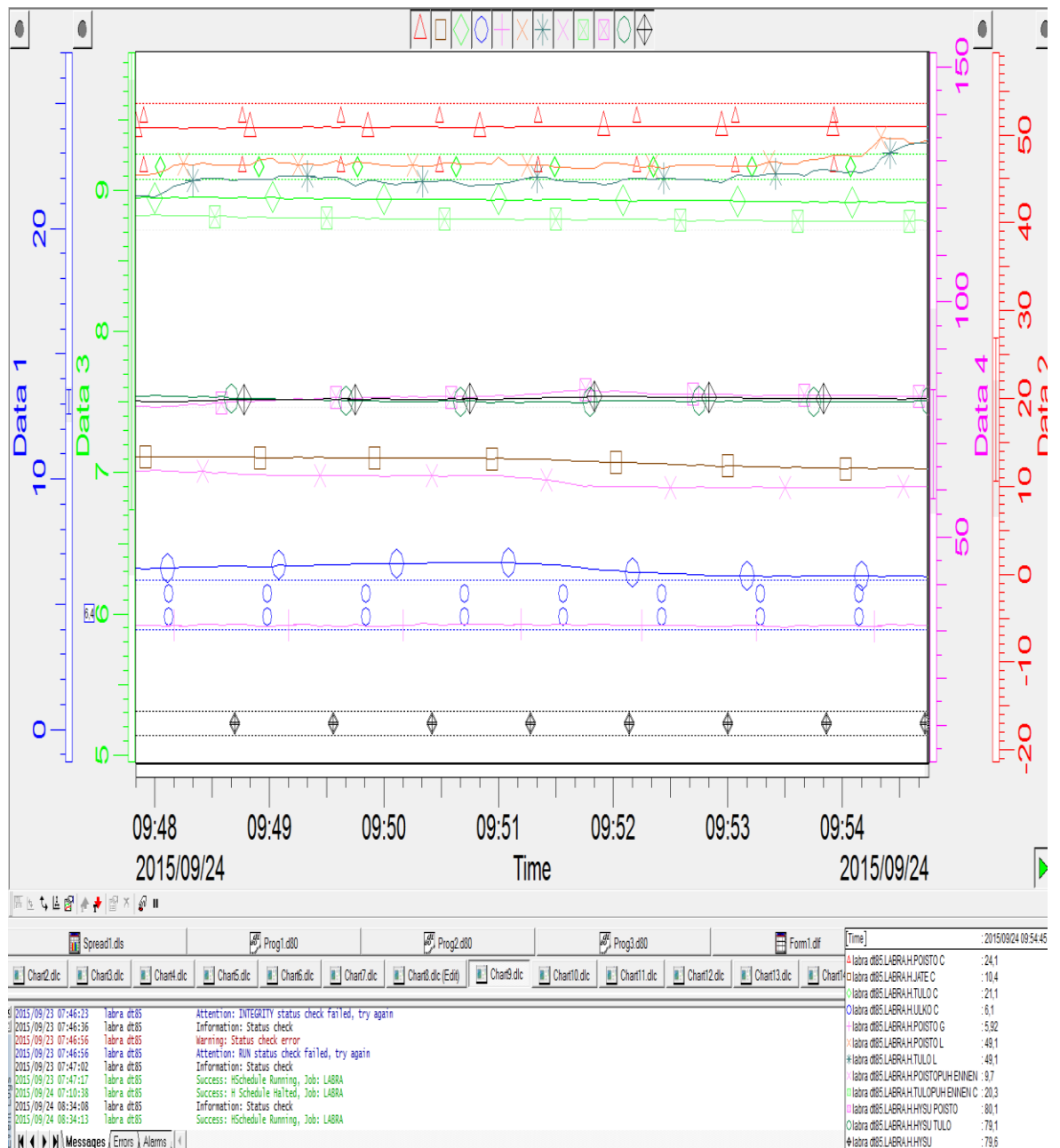
Kohoumakennon jatkomittaus

Kohoumakennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset, kun roottorin pyörimisnopeutta oli kasvatettu 50 % alkuperäisestä nopeudesta.



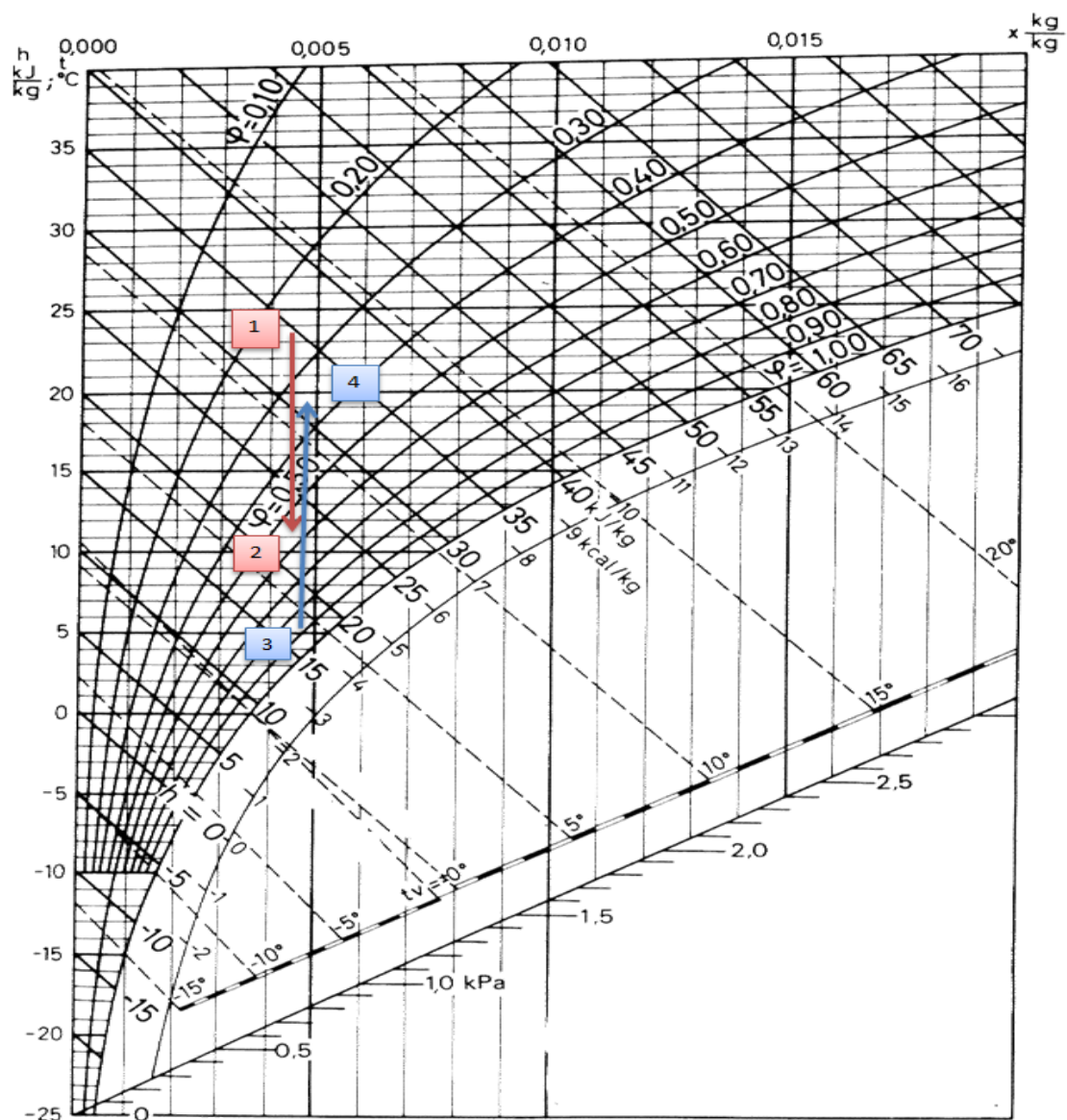
Alumiinikennon jatkomittaus

Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset, kun kennon pyörimisnopeutta oli kasvatettu 50 % alkuperäisestä nopeudesta.



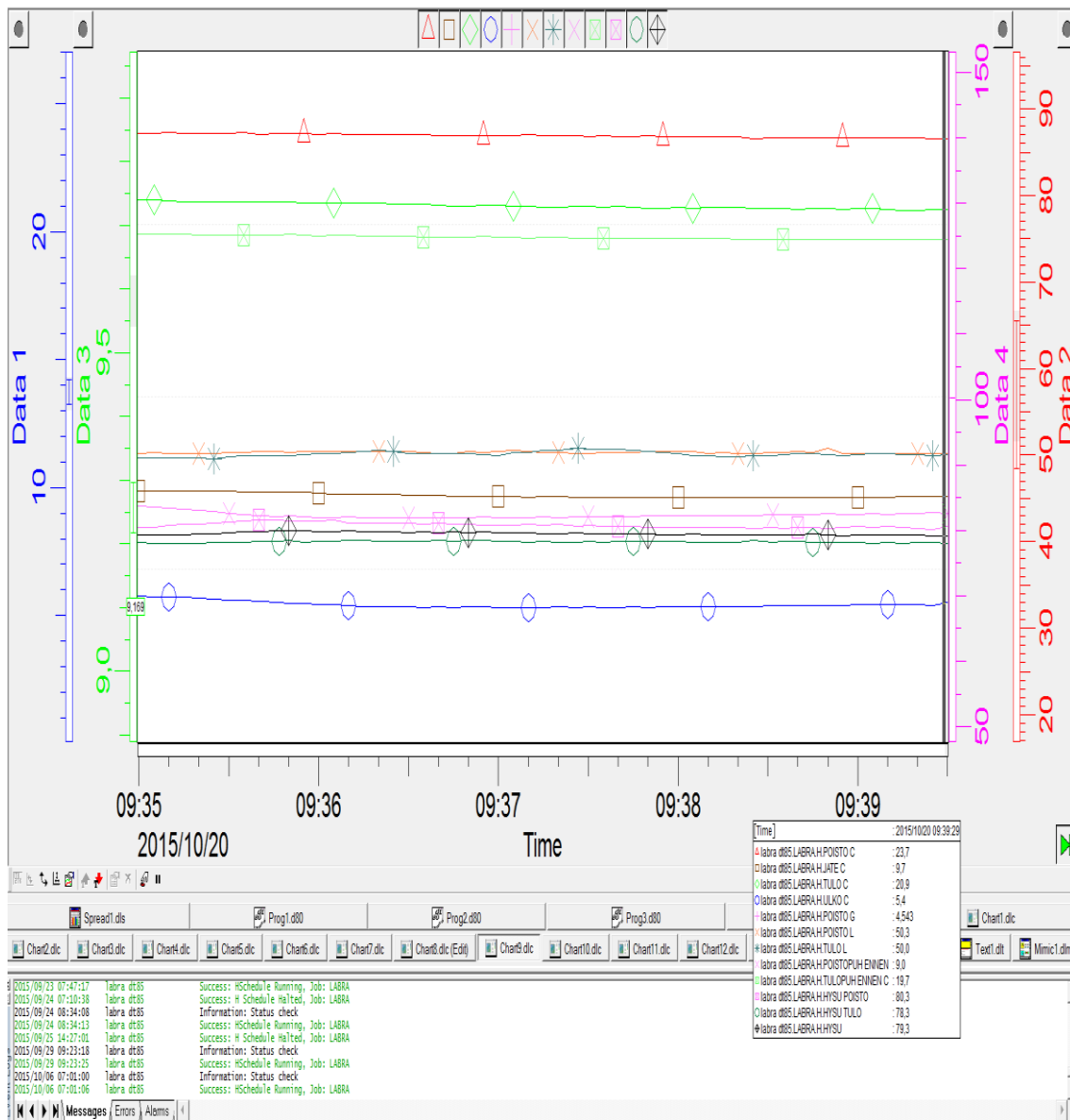
Suorakaidekennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa

Esitetynä suorakaideprofiilisen kennon tilapiirros Mollier-diagrammissa. Kuvatut tilapistet: (1) Koneeseen virtaava poistoilma, (2) koneesta puhallettava jäteilma, (3) Koneeseen virtaava raitisilma, (4) Koneesta puhallettava tuloilma.



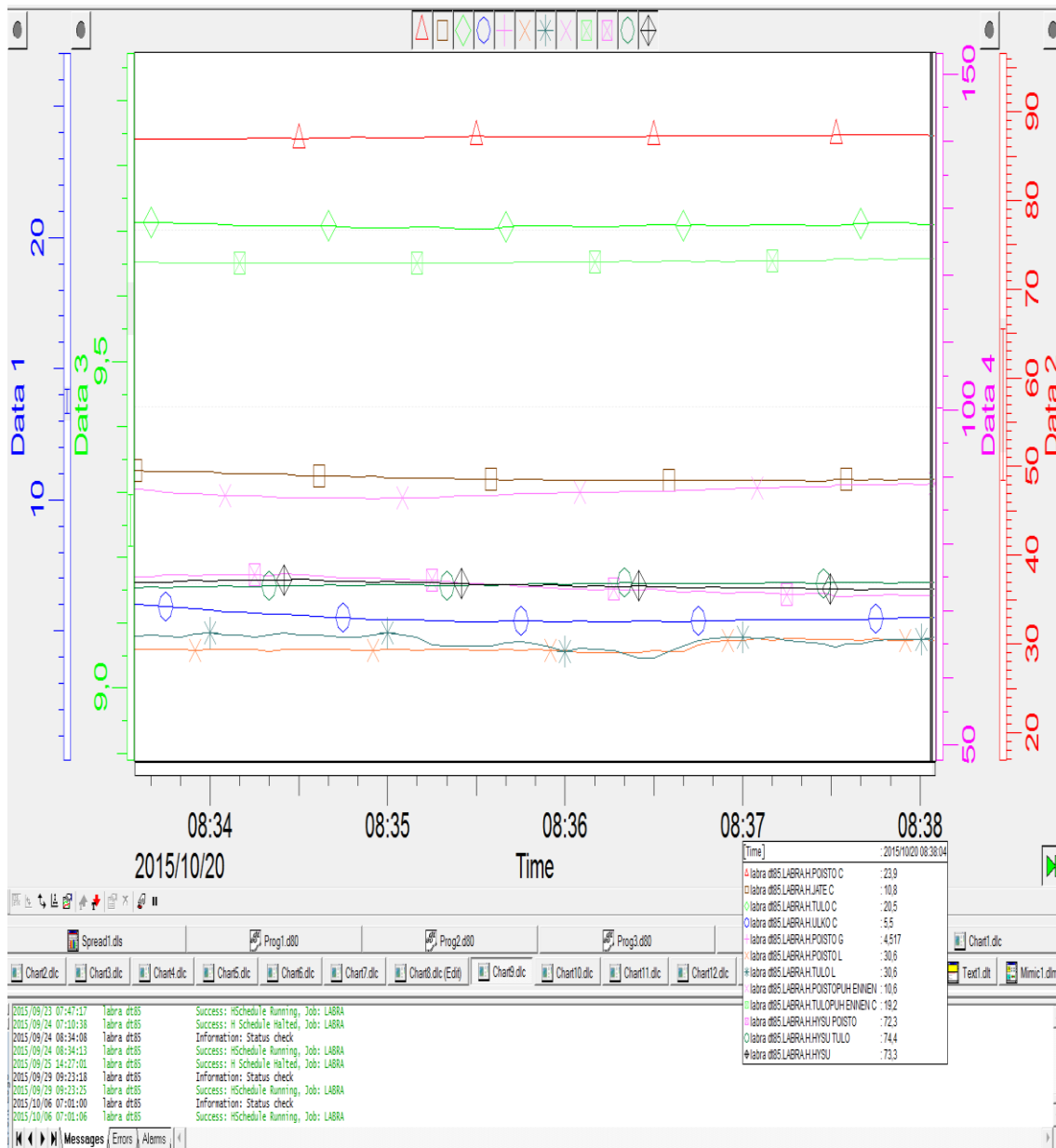
Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 20.10.2015

Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset, joita käytettiin suorakaidekennosta saatujen mittaustuloksien analysointiin. Kennon läpi ajettava ilmamäärä oli 50 l/s.



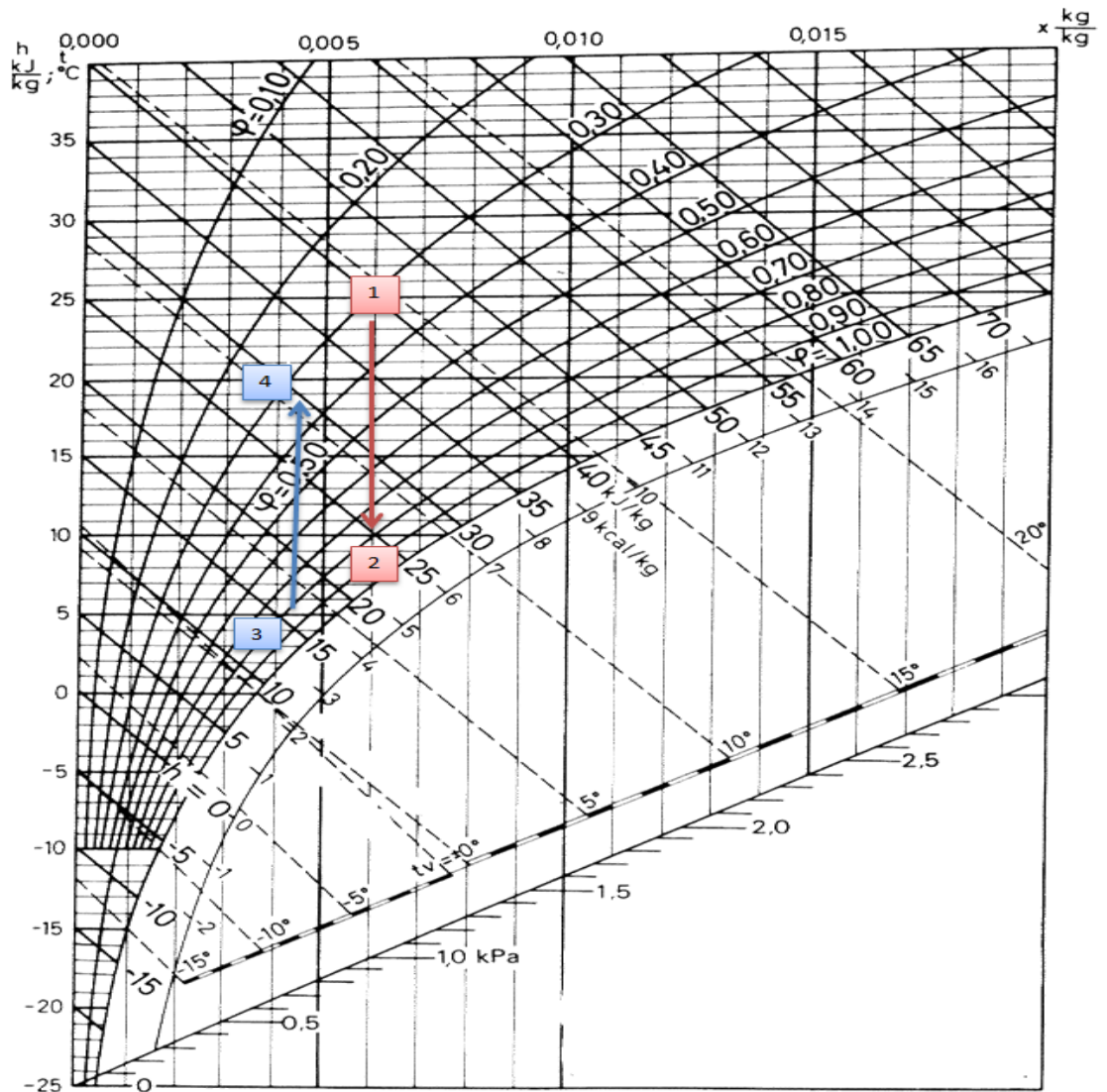
Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittaus 30 l/s

Suorakaidekennon lämpötilahyötysuhdemittauksesta saadut tulokset. Ilmavaihtokoneilla vaihdettava ilmamäärä oli 30 l/s.



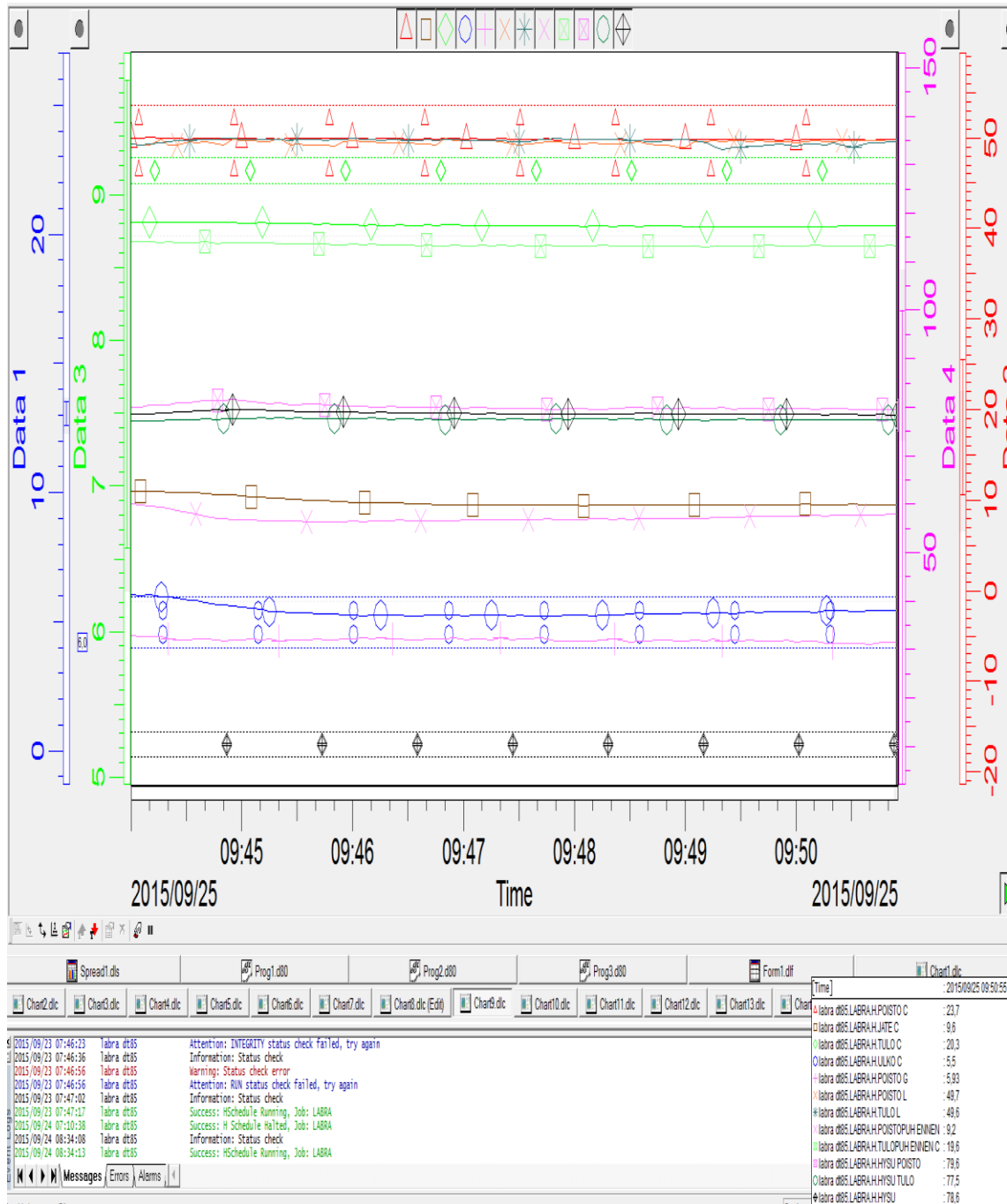
Yhdistelmäkennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa

Esitetynä yhdistelmäkennon tilapiirros Mollier-diagrammissa. Kuvatut tilapisteen: (1) Koneeseen virtaava poistoilma, (2) koneesta puhallettava jäteilma, (3) koneeseen virtaava raitisilma, (4) koneesta puhallettava tuloilma



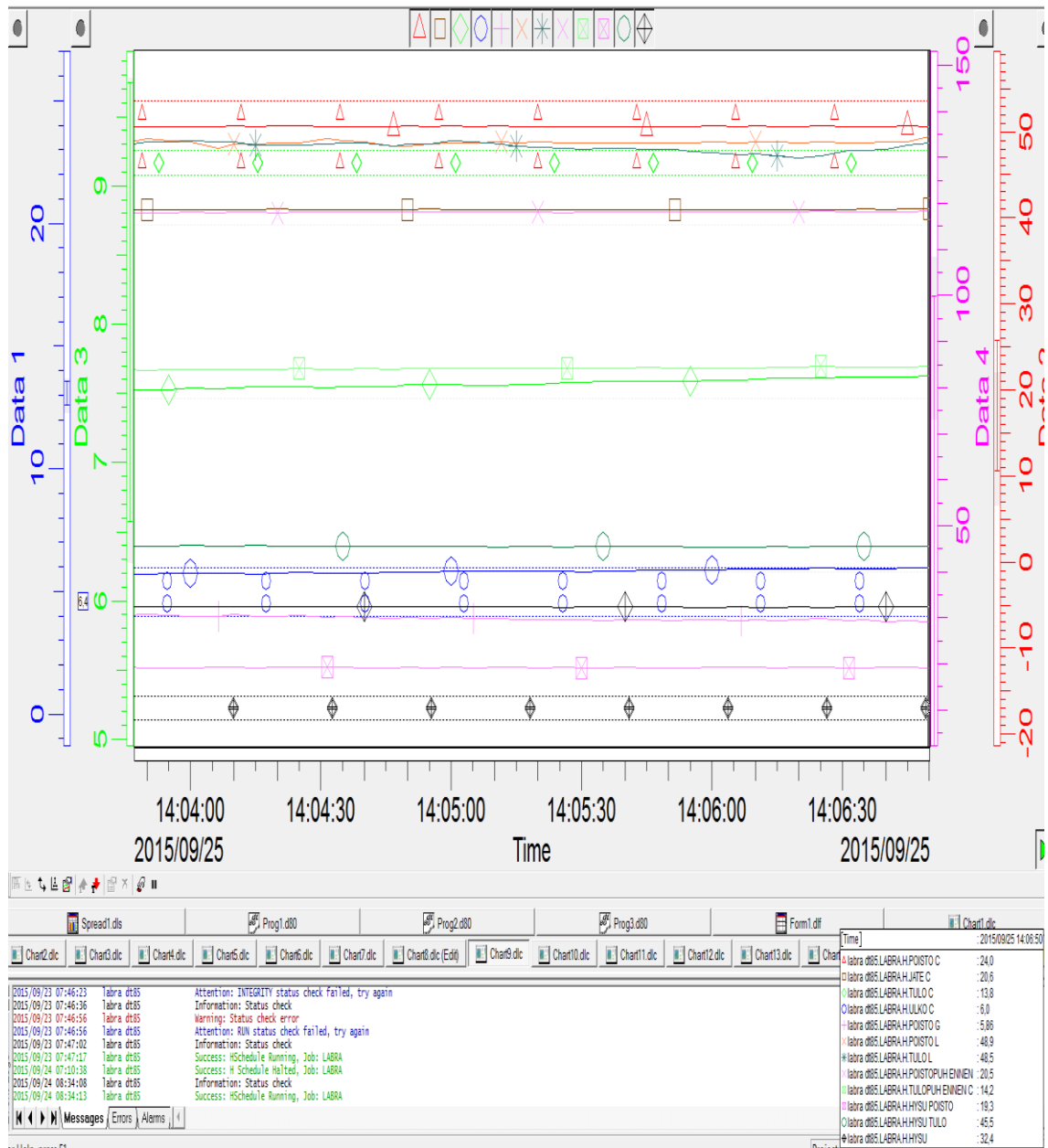
Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 25.9.2015

Alumiinikennolle suoritetusta lämpötilahyötysuhdemittauksesta saadut tulokset. Mittaus-
tuloksia käytettiin yhdistelmäkennolle saatujen tuloksien vertailuun.



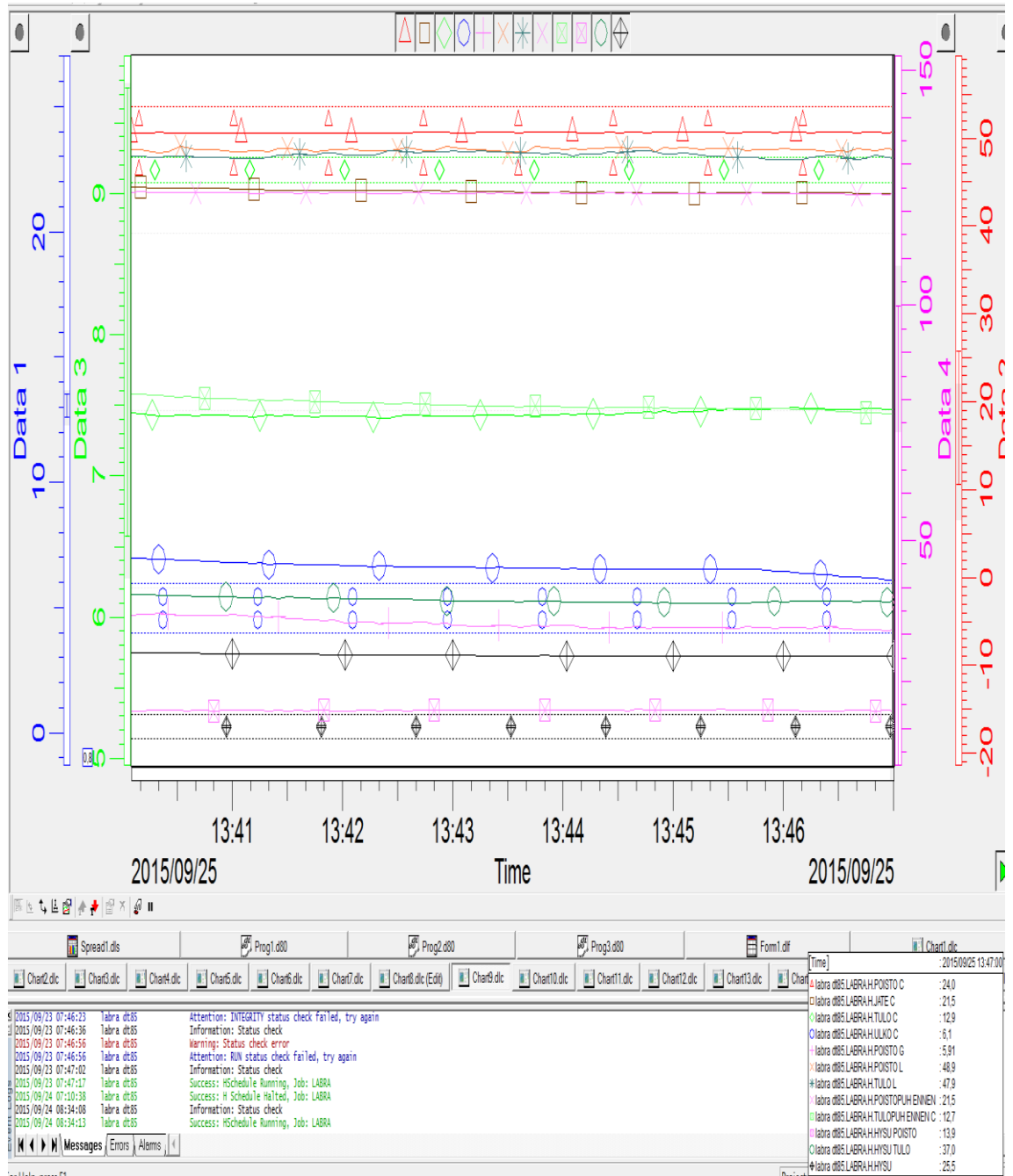
Yhdistelmäkennon lämmönjohtavuusmittaus

Yhdistelmäkennolle suoritetun mittauksen tulokset, joissa tarkasteltiin lämmönjohtumista lämmönsiirrinmateriaalissa.

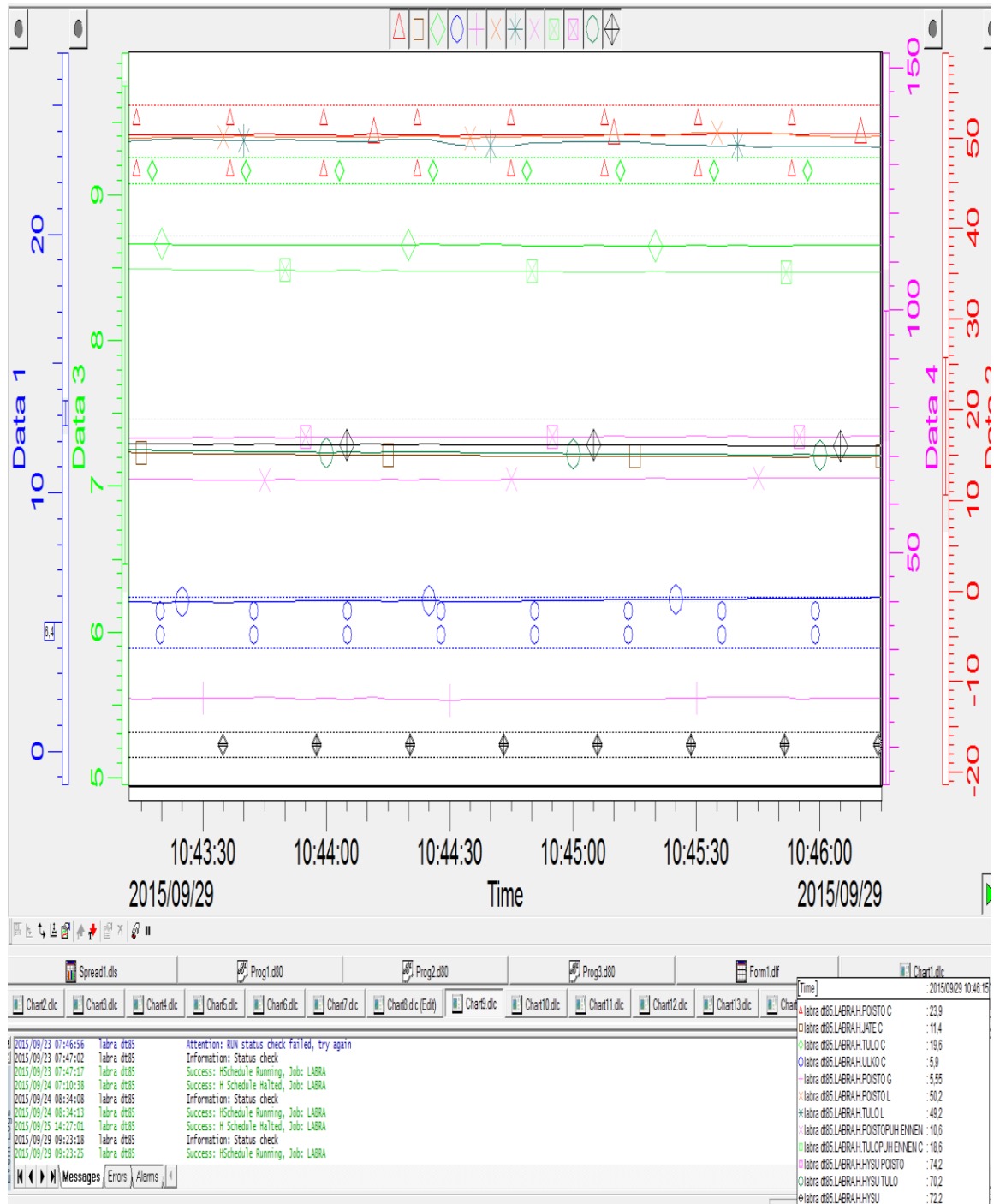


Alumiinikennon lämmönjohtavuusmittaus

Alumiinikennolle suoritettu mittaus, jossa tarkasteltiin lämmönjohtumista alumiinissa hyötysuhteiden avulla.

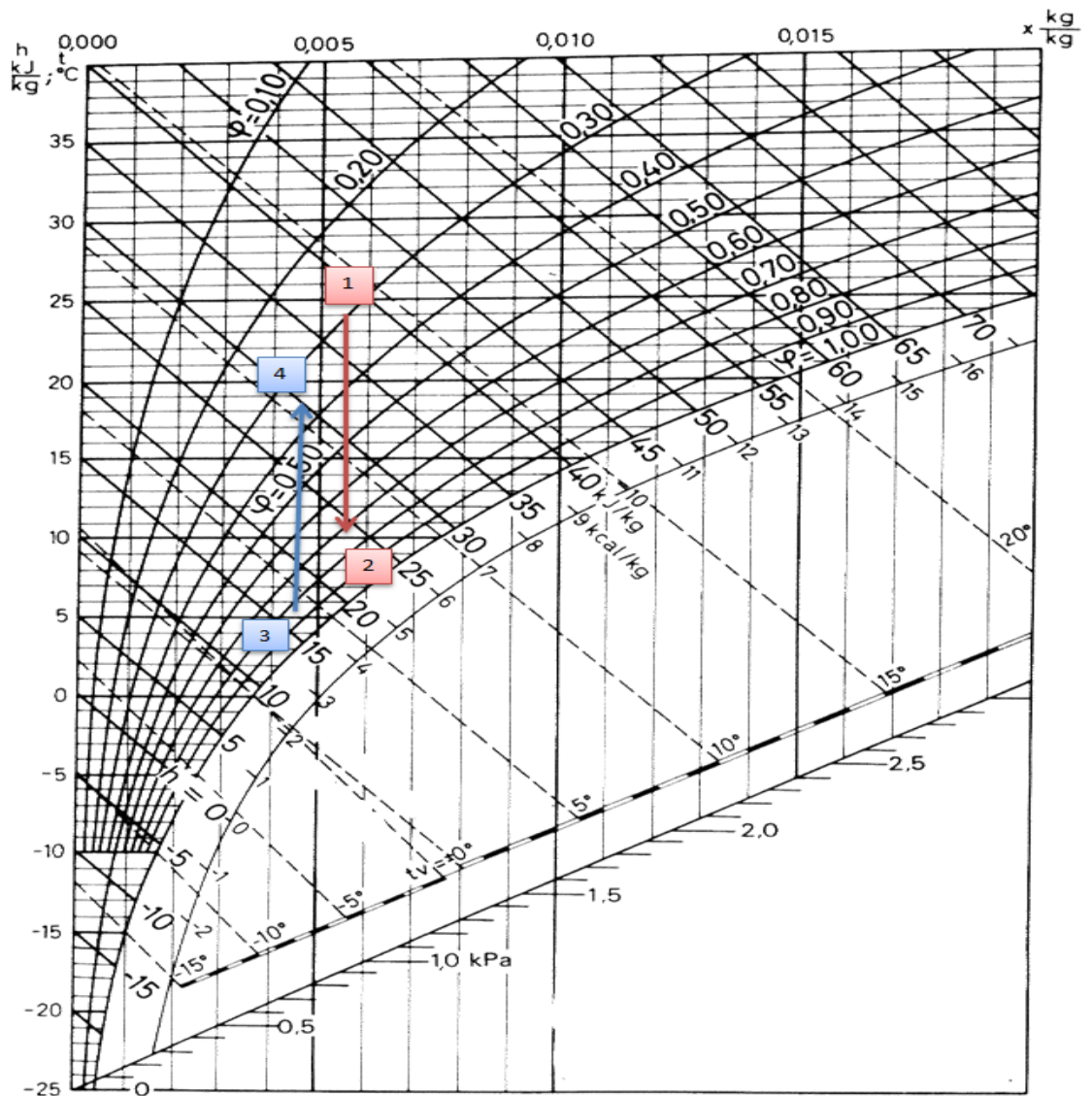


Sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus

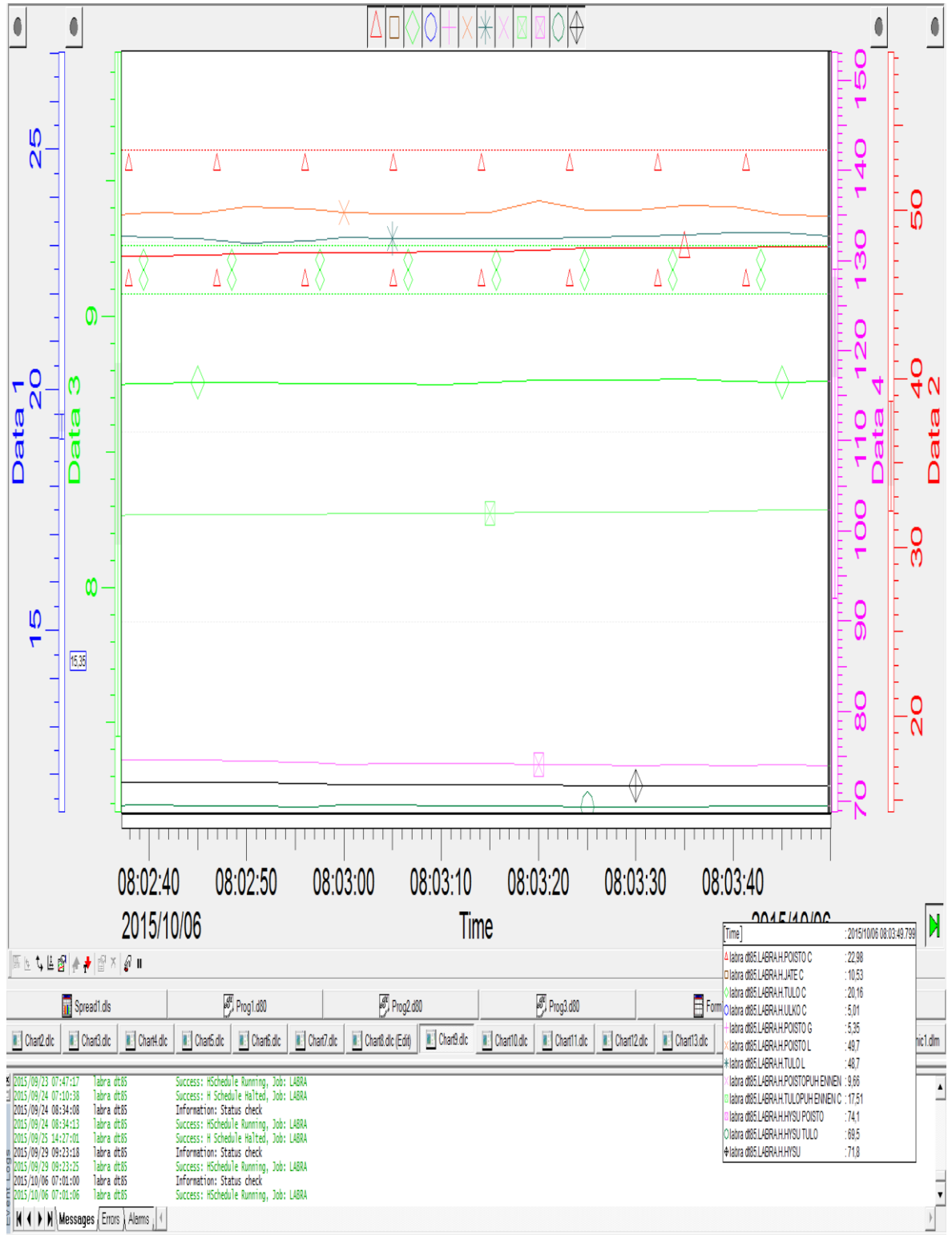


Sektorikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa

Esitetynä sektorikennon tilapiirros Mollier-diagrammissa. Kuvatut tilapisteet: (1) Koneeseen virtaava poistoilma, (2) koneesta puhallettava jäteilma, (3) koneeseen virtaava raitisilma, (4) koneesta puhallettava tuloilma

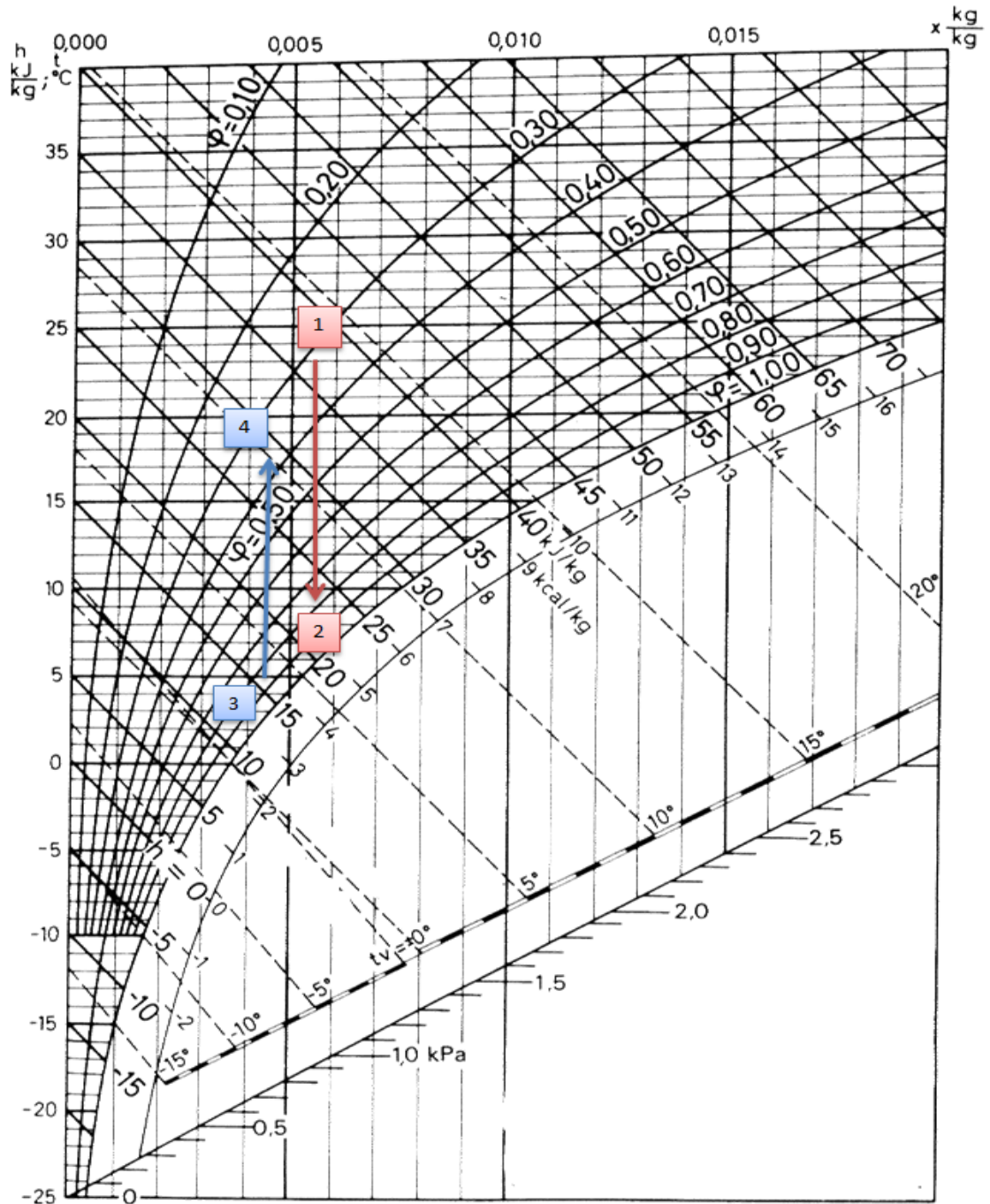


Pinnoitetun sektorikennon lämpötilahyötysuhdemittaus

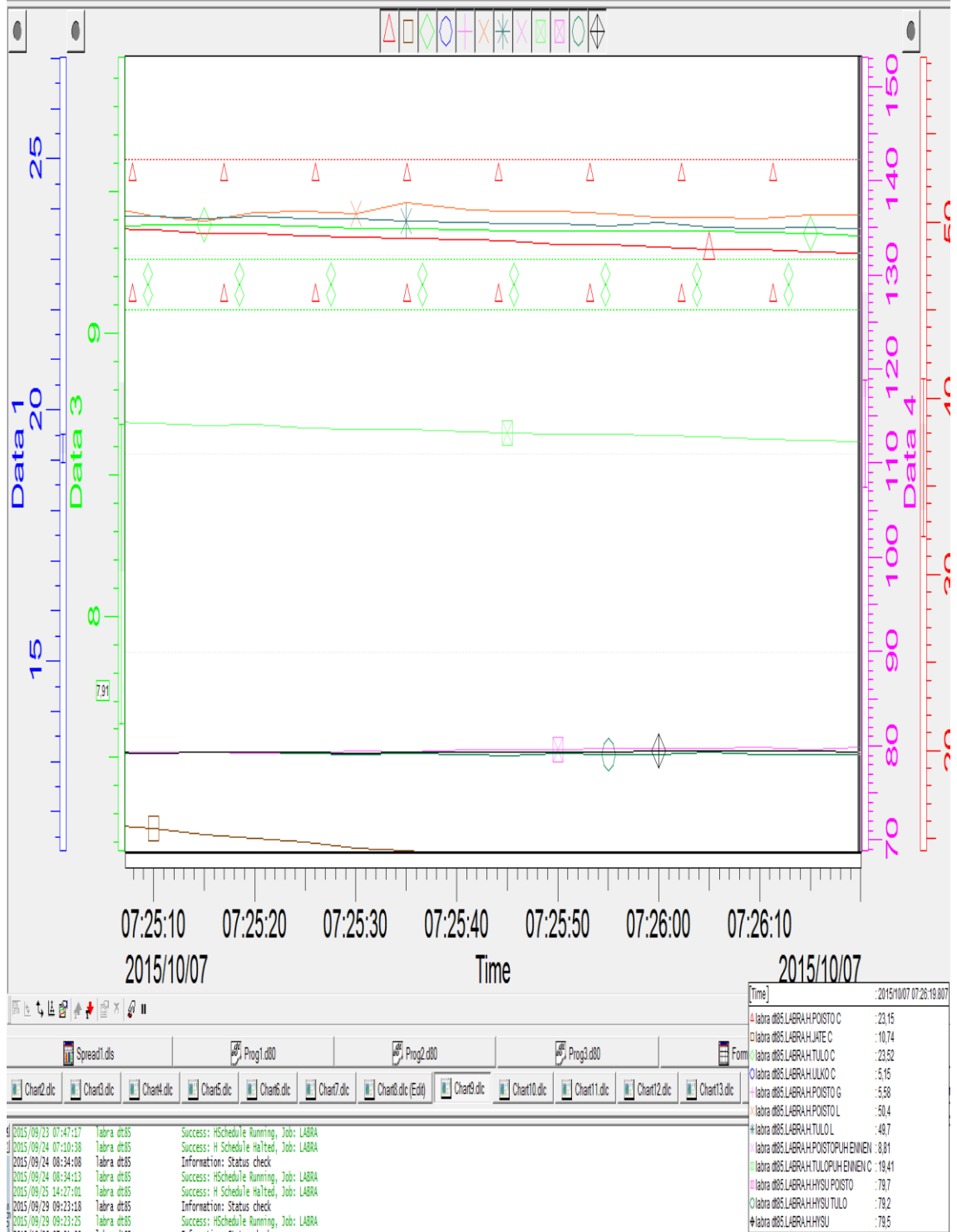


Pinnoitetun sektorikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa

Esitetynä pinnoitetun sektorikennon tilapiirros Mollier-diagrammissa. Kuvatut tilapistet:
 (1) Koneeseen virtaava poistoilma, (2) koneesta puhallettava jäteilma, (3) koneeseen virtaava raitisilma, (4) koneesta puhallettava tuloilma

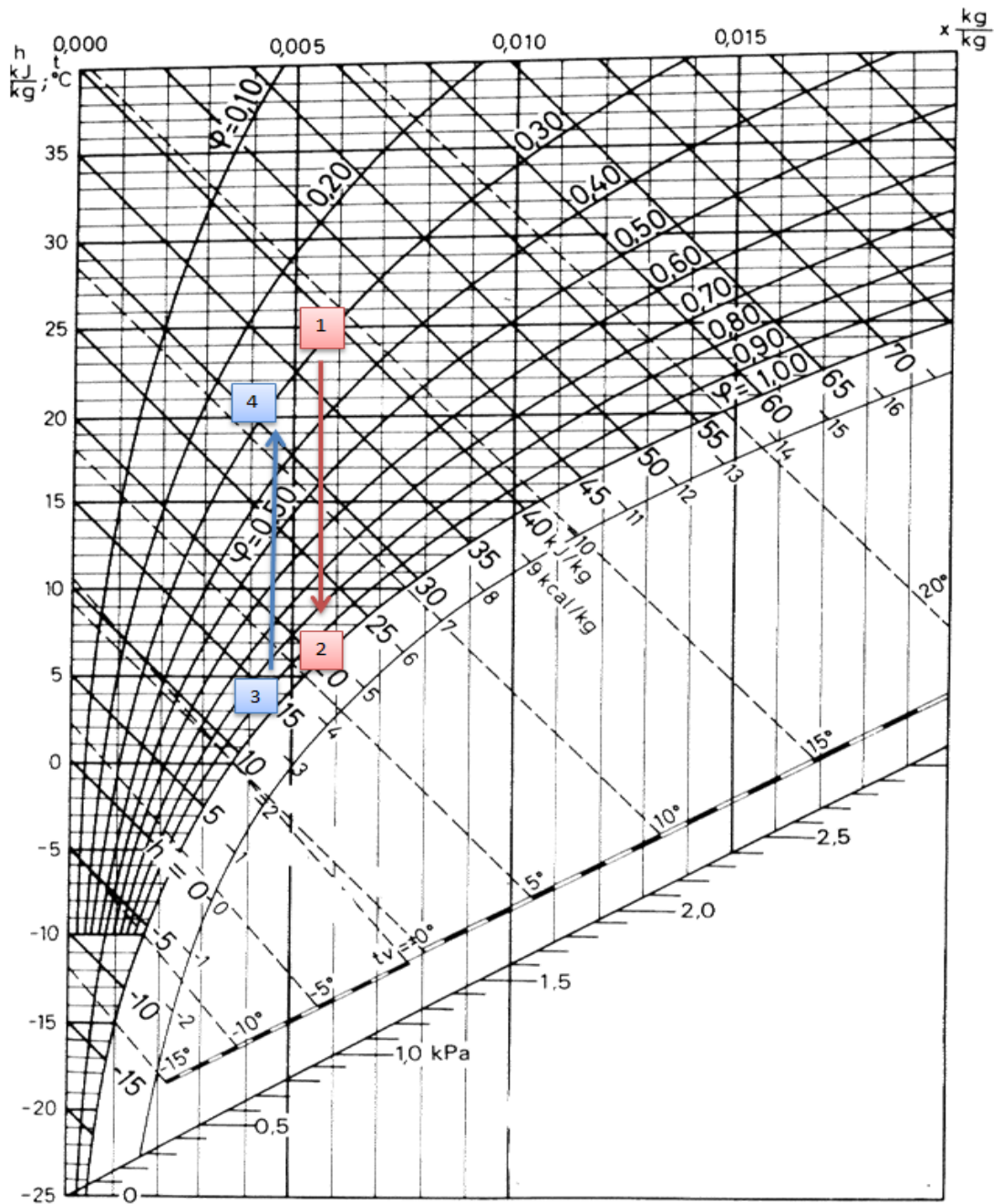


Pinnoitetun alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemitta



Pinnoitetun alumiinikennon lämmönsiirtoprosessi Mollier-diagrammissa

Esitetynä pinnoitetun alumiinikennon tilapiirros Mollier-diagrammissa. Kuvatut tilapistet: (1) Koneeseen virtaava poistoilma, (2) koneesta puhallettava jäteilma, (3) koneeseen virtaava raitisilma, (4) koneesta puhallettava tuloilma



Alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittaus 6.10.2015

Nykyisen alumiinikennon lämpötilahyötysuhdemittauksen tulokset, joita käytettiin mattamustan alumiinikennon tuloksien vertailuun.

