

Eero Ketonen

## MAALIN JÄÄHDYTYKSEN NOPEUTTAMINEN

Tekniikan ja merenkulun koulutusohjelma

2014

## MAALIN JÄÄHDYTYKSEN NOPEUTTAMINEN

Ketonen, Eero  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja merenkulun koulutusohjelma  
kesäkuu 2014  
Ohjaaja: Tommila, Timo  
Sivumäärä: 36  
Liitteitä: 6

Asiasanat: maali, jäähdytys, punamulta, keittomaali

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten Uulatuote oy:n punamultamaalin tuotannossa oleva pullonkaula voidaan poistaa. Nykyisellään keittämällä valmistettu maali pumpataan varastosäiliöön, jossa se saa jäähtyä, kunnes se on riittävän viileää purkittavaksi. Omavalmisteisen jäähdytysjärjestelmän avustuksella tähän kuluu aikaa noin kahdeksantoista tuntia. Säiliön tilavuus on 3000 litraa, joka rajoittaa tällä hetkellä enimmäispäivätuotannon tähän.

## SPEEDING UP THE COOLING OF PAINT

Eero, Ketonen

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme Technology and Seafare

june 2014

Supervisor: Tommila, Timo

Number of pages: 36

Appendices: 6

Keywords: paint, cooling, falu red, rödfärg

The purpose of this thesis was to find out ways to remove a bottleneck in Uulatuote Oy Ltd's falu red paint manufacturing process. As of now falu red paint, after being manufactured by process that includes heating, is just pumped to a storage vessel where, aided by home-made cooling system, it takes eighteen hours to cool into appropriate canning temperature. The size of the vessel is 3000 liters, which currently sets the daily maximum production rate.

## SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO	5
KÄYTETTYJÄ LYHENTEITÄ	6
.. Lämmönvaihtimet	6
.. Jäähdytysrivat	6
.. Säteilily	6
FAKTOJA LAITTEISTOSTA	7
FAKTOJA MAALISTA	9
.. Lämpökapasiteetti	9
.. Maalin lämmönjohtavuus	11
.. Viskositeetti	13
.. Tiheys	15
LÄMMÖN SIIRTYMINEN ASTIASTA VETEEN JA ILMAAN	16
.. Lämmön siirtyminen ilmaan	16
.. Lämmön siirtyminen veteen	21
.. Kylmäpankin koon kasvattaminen	24
LÄMMÖNVAIHTIMET	25
.. Ilmalämmönsiirtimet	26
.. Osittaisjäähdytys astiassa	27
.. Ilmalämmönsiirrin lyhemmälle lämmönvaihtimelle	28
.. Moniputkinen lämmönvaihdin	29
JÄÄHDYTYSRIVAT	31
ASTIAN VÄRI	33
JOHTOPÄÄTÖS	34
<u>LÄHTEET.....</u>	<u>35</u>

## 1 JOHDANTO

Kokemäen Kauvatsalla sijaitseva Uulatuote oy:n maalitehdas on erikoistunut perinne-  
maaleihin, suurimpina tuoteryhminä keittomaalit ja pellavaöljymaalit. Yrityksellä on pa-  
rikymmentä työntekijää ja sen liikevaihto on n. 2,5 M€. [UULA1]

Uulatuotteen punamullanvalmistuslaitteisto käsittää pääosiltaan kaksi 1500 litraista  
höyryllä lämmitettyä keittoastiaa, joista maali pumpataan 3000 litran vetoiseen varasto-  
astiaan, josta se voidaan edelleen, sen jäähtyttyä, pumpata purkituspisteelle. Tämän as-  
tian vieressä on toinen 4000 litran vetoinen astia, joka voidaan myös tarvittaessa ottaa  
maalivarastoksi. Yhden 1500 litran panoksen keitto kestää noin kolme tuntia, ja täyden  
varastosäiliön jäähtymiseen menee noin vuorokausi. Maalin jäähtyminen aiheuttaa koko  
tuotantoprosessiin ei-toivotun pullonkaulan, joka estää tulevaisuuden tuotannon laajene-  
misen ja Uulatuote toivoo (tai toivoi syksyllä 2012) tapoja, jolla jäähtymistä voidaan  
nopeuttaa.

Nykyisellään maaliastian jäähdytystä pyritään nopeuttamaan valelemalla sitä kylmällä  
vedellä, jota jäähdytetään kompressorilla; tämä järjestelmä on valmistettu itse Uulan ti-  
loissa aiemmin toimineen meijerin jäämistöön kuuluneesta maidonjäähdyttimestä.

Alustavasti toivottiin selvitettävän, kuinka paljon nykyistä järjestelmää olisi mahdol-  
lista parantaa ja onko järkevää rakentaa vastaava järjestelmä myös viereiseen 4000 lit-  
ran säiliöön.

Lisäksi päätettiin tutkia muita vaihtoehtoja: säiliön jäähdytysrivoitusta, maalaamista  
lämpösäteilyvaikutuksen lisäämiseksi, sekä vaelun korvaamista lämmönvaihtimella.

## 2 KÄYTETTYJÄ LYHENTEITÄ

$U$  = lämpövirta [W]  
 $Q$  = lämpöenergia [J]  
 $C$  = lämpökapasiteetti [J/(gK)]  
 $k$  = materiaalin konduktanssi [W/(mK)]  
 $h$  = rajapinnan konduktanssi [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $T$  = lämpötila  
 $L$  = korkeus, paksuus, ominaispituus [m]  
 $D$  = halkaisija [m]  
 $d$  = etäisyys  
 $Nu$  = Nusselt'n numero  
 $Pr$  = Prandtl'n numero  
 $Re$  = Reynolds'n numero  
 $Gr$  = Grashof'n numero  
 $\nu$  = kinemaattinen viskositeetti  
 $\mu$  = dynaaminen viskositeetti  
 $E$  = virhe

### 2.1 Lämmönvaihtimet

$U_D$  = lämpövirta nesteiden välillä  
 $D_o$  = sisäputken ulkosäde  
 $D_i$  = sisäputken sisäsäde  
 $D_e$  = ulkoputken verrannaissäde  
 $h_o$  = ulkopinnan konvektiivinen vastus  
 $h_i$  = sisäpinnan konvektiivinen vastus

### 2.2 Jäähdytysrivat

$m$  = rivan lämmönsiirtokerroin  
 $\tau$  = rivan paksuus

### 2.3 Säteily

$\sigma$  = Boltzmann'n vakio  
 $\varepsilon$  = emissiivisyyskerroin

### 3 FAKTOJA LAITTEISTOSTA

Mitattiin Uullalla nyt käytössä olevan laitteiston ominaisuuksia.

- Mittanauhaa apuna käyttäen selvitettiin säiliöiden ulkomitat:

	<i>Tilavuus [l]</i>	<i>Säde [cm]</i>	<i>Korkeus [cm]</i>	<i>Paksuus [mm]</i>
<b>Nykyinen säiliö</b>	3000	61 → 66	221	3
<b>Viereinen säiliö</b>	4000	80	210	3

Tehtiin tarkastuslasku ja huomattiin, että mittauksissa on selvästi ollut virheitä:

$$\pi \cdot r^2 \cdot h \Rightarrow \pi \cdot (0,61 \text{ m})^2 \cdot 2,21 \text{ m} = 2,58 \text{ m}^3 \quad \text{ja}$$

$$\pi \cdot (0,80 \text{ m})^2 \cdot 2,10 \text{ m} = 4,22 \text{ m}^3 \quad . \quad \text{Ainakin nykyisen säiliön säde on arvioitu}$$

alakanttiin. Säiliön keskikohdassa on täyttöventtiili, joten sekä säteen, että halkaisijan mittaaminen oli vaikeaa. Päätetään lisätä mitattuun säteeseen 6 cm; olettaen korkeus oikein mitatuksi, tämä antaa tilavuudeksi

$$\pi \cdot (0,66 \text{ m} - 0,003 \text{ m})^2 \cdot (2,21 \text{ m} - 2 \cdot 0,003 \text{ m}) = 2,99 \text{ m}^3 \quad .$$

- Pinta-alat edellisen perusteella:  $D = 2 \cdot r \cdot \pi$ ;  $A_{\text{kylki}} = D \cdot L$ ;  $A_{\text{pää}} = 2 \cdot (\pi \cdot r^2)$

	<i>Kylki [m<sup>2</sup>]</i>	<i>Päät [m<sup>2</sup>]</i>
<b>Nykyinen säiliö</b>	9,16	1,36
<b>Viereinen säiliö</b>	10,56	2,01

- Molempien säiliöiden seinämän paksuus: 3 mm.
- Ilmatilaa maalin päältä säiliön kanteen: 15 cm.
- Olemassa olevan putkituksen ulkopaksuus 6 cm, sisäpaksuutta ei voitu mitata, mutta oletetaan laskuissa olevan 2 tuumaa.

- Maalin virtausnopeus: noin 90 l minuutissa. ( $\frac{1400 \text{ l}}{16 \text{ min}} = 87.5 \text{ l/min}$ ).

- Mitattiin sähkönkulutusta. Sekoitin: 1,310 kW, kiertopumppu: 0,901 kW, kylmäkone: 1,035 kW. Otetaan jäähtymisajaksi ilmoitettu 18 h ja sekoittimen käyttöajaksi 15 min/h, saadaan ~ 41 kWh.

$$( (0,25 \cdot 1,310 \text{ kW} + 1,035 \text{ kW} + 0,901 \text{ kW}) \cdot 18 \text{ h} = 40,743 \text{ kWh} )$$

- Kiertopumpun nostoteho: tyyppikilven mukaan 100 l/min.
- Vesivalellun keräyskaukalosta pohjaan mitattiin tasan 40 cm, siten nykyisen säiliön vedellä valellun osan pinta-ala on:  $(2,21 \text{ m}^2 - 0,4 \text{ m}^2) \cdot 4,15 \text{ m} = 7,51 \text{ m}^2$ .
- Veden peittämä osa seinämästä (yksikkö cm, K = kuiva, M = märkä):

<i>K</i>	11	5	8	9	3	16	6	12	13	67	7	11	17	16	5
<i>M</i>	7	8	25	11	7	4	3	3	14	9	25	5	11	65	5

Yhteensä tämä tekee 206 cm kuivaa, 202 cm märkää pintaa. Kastellun alueen pinnasta 49,5 % on todella märkää, eli 3,72 m<sup>2</sup>.

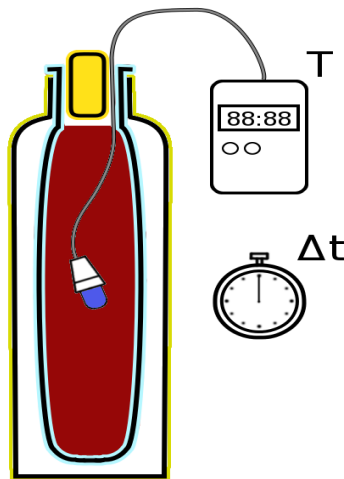
Mittaus on suoritettu vesinorojen alaosasta. Norot kapenevat hieman alaspäin mennessään, josta syntyy arvioon pieni virhe.



## 4 FAKTOJA MAALISTA

Jo varhaisessa vaiheessa kävi ilmi, että etenkin lämmönvaihdinlaskut vaativat maalin dynaamisten ominaisuuksien tuntemusta. Keittomaali ei ole läsnä taulukkokirjoissa, siispä avaindata piti selvittää kokeellisesti. Kenties olisi saatu riittävän hyviä tuloksia valistuneilla arvauksilla, käyttämällä suurimman yksittäisen ainesosan, eli veden arvoja; viskositeetti kuitenkin on aistinvaraisestikin arvioiden paljon vettä suurempi. Yllätyksen mittauksista teki lämmönjohtavuus, joka oli paljon oletettua matalampi.

### 4.1 Lämpökapasiteetti



*Kuva 1: lämpökapasiteetti-  
mittausjärjestely*

Lämpökapasiteetin mittaamiseen rakennettiin kuvan 1 mukainen järjestely. Mittaus nojaa lämpövirtakalorimetrin ajatukseen, eli maalia on astiassa, jonka lämmönjohtavuus tunnetaan. Mitataan, kuinka kauan siltä kestää jäähtyä tietystä lämpötilasta toiseen; tämän avulla voidaan arvioida aineesta poistuva energia, jolloin päästään käsiksi maalin lämpökapasiteettiin.

Perinteisesti kalorimetrin absoluuttinen lämmönjohtavuus, eli ”W/K -arvo” tunnetaan, ja voidaan arvioida suoraan mitattavan aineen lämpökapasiteetti kuluvasta ajasta. Kotitekoisen kalorimetrin lämmönjohtavuutta ei kuitenkaan tunneta, joten se on selvitettävä vertaamalla maalin jäähtymiseen kuluvaa aikaa sellaisen aineen jäähtymisaikaan, jonka lämmönjohtavuus tunnetaan. Tunnetuksi aineeksi valittiin vesi.

Ongelmaa lähdetään lähestymään tunnetusta lainalaisuudesta, lämpökapasiteetista:  $C=Q/\Delta T$  [KT 3], joka kaavana toteaa, että ”lämpökapasiteetti on sitä suurempi, mitä vähemmän mitattu lämpötila muuttuu tietyn energiamäärän sitoutuessa vakiomäärään ainetta.” Vastaavasti  $Q$ , eli energiasisältö voidaan ilmaista muodossa, joka johtuu yksikkötarkastelusta  $[W]=[J]/[s]$ ; näin mukaan saadaan aika.

Mittaukseen aiheuttaa pienen teoreettisen ongelman se, että lämpövirta on riippuvainen lämpötilaerosta sisä- ja ulkoseinän välillä ja kun lämpötila laskee, virta laskee. Lämpövirran tarkka arvo tulee siten myös riippuvaiseksi ajanhetkestä. Kuitenkin lähempi tarkastelu paljastaa seuraavaa:

$$C = \frac{U \cdot t}{\Delta T} \Leftrightarrow \Delta T = \frac{U \cdot t}{C}$$

Lämpötilaeron  $\Delta T$  tuleminen yhteiseksi tekijäksi tarkoittaa, että sillä ei tässä tapauksessa ole merkitystä, jolloin kaava supistuu muotoon, joka voidaan ratkaista ja siihen täydennetään mittaamalla saadut arvot:

$$\frac{U \cdot t_{\text{vesi}}}{C_{\text{vesi}}} = \frac{U \cdot t_{\text{maali}}}{C_{\text{maali}}} \Rightarrow C_{\text{maali}} = C_{\text{vesi}} \cdot \frac{t_{\text{maali}}}{t_{\text{vesi}}} = 4,1872 \text{ Jg/K} \cdot \frac{6392 \text{ s}}{6451 \text{ s}} \approx 4,15 \text{ Jg/K}$$

Vastaukseksi saadaan, että maalin lämpökapasiteetti vastaa hyvin pitkälle vettä.

Laskussa on lisäksi se epätarkkuus, sillä molempien aineiden lämpökapasiteetti riippuu myös lämpötilasta, vedellä se on lämpötilassa  $70^\circ\text{C}$   $4,1895 \text{ Jg/K}$  ja  $60^\circ\text{C}$   $4,1843 \text{ Jg/K}$  [ENG 2], joista otettiin käytetty arvo lineaarisesti interpoloimalla:

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \cdot \frac{x - x_0}{x_1 - x_0},$$

$$4,1843 \text{ Jg/K} + (4,1895 \text{ Jg/K} - 4,1843 \text{ Jg/K}) \cdot \frac{65,5^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{70^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}} = 4,1872 \text{ Jg/K}$$

Tarkastellaan vielä mittaustarkkuutta. Voidaan katsoa, että ajanotto oli korkeintaan 5 s tarkka, tämä tapahtui käsin käyttäen sekuntikelloa. Interpoloitu lämpökapasiteetti arvioidaan korkeintaan  $0,005 \text{ Jg/K}$  tarkaksi.

Fraktionaalista epävarmuutta käytetään kerto- ja jakolaskujen epävarmuuden määrittelyyn:

$$E = \left| \frac{\text{virhe}}{\text{mittausalue}} \right| \quad [\text{UNCE1}],$$

$$E_{\text{aika1}} = \frac{5 \text{ s}}{6392 \text{ s}} = 0,0008 \quad E_{\text{aika2}} = \frac{5 \text{ s}}{6451 \text{ s}} = 0,0008$$

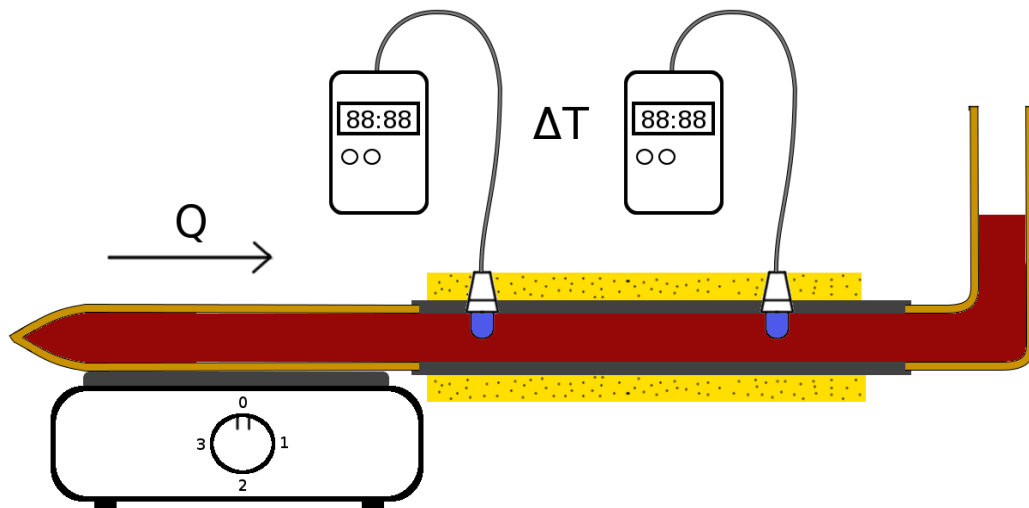
$$E_{\text{veden lämpökapasiteetti}} = \frac{0,005 \text{ Jg/K}}{4,1872 \text{ Jg/K}} = 0,001$$

$$E_{\text{kok}} = E_{\text{aika1}} + E_{\text{aika1}} + E_{\text{veden lämpökapasiteetti}} = 0,0008 + 0,0008 + 0,001 \approx 0,002$$

Tarkkuudeksi saadaan siten 0,2 %, eli  $4,15 \text{ Jg/K} \cdot 0,002 \approx 0,01 \text{ Jg/K}$ .

Lämpökapasiteetti on  $(4,15 \pm 0,01) \text{ Jg/K}$ .

## 4.2 Maalin lämmönjohtavuus



Kuva 2: lämmönjohtavuusmittausjärjestely

Rakennettiin kuvan 2 mukainen mittajärjestely. Se perustuu staattisen tilan mittaukseen putken toista päätä lämmitettäessä. Putki on kuparia, mutta muuttuu mittausalueella PVC-vesijohdoksi rinnakkaisjohtumisen välttämiseksi. Lämmitystä jatketaan niin kauan, että kumpikaan lämpömittari ei muuta arvoaan. Lähtökohtana käytetään yksiuotteista lämmönjohtumisen peruskaavaa:

$$U = k \cdot \frac{A \cdot (T_{\text{alku}} - T_{\text{loppu}})}{L}$$

[PHT 2]. Kotitekoisen laitteen ominaisuudet selvitetään vertaamalla veteen samalla tavalla kuin viimekappaleessa. Tehdään oletus, että kun ensimmäisen mittarin luku vedellä ja maalilla on sama, myös lämpövirta mittarin kohdalla on likimain sama. Veden lämmönjohtavuus on  $0,30154 \text{ W/(mK)}$  [ENG 3]. Mittaukset:

	$T_1 [^{\circ}\text{C}]$	$T_2 [^{\circ}\text{C}]$
<b>Maali</b>	42,6	29,1
<b>Vesi</b>	42,6	35,9
<b>Ympäristö</b>	21,1	

$$\frac{k_{\text{vesi}} \cdot A \cdot \Delta T_{\text{vesi}}}{L} = \frac{k_{\text{maali}} \cdot A \cdot \Delta T_{\text{maali}}}{L} \Leftrightarrow k_{\text{vesi}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{vesi}}}{\Delta T_{\text{maali}}} \\ \Leftrightarrow 0,56 \text{ W/(mK)} \cdot \frac{7,7 \text{ K}}{14,3 \text{ K}} = 0,30154 \text{ W/mK}$$

Mittauksella todetaan, että maalin lämmönjohtavuus on jossain määrin vettä alempi, mikä oli yllätys, ottaen huomioon, että maali on suurilta osin vettä. Tässä karkeasti saatu arvo on kuitenkin ehdottomasti alaraja ja todellinen lämmönjohtavuus on enemmän. Tämä virhe johtuu lämmön siirtymisestä mittaustilanteen seinämiin.

Tutkitaan seinämiin johtumisesta syntyvää häviötä. L säädettiin 250 mm:ään, putken seinämän paksuus oli 2 mm, säde 12,8 mm ja styroksimuhvin paksuus 25 mm. Näiden lisäksi tiedetään styroxin ja PVC-muovin lämmönjohtavuudet: 0,190 ja 0,033 W/mK [ENG 3]. Pitää käyttää logaritmista keskiarvoa lämpöäripäiden välillä, joka mallintaa tilannetta, jossa jokaisella putken siivulla tietty määrä lämpövirrasta siirtyy seinämiin ja loput jatkavat matkaa.

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad [\text{PHT 55-56}].$$

$$T_{\text{vesi}} = \frac{(42,6^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}) - (35,9^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C})}{\ln((42,6^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}) / (35,9^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}))} = 17,942 \text{ K}$$

$$T_{\text{maali}} = \frac{(42,6^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}) - (29,1^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C})}{\ln((42,6^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}) / (29,1^\circ\text{C} - 21,1^\circ\text{C}))} = 13,656 \text{ K}$$

Putken sisä- ja ulkopinta-alan keskiarvo:

$$A = \frac{2 \cdot 0,0128 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m} \cdot \pi + 2 \cdot (0,0128 \text{ m} + 0,002 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) \cdot 0,25 \text{ m} \cdot \pi}{2} = 0,0413 \text{ m}^2$$

Tämän jälkeen lasketaan siten kuin putken ja muhvin termiset resistanssit olisivat sarjaan kytketty:

$$R_{\text{PVC}} = \frac{L}{A \cdot h} = \frac{0,002 \text{ m}}{0,0414 \text{ m}^2 \cdot 0,19 \text{ W}/(\text{mK})} = 0,254 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{styrox}} = \frac{0,025 \text{ m}}{0,0414 \text{ m}^2 \cdot 0,033 \text{ W}/(\text{mK})} = 18,299 \text{ K/W} \quad , \quad R_{\text{styrox}} + R_{\text{PVC}} = 18,553 \text{ K/W}$$

Lasketaan viimein seiniin siirtyvä lämpöenergia:

$$U_{\text{seinät, maali}} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{13,656 \text{ K}}{18,553 \text{ K/W}} = 0,736 \text{ W} \quad , \quad U_{\text{seinät, vesi}} = \frac{17,942 \text{ K}}{18,553 \text{ K/W}} = 0,967 \text{ W}$$

Veden tapauksessa lämpövirta putken läpi oli:

$$U = h \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{L} = 0,56 \text{ W}/(\text{mK}) \cdot \frac{\pi \cdot 0,0128 \text{ m}^2 \cdot 7,7 \text{ K}}{0,25 \text{ m}} = 0,0088 \text{ W}$$

Tämä osoittaa, että eristyksestä huolimatta valtaosa energiasta karkaa putken seinämiin, ja toiselle mittauspisteelle pääsee vain muutama prosentti lämmöstä, joka on ensimmäisellä mittauspisteellä. Ennako-oletuksen vastaisesti ei siten ole mieltä alkaa arvioimaan, miten paljon seinämät vääristävät alkuperäistä laskelmaa, vaan todellisuudes-

sa onkin niin, että mittauksen kohteena oli energiavirta maalista seinämiin, ei maalin läpi.

Arvioidaan vielä mittaustarkkuutta; fraktionaalisen epävarmuuden kaava jako- ja kertolaskuille:

$$E = \left| \frac{\text{virhe}}{\text{mittausalue}} \right| \quad [\text{UNCE1}].$$

Lämpötilan mittauksen epävarmuus on 0,05 °C, koska käytettiin mittaria, jonka näytön tarkkuus on 0,1, mutta lämpötilan muutoksen suunta tunnetaan. Mittauksia tehtiin 2 kpl kahdella mittarilla. Veden lämmönjohtavuuden tarkkuus on 0,01.

$$E_{\text{veden lämmönjohtavuus}} = \frac{0,01 \text{ W/(mK)}}{0,56 \text{ W/(mK)}} = 0,02, \quad E_{\text{maalin lämpötila}} = \frac{0,05 \text{ K}}{7,7 \text{ K}} = 0,007,$$

$$E_{\text{veden lämpötila}} = \frac{0,05 \text{ K}}{14,3 \text{ K}} = 0,003.$$

Yhteenlaskettu epävarmuus siis on:

$$E_{\text{kok}} = E_{\text{veden lämmönjohtavuus}} + E_{\text{maalin lämpötila}} + E_{\text{veden lämpötila}} = 0,02 + 0,007 + 0,003 = 0,03.$$

$$\text{Eli } 0,30154 \text{ W/(mK)} \cdot 0,03 = 0,01 \text{ W/(mK)}.$$

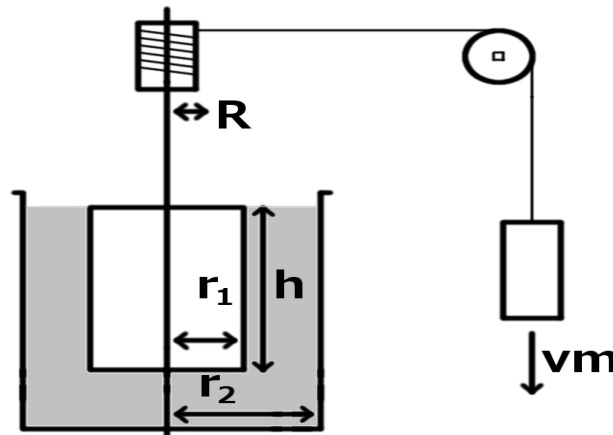
Lämmönjohtavuus on  $(0,30 \pm 0,01) \text{ W/(mK)}$ .

### 4.3 Viskositeetti

Viskositeettimittaus on joukossa siinä mielessä poikkeuksellinen mittaus, että sitä varten käytössä oli ihan oikea laboratoriomittalaite: rotaatioviskosimetri.

Rotaatioviskosimetri perustuu testattavassa nesteessä vakiovoimalla pyöritettävään sylinteriin: viskositeetti ja sylinterin pyörimisnopeus ovat kääntäen verrannollisia. Tyypillisessä sovelluksessa vakiovoima saadaan painovoiman vetämästä punnuksesta. Punnuksen putoamisnopeudesta voidaan myös mitata sylinterin pyörimisnopeus, kunhan painovoiman veto ja nesteen pyörimistä vastustava kitkavoima ovat asettuneet tasapainoon siten, että punnus putoaa tasaisella vakionopeudella. Tunnettaessa punnuksen putoamisnopeus ja paino, voidaan viskositeetti laskea suoraan niiden suhteesta kertomalla viskosimetrikohtaisella kertoimella. Kaavassa on lähtötilanne, jossa oletetaan, että painovoimaa vastustaa pelkästään nesteen jähmeydestä eli dynaamisesta viskositeetista aiheutuva voima. Ajatuksena on, että sylinterin pinnassa ja seinämällä neste on paikoillaan, ja että tavallaan sylinteri ja seinämä pyörivät vastakkaisiin suuntiin virtauksen ollessa niiden välissä laminaarista.

Oheisessa kuvassa  $r_1$  on sylinterin säde,  $r_2$  astian säde,  $h$  sylinterin korkeus,  $R$  punnuksen lankakelan säde,  $v$  punnuksen putoamisnopeus ja  $m$  punnuksen massa. Tilannetta



Kuva 3: rotaatioviskosimetri

mallinnetaan seuraavalla yhtälöllä, joka ei ota sylinterin pohjaan kohdistuvaa vastusta huomioon.

$$\eta = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} \cdot T \cdot \Omega, \quad T = m \cdot v \cdot R, \quad \Omega = \frac{v^2}{r}$$

Ideana on, että kaavan toissijaiset suuret siirretään yhtälön eteen ja todetaan, että yhtä hyvin niitä voitaisiin nimittää kertoimeksi  $k$ :  $\eta = k \cdot m/v$ . Tässä muodossa rotaatioviskosimetrin yhtälö yleensä esiintyy, ja  $k$  on saatu instrumentin valmistajalta käytetyllä viskosimetrillä sen ollessa  $3,89 \text{ s}^2$  tuloksen yksikön ollessa senttipoiseja, eli millipascalsekunteja. Oheiset kaavat ja kerroin saatiin rotaatioviskosimetrin käyttöohjeista.

Mittauksia ehdittiin tekemään vain 3 kpl, johtuen jatkuvista vaikeuksista itse instrumentin kanssa. Oli ongelmia sekä lämpötilaa hallitsevan kuumentimen, että valoporttien kanssa. Aiheeseen ei palattu myöhemmin, sillä mahdollisuus käyttää viskosimetriä oli luonteeltaan ainutlaatuinen.

Seuraava data saatiin:

$v$ [m/s]	$m$ [g]	Lämpötila [°C]	Viskositeetti [mPas]
0,048	25	28,7	2,03
0,050	20	19,3	1,55
0,071	40	28,6	2,19

Lasketaan keskiarvo, joka antaa kohtalaisen tarkkuuden:

$$\frac{(2,03 + 1,55 + 2,19) \text{ mPas}}{3} = 1,92 \text{ mPas}$$

Tutkitaan vielä mittauksen tarkkuutta: massa on hyvinkin tarkka, sillä käytettiin leimattuja punnuksia, joiden tarkkuudeksi arvioidaan 0,1 g. Nopeusmittari näytti kolme desimaalia, eli 0,001 m/s. Viskosimetrikertoimen tarkkuus oli  $0,01 \text{ s}^2$ .

$$E = \left| \frac{\text{virhe}}{\text{mittausalue}} \right| \quad [\text{UNCE1}]. \quad E_{\text{massa}} = \frac{0,0001 \text{ kg}}{(0,025 \text{ kg} + 0,020 \text{ kg} + 0,040 \text{ kg})/3} = 0,004$$

$$E_{\text{nopeus}} = \frac{0,001 \text{ m/s}}{(0,048 \text{ m/s} + 0,05 \text{ m/s} + 0,071 \text{ m/s})/3} = 0,02 \quad , \quad E_{\text{kerroin}} = \frac{0,01 \text{ s}^{-2}}{3,89 \text{ s}^{-2}} = 0,003 \quad .$$

Yhteensä epätarkkuus siis on:

$$E_{\text{kok}} = E_{\text{massa}} + E_{\text{nopeus}} + E_{\text{kerroin}} = 0,004 + 0,02 + 0,003 = 0,03 \quad .$$

Eli  $1,92 \text{ mPas} \cdot 0,03 = 0,06 \text{ mPas}$  .

Viskositeetti on  $(1,92 \pm 0,06) \text{ mPas}$ .

#### 4.4 Tiheys

Tiheyden mittaaminen oli suoraviivainen toimitus: taaratulla vaa'alla olevaan mittalasiin kaadettiin maalia 252,4 ml, joka painoi 299,3 g. Tämä tarkoittaa tiheyttä:  $1186 \text{ kg/m}^3$ .

Vaa'an tarkkuus oli 0,1 g ja mittalasin 0,1 ml, eli epävarmuus on:

$$E = \left| \frac{\text{virhe}}{\text{mittausalue}} \right| \quad [\text{UNCE1}].$$

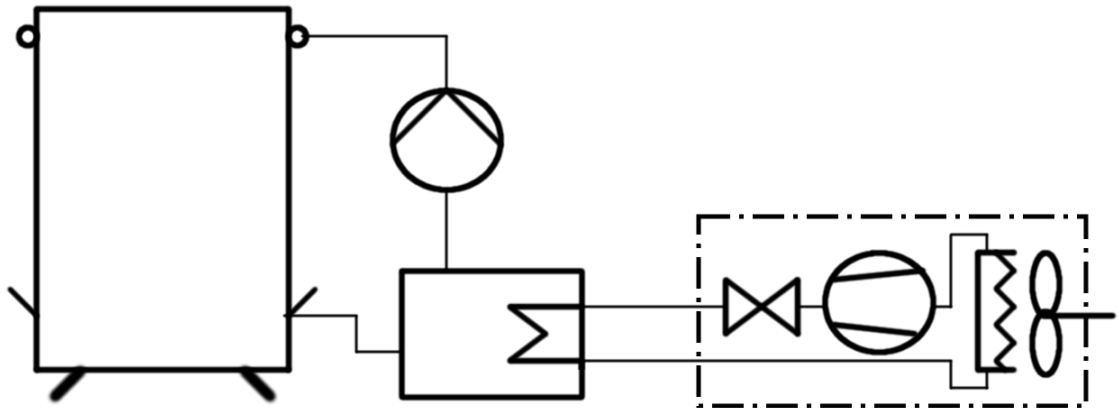
$$E_{\text{massa}} = \frac{0,1 \text{ g}}{299,3 \text{ g}} = 0,0003 \quad , \quad E_{\text{tilavuus}} = \frac{0,1 \text{ ml}}{252,4 \text{ ml}} = 0,0004 \quad .$$

Yhteensä  $E_{\text{kok}} = E_{\text{massa}} + E_{\text{tilavuus}} = 0,0003 + 0,0004 \approx 0,0007 \approx 0,01$  .

Eli  $1186 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,001 = 1 \text{ kg/m}^3$  .

Tiheys on  $(1186 \pm 1) \text{ kg/m}^3$ .

## 5 LÄMMÖN SIIRTYMINEN ASTIASTA VETEEN JA ILMAAN



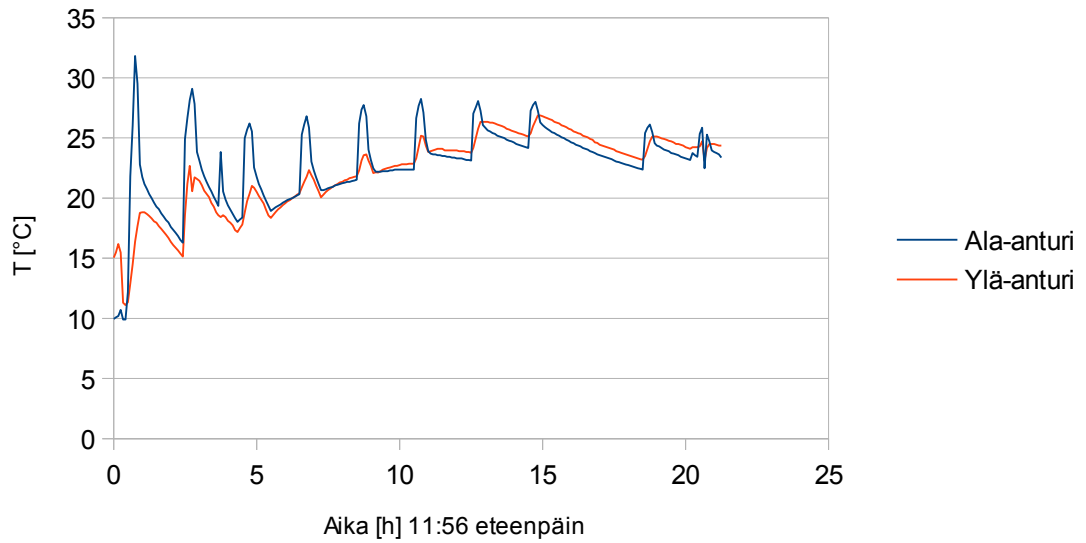
*Kuva 4: Nykyisen järjestelmän kaaviokuva*

Tässä kappaleessa pyrkimyksenä on tutkia nykyisen järjestelmän toimintaa ja arvioida, kuinka paljon sitä voidaan parantaa.

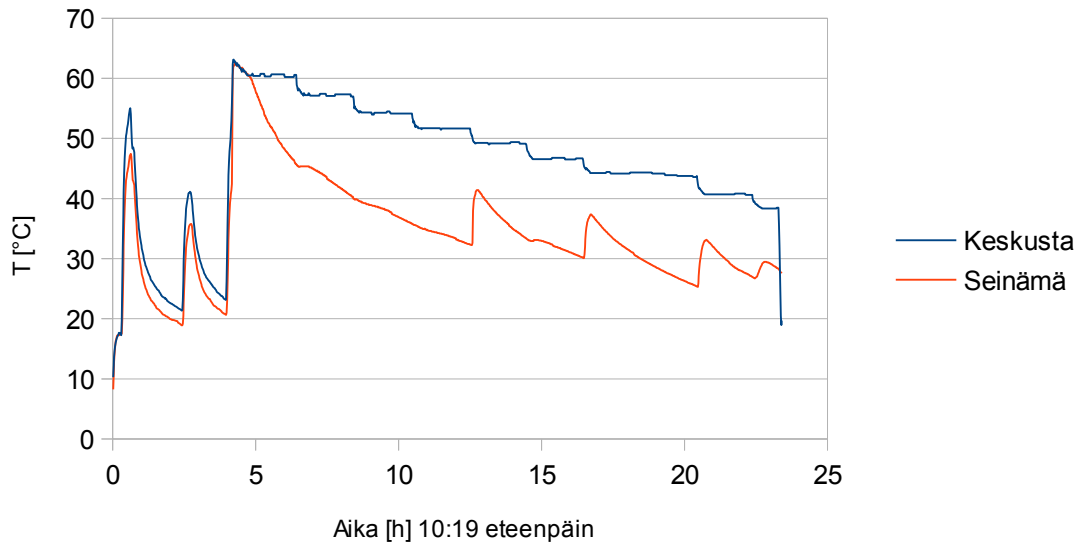
### *5.1 Lämmön siirtyminen ilmaan*

Ohessa mitatusta datasta koostettuja kuvaajia, jotka havainnollistavat jäähdysveden ja maalin lämpökäyttäytymistä ajan kuluessa. Mittaus A suoritettaessa jäähdyslaitteistolla oli termostaattiongelmia.





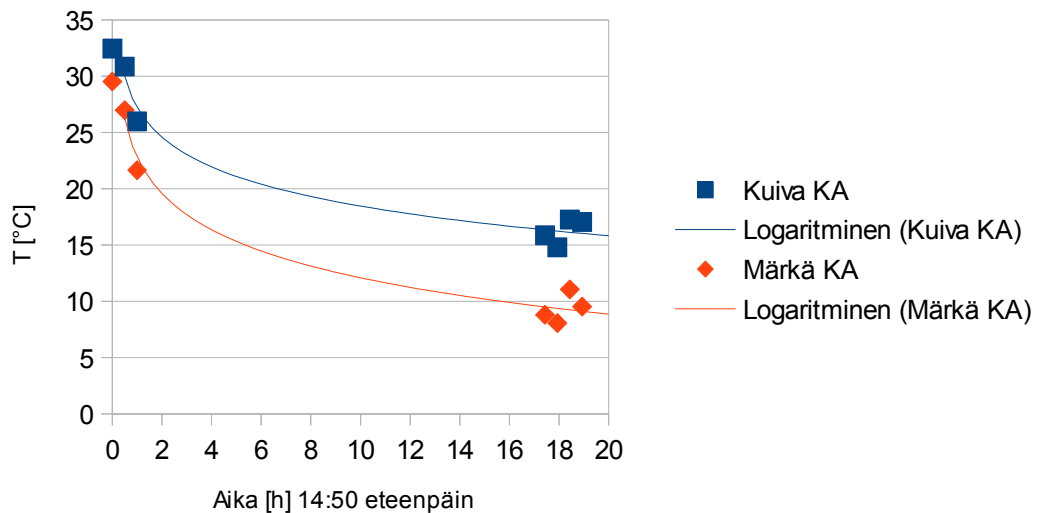
Kuva 5: mittaus A: valeluveden lämpötilamittaus astian ulkopinnalta



Kuva 6: mittaus B: maalin jäähtyminen astian keskellä ja reunassa

Lisäksi mitattiin astian pintalämpötiloja, mutta tämä mittaus tehtiin käsin, joten mitauspisteitä on rajallisesti. Tarkalleen ottaen laskettiin kolmen pisteen keskiarvot seuraaviin mitauspisteisiin:

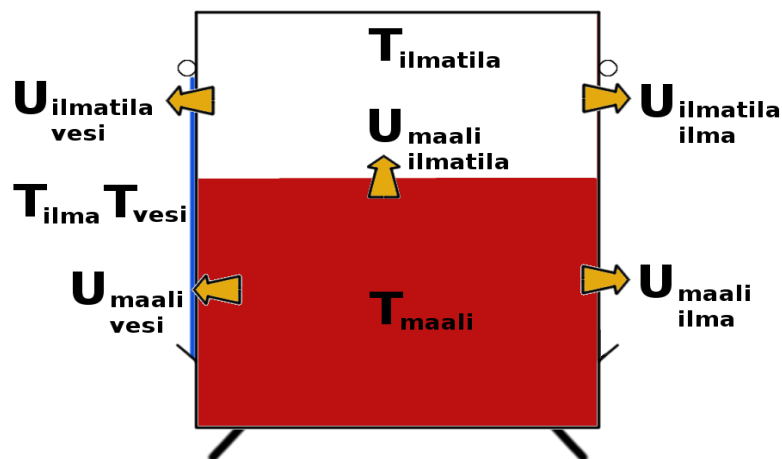
Aika [min]	Kuiva KA	Märkä KA
0	32,5	29,5
30	30,8	27
60	26	21,7
1046	15,9	8,8
1076	14,8	8,1
1106	17,3	11,1
1136	17,1	9,5



Kuva 7: mittaus C: astian pintalämpötiloja (käsin)

Tulokset viimeisessä mittauksessa ovat tosiaan rajallisia, mutta kiinnostavimmat, eli alku ja loppu, ovat tiedossa.

Sekoittimen teho tiedetään, 1,3 kW sähköä, eli pyöreästi kilowatti akselitehoa, jos oletetaan normaali vanhan moottorin 70–80 % hyötysuhde. Kaikki akseliteho siirtyy maaliin, eli sekoitin toimii myös lämmittimenä; tutkitaan sekoittimen vaikutusta.



Kuva 8: säiliön lämpövirrat

Ohessa mallikuva säiliön erilaisista lämpövirtatilanteista:

Tästä on helppo laskea käyttäen lämmönjohtavuuksia:  
 $U_{\text{kok}} = U_{\text{maali-vesi}} + U_{\text{maali-ilma}} + U_{\text{maali-ilmatila}}$  ja  $U_{\text{maali-ilmat.}} = U_{\text{ilmatila-vesi}} + U_{\text{ilmatila-ilma}}$ ,  
 mutta koska ilma-neste -rajapintaa on vaikea yksinkertaisilla kaavoilla mallintaa, yksinkertaistetaan kaavaa vielä lisää:  $U = U_{\text{vedellä vaelettu pinta}} + U_{\text{kuiva pinta}}$ , toivoen että huipun vaikutus on vähäinen. Muistetaan, että koko pinta-ala on  $\text{seinä} + \text{pää} = 9,16 \text{ m}^2 + 1,36 \text{ m}^2 \cdot 2 = 11,88 \text{ m}^2$  ja märkää pinta-alaa on  $7,51 \text{ m}^2$ , josta  $3,72 \text{ m}^2$  on todella märkää. Seinämän paksuus on 3 mm.

Laskelma tekee pienen virheen olettamalla ilmatilan olevan samassa lämpötilassa kuin neste. Todennäköisesti se on kuitenkin hieman viileämpi, joka tarkoittaa alhaisempaa lämmön poistumaa. Kaiken kaikkiaan kuitenkin huipun merkitys lienee vähäinen verrattuna seinämiin. Virheen enimmäismäärä voidaan arvioida jakamalla ilmatilan pinta-ala koko pinta-alalla  $11,88 \text{ m}^2$ , eli kokonaisvirhe olisi enintään  $1,46 \text{ m}^2 / 11,88 \text{ m}^2 = 12\%$ . Lähellä kiehumispistettä olevan neste-kaasurajapinnan mallintaminen suljetuilla kaavoilla on haastavaa; luotettavampiin tuloksiin vaadittaisiin simulaatioita.

Yksinkertainen lämmönjohtumisen kaava:  $U = k \cdot \frac{A \cdot (T_{\text{alku}} - T_{\text{loppu}})}{L}$  [PHT 2].

Tämän lisäksi pitää ottaa huomioon myös seinämä-ilma -rajapinta ja maali-seinäma -rajapinta.

Rajapintaa kuvaava kaava on:  $U = h \cdot A \cdot (T_{\text{sisä}} - T_{\text{ulko}})$  [PHT 44].

Kaavasta on otettava huomioon, että konvektiivisen lämmönsiirron vakio  $h$  ei suinkaan ole konduktanssin  $k$  kaltainen ainekohtainen vakio, vaan siihen vaikuttavat rajapinnan materiaalien ohessa myös rajapinnan geometria.  $h$  johdetaan tavanomaisesti kaava-

vasta  $Nu = \frac{h \cdot K}{k} \Leftrightarrow h = \frac{k \cdot Nu}{L}$  [PHT 56], jossa  $L$  on konvektiivista virtausta vastaavan pinnan ominainen pituus,  $k$  virtaavan aineen lämmönjohtavuus ja  $Nu$  Nusselt'n numero, joka syvimmältä olemukseltaan on kokeellisesti määritetty kuhunkin sovellukseen. Nusselt'n numero kuvaa johtumisen ja konvektion suhdetta lämmönjohtumisessa rajapinnassa.

Sylinterimäisille kappaleilla Nusselt'n numero määräytyy seuraavasti:

$$Nu_{\text{sylinteri}} = Nu_{\text{levy}} \cdot \left( 1 + 1,43 \cdot \left( \frac{L}{D \cdot Gr^{0,25}} \right)^{0,9} \right),$$

$$Nu_{\text{levy}} = \left( 0,825 + \frac{0,387 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right)^2$$
 [PHT 67], jossa

$Pr = C_p \cdot \mu / k$  [PHT 53] ja  $Gr = \frac{g \cdot \beta}{\nu^2} \cdot |T_s - T_\infty| \cdot L^3$ , jossa ideaalisille fluideille

$\beta = \frac{1}{T}$  ja tiheämmille nesteille  $\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T}$  [PHT 65-66], mutta viimeisintä kaavaa

ei voida käyttää, sillä maalin tiheyttä ei ole selvitetty kuin yhdessä lämpötilassa.

Alkulämpötila kuivalla pinnalla oli 32,5 °C, märällä pinnalla 29,5 °C; loppulämpötila kuivalla pinnalla oli 17,1 °C ja märällä pinnalla 9,5 °C. Huoneenlämpö oli koko mittauksen ajan 9 °C. Astian sisältä tehty jatkuvan lämpötilanmittauksen tulokset sovitettiin logaritmisille käyrille:

Keskeltä:  $f(x) = (-16,23 \cdot \ln(x) + 157,49)^\circ\text{C}$  väli [200; 1600] .

Reunasta:  $g(x) = (-11,86 \cdot \ln(x) + 113,85)^\circ\text{C}$  väli [200; 1600] .

Alkulämpötila säiliön keskellä:  $f(200) = 71,6^\circ\text{C}$ , loppulämpötila keskellä:  $f(1600) = 37,8^\circ\text{C}$ , alkulämpötila reunalla:  $g(200) = 51,0^\circ\text{C}$ , loppulämpötila reunalla:  $g(1600) = 26,4^\circ\text{C}$  .

Maalin viskositeetiksi mitattiin 1,92 mPas, ja tiheydeksi 1186 kg/m<sup>3</sup>. Kinemaattinen

viskositeetti on siten  $\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,00192 \text{ Pas}}{1186 \text{ kg/m}^3} = 1,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ilman kinemaattinen viskositeetti 20 °C:n lämpötilassa on 0,00001511 m<sup>2</sup>/s. [ENG 4] Astian korkeus, eli laminaarisen virtauksen pituustermi on 2,21 m.

Lasketaan Grashof'n numeroita ja Prandtl'n numeroita, joista saadaan Nusselt'n numeroita, joista saadaan rajapintojen lämmönsiirtokertoimia ja lämpövirtoja:

(laskettu liitteessä F: laskuesimerkkejä)

	<i>Ilma</i>		<i>Maali</i>			
	<i>kuiva seinämä</i>	<i>märkä seinämä</i>	<i>alussa</i>	<i>lopussa</i>	<i>alussa</i>	<i>lopussa</i>
$\beta$ [K <sup>-1</sup> ]	0,00354				0,00290	0,00322
$Gr$	$3,86 \cdot 10^{10}$	$1,33 \cdot 10^{10}$	$3,37 \cdot 10^{10}$	$8,21 \cdot 10^8$	$2,41 \cdot 10^{12}$	$1,48 \cdot 10^{12}$
$Pr$	0,83				43,5	
$Nu_{levy}$	373,2	266,0	357,4	111,5	6881,9	5859,5
$Nu_{sylinteri}$	376,7	269,2	360,9	114,0	6907,3	5883,9
$h$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	4,38	3,13	4,20	1,33	937,6	798,7
$U$ [W]	840	207	320	2,47	229000	108000

Lisäksi lämmönjohtuminen astian seinämässä:

	<i>Kuiva seinämä - maali</i>	<i>Märkä seinämä - maali</i>
<i>Alku</i> [W]	805000	427000
<i>Loppu</i> [W]	40500	30000

Jos kaikki olisi mennyt täysin oikein, pitäisi sekä ilma–seinämä- ja maali–seinämä -rajapintojen, että seinämä yli menevän lämpövirran olla samat. Arvioidaan mittauksen seinämästä ilmaan olevan parhaiten mittakaavassa, tällöin lämpövirta olisi alussa ~1,1 kW ja lopussa 320 W. Seinämän lämpötilan mittausta lienee haitannut vääränlainen anturi-valinta -seinämän lämpöjä mitattaessa puikkomaisella anturilla on ympäröivä fluidi vaikuttanut mittaukseen ratkaisevasti. Maalia mitattaessa anturi taas oli ilmeisesti liian keskellä, ja sen olisi pitänyt olla välittömästi seinämän läheisyydessä, muttei kiinni siinä.

## 5.2 Lämmön siirtyminen veteen

Huomioimatta on vielä energia, joka siirtyy suoraan jäähditysvedeen. Tämä on helppo arvioida veden alku- ja loppulämpötilasta, veden lämpökapasiteetista ja virtausnopeudesta, joka pumpun oman tyyppikilven mukaan on ”max 100 l/min”. Veden ylälämpötila alussa oli 20,6 °C, alalämpö taas 29,1 °C; lopussa ylälämpö oli 25,3 °C ja alalämpö 24,2 °C, tosin tällöin oli ongelmia termostaatin kanssa.

$$4200 \text{ J}/(\text{kgK}) \cdot \frac{(29,1 \text{ °C} - 20,6 \text{ °C}) \cdot 100 \text{ kg}/\text{min}}{60 \text{ s}/\text{min}} = 59,5 \text{ kW}$$

$$U_{\text{loppu}} = 4200 \text{ J}/(\text{kgK}) \cdot \frac{(25,3 \text{ °C} - 24,2 \text{ °C}) \cdot 100 \text{ kg}/\text{min}}{60 \text{ s}/\text{min}} = 7,7 \text{ kW}$$

Havaitaan, että veden vaikutus jäähdytykseen on merkittävä ja hallitseva. Luku 7,7 kW lienee lähellä todellisuutta, mitä tulee kylmäkoneen kykyyn poistaa energiaa säiliöstä, sillä alkuvaiheessa kylmäpankkiin on varastoitunut energiavajetta, joka parantaa jäähdytystulosta; lopussa kylmäpankin lämpötila on astian pinnan tasolla.

Lasketaan millaisen lämpötilaeron sisä- ja ulkopintojen välillä koko astia tarvitsee, jotta saataisiin jonkinlaisen käsityksen astian seinien vaikutuksesta:

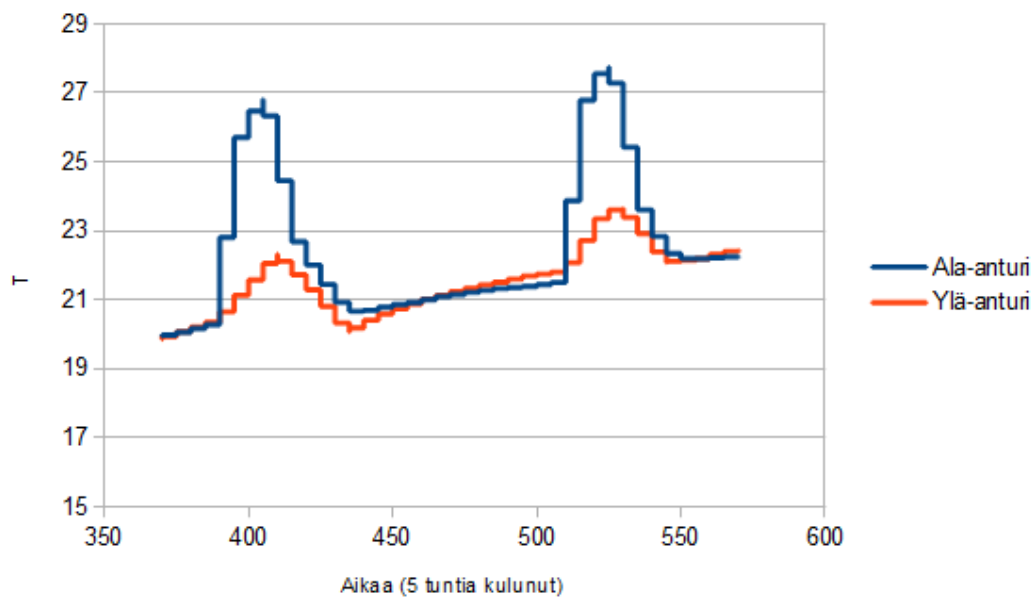
$$\Delta T = \frac{U \cdot L}{A \cdot k} = \frac{7,7 \text{ kW} \cdot 0,003 \text{ m}}{11,88 \text{ m}^2 \cdot 16 \text{ W}/(\text{mK})} = 0,12 \text{ °C}$$

Tämä on tasaisen tilan yhtälö. Se kertoo, että näin suuri lämpötilaero tarvitaan, jotta tasainen 7,7 kW energiavirta menee seinämien läpi. Luku tahtoo sanoa, että seinämien vaikutus lämpövirtaan on hyvin vähäinen. Rajapintojen lämmönsiirtokertoimet taas kertovat, että lämpö siirtyy vedestä seinämään paljon paremmin kuin seinämästä ilmaan. Tästä seuraa se, että maali–metalli -rajapinnan lämpöresistanssi hallitsee energian siirtymistä seinämän läpi.

Jäähditysveden pois viemä energiamäärä on lähellä vakiota, paitsi tilanteessa, jossa maalin lämpötila on lähellä jäähditysveden lämpötilaa. Toisin sanoen jäähditysvesi

jähdyttää vain astian pinnan lähellä olevan maalin omaan tulolämpönsä, jolloin rajoittavaksi tekijäksi tulee konvektio maalissa. Tätä rajaa voidaan ohittaa sekoittinta käyttämällä.

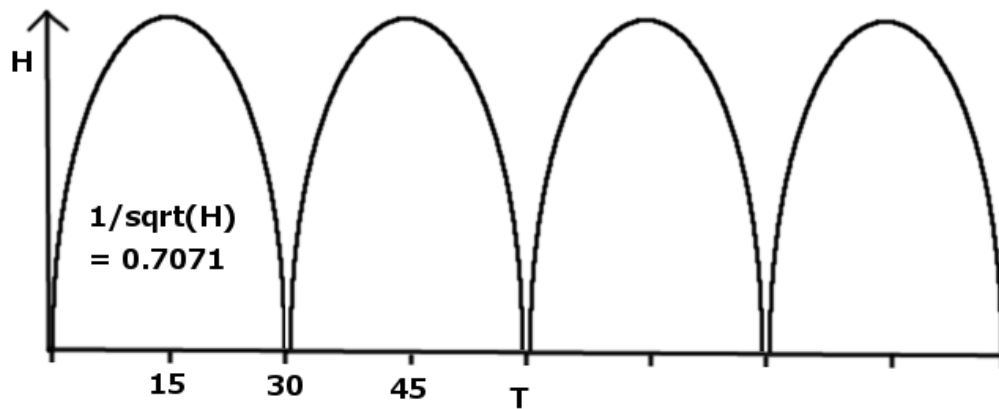
Arvioidaan vielä kuvaajien perusteella sopiva intervalli sekoittimen käytölle. Tässä avuliain kuvaaja on mittaus A, jonka kahdesta ensimmäisestä huipusta otetaan tarkennus, ajan ollessa minuuttiskaalassa:



Kuva 9: valeluveden lämpeneminen sekoittimen käydessä

Mittausdatasta havaitaan, että huipuilla on etäisyyttä toisistaan  $525 - 410 \approx 120$  minuuttia. Eli, toisin kuin ilmoitettu, sekoitin käy noin 15 minuuttia kahden tunnin välein. Lämpötila tasaantuu reunan ja keskustan välillä nopeasti, ja noin puolet ajasta ollaan luonnollisen konvektion varassa.

Tutkitaan tilannetta, jossa sekoitin toimii 15 minuuttia ja on pois päältä toiset 15 minuuttia, koska tilanteessa, jossa sekoitin on kauemmin pois päältä, maalin lämpötila tasaantuu ja luonnollinen konvektio ottaa lämmönsiirtovastuun. Pienillä yksinkertaistuksilla voidaan arvioida tilanne 15/15 yksinkertaisesti: Käytetty periaate pinnan jäähdystehon vähenemisen määrittämiseksi on sama kuin sähköisessä tehollisarvossa, joka perustuu sinikäyrän puolijakson integrointiin ja vertaamiseen saman levyiseen neliöön. Tämä periaate kertoo, että 15/15 minuutin päällä-pois -jaksotteisen jäähdystyksen teho on 70 % koko ajan päällä olevaan sekoitukseen nähden:



Kuva 10: sähkökäytöllisesti optimoitu sekoitus

Lisäämällä sekoitustehoa voitaisiin lämpötilaeroa nesteessä edelleen alentaa jossain määrin, mutta käyrien perusteella 1 kW teho on oikein kohtuullinen. Silmämääräisesti arvioiden koko nestemassa sekoittuu tehokkaasti.

Osoitettiin, että metallinen seinämä ei juurikaan rajoita lämmön siirtymistä, vaan raja on metalli–ilma- ja metalli–vesi -rajapinnoissa. Se että jäähdytysveden lämpötilaero alaja yläosan välillä on vain alle asteen, ja pinta noin samassa lämpötilassa sisällä olevan maalin kanssa vihjaa, että jäähdytystä voidaan nopeuttaa reilustikin kasvattamalla kylmäkoneen tehoa. Kylmäkoneen tehon kasvatuksen vaikutusta lopulta rajoittanee eniten maalin sisäinen konvektio; tässä tilanteessa sekoittimen käyttö tulee perustelluksi. Nykyisellään sekoittimen käyttö kuitenkin ei vaikuta järkevältä, koska jos palataan mittauksen A, havaitaan, että jäähdytysveden lämpötila tilanteessa, jossa kylmäpankin lämpötila on ympäristön lämpötilassa, valeluveden lämpötilaero ei mainittavasti kasva.

Astian seinä on osoittanut voivansa lämmittää sitä pitkin valuvaa vettä yli kymmenellä asteella, joka tarkoittaisi, että astiasta poistuisi tällöin lämpövirta:  $4180 \text{ kJ}/(\text{kgK}) \cdot 10 \text{ K} \cdot 1001/\text{min} \cdot 1/60 \text{ min/s} = 70 \text{ kW}$ , tai määrä, joka laskettiin tarvittavaksi energiavirraksi seuraavassa vaippaputkilämmönvaihtimia käsittelevässä kappaleessa, jos astiaa jäähdytettäisiin kolme tuntia. Näin arvioitu kapasiteetti voidaan tuplata hoitamalla vesivalelu kuntoon lisäämällä nostopumpun tehoa siten, että koko valeltava alue todella on vedellä valeltu.

4000 litran astian pinta-alan suhde tilavuuteen on pienempi, joten sen pintajäähdytys on heikompaa. Jos oletetaan, että vesivaleltu alue on samassa suhteessa korkeuteen kuin nykyisessä astiassa, voidaan verrata vain astioiden ympärysmittoja. 4000 l astian jääh-

dytyskyky on :  $\frac{D_{3000l}}{D_{4000l}} = \frac{2 \cdot 66 \text{ cm}}{2 \cdot 80 \text{ cm}} = 82,5\%$  nykyisestä astiasta, joka lienee riittävä.

Rohkenen näillä tiedoilla ja laskelmilla väittää, että jäähdytysaika voidaan nykyisen järjestelmän puitteissa arviolta puolittaa vain hoitamalla jäähdytysvesivalelu kuntoon ja tuplaamalla kylmäkoneen teho; potentiaalia lisäaikasäästöihin edelleen kasvattamalla kylmäkonetta on olemassa hyvinkin lyhyisiin aikoihin, jopa kolmeen tuntiin.

### 5.3 Kylmäpankin koon kasvattaminen

Uula käyttää nykyisessä järjestelmässään apuna nk. kylmäpankkia, eli vesivarastona toimiva maidonjäähdytin annetaan osittain jäätyä. Astian tilavuus on noin 200 l. Selvitetään, kuinka paljon jäätä tarvittaisiin, että koko maalimassa voitaisiin jäähdyttää jäänsulamiseen sitoutuvalla energialla.

Vesijäähän sitoutuu 334 kJ/kg, maaliin taas on varastoitunut noin 756 MJ, tämä tarkoittaa:  $756000 \text{ kJ} / 334 \text{ kJ} = 2264 \text{ kg}$ , joka on varsin paljon.

Kylmäkoneen lämmönpoistokyvyksi mitattiin 7,7 kW, ja  $[J] = [W] \cdot [s]$ . Jos oletetaan, että jäähtymiseen kuluu 3 tuntia, kuten edellisessä kappaleessa laskettiin minimiksi,

pystyy kylmäkone tuottamaan lisää jäätä: 
$$\frac{3 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 7,7 \text{ kW}}{334 \text{ kJ}} = 249 \text{ kg}$$
. Tämä tarkoittaa, että kylmäkoneen vaikutus on liki virhemarginaalissa, ja vastaavasti, että sen olisi käytävä yli kymmenen tuntia vain kaiken veden jäähdyttämiseksi, sekä toki lisätunnit, jotka kuluvat sen jäätymispisteeseen jäähdyttämiseen. Kylmäpankin kasvatuksen vaikutus vaikuttaa rajalliselta ja kylmäkoneen ollessa nytkin rajoittavana tekijänä ei nopeuta, jos maalia pitäisi tuottaa monta panosta kerrallaan.



## 6 LÄMMÖNVAIHTIMET

Matemaattisesti helposti todennettava ratkaisu olisi jäähdyttää koko maalimassa kohdelämpöön lämmönvaihtimella jo ennen säiliötä. Tilaajan neuvosta tarkastelu rajoitetaan yksinkertaisiin vaippaputkilämmönvaihtimiin, sillä moniputkisen, mutta tehokkaamman vaihtimen pesu maalierien välillä voisi olla liian työlästä. Toisiopuolen nesteeksi valitaan vesi, jota voidaan jäähdyttää suurehkoilla ilmalämmönvaihtimella.

Arvion suoran vaihtimen pituudesta, jossa virtaukset kulkevat toisiaan vasten, antavat seuraava yhtälöt:

$$U = h \cdot A \cdot \Delta T_{\text{keskiarvo}}, A = \pi \cdot D \cdot L \Leftrightarrow L = \frac{U}{h \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta T_{\text{keskiarvo}}} \quad [\text{PHT 93}],$$

$$h = \left[ \frac{D_o}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_o \cdot \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad [\text{PHT 94}] \text{ ja}$$

$$\Delta T_{\text{keskiarvo}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \Delta T_1 / \Delta T_2} \quad [\text{PHT 55-56}].$$

Toisin sanoen tässä on sarjassa sisä- ja ulkoputken konvektiivinen vastus sisäputken seinämää vasten, sisäputken lämmönjohtavuus, sekä erityiset sisä- ja ulkopintojen pilaantumiskertoimet, jotka ottavat huomioon pintojen karstoittumisen käytössä.  $h_o$  ja  $h_i$  saadaan yhtälöstä:

$$h = (k/D) \cdot Nu \quad [\text{PHT 56}].$$

Nusselt'n numeron laskemiseen sisä- ja ulkoputkille on lukuisia kaavoja, oikean valitsemiseksi on syytä laskea Reynoldsin numero, jota tarvitaan usein myös Nusselt'n numeron laskemiseen:

$$Re = D \cdot v_{\text{neeste}} \cdot \nu^{-1} \quad [\text{PHT 64}],$$

Nusselt'n numero turbulenttisen virtauksen tapauksessa on:

$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu/\mu_{\text{reuna}})^{0,14}$ , mutta koska viskositeettiero reunan ja keskustan välillä ei tarkkaan tunneta,  $\mu = \mu_{\text{reuna}} \Rightarrow (\mu/\mu_{\text{reuna}})^{0,14} = 1$ .

Maalin virtausnopeus putkessa voidaan laskea seuraavasti:  $v = \frac{U_{\text{maalin massavirta}}}{\pi \cdot r_{\text{sisäputki}}^2}$ .

Vastaavasti veden virtausnopeus on:  $v = \frac{U_{\text{veden massavirta}}}{\pi \cdot r_{\text{ulkoputki}}^2 - \pi \cdot r_{\text{sisäputki}}^2}$ .

Maalin virtausnopeuden on mitattu karkeasti olevan 90 l/min. Veden virtausnopeus riippuu muun muassa siitä, että se pystyy siirtämään tarvittavan energiavirran pois maalista. Tämä arvioidaan maalin lämpökapasiteetin kautta ja oletetaan, että maalia jäähdytetään noin 60 °C, eli liki kiehumispisteestä 30 °C:hen, tällöin joka sekunti poistettava energiavirta on seuraava.

$$4200 \text{ J}/(\text{kg K}) \cdot \frac{90 \text{ l}/\text{min} \cdot 1,19 \text{ kg}/\text{l}}{60 \text{ s}/\text{min}} \cdot 60 \text{ K} = 449,8 \text{ kJ}/\text{s}$$

Veden tarvittava massavirta arvioidaan oletuksella, että vesi lämpenee vaihtimessa lähelle maalin tulolämpötilaa, eli ainakin 50 °C:

$$\frac{449800 \text{ J}/\text{s}}{4186 \text{ J}/(\text{kg K}) \cdot 1 \text{ kg} \cdot 50 \text{ K}} = 2,15 \text{ kg}/\text{s}, 2,15 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot 60 \text{ s}/\text{min} = 129 \text{ l}/\text{min}$$

Päätetään taulukoida tarvittavia lämmönvaihtimen pituuksia eri putkikoilla. Vaipan halkaisijan oletetaan olevan tuuman paksumpi kuin sisäputki ja sisäputken pauksuudeksi oletetaan 1,5 mm. (Putkien ulkohalkaisijat taulukosta. [EE 1]) . 70 °C-asteisen veden viskositeetti on  $0,475 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [ENG 5].

(laskuesimerkki liitteessä F: laskuesimerkkejä)

	1 "	1,5 "	2 "	4 "	6 "
Sisäputken sisä-D	0,0304	0,0453	0,0603	0,1113	0,1653
Ulkoputken ekv-D	0,0299	0,0217	0,0573	0,0240	0,0224
Ulkoputken sisä-D	0,0573	0,0700	0,0859	0,1383	0,1907
Maalin virtaus-V	2,067	0,931	0,582	0,154	0,070
Veden virtaus-V	1,263	1,066	0,668	0,452	0,340
Maalin Re	38988	26034	20515	10512	7143
Veden Re	68069	57452	36109	24360	18324
Maalin Nu	447,0	323,6	267,3	156,6	115,0
Veden Nu	308,4	269,3	177,0	135,5	107,9
$h_i$ (maali)	4411	2143	1400	422	209
$h_o$ (vesi)	6987	4742	4010	3070	2445
h	2039	1242	911	350	186
Putken pituus	38,3	43,5	47,5	65,3	83,4

Suoritetut laskut osoittavat, että normaalilla pumppausnopeudella lämmönvaihtimesta tulee melko kookas, mutta on kuitenkin vielä tehtävissä, jos maalia todella on valmistettava joskus tauotta: sopiva mitta voisi olla kenties 8 kpl:tta 5 metriä pitkiä vaihtimia sarjassa. Vaihtimen suuren koon aiheuttaa maalin saama matala Nusselt'n numero, joka johtuu maalin vettä matalammasta viskositeetista. Tilannetta voisi parantaa lisäämällä sisäputken pinta-alaa rivoilla, mutta tämä voi aiheuttaa ongelmia maalin väriä vaihdettaessa; samasta syystä torjuttiin ajatus moniputkisesta lämmönvaihtimesta.

## 6.1 Ilmalämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimen pitää pystyä siirtämään 449,8 kW, joten laite tulee olemaan kookas ja hintava. Ei tunnu mielekkäältä alkaa suunnitella vaihdinta itse, sillä tiedoilla ”~500 kW, 80 °C vesi – ulkoilma” pitäisi hellitä riittävän tarkkoja tarjouksia.

Pyritään kuitenkin arvioimaan tarvittavan vaihtimen koko karkeasti. Ensinnäkin kerroin  $h$  saadaan suoraan taulukosta, ja on ”25–28 prosessivedelle” [PHT 641]; ilman lämpenemiseen vaihtimessa on ”hyvä ensimmäinen aproksimaatio” seuraava kaava:

$$\Delta T_{\text{ilma}} = 0,005 \cdot h \cdot \frac{T_{\text{kuuma vesi}} + T_{\text{kylmä vesi}}}{2} - T_{\text{ulkoilma}} \quad [\text{KUP 229}] ,$$

$$\Delta T_{\text{ilma}} = 0,005 \cdot 25 \cdot \left( \frac{273,15 \text{ K} + 30 \text{ K} + 273,15 \text{ K} + 90 \text{ K}}{2} - (273,15 \text{ K} + 20 \text{ K}) \right) = 4,4 \text{ K}$$

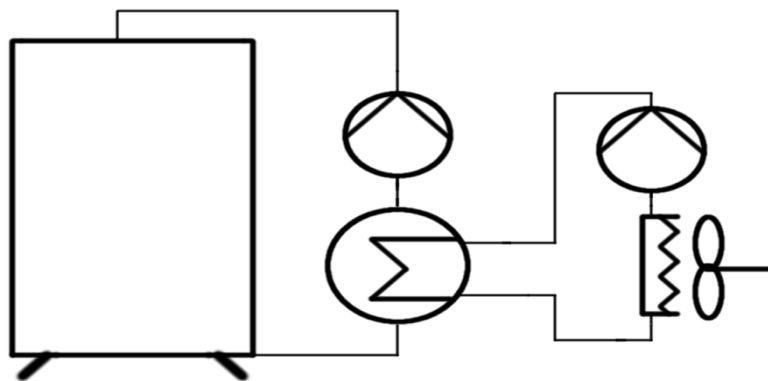
$$A = \frac{U}{h \cdot \Delta T} = \frac{449800 \text{ kW}}{25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \cdot 4,4 \text{ K}} = 4089,1 \text{ m}^2$$

Merkillepantavaa kuitenkin on, että järjestämällä rivastoja siten, että lähtöilma lämpee lisää, voidaan pinta-ala pudottaa niin monella kerralla kuin on putkikerroksia, enimmäismääränä pidetään kuutta kerrosta. Taulukkoarvoja käyttäen [PHT 634]: putkien etäisyys toisistaan 5,72 cm, kerrosten etäisyys toisistaan 4,95 cm, putken pinta-alan ja pituuden suhde 3,8 ja kokonaispinta-ala ripoiveen putken pinta-alaan nähden on 14,5. Tiedetään myös, että rekan puoliperävaunun enimmäismitat ovat 12x2,55 m [LEX 1].

$$\frac{4089 \text{ m}^2}{(1 \text{ m}/0,0572 \text{ m}) \cdot 3,8 \cdot 14,5} = 4,2 \text{ m}^2$$

Alustava laskelma viittaa, että tarvittavan vaihtimen vaatima jalanjälki on vain luokkaa 2x2 metriä, tai neljällä kerroksella yhden neliömetrin.

## 6.2 Osittaisjäähdytys astiassa



Kuva 11: Kaaviokuva ehdotetusta järjestelmästä

Koko maalimassa jäähdyttäminen yhdellä valtavalla lämmönvaihtimella ei välttämättä ole järkevää, sillä keittoprosessi vie itsessään kolme tuntia. Siten maalia voitaisiin kierättää säilytysastiasta pienemmän lämmönvaihtimen läpi tämän kolmen tunnin ajan. Lasketaan tarvittava lämmönvaihtimen pituus sekä alun, että lopun lämpötilaeroilla. Nesteiden virtausnopeuksia ei muuteta, joten voidaan käyttää myös suoraan samaa lämmönvaihdinkerrointa, sillä sen määrittävissä kaavoissa ei lämpötilaeroa käytetä.

Energiavirta alussa on 449,8 kW, lopussa, jos oletetaan ulkolämpötilaksi 20 °C,

$$4200 \text{ J}/(\text{kg K}) \cdot \frac{90 \text{ l}/\text{min} \cdot 1.19 \text{ kg/l}}{60 \text{ s}/\text{min}} \cdot 20 \text{ K} = 20431 \text{ W}$$

$$\Delta T_{\log} = \frac{449,8 \text{ kW} - 20,4 \text{ kW}}{\ln\left(\frac{449,8 \text{ kW}}{20,4 \text{ kW}}\right)} = 138,8 \text{ K}$$

Näiden logaritminen keskiarvo on:

Astiasta poistettava lämpöenergia:  $4200 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 3000 \text{ kg} \cdot 60 \text{ K} = 756 \text{ MJ}$ ,

$$\text{jaettuna kolmelle tunnille: } \frac{756 \text{ MJ}}{10800 \text{ s}} = 70 \text{ kW}$$

$$\Delta T_{\log} = \frac{90^\circ \text{C} - 30^\circ \text{C}}{\ln\left(\frac{90^\circ \text{C}}{30^\circ \text{C}}\right)} = 50,6 \text{ K}$$

Lämpötila alussa:

$$\Delta T_{\log} = \frac{30 \text{ K} - 20 \text{ K}}{\ln\left(\frac{30 \text{ K}}{20 \text{ K}}\right)} = 24,7 \text{ K}$$

Lämpötila lopussa:

$$\Delta T_{\log} = \frac{50,6 \text{ K} - 24,7 \text{ K}}{\ln\left(\frac{50,6 \text{ K}}{24,7 \text{ K}}\right)} = 32,7 \text{ K}$$

Näiden logaritminen keskiarvo on:

Vaihtimen pituudeksi kahden tuuman putkella saadaan:

$$L = \frac{U}{h \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta T_{\text{keskiarvo}}} = \frac{70 \text{ kW}}{2254,6 \cdot \pi \cdot 0,0573 \text{ m} \cdot 32,7 \text{ K}} = 5,3 \text{ m}$$

### 6.3 Ilmalämmönsiirrin lyhemmälle lämmönvaihtimelle

Arvioidaan lyhemmän lämmönvaihtimen vaatima pinta-ala ja jalanjälki käyttäen edellisestä kappaleesta tuttua approksimaatiota ilman lämmön muutokselle. Tuloilma on 20 °C, maalin lämpötilaero on 32,7 K, ja turvallisuuden vuoksi karkeasti yläkanttiin arvioitu jäähdytysveden lämpötilaero voisi olla 10 K vähemmän: 22,7 K, tai 25 °C ja 47,7 °C. Tämä tarkkuus riittänee tarkoituksiimme ja suojaa alimitoitusta vastaan.

$$\Delta T_{\text{ilma}} = 0,005 \cdot h \cdot \frac{T_{\text{kuuma vesi}} + T_{\text{kylmä vesi}}}{2} - T_{\text{ulkoilma}}$$

$$\Delta T_{\text{ilma}} = 0,005 \cdot 25 \cdot \left( \frac{273,15 \text{ K} + 25 \text{ K} + 273,15 \text{ K} + 47,7 \text{ K}}{2} - (273,15 \text{ K} + 20 \text{ K}) \right) = 2,0 \text{ K}$$

Pinta-ala:

$$A = \frac{U}{h \cdot \Delta T} = \frac{70 \text{ kW}}{25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \cdot 2,0 \text{ K}} = 1400 \text{ m}^2$$

Käyttäen edellisen kappaleen tietoja saadaan pinta-alaksi noin:

$$\frac{1400 \text{ m}^2}{(1 \text{ m}/0,0572 \text{ m}) \cdot 3,8 \cdot 14,5} = 1,5 \text{ m}^2$$

Toisin sanoen tarvittava jäähdytyn on hyvinkin kompakti, vieden vain neliömetrin pinta-alaa, nelikerroksisena se veisi vain 60 cm x 60 cm tilan.

#### 6.4 Moniputkinen lämmönvaihdin

Yksinkertaisesta vaippaputkilämmönvaihtimesta laskettiin tulevan noin 40-metrinen, selvitetään moniputkista lämmönvaihdinta, josko tällä rakenteella olisi mahdollista rakentaa kompaktimman kokoinen lämmönvaihdin.

Moniputkiset lämmönvaihtimet vaativat periaatteessa monimutkaisempaa analyysiä, mutta pienikokoisille vaihtimille voidaan käyttää hyvin karkeaa approksimaatiota, jossa sisäputkille käytetään samoja yhtälöitä kuin vaippaputkilämmönvaihtimellekin, ulkoputkille yhtälöä:

$$h_o = j_H \cdot \frac{k}{D_e} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}, \quad \text{jossa oletetaan taas, että } \mu = \mu_w \Rightarrow \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} = 1;$$

$$i_H = 0,5 \cdot (1 + B/d_s) \cdot (0,08 \cdot \text{Re}^{0,6821} + 0,07 \cdot \text{Re}^{0,17772})$$

$j_H$  pitää paikkansa virtauksenpoikkeutuslaipoilla, jotka ovat 80 % putken halkaisijasta. B:ksi, eli laippaetäisyydeksi arvioidaan 40 cm. Tutkitaan tarvittavaa lämmönvaihtimen pituutta sisäputkien paksuuksilla 1 ja 2 tuumaa, sekä putkiluvuilla 7 ja 18; ulkoputkien halkaisijaksi valitaan 7, 9, 10 ja 14 tuumaa. Ekvivalenttihalkaisijaksi oletetaan noin tuuma. Putken paksuudeksi oletetaan taas 1,5 mm. Maalin virtausnopeus oli 2,07 m/s tuumaisella putkella, 0,58 m/s kaksituumaisella. Maalin Nusselt'n numeroksi asetetaan 3,66, joka kuvaa laminaarista virtausta äärettömän pitkässä putkessa [PHT 54]. Veden virtausnopeudeksi oletetaan 150 l/min. Veden virtausnopeus 130 l/min laskettiin edellisessä kappaleessa riittävän maalin energiavirran poistamiseen käyttäen nopeudelle kaa-

$$\text{valla } \frac{0,150 \text{ m}^3/\text{min}}{\pi \cdot ((D_{\text{ulko}}/2)^2 - n_{\text{putket}} \cdot (D_{\text{sisä}}/2)^2) \cdot 60 \text{ s}/\text{min}} :$$

	<i>1" x 7</i>	<i>1" x 18</i>	<i>2" x 7</i>	<i>2" x 18</i>
Sisäputken D [m]	0,0334		0,06	
Sisäputken sisä-D [m]	0,0304		0,06	
Ulkoputken D [m]	0,1937	0,2445	0,2731	0,3556
Ulkoputken sisä-D [m]	0,1907	0,2415	0,2701	0,3526
Maalin Re	2064	1501	2829	1061
Veden Re	5882	4277	3743	2673
$h_i$ (maali)	36,1		19,2	
$j_H$	252	203	186	148
$h_o$ (vesi)	8524	6866	6291	5006
$h$	32,6	32,6	17,4	17,4
Vaihtimen pituus [m]	245	95	128	331

Lopputuloksena on, että johtuen maalin madaltuneesta virtausnopeudesta putkessa, seuraa että lämmönvaihtimen pinta-ala kasvaa valtavaksi verrattuna vaippaputkiratkaisuun. On tosin todettava, että tämä laskelma ei ota kantaa luonnolliseen konvektioon, joka voi näin hitailla virtausnopeuksilla olla huomattava.

Laskelma antaa kuitenkin viitteitä siitä, että käytettäessä moniputkilämmönvaihdinta, putkien määrä ja vaihtimen monimutkaisuus ovat huomattavasti suuremmat kuin pitkäläkään vaippaputkilämmönvaihtimella, josta seuraa suurempi hankintahinta ja vaikeampi puhdistus maalierien välillä.

## 7 JÄÄHDYTYSRIVAT

Rivoilla pystytään moninkertaistamaan tehollisen lämmönsiirtymispinta-ala, eli lisätä energiavirtaa astiasta ympäröivään ilmaan. Tutkitaan, pystytäänkö rivoilla saavuttamaan lämmönsiirtotehoja, jotka vastaavat nykyistä vesivalelua.

Jäähdytysripojen tuomalle lisälle on hyvä approksimaatio, niin sanottu ripahyötysuhteen yhtälö, joka kertoo, kuinka suuri osa lisäpinta-alasta todella vastaa astian varsinaista seinää:

$$n_f = \frac{\tanh(m \cdot L)}{m \cdot L}, \quad m = \frac{2 \cdot h}{k \cdot \tau} \quad [\text{PHT 51}].$$

Teräksen vakiot  $h$  ja  $k$  tunnetaan jo aiemmista kappaleista, ne ovat  $16 \text{ W}/(\text{mK})$ , sekä  $h$  alussa  $4,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ja lopussa  $3,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $\tau$  valitaan  $3 \text{ mm}$ :ksi. Taulukoidaan ripahyötysuhteita eri rivan pituuksia ja kuinka suureen laskennalliseen jäähdytyspinta-alan kasvuun ne johtavat eri ripataajuuksilla. Ripojen pituudeksi oletetaan koko astian korkeus.

Sovelletaan logaritmista keskiarvoa, koska lämpövirta astiasta pois ei ole lineaarista, vaan hidastuvaa:

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad [\text{PHT 55-56}],$$

$$h_{\text{logaritminen keskiarvo}} = \frac{4,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) - 3,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})}{\ln\left(\frac{4,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})}{3,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})}\right)} = 3,72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$m = \frac{2 \cdot 3,72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})}{16 \text{ W}/(\text{mK}) \cdot 0,003 \text{ m}} = 155 \frac{1}{\text{m}^2}.$$

Lisäpinta-alan arvioinnissa käytetään hyväksi oletusta, että rivat yltyvät koko astian seinän pituudelle. Tällöin voidaan käyttää seuraavaa yksinkertaistusta arvioimaan maksimilämmönsiirtokyvyn lisäys:

$$\frac{\frac{D_{\text{säiliö}} \cdot \pi}{d_{\text{ripa}}} \cdot n_f \cdot 2 \cdot L_{\text{ripa}} + D_{\text{säiliö}} \cdot \pi - \frac{D_{\text{säiliö}} \cdot \pi}{d_{\text{ripa}}} \cdot \tau}{D_{\text{säiliö}} \cdot \pi} = \text{parannuskerroin},$$

jossa ensin arvioidaan ripojen tuoma lisäpinta-ala jakamalla säiliön ympäryys ripojen tiheydellä ja kertomalla ripojen pinta-alalla (ripojen pään pinta-ala jätetään huomiotta, samoin astian kannen ja pohjan). Pinta-alaan lisätään vielä säiliön seinämän pinta-ala, jos-

ta poistetaan ripojen leveyden verran, tätä verrataan jakamalla nykyiseen pinta-alaan. (laskuesimerkki liitteessä F: laskuesimerkkejä)

<i>L</i>	$\eta$	<i>Väli 1,5 cm</i>	<i>Väli 2,5 cm</i>	<i>Väli 5 cm</i>	<i>Väli 10 cm</i>
<i>1,5 cm</i>	<i>0,42</i>	2,64	2,38	2,19	2,09
<i>2,5 cm</i>	<i>0,26</i>	2,66	2,40	2,20	2,10
<i>5 cm</i>	<i>0,13</i>	2,66	2,40	2,20	2,10

1,5 cm on valittu minimiksi metallintyöstöellisistä lähtökohdista, koska jonkun on hittattava rivat käsin kiinni jo olemassa olevaan astiaan. On pantava merkille, että tosielämän lämmönsiirron lisäykset eivät välttämättä ole laisinkaan näin dramaattisia, sillä jäähditysriivat myös heikentävät ilmavirtaa astian ympärillä, lisäksi jos astiaa valellaan vedellä, jäähdyttää vesi tehokkaasti myös jäähditysriipoja, jolloin niiden vaikutus romahtaa, siten laskelma antaa vain teoreettisen enimmäisarvion siitä, kuinka paljon voidaan energiavirtaa astian seinämiltä ympäröivään ilmaan kasvattaa. 3 mm paksuus rajoittaa hyötysuhdetta, mutta sitä ei välttämättä voida kasvattaa paljon enempää tästä rakenteellisista syistä.

Tämä laskelma osoittaa, että jäähditysriipoja nykyiseen astiaan lisäämällä ei voida lämmönsiirtoa lisätä tasolle, jota tarvittaisiin maalin seisonta-ajan merkittävään vähentämiseen.



## 8 ASTIAN VÄRI

Myös säteilyllä voi olla merkittävä vaikutus. Tämän selvittämiseksi lasketaan mustan kappaleen säteily säiliön kyljestä, josta vähennetään ympäristön säteily astiaan, näin saadaan arvioitua nettosäteily astiasta pois:

$$U = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{\text{abs}}^4 \quad [\text{MOM 453}],$$

eli  $U = \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4)_{\text{vedellä vaelettu}} + \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4)_{\text{kuiva}}$ . Kuivaa pinta-ala on  $11,88 \text{ m}^2 - 3,72 \text{ m}^2 = 8,16 \text{ m}^2$ . Lämpötilana käytetään mitattua ympäristön lämpötilaa, eli  $9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

(laskettu liitteessä F: laskuesimerkkejä)

	<i>Energiavirta [W]</i>
<i>Alku</i>	1954
<i>Loppu</i>	371

Tulokset ovat hämmästyttävän korkeita, mutta kun otetaan huomioon emissiivisyyskerroin, luku saa järkeä. Kiillotetun teräksen kerroin on kyllä 0,07, ja vastaavasti mustan silikonimaalin 0,93 [ENG 1], mutta astiamme edustaman patinoituneen rosterin kerroin voi olla niinkin korkea kuin 0,85 [ENG 1] tai konservatiivisemmin 0,54–0,63 uudelle tyyppiin 301 teräkselle. [ENG 1] Lisäksi on huomattava, että kesällä, jolloin ympäristön lämpötila on korkeampi, säteilyvaikutus on heikompi, lähempänä  $U_{\text{loppu}}$ -laskelmaa. Todellinen lämmönsiirtymisen lisääntyminen maalaamisesta lienee korkeintaan satoja watteja, joka on suhteellisen pieni parannus verrattuna potentiaaliaan, joka on valeluveden-jäähdytyslaitteiston kapasiteetin kasvatuksessa.

## 9 JOHTOPÄÄTÖS

Selvitettiin nykyisen järjestelmän laajennuspotentiaali, ja saatiin viitteitä siitä, että jäähtymisaika voidaan nykyisen järjestelmän puitteissa saattaa jopa tasolle, jossa varastosäiliöt eivät ole enää pullonkaula. Tätä varten olisi kuitenkin tehtävä laitehankintoja, sillä jäähdymistä hidastaa nimenomaan alimitoitettu kylmäkone. Puhelinsoitoilla laitevalmistajille saatiin viitteitä siitä, että uutta kylmäkonetta ei välttämättä kannata hankkia, sillä ilma-vesi lämmönvaihdinten hinnat ovat varsin kohtuullisia: jopa 3500 € 70 kW -vaihtimesta (Alfa Laval).

Erityisesti annettiin huomiota vaippaputkilämmönvaihtimille, joista todettiin, että koko maalin jäähdytys välittömästi ennen säilytysastiaan siirtoa on mahdollista, mutta lämmönvaihtimesta tulee suurikokoinen, noin 40 metriä pitkä.

Päädyn suosittelemaan Uulalle nykyisen kylmäkoneen korvaamista vähintään 70 kW -tehoisella ilma-vesi -lämmönvaihtimella ja maalin kierrättämisellä 6-metrinen vaippaputkilämmönvaihtimen läpi sen jo ollessa astiassa. Tarkkaan mitoituseseen kannattanee kysyä arviota valmistajalta, sillä tässä työssä esitetyt luvut ovat vain suuntaa antavia, joskin virhe on pyritty arvioimaan siten päin, että tarvittava mitoitus koko olisi todellisuudessa pienempi.

Jos 4000 litran säiliö otetaan käyttöön, ei liene tarkoituksenmukaista varustaa sitä nykyisenkaltaisella järjestelmällä, vaan pumpata maali yhteisen lämmönvaihtimen läpi.

## LÄHTEET

- UULA1: Yritysesittely: Uulatuote Oy, <http://www.uula.fi/fi/uulatuote-oy>
- KT 3: Antero Aittomäki, Kylmätekniikka, 2008 s. 2
- ENG 2: Specific Heat, [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_339.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_339.html)
- UNCE1: Examples of Uncertainty calculations,  
<http://spiff.rit.edu/classes/phys273/uncert/uncert.html#fraction>
- PHT 2: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 2
- ENG 3: Thermal Conductance, [http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
- PHT 55-56: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 55-56
- PHT 44: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 44
- PHT 56: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 56
- PHT 67: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 67
- PHT 53: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 53
- PHT 65-66: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 65-66
- ENG 4: Air - Absolute and Kinematic Viscosity,  
[http://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d\\_601.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html)
- PHT 93: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 93
- PHT 94: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 94
- PHT 64: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 64
- EE 1: Standard Pipe Schedules, [http://www.engineersedge.com/pipe\\_schedules.htm](http://www.engineersedge.com/pipe_schedules.htm)
- ENG 5: Water - Absolute or Dynamic Viscosity,  
[http://www.engineeringtoolbox.com/absolute-dynamic-viscosity-water-d\\_575.html](http://www.engineeringtoolbox.com/absolute-dynamic-viscosity-water-d_575.html)
- PHT 641: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 641
- KUP 229: Thulukkanam, Kuppan , Heat Exchanger Design Handbook, 2013 s. 229
- PHT 634: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 634
- LEX 1: Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä,  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257>
- PHT 54: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 54
- PHT 51: Serth, Process Heat Transfer Principles and Applications, 2007 s. 51
- MOM 453: Inkinen, Manninen, Tuohi, Momentti 2 Insinöörifysiikka, 2006 s. 453
- ENG 1: Emissivity Coefficients of some common Materials,  
[http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)

## LIITTEET

- Liite A: kuvia
- Liite B: lämpötilamittaus, valeluvesi, astian yläosa
- Liite C: lämpötilamittaus, valeluvesi, astian alaosa
- Liite D: lämpötilamittaus, maali, reuna
- Liite E: lämpötilamittaus, maali, keskusta
- Liite F: laskuesimerkkejä