



LEVYLÄMMÖNSIIRTIMEN JÄÄTYMINEN KRYOGEENISISSÄ LÄMPÖTILOISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Markus Nikkanen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tero Tynjälä

Professori Teemu Turunen-Saaresti

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Markus Nikkanen

Levylämmönsiirtimen jäätyminen kryogeenisissä lämpötiloissa

Energiatekniikan diplomityö

2022

53 sivua, 36 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastajat: Apulaisprofessori T.T. ja Professori T.T-S.

Avainsanat: Lämmönsiirrin, jäätyminen, LNG

Lämmönsiirrin on laite, jossa lämpö siirtyy kahden virtaavan aineen välillä. Lämmönsiirtimessä on kuuma puoli ja kylmä puoli. Tässä diplomityössä tutkitaan levylämmönsiirrintä ja sen jäätymistä hyvin alhaisissa lämpötiloissa.

Alhaisia lämpötiloja on mm. nesteytetyn maakaasun höyrystämisprosessissa. Maakaasun höyrystyslämpötila on hyvin alhainen, noin -162 °C ilmanpaineessa. Maakaasun alhaisen höyrystyslämpötilan takia lämmönsiirtimen kuuman puolen aineella, esim. vesiglykoliseoksella, on riski jäätyä.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli antaa lisää ymmärrystä jäätyminen alkamiseen LNG:n höyrystysprosesseissa. Testeissä käytettiin LNG:n sijasta nestemäistä tyyppiä, joka höyrystettiin ja tulistettiin. Lämmönsiirtimen kuuman puolen aineena oli 50 % vesietyleeniglykoliseos. Testien aikana otettiin ylös relevantteja arvoja, joiden avulla tarkkailtiin, milloin lämmönsiirrin jäätyy. Lämmönsiirtimen mitoitusohjelman avulla laskettiin mittauspisteiden minimipintalämpötila, glykolipuolen leikkausjännitys sekä glykolipuolen Reynoldsin luku. Näiden suureiden oletettiin kaikkien laskevan lähestyttäessä jäätymistä. Suureiden avulla toivottiin pystyvän arvioimaan jäätyminen riskiä jo mitoitusohjelmassa. Tulosten perusteella Reynoldsin luvun avulla jäätymisriskiä voitaisiin arvioida mitoitusohjelmassa. Reynoldsin luku pieneni jokaisessa testissä jäätymistä lähestyttäessä. Minimipintalämpötila antoi suurimmalta osin myös hyvän arvion jäätymisriskistä ja laski jäätymistä lähestyttäessä, paria poikkeusta lukuun ottamatta. Leikkausjännitys ei käyttäytynyt niin, kuin alun perin kuviteltiin. Osassa testeissä leikkausjännitys pysyi vakiona tai kasvoi, kun lähestyttiin jäätymistä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Markus Nikkanen

Plate heat exchanger freezing in cryogenic temperatures

Master's thesis

2022

53 pages, 36 figures and 3 tables

Examiners: Associate professor T.T. and Professor T.T-S.

Keywords: Heat exchanger, freezing, LNG

A heat exchanger is a device where heat transfers between two fluids. A heat exchanger has a hot side and a cold side. This thesis studies the freezing of plate heat exchangers in cryogenic temperatures.

Cryogenic temperatures are present for example in LNG regasification processes. LNG vaporizes at about -162 °C at atmospheric pressure. Due to this low vaporization temperature, there is a risk for the hot side fluid, typically a water-glycol mixture, to freeze.

The purpose of this thesis was to increase knowledge on the start of freezing in LNG regasification processes. Liquid nitrogen was used in the tests instead of LNG. The nitrogen was vaporized and superheated. The hot side fluid was a 50 % mixture of ethylene glycol and water. In the tests relevant values were used to observe when the freezing happens. A heat exchanger design program was used to calculate the minimum surface temperature, the shear stress on glycol side and the Reynolds number on glycol side. It was assumed these values would all decrease when nearing the freezing point. With these values the freezing risk could hopefully be assessed in the heat exchanger design program. Based on the results the Reynolds number could be used to assess freezing risk. The value of the Reynolds number decreased when nearing the freezing point in every test. The minimum surface temperature was also determined to give a good analysis of freezing risk as it also decreased when nearing the freezing point, though there were some exceptions. The shear stress did not behave according to the hypothesis. In some tests the shear stress stayed the same or increased when nearing the freezing point.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
KÄYTETYT SYMBOLIT	5
1 JOHDANTO	7
1.1 Testien tarkoitus	7
2 LÄMMÖNSIIRTO	9
2.1 Johtuminen, konvektio ja säteily	9
2.2 Lämmönsiirrin	10
2.2.1 Levylämmönsiirrin	11
2.2.2 Lämmönsiirtimen teoriaa	14
2.3 Likaantuminen	22
3 JÄÄTYMINEN	26
3.1 Faasimuunnos	26
3.2 Jäätymisen teoriaa	28
3.2.1 Nukleaatio	29
3.3 Etyleeniglykolin ominaisuudet	29
4 KIRJALLISUUSTUTKIMUS	33
5 TESTIT	34
6 TESTIEN TULOKSET	40
7 PÄÄTELMÄT	55
8 YHTEENVETO	58
LÄHTEET	60

KÄYTETYT SYMBOLIT

Latinalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
C	lämpökapasiteetti	[J/K]
\dot{C}	lämpökapasiteettivirta	[W/K]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
D_h	hydraulinen halkaisija	[m]
e	kappaleen emissiivisyys	
h	konvektion lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
k	materiaalin lämmönjohtavuus	[W/mK]
L	latenttienergia	[kJ/kg]
l	pituus, paksuus	[m]
m	massa	[kg]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
n	vetojen määrä	
P	märkäpiiri	[m]
p	paine	[Pa]
q''	lämpövuoto	[W/m ²]
q	lämpövirta	[W]
Q	lämpöenergia	[J]
R	kapasiteettisuhde	
R_f	likaantumiskerroin	[W/m ² K]
S	kokonaismärkäalue	[m ²]
s	lämmönsiirtokanavan pituus	[m]
T	lämpötila	[°C, K]
U	lämmönläpäisykerroin	[W/m ² K]

u	virtauksen keskinopeus	[m/s]
V	kokonaismärkätilavuus	[m ³]
ν	kinemaattinen viskositeetti	[m ² /s]
x	lämmönsiirron suunta	

Kreikkalaiset

α	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
ε	lämmönsiirtimeen tehokkuus	
μ	dynaaminen viskositeetti	[Pa s]
ϕ	lämpöteho	[W]
σ	leikkausjännitys	[Pa]

Dimensiottomat luvut

Pr	Prandtin luku
Re	Reynoldsin luku

Vakiot

σ	Stefan-Boltzmann vakio	$5,67 * 10^{-8} \text{ m}^2\text{K}^4\text{J/s}$
----------	------------------------	--

Lyhenteet ja muut symbolit

LNG	Liquefied Natural Gas, nesteytetty maakaasu
NTU	siirrettyjen lämpöyksiköiden määrä

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä tutkitaan jäätymistä levylämmönsiirtimessä. Jäätyminen lämmönsiirtimessä on ongelmallista, koska jäätyessään lämmönsiirrin ei saavuta haluttuja lämpötiloja eli se ei toimi halutulla teholla. Jäätyminen takia myös painehäviö kasvaa ja pumppu saattaa vaatia enemmän energiaa. Jäätyminen edetessä pitkälle jää voi tukkia koko lämmönsiirtokanavan, jolloin ainetta ei virtaa lämmönsiirtimen sisällä enää lainkaan. Pahimmassa tapauksessa jäätyminen voi aiheuttaa lämmönsiirtimen rikkoutumisen. Tehdyissä testeissä jäätyminen saatiin aikaan käyttämällä kryogeenisessä lämpötilassa olevaa nestemäistä tyyppiä lämmönsiirtimen kylmällä puolella ja vettä tai vesiglykoliseosta kuumalla puolella. Koska tässä työssä käsitellään lämmönsiirtimiä, lämmönsiirron teoria on oleellista ja se käydään aivan ensimmäiseksi läpi. Lämmönsiirron teoriaan liittyen käydään läpi myös lämmönsiirtimen likaantuminen, koska jäätyminen on eräänlaista likaantumista. Tämän jälkeen käydään läpi faasimuunnokset, jäätyminen teoriaa ja hieman teoriaa etyleeniglykolista. Lopuksi paneudutaan varsinaisiin testeihin ja niistä tehtyihin päätelmiin. Tässä diplomityössä tehtävät tutkielmat tehdään aiheesta löytyvän valmiin teorian sekä Vahteruksen tuotekehityslaboratoriossa tehtävien testien perusteella.

1.1 Testien tarkoitus

Testien tarkoitus on tutkia lämmönsiirtimen jäätymistä kryogeenisissä lämpötiloissa. Kryogeenisiä lämpötiloja lämmönsiirtimissä esiintyy mm. LNG (Liquified Natural Gas) sovelluksissa, joita on käytössä esimerkiksi uusissa risteilijöissä ja muissa suurissa laivoissa, joissa maakaasua käytetään polttoaineena.

Polttoaineena käytettävä maakaasu koostuu yleensä enimmäkseen metaanista (CH_4), mutta mukana voi olla myös etaania (C_2H_6), propaania (C_3H_8) sekä butaania (C_4H_{10}). Nesteenä oleva maakaasu eli LNG vie huomattavasti vähemmän tilaa kuin kaasumuodossa. Nestemäisen maakaasun tilavuus on noin 600 kertaa pienempi, kuin kaasumaisessa muodossa oleva maakaasu. Tämän takia sitä kuljetetaan ja varastoidaan nimenomaan nestemäisessä muodossa. Nesteenä oleva maakaasu on hyvin kylmää. Maakaasun höyrystymislämpötila on noin $-162\text{ }^\circ\text{C}$ ilmanpaineessa. (Kumar et al. 2011)

Jotta LNG:tä voidaan käyttää polttoaineena moottoreissa, se täytyy lämmittää ja höyrystää jälleen kaasumuotoon. Tähän höyrystämiseen käytetään lämmönsiirrintä. Kuten aiemmin todettu ennen höyrystämistä maakaasu on erittäin kylmää, jonka takia se voi aiheuttaa lämmönsiirtimeen kuumen puolen aineen (esim. vesi tai vesiglykoli) jäätyksen. Tässä diplomityössä tehtävät tyypit testit jäljitellevät nimenomaan lämmönsiirtimien LNG sovellusten käyttäytymistä ja jäätyksriskejä. Näiden testien avulla tutkitaan, missä kohtaa lämmönsiirrin alkaa jäätyä. Mitä suureita pitää tarkkailla ja mistä tietää, että lämmönsiirrin on alkanut jäätyä.

2 LÄMMÖNSIIRTO

Lämmönsiirtoa pitää tapahtua aina, kun jossain väliaineessa tai eri väliaineiden välillä on lämpötilaero. Lämpö siirtyy aina lämpimästä kylmään. On olemassa kolmea erityyppistä lämmönsiirtoa: johtumista, konvektiota ja säteilyä. Johtuminen tapahtuu paikallaan olevan kiinteän aineen tai fluidin kautta. Konvektio tapahtuu liikkuvan fluidin ja kiinteän pinnan välillä, jos pinta ja liikkuva fluidi ovat eri lämpötiloissa. Säteilylämmönsiirron aiheuttaa pintojen lähettämät sähkömagneettiset aallot. Säteilylämmönsiirtoa tapahtuu kahden eri lämpötiloissa olevien pintojen välillä, vaikka lämpöä siirtävää väliainetta ei olisi. Lämmönsiirron edellytys on prosessissa vallitseva lämpötilagradientti. (Incropera et al. 2007)

2.1 Johtuminen, konvektio ja säteily

Fourierin laki kertoo johtumisen lämpövuon eli lämpövirran tiheyden kaavan (2.1) mukaan:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{l} \quad (2.1)$$

jossa q'' on lämpövuoto $[\text{W}/\text{m}^2]$, l on johtavan materiaalin paksuus $[\text{m}]$ ja k on materiaalin lämmönjohtavuus $[\text{W}/\text{mK}]$. Lämmönsiirron suunta x on isotermejä kohtisuoraan.

Kuten aiemmin todettu, konvektio tapahtuu liikkuvan fluidin ja jonkin pinnan välillä, jos fluidin ja pinnan välillä on olemassa lämpötilaero. Lämpötilat liikkuvan fluidin sisällä ovat erilaisia riippuen siitä, kuinka kaukana piste on paikallaan olevasta pinnasta. Aluetta, jossa lämpötilat ovat erilaisia fluidissa kutsutaan lämpötilarajakerrokseksi. Yleisesti suurin osa konvektiosta aiheutuu satunnaisesta molekyylien liikkeestä pinnalla, koska virtausnopeuden oletetaan olevan lähellä nollaa. Tätä molekyylien satunnaista liikettä kutsutaan diffuusioksi. Lämpötilarajakerroksen paksuus kasvaa pidemmällä lämpöä johtavan pinnan etäisyyksillä ja virtausnopeuden kasvaessa. Lämpö johtuu lämpötilarajakerroksen läpi liikkuvaan fluidiin. Konvektiota on kahta tyyppiä: luonnollista ja pakotettua. Luonnollinen konvektio on fluidin sisäisten tiheuserojen aiheuttamaa liikettä. Pakotettu konvektio on virtausta, joka on saatu aikaan

ulkoisin keinoin kuten pumpulla, tuulettimella tai painovoimalla. Newtonin laki kuvailee konvektion luoman lämpövuon kaavan (2.2) mukaan:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

missä q'' on lämpövuoto, h on konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], T_s on lämpötila pinnalla [K] ja T_∞ on lämpötila lämpötilarajakerroksen ulkopuolella [K].

Säteilyn lämpövuoto voidaan ilmoittaa kaavan (2.3) mukaan:

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = e * \sigma * (T_s^4 - T_{sur}^4). \quad (2.3)$$

jossa q on lämpövirta [W], A on kappaleen pinta-ala [m^2], e on kappaleen emissiivisyys, joka kertoo, kuinka paljon kappale lähettää säteilyä verrattuna täysin mustaan kappaleeseen. σ on Stefan-Boltzmann vakio eli $5,67 * 10^{-8} \text{ m}^2\text{K}^4\text{J/s}$. T_{sur} on ympäristön lämpötila [K].

Energiatasapainoyhtälö pinnan ympärillä voidaan kirjoittaa kaavan (2.4) mukaisesti:

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0 \quad (2.4)$$

jossa q_{cond} on johtumisen lämpövuoto, q_{conv} on konvektion lämpövuoto ja q_{rad} on säteilyn lämpövuoto. (Incropera et al. 2007)

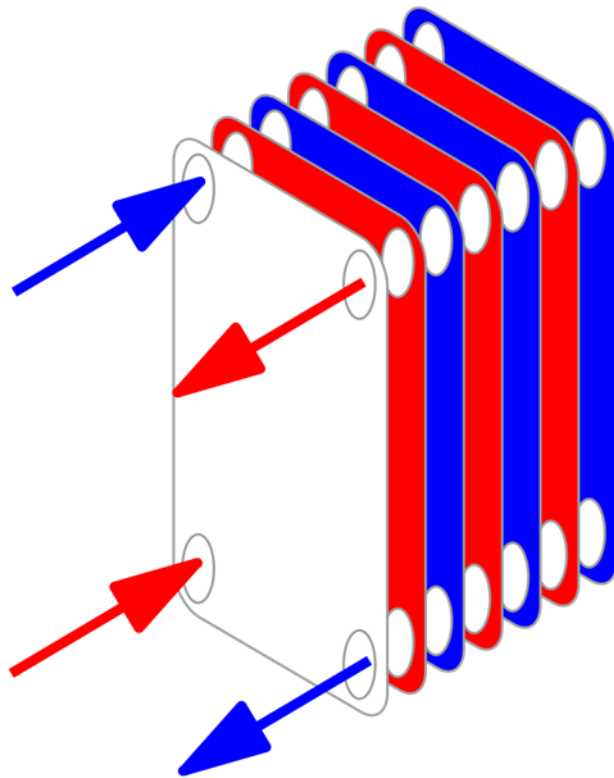
2.2 Lämmönsiirrin

Lämmönsiirrin on laite, jonka tarkoituksena on siirtää lämpöenergiaa kahden tai useamman nesteen tai kaasun välillä. Lämmönsiirtimiä voidaan käyttää jonkin aineen kuumennukseen tai viilennykseen. Käyttökohteesta riippuu, mikä on haluttu lopputulos ja mitä viilennyksellä tai kuumennuksella haetaan. (Shah & Sekulic, 2003) Lämmönsiirtimiä ovat myös mm. höyrystimet ja lauhduttimet, joilla saadaan aikaan lämmönsiirron lisäksi aineen olomuodon muutos (nesteestä kaasuksi tai kaasusta nesteeksi). Esimerkiksi modernien jäähallien jäädytys tapahtuu kylmäkoneistolla, johon kuuluu lämmönsiirtimiä.

Suurimmassa osassa lämmönsiirtimiä lämmönsiirto aineiden välillä tapahtuu aineet erottavan seinämän avulla. Lämmönsiirron lisäksi seinämä toimii nimenomaan erottamaan eri aineet toisistaan, joka yleensä on haluttua. (Shah & Sekulic, 2003) Lämmönsiirtimiä on erilaisia, kuten levylämmönsiirtimiä ja putkilämmönsiirtimiä. Tässä työssä keskitytään levylämmönsiirtimiin.

2.2.1 **Levylämmönsiirrin**

Levylämmönsiirrin on lämmönsiirrin, jossa lämpö siirtyy kahden aineen välillä metallisen levyn avulla. Levy toimii lämmönsiirron lisäksi myös aineiden erottajana, jotta aineet eivät sekoitu keskenään. Levylämmönsiirtimessä on yleensä kylmän puolen sisääntulo ja ulostulo, sekä kuuman puolen sisääntulo ja ulostulo. Levylämmönsiirrin on rakennettu niin, että yhden puolen aine pääsee aina vain joka toiseen levyväliin. (Wang et al. 2007) Kuvassa 1 (Wikipedia, 2011) on havainnollistettu tämä periaate. Levyä kohtisuoraan katsottaessa kuuma aine (punainen) menee sisään vasemmalta alhaalta ja poistuu oikealta ylhäältä. Kylmä aine (sininen) menee sisään vasemmalta ylhäältä ja poistuu oikealta alhaalta. Joka toinen väli täyttyy kuuman puolen aineesta ja joka toinen kylmän puolen aineesta. Tällöin lämpö siirtyy lämmönsiirtolevyn välityksellä kuumasta aineesta kylmään, jolloin kuuma aine viilenee ja kylmä aine lämpenee.



Kuva 1. Levylämmönsiirtimen periaate. (Wikipedia, 2011)

Lämmönsiirtimissä voidaan käyttää ns. vetoja. Vedot pakottavat virtauksen kulkemaan tiettyä reittiä. Vedot voidaan toteuttaa esim. tulpalla lämmönsiirtokanavassa, jolloin virtaus joutuu kiertämään toista reittiä. Vetojen rakenteet vaihtelevat eri valmistajien välillä. Vetoja voidaan käyttää, kun halutaan esimerkiksi, että painehäviö olisi korkeampi tapauksissa, joissa lämmönsiirto olisi muuten liian heikko. Kuvissa 2 ja 3 (Savree, 2020) on esitetty virtaukset 1-vetoisessa levylämmönsiirtimessä ja 2-vetoisessa levylämmönsiirtimessä. Kuvassa 2 näkyy, kuinka kuuma virta tulee ylhäältä sisään ja kulkeutuu tasaisesti lämmönsiirrinlevyjä pitkin alas koko matkalta ja poistuu kuuman puolen ulostulosta. Vastaavasti kylmä puoli tulee alhaalta sisään ja poistuu ylhäältä. Kuvan 2 molemmat virtaukset kulkevat siis vain yhden vedon. Kuvassa 3 sen sijaan kuuma puoli tulee sisään alhaalta vasemmalta ja kulkeutuu ylös, kunnes se kääntyy ja kulkeutuu toisen puoliskon lämmönsiirrinlevyistä alaspäin ja tulee ulos alhaalta oikealta. Kylmä virta tekee saman, mutta toisin päin eli oikealta alhaalta sisään ja vasemmalta

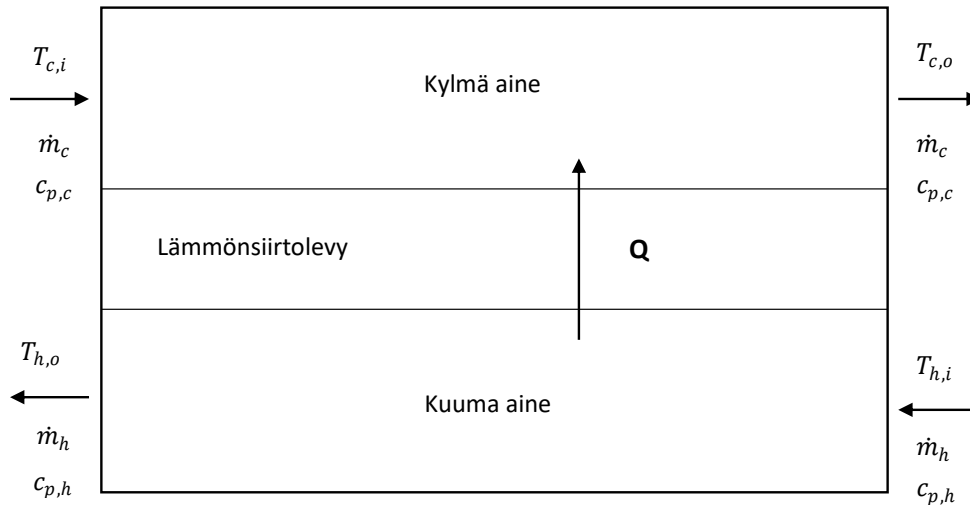
2.2.2 Lämmönsiirtimen teoriaa

Lämpötehot lämmönsiirtimen kylmällä ja kuumalla puolella voidaan esittää kaavojen (2.5) ja (2.6) mukaisesti ominaislämpökapasiteettien c_p [kJ/kgK], massavirtojen \dot{m} [kg/s] ja lämpötilaerojen T [K] avulla:

$$\phi_h = \dot{m}_h * c_{p,h} * (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.5)$$

$$\phi_c = \dot{m}_c * c_{p,c} * (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2.6)$$

Kuvassa 4 on esitetty lämmönsiirtimen energiatase, jolla voidaan havainnollistaa lämpötehojen yhtälöitä (2.5) ja (2.6). Kuvassa kylmän puolen aine on ylimmäisessä osiossa, lämmönsiirtokanavassa. Alimmassa osiossa on kuuman puolen aine omassa lämmönsiirtokanavassaan. Osioden välissä on lämmönsiirtolevy, joka erottaa aineet toisistaan ja jonka avulla lämpö siirtyy kuumasta aineesta kylmään. Vasemmalla ylhäällä kylmä aine tulee sisään tietyllä massavirralla (\dot{m}_c), lämpötilalla ($T_{c,i}$) ja ominaislämpökapasiteetilla ($c_{p,c}$). Vastaavat kuuman puolen suureet ovat esitetty oikealla alhaalla. Kuvan keskellä on osoitettu nuolella, kuinka lämpö Q siirtyy kuumalta puolelta kylmälle puolelle lämmönsiirtolevyn kautta. Kylmä aine kulkee lämmönsiirtokanavan läpi ja tullessaan ulos sillä on sama massavirta ja ominaislämpökapasiteetti, mutta lämpötila on muuttunut ($T_{c,o}$) kuuman puolen luovuttaman lämmön seurauksena. Näillä arvoilla saataisiin laskettua kylmän puolen lämpöteho sekä kuuman puolen lämpöteho kaavojen (2.5) ja (2.6) mukaisesti.



Kuva 4. Lämmönsiirtimen energiatase.

Lämmönsiirtimiä käsiteltäessä tehdään yleensä oletus, että edellä mainitut tehot ovat yhtä suuret. Tämän oletuksen perusteella kaikki lämmönsiirtimen kuumalta puolelta siirtyvä lämpö siirtyisi kylmälle puolelle. Tämä ei kuitenkaan käytännössä toteudu, koska lämpöä siirtyy tämän lisäksi myös ympäristöön lämpöhäviönä. Lämpöhäviöitä voidaan koittaa minimoida käyttämällä eristyksiä. Täydellistä eristystä, jonka avulla lämpöhäviöitä ei syntyisi ollenkaan, ei kuitenkaan ole olemassa. Kuumen ja kylmän puolen virtaukset voidaan olettaa olevan staattisia. Tämä tarkoittaa sitä, että massavirrat ja lämpötilat eivät muutu ajan funktiona, eli lämpöä siirtyy vain virtaavien aineiden välillä. Jos oletetaan, että lämpöhäviöitä ympäristöön ja lämmönsiirtimen rakenteisiin ei ole, voidaan kirjoittaa tasapaino kaavan (2.7) mukaisesti:

$$\phi = \phi_h = \phi_c \quad (2.7)$$

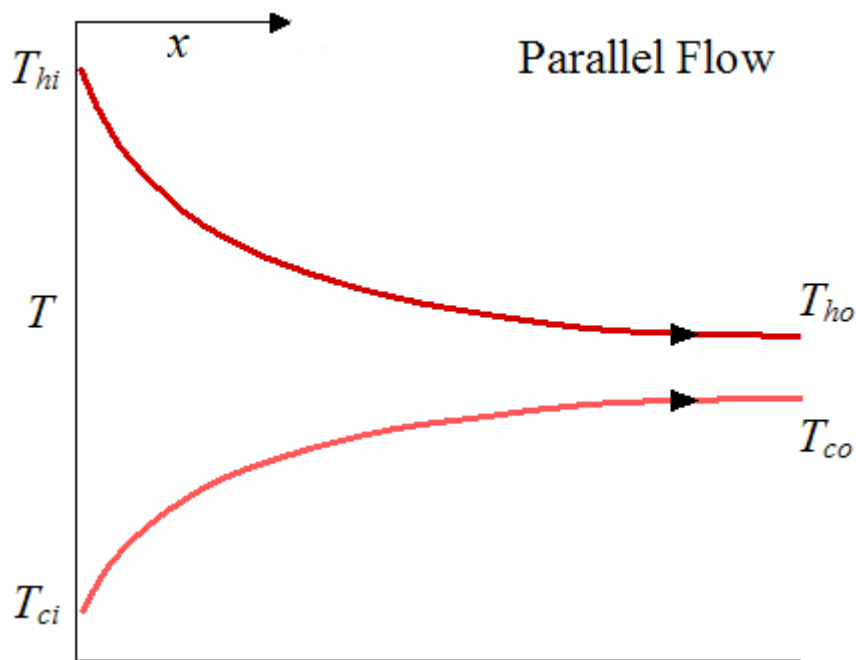
Siirtyvä lämpöteho voidaan myös selvittää kaavan (2.8) avulla:

$$\phi = U * A * \Delta T_{LM} \quad (2.8)$$

jossa U on lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], A on lämmönsiirtopinta-ala [m^2] ja ΔT_{LM} on logaritminen lämpötilaero kylmän ja kuumen virtauksen välillä [K].

Logaritmisen lämpötilaeron määrittämiseen vaikuttaa lämmönsiirtimen virtauksen tyyppi. Virtaus voi olla myötävirta tai vastavirta. Myötävirrassa virtaukset

kulkevat samaan suuntaan. Myötävirrassa lämpötilaero on suurimmillaan virtausten tullessa lämmönsiirtimeen sisään ja lämpötilaero pienenee koko lopun siirtimen läpi. Tämä voidaan havainnollistaa myötävirtasiirtimen Q,T-kuvaajalla, joka on esitetty kuvassa 5 (Normani, 2009). Kuvassa vaaka-akselilla x kuvaa siirtymää eli ns. matkaa lämmönsiirtimen läpi. Pystyakselilla on kuvattuna lämpötilat, joista kuuman puolen sisääntulo on ylhäällä T_{hi} ja kylmän puolen sisääntulo T_{ci} on alhaalla. Lämpötilaero on ensin suuri ja pienenee mitä lähemmäksi ulostuloja (T_{ho} ja T_{co}) mennään.



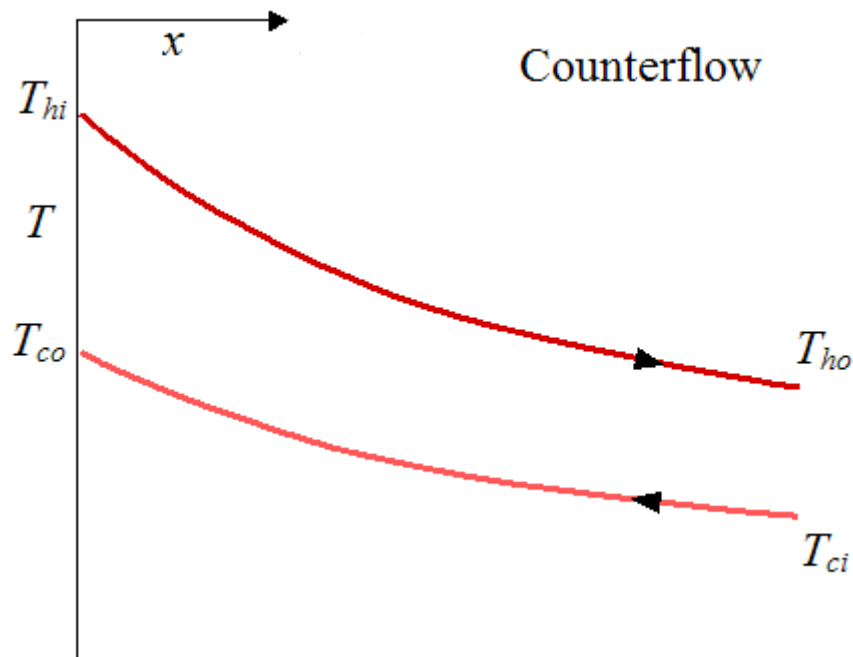
Kuva 5. Virtausten lämpötilat myötävirtalämmönsiirtimessä (Normani, 2009).

Myötävirtalämmönsiirtimen logaritminen lämpötilaero määritellään kaavan (2.9) mukaisesti:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \Delta T_2 - \ln \Delta T_1} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,o}) - (T_{h,i} - T_{c,i})}{\ln(T_{h,o} - T_{c,o}) - \ln(T_{h,i} - T_{c,i})} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,o}) - (T_{h,i} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{h,o} - T_{c,o})}{(T_{h,i} - T_{c,i})}} \quad (2.9)$$

Vastavirtalämmönsiirtimissä virtaukset kulkevat toisiaan vasten. Tämän johdosta virtausten välinen lämpötilaero on vakio lähes koko siirtimen ajan, jos aineiden massavirrat ja ominaislämpökapasiteetit ovat yhtä suuria. Vastavirtalämmönsiirtimen Q,T-kuvaaja on esitetty kuvassa 6 (Normani, 2009). Kuvan 4 periaate on sama kuin kuvan

3, eli vaaka-akselilla x kuvaa siirtymää lämmönsiirtimen läpi ja pystyakselilla on lämpötila. Vastavirrassa on erona se, että kuuman puolen sisääntulo on samassa päässä kuin kylmän puolen ulostulo ja sama toisinpäin.



Kuva 6. Virtausten lämpötilat vastavirtalämmönsiirtimessä (Normani, 2009).

Logaritminen lämpötilaero vastavirtalämmönsiirtimelle määritellään kaavan (2.10) mukaan:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \Delta T_2 - \ln \Delta T_1} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o})}{\ln(T_{h,o} - T_{c,i}) - \ln(T_{h,i} - T_{c,o})} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o})}{\ln \frac{(T_{h,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,o})}} \quad (2.10)$$

Vastavirtalämmönsiirrin on yleisesti ottaen tehokkaampi kuin myötävirtalämmönsiirrin. Vastavirtalämmönsiirrin vaatii pienemmän lämmönsiirtopinta-alan saman lämmönsiirtotehon saavuttamiseksi, kuin myötävirtalämmönsiirrin. Tämän lisäksi vastavirtalämmönsiirtimessä kylmän virtauksen ulostulolämpötila voi olla suurempi kuin kuuman virtauksen ulostulolämpötila, mutta myötävirtalämmönsiirtimessä näin ei voi tapahtua. Tästä huolimatta myötävirtalämmönsiirtimillä on käyttöä, esim. kun halutaan tarkoituksenmukaisesti rajoittaa lämmönsiirtoa virtausten välillä. (Normani, 2009)

Lämmönläpäisykerroin U voidaan määrittellä lämpövastusten käänteislukujen summana kaavan (2.11) mukaan:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{l}{k} + \frac{1}{h_c} + R_f \quad (2.11)$$

jossa:

h_h on kuuman virtauksen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m²K]

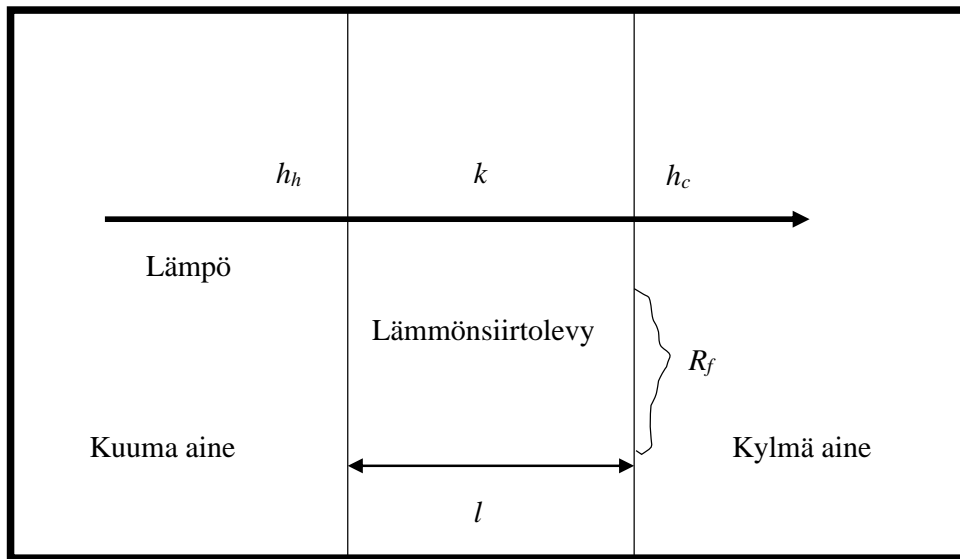
l on lämmönsiirtimen seinän paksuus [m]

k on lämmönsiirtimen seinän materiaalin lämmönjohtavuus [W/mK]

h_c on kylmän virtauksen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [W/m²K]

R_f on likaantumiskerroin [W/m²K]. (Wang et al. 2007)

Kuvassa 7 on esitetty lämmönläpäisykerroimen periaate. Kuvassa on keskellä lämmönsiirtolevy eli lämmönsiirtimen seinä, jonka paksuus l on kuvattu kahdensuuntaisella nuolella. Kuuma aine on vasemmalla ja kylmä aine on oikealla puolella levyä. Lämpö virtaa vasemmalta oikealle eli lämpimästä kylmään. Lämmön siirtoa on kuvattu nuolella. Kuuman ja kylmän aineen konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet ovat kuvattu vastaavilla puolillaan h_h ja h_c . Lämmönsiirtolevyn eli lämmönsiirtimen seinän materiaalin lämmönjohtavuus k on kuvattu keskellä. Kylmällä puolella on esitetty likaantumiskertymä lämmönsiirtolevyn pinnalla, jonka likaantumiskerroin R_f vaikuttaa lämmönläpäisykerroimeen kaavan (2.11) mukaisesti.



Kuva 7. Lämmönläpäisykertoimeen vaikuttavat tekijät.

Lämmönsiirtimien analysoinnissa tarvitaan kaksi dimensiotonta lukua. Reynoldsin luku, joka kuvaa virtauksen inertian ja viskoosien voimien suhdetta ja Prandtlin luku, joka kuvaa kinemaattisen ja termisen diffuusion suhdetta, mikä riippuu vahvasti lämpötilasta. Reynoldsin luku levylämmönsiirtimelle määritellään kaavan (2.12) mukaan:

$$Re = \frac{D_h * u}{\nu} = \frac{2 * s * u}{\nu} \quad (2.12)$$

jossa:

D_h on hydraulinen halkaisija [m]

s on lämmönsiirtokanavan pituus [m]

u on virtauksen keskinopeus [m/s]

ν on kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]. (Wang et al. 2007)

Hydraulista halkaisijaa käytetään, kun käsitellään virtauksia kanavissa, jotka eivät ole pyöreitä. Hydraulisen halkaisijan avulla voidaan laskea eri asioita eri muotoisilla kanavilla, koska hydraulisen halkaisijan avulla kanavan poikkipinta-ala tiedetään. Kun

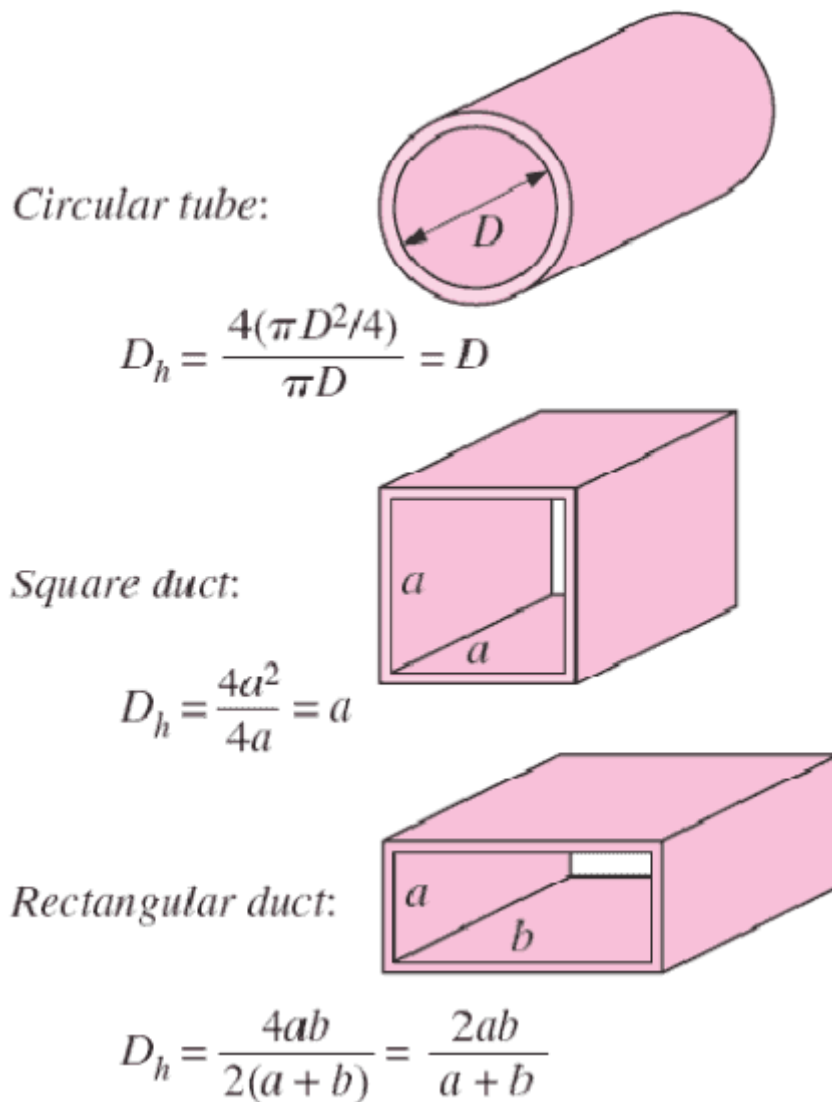
kanavan poikkipinta-ala on yhdenmukainen, hydraulinen halkaisija lasketaan kaavan (2.13) mukaan:

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (2.13)$$

jossa A on kanavan poikkipinta-ala [m^2] ja P on märkä piiri [m]. (White, 2011) Märällä piirillä tarkoitetaan kanavassa sitä aluetta, joka on kosketuksissa kanavassa virtaavan aineen kanssa (Knighton, 1998). Kun kanavan poikkipinta-ala ei ole yhdenmukainen, hydraulinen halkaisija lasketaan kaavan (2.14) mukaan:

$$D_h = \frac{4 \cdot V}{S} \quad (2.14)$$

jossa V on kokonaismärkätilavuus [m^3] eli koko kanavan tilavuus, joka on kosketuksissa kanavassa virtaavan aineen kanssa. S on kokonaismärkäalue [m^2] eli kanavan kokonaispinta-ala, joka on kosketuksissa virtaavan aineen kanssa. (White, 2011) Kuvassa 8 (Connor, 2019) on esitetty hydraulisen halkaisijan laskentatapoja eri geometrioille. Ylimpänä on pyöreä muoto, jolloin hydraulinen halkaisija on sama kuin varsinainen halkaisija. Keskimmäisenä on neliön muotoinen kanava, jolloin hydraulinen halkaisija on sama kuin yhden sivun pituus. Alimpana on suorakulmion muotoinen kanava. Suorakulmiolla, ja muilla monimutkaisimmilla muodoilla hydraulisen halkaisijan laskeminen on monimutkaisempi, kuin ympyrällä ja neliöllä. Tämän takia hydraulisen halkaisijan laskeminen levylämmönsiirtimelle on huomattavasti monimutkaisempaa, kuin esimerkiksi putkisiirtimelle.



Kuva 8. Eri geometrioiden hydraulisia halkaisijoita (Connor, 2019).

Prandtlin luku määritellään kaavan (2.15) mukaan:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k}, \quad (2.15)$$

jossa μ on dynaaminen viskositeetti [Pa*s]. (Wang et al. 2007)

Myötävirtalämmönsiirtimelle ja vastavirtalämmönsiirtimelle voidaan määrittää lämmönsiirtimen tehokkuus. Myötävirtalämmönsiirtimen tehokkuus kaavan (2.16) mukaisesti:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1+R)}}{1+R} \quad (2.16)$$

ja vastavirtalämmönsiirtimelle kaavan (2.17) mukaisesti:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-R)}}{1 - R * e^{-NTU(1-R)}}, \quad (2.17)$$

joissa R on kapasiteettisuhde, joka lasketaan kaavan (2.18) mukaisesti:

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{\min(C_H, C_C)}{\max(C_H, C_C)}, \quad (2.18)$$

joissa puolestaan C on lämpökapasiteetti [J/K] tai lämpökapasiteettivirta \dot{C} [W/K].
Lämpökapasiteetti C lasketaan massan m [kg] ja ominaislämpökapasiteetin c_p [J/kg*K] avulla kaavan (2.19) mukaisesti:

$$C = m * c_p \quad (2.19)$$

Lämpökapasiteettivirta \dot{C} lasketaan massavirran \dot{m} [kg/s] ja ominaislämpökapasiteetin avulla kaavan (2.20) mukaan:

$$\dot{C} = \dot{m} * c_p \quad (2.20)$$

NTU on siirrettyjen lämpöyksiköiden määrä ja se lasketaan kaavan (2.21) mukaan:

$$NTU = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} \quad (2.21)$$

joissa:

U on lämmönläpäisykerroin [W/m²*K]

A on lämmönsiirtopinta-ala [m]. (Wang et al. 2007)

2.3 Likaantuminen

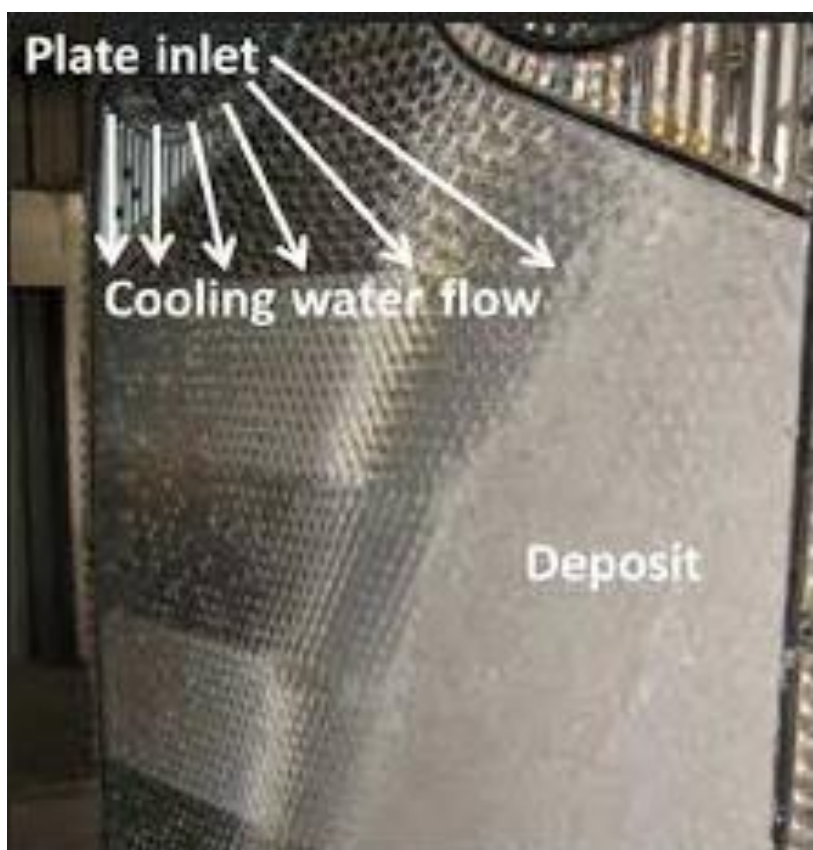
Lämmönsiirtimen likaantuminen voidaan määritellä ei-haluttujen kerääntymien muodostumisena lämmönsiirtopinnoille. Likakerros toimii eristeenä lämmönsiirtopinnalla ja täten huonontaa lämmönsiirtoa. Tämän lisäksi likakerros

pienentää lämmönsiirtokanavan poikkileikkauksen pinta-alaa ja aiheuttaa virtausnopeuden suurenemisen. Likakerros on myös yleensä epätasaista, joka kasvattaa virtaavan aineen virtausvastusta. Likaantuminen aiheuttaa lämmönsiirtimessä yleensä lämmönsiirtotehokkuuden huonontumisen ja muita lämmönsiirtimen käyttöön liittyviä ongelmia, kuten lämmönsiirtimen läpi muodostuvan painehäviön suurenemisen. (Bott, 2011)

Lämmönsiirtimen likaantumisaste riippuu lämmönsiirrintyyppistä, virtaavasta aineesta ja käyttöolosuhteista. Myös likakerääntymien ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Joissakin tapauksissa kerääntymät ovat kovia ja vaikeita poistaa, muissa tapauksissa kerääntymät saattavat olla pehmeitä ja lähtevät helposti pois. Likaantumistyyppjä on erilaisia ja ne voidaan kategorisoida esimerkiksi seuraavanlaisesti:

1. Kiteytymislikaantuminen (crystallization fouling) on likaantumistyyppi, jossa kiteitä muodostuu lämmönsiirtopinnalle.
2. Pienhiukkaslikaantumisessa (particulate fouling) erikokoisia pienhiukkasia kertyy lämmönsiirtopinnalle ja muodostavat lopulta likakerroksen.
3. Biologisessa likaantumisessa (biological fouling) elävä orgaaninen materia kasvaa lämmönsiirtopinnalla. Tätä saattaa tapahtua, jos esim. vesi sisältää mikro- ja/tai makro-organismeja.
4. Kemiallinen likaantuminen (chemical reaction fouling) on likaantumista, jossa kemiallinen reaktio lämmönsiirtopinnalla tai sen lähellä aiheuttaa likakerrostuman muodostumisen. Kemiallisen reaktion saattaa aiheuttaa lämmönsiirtimessä esimerkiksi prosessiaineen lämpötilan muutos.
5. Korrosoiva likaantuminen (corrosion fouling) on likaantumistyyppi, jossa prosessissa käytössä oleva fluidi aiheuttaa korroosiota lämmönsiirtopinnalle. Korroosiolikaantumiselta pystytään välttymään esimerkiksi valitsemalla tarpeeksi kestävä materiaali.
6. Jäätymislikaantumista (freezing fouling) tapahtuu, kun lämmönsiirtimessä virtaava neste jäätyy lämmönsiirtopinnalle. Muodostuva jää toimii eristeenä lämmönsiirrolle samalla tavalla kuin likakerros.

On yleistä, että lämmönsiirtimen likakertymät sisältävät monta erilaista likaantumistyyppiä. Esimerkiksi vesi saattaa aiheuttaa korrosoivaa likaantumista, pienhiukkaslikaantumista, kiteytymislikaantumista ja biologista likaantumista. Se, että mitä edellisistä likakertymistä lämmönsiirtimessä esiintyy ja kuinka paljon, riippuu monesta eri tekijästä, kuten veden laadusta, alkuperästä ja sen puhdistusmenetelmistä. (Bott, 2011) Kuvassa 9 (Kananeh & Peschel, 2012) on esimerkki levylämmönsiirtimen likaantumisesta, jossa likakertymä näkyy harmaana kerroksena levyn oikeassa reunassa. Lämmönsiirtimen pintaa, joka on tämän likakerroksen peittämä, ei pystytä hyödyntämään lämmönsiirrossa.



Kuva 9. Levylämmönsiirtimen lämmönsiirtopinnalla näkyvä likakerros (Kananeh & Peschel, 2012).

Lämmönsiirtimen suunnittelussa likaantuminen otetaan yleensä huomioon niin sanotun likaantumiskertoimen (fouling factor) avulla. Mitä enemmän likaantumiskerrointa lämmönsiirtimen suunnittelussa on käytetty, sitä enemmän ylimääräistä lämmönsiirtopinta-alaa lämmönsiirtimessä on. Ylimääräisellä

lämmönsiirtopinta-alalla tarkoitetaan sitä, että annetuilla arvoilla halutun lämpötehon saavuttamiseksi vaaditun lämmönsiirtopinta-alan lisäksi lämmönsiirtimeen mitoitetaan ylimääräistä pintaa, jotta haluttu teho saavutetaan, vaikka likaantumista esiintyisi. (Bott, 2011)

3 JÄÄTYMINEN

Jäätyminen voidaan määritellä jonkin nesteen tai jonkin aineen nestekoostumuksen jähmettymisenä faasimuunnoksen takia. Faasimuunnoksen aiheuttaa yleensä lämpötilan tippuminen. (International Dictionary of Refrigeration, 2015) Toisin sanoen, kun jonkin nesteen lämpötila saavuttaa sen jäätymispisteen, faasimuunnos kiinteäksi aineeksi alkaa. Useimmilla aineilla sulamis- ja jäätymispiste on samassa lämpötilassa, vaikkakin poikkeuksia on olemassa. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin faasimuunnosta.

3.1 Faasimuunnos

Faasimuunnoksessa aine muuttuu olomuotoaan esim. jäätymisessä nesteestä kiinteäksi, tai höyrystymisessä nesteestä kaasuksi. Faasimuunnoksen aikana aine joko luovuttaa tai sitoo energiaa, mutta lämpötila ei muutu. Lämpötila muuttuu vasta, kun faasimuutos on valmis. Jonkin tietyn aineen faasimuunnoksen vaatiman lämpöenergian Q laskeminen onnistuu kaavojen (3.1) ja (3.2) avulla:

$$Q_f = m * L_f \quad (3.1)$$

$$Q_v = m * L_v \quad (3.2)$$

joissa:

Q on faasimuunnoksen vaatima lämpöenergia [kJ]

m on aineen massa [kg]

L_f on sulamisen ja jäätymisen latenttienergia [kJ/kg]

L_v on höyrystymisen ja lauhtumisen latenttienergia [kJ/kg].

Huomioitavaa on, että lauhtumisen ja jäätymisen tapauksissa aine luovuttaa energiaa, jolloin edellä mainittujen kaavojen avulla tehdyt laskut antavat negatiivisen tuloksen. (Faghri & Zhang, 2020)

Kuvassa 10 on esitetty veden faasimuunnokset. X-akselilla on lisätyn energian määrä painoyksikköä kohden ja y-akselilla on lämpötila. Veden ominaislämpökapasiteetti on 4,2 kJ/kg*K, veden jäätyksen latenttienergia on 334 kJ/kg ja veden höyrystymisen latenttienergia on 2260 kJ/kg (The Engineering Toolbox, 2010). Veden lämmittämiseen kulunut energia eli lämpömäärä Q saadaan laskettua kaavan (3.3) avulla. Lämpömäärän yksikkö on joule [J].

$$Q = m * c_p * (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

jossa:

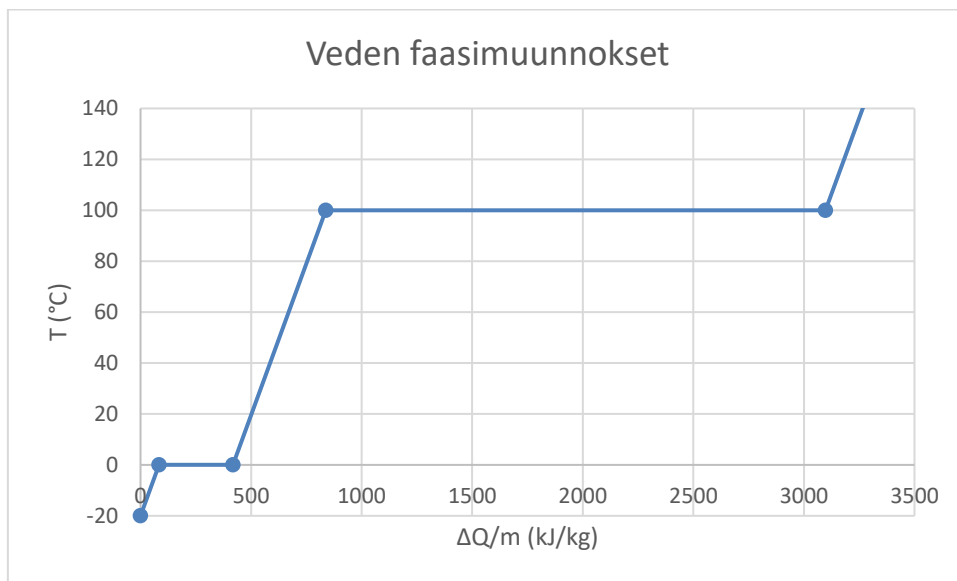
m on kappaleen massa [kg]

c_p on aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg*K]

T_2 ja T_1 ovat lämpötilat eri pisteissä [K].

Kaava (3.3) on hyvin samantapainen kuin kaavat (2.5) ja (2.6), joilla lasketaan lämpötehot lämmönsiirtimen kylmällä ja kuumalla puolella.

Voimme laskea veden lämmityksen ja faasimuunnosten vaatiman energian määrän kaavojen (3.1), (3.2) ja (3.3) avulla. Oletetaan, että tarkasteltava kappale vettä painaa 1 kg. Lasketaan ensin energian määrä, joka tarvitaan, että 1 kg kappale -20 °C jäätä lämmitetään sulamispisteeseen eli 0 °C. Kaavan (3.3) avulla saadaan lämmitykseen vaadituksi energiaksi 84 kJ. Seuraavaksi lasketaan jään sulamiseen vaadittu energia. Kaavan (3.1) avulla saadaan 334 kJ. Tulos on sama, kuin veden jäätyksen latenttienergia, koska tarkasteltava kappale painaa 1 kg. Seuraavaksi lasketaan tarvittu energian määrä, kun vesi lämmitetään 0 °C – 100 °C. Kaavan (3.3) avulla saadaan 420 kJ. Viimeiseksi lasketaan vielä veden höyrystymiseen tarvittava energia. Kaavan (3.2) avulla saadaan 2260 kJ/kg.



Kuva 10. Veden faasimuunnokset ja niiden vaatima energia.

Kuvassa 10 havainnollistuu, kuinka veden lämpötila ei muutu faasimuunnoksen aikana. Kaikki energia menee faasimuunnoksen aikaansaamiseen. Lämpötila muuttuu vasta, kun faasimuunnos on valmis.

3.2 Jäätymisen teoriaa

Suurin osa nesteistä jäätyy kiteytymisen johdosta, eli kiinteiden kiteiden muodostumisesta yhtenäisestä nesteestä. Tämä on ensimmäisen asteen termodynaaminen faasimuunnos, joka tarkoittaa sitä, että niin kauan kuin kiinteä ja neste ovat samaan aikaan olemassa, koko systeemin lämpötila säilyy lähes samana kuin sulamispisteen lämpötila. Tämä puolestaan johtuu lämmön hitaasta poistumisesta aineen ollessa kosketuksissa ilman kanssa. Ilma on huono lämmönjohde. Sulamisen latenttilämmön johdosta jäätyminen hidastuu suuresti ja lämpötila ei tipu, kun jäätyminen alkaa, mutta lämpötilan tippuminen jatkuu, kun jäätyminen on tapahtunut. Kiteytyminen koostuu kahdesta tapahtumasta: nukleaatiosta ja kiteiden kasvusta. Nukleaatiossa molekyylit alkavat kerääntyä ryhmiä nanoskaalalla, järjestäytyen tiettyyn tapaan, joka määrittää kiteiden rakenteen. Kiteiden kasvu on niiden ydinten kasvua, jotka saavuttavat tarpeeksi suuren ryhmän koon. (Pedersen et al. 2016)

3.2.1 Nukleaatio

Nukleaatio on ensimmäinen vaihe aineen olomuodon muutoksessa tai aineen rakenteen muutoksessa. Tyypillisesti juuri nukleaatiosta riippuu, kuinka kauan kestää, ennen kuin olomuodon muutoksen tai rakenteen muutoksen voi havaita ulkoisesti. (Sear, 2006)

Nukleatioon vaikuttaa epäpuhtaudet. Esimerkiksi jos vesi on täysin puhdasta ja eristyksissä ilmasta, se ei jäädy 0 °C lämpötilassa, vaan voi olla huomattavasti kylmempää. Mutta kun vesi on kontaktissa ilman kanssa ja sisältää epäpuhtauksia, mitä vedessä normaalisti on, se jäätyy noin 0 °C tuntumassa. Mitä kylmempi lämpötila on, sitä nopeammin nukleaatio tapahtuu ja jää muodostuu nopeammin. (Sear, 2006)

Nukleaatio eritellään usein heterogeeniseen nukleatioon ja homogeeniseen nukleatioon. Heterogeeninen nukleaatio tapahtuu systeemin pinnalla nukleatiokeskitymissä ja homogeeninen nukleaatio tapahtuu kauempana pinnasta. Heterogeeninen nukleaatio on huomattavasti yleisempää kuin homogeeninen nukleaatio. (Sear, 2006)

3.3 Etyleeniglykolin ominaisuudet

Etyleeniglykoli on orgaaninen yhdiste, jonka kemiallinen kaava on $(\text{CH}_2\text{OH})_2$. Etyleeniglykolia käytetään raaka-aineena polyestereiden valmistuksessa, sekä jäätymistä estävänä aineena eri sovelluksissa, kuten tässä diplomityössä käsiteltävässä lämmönsiirrinprosessissa. Puhtaan etyleeniglykolin jäätymispiste on -12 °C, mutta kun etyleeniglykoliin lisätään vettä, syntyvä etyleeniglykolin ja veden seos jäätyy huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa. (Yue et al. 2012) Taulukossa 1 on esitetty vesietyleeniglykoliseoksen jäätymispisteitä eri glykolin pitoisuuksilla (The Engineering Toolbox, 2003). Taulukossa vasemmalla sarakkeella on etyleeniglykolin osuus seoksesta prosentteina ja oikealla sarakkeella on jäätymispiste Celsiusasteina.

Taulukko 1. Vesietyleeniglykoliseoksen jäätymispisteitä eri seososuuksilla.

Etyleeniglykolin osuus seoksesta (%)	Jäätymispiste (°C)
0	0,0
10	-3,4
20	-7,9
30	-13,7
40	-23,5
50	-36,8
60	-52,8
80	-46,0
90	-30,0
100	-12,8

Taulukosta 1 lukemalla huomataan, että alhaisin jäätymispiste saavutetaan, kun etyleeniglykolia on seoksesta 60 %. Lämmönsiirtimen jäätyminen on kuitenkin monimutkaisempaa kuin pelkkä vesi-glykoliseoksen jäätymispiste, koska lämmönsiirtoon liittyvät ominaisuudet kuten viskositeetti ja tiheys vaikuttavat myös vesi-glykoliseoksen käyttäytymiseen lämmönsiirtimessä ja siten myös jäätymiseen. Useasti käytännön prosesseissa käytetäänkin 40 % tai 50 % glykoliseoksia juuri parempien lämmönsiirto-ominaisuuksien takia.

Taulukossa 2 on esitetty eri tiheyksiä vesietyleeniglykoliseoksille 10 % - 60 % (The Engineering Toolbox, 2003). Sarakkeessa on etyleeniglykolin seososuudet, lämpötilat ovat rivissä -48–60 °C ja ruudukoissa on seososuutta ja lämpötilaa vastaavat tiheydet kg/m³.

Taulukko 2. Vesietyleeniglykolin tiheyksiä eri seososuuksilla ja lämpötiloilla.

Etyleeniglykolin osuus seoksesta (%)	Tiheys (kg/m ³)									
	Lämpötila (°C)									
	-48	-35	-25	-14	-8	-4	0	20	40	60
10						1019	1018	1014	1008	1000
20					1038	1037	1036	1030	1022	1014
30				1058	1056	1055	1054	1046	1037	1027
40			1080	1077	1075	1073	1072	1063	1052	1030
50		1103	1100	1096	1093	1092	1090	1079	1067	1042
60	1127	1124	1120	1115	1112	1110	1107	1095	1082	1055

Taulukosta 2 nähdään, että tiheys kasvaa, mitä alhaisempi lämpötila on ja mitä suurempi glykolin osuus seoksesta on.

Taulukossa 3 on esitetty vesietyleeniglykolin dynaaminen viskositeetti eri seososuuksilla ja lämpötiloilla (The Engineering Toolbox, 2003). Etyleeniglykolin osuus seoksesta prosentteina on sarakkeessa vasemmalla. Ylhäällä rivissä on lämpötilat ja taulukon ruudukossa on viskositeetit.

Taulukko 3. Vesietyleeniglykolin viskositeettejä eri seososuuksilla ja lämpötiloilla.

Dynaaminen viskositeetti (mPa*s)					
Glykolin osuus (%)	Lämpötila (°C)				
	-17,8	4,4	26,7	48,9	71,1
25	-	3	1,5	0,9	0,65
30	-	3,5	1,7	1	0,7
40	15	4,8	2,2	1,3	0,8
50	22	6,5	2,8	1,5	0,95
60	35	9	3,8	2	1,3

Taulukosta 3 nähdään, että dynaaminen viskositeetti suurenee mitä alhaisemmat lämpötilat ovat ja mitä isompi etyleeniglykolin osuus on seoksesta. Tämä tarkoittaa sitä, että jos lämpötilat ovat alhaiset tai glykolin osuus seoksesta on suuri, etyleeniglykoli liikkuu lämmönsiirtimen kanavissa vaikeammin ja glykolin jähmettyminen ja lopulta jäätyminen saattaa tapahtua helpommin. Toisaalta suuremmalla pitoisuudella on myös alempi jäätymispiste.

4 KIRJALLISUUSTUTKIMUS

Seuraavaksi käydään läpi muita lämmönsiirtimen jäätymiseen liittyviä tutkimuksia. Tutkittavasta aiheesta ei löydy suuria määriä kirjallisuutta, koska aihetta on ruvettu tutkimaan enemmän vasta hiljattain.

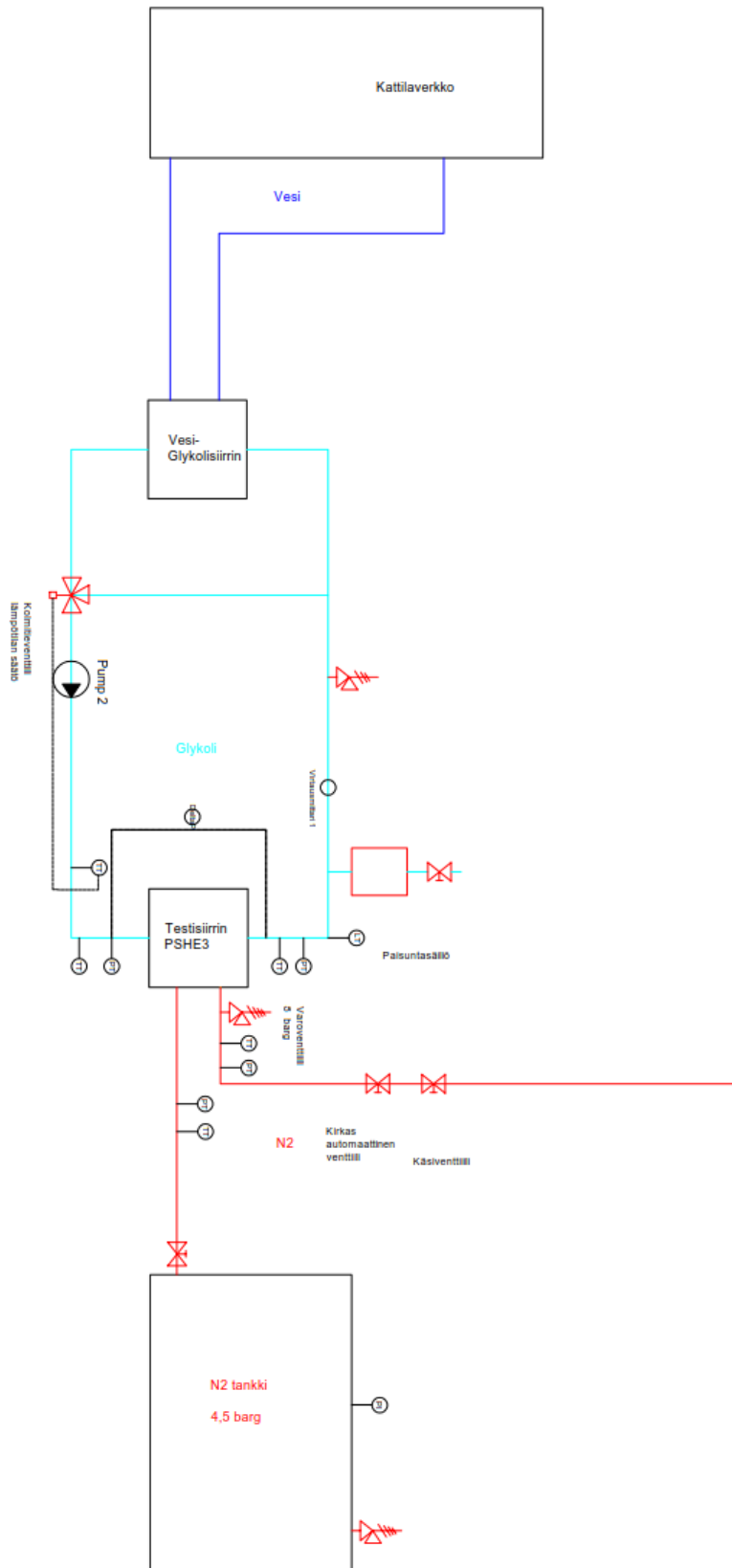
Brenk et al. (2020) tutkivat geometristen muutosten vaikutusta putkilämmönsiirtimen suorituskykyyn sekä jäätymisriskiin LNG:n höyrystämisen prosessissa. Tutkimus liittyy hyvin läheisesti tähän diplomityöhön. Suuri ero on tietenkin tutkittavassa lämmönsiirtimessä, joka tämän diplomityön tapauksessa on hitsattu levylämmönsiirrin ja Brenk et al. tutkimuksessa putkisiirrin. Tutkimuksessa kehitettiin numeerinen malli, jonka avulla LNG höyrystimen jäätymisriskiä voitaisiin analysoida putkisiirtimessä. Malli koostui kahdesta osasta: höyrystyvän LNG:n lämmönsiirto, sekä vesiglykoliseoksen jäätyksen piirteet. Tutkimuksessa esitettiin jatkuva ja differentioituva määritelmä LNG:n kiehumiskäyrälle, jotta kehitetty numeerinen malli voitaisiin yleistää useille eri kiehumisalueille. Kehitettyä numeerista mallia käytettiin useiden eri virtausolosuhteiden sekä putkien eri mallien ja kokojen tutkimukseen. Tutkimuksissa kävi ilmi, että jäätymistä voisi indikoida, kun Reynoldsin luku saavuttaisi kriittisen arvon. Tehty tutkimus mahdollisti lämpövuon ja pumpun tehon suhdeluvun määrittämisen. Suhdeluvun mukaan litistetyt putket takaisivat paremman lämmönsiirron, paremman luotettavuuden ja myös pienentäisi pumpun vaatimaa tehoa.

Rogala et al. (2019) analysoivat jäätymisriskiä LNG höyrystämisen prosessissa teoreettisesti sekä numeerisesti. Tutkimuksessa keskityttiin useiden eri parametrien yhteiseen vuorovaikutukseen, jotka ovat tärkeässä roolissa höyrystymisen prosessissa. Tutkimus perustui nollaulotteiseen malliin, joka validoitiin vertaamalla erääseen hyväksi todettuun CFD-malliin. LNG:n kiehumisalueet todettiin olevan tärkeä tekijä jäätymisriskin arvioimisen kannalta.

5 TESTIT

Testien tarkoituksena oli mallintaa LNG-lämmönsiirtimien toimintaa nestemäisen tyypin avulla. LNG-siirtimissä iso kysymysmerkki on toisen puolen aineen (useasti glykoli) jäätyminen. Testien avulla tutkittiinkin nimenomaan siirtimen jäätymistä. Milloin siirrin alkaa jäätymään? Kuinka jäätyminen tapahtuu? Mitkä tekijät vaikuttavat jäätyksen alkamiseen ja sen nopeuteen? Mitä suureita seuraamalla voitaisiin ennustaa siirtimen jäätyminen? Esimerkiksi näihin kysymyksiin haettiin testeillä vastauksia.

Testit suoritettiin Vahteruksen tuotekehityslaboratoriossa. Testeissä käytettiin Vahteruksen hitsattuja levylämmönsiirtimiä. Testilaitteistossa on 3 piiriä. Kattilavesipiiri, glykolipiiri ja typpipiiri. Kuvassa 11 on havainnollistettu testilaitteisto PI-kaaviona. Kattilavesipiirillä, glykolipiirillä ja typpipiirillä on omat värikoodit PI-kaaviossa. Kattilavesipiiri on piirretty sinisellä, glykolipiiri vaaleansinisellä ja typpipiiri punaisella. Kattilalta tuleva vesi lämmittää vesi-glykolisiirtimessä glykolia. Testeissä käytettiin 50 % vesietyleeniglykoliseosta. Glykoli siirtyy vesi-glykolisiirtimen jälkeen glykoli-typpisiirtimeen, jossa glykoli virtaa lämmönsiirtimen kuumalla puolella. Glykoli-typpisiirtimen kylmällä puolella virtaa typpisäiliöstä tuleva nestemäinen typpi, joka höyrystyy glykoli-typpisiirtimessä. Glykolipiirin lämpötilaa säädellään kolmitieventtiilillä ja glykolipiirin virtausta säädellään pumpulla, jota puolestaan säädetään taajuusmuuntajan avulla. Lämpötila-anturit ja paineanturit sijaitsevat glykoli-typpisiirtimen molemmin puolin sekä glykolipiirissä, että typpipiirissä.



Kuva 11. Testilaitteiston PI-kaavio.

Kuvassa 12 on valokuva testilaitteistosta toiminnan aikana. Kuvassa vasemmalla oleva valkoinen lämmönsiirrin on glykoli-typpilämmönsiirrin, jossa nestemäinen typpi höyrystetään ja tulistetaan glykolin avulla. Siirtimen kylmän puolen sisääntulossa näkyy, kuinka kylmä nestemäinen typpi saa aikaan jäätä putkiston ja laipan pinnalla. Oikealla kauimmaisempana oleva tummempi lämmönsiirrin on vesi-glykolisiirrin.



Kuva 12. Testilaitteisto toiminnassa.

Testien aikana tietokoneelta säädeltiin joko glykolin sisääntulolämpötilaa tai glykolin virtausta. Glykolin sisääntulolämpötilaa tai glykolin virtausta tiputettiin niin kauan, kunnes havaittiin, että lämmönsiirrin on todennäköisesti alkanut jäätymään glykolipuolelta tai on jo jäänyt. Typen sisääntulolämpötila pidettiin kaikissa testeissä samana, noin $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jäätyminen havaittiin tarkkailemalla eri suureita kuten typen ulostulolämpötilaa, joka alkaisi pudota, kun lämmönsiirtimeen alkaisi muodostua jääkerrosta. Jääkerroksen peittäessä lämmönsiirtimen lämmönsiirtopintaa, lämmönsiirrin ei pysty enää höyrystämään typpeä eikä varsinkaan tulistamaan sitä. Tarpeeksi pitkälle

jäätymisen edetessä typen ulostulolämpötila hädin tuskin eroaisi sisääntulolämpötilasta. Toinen tarkkailtava suure, jonka avulla pystyttiin havaitsemaan lämmönsiirtimen mahdollinen jäätyminen, oli laskennallinen teho. Lämmönsiirtimen jäätyessä teho tippuu samasta syystä kuin typen ulostulolämpötila. Lämmönsiirtopinnan vähentyessä jäätyminen seurauksena siirrin ei pysty enää toimimaan samalla teholla, kuin ilman jääkerrosta.

Näiden testien tarkoituksena oli kokeilla, kuinka matala glykolin sisääntulolämpötila voisi olla vakiovirtauksella, ennen kuin lämmönsiirrin alkaisi jäätyä. Toisissa testeissä glykolin sisääntulolämpötila pidettiin vakiona, mutta glykolin virtausta pudotettiin vähitellen. Näiden testien tarkoituksena oli puolestaan tutkia, kuinka pieneksi glykolivirtausta pystyttäisiin pudottamaan glykolin sisääntulolämpötilan pysyessä vakiona, ennen kuin lämmönsiirrin alkaisi jäätyä. Testien aikana tietyin väliajoin otettiin ylös seuraavat arvot:

- Lämpöverkoston tulolämpötila [°C].
- Lämpöverkoston paluulämpötila [°C].
- Glykolin sisääntulolämpötila (glykoli-typiksiirtimeen) [°C].
- Glykolin ulostulolämpötila (glykoli-typiksiirtimestä) [°C].
- Typen sisääntulolämpötila [°C].
- Typen ulostulolämpötila [°C].
- Glykolin ulostulopaine [bar].
- Glykolin virtaus [l/s].
- Glykolipuolen paine-ero glykoli-typiksiirtimessä [kPa].
- Glykolipumpun nopeus [Hz].
- Glykolin säätöpiste [°C].
- Typen ulostulopaine [bar].
- Typen sisääntulopaine [bar].
- Laskennallinen teho [kW].
- Lämpöverkon virtaus [l/s].

Tarkoituksena oli myös tarkkailla lämmönsiirtimen minimipintalämpötilaa, glykolipuolen leikkausjännitystä ja glykolipuolen Reynoldsin lukua. Tarkoituksena oli,

että näitä arvoja seuraamalla voitaisiin saada hieman ajatusta jäätymisriskistä jo lämmönsiirrintä mitoittaessa. Tavoitteena on nimenomaan, että jäätymisriski voitaisiin havaita jo Vahteruksen lämmönsiirtimen mitoitusohjelmassa ja asiakkaan kanssa kommunikoinnin avulla voitaisiin valita sellaiset operointiarvot, jossa lämmönsiirtimellä olisi mahdollisimman pieni jäätymisriski. Hypoteesi näiden arvojen kannalta oli, että kun leikkausjännitys ja Reynoldsin luku glykolipuolella on liian alhainen, jäätymisriski on suurempi. Minimipintalämpötila pitäisi myös pitää tarpeeksi korkealla, jotta jäätyminen voitaisiin välttää.

Glykolipuolen leikkausjännitys, Reynoldsin luku ja lämmönsiirtimen minimipintalämpötila saatiin eri mittauspisteille syöttämällä mittauspisteiden operointiarvot eli lämpötilat ja virtaukset Vahteruksen lämmönsiirtimen mitoitusohjelmaan. Reynoldsin luku saadaan aiemmin läpi käydyn kaavan (2.12) avulla. Leikkausjännitys σ lasketaan kaavan (5.1) avulla:

$$\sigma = \frac{\Delta p}{n} * \frac{D_h}{4*s} \quad (5.1)$$

jossa:

Δp on painehäviö [Pa]

n on vetojen määrä lämmönsiirtimen laskettavalla puolella

D_h on hydraulinen halkaisija [m]

s on lämmönsiirtokanavan pituus [m].

Hydraulinen halkaisija D_h lasketaan kaavan (2.14) periaatteella.

Pintalämpötila T_{pinta} lasketaan kaavan (5.2) avulla:

$$T_{pinta} = \frac{(\alpha_1 * T_1 + \alpha_2 * T_2)}{(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (5.2)$$

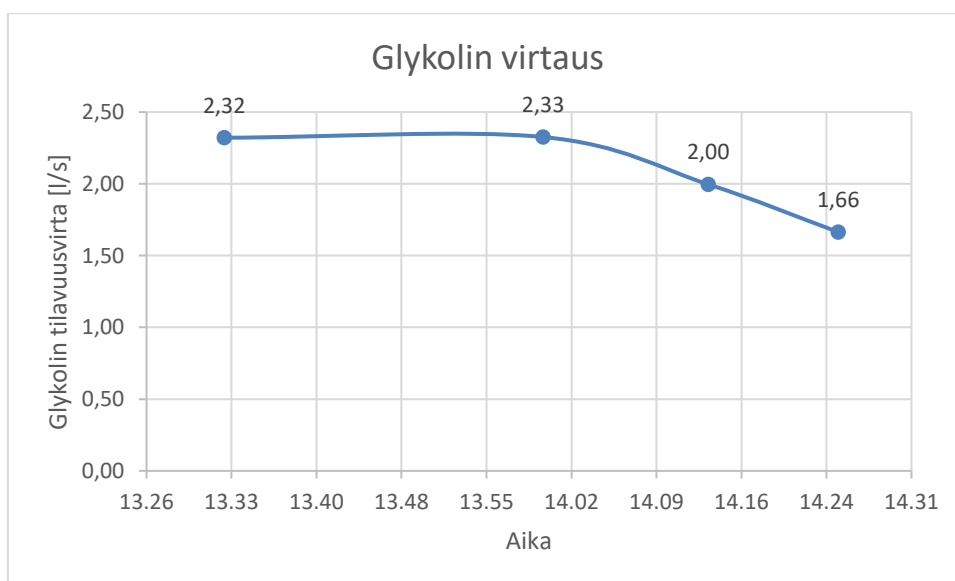
jossa:

α_1 ja α_2 ovat lämmönsiirtokertoimet lämmönsiirtimen kuumalla ja kylmällä puolella [W/m²K]

T_1 ja T_2 ovat lämpötilat lämmönsiirtimeen kuumalla ja kylmällä puolella [K]. Mitoitusohjelma laskee pintalämpötilan eri T_1 ja T_2 arvoilla kohdissa, joissa kuuma ja kylmä virta kohtaavat. Minimipintalämpötilaksi tulee se pintalämpötilan laskettu arvo, joka on alhaisin.

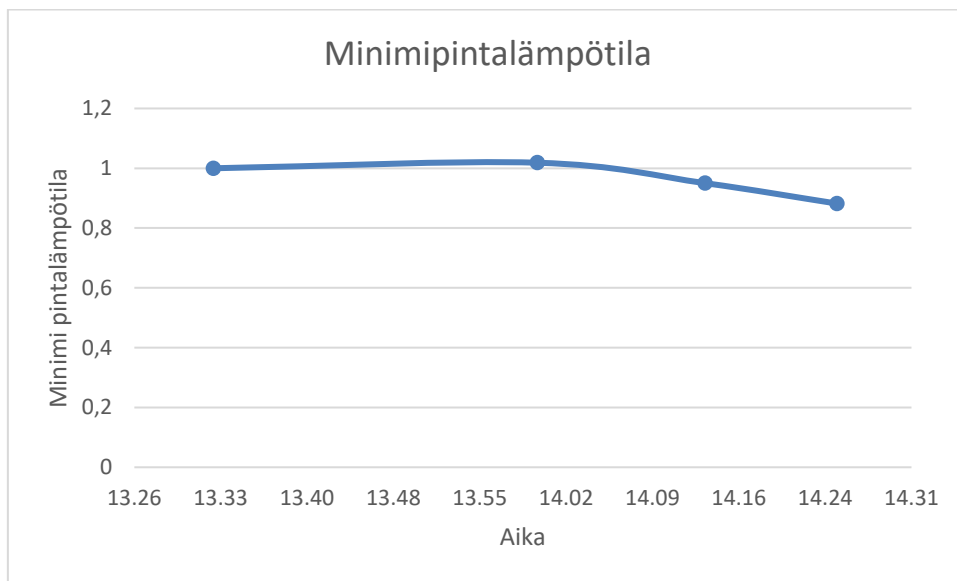
6 TESTIEN TULOKSET

Seuraavaksi käydään läpi varsinaisia tuloksia, joita saatiin testien pohjalta. Kuten aiemmin todettu, testeissä vaihdeltiin joko glykolin sisääntulolämpötilaa tai glykolin virtausta. Testejä jatkettiin, kunnes jäätyminen huomattiin esim. typen ulostulolämpötilan laskusta tai jostain muusta suureesta. Kun jäätyminen havaittiin, typen virtaus katkaistiin ja odotettiin, että siirrin sulaa ennen kuin jatkettiin seuraavia testejä. Kuvassa 13 on esitetty erään testin glykolin virtaus 4 viimeiselle mittauspisteelle. X-akselilla on kuvattu kellonajat mittauspisteille. Viimeinen mittauspiste on oletettu jäätymisspiste. Jäätymisspisteessä lämmönsiirtimen glykolipuolen oletetaan jo olevan jossain määrin jäässä. Testissä laskettiin glykolin virtausta, kunnes jäätyminen tapahtui. Glykolin sisääntulolämpötila pidettiin vakiona, noin 20 °C.

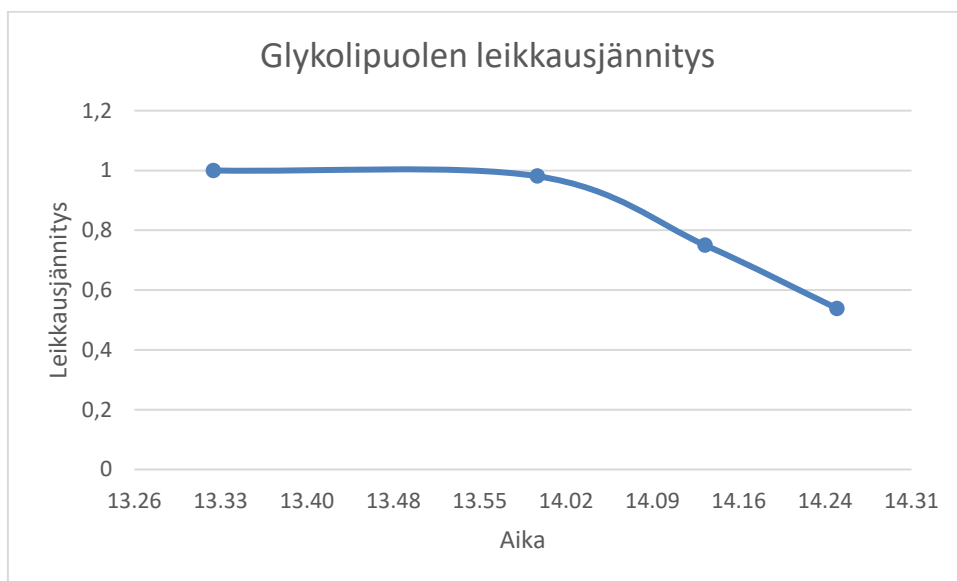


Kuva 13. Glykolin virtauksen käyrä.

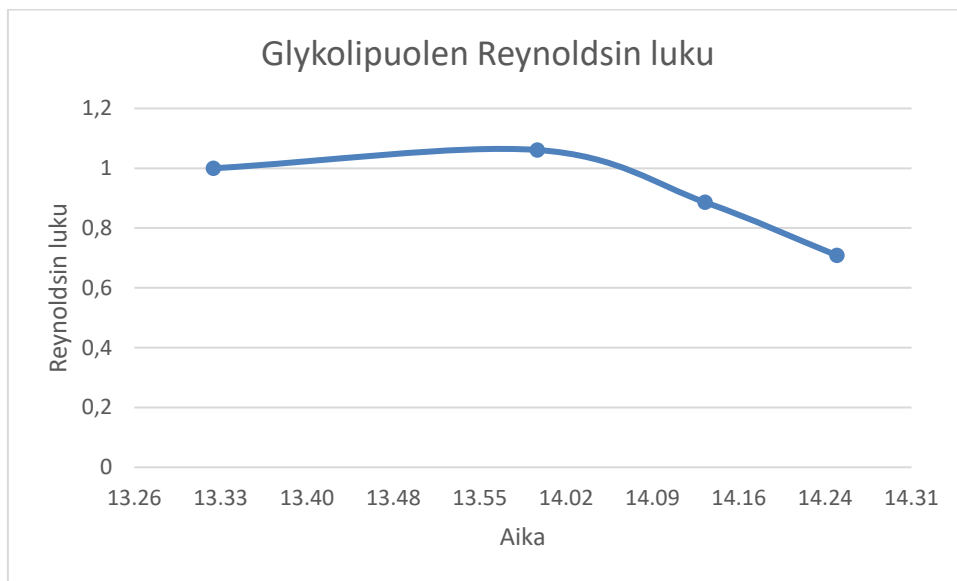
Kuvassa 14 kuvataan vastaavien mittauspisteiden minimi pintalämpötilaa ajan suhteen. Pintalämpötilan arvot on suhteutettu ensimmäisen esitetyn mittapisteen arvoon, jossa lämmönsiirrin ei oletettavasti ole vielä jäässä. Kuvassa 15 kuvataan samalla periaatteella glykolipuolen leikkausjännitystä ajan suhteen ja kuvassa 16 kuvataan samalla periaatteella Reynoldsin lukua glykolipuolella ajan suhteen.



Kuva 14. Minimipintalämpötila lähestyttäessä jäätymispistettä.



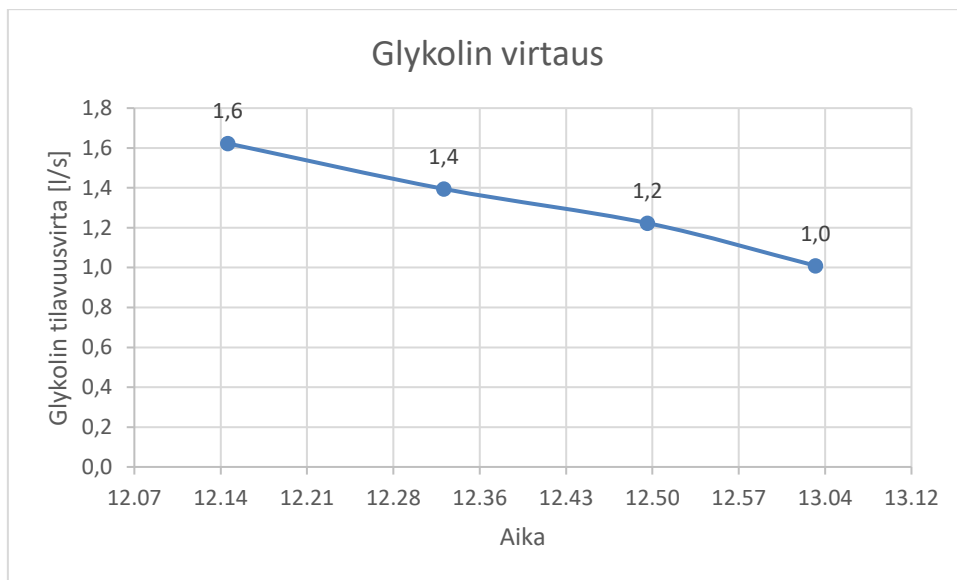
Kuva 15. Leikkausjännitys glykolipuolella lähestyttäessä jäätymispistettä.



Kuva 16. Reynoldsin luku glykolipuolella lähestyttäessä jäätymispistettä.

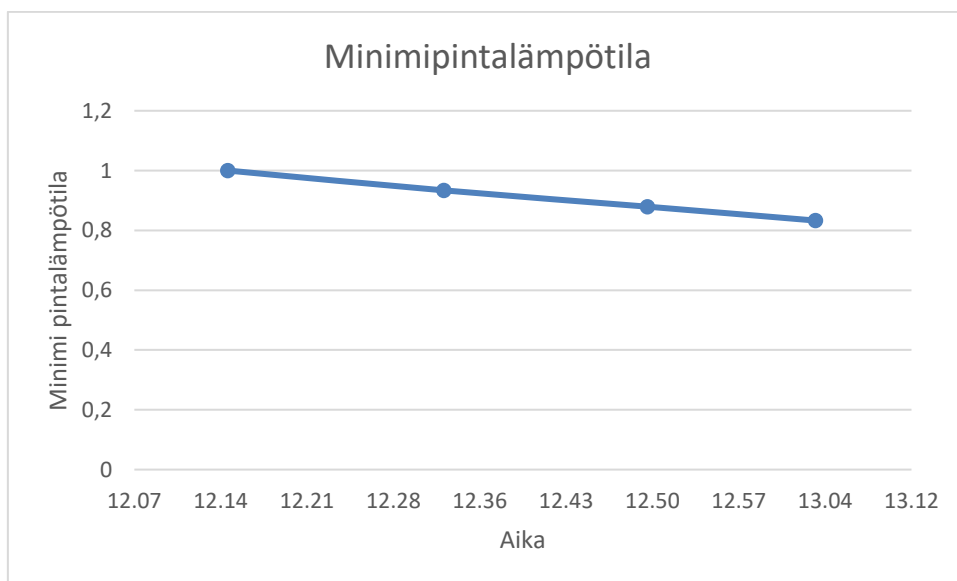
Kuvien 14–16 tulokset näyttäisivät enimmäkseen tukevan alkuperäistä hypoteesia. Kun siirrytään ajassa eteenpäin, eli siirrytään lähemmäksi jäätymispisteitä, huomataan, että minimipintalämpötila laskee (Kuva 14), leikkausjännitys glykolipuolella laskee (Kuva 15) sekä Reynoldsin luku glykolipuolella laskee (Kuva 16).

Seuraavassa testissä glykolin sisääntulolämpötilaa nostettiin ja pidettiin vakiona noin 30 °C. Glykolin virtausta laskettiin, kunnes jäätyminen havaittiin. Kuvassa 17 on esitetty glykolin virtaus jäätymistä lähestyessä.

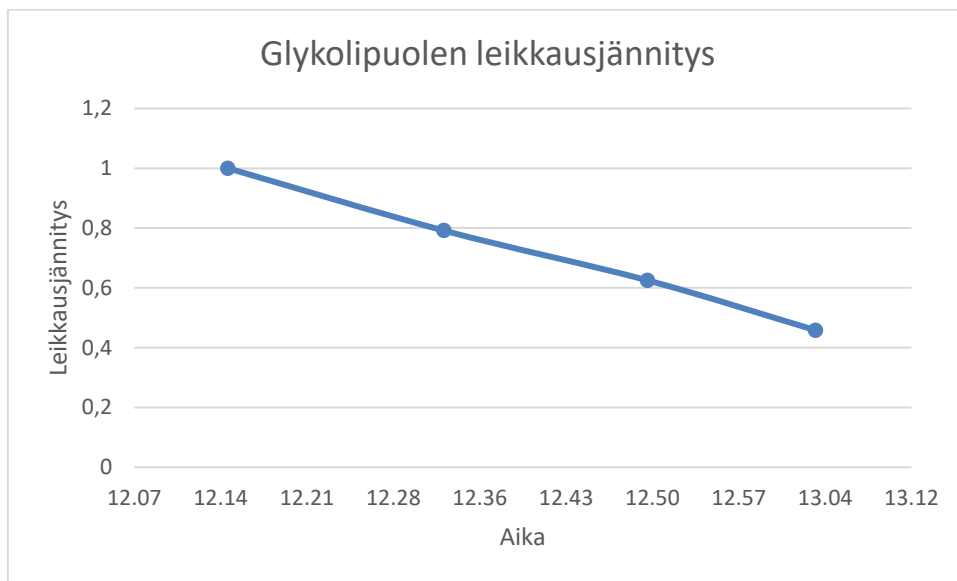


Kuva 17. Glykolin virtauksen käyrä.

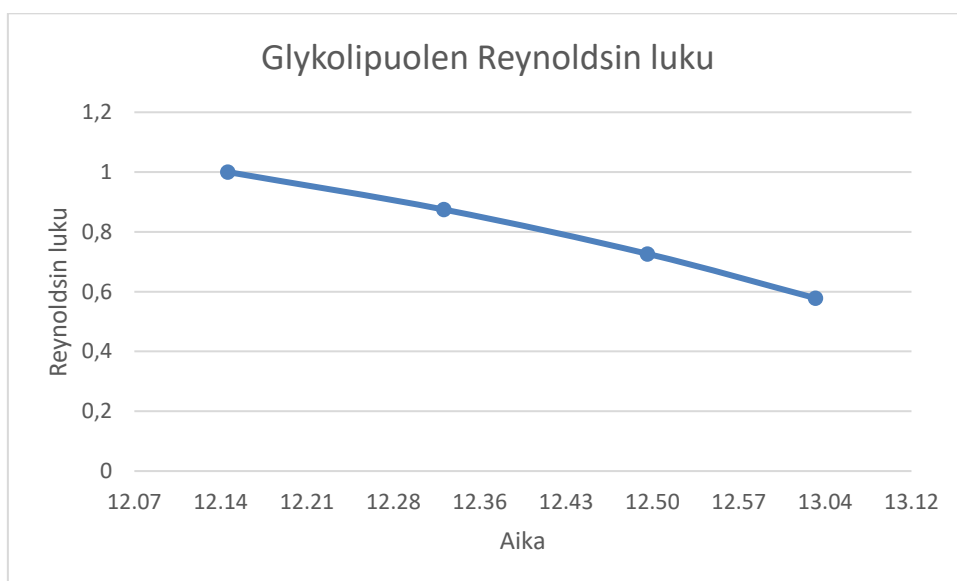
Kuvissa 18–20 on esitetty käyrät ajan samojen testipisteiden minimipintalämpötilalle, leikkausjännitykselle ja Reynoldsin luvulle. Kuten kuvissa 14–16, arvot ovat esitetty suhteina ensimmäiseen esitettyyn mittauspisteeseen.



Kuva 18. Minimipintalämpötilan käyrä



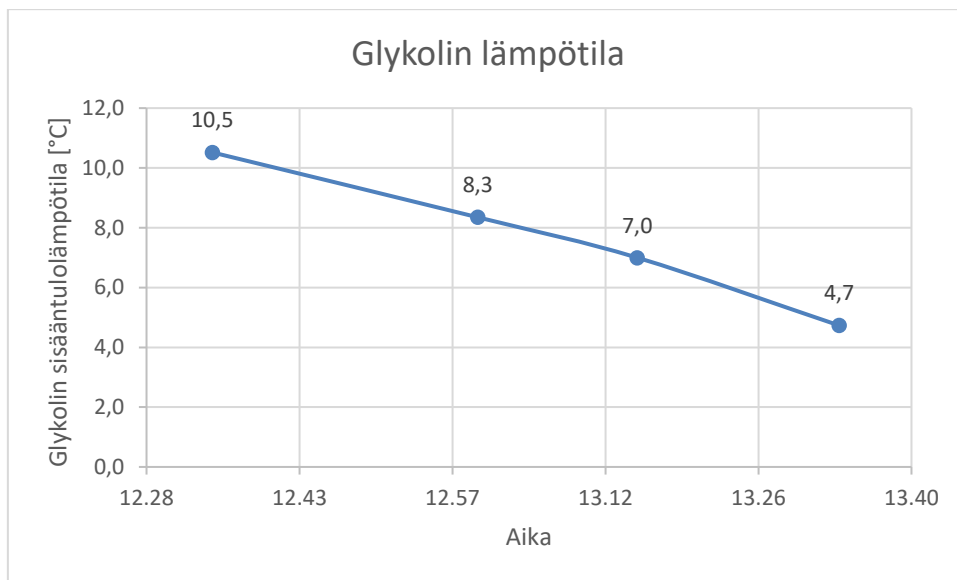
Kuva 19. Leikkausjännityksen käyrä.



Kuva 20. Reynoldsin luvun käyrä.

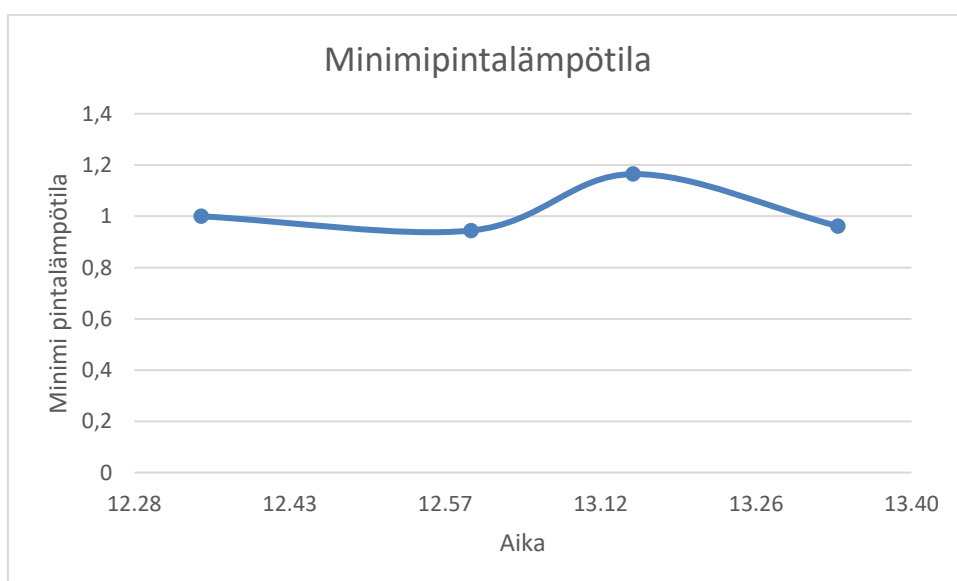
Kuvien 18–20 käyrät kaikki myötäilevät hypoteesia. Pintalämpötila laskee lähestyttäessä jäätymispistettä, leikkausjännitys glykolipuolella pienenee lähestyttäessä jäätymispistettä ja Reynoldsin luku glykolipuolella pienenee lähestyttäessä jäätymispistettä.

Seuraavassa testissä glykolin virtaus pidettiin vakiona, noin 1,8 l/s ja glykolin sisääntulolämpötilaa pudotettiin vähitellen. Kuvassa 21 on esitetty testin glykolin sisääntulolämpötila lähestyttäessä jäätymistä.

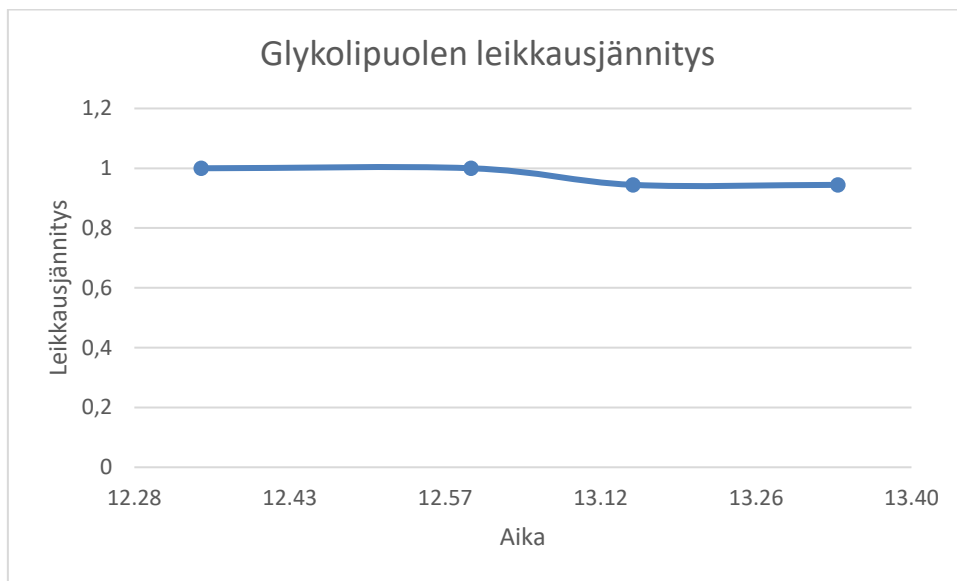


Kuva 21. Glykolin sisääntulolämpötila.

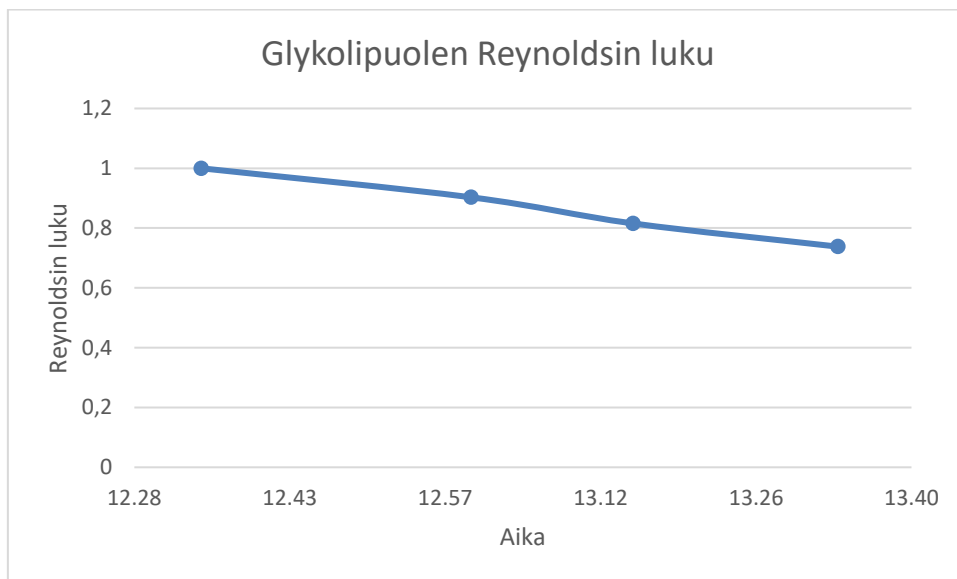
Kuvissa 22–24 on esitetty testin minimipintalämpötila, leikkausjännitys glykolipuolella ja Reynoldsin luku glykolipuolella samalla periaatteella kuin aiemmissa testeissä.



Kuva 22. Minimipintalämpötilan käyrä.



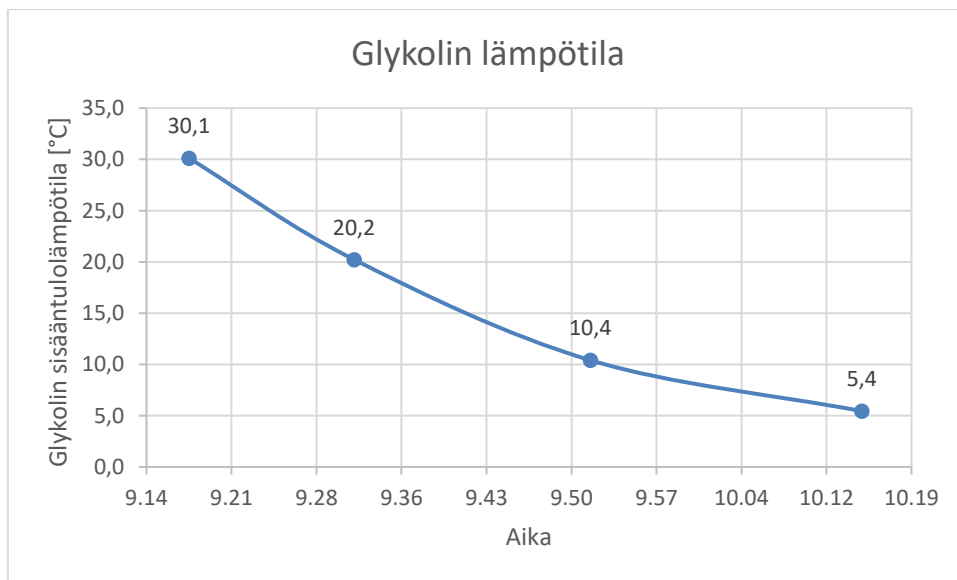
Kuva 23. Leikkausjännityksen käyrä.



Kuva 24. Reynoldsin luvun käyrä.

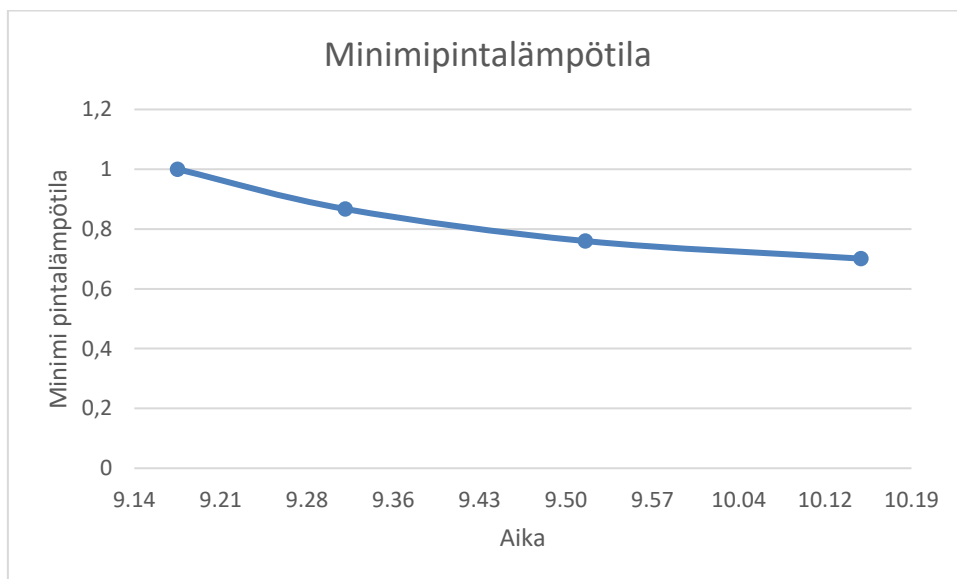
Kuvan 22 pintalämpötila poikkeaa aiempien testien tuloksista ja käyttäytyy hieman epäloogisesti. Lähestyttäessä jäätyispistettä minimi pintalämpötila nousee hieman ja sen jälkeen laskee taas. Kuvan 23 leikkausjännitys on melko tasainen, mutta laskee hieman loppua kohden. Kuvan 24 Reynoldsin luku laskee tasaisesti ja on linjassa hypoteesin kanssa.

Seuraavassa testissä glykolin virtausta nostettiin ja pidettiin vakiona noin 2,1 l/s. Glykolin sisääntulolämpötilaa pudotettiin, kunnes jäätymistä havaittiin. Kuvassa 25 on esitetty glykolin sisääntulolämpötilan käyrä jäätymistä lähestyttäessä.

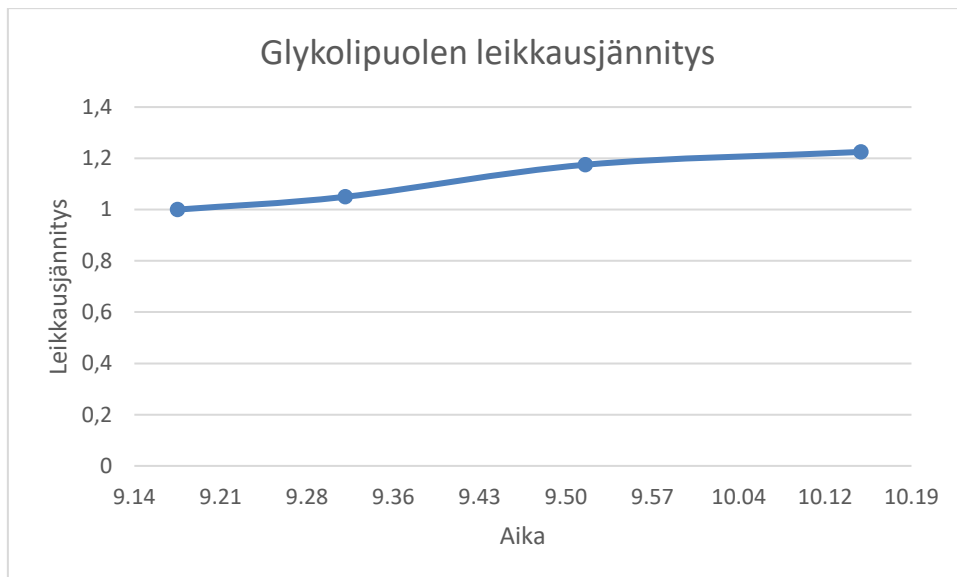


Kuva 25. Glykolin sisääntulolämpötila.

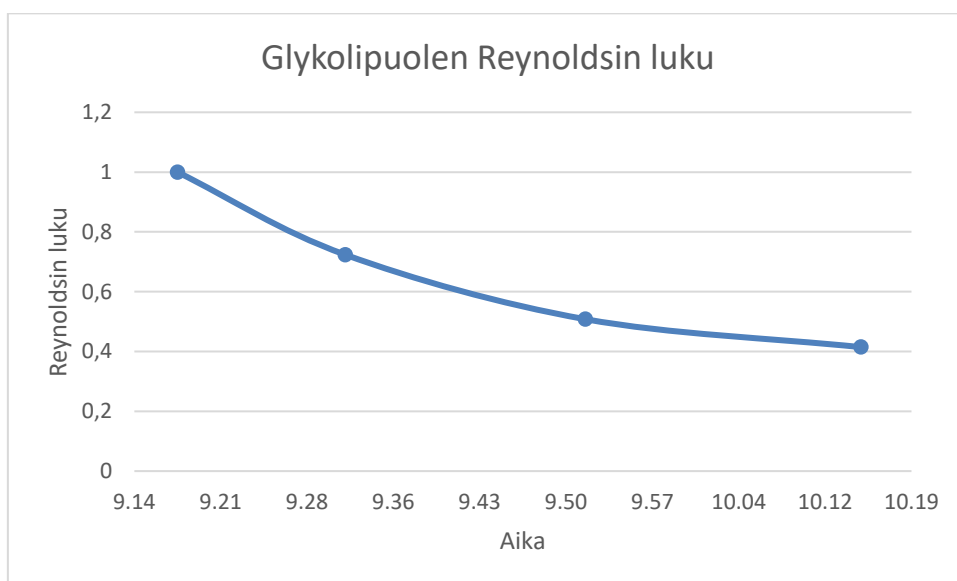
Kuvissa 26–28 on esitetty käyrät minimipintalämpötilalle, glykolipuolen leikkausjännitykselle ja glykolipuolen Reynoldsin luvulle samoissa pisteissä, samalla periaatteella kuin aiemmissa testeissä.



Kuva 26. Minimipintalämpötilan käyrä.



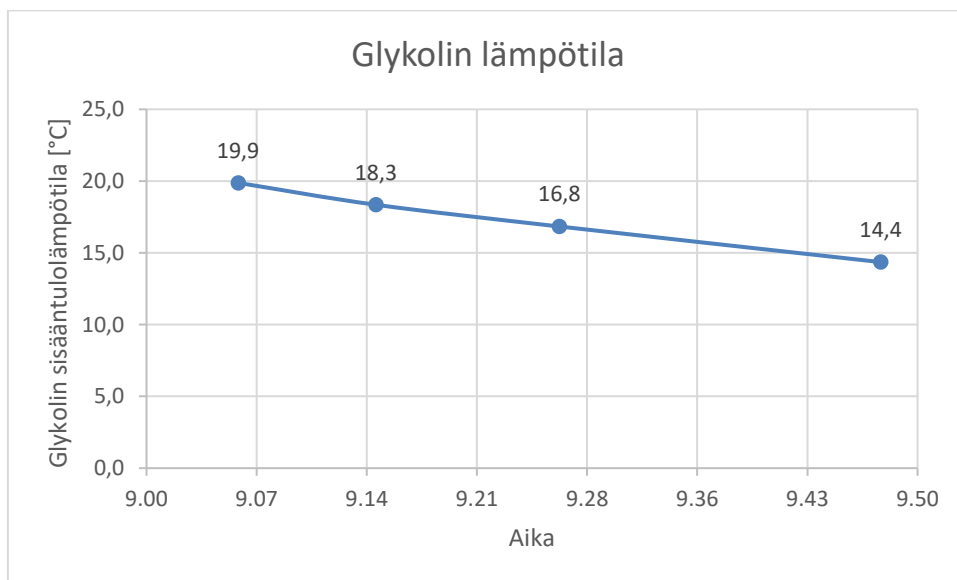
Kuva 27. Leikkausjännityksen käyrä.



Kuva 28. Reynoldsin luvun käyrä.

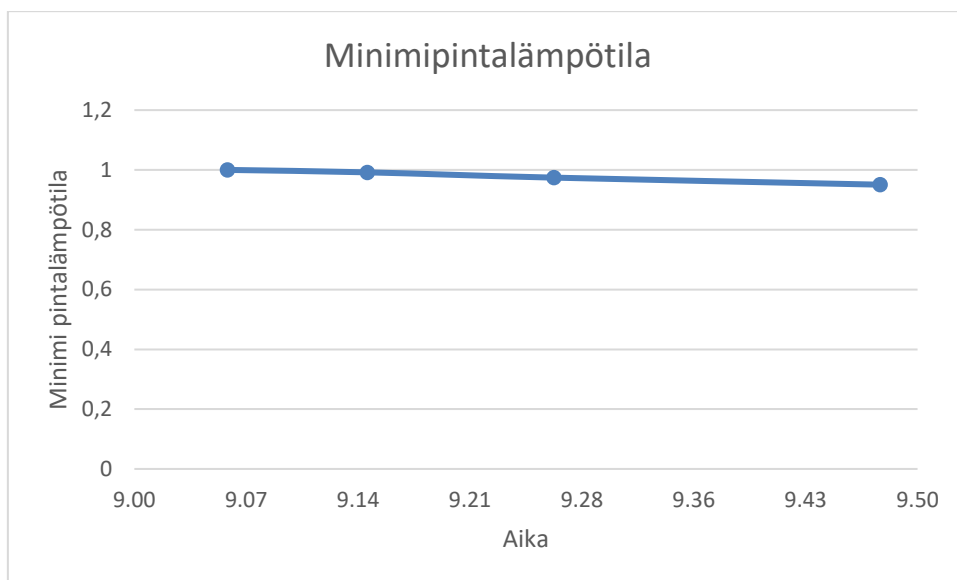
Kuvien 26–28 käyrät myötäilevät hypoteesia minimi pintalämpötilan ja Reynoldsin luvun osalta, mutta leikkausjännitys on ristiriidassa hypoteesin kanssa. Leikkausjännitys kasvaa lähestyttäessä jäätymispistettä.

Seuraavassa testissä glykolin virtausta nostettiin hieman ja pidettiin vakiona, noin 2,3 l/s. Glykolin sisääntulolämpötilaa laskettiin, kunnes jäätyminen havaittiin. Kuvassa 29 on esitetty glykolin sisääntulolämpötila lähestyttäessä jäätymispistettä.



Kuva 29. Glykolin sisääntulolämpötila ajan edetessä.

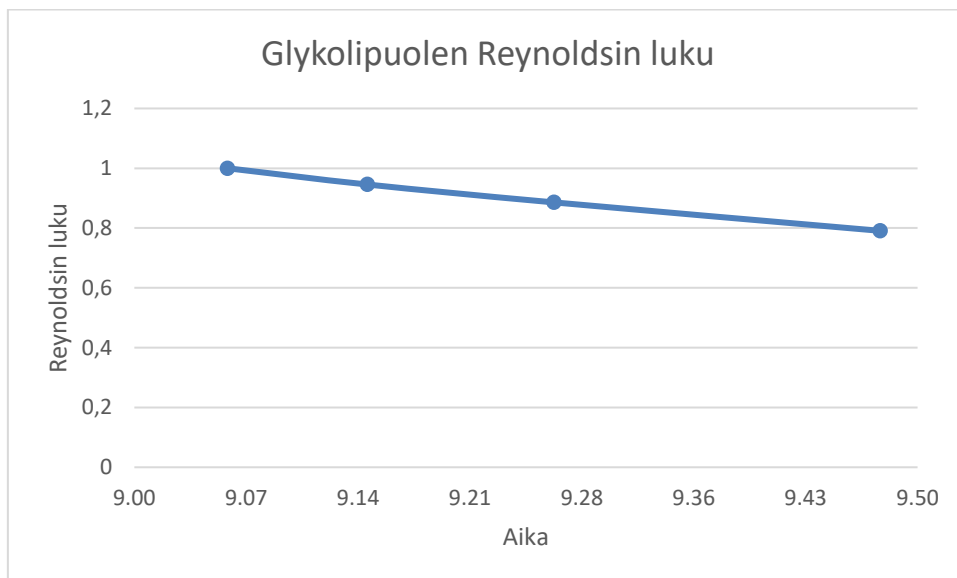
Kuvissa 30, 31 ja 32 on esitetty tälle testille minimipintalämpötilan, leikkausjännityksen ja Reynoldsin luvun käyrät vastaavilla mittauspisteillä, samalla periaatteella kuin aikaisemmissa testeissä.



Kuva 30. Minimipintalämpötilan käyrä.



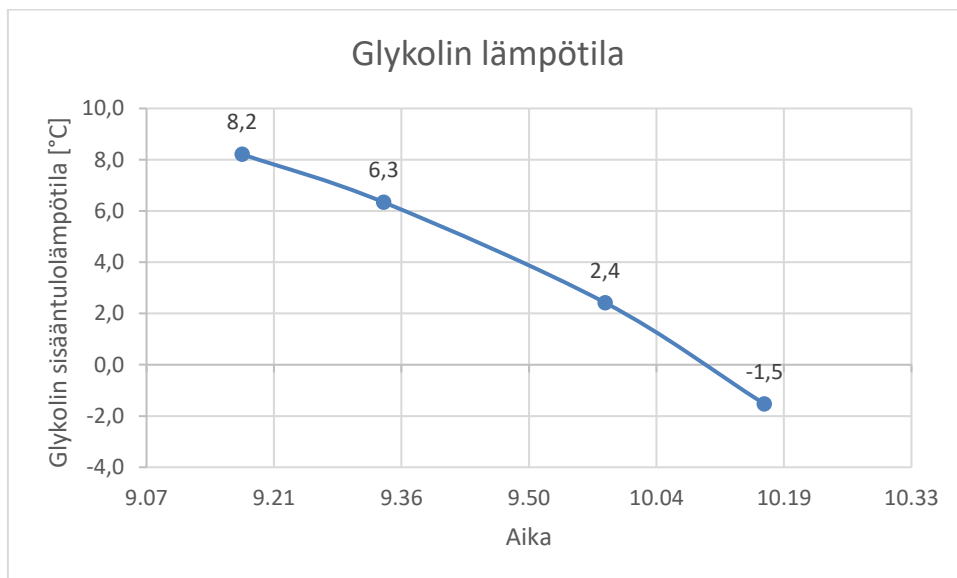
Kuva 31. Leikkausjännityksen käyrä.



Kuva 32. Reynoldsin luvun käyrä.

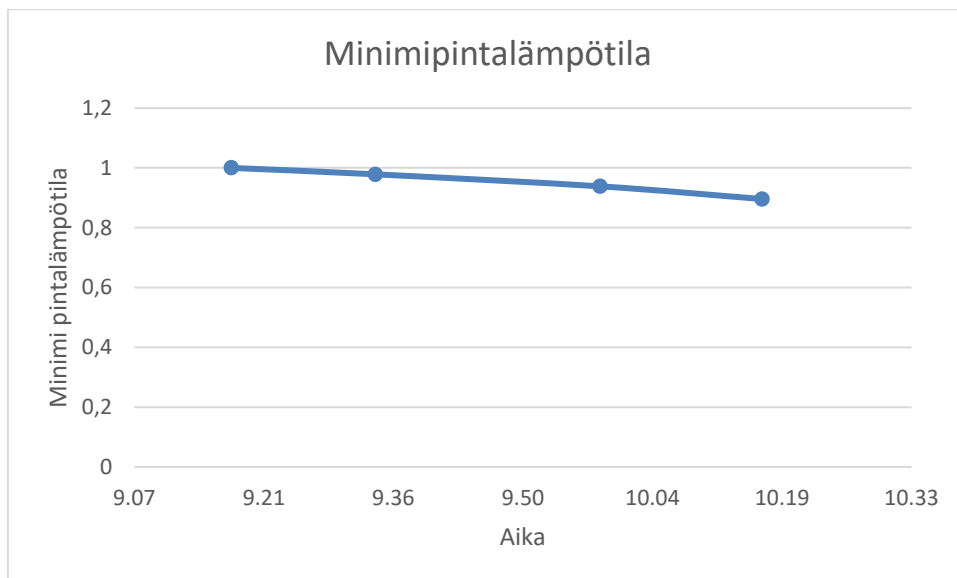
Kuvan 30 minimipintalämpötila on melko tasainen, mutta laskee hieman jäätymistä lähestyttäessä. Kuvan 31 leikkausjännityksen käyrä pysyy tasaisena eli leikkausjännitys pysyy samana jäätymiseen asti. Kuvan 32 Reynoldsin luvun käyrä laskee tasaisesti jäätymispistettä lähestyttäessä. Reynoldsin luvun käyrä on looginen hypoteesin kannalta, mutta leikkausjännitys ei tue hypoteesia. Minimi pintalämpötila toki laskee jäätymistä lähestyttäessä, eli tukee siltä osin hypoteesia, mutta lämpötilan lasku on hyvin vähäistä.

Seuraavassa testissä virtausta nostettiin jälleen hieman ja virtaus pidettiin vakiona, noin 2,9 l/s. Kuvassa 33 on esitetty testin glykolin sisääntulolämpötila viimeisissä pisteissä, kun lähestyttiin jäätymistä.

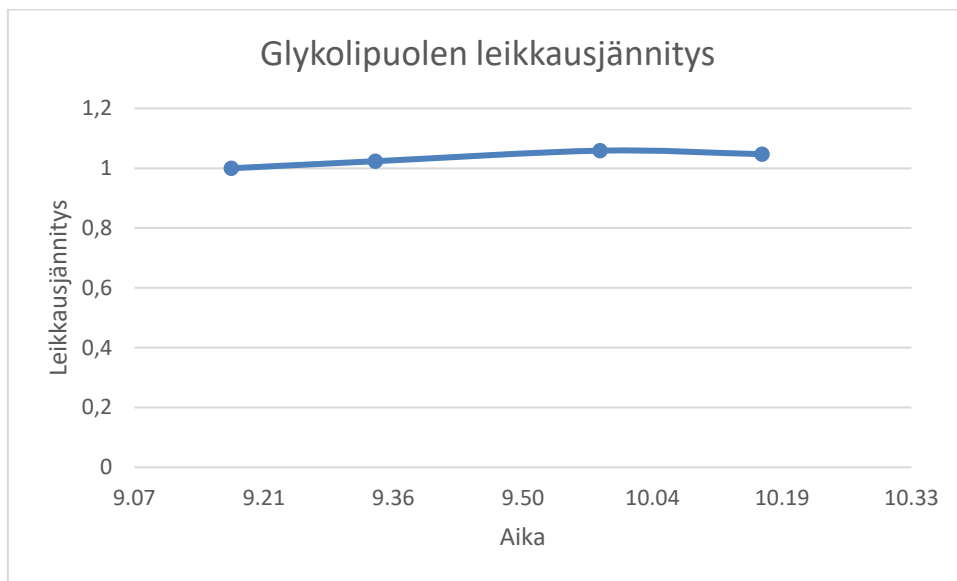


Kuva 33. Glykolin sisääntulolämpötila ajan edetessä.

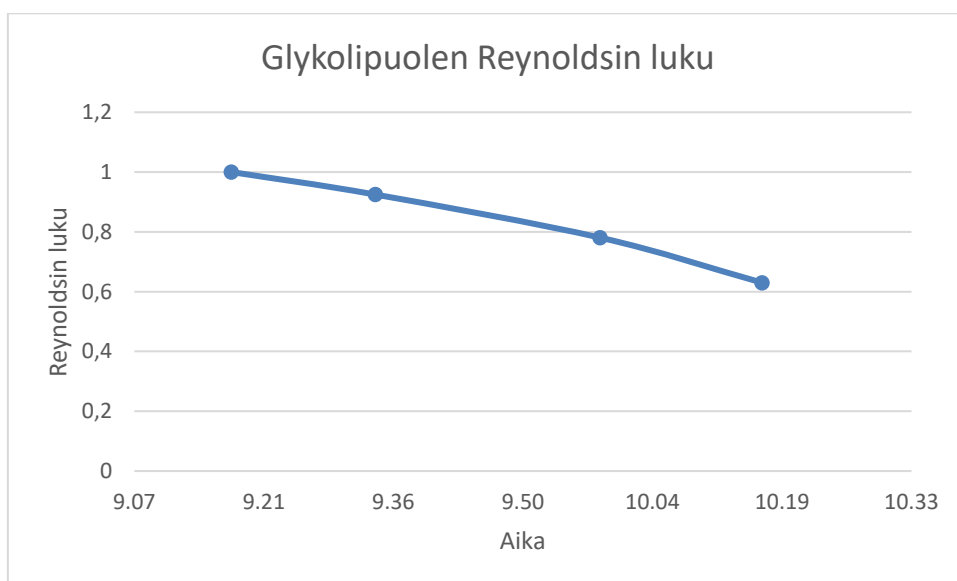
Kuvissa 34–36 on esitetty testin minimipintalämpötila sekä glykolipuolen leikkausjännitys ja Reynoldsin luku vastaavilla glykolin sisääntulolämpötiloilla. Arvot ovat esitetty samalla periaatteella kuin aiemmin tässä kappaleessa.



Kuva 34. Minimipintalämpötilan käyrä.



Kuva 35. Leikkausjännityksen käyrä.



Kuva 36. Reynoldsin luvun käyrä.

Pintalämpötilan käyrä (Kuva 34) myötäilee hypoteesia, eli pintalämpötila laskee jäätymispistettä lähestyttäessä. Leikkausjännityksen käyrä (Kuva 35) on jälleen ristiriidassa hypoteesin kanssa. Leikkausjännitys ei laske jäätymispistettä lähestyttäessä,

vaan se kasvaa hieman. Reynoldsin luvun käyrä (Kuva 36) myötäilee hypoteesia. Reynoldsin luku pienenee lähestyttäessä jäätymispistettä.

Saatujen tulosten perusteella hypoteesi näyttäisi olevan enimmäkseen oikeassa, mutta leikkausjännityksen suhdetta jäätymiseen täytyy arvioida uudelleen. Käyrien perusteella Reynoldsin luku sekä minimipintalämpötila olisivat luotettavimmat mittarit jäätymisen arviointiin.

7 PÄÄTELMÄT

Reynoldsin luku näyttäisi olevan tulosten perusteella melko luotettava mittari jäätymisriskin arvioimiseen. Reynoldsin luku oli ainoa suure, joka käyttäytyi hypoteesin mukaan loogisesti läpi testien. Minimipintalämpötila oli myös luotettava suurimmalta osin, mutta pintalämpötilan arvon lasku jäätymistä lähestyttäessä oli huomattavasti pienempää kuin Reynoldsin luvun lasku. Tämän lisäksi esimerkiksi kuvan 22 minimipintalämpötilan käyrä käyttäytyy epäloogisesti. Tämä saattaa johtua myös mittausvirheestä tai jostain muusta muuttujasta. Leikkausjännitys käyttäytyi osassa testeissä loogisesti, eli kun leikkausjännitys pieneni jäätymistä lähestyttäessä, mutta osassa testeissä leikkausjännitys pysyi melko vakiona tai jossain tapauksissa jopa suureni jäätymistä lähestyttäessä.

Osassa testeissä glykolin virtaus pidettiin vakiona ja glykolin sisääntulolämpötilaa laskettiin, kunnes jäätyminen havaittiin. Pienimmällä virtauksella 1,8 l/s (Kuva 21) päästiin 4,7 °C asti ennen jäätymistä. 2,1 l/s virtauksella (Kuva 25) päästiin 5,4 °C asti ennen jäätymistä. 2,3 l/s virtauksella (Kuva 29) glykolin lämpötila jäätymispisteessä on huomattavasti korkeampi, noin 14,4 °C. Suurimmalla virtauksella eli 2,9 l/s (Kuva 33) glykolin lämpötilassa päästiin jo 0 °C alapuolelle, noin -1,5 °C. Tuloksista herää kysymykseksi, että miksi pienimmällä 1,8 l/s virtauksella päästään huomattavasti alhaisempaan glykolin sisääntulolämpötilaan, kuin suuremmalla 2,3 l/s virtauksella?

Toisissa testeissä glykolin sisääntulolämpötila pidettiin vakiona ja glykolin virtausta laskettiin, kunnes jäätyminen havaittiin. Kuvan 13 glykolin sisääntulolämpötila oli noin 20 °C ja kuvan 17 glykolin sisääntulolämpötila oli noin 30 °C. Näiden kuvien käyrät ovat glykolin sisääntulolämpötilojen ja virtausten osalta loogiset. 20 °C glykolin sisääntulolämpötilalla päästiin noin 1,7 l/s virtaukseen ennen jäätymistä. 30 °C glykolin sisääntulolämpötilalla päästiin noin 1,0 l/s glykolin virtaukseen ennen jäätymistä. Näiden testien osalta myös minimi pintalämpötilan, leikkausjännityksen ja Reynoldsin lukujen käyrät olivat hypoteesin osalta samassa linjassa.

Glykolin sisääntulolämpötilan pienentyessä jäätymisriskin arvioiminen vaikuttaisi olevan vaikeampaa, kun jos glykolin sisääntulolämpötila pidetään melko

korkeana. Tapauksissa, missä glykolin sisääntulolämpötilan tulisi olla melko matala, kannattaa olla erityisen varovainen ja jonkinlaisia turvamarginaaleja on hyvä ottaa huomioon. Minimipintalämpötila, glykolipuolen leikkausjännitys sekä glykolipuolen Reynoldsin luku kannattaa kaikki pitää kriittisten arvojen yläpuolella. Testeissä päästiin kaikkien kolmen suureen osalta hieman matalampiin arvoihin, kuin mitä entuudestaan on pidetty kriittisenä arvona, mutta käytännön projekteissa on hyvä silti pitää tarpeeksi turvamarginaaleja.

Koska jäätyminen alkaminen on jouduttu ns. manuaalisesti arvioimaan tarkkailtavista arvoista, on mahdollisuus, että jäätympisteiden toteamisten kanssa on tapahtunut virheitä. Joissain testeissä on mahdollista, että jäätyminen on todellisuudessa alkanut aiemmassa vaiheessa ja se saattaa osaltaan myös selittää miksi jotkut testit ovat käyttäytyneet eri tavalla kuin toiset minimipintalämpötilan, leikkausjännityksen tai Reynoldsin luvun osalta. On myös mahdollista, että jäätyminen on todettu liian aikaisin. Tämä voi selittää esimerkiksi sitä, miksi kuvan 29 virtauksella 2,3 l/s on jääty korkeampaan glykolin sisääntulolämpötilaan, kuin alhaisemmilla virtauksilla. Ja miksi saman testin minimipintalämpötila (Kuva 30) putoaa vain hyvin vähän, miksi glykolipuolen leikkausjännitys (Kuva 31) ei muutu lainkaan ja miksi glykolipuolen Reynoldsin luku (Kuva 32) laskee loivemmin, kuin muiden testien Reynoldsin luvut.

Jatkotutkimuksia kaivataan, jotta voidaan ymmärtää lämmönsiirtimen jäätymistä tarkemmin. Tässä työssä saadut tulokset ovat vasta pintaraapaisu jäätyminen ymmärtämiseen. Tarkempien tulosten saamiseksi testejä pitäisi suorittaa enemmän. Glykolin lämpötilojen ja virtauksen kanssa täytyisi edetä hyvin systemaattisesti alaspäin ja pitää jokaisessa testeissä muut arvot samana, jotta muuttujia ei olisi glykolin lämpötilan ja virtauksen lisäksi. Jäätyminen voitaisiin mahdollisesti myös viedä pidemmälle, eli testejä ei katkaistaisikaan, kun jäätyminen oletetaan alkavan, vaan annettaisiin lämmönsiirtimen jäätyä kokonaan tai melkein kokonaan. Tällä tavalla on toki riski, että lämmönsiirtimen tai jokin muu testikomponentti saa jonkinlaisia vaurioita. Aihe ei ole helppo asia tutkia, koska varmuudella ei voida sanoa, mitä täsmälleen lämmönsiirtimen sisällä tapahtuu. Jäätyminen arviointi on nimenomaan arviointia. Tarkkaa hetkeä, milloin jäätyminen alkaa ei pystytä sanomaan.

Tällä hetkellä varmin tapa minimoida lämmönsiirtimen jäätymisriski LNG:n höyrystämissovelluksissa sekä muissa sovelluksissa, joissa kuumen puolen aineella on jäätymisriski, on pitää glykoli tai vastaava aine tarpeeksi lämpimänä ja pitää virtausnopeus tarpeeksi suurena. Mitoitusohjelmassa kannattaa tarkkailla minimipintalämpötilaa, leikkausjännitystä ja Reynoldsin lukua ja mieluummin pitää turvamarginaalia näissä suureissa, kuin mennä liian lähelle raja-arvoa, jonka jälkeen jäätyminen on todennäköistä. Tapaukset, joissa täytyy mennä lähelle raja-arvoja pitää aina tutkia tapauskohtaisesti.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin levylämmönsiirtimen jäätymistä. Lämmönsiirtimen jäätyminen on riskinä, kun jossain prosessissa kylmän puolen aine on hyvin kylmää ja kuuman puolen aineen jäätympiste on korkeampi, kuin kylmän aineen operointilämpötilat. Tällainen prosessi on esimerkiksi LNG:n eli nesteytetyn maakaasun höyrystäminen ja lämmittäminen moottoreiden käyttöä varten. Työssä esitettiin lämmönsiirtimien perusteoriaa ja jäätymiseen liittyvää teoriaa. Tämän jälkeen käytiin läpi muita aiheeseen liittyviä tutkimuksia. Lopuksi paneuduttiin testijärjestelyihin ja varsinaisiin tuloksiin. Testien perusteella oli tarkoitus saada lisää ymmärrystä jäätyksen alkamiseen, jotta jäätymisriskiä voitaisiin arvioida jo lämmönsiirtimen mitoitusvaiheessa.

Työhön liittyvissä testeissä mallinnettiin LNG:n höyrystämisen prosessia nestemäisen tyypin avulla. Nestemäinen tyyppi toimi LNG:n korvaajana lämmönsiirtimen kylmällä puolella ja lämmönsiirtimen kuumalla puolella oli 50 % vesietyleeniglykoliseos. Tyyppi tuli sisään noin $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteisena ja höyrystettiin sekä tulistettiin lämmönsiirtimessä. Tietokone otti ylös testien aikana eri arvoja kuten lämpötiloja, virtauksia ja painehäviöitä. Testeissä pidettiin vakiona joko glykolin sisääntulolämpötilaa, tai glykolin virtausta. Arvoa, jota ei pidetty vakiona, ruvettiin pienentämään, kunnes jäätyminen havaittiin. Jäätyminen puolestaan havaittiin eri suureita tarkkailemalla kuten tyypin ulostulolämpötila ja laskennallinen teho. Jäätyksen havaittua testit pysäytettiin ja tarkkailuun otettiin jäätympiste sekä 3 edellistä mittauspistettä. Vahteruksen lämmönsiirtimen mitoitusohjelmalla laskettiin tarkkailtavien pisteiden ajotilanteet ja ohjelmasta otettiin ylös minimipintalämpötila, leikkausjännitys glykolipuolella sekä Reynoldsin luku glykolipuolella. Hypoteesina oli, että nämä kolme arvoa laskisi jäätymistä lähestyttäessä ja siten näitä arvoja tarkkailemalla mitoittaessa lämmönsiirintä voitaisiin arvioida jäätymisriskiä.

Tulosten perusteella eniten hypoteesia tuki Reynoldsin luku, joka laski jokaisessa testissä jäätymistä lähestyttäessä. Minimipintalämpötila tuki myös jokseenkin hypoteesia, mutta osassa testeissä minimipintalämpötila käyttäytyi epäloogisesti, tai lämpötilan lasku ei ollut kovin huomattavaa. Leikkausjännitys käyttäytyi hypoteesin mukaisesti, eli laski jäätympistettä lähestyttäessä, niissä testeissä, joissa glykolin sisääntulolämpötila pidettiin vakiona, ja glykolin virtausta pienennettiin, kunnes

jäätymisen havaittiin. Sen sijaan leikkausjännitys ei käyttäytynyt hypoteesin mukaisesti niissä testeissä, joissa glykolin virtaus pidettiin vakiona ja glykolin sisääntulolämpötilaa pudotettiin jäätymispisteeseen saakka. Näissä testeissä leikkausjännitys pysyi vakiona tai kasvoi, kun lähestyttiin jäätymistä. Glykolipuolen leikkausjännitystä jäätymisen arvioimisen työkaluna täytyy testien perusteella arvioida uudelleen.

Testeissä jäätymisen alkaminen arvioitiin manuaalisesti, joten mahdollisuus virheille on ollut olemassa. Tämä on saattanut vaikuttaa osaan tuloksista, esimerkiksi jos jäätymisen on todettu liian aikaisin tai liian myöhään. Jatkotutkimuksia tarvitaan, jotta lämmönsiirron jäätymistä ymmärrettäisiin paremmin.

LÄHTEET

Bott, T.R. (2011) Fouling. Viitattu 22.10.2020:

<http://www.thermopedia.com/content/779/>

Brenk, A., Kielar, J., Malecha, Z. & Rogala, Z. (2020). 'The effect of geometrical modifications to a shell and tube heat exchanger on performance and freezing risk during LNG regasification', International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 161.

Engineering ToolBox (2003). Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid Properties. Viitattu 31.3.2022: https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html

Engineering ToolBox (2003). Latent Heat of Melting for some common Materials. Viitattu 19.3.2022: https://www.engineeringtoolbox.com/latent-heat-melting-solids-d_96.html

Engineering ToolBox (2010). Water – Heat of Vaporization vs. Temperature. Viitattu 19.3.2022: https://www.engineeringtoolbox.com/water-properties-d_1573.html

Faghri, Amir & Zhang, Yuwen (2020). Fundamentals of Multiphase Heat Transfer and Flow. Springer Nature Switzerland AG.

Incropera, F.P, DeWitt, D.P, Bergman, T.L & Lavine, A.S (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons Inc. 6th edition.

International Dictionary of Refrigeration (2015). Viitattu 1.10.2020:

<http://dictionary.iifir.org/search.php>

Normani, F. (2009) Real World Physics Problems. Viitattu 24.9.2020: <https://www.real-world-physics-problems.com/heat-exchanger.html>

Knighton, David (1998). Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge. 2nd edition.

Kumar, S., Kwon, H.-T., Choi, K.-H., Lim, W., Cho, J.H., Tak, K. & Moon, I. (2011). 'LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development', *Applied Energy*, vol. 88, no.12, 4264–4273.

Pedersen, Costigliola, Bailey, Schroder, Dyre. *Thermodynamics of freezing and melting* (2016). Viitattu 1.10.2020: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4992064/>

Rogala, Z., Brenk, A. & Malecha, Z. (2019). 'Theoretical and Numerical Analysis of Freezing Risk During LNG Evaporation Process', *Energies*, vol. 12, no. 8.

Sear, R.P. (2006). *Nucleation: theory and applications to protein solutions and colloidal suspensions*. Viitattu 17.12.2020: <http://personal.ph.surrey.ac.uk/~psh1rs/review.pdf>

Serth, Robert W. & Lestina, Thomas G. (2014) *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb*. Elsevier. 2nd edition.

Shah, Ramesh K. & Sekulic, Dusan P. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons Inc.

Wang, L., Sunden, B. & Manglik, R.M. (2007). *Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance*. WIT Press.

White, Frank M. (2011) *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill. 7th edition.

Yue, H., Zhao, Y., Ma, X. & Gong, J. (2012). 'Ethylene glycol: properties, synthesis and applications', *Chemical Society Reviews*, vol. 39, no. 11, 4218-4244.

Kuvat:

Connor, Nick (2019) What is Hydraulic Diameter – Definition. *Thermal Engineering*. Saatavilla: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-hydraulic-diameter-definition/>

Kananeh, A.B & Peschel, Julian (2012). Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. Saatavilla: https://cdn.intechopen.com/pdfs/30779/InTech-Fouling_in_plate_heat_exchangers_some_practical_experience.pdf

Savree (2020). Plate Heat Exchangers (PHE). Saatavilla: <https://savree.com/en/encyclopedia/plate-heat-exchanger-phe>

Wikipedia (2011). Plate heat exchanger. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Plate_frame_1.svg