

Joni Tilaeus

JÄÄPANKKIPERIAATTEELLA
TOIMIVAN OLUTJÄÄHDYTTÄJÄN
JÄÄHDYTYSPUTKISTON
MITOITUSTYÖKALU

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Syyskuu 2010




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU <small>Mikkeli University of Applied Sciences</small>	Opinnäytetyön päivämäärä 2.9.2010				
Tekijä(t) Joni Tilaeus	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka				
Nimeke Jääpankkiperiaatteella toimivan olutjäähdyttäjän jäähdytysputkiston mitoitustyökalu					
Tiivistelmä Opinnäytetyön aiheena oli jääpankkiperiaatteella toimivan olutjäähdyttäjän jäähdytys-, eli tuoteputkiston mitoitustyökalun luominen. Tarkoitus oli saada helppokäyttöinen, luotettava ja muokattava Excel-pohjainen mitoitustyökalu, jota hyödynnetään olutjäähdyttäjien tuotannossa. Opinnäytetyössä lähdettiin aluksi mallintamaan oluen jäähtymistä lämmönsiirtoon perustuvilla laskelmilla, jotka toteutettiin Exceliin. Tämän jälkeen siirryttiin mittauksiin, joilla oli tarkoitus säätää mallin antamat tulokset luotettaviksi. Mittaukset suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI-laboratorioon rakennetussa mittauspisteessä. Mittauksissa mitattiin tuotteen tulolämpötilan, virtauksen, putken halkaisijan ja pituuden vaikutusta tuotteen lähtölämpötilaan. Mittauksissa mitattavana aineena käytettiin vettä. Työn edetessä matemaattinen lähestymistapa todettiin ongelmalliseksi, jonka seurauksena siirryttiin luomaan mitoitustyökalua kokeellisten tulosten perusteella. Mitattujen tulosten pohjalta luotiin mitoitustyökalu käyttäen Exceliä. Mitoitustyökalusta luotiin käyttäjäystävällinen ja luotettavasti toimiva Excelin Visual Basic for Applications -ohjelmoinnilla.					
Asiasanat (avainsanat) Olutjäähdyttävä, mitoitustyökalu, jääpankki					
Sivumäärä 33	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">Kieli</td> <td style="width: 33%;">URN</td> </tr> <tr> <td>Suomi</td> <td></td> </tr> </table>	Kieli	URN	Suomi	
Kieli	URN				
Suomi					
Huomautus (huomautukset liitteistä)					
Ohjaavan opettajan nimi Pertti Lehikoinen	Opinnäytetyön toimeksiantaja Bierkühl Oy				

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis 2.9.2010	
Author(s) Joni Tilaeus		Degree programme and option Technology: Building services	
Name of the bachelor's thesis Cooling pipe dimensioning tool for beer coolers based on ice bank principal			
Abstract The topic of this thesis was to develop Excel based tool, which is used in dimensioning the length of product cooling pipes for beer coolers. The operation of beer cooler is based on ice bank principle. The goal was to create practical, reliable and modifiable software, which would be utilized in production. Beer cooling was first modeled with calculations, which were set in Excel. Measurements were made after this in HVAC laboratory in Mikkeli University of Applied Sciences, and the goal was to tune the dimensioning tool reliable with actual results. The effect of the incoming temperature, amount of flow, pipe diameter and length on the outgoing temperature were measured. Measurements were made using water. During progress, the mathematical approach was discovered to be problematic, which led to developing the dimensioning tool based only on the data gathered with measurements. A user friendly and reliably working dimensioning tool was created utilizing Excel's Visual Basic for Applications programming.			
Subject headings, (keywords) Beer cooler, dimensioning tool, ice bank,			
Pages 33	Language Finnish	URN	
Remarks, notes on appendices			
Tutor Pertti Lehtikoinen		Bachelor's thesis assigned by Bierkühl Oy	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	OLUTJÄÄHDYTTÄJÄN TOIMINTAPERIAATE JA KOMPONENTIT.....	1
3	MITOITUSPERIAATTEET	6
4	MITOITUSLASKELMAT	7
5	MITTAUKSET	8
5.1	Mittauslaitteisto	9
5.2	Mittausjärjestelyt	11
5.3	Mittausvalmistelut	13
5.4	Mittausten suorittaminen	17
5.5	Tulokset	18
6	MITOITUSTYÖKALU	24
6.1	Laskujen perusteella toimiva mitoitustyökalu	24
6.2	Mittausten perusteella toimiva mitoitustyökalu.....	27
6.3	Työkalun antamat tulokset ja toiminta	30
6.4	Käyttöohje.....	31
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	31
	LÄHTEET	34
	LIITTEET	

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	Poikkipinta-ala, m ²
c _p	Tuotteen ominaislämpökapasiteetti, kJ / kg°C
d _s	Sisähalkaisija, m
d _u	Ulkohalkaisija, m
l	Putken pituus, m
Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku
q _v	Tilavuusvirta, l / h
Re	Reynoldsin luku
s	Putken seinämän paksuus, m
t _{lähtö}	Tuotteen lähtölämpötila, °C
t _{tulo}	Tuotteen tulolämpötila, °C
t _{ympäroiva}	Ympäroivän veden lämpötila, °C
U	Lämmönsiirtokerroin, W / (m ² K)
v	Nopeus, m/s
V	Tilavuus, l
η	Dynaaminen viskositeetti, Pa * s
θ	Logaritminen lämpötilaero, °C
λ	Lämmönjohtavuus, W / (K * m)
ν	Kinemaattinen viskositeetti, m ² / s
ρ	Tiheys, kg / m ³

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössäni tutkin olutjäähdyttäjän toimintaa matemaattisesti laskemalla sekä empiirisesti mittauksia suorittamalla. Työn tilaaja on Mikkelissä toimiva juomien jäähdyttämiseen liittyvien laitteiden valmistaja Bierkühl Oy.

Olutjäähdyttäjä toimii jääpankkiperiaatteella, eli laite tuottaa jäätä vesialtaassa kiertävien höyrystinputkien päälle ja jäähdyttää näin altaan vettä. Tuoteputket, joissa jäähdytettävät juomat virtaavat, sijaitsevat tässä altaassa. Näin juomasta saadaan halutun viileää, tarjoiluun sopivaa, eli noin 2-4 asteista.

Työn tavoitteena on luoda Excel-pohjainen mitoitustyökalu, jolla määritetään tuoteputken pituus valittujen lähtöarvojen mukaan. Mitoitustyökalun tulee olla erityisesti helppokäyttöinen ja luotettava, jotta siitä saadaan maksimihyöty irti olutjäähdyttäjien tuotantoa varten. Mitoitustyökalulla voidaan määrittää olutjäähdyttäjän tuoteputkien pituus virtaaman, tulolämpötilan ja putken halkaisijan perusteella. Tuoteputket koostuvat vesitilaan asennettavista putkista, joiden läpi jäähdytettävät tuotteet virtaavat. Ohjelma ilmoittaa tarvittavan putken halkaisijan ja putkipituuden, kun alkuarvoina annetaan putken halkaisija (8 tai 10 mm), tulolämpötila (10–30 °C), virtaama (30, 60, 90 tai 120 l/h) ja haluttu lähtölämpötila (mittausten perusteella saatu arvo).

Opinnäytetyö on luotu pitäen silmällä sitä, ettei kilpailijan ole mahdollista kopioida tai hyödyntää työssä esitettyjä mittaustuloksia tai laskelmia. Tämän vuoksi tulolämpötilan arvoja on jätetty esittämättä tuloksissa ja taulukoissa siten, että se ei vaikuta kuitenkaan taulukon tarkoitukseen ja tietojen luettavuuteen. Pois jätetyt tulolämpötilan arvot on merkitty tunnuksella x.

2 OLUTJÄÄHDYTTÄJÄN TOIMINTAPERIAATE JA KOMPONENTIT

Olutjäähdyttäjää käytetään oluen ja muiden juomien jäähdyttämiseen. Olutjäähdyttäjän höyrystinputkisto sijaitsee vesialtaassa, jonka veden se jäähdyttää noin nollasteiseksi. Vesi on tavallista vesijohtovettä, jolla allas täytetään ennen koneen käynnistämistä. Höyrystinputkien ympärille alkaa muodostua jäätä kompressorin käydessä. Tästä jäämassasta käytetään nimitystä jääpankki. Tuoteputkisto, jonka läpi jäähdytet-

tävä tuote virtaa, sijaitsee vesialtaassa. Virratessaan tuoteputkiston läpi jäähtyy olut haluttuun lämpötilaan, noin 2-4 asteiseksi. Käytön aikana altaan vesi lämpenee ja jääpankki alkaa hiljalleen sulaa. Tällöin kompressori lähtee käyntiin pyrkien tekemään lisää jäätä höyrystinputkien ympärille. Jääpankki mahdollistaa erilaiset kuormitukset. Se kestää hetkellisiä suuria määriä sekä soveltuu hyvin vähemmällekin käytölle. Kuvassa 1 näkyy laboratorioon kytketty olutjäähdyttävä, jota käytettiin mittauksissa.



KUVA 1. Olutjäähdyttävä

Höyrystinputket

Kuvassa 2 ovat olutjäähdyttäjän höyrystinputket altaan ulkoreunoilla sekä vasemmassa alareunassa jääpankin kontrolloimiseen käytettävä termostaatti.



KUVA 2. Höyrystinputket

Jääpankki

Kuvan 2 höyrystinputkien päälle kertyvästä jäämassasta käytetään nimitystä jääpankki, jonka nimi tulee sen luonteesta. Jääpankki toimii kylmän varastona ja näin ollen se soveltuu hyvin oluen jäähdyttämiseen kuormituksen vaihtelevuuden vuoksi.

Tuoteputket

Oluen jäähdyttämiseen käytetyt jäähdytysputket eli tuoteputket ovat ruostumatonta terästä. Olutjäähdyttäjässä tuoteputket sijaitsevat altaassa siten, että ensin on sisin lenkki, sen ympärillä seuraava ja niin edelleen.



KUVA 3. Tuoteputket

Yllä olevassa kuvassa 3 on testatun laitteen tuoteputkisto. Tässä laitteessa oli putkisto kolmelle tuotteelle. Keskellä näkyy sekoittaja sekä ympäröivän veden lämpötilaanturi. Ympäröivän veden lämpötilaa mittaava anturi on kiinnitetty pieneen kuparipalaan, joka reagoi nopeasti ja herkästi veden lämpötilan muuttuessa. Tuoteputkilenkkejä kutsutaan pakoiksi. Kyseisessä laitteessa on kolme pakkaa: sisä- keski- ja ulkopakat.

Termostaatti

Termostaattia käytetään jääpankin muodostumisen kontrolloimiseen. Kun jääpankki on kasvanut tarpeeksi ja peittää termostaatin, lakkaa kompressorin käymästä. Kun jäätä on sulanut ja termostaatti ei ole enää jään peitossa, vaan vedessä, lähtee kompressorin taas käyntiin. Jään muodostumista kontrolloidaan siten, että se ei pääse ottamaan kiinni tuoteputkistoon. Termostaatin sijainti näkyy kuvassa 2.

Kylmäaine

Olutjäähdyttäjän kylmäkoneistossa käytetään kylmäainetta R404a. Se koostuu kolmen kylmäaineen seoksesta, R125/R134a/R143a suhteessa 44/4/52. R404a on tarkoitettu korvaamaan R502 uusissa laitoksissa. Se on klooriton ja melko lähellä atseotrooppia. Atseotrooppisuus merkitsee käyttäytymistä puhtaan aineen lailla mm. höyrystymisessä ja lauhtumisessa. Sen suhteellista otsonihaitallisuutta kuvaava ODP-luku (Global Warming Potential) on 0 ja kasvihuonehaitallisuutta kuvaava GWP-luku (Global Warming Potential) on 3500. (Aittomäki 1996)

Sekoittaja

Tuoteputkia ympäröivää vettä sekoitetaan jatkuvasti lämmönsiirtymisen tehostamiseksi. Tällä pyritään myös saamaan jokaiselle tuoteputkistolle tasavertaiset olosuhteet. Sekoittaja sijaitsee sisimmän tuoteputkistopakakan sisäpuolella altaassa. Sekoittaja näkyy kuvassa 3.

Kapillaariputki

Kylmäainesyöttö höyrystimelle tapahtuu kapillaariputkella.

Kompressori

Kompressorin toimintaa ohjataan termostaatin avulla. Jään sulaessa kompressori lähtee käymään ja jääpankin muodostumisen jälkeen pysähtyy.

Lauhdutin

Lauhdutin sijaitsee koneen alaosassa, josta lämpö poistetaan ympäristöön. Puhallin käy samaan kuin kompressori käy.

3 MITOITUSPERIAATTEET

Tuoteputkiston mitoituksen matemaattinen mallintaminen

Tuoteputkiston mitoitusta lähdetään aluksi mallintamaan matemaattisesti. Ennen mitausten aloittamista luodaan ohjelma, joka perustuu lämmönsiirtymislaskentaan. Ohjelmaan tulee syöttää laskuja varten sen tarvitsemat arvot eli tuotteen tulo- ja lähtölämpötila, sekä virtaus ja ympäröivän veden lämpötila. Ohjelma ilmoittaa tarvittavan putken halkaisijan ja putkipituuden. Ohjelma luodaan muokattavaksi, jotta sitä pystytäisiin muokkaamaan helposti antamaan oikeita tuloksia, jos mittaukset osoittavat sen antavan vääriä tuloksia.

Ongelmat mitoituksessa

Suurimmaksi ongelmaksi tässä lähestymistavassa muodostui virtaus. Ohjelma laskee virtauksen yhtäjaksoisena, eikä jaksottaisena, kuten todellisuudessa on. Pieni virtaama ei todellisuudessa vähennä lämmönsiirtymistä, vaan tehostaa sitä, koska tuote ehtii jäähtyä ollessaan tuoteputkistossa pidempään. Kuitenkin tällä laskennalla tulisi joka tapauksessa pystyä mitoittamaan tuoteputkisto maksimivirtaamalle eli tilanteelle, jossa virtaus on todellisuudessa lähes yhtäjaksoinen. Tämä vastaa 120 litralla tunnissa suoritettuja mittauksia, joissa 0,5l dekkalasi lasketaan täyteen kahdessatoista sekunnissa ja tyhjennetään ja asetetaan takaisin kolmessa sekunnissa. Vaihtoaika on niin lyhyt, että mittaus vastaa käytännössä tilannetta, jossa hana on jatkuvasti auki.

Tässä lähestymistavassa ilmeni myös muita ongelmia. Virtaus ja putkikoko aiheuttavat sen, että laskennallisesti virtaus on juuri turbulenttisen virtauksen puolella. Reynoldsin luku ylittää arvon 2300, jonka jälkeen virtaus on siis turbulenttista. Reynoldin luku muuttuu pienemmäksi putkikokoa kasvatettaessa ja tällöin myös Nusseltin luku pienenee. Virtauksen ollessa puoli litraa ajassa 12-15 s ja putkikoon välillä 8-12 mm on Reynoldsin luku kuitenkin koko ajan yli turbulenttisuuden rajan, joten mitoituksen tulisi toimia näillä mitoituskriteereillä ja kyseisellä mitoitustyökalulla.

Ohjelmaan syötettävä putken ympäröivän veden lämpötila oletettiin työn alussa olevan 0 °C, ja sitä käytettiin laskuissa. Mittauksissa ympäröivä vesi olikin melko tarkal-

leen nolla-asteista, mutta riippuen tulolämpötilasta ja kuormituksesta nousi se useita asteita. Tästä seurasi taas ongelma, kuinka tietää syötettävä ympäristön lämpötila tietyllä virtaamalla ja lämpötilalla.

Myös putkikoon muuttamisen vaikutukset aiheuttivat aluksi hieman hämmennystä. Tuoteputken tarvittava pituus kasvoi, kun halkaisijaa kasvatettiin. Tämä selittyy Nusseltin luvun pienentymisellä ja sitä kautta lämmönsiirtymiskertoimen heikkenemisellä. Mittauksissa 8mm ja 10mm putkille ei saatu selkeää korrelaatiota. Erot eivät olleet suuria, alle 1 °C, eivätkä niin johdonmukaisia, että niistä voisi tehdä tarkkoja johtopäätöksiä. Suuremmalla putkella saa kuitenkin kasvatettua hanasta tulevaa virtausta hieman, mikä oli suurin havaittu ero kyseisten putkikokojen välillä.

4 MITOITUSLASKELMAT

Matemaattisen mitoitustyökalun käyttämät kaavat on sijoitettu suoraan soluihin, joten ohjelma antaa tuloksen suoraan käyttäjälle tämän muuttaessa arvoja. Putken johtumisen vaikutus ja ulkopuolisen konvektion osuus sekoittajan vuoksi oletettiin vähäiseksi.

Laskut

Virtausnopeus putkessa

$$v = \left(\frac{\left(\frac{q_v}{1000 \text{ l/m}^3} \right)}{3600} \right) / A \quad (1)$$

Logaritminen lämpötilaero

$$\theta = \frac{(t_{tulo} - t_{ympäroiva}) - (t_{lähtö} - t_{ympäroiva})}{\ln \frac{(t_{tulo} - t_{ympäroiva})}{(t_{lähtö} - t_{ympäroiva})}} \quad (2)$$

Putken sisähalkaisija

$$d_s = d_u - 2s \quad (3)$$

Putken poikkipinta-ala

$$A = \pi * \frac{d_s^2}{4} \quad (4)$$

Putken tilavuus

$$V = \pi * \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 * l * 1000 \quad (5)$$

Nusseltin luku

$$Nu = 0,037 * (Re^{0,75} - 180) * Pr^{0,42} \quad (6)$$

Reynoldsin luku

$$Re = \frac{v * \emptyset_s}{\nu} \quad (7)$$

Prandtlin luku

$$Pr = \frac{v * c_p * 1000}{\lambda} \quad (8)$$

Lämmönsiirtokerroin

$$U = \frac{Nu * \lambda}{d_s} \quad (9)$$

Putken pituus

$$l = \frac{(1000 * c_p * \rho * v * d_s * (t_{tulo} - t_{lähtö}))}{4 * h * \theta} \quad (10)$$

5 MITTAUKSET

Mittauspiste sijoitettiin Mikkelin ammattikorkeakoulun LVI-laboratorioon. Mittaukset suoritettiin vedellä. Selkeyden säilyttämiseksi käytetään tulevasta ja lähtevästä vedestä nimitystä tuote ja jäädyttäjän vesialtaassa olevasta vedestä nimitystä ympäröivä vesi. Mittauksissa oli tarkoituksena selvittää tuotteen tulolämpötilan, ympäröivän veden lämpötilan, tuoteputken sijainnin (sisä, keski, ulko), putkipituuden, sekä hanasta laskettavan litramäärän vaikutukset tuotteen lähtölämpötilaan. Tätä lähdettiin selvittämään mittaamalla eri kombinaatioita ja näin hakemalla riippuvuuksia näiden vaihtoehtojen välille.

5.1 Mittauslaitteisto

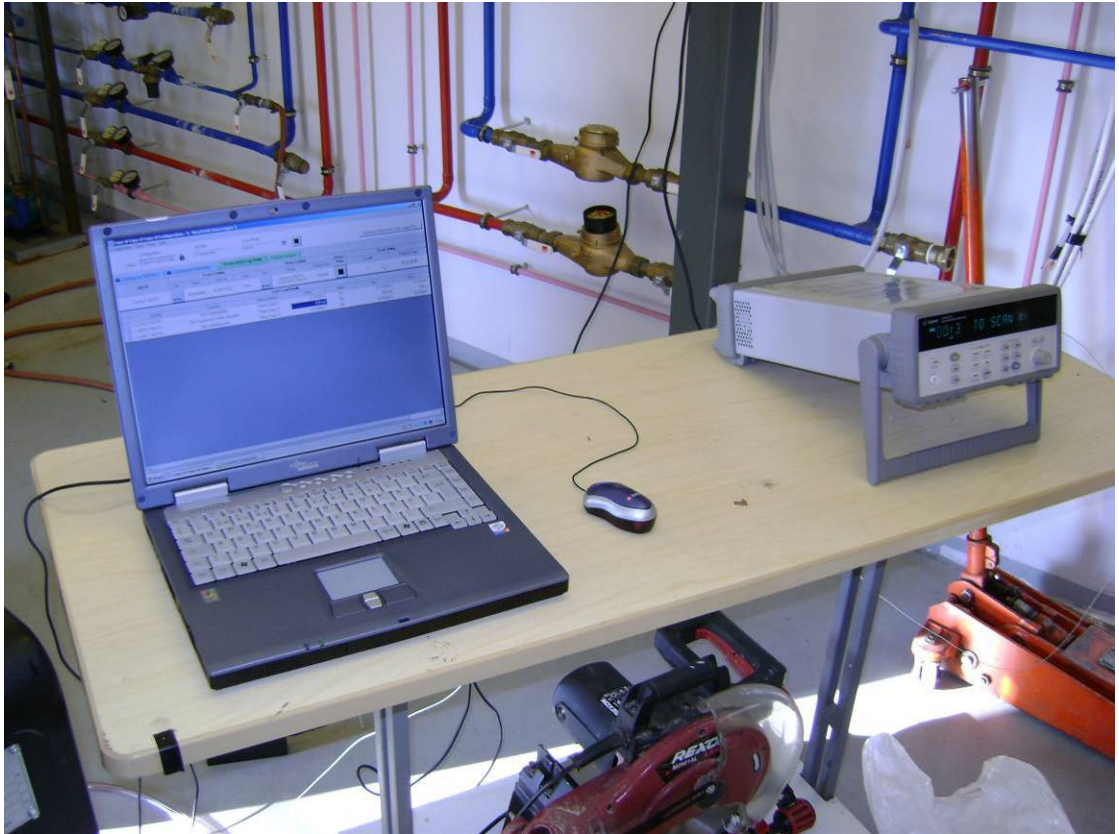
Mittauksissa käytössä oli Bierkühlin BOC-3 olutjäähdyttävä. Tuoteputkistoja käytössä oli 8 mm ja 10 mm halkaisijaltaan olevat pakat, putkien pituus näissä n. 7 m. Nämä ovat pituuksiltaan vastaavat, joita Bierkühl käyttää olutjäähdyttäjissään. Lisäksi mittauksia varten muokattiin alkuperäistä 8 mm putkistoa siten, että sen putkipituudet olivat n. 3,5 m, 5 m, ja 6 m. Oluthana oli käsikäyttöinen ja niitä oli käytössä yksi.



KUVA 4. Mittauspiste

Kuvassa 4 on LVI-laboratorioon rakennettu mittauspiste. Kuvassa vasemmalla on tiedonkeruulaitteisto, keskellä oluthana, sen oikealla puolella olutjäähdyttävä ja oikealla sekoittaja.

Mittaustulosten keräämiseen käytettiin kuvassa 5 olevaa Agilent 34970A -dataloggeria, joka oli kytketty kannettavaan tietokoneeseen. Dataloggeriin oli kytketty T-tyyppin lämpötila-anturit.



KUVA 5. Dataloggeri ja pc

Copy of Copy of Copy of Configuration - 9 - BenchLink Data Logger 3

Configuration Data Tools Help

Configuration: 34970A : Scan Mode:

Status: Copy of Copy of Copy 1 Connected Active Experience BenchLink Data Logger Pro ...

Configure 34970As Configure Channels Scan and Log Data Quick Graph

34970	Scan Control				Data Control			Start/Stop	Scan Status	
	Set	Start	Interval	Stop	Set	Name	Export Data		Scan#	Elapsed Time
1. ASRL1::INSTR	...	Immediately	00:00:30.00	User	...	Data Instr INSTR 8/12/2010 11:45:27	Manual	<input checked="" type="checkbox"/>	5	00:00:02:01

Last Scan Results

	34970A	Channel	Measurement	Data	Alarm	Min	Max
1	<1.ASRL1::INSTR>	102<Tulolämpötila>	Temp (Type T)	28.99200 C	Off	28.99200 C	29.64000 C
2	<1.ASRL1::INSTR>	104<Ympäristön veden lämpötila>	Temp (Type T)	663 mC	Off	663 mC	1.799000 C
3	<1.ASRL1::INSTR>	106<Lähtölämpötila>	Temp (Type T)	7.191000 C	Off	6.386000 C	7.191000 C

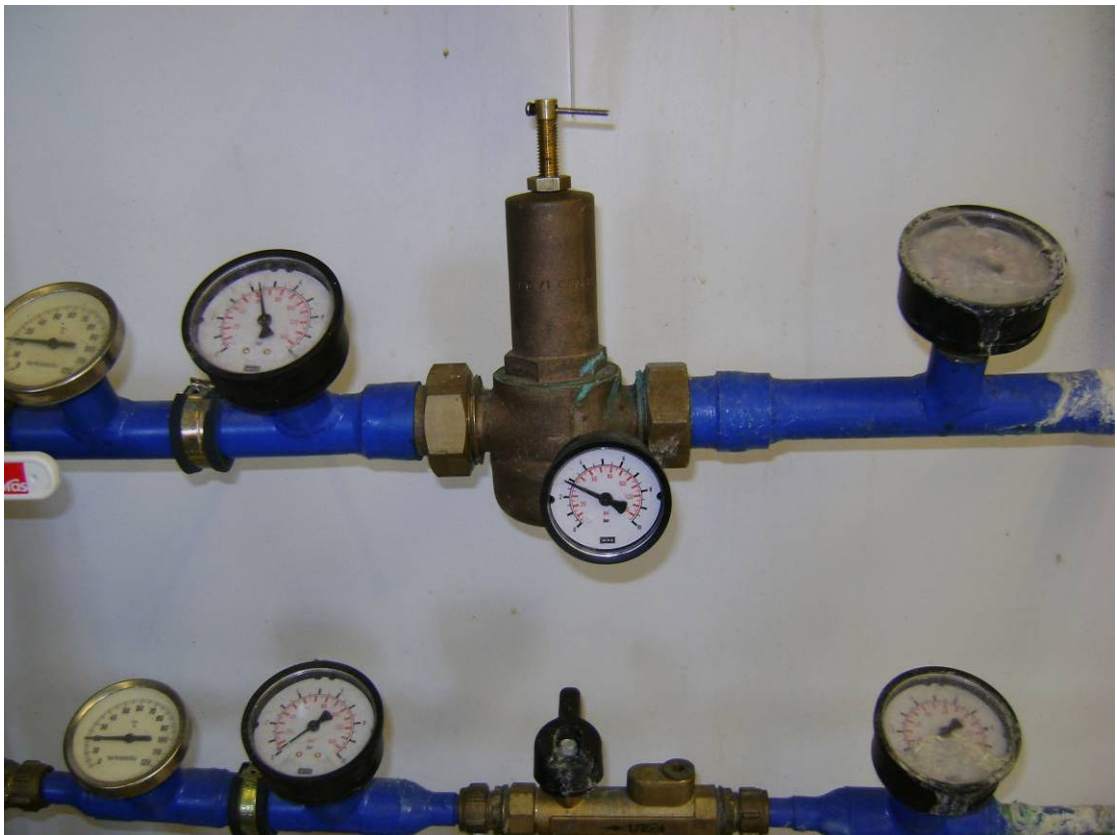
Windows taskbar: Start, 30 astetta, Copy of C..., 30 litraa t..., 60 litraa t..., 90 litraa t..., 120 litraa t..., 30 litraa t..., 60 litraa t..., untitled - ..., 11:47

KUVA 6. Tiedonkeruuhjelma

Kuvassa 6 on mittauksissa käytetyn dataloggerin käyttöliittymä. Kuvassa näkyvät kolme kanavaa, joiden anturit mittaavat tulolämpötilaa, ympäröivän veden lämpötilaa sekä lähtölämpötilaa. Interval-kohtaan asetettiin mittausväli, 15 s (120 l/h mittaus), 20 s (90 l/h mittaus) tai 30 s (30 ja 60 l/h mittaukset). Mittausaika 5 min luettiin Elapsed time -kohdasta. Mittauksen päättyessä mittaustulokset tuotiin csv-tiedostoiksi Export file -toiminnon kautta käyttäen erottimena puolipistettä. Sen jälkeen ne avattiin Exceliin tekstitiedostoina ja mittaustulokset vietiin omiin tiedostoihin.

5.2 Mittausjärjestelyt

Mittausten lähtökohtana oli, että tulevan tuotteen paine olisi lähellä olutsäiliön painetta, mikä on noin 2-2,5 bar. Tämä saavutettiin kuvan 7 mukaisen paineenalennusventtiilin avulla ja vesiverkoston paine oli sekoittajalla sen jälkeen hyvin lähellä olutsäiliön painetta.



KUVA 7. Paineenalennusventtiili

Toinen tärkeä asia mittausten onnistumiselle oli tulevan tuotteen lämpötilan säätö. Oluen lämpötila voi todellisuudessa vaihdella noin kymmenen ja kolmenkymmenen asteen välillä. Olutsäiliön sijoitus vaikuttaa paljon, koska kuumana kesäpäivänä olut voi lämmetä hyvinkin paljon huoneen lämpötilan noustessa. Toisaalta olut voi olla myös viileämpää, jos säiliö sijaitsee kylmässä tilassa. Tämä ongelma ratkaistiin käyttämällä normaalia kuvassa 8 olevaa sekoittajaa veden lämpötilan säätämiseen. Kuuman veden valmistamiseen käytettiin öljykattilaa. Näin lämpötilaa pystyttiin säätämään halutulla 10–30 °C välillä.

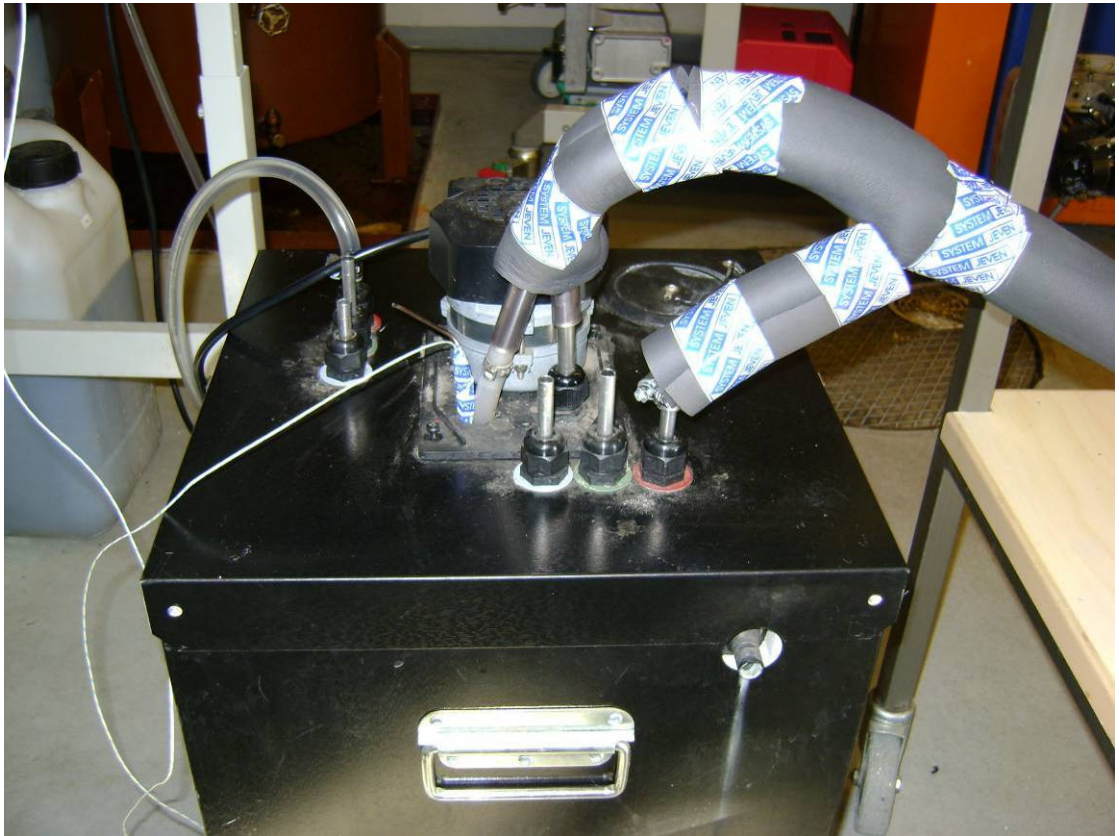


KUVA 8. Sekoittaja, painemittari ja lämpötila-anturi

5.3 Mittausvalmistelut

5.3.1 Olutjäähdyttäjän kytkentä

Olutjäähdyttäjään kytkettiin tarvittavat letkut (tuleva tuote, lähtevä tuote, kylmän veden kierto), jonka jälkeen ne eristettiin huolella, kuten kuvassa 9 on esitetty. Käytössä oli letkukiristimiä, jotka oli mahdollista avata ja kiristää uudelleen ruuvimeisselillä. Näin letkujen paikan vaihtaminen oli helppoa ja nopeaa. Vesiallas täytettiin vedellä, jonka jälkeen kansi asetettiin takaisin paikoilleen ja kytkettiin virtajohto pistorasiaan kiinni. Tämän jälkeen odotettiin jääpankin muodostumista, jonka jälkeen oli mahdollista aloittaa mittaukset.



KUVA 9. Kytkenä

Kuvassa 9 on vasemmalla tulevan tuotteen letku, keskellä kylmän veden kierron letkut ja oikealla lähtevän tuotteen letku liitettynä. Kuvanottohetkellä mittauksessa on ollut käytössä uloin putkilenkki.

5.3.2 Lämpötila-anturit

Mittaustulosten luotettavuus oli tärkeä kriteeri mittauksia aloitettaessa, ja siksi lämpötila-anturien antamista lukemista haluttiin varmistua. Tämä tapahtui kiinnittämällä viisi anturia mittalasiin. Tämän jälkeen lasiin laskettiin vettä ja vertailtiin anturien antamia arvoja koneelta keskenään, sekä elohopeamittarilla mitattuun lämpötilaan. Kolmen mittarin todettiin näyttävän keskenään lähes samaa arvoa ja myös hyvin lähelle kahdella elohopeamittarilla mitattua ($\pm 0,5$ °C). Nämä kolme anturia valittiin mitattamaan tulevan tuotteen lämpötilaa, ympäröivän veden lämpötilaa ja lähtevän tuotteen lämpötilaa.

Anturit sijoitettiin paikoilleen ja tämän jälkeen todettiin vielä, että ne toimivat hyvin ja antavat oikeita tuloksia mahdollisimman nopeasti. Tulevan tuotteen lämpötila mitattiin aluksi kahdesta kohdasta, kuparista sekoittajan jälkeen, sekä siitä lähtevästä letkusta. Kuparista mitattuna lämpötila muuttui nopeasti ja oli tarkka, letkusta ei, joten anturi sijoitettiin kupariin. Ympäröivän veden lämpötila mitattiin anturilla, joka oli kiinnitetty pieneen kuparinpalaan, joka oli sijoitettu vesialtaaseen, lähelle sekoittajaa. Tämänkin toiminta varmistettiin elohopeamittarin avulla. Mittalasin anturi kiinnitettiin lasin alaosaan, jottei veden kaataminen ja lasin täyttö vaikuttaisi lämpötilaan.

5.3.3 Eristys

Eristys on tärkeää, jotta ympäristön lämpötila ei pääse vaikuttamaan olutjäähdyttäjän toimintaan heikentävästi. Tämän vuoksi olutjäähdyttäjältä hanalle lähtevät letkut eristettiin hyvin, kuten todellisuudessakin tehdään, mikä on erityisen tärkeää etenkin jos matka olutjäähdyttäjältä hanalle on pitkä. Lisäksi myös anturit eristettiin, jotta ympäristön lämpötila ei vaikuttaisi niiden antamiin arvoihin. Eristyksessä käytettiin solukumia ja teippiä. Kuvissa 10 ja 11 näkyy kylmän veden kierto ennen eristämistä sekä eristyksen jälkeen.



KUVA 10. Kylmän veden kierto ennen eristystä



KUVA 11. Eristetyt letkut ja oluthana

5.3.4 Tuoteputkiston pituuden vaikutuksen mittaaminen

Eri putkipituuksien mittausta varten olemassa olevaa tuoteputkistoa muokattiin mitta-
uskäyttöön soveltuvaksi. Pituuksia muokattiin siten, että jokaista putkea lyhennettiin.
Normaalia noin 7 metrin pituutta pidemmät putket saatiin mitattua kytkemällä tuote-
putkia sarjaan, kuten kuvassa 12 on esitetty. Muokatut tuoteputket ovat kuvassa 13,
jossa näkyy kuinka putki on kytketty takaisin lenkiksi lyhentämisen jälkeen.



KUVA 12. Tuoteputkien kytkeminen sarjaan



KUVA 13. Lyhennetyt tuoteputket

5.3.5 Muut säädöt

Oluthanasta säädettiin virtaukseksi 0,5 l/12 s. 8 mm putkella tämä arvo oli hanan ollessa täysin auki, 10 mm putkella virtausta kuristettiin hieman. Tämä arvo on sopiva oluen laskemiseen hanasta, liian suuri nopeus ei ole suositeltavaa vaahdon muodostumisen vuoksi.

5.4 Mittausten suorittaminen

Mitattaviksi virtaamiksi valittiin 30 l/h, 60 l/h, 90 l/h ja 120 l/h. Tällöin dataloggerin tiedonkeruu väleiksi valittiin 30 s, 30 s, 20 s ja 15 s. 30 litraa tunnissa mittauksissa ei otettu 60 s mittausväliä, jotta tulevan tuotteen lämpötilaa pystyttiin seuraamaan paremmin ja keskiarvo ei heittelisi liikaa. Mitattaviksi tulolämpötiloiksi valittiin 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C ja 30 °C.

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin kymmenen minuutin mittauksina. Tällöin mittaus-tulokseksi otettiin keskiarvot väliltä 5-10 min. Pian kuitenkin havaittiin, että jääpankin

kapasiteetti ei riitä suurille litramäärille, kun tulolämpötila on suuri. Tämän vuoksi siirryttiin viiden minuutin mittauksiin, jotta mittauksia pystyttiin suorittamaan enemmän ilman katkoja jääpankin loppuessa.

Ympäröivän veden ja lähtevän tuotteen lämpötila nousee hieman mittauksen edetessä isoilla virtauksilla ja lämpötiloilla. Pienillä virtauksilla ja lämpötiloilla lämpötilat asettuvat hyvin lähelle vakiotilaa kolmen minuutin jälkeen. Mittauksen ensimmäisinä minuutteina lämpötilat muuttuvat paljon ja lähestyvät tätä vakiotilaa. Tulolämpötilaa täytyy myös useasti säätää kohdalleen alussa, ja tästä johtuen keskiarvot on otettu mittauksen lopusta. Tulolämpötilalla 10 °C tulokset vaihtelivat hieman, koska kymmenen asteen tulolämpötila oli vaikea saavuttaa, ja se nousikin monessa mittauksessa noin kahteentoista asteeseen. Tässä työssä käytettävät arvot ovat kaikki keskiarvoja väliltä 3-5 min.

Ensin mitattiin sisä-, keski- ja ulkopakat 8mm tuoteputkistosta tulolämpötiloilla 15 ja 20 °C. Seuraavaksi mitattiin sisin pakka, eli mikä on värikoodattu kannessa harmaaksi, kaikilla tulolämpötiloilla. Tällä selvitettiin aluksi erot tuoteputkistopakkojen sijaintien välillä. Lisäksi mitattiin jääpankin loppumisen vaikutusta lähtölämpötilaan.

Tämän jälkeen mitattiin 8 mm putkella putken pituuden vaikutusta, pituuksilla n. 5 m, 6 m, 7 m, 8,5 m ja 9,5 m. 8,5 m, sekä 9,5 m saatiin lenkittämällä putket sarjaan. Viimeisenä mitattiin putken halkaisijan vaikutusta 10 mm putkella kaikilla lämpötiloilla ja virtaamilla.

5.5 Tulokset

Mittaukset onnistuivat hyvin, ja tuloksista tuli pääosin hyvin informatiivisia ja vertailukelpoisia. Mittausten suuren lukumäärän vuoksi tuloksista saatiin luotettavia, ja mahdolliset virheelliset arvot oli helppo havaita ja korjata. Esimerkiksi eri pituuksilla mitatessa tulokset käyttäytyivät loogisesti. Mitä pidempi putki, sen paremmin tuote jäähtyy. Kuitenkin välillä tuli yksittäisiä tuloksia, jotka erosivat muista. Nämä tapahtuivat yleensä silloin, kun jääpankki oli loppumassa. Mittauksista on taulukoitu sekä mittaustulokset että tulokset, joihin poikkeavat arvot on muutettu. Halkaisijan vaiku-

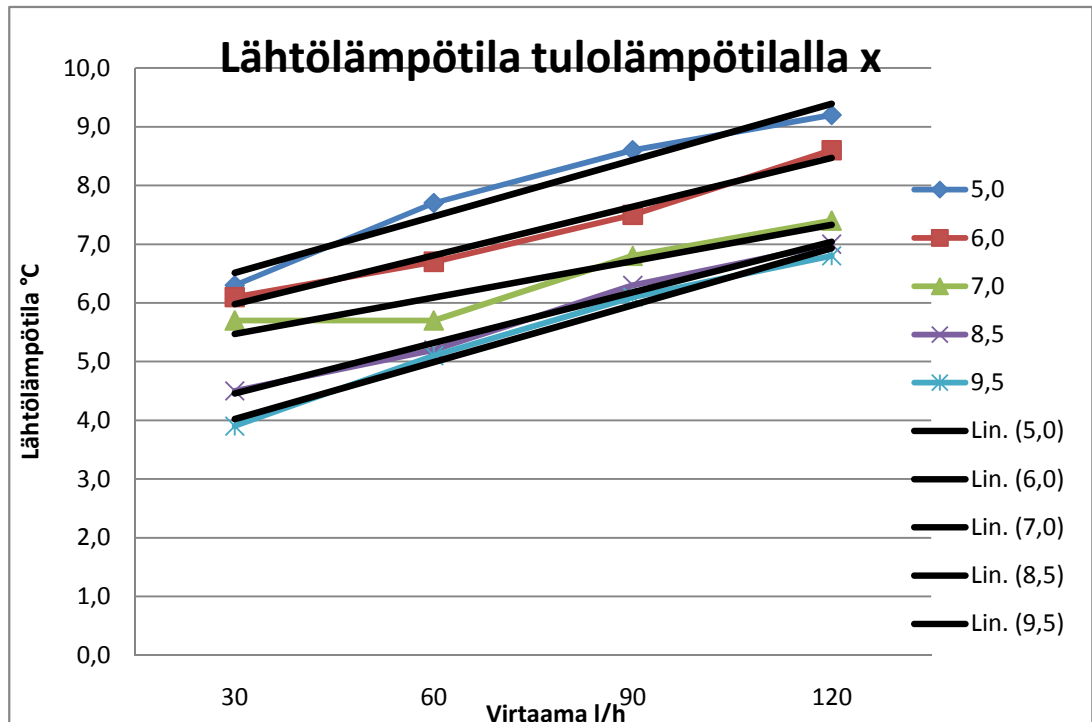
tuksen mittaukset eivät olleet kuitenkaan kovin informatiivisia. Mittaustuloksista ei ilmennyt selvää eroa 8 mm ja 10 mm putkien välille.

5.5.1 Sisä- ja ulkopakkojen vertailu

Ensimmäisissä mittauksissa selvitettiin eroja sisimmän, keskimmäisen ja uloimman pakan välillä. Mittauksissa havaittiin, että sisin pakka on tehokkain jäähdyttämään sisään tulevaa tuotetta. Putki sijaitsee lähellä sekoittajaa, joka tehostaa lämmönsiirtymistä. Ero sisimmän ja uloimman välillä oli keskimäärin n. 0,5 °C. Tätä eroa ei ole huomioitu mittauksissa, mutta se on hyvä pitää mielessä mitoitettaessa putken pituutta.

5.5.2 Pituuden vaikutuksen mittaaminen

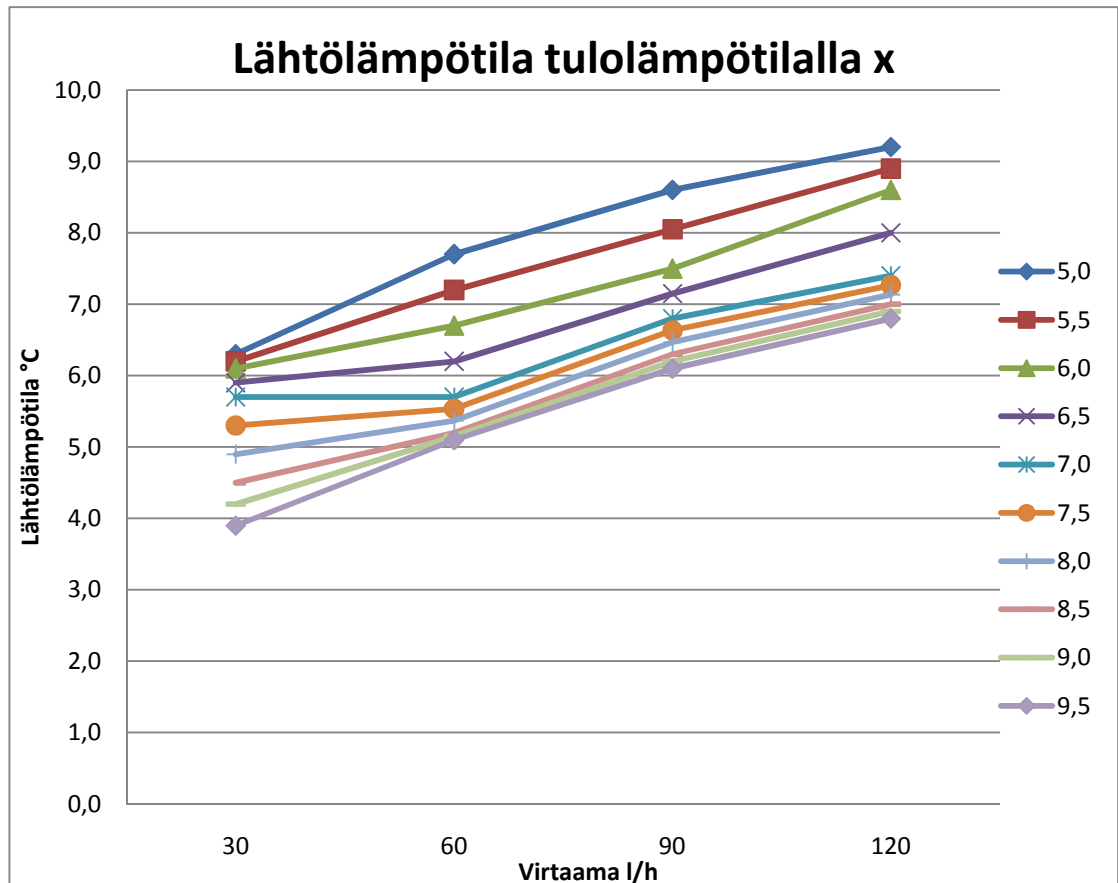
Mittauksissa havaittiin, että tuoteputken pituudella on suuri vaikutus tuotteen lähtölämpötilaan. Mitattavat putkipituudet olivat metrin ja puolentoista metrin päässä toisistaan, ja näin erot tulivat hyvin esille. Nämä välit olivat riittävät, koska erot muodostuivat sopiviksi, eikä tarvetta tarkempaan mittaukseen ollut. Välit olivat myös siten hyvät, että mahdolliset suuret ja pienet erot lähtölämpötiloissa tulivat hyvin esille.



KUVA 14. Tuoteputken pituuden vaikutus lähtölämpötilaan mitatuilla putkipituuksilla

Kuvan 14 kaavioon on otettu mittaustulokset eräällä tulolämpötilalla. Tulolämpötila on jätetty kaaviosta pois, jotta tulokset eivät ole kopioitavissa. Kuvassa pystyakseli kuvaa lähtölämpötilaa ja vaaka-akseli litramäärää tunnissa. Jokaisen putkipituuden mittaustulokset näkyvät kuvassa, sekä niille piirretyt trendiviivat. Trendiviivat helpottavat kaavion hahmottamista sekä mitoittamista.

Kaaviosta voidaan todeta, että lähtölämpötila muuttuu paljon putken pituutta muuttamalla. Erot ovat selkeitä välillä 5-8,5 m, kun taas 8,5 m ja 9,5 m pituuksien välillä ei enää suurta eroa ole. Näin on myös muilla tulolämpötiloilla. Putken pituuden mitoittamista varten tarvittavat arvot eli 5,5 m, 6,5 m, 7,5 m, 8,0 m ja 9,0 m on saatu mittaustulosten perusteella. Esimerkiksi 5,5 m arvo on viiden ja kuuden metrin mittausten keskiarvo. Väli 7-8,5 m on jaettu taas kolmeen osaan, jotta saadaan arvot pituuksille 7,5 m ja 8,0 m. Vastaavasti mitattujen lämpötilojen väliin jäävät lämpötilat on taulukoitua samalla menetelmällä. Mitoituksen lähtökohtana oli tulolämpötilan muuttaminen asteen välein. Näin esimerkiksi 15 ja 20 asteen lähtölämpötilatulosten väli on jaettu tasaisesti viiteen osaan, jotta saadaan myös arvot 16 °C, 17 °C, 18 °C ja 19 °C.



KUVA 15. Tuoteputken pituuden vaikutus lähtölämpötilaan mitatuilla sekä lasketuilla välipituuksilla

Kuvan 15 kaavioon on piirretty myös mittaustulosten perusteella lasketut väliarvot samalla tulolämpötilalla kuin edellisessä kuvassa. Jokaiselle tulolämpötilalle on luotu tällaiset taulukot käsin mitoitusta varten. Kaaviota lukemalla voi tällöin etsiä pituudelle tarkempaa arvoa, jos se tulee tarpeeseen. Kaavioita voi käyttää rinnan mitoitustyökalun kanssa havainnollistamaan eroja sekä täysin itsenäisesti ilman Exceltyökalua putken pituuden mitoittamiseen ja lämpötilojen tarkasteluun. Tällöin tulee muistaa, että mitoitustyökalu saattaa antaa eri tuloksia riippuen esimerkiksi siitä, millaiset varmuusarvot sille on syötetty tai mitä halkaisijaa käytetään.

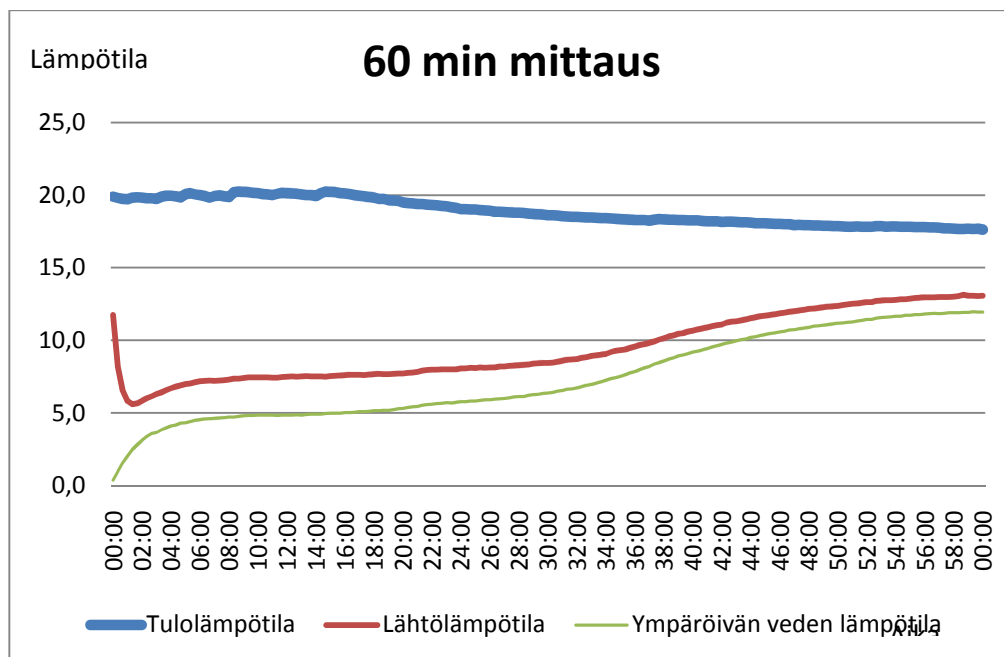
Taulukko 1. Tulolämpötilan arvoja

Tulolämpötila x

Litraa/tunnissa	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
30	4,5	4,0	3,6	3,4	3,3	3,1	2,9	2,8	2,7	2,7
60	4,9	4,5	4,0	3,9	3,7	3,6	3,4	3,3	3,2	3,0
90	5,5	5,2	5,0	4,7	4,5	4,4	4,2	4,0	3,9	3,9
120	5,9	5,6	5,4	5,1	4,9	4,8	4,7	4,5	4,5	4,4

Taulukkoon 1 on taulukoitu lähtölämpötilan arvot eräällä tulolämpötilalla. Tällainen taulukko on luotu asteen välein lähtien kymmenestä asteesta ja loppuen kolmeen kymmeneen asteeseen. Kuvassa tummennetulla pohjalla olevien solujen arvot on muutettu. Tässä tapauksessa esimerkiksi seitsemän metrin mitatut arvot olivat suurempia kuin kuuden metrin mitatut arvot, joten arvot korjattiin vastaamaan n. kahdeksan ja kuuden metrin keskiarvoa. Tämä voidaan todeta toimivaksi menetelmäksi kuvasta 13, jossa seitsemän metrin tulokset ovat melko tarkalleen kuuden ja kahdeksan metrin arvojen puolivälissä. Mittauksista on tallennettu sekä muokkaamattomat että muokatut tulokset, joihin on selkeästi merkitty muokkaamista vaativat arvot (mittaus-tulokset) ja muokatut arvot (mitoituksessa käytettävät arvot).

5.5.3 60 minuutin mittaus



KUVA 16. 60 minuutin mittaus tulolämpötilalla 20 °C ja virtaamalla 90 l/h

Kuvan 16 mittauksessa selvitettiin miten lämpötilat muuttuvat 60 minuutin mittauksen aikana. Mittaus suoritettiin tulolämpötilalla 20 °C ja virtaamalla 90 litraa tunnissa. Tulolämpötilaa ei pystytty pitämään vakiona koko mittauksen aikaa, koska öljykattila ei ollut sillä hetkellä päällä, ja näin ollen tulolämpötila tippui, vaikka lämpötilan säätö oli hanasta kuumimmalla. Kuvassa näkyy tulolämpötilan käyrä ylimpänä, lähtölämpötila keskellä ja ympäröivän veden lämpötila alimpana. Kompressori käynnistyi n. 2,5 minuuttia mittauksen alkamisesta, ja lopussa ei ollut enää jääpankkia.

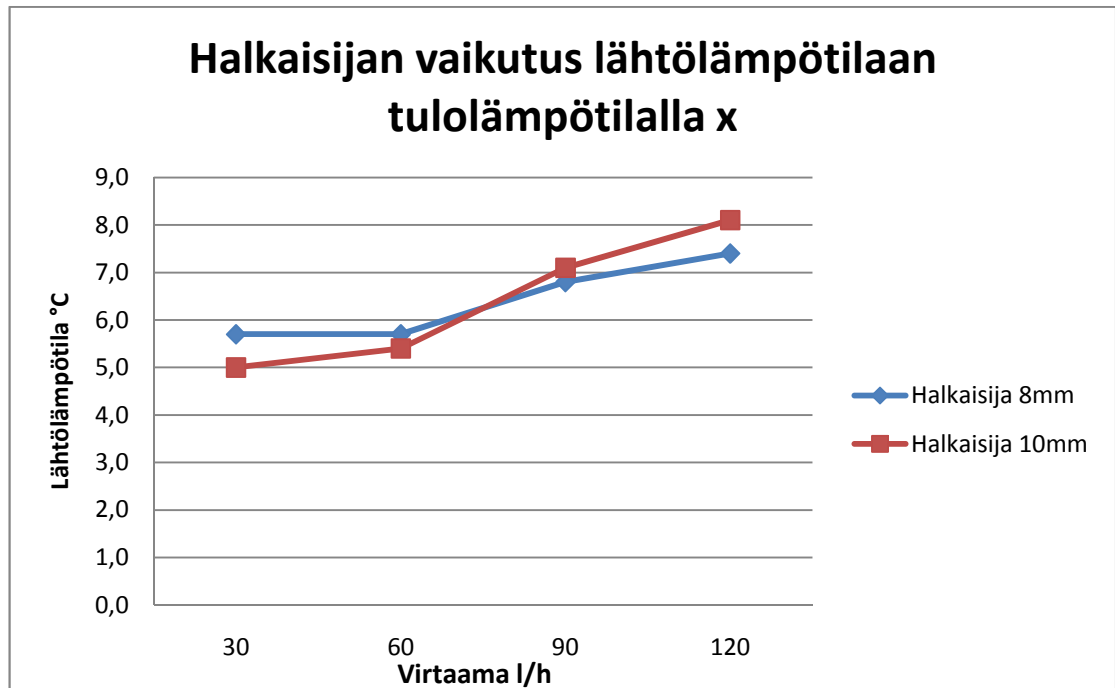
Mittaustuloksista voidaan lukea, että lähtölämpötila asettuu hyvin lähelle samaa arvoa noin 5 minuutin kohdalla. Se pysyy hyvin lähellä vakiota seuraavat 25 minuuttia. Myös ympäröivän veden lämpötila käyttäytyy samalla tavalla. Kolmen ja viiden minuutin välillä se on hieman alhaisempi kuin tästä eteenpäin. Näin ollen 5-10 minuutin mittaukset antavat hieman korkeammat ja tarkemmat lämpötila-arvot kuin 3-5 minuutin mittaukset. Tämä on syytä huomioida, jos verrataan 3-5 min ja 5-10 min mittaustuloksia keskenään.

Mitoituksessa on myös syytä huomioida varsinkin suurilla litramäärillä, että lähtölämpötila nousee hieman siitä, mikä on mitattu 3-5 min keskiarvoksi. Pienillä litramäärillä lähtölämpötila asettuu melko vakioksi nopeasti, koska ympäröivän veden lämpötila ei nouse kuormituksen myötä.

5.5.4 Halkaisijamittaukset

Halkaisijan vaikutusta mitattiin 8 mm ja 10 mm putkien kesken. Mittaukset suoritettiin 7 m putkipituudella tulolämpötiloilla 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C ja 30 °C. Mittaustuloksista luotiin vertailua varten kuvaajat jokaiselle tulolämpötilalle, joista luettiin halkaisijan vaikutusta lähtölämpötilaan. Kuvaajiin piirretyt käyrät olivat hyvin lähellä toisiaan, eli putken halkaisijan muuttamisella ei kyseisillä putkilla ollut suurta vaikutusta lähtölämpötilaan. Selkeää johtopäätöstä ei kuvaajista pystynyt vetämään, koska kuvaajan käyrät saattoivat ristetä, eli pienellä virtaamalla toinen putki jäähdytti enemmän ja virtauksen kasvaessa tilanne kääntyi päinvastaiseksi. Toisessa mittauksessa käyrät taas kulkivat johdonmukaisesti siten, että toisen putkista jäähdytti jokaisella virtaamalla enemmän. Halkaisijamittauksista on esitetty kuvaaja yhdestä mittauksesta kuvassa 17. Kaaviota luettaessa on syytä pitää mielessä, että se edustaa vain

yhden tulolämpötilan mittauksia ja pelkästään sen tuloksista ei pidä vetää johtopäätöksiä putkihalkaisijoiden vertailuun.



KUVA 17. Halkaisijan vaikutus tulolämpötilaan

6 MITOITUSTYÖKALU

Työssä kehitettiin rinnan matemaattista mitoitustyökalua sekä mittaustuloksiin perustuvaa mitoitustyökalua.

6.1 Laskujen perusteella toimiva mitoitustyökalu

Työn alussa luotiin kuvassa 18 esitetty Exceliin laskentataulukko, joka laski putkipituutta sille syötettyjen kaavojen avulla. Kuten kohdassa 3 käsitellyissä mitoitustilanteissa on käyty läpi, todettiin teoreettinen mallintaminen tällä tavalla mahdottomaksi ja muutenkin ongelmalliseksi vaihtelevien lämpötilojen vuoksi. Oluen tiheytenä on käytetty arvoa 1010 kg / m^3 , ominaislämpökapasiteettina $4,2 \text{ kJ / (kg * K)}$ ja lämmönjohtavuutena $0,6 \text{ W / (K * m)}$.

	A	B	C	D
1	Tuoteputkisto	Tänne syötetään putken halkaisija ja tilavuusvirta		
2				
3	Tulolämpötila	20	°C	
4	Lahtolämpötila	5	°C	
5	Ympäröivä lämpötila	2	°C	
6	Tilavuusvirta	120	l/h	
7	Nopeus	0,87	m/s	
8	Tuotteen ominaislämpökapasiteetti	4,2	kJ/kgK	
9	Tiheys	1010	kg/m ³	
10	Logaritminen lämpötilaero	8,37	°C	
11	Putken halkaisija	0,007	m	sisähalkaisija
12	Halkaisija, pinta-ala	0,000038	m ²	
13	Tilavuus	0,18	litraa	
14	Lämmönjohtavuus	0,600	W/(K·m)	
15	Nusseltin luku	28,23		
16	Lämmönsiirtokerroin	2419,72	W/(m ² ·K)	
17	Kinemaattinen viskositeetti	0,0000018	kgm/s	
18	Dynaaminen viskositeetti	0,001818		
19	Reynoldsin luku	3368,36	kin. Vis	>2300
20	Prandtin luku	12,7260	dyn. Vis.	
21	Putken pituus	4,76	m	
22				

KUVA 18. Laskujen perusteella toimiva mitoitustyökalu

Taulukkoon 2 on taulukoitu oluen ominaisuuksia eri lämpötiloilla. Taulukosta on luettavissa laskuissa käytetyt tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus sekä dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti.

Taulukko 2. Oluen ominaisuudet

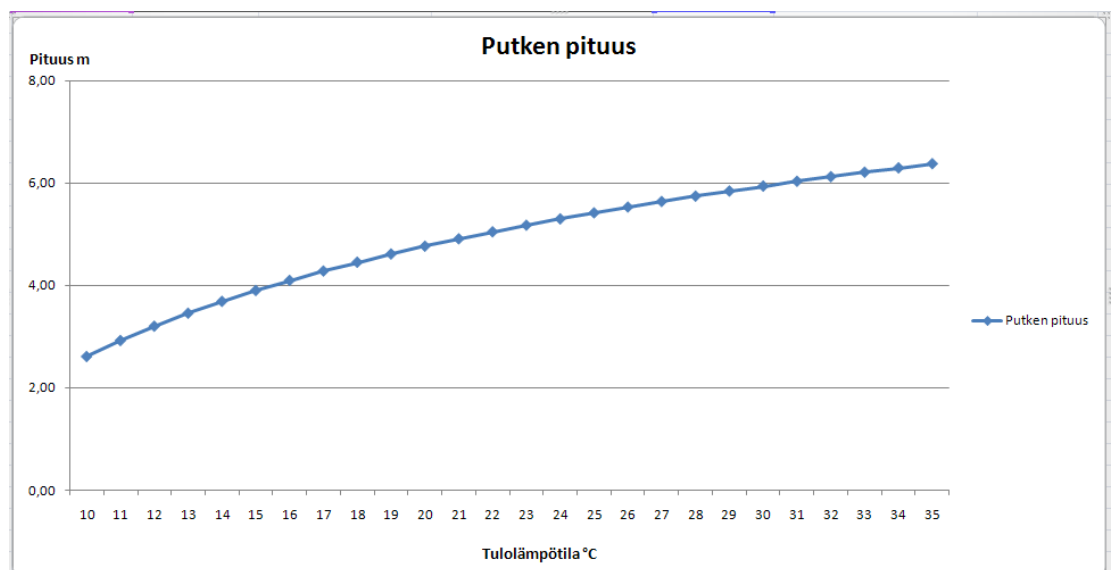
Alcohol 4 % weight. Original extract: 11.8 % weight.

Temperature	Density	Expansion	Specific	Thermal	Dynamic	Kinematic	
[°C]	[°K]	Coëff.	Heat	Conduct.	Viscosity	Viscosity	
		[1/K]	[kJ/kg.K]	[W/m.K]	[Pa.s]	[m ² /s]	
		.10 ⁻³			.10 ⁻³	.10 ⁻⁶	
0	273	1009.4	-0.005	4.015	0.536	2.60	2.57
5	278	1009.2	0.063	4.007	0.544	2.16	2.14
10	283	1008.7	0.126	4.002	0.553	1.82	1.81
15	288	1008.0	0.186	3.998	0.561	1.56	1.54
20	293	1006.9	0.241	3.995	0.568	1.35	1.34
25	298	1005.5	0.293	3.994	0.575	1.17	1.17
30	303	1003.9	0.341	3.993	0.582	1.03	1.03
35	308	1002.1	0.385	3.994	0.589	0.92	0.92
40	313	1000.1	0.425	3.996	0.595	0.82	0.82
45	318	997.9	0.462	3.999	0.600	0.74	0.74
50	323	995.5	0.495	4.003	0.606	0.67	0.68
55	328	993.0	0.524	4.007	0.611	0.62	0.62
60	333	990.3	0.550	4.012	0.615	0.56	0.57
65	338	987.5	0.572	4.018	0.619	0.52	0.53
70	343	984.7	0.590	4.024	0.623	0.48	0.49
75	348	981.7	0.605	4.030	0.627	0.45	0.46
80	353	978.7	0.616	4.037	0.630	0.42	0.43

Taulukkoon 3 on laskettu putkipituudet tulolämpötiloille 10–35 °C. Nämä tulokset on sijoitettu kuvan 19 kaavioon, josta oli tarkoitus lukea tarvittavan putkipituuden käyttäytymistä tulolämpötilan vaihdellessa.

Taulukko 3. Putken pituuden laskenta kaikilla tulolämpötiloilla

Tulolämpötila	Lähtölämpötila	Ympäröivä lämpötila	Logaritminen lämpötilaero	Putken pituus
10	5	2	5,10	2,61
11	5	2	5,46	2,92
12	5	2	5,81	3,20
13	5	2	6,16	3,45
14	5	2	6,49	3,68
15	5	2	6,82	3,90
16	5	2	7,14	4,09
17	5	2	7,46	4,28
18	5	2	7,77	4,45
19	5	2	8,07	4,61
20	5	2	8,37	4,76
21	5	2	8,67	4,90
22	5	2	8,96	5,04
23	5	2	9,25	5,17
24	5	2	9,54	5,29
25	5	2	9,82	5,41
26	5	2	10,10	5,53
27	5	2	10,38	5,63
28	5	2	10,65	5,74
29	5	2	10,92	5,84
30	5	2	11,19	5,94
31	5	2	11,46	6,03
32	5	2	11,73	6,12
33	5	2	11,99	6,21
34	5	2	12,25	6,29
35	5	2	12,51	6,37

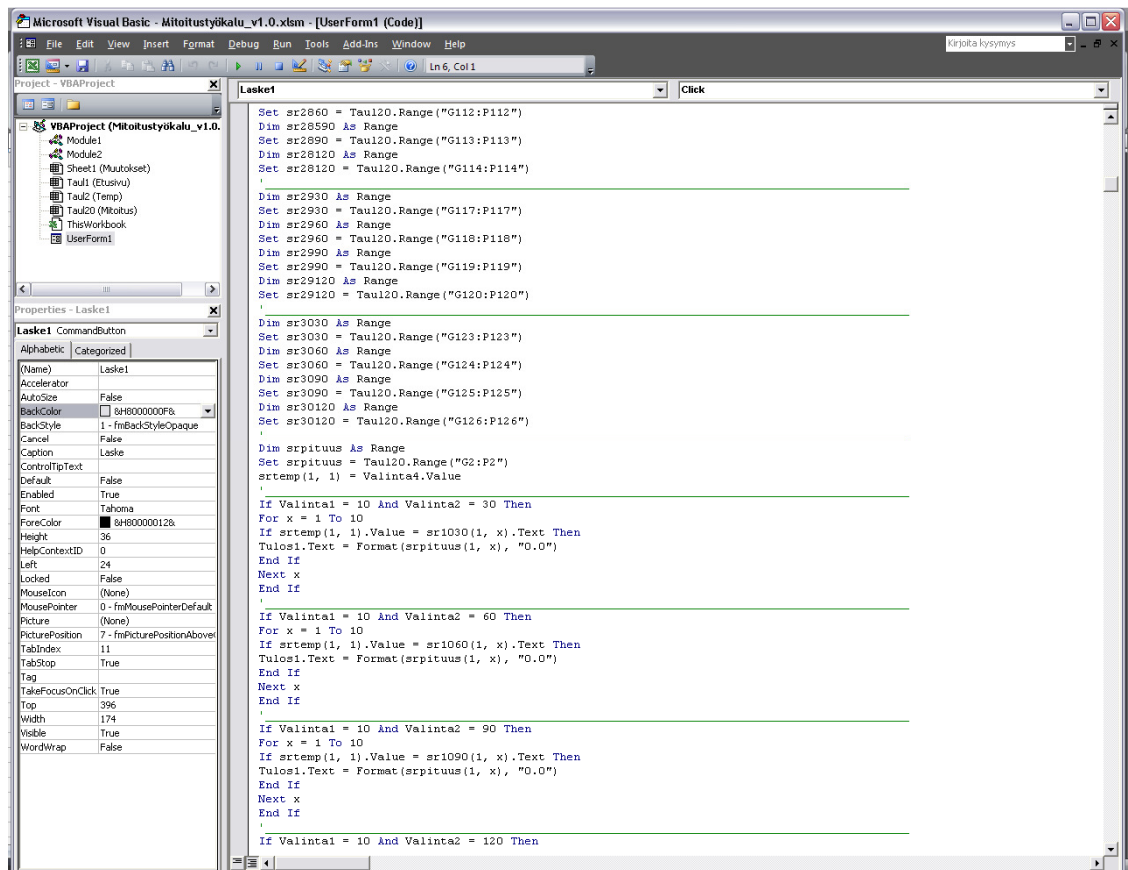


KUVA 19. Putken pituuden arvojen kuvaaja

6.2 Mittausten perusteella toimiva mitoitustyökalu

Mittausten antamien arvojen pohjalta kehitettiin helppokäyttöinen Excel-pohjainen mitoitustyökalu. Se kehitettiin silmällä pitäen sekä helppokäyttöisyyttä, että muokattavuutta. Muokattavuuden vuoksi mitoitustyökalun toimintaan vaikuttavat seikat ovat selkeästi esillä, mutta eivät kuitenkaan sekoittamassa tavallisen käyttäjän toimintaa. Mitoitustyökalusta pyrittiin myös tekemään mahdollisimman joustava, jotta myöhempi muokkaus on ylipäänsä mahdollista. Joustavuus otettiin huomioon esimerkiksi solujen sijoittelussa ja kaavojen luomisessa. Ohjelma luotiin Excelillä Visual Basic for Applications–ohjelmointikieltä (VBA) käyttäen. Ohjelmointikieleen ja ympäristöön tutustumisen ja opettelemisen apuna käytettiin Excel ohjelmointi – tehokas hallinta teosta, jonka tavoite lukijalle oli selvittää ohjelmoinnin perusteet ja antaa kuva siitä, kuinka VBA toimii Excelissä. Erityisesti kirjan osio lomakkeista oli hyödyllinen mitoitustyökalua ohjelmoitaessa. (Shepherd 2006, 91.)

6.2.1 Mitoitustyökalun ohjelmointi



KUVA 20. Mitoitustyökalun ohjelmointia Excelillä

Kuvassa 20 näkyy pieni osa ohjelman koodia sekä ohjelmointiympäristö. Kyseinen koodi on osa Laske-painikkeen toimintaa, jonka painamisen jälkeen ohjelma ilmoittaa putkipituuden tulos-kohtaan. Koodin alussa on määritetty mittaustulosten solualueita ja annettu niille nimi virtaaman ja tulolämpötilan mukaan, esimerkiksi sr2930. Lyhenne sr tulee englannin kielen sanoista source range. Keskellä on määritetty putkipituuden arvot, eli 5-9,5 m, alueeksi, jonka nimi on srpituus. Samalla taulukon Temp-laskentataulukon srtemp alueen ensimmäiseen soluun kirjoitetaan Valinta4-alasvetovalikon valinta, eli valittu lähtölämpötila. Temp-tilukoon kirjoitetut arvot toimivat mitoitusyökalun toiminnan tukena, niitä käytettiin sekä ohjelman antamien tulosten muokkaamiseen, että kiertämään jokin ohjelman toiminnallinen ongelma. Tätä lähestymistapaa tarvittiin, Laske-napin toiminnan ohjelmoimisessa, koska se ei osannut lukea valittua tulolämpötilaa suoraan alasvetovalikosta, vaan lämpötila täytyi lukea temp-laskentataulukon solusta johon tulolämpötilan arvo kirjoitetaan joka kerta sitä vaihdettaessa. Koodin sekaan on laitettu muistutuksia, ohjeita ja vinkkejä siitä mitä koodi tekee. Nämä ovat tärkeitä koodin luettavuuden kannalta tulevaisuutta varten, jos mitoitusyökalun toimintaa muutetaan tai laajennetaan.

Käyttäjän avatessa mitoitusyökalun avautuu käyttäjälle suoraan lomake, jota voidaan käyttää mitoitukseen. Käyttäjä pääsee muokkaamaan ohjelman arvoja sulkemalla lomakkeen. Takaisin lomakkeeseen pääsee taulukosta löytyvällä painikkeella.



KUVA 21. Mitoitusohjelman ulkonäkö

Kuvassa 21 on mitoitusohjelman ulkonäkö, joka avautuu käyttäjälle, kun Excel-tiedosto avataan. Käyttäjä valitsee haluamansa arvot alasvetovalikoista ja painaa laske. Ohjelma on luotu siten, että jos käyttäjä muuttaa jotain arvoa, joka vaikuttaa toisten alasvetovalikoiden valintoihin, tyhjenee edellinen valinta. Tällä estetään mitoitusohjelman virheellinen toiminta. Käyttäjän muuttaessa putken halkaisijaa, tyhjenevät edelliset arvot kaikista valinnoista sekä aiempi putken pituus. Käyttäjän muuttaessa oluen tulolämpötilaa tyhjenee aiemmin valittu lähtölämpötila, jolloin käyttäjän on valittava siihen uusi arvo. Samalla myös aiempi putken pituus katoaa. Virtaaman muuttaminen tyhjentää lähtölämpötilan valinnan ja edellisen putkipituuden arvon. Muutosten jälkeen käyttäjän tulee painaa laske-painiketta, jolloin ohjelma laskee uuden putkipituuden ilmoittaa uuden putkipituuden annettujen arvojen perusteella.

6.2.2 Toimintaperiaatteet

Mitoitustyökalua voidaan käyttää kahdella tavalla, jotka ovat seuraavanlaiset:

Putken pituuden selvittäminen

1. Valitse putken halkaisija (8 tai 10 mm)
 2. Valitse oluen tulolämpötila (10–30 °C)
 3. Valitse virtaama (30, 60, 90 tai 120 l/h)
 4. Valitse oluen lähtölämpötila
 5. Paina laske
- Ohjelma ilmoittaa putkipituuden

Ohjelma toimii myös siten, että ei selvitetä putken pituutta halutulla lähtölämpötilalla, vaan lähtölämpötilaa selvitetään tietyllä putkipituudella.

6.3 Työkalun antamat tulokset ja toiminta

Mitoitustyökaluun on luotu solut joihin syötetään arvot, jotka lisätään mittaustuloksiin. Tällöin välttyään alimitoitukselta. Koska viiden minuutin mittaus ei ole pitkä aika, ja lähtölämpötila ja ympäröivän veden lämpötila nousevat hieman ajan kuluessa etenkin suurilla virtaamilla, on ne helppo huomioida tällä tavalla. Tämä toimii toki myös päinvastoin, eli jos myöhemmin havaitaan, että mitoitus työkalu antaa liian korkeita arvoja, voidaan soluun syöttää negatiivinen arvo. 30 ja 60 litran mittauksissa lähtölämpötila ei paljoa nouse ajan kuluessa ja mittauksen jatkuessa. 90 ja 120 litramäärille voi olla kuitenkin hyvä ottaa huomioon lähtölämpötilan nousu ajan myötä. Esimerkiksi lisäämällä 90 litran tuloksiin 0,5 °C ja 120 litran tuloksiin 1,0 °C. Nämä arvot on arvioitu mittaustulosten pohjalta. Niiden tarkempi määrittely olisi vaatinut useita pidempiä mittauksia. Syytä on myös huomioida, että mitä suurempi kuormitus ja tulolämpötila, sitä isompi vaikutus sillä on lähtölämpötilaan kuormituksen jatkuessa yli viisi minuuttia.

6.4 Käyttöohje

Mitoitustyökalun kehityksen yksi tärkeimmistä kriteereistä oli helppokäyttöisyys. Mitoitustyökalua tulee osata käyttää lyhyen opastuksen jälkeen, ilman että vaaditaan alan koulutusta tai syvällistä tietoa olutjäähdyttäjän toiminnasta. Mitoitustyökalusta on laadittu yksityiskohtainen käyttöohje vain Bierkühlin käyttöön. Käyttöohje sisältää opastuksen mitoitustyökalun peruskäyttämiseen sekä ohjeet eri parametrien muokkaamiseen, joilla vaikutetaan mitoitustyökalun toimintaan. Käyttöohje sisältää kuvankaappauksia mitoitustyökalun käytön ja muutosten teon vaiheista.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli luoda helppokäyttöinen ja luotettava Excel-pohjainen mitoitus työkalu olutjäähdyttäjän tuoteputkiston mitoittamiseen. Työssä saavutettiin annetut tavoitteet hyvin, mutta työn suorittaminen poikkesi suunnitellusta melko paljon. Työn suorittamisen alkuperäinen suunnitelma olisi toiminut hyvin, jos laskelmat olisi saatu antamaan lähes oikeita tuloksia ja sen jälkeen varmistettu ne mittauksilla. Työn edetessä havaittiin, että oli hyvä olla varasuunnitelma jos alkuperäinen suunnitelma on mahdotonta toteuttaa syystä tai toisesta. Toisaalta vastaan tulee aina väistämättä tilanteita, jotka on ollut mahdotonta ennakoida. Näistä tuli selviytyä, jotta lopputulos vastaisi tavoitetta.

Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan aivan saavutettu sille annettuja tavoitteita. Opinnäytetyö sisälsi suunnitelman mukaan kaksi osaa, joista ensimmäinen on tuoteputkiston mitoitus työkalu ja toinen höyrystinputkiston mitoitus työkalu. Jo työn alkuvaiheessa höyrystinputkiston mitoitus rajattiin opinnäytetyön ulkopuolelle sen haastavuuden, sekä tuoteputkistupuolen laajuuden vuoksi, minkä todettiin olevan riittävä opinnäytetyön aiheeksi. Jääpankin käyttäytymisen mallintamiseen, eli jään sulamiseen ja muodostumiseen on aiemmin luotu tietokoneohjelma, jota käsittelevään artikkeliin tutustuttiin työn alussa. (Halasz, Grozdek, Soldo 2009)

Tuoteputkiston mitoittaminen ensin matemaattisesti ja sen jälkeen tulosten paikkansa pitävyyden tarkastaminen mittausten perusteella oli tässä tapauksessa hankala lähestymistapa. Laskelmien antamat tulokset todettiin virheellisiksi melko pian mittausten

alkaessa, jolloin laskelmien arvoja/kaavoja oli tarkoitus säätää tai muuttaa, jotta tulokset olisivat vastanneet todellisuutta. Tässä vaiheessa laskujen puutteet tulivat hyvin esille. Olutjäähdyttäjän toiminta, eli jaksottainen virtauksesta johtuva oluen jäähtyminen sen ollessa paikallaan tuoteputkessa vesialtaassa ja jäähtyminen virtauksen myötä, on haastavaa mallintaa matemaattisesti. Tämä oli suurin puute laskelmissa, koska niissä käytetyn virtauksen arvot olivat yhtäjaksoisen virtauksen arvoja. Näin ollen esimerkiksi virtauksen pienentäminen pidensi laskelmissa tarvittavan putken pituutta, koska turbulentsisuus pieneni ja lämmönsiirtyminen heikkeni. Todellisuudessa virtauksen pienentäminen lyhentää tarvittavan putken pituutta, koska tuote jäähtyy seisoesaan ja pieni virtaus ei aiheuta ympäröivän veden lämpötilalle suurta nousua.

Mittauksissa havaittu ympäröivän veden lämpötilan vaihtelevuus aiheutti ongelmia. Alussa yhdeksi mitoitusravoksi laskelmiin otetun ympäröivän veden lämpötilan oletettiin olevan vakio eli nolla astetta, mitä se olikin, kun laitetta ei kuormitettu. Mutta etenkin isoilla virtaamilla tämä lämpötila nousi useita asteita, jolloin laskelmissa käytetty $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ oli kaukana todellisesta. Jos ympäröivä lämpötila oletetaan vakioksi vastavissa lämmönsiirtymislaskelmissa, on se hyvä varmistaa mittauksilla. Etenkin jos ympäröivän veden määrä on melko pieni, kuten tässä tapauksessa. Olutjäähdyttäjän tuoteputkistoa mitoitettaessa laskelmin oli ero tarvittavaan putken pituuteen suuri riippuen ympäröivän veden lämpötilasta. Sen tietäminen ja syöttäminen laskuihin eri tulo- lämpötiloilla ja virtaamilla vähäisillä mittauksilla on mahdoton tehtävä.

Mitoitustyökalun ohjelmointi Visual Basic Applicationilla osoittautui onnistuneeksi ratkaisuksi. Kun ohjelmoinnin periaatteet ja ohjelmointikielen perusteet oli omaksuttu, oli ohjelmoinnissa selkeä tavoite, johon edettiin ratkomalla eteen tulevia ongelmia. Kokemattomalle on vaikeasta alusta huolimatta kannattavaa lähteä ohjelmoimaan Excelillä, koska sillä saavutetaan erittäin toimivia ja kaupallisen näköisiä ratkaisuja. Tässä työssä helppokäyttöinen, helposti lähestyttävä ja tyylikkään näköinen ratkaisu olisi ollut mahdoton toteuttaa Excelillä ilman mitoitustyökalun ohjelmointia. Ohjelmointityön aikana ohjelmoinnin potentiaali hahmottui. Se soveltuu monien erilaisten ongelmien ratkaisuun ja siitä voi olla hyötyä monissa ennalta arvaamattomissakin asioissa.

Kaiken kaikkiaan opinnäytetyöprosessi oli haastava ja tutkimus- ja kehitysperiaatteella etenevä projekti tuli tutuksi opinnäytetyön aikana. Työ sisälsi osa-alueita,

jotka olivat tärkeitä opinnäytetyössä onnistumisen kannalta, kuten ohjelmoinnin osuus. Tämän vuoksi suosittelen ohjelmoinnin perusteiden kurssia sisällytettäväksi talotekniikan insinöörin opintoihin.

LÄHTEET

Richard Shepherd, 2006. Excel-ohjelmointi – tehokas hallinta. Jyväskylä: readme.fi

Antero Aittomäki, Kylmäteknikka, 1996. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Boris Halasz, Marino Grozdek, Vladimir Soldo, Development of computer program for simulation of an ice bank system operation, Part 1: Mathematical modeling, 2009

LIITTEET

LIITE 1 Käyttöohje (vain Bierkühlin käytössä)

LIITE 2 Mittaustulokset (vain Bierkühlin käytössä)