

**BRAUMEISTER 20L- MÄSKÄYSLAITTEIDEN LÄMPÖTILASEURANNAT
JA JÄÄHDYTYKSEN OPTIMOINTI**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Bio- ja elintarviketekniikka, Hämeenlinna

Kevät, 2021

Antti Viitamäki

| | | |
|-----------|--|------------|
| Tekijä | Antti Viitamäki | Vuosi 2021 |
| Työn nimi | Braumeister 20L -Mäskäyslaitteiden lämpötilaseurannat ja jäähdytyksen optimointi | |
| Ohjaaja | Susanna Peltonen | |

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Hämeen ammattikorkeakoulun opetuspanimo. Opetuspanimolle on hankittu viisi uutta mäskäyslaitetta. Opinnäytetyössä seurattiin kunkin laitteen lämpötilakäyttäytymistä sekä mäskikakun lämpötilan tasaisuutta. Opetuskäytössä jokaisen laitteen tulisi käyttäytyä mahdollisimman yhdenmukaisesti, jotta lopputuotteet olisivat tasalaatuisia ja vertailukelpoisia. Lisäksi panimon vierteenjäähdysmenetelmistä tutkittiin, mikä on opetuskäyttöön sopivin menetelmä.

Mäskäysohjelmalla hallitaan sokereiden liukenemistä ja vaikutetaan lopputuotteen ominaisuuksiin. Eri lämpötiloissa toimivat eri entsyymit pilkkovat sokeriketjuja maltooseiksi, jotka hiiva kykenee käyttämään täysin ravinnokseen, sekä dekstriineiksi, jotka eivät ole käymiskelpoisia ja tuovat tuotteeseen esimerkiksi suutuntumaa.

Mäskikakun lämpötiloissa ei havaittu merkittäviä poikkeavuuksia. Yhdessä laitteista havaittiin poikkeavaa käytöstä mäskäysohjelman läpikäynnissä. Tämän vuoksi on suositeltavaa seurata seuraavissa oppilastöissä, onko poikkeava käytös toistuvaa. Nopealla jäähdytyksellä minimoidaan kontaminaatoriskit, säästetään vettä sekä sujuvoitetaan valmistusprosessia. Parhaaksi jäähdytysmenetelmäksi valikoitui pelkän immersiojäähdyttimen käyttö, joka oli nopea, helppo ja kulutti maltillisesti vettä.

Avainsanat panimo, mäskäys, vierre, jäähdytys, lämmönsiirto

Sivut 35 sivua ja liitteitä 6 sivua

| | | |
|------------|--|-----------|
| Author | Antti Viitamäki | Year 2021 |
| Subject | Braumeister 20L Brewing System Mash Temperature Monitoring and Optimal Wort Chilling | |
| Supervisor | Susanna Peltonen | |

ABSTRACT

This thesis was commissioned by the educational brewery of Häme University of Applied Sciences. The university has acquired five new brewing systems for educational use. The goal of this thesis was to clarify whether there are any thermal behavior differences in mashing between these five systems, and to find the most efficient application for wort chilling. For educational use, the devices should reach a similar level of equivalence to ensure that the end products are homogeneous and comparable.

The primary goal of mashing is the hydrolysis of starch. The temperature determines the enzyme activity during the mash. Different enzymes convert large starch molecules into fermentable and unfermentable sugars. Maltose, which has high fermentability, leads to complete conversion, whereas dextrins, which are not fermentable, remain in the final product to give body and mouthfeel.

As a result, no significant deviations of heat distribution were found. However, one of the devices was found to have an abnormal behavior during the mash program. Therefore, it is recommended to monitor the mashing whether the corresponding behavior recurs. The rapid cooling minimizes contamination risks, saves water and decreases the duration of the process. In cooling experiments, the use of the immersion chiller was fast, simple to execute and efficient in regards to water consumption, making it the best option for wort chilling.

Keywords brewery, mash, wort, chilling, heat transfer

Pages 35 pages and appendices 6 pages

Sisälllys

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Lämpötilojen merkitys mäsikäysprosessissa | 1 |
| 2.1 | Mäsikäysmenetelmät..... | 2 |
| 2.2 | Mallastus | 3 |
| 2.3 | Mäsikäyksen kemia | 3 |
| 2.3.1 | Tärkkelyksen hydrolyysi | 3 |
| 2.3.2 | Proteiinien hydrolyysi..... | 4 |
| 2.3.3 | β-glukaanien hydrolyysi | 4 |
| 2.3.4 | Mäsikäyksen pH | 5 |
| 3 | Jäähdytys | 5 |
| 3.1 | Lämmönsiirto | 6 |
| 3.2 | Levylämmönsiirrin elintarviketeollisuudessa..... | 7 |
| 3.3 | Aistittavat vaikutukset | 7 |
| 3.4 | Mikrobiologiset vaikutukset..... | 8 |
| 3.5 | Taloudelliset vaikutukset | 8 |
| 3.6 | Jäädätysmenetelmät ja välineet | 8 |
| 3.6.1 | Laitteen jäähdytysvaippa | 9 |
| 3.6.2 | Speidel immersiojäähdytin..... | 10 |
| 4 | Kokeellinen osuus..... | 11 |
| 4.1 | Tutkimuskysymykset | 14 |
| 4.2 | Koekeitoissa käytetty resepti | 14 |
| 4.3 | Braumeister 1 mäsikäys | 17 |
| 4.4 | Braumeister 2 mäsikäys | 18 |
| 4.5 | Braumeister 3 mäsikäys | 19 |
| 4.6 | Braumeister 4 mäsikäys | 20 |
| 4.7 | Braumeister 5 mäsikäys | 21 |
| 4.8 | Braumeister laitteistojen välinen vertailu | 22 |
| 5 | Jäähdytyskokeet | 22 |
| 5.1 | Laitteen vaipalla jäähdytys..... | 23 |
| 5.2 | Immersiojäähdyttimellä jäähdytys..... | 24 |
| 5.3 | Laitteen vaipalla sekä immersiojäähdyttimellä jäähdytys | 24 |
| 5.4 | Vaippaa ja pumppua käyttämällä jäähdytys | 24 |
| 5.5 | Immersiojäähdytintä ja pumppua käyttämällä jäähdytys | 24 |

| | | |
|-----|------------------------------------|----|
| 6 | Johtopäätöksen ja pohdinta | 25 |
| 6.1 | Mäskäyksen lämpötilaseuranta | 26 |
| 6.2 | Jäähdytyksen optimointi | 26 |
| | Lähteet..... | 28 |

Kuvat, taulukot ja kaavat

| | | |
|----------|--|----|
| Kuva 1. | Braumeister 20 PLUS ilman lämpöeristettä, jotta vaippa näkyisi | 10 |
| Kuva 2. | Speidel immersiojäähdytin | 11 |
| Kuva 3. | Mäskikakun sektoreiksi jaetut mittauspisteet..... | 12 |
| Kuva 4. | Lämpötilamittaus mäskikakusta ensimmäisestä sektorista | 12 |
| Kuva 5. | Yläritilään poratut mittauspisteet | 13 |
| Kuva 6. | Opinnäytetyössä käytettävä resepti | 16 |
| Kuva 7. | Braumeister 1 mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen | 17 |
| Kuva 8. | Braumeister 2 mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen | 18 |
| Kuva 9. | Braumeister 3 mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen | 19 |
| Kuva 10. | Braumeister 4 mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen | 20 |
| Kuva 11. | Braumeister 5 mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen | 21 |
| Kuva 12. | Mäskäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen mittauspisteiden lämpötilojen keskiarvoa käyttämällä | 22 |
| Kuva 13. | Vedenkulutus eri jäähdytysmenetelmillä | 23 |
| Kuva 14. | Jäähdytysmenetelmien nopeudesta laaditut käyrät | 25 |

Taulukko 1. Tärkeimmät aktiiviset entsyymit mäskäyksessä (Enari & Mäkinen, 2014, 85)3

Liitteet

| | |
|---------|------------------------------------|
| Liite 1 | Braumeister 1 mäskäyslämpötaulukko |
| Liite 2 | Braumeister 2 mäskäyslämpötaulukko |
| Liite 3 | Braumeister 3 mäskäyslämpötaulukko |
| Liite 4 | Braumeister 4 mäskäyslämpötaulukko |
| Liite 5 | Braumeister 5 mäskäyslämpötaulukko |

Liite 6 Jäähdytystaulukko

1 Johdanto

Hämeen ammattikorkeakoulun opetuspanimon uusiksi oluenvalmistulaitteiksi on hankittu viisi Speidelin valmistamaa Braumeister PLUS 20 -laitetta. Braumeisterin 10–50 litraiset laitteet ovat yleisiä panimoilla koekeittolaitteistoina. Useissa pienpanimoissa käytetään myös varsinaisessa tuotannossa saman valmistajan 200–500 litraisia laitteita. Pienemmät Braumeisterit ovat suosittuja koe-erien valmistuksissa ja reseptin hiomisissa, koska nämä laitteet toimivat suurempiin Braumeistereihin verrattuna samalla periaatteella ja mäskäystä ja keittoa kontrolloidaan samanlaisella ohjauspaneelilla. Laitteilla voidaan mäskätä, keittää ja jäähdyttää olut. 200- ja 500-litraisissa sekä pienemmissä PLUS-malleissa on oma jäähdytysvaippa, mutta usein prosessia nopeutetaan käyttämällä myös erillisiä lämmönsiirtimiä. Opinnäytetyön tarkoitus on tutkia hankittujen laitteiden lämpötilakäyttäytymistä mäskäyksen aikana. Opetuskäytössä laitteiden yhtenevä käyttäytyminen on tärkeää, jotta jokainen erä olisi vertailukelpoinen toisiinsa nähden. Jos joku laitteista eroaa selvästi muista, voidaan se tulevaisuudessa ottaa huomioon mäskäysohjema luodessa tai käyttää laitteista eniten poikkeavaa vain tilanteen vaatiessa kaikkien laitteiden yhtäaikaista käyttöä.

Lisäksi tarkastellaan eri jäähdytysmenetelmiä ja pyritään selvittämään paras menetelmä opetuskäyttöön. Nopea jäähdytys prosessissa säästää vettä ja pienentää kontaminaatoriskejä. Opetuspanimon laitteilla on mahdollista jäähdyttää vierre käyttämällä laitteiden omaa jäähdytysvaippaa, erillistä immersiojäähdytintä tai yhdistämällä molemmat menetelmät. Jäähdytysmenetelmistä valitaan paras menetelmä, jonka tulee toimia osana prosessia mahdollisimman hyvin niin ajallisesti, kuin yksinkertaisuudessakin. Valinnan tekemisessä huomioidaan myös jäähdytysveden kulutus.

2 Lämpötilojen merkitys mäskäysprosessissa

Lämpötilahallinnalla on merkittävä tarkoitus mäskäyksessä. Mäskäyksen pääasiallinen tarkoitus oluenvalmistuksessa on tuottaa ravintoliuos hiivaa varten. Ennen käymistä tätä liuosta kutsutaan vierteeksi. Vierteen tulee sisältää riittävä määrä käymiskelpoisia sokereita sekä hiivan tarvitsemat typpi- ja muut ravinteet hyvää alkoholikäymistä ja riittävää

alkoholipitoisuutta varten. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 76) Mäskäysohjelmalla voidaan hallita näiden ravinteiden liukenemista ja vaikuttaa lopputuotteen eli oluen kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin kuten esimerkiksi alkoholipitoisuuteen, suutuntumaan ja vaahtoon.

2.1 Mäskäysmenetelmät

Mäskäystapoja ovat esimerkiksi keittomäskäykset, joissa osa mäskestä kiehausetaan erillisessä astiassa ja palautetaan mäskiin. Lämmönnoitoja hallitaan keitetyn mäsken tilavuudella. Vanhin oluenuuvalmistuksessa käytetty tapa lienee kolmikeittomäskäys, jossa lämpötilaa nostettiin kolme kertaa lisäämällä päämäskiin kiehumispisteeseen nostettua mäskiä. Yleensä aloittamalla 35 °C:ssa ja nostamalla päämäski proteolyysitauon optimilämpötilaan 50–55 °C:een. Seuraavaksi nostettiin mäskäyslämpö sokeroitumislämpöön 62–65 °C:een ja lopuksi loppulämpöön 75–78 °C:een. Keittomäskäystä on käytetty varsinkin perinteisten eurooppalaisten lagereiden valmistuksessa. (Boulton, 2013, s. 397) Keittomäskäyksessä on kuitenkin verrattain paljon epäedullisia puolia. Osa entsyymeistä tuhoutuu keitetessä sekä mäskiä keitetessä liukenee myös ei toivottuja makuun vaikuttavia yhdisteitä. Prosessia mäskenkeitto voi hankaloittaa myös liisteröitymisen vuoksi. Keittomäskäys on lisäksi hidasta ja siihen voi kulua jopa kymmenen tuntia aikaa.

Laajemmin yleistyneeksi tavaksi on tullut ohjelmoitu infuusiomäskäys, jossa koko mäsken lämpötilaa hallitaan samassa astiassa. Lämpötilaohjelma sisältää tarpeen mukaan samat tauot kuin keittomäskäyksessäkin. Proteolyysitauon, yhden tai kaksi sokeroitumistaukoa ja ulosmäskäystauon. Uutesaannin ja prosessin sujuvuuden kannalta useampi mäskäystauko on avuksi varsinkin käytettäessä perusmaltaiden lisänä muita viljoja tai huonosti möyhentyntä mallasta. Ohjelmoitu infuusiomäskäys on energiatehokkaampaa eikä tarvitse erillistä keittokattilaa. Aikaa ohjelmoituun infuusiomäskäykseen kuluu noin kolme tuntia. (Briggs ym., 1981, s. 263)

Infuusiomäskäys vakiolämpötilassa on yksinkertaisin ja nopein mäskäystapa. Esimerkiksi englantilaistyyppisten ale-oluiden valmistus tapahtuu usein vain yhdessä lämpötilassa koko mäskäyksen ajan. Mäskäysohjelma sisältää vain sokeroitumistauon, joka on yleensä 65–70°C:ssa. Menetelmä vaatii kuitenkin hyvin möyhentyneiden maltaiden käyttöä.

2.2 Mallastus

Oluen pääraaka-aine veden ohella on mallasohra. Lisäksi oluen raaka-aineita ovat humala ja hiiva. Mallastuksessa aloitetaan jyvän hallittu idätys, jolloin jyvän tärkkelyksen entsyymattinen hajoaminen alkaa (Fix, 1989, s. 87). Jyvän tärkkelys ja proteiinit on tarkoitus hajottaa helpommin veteen liukenevaan muotoon, jotta mäsikäys olisi mahdollisimman tehokasta.

2.3 Mäskäyksen kemia

Mäskäyksen aikana idätyksessä aloitetut entsyymattiset hajoamisreaktiot jatkuvat. Jyvän endospermin vararavinnon hajottamisesta vastaavat hydrolyyttiset entsyymit, jotka jatkavat toimintaansa vielä maltojen kuivauksen ja rouhinnan jälkeenkin. Näiden entsyymien toimintaa säädellään mäskäyksen aikana lämpötila-aika-ohjelmalla. Jokaisella entsyymillä on omat optimilämpötilat ja pH-arvonsa (taulukko 1). Mäskäyksessä tärkeimpiä reaktioita ovat tärkkelyksen, proteiinien ja β -glukaanien hajoaminen liukeneviksi yhdisteiksi. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 84)

Taulukko 1. Tärkeimmät aktiiviset entsyymit mäskäyksessä (Enari & Mäkinen, 2014, 85)

| Entsyymi | Optimi-lämpötila °C | Optimi-pH |
|---------------------|---------------------|-----------|
| α -amylaasi | 72 - 74 | 5,7 |
| β -amylaasi | 62 - 65 | 5,5 |
| Hapan proteinaasi | 45 - 55 | 3,9 - 6,0 |
| Karboksipeptidaasi | 60 | 4,8 - 5,6 |
| β -glukanaasi | 30 | 4,7 - 5,0 |

2.3.1 Tärkkelyksen hydrolyysi

98 % tärkkelysjyvästen kuivapainosta muodostuu tärkkelyksestä. Loput 2 % muodostuu proteiineista, lipideistä ja muista yhdisteistä. Tärkkelystä kuumennettaessa amylopektiini turpoo ja muodostaa amylaasien hydrolyyttiselle toiminnalle alttiin geelin. Tätä kutsutaan tärkkelyksen liisteröitymiseksi.

Koska tärkkelyksen rakenne on osittain hajonnut jo idätyksessä, liisteröitymistä tapahtuu mäsikäyksessä mallastettua ohraa raaka-aineena käytettäessä. Ilman oikeanlaista mäsikäysohjelmaa liisteröityminen voi tehdä siivilöinnistä mahdotonta. Liisteröitynyt tärkkelys saadaan hajoamaan α - ja β - amylaasin vaikutuksesta. Täydellisen sokeroitumisen tuloksena on maltoosi. Tärkkelyksen täydellistä hydrolyysiä mäsikäyksessä ei kuitenkaan haeta, vaan vierteeseen halutaan myös dekstriinejä, jotka eivät hajoa käymiskelpoisiksi sokereiksi ja jäävät tuomaan olueeseen täyteläisyyttä. α -amylaasin ja β -amylaasin toiminnan suhdetta säädellään lämpötilan avulla. Nostamalla mäsikäyslämpötila nopeasti β -amylaasin optimin toiminta-alueen yli noin 70°C :seen muodostuu enemmän dekstriinejä, jotka eivät hajoa käymiskelpoisiksi sokereiksi, jolloin oluesta saadaan täyteläisempi. Kun mäsikäys tapahtuu taas β -amylaasin optimi toiminta-alueella $62\text{--}65^{\circ}\text{C}$:ssa, lopputuloksesta saadaan kevyempi tai kuivempi, koska vierteessä on enemmän käymiskelpoisia sokereita. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 84–86)

2.3.2 Proteiinien hydrolyysi

Mäsikäyksessä proteolyysiin vaikuttamiseen on suhteellisen pieniä mahdollisuuksia. Proteiinien hajoaminen tapahtuukin pääasiassa jo mallastuksessa (Fix, G, 1989, s. 33). Proteiinin hydrolyysistä vastaavat peptidaasi- ja proteinaasientsyymit. Peptidaaseista tärkein, karboksipeptidaasi toimii lähes koko mäsikäyksen ajan, kun taas proteinaasi toimii $45\text{--}55$ asteen välillä. Proteiinien hydrolyysissä syntyy aminohappoja, jotka takaavat hiivalle paremmat elinolosuhteet. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 86–87)

2.3.3 β -glukaanien hydrolyysi

Mallastuksessa jyvän rakenneaine β -glukaani hajoaa osittain endo- β -glukanaasin vaikutuksesta vesiliukoiseksi β -glukaaneiksi. Lyhyellä idätysajalla jyvän möyhentyminen jää huonoksi ja muodostuu suuri määrä suurimolekyylisiä β -glukaaneja. Pidemmällä idätysajalla hydrolyysi etenee pidemmälle ja muodostuu pienimolekyylisiä β -glukaaneja. β -glukaanien hydrolyysi jatkuu mäsikäyksessä. Mäsikäyksen lämpötilaohjelmalla on suuri merkitys, koska endo- β -glukanaasi on varsin lämpöherkkä. Jos lämpö nostetaan nopeasti 60°C :een, β -glukanaasi inaktivoituu ja vierteeseen jää suurimolekyylisiä β -glukaaneja, jotka nostavat sen viskositeettia ja hankaloittaa siivilöintiä ja suodatusta. Varsinkin vähemmän modifioitua

mallasta käytettäessä kannattaakin mäsäysohjelmaan sisällyttää pidempi sisäänmäsäystauko 30–40°C:ssa. Korkean glukaanipitoisuuden aiheuttamia ongelmia voidaan myös helpottaa lisäämällä mäsäykseen mikrobiperäisiä suodatusentsyymejä. Näitä voidaan lisätä vierteeseen myös käymisen aikana helpottamaan suodatusta ja parantamaan oluen kirkastumista. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 88)

2.3.4 Mäsäyksen pH

Mäskin happamuus vaikuttaa entsyymien toimintatehokkuuteen. Mäskin pH on yleensä 5,7–5,8 ja sitä kannattaakin säätää alemmas 5,2–5,3:een. Säätöön käytetään yleensä maito- tai sitruunahappoa. Näin voidaan saavuttaa seuraavia etuja:

- lyhyempi sokeroitumisaika
- korkeampi käymisaste
- vapaa aminotyyppi nousee
- parempi uutesaanto
- vierteen väri vaalenee
- polyfenolipitoisuus nousee.

Näistä korkeammalla polyfenolipitoisuudella on mäsäyksessä haittaa amylaaseille ja proteolyttisille entsyymeille ja voi aiheuttaa sameutta lopputuotteeseen varsinkin pidempään säilytettäessä. (Enari & Mäkinen, 2014, ss. 81, 88)

3 Jäähdytys

Jäähdytys on merkittävä osa prosessia ja sillä on suuri merkitys laadullisesti lopputuotteeseen. Se vaikuttaa lopputuotteen aistittaviin ominaisuuksiin ja pienentää mikrobiologisten kontaminaatioiden riskiä. Jäähdytyksen pääasiallinen tarkoitus on jäähdyttää vierre käytettävälle hiivatyyppille sopivaan lämpötilaan. Yli 37°C on hiivoille liian korkea lämpötila ja heikentää niiden suorituskykyä käymisessä merkittävästi tai tuhoaa ne kokonaan. Yleensä vierre jäähdytetäänkin 10–20 °C:een. Lager-hiivat eli pohjahiivat toimivat

matalammissa lämpötiloissa ja ale-hiivat, eli pintahiivat korkeammissa lämpötiloissa.

Tehokas jäähdytys nopeuttaa myös prosessia ja voi tuoda panimon koosta riippuen suuriakin taloudellisia etuja. Kaupallisissa panimoissa käytetään lähestulkoon aina jäähdyttämiseen levylämmönsiirrintä. Levylämmönsiirtimen jäähdytysnesteinä kierrätetään glykolia tai vettä ja joissain tapauksissa jäähdytystä tehostamaan käytetään lisäksi jäävettä.

Levylämmönsiirrintä käyttämällä lämpö voidaan ottaa helposti talteen ja käyttää prosessin muissa vaiheissa energian säästämiseksi. (Smart, 2019, s. 104) Opetuspanimon laitteistolla on mahdollista jäähdyttää käyttämällä laitteiden omaa jäähdytysvaippaa sekä mahdollisesti erillistä vierteeseen upotettavaa immersiojäähdytintä. Jäähdytysvetenä käytetään kylmää vettä rakennuksen kylmävesilinjasta. Kylmän veden lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan noin kahdeksasta C°:sta jopa 14C°:en.

3.1 Lämmönsiirto

Lämpö on energiaa, eli se ei vain katoa, vaan se vaihtaa muotoaan tai siirtyy johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla. Yleensä lämmönsiirto tapahtuu kaikkien näiden yhdistelmänä. Vierteen jäähdytyksessä lämpö siirretään jäähdytysveden mukana pois vierteestä käyttämällä laitteen omaa jäähdytysvaippaa tai kierukkamallista immersiojäähdytintä. Tätä kutsutaan konvektiiviseksi lämmönsiirroksi. Lämpö siirtyy vierteestä johtumalla käytettävään jäähdytys-elementtiin, jossa se kulkeutuu liikkuvan nesteen mukana pois. (Sysilä, 1997, ss. 88–89) Jäähdytys perustuu lämmönsiirtoon johtumalla ilman että fluidit sekoittuvat keskenään. Lämmönsiirtoa voidaan tehostaa vierrettä sekoittamalla sekä mahdollisimman kovalla virtausnopeudella. Mitä kylmempänä jäähdytys-elementti saadaan pidettyä, sitä tehokkaammin vierre jäähtyy. Vastaavasti, jos jäähdytysveden virtaus on hidasta, ehtii se lämmitä enemmän matkallaan jäähdytys-elementin läpi, eikä lämmönsiirto ole enää tehokasta. Mitä suurempi lämpötilaero on, sitä suurempi on lämpövirta. Vierteen jäähtyessä lämmön siirtyminen hidastuu, kun lämpötilaero pienenee. Vierteen jäähtyessä tapahtuu jäähtymistä myös vapaan konvektion avulla. Konvektiossa lämpötilaeron aiheuttama tiheysero aiheuttaa pystysuoran jäähdytysvaipan läheisyydessä jäähtyneen vierteen laskeutumisen kattilan pohjalle ja kuumemman vierteen nousun pinnalle (Wagner 1994, s. 82).

3.2 Levylämmönsiirrin elintarviketeollisuudessa

Levylämmönsiirrin on yleisin elintarviketeollisuudessa nestemäisten tuotteiden jäähdtykseen käytetty jäähdtystapa. Levylämmönsiirrin koostuu levyistä, joissa on erilliset kanavat jäähdtyttävälle nesteelle ja jäähdtyksnesteelle. Levyt on kiristetty pulteilla pakaksi ja laitteiston jäähdtystehoa voidaan lisätä lämmönsiirtopinta-alaa kasvattamalla levyjä lisäämällä. (Ahmed ym., 2012, ss. 329–331) Tehokkain lämmönsiirto saavutetaan yleensä vastavirtaperiaatteella, jossa jäähdtyttävä neste ja jäähdtyksneste virtaavat nimensä mukaisesti vastakkaisiin suuntiin. Lämpö johtuu vierteestä jäähdtyksveteen, joka voidaan ottaa talteen energian säästämiseksi. Talteen otettu jäähdtyksvesi on yleensä noin 70°C ja sopii siksi käytettäväksi esimerkiksi seuraavassa mäskäyksessä tai välineiden puhdistuksessa (Hough ym., 1982, s. 523). Levylämmönsiirtimiä on myös hitsattuja ja juotettuja, joiden tehoa ei voida lisätä levyjä lisäämällä. Panimoissa kuuma vierre siirretään käymistankkiin yleensä levylämmönsiirtimen kautta, jolla vierre saadaan jäädytettyä tarkasti haluttuun käymislämpötilaan vierteensiirron yhteydessä.

3.3 Aistittavat vaikutukset

Vierteenkeiton jälkeen, ennen jäähdtystä vierre voidaan siirtää niin sanottuun whirlpool-säiliöön, jossa vierre pumpataan sivusta tangentialisesti, jolloin se synnyttää säiliöön luonnollisen pyörteen. Tätä kutsutaan myös vierresykloniksi. Pyörteen tarkoitus on kerätä humala- ja mallasjäät sedimenttikeoksi säiliön pohjalle ennen jäähdtystä ja siirtoa käymistankkiin. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 109) Monissa reilummin aromihumaloituissa oluissa whirlpooliin lisätään reilusti aromia tuovia humalalajikkeita. α -happojen isomeroituminen vaatii kiehumiseen tarvittavan lämpötilan, joten whirlpool-humaloinnilla on mahdollista saada toivottuja aromaattisia aineita katkeroaineiden sijaan. Whirlpoolin jälkeen jäähdtyksellä voidaan pysäyttää α -happojen isomeroituminen ja humalaöljyjen haihtuminen.

Nopealla jäähdtyksellä saadaan myös niin kutsuttu kylmärupa laskeutumaan säiliön pohjalle. Mitä nopeammin vierre pystytään jäähdtyttämään, sitä vähemmän vierteeseen jää sameutta aiheuttavia proteiineja, jotka voivat aiheuttaa myös ylimääräistä vaahtoamista ja ei toivottua rikkimäistä makua. (Noonan, 1986, s. 135) Kuuma vierre on myös todella altis

hapettumiselle. Monet yhdisteet kuumassa vierteessä reagoivat hapen kanssa synnyttäen oksideja, jotka voivat olla laadullisesti yhtä haitallisia oluen flavorille, kuin mikrobiologinen kontaminaatiokin (Sysilä, 1997, s. 89).

3.4 Mikrobiologiset vaikutukset

Vierre on ravintosisällöltään täydellinen kasvualusta hiivan lisäksi ei-toivotuille mikrobeille. Tämän vuoksi on tärkeää, että vierre saadaan nopeasti lopulliseen käymissäiliöön. Kun vierre on jäähtynyt alle 63°C:een, se on altis ilmasta tarttuville bakteereille ja villihiivoille (Noonan, 1986, s. 135). Yleisimmät kontaminantit vierteelle ovat enterobakteerit, etikkahappobakteeri ja ei-toivotut villihiivat (Kellershohn ym., 2008, s. 169). Keiton jälkeen vierre on mikrobiologisesti steriiliä. Jäähdytyksen jälkeen kaikki laitteet, säiliöt ynnä muut pinnat joihin vierre on kosketuksessa, on oltava steriilejä.

Ennen hiivan lisäystä vierteen on oltava sille sopivassa lämpötilassa. Yleensä pintahiivoille sopiva lämpötila käymisen aloitukselle on 18–25°C ja pohjahiivoille useimmin korkeintaan 16°C. On suositeltavaa jäähdyttää vierre paria astetta käymislämpötilaa matalammalle, ettei hiiva saa lämpöshokkia ja käyminen alkaisi rauhallisesti. (Enari & Mäkinen, 2014, s. 148)

3.5 Taloudelliset vaikutukset

Mahdollisimman tehokas jäähdytys tarkoittaa yleensä myös mahdollisimman vähäistä vedenkulutusta. Eri jäähdytysmenetelmillä jäähdytykseen kuluva ajasta voidaan vertailua varten arvioida myös keskimääräinen vedenkulutus. Lämmön talteenotto jäähdytyksen aikana on suositeltavaa. Lähes jokaisessa panimossa jäähdytykseen käytetty vesi otetaan talteen erilliseen kuumavesisäiliöön energian ja veden säästämiseksi. Opetuspanimossakin jäähdytysvettä voi aivan hyvin käyttää esimerkiksi pesuliuosten valmistamiseen tai välineiden ja pintojen esihuuhteluun.

3.6 Jäähdytysmenetelmät ja välineet

Opinnäytetyössä koekeittojen jäähdytysmenetelmiä verrataan käyttämällä laitteen omaa jäähdytysvaippaa, upotettavaa immersiojäähdytintä sekä yhdistämällä molemmat

menetelmät. Koska tiedetään vierteen liikuttamisen tehostavan lämmönsiirtoa, kokeillaan myös vierrettä kierrättää jäähdytyksen aikana laitteen pumpulla. Vierteen sekoittaminen ei ole kuitenkaan suotavaa jäähdytyksen aikana hapettumisriskin vuoksi. Kaikissa tapauksissa jäähdytykseen käytetään kylmää vettä.

3.6.1 Laitteen jäähdytysvaippa

Braumeister PLUS-laitteisiin on integroitu oma jäähdytysvaippa, jolla vierre voidaan jäähdyttää. Pelkkää jäähdytysvaippaa käytettäessä, ilman vierteen liikuttamista, lämmönsiirto on kuitenkin heikkoa, koska pystysuora vaippa aiheuttaa vierteeseen eri lämpötiloissa olevia kerroksia, jotka heikentävät lämmön siirtymistä kattilan keskellä olevasta kuumemmasta vierteestä (Wagner 1994, s. 82). Viergeessä tapahtuva vapaa konvektio on kuitenkin niin pientä, että pelkästään se ei aiheuta tarpeeksi virtausta sekoittamaan vierrettä. Jäähdytysvaipan mitat ovat 25 cm x 103 cm x 0,3 cm ja jäähdytyspinta-alaa vaipalla on 0,25m². (Kuva 1)

Kuva 1. Braumeister 20 PLUS ilman lämpöeristettä, jotta vaippa näkyisi



3.6.1

3.6.2 Speidel immersiojäähdytin

Jäähdytykseen kokeillaan myös Speidelin valmistuttamaa immersiojäähdytintä, joka on tarkoitettu jäähdyttämään noin 25 litran erä jopa 20 minuutissa. Upotettavan immersiojäähdyttimen lämmönsiirto perustuu johtumiseen eli konduktioon. Lämpöenergia vierteestä johtuu jäähdyttimeen ja sen kautta johdetaan jäähdytysveden mukana viemäriin. Jäähdytysnopeuteen vaikuttavat jäähdytysveden lämpötila sekä virtausnopeus. Jäähdytin on halkaisijaltaan 11 mm ruostumatonta teräsputkea, jonka sisähalkaisija on 9 mm. Jäähdytyskierukan kokonaishalkaisija on 19 cm ja korkeus: 46,4 cm. Jäähdytyspinta-alaa immersiojäähdyttimellä on 0,29 m². (Kuva 2)

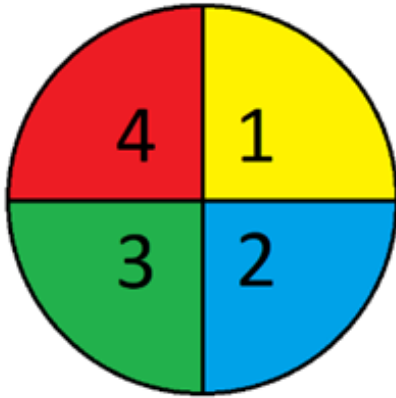
Kuva 2. Speidel immersiojäähdytin



4 Kokeellinen osuus

Tässä osuudessa esitetään jokaisen Braumeisterin koemäskäyksen lämpötilat lämpötila-aika-diagrammeilla. Kokeitot suoritettiin peräkkäisinä päivinä alkaen maanantaina 14.12.2020. Lämpötilaa mitattiin mäskikakusta neljästä eri sektorista noin 11 cm syvyydeltä, joka oli mäskäyksen aikana mäskikakun suurpiirteinen keskikohta. (Kuva 3, 4, 5) Mittaussektorit kuvassa vastaavat värityksiltään diagrammien mittauspisteiden käyrien väritystä. Mittaus tehtiin viiden minuutin välein. Mäskikakusta mitatuissa lämpötiloissa ei havaittu merkittäviä heittoja. Tästä syystä lopullisten käyrien laatimiseen käytettiin mäskikakun sektoreiden keskimääräistä lämpötilaa, jota verrattiin laitteen oman lämpötila-anturin antamaan arvoon. Käyriä vertaamalla voidaan huomata laitteiden välillä käyttäytymisen mahdolliset erot.

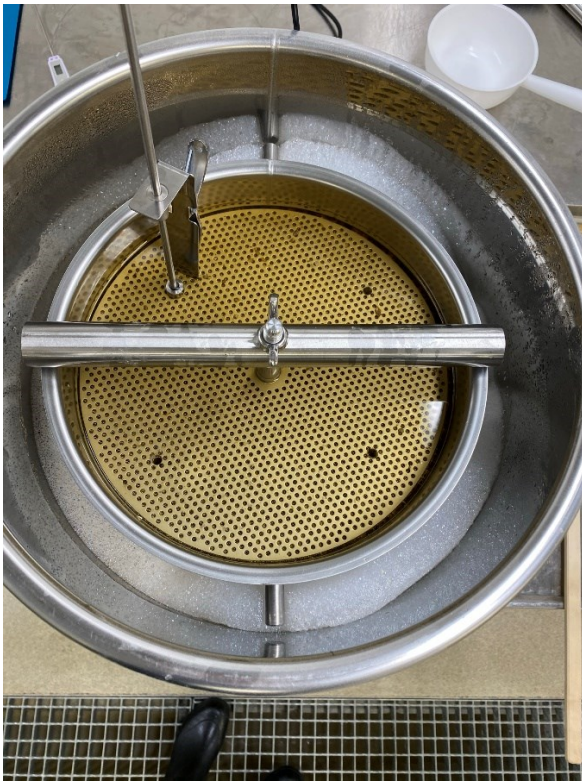
Kuva 3. Mäskikakun sektoreiksi jaetut mittauspisteet



Kuva 4. Lämpötilamittaus mäskikakusta ensimmäisestä sektorista



Kuva 5. Yläritilään poratut mittauspisteet



Lopuksi esitetään jäähdytyskokeiden tulokset. Tulokset esitetään myös lämpötila-aika-diagrammeina jäähdytysnopeuden havainnollistamiseksi. Jäähdytyksissä lämpötilaa seurattiin laitteen anturin antamasta arvosta, joka merkittiin ylös kahden minuutin välein. Lisäksi laskettiin veden keskikulutukset jokaisen jäähdytysmenetelmän osalta ja tulokset esitetään palkkikaaviona. Mäskikakun lämpötilojen seurantaan olisi ollut parempi käyttää neljää erillistä lämpömittaria, joiden anturit olisi saanut olla koko mäskäyksen ajan omissa mittauspisteissään. Yhdellä mittarilla jokaisen mittauspisteen mittaus suoritettiin noin minuutin sisään, joten mäskäysohjelman lämmönnostojen aikana voi esiintyä lieviä lämpötilaeroja. Myös pumppauksen automaattisten taukojen aikana lämpötilalukema saattoi näyttää pienempää arvoa, koska silloin pohjalta ei virtaa antureille kuuminta vastusten juuri lämmittämää vierrettä.

4.1 Tutkimuskysymykset

Työn tutkimuskysymykset laadittiin mahdollisimman selviksi ja yksinkertaisiksi, jotta ne selvittäisivät mitä opinnäytetyössä tutkitaan ja miksi. Kun tutkimuskysymyksiin saadaan vastaukset, voidaan päätellä, onko opetuspanimolle hankittu laitteisto opetuskäyttöön sopiva. Mäskäyksessä keskitytään havaitsemaan mäskikakusta poikkeavuuksia lämpöjakautumisessa yksilöittäin ja vertaamalla niitä toisiinsa. Lisäksi halutaan löytää tehokkain menetelmä vierteenjähdytykseen hankituilla välineillä, jotta jäähdytys voitaisiin suorittaa nopeasti ja mutkattomasti ja lopputuote olisi laadullisesti hyvä.

Tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyössä halutaan löytää vastaus ovat:

- Esiintyykö laitteiden välillä eroja lämpötilakäyttäytymisessä?
- Havaittiinko laitteiden välillä lämpötilaeroja mäskäyksessä?
- Mikä on tehokkain tapa jäähdytykseen?

4.2 Koekeitoissa käytetty resepti

Resepti laadittiin tarkoituksella yksinkertaiseksi raaka-aineiden osalta, jotta koekeitto olisi helppo toistaa jokaisella laitteella mahdollisimman samankaltaisesti. Mäskäystaukoja reseptissä on neljä, jotta saataisiin enemmän dataa ja mahdolliset erot laitteiden välillä voitaisiin havaita helpommin (Kuva 6). Mäskäysohjelman ensimmäinen tauko on 10 minuutin proteolyysitauko, joka tapahtuu 52°C:ssa. Proteolyysitauon tarkoitus on pilkkoa maltaan proteiineja aminohapoiksi, joita hiiva käyttää ravinnokseen. Täysmallasolutta tehdessä proteolyysitauko ei kuitenkaan ole välttämätön, koska aminohappoja syntyy riittävästi sokeroitumistaukojenkin aikana. Käytettäessä korkeampiproteiinisia viljoja ohran lisänä kuten kauraa, proteolyysitauolla voidaan edesauttaa tulevaa mäskin siivilöintiä ja saavuttaa myös kirkkaampi lopputulos. Tässä tapauksessa proteolyysitauko on sisällytetty mäskäysohjelmaan vain datan saamisen vuoksi.

Ensimmäinen varsinainen sokeroitumistauko pidetään beta-amylaasin optimaalalueella 65°C:ssa ja sen kesto on 30 minuuttia. Beta-amylaasi pilkkoo suoraketjuisten tärkkelysketjujen päistä maltoosia, joka on täysin käymiskelpoinen sokeri. Toinen 30 minuutin sokeroitumistauko

pidetään 72°C:ssa, jossa alfa-amylaasi pilkkoo monimutkaisempia tärkkelysketjuja dekstriineiksi, joita hiiva ei kykene täysin hyödyntämään. Tämän tauon pääasiallinen tarkoitus on tuoda olueeseen täyteläisyyttä.

Viimeinen tauko on niin kutsuttu ulosmäskäys, jolla mäskäysprosessi lopetetaan. Tauko pidetään 78°C:ssa 10 minuuttia, jolloin entsyymiaktiivisuus lakkaa. Tauon pääasiallinen tarkoitus on helpottaa siivilöintiä sekä parantaa uutesaantia korkeamman lämpötilan vaikutuksella sokereiden viskositeettiin (Sysilä, 1997, s. 83).

Mittauskokeet suoritettiin käyttämällä oikeaa reseptiä, jotta kokeet vastaisivat mahdollisimman hyvin tosielämän tilannetta. Valmistaja suosittelee 20-litran laitteistolle enintään 6 kg mallasmäärää, jolloin maltaista saadaan parhaiten liukenemaan halutut sokerit vierteeseen (Speidel, nd.). Liian suuri mallasmäärä pakkautuu liian tiukaksi eikä niillä ole tilaa liikkua riittävästi mallaspiipussa. Tällöin mäskäys ei ole tehokasta. Lämpötilakäyttäytymiseen vaikuttavat myös mäskin viskositeetti, kiintoainepitoisuus ja muut vähemmän mäskin lämpökapasiteettiin vaikuttavat tekijät.

Myös jäähdytyskokeisiin vaikuttavat samat tekijät kuin tosielämässä. Pelkkää vettä jäähdyttämällä olisi liian moni tekijä jäänyt huomioimatta. Esimerkiksi jäähdytyspinnoille mahdollisesti muodostuva rupa ja pohjalle laskeutunut humala voivat vaikuttaa jäähdytysprosessiin.

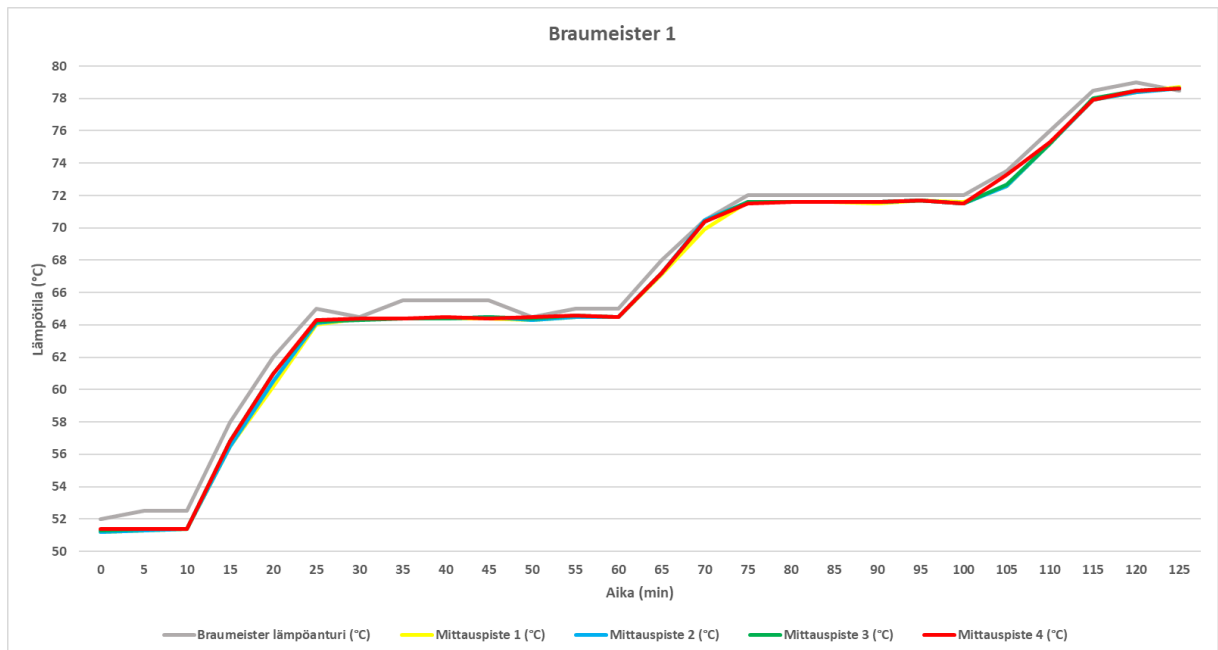
Kuva 6. Opinnäytetyössä käytettävä resepti

| Resepti | |
|-----------------------|----------------------------|
| 25 l | Vesi |
| 5 kg | Pale Ale mallas |
| 0,5 kg | Caramel 30 mallas |
| Mäskäysohjelma | |
| 10 min | 52 °C |
| 30 min | 65 °C |
| 30 min | 72 °C |
| 10 min | 79 °C |
| 3 l | Huuhteluvesi 79 °C |
| Keitto | |
| 60 min | Azacca humalapelletti 30 g |
| 5 min | Azacca humalapelletti 50 g |
| | Jäähdytys 25 °C:een |
| 11,5g | Safale US-05 hiiva |

4.3 Braumeister 1 mäsikäys

Koko mäsikäysohjelman suorittamiseen kului aikaa 125 minuuttia. Laatuun merkittäviä lämpötilaheittoja ei havaittu ja mäsikakun lämpötilat olivat tasaisia. Havaittavia heittoja syntyi pääasiassa silloin, kun mittaus tapahtui mäsikäystaukojen välisien lämpötilanostojen aikana. Tällöin lämpötila saattoi nousta mittauspisteiden vaihdon aikana. Ensimmäisessä koekeittämissä mittauspisteiden vaihtojen välillä lämpötilanousut saattoivat olla suuremmat johtuen pienistä inhimillisistä mittausteknisistä eroista, jotka vakioituivat useamman mittauksen jälkeen. Opetuspanimon sisälämpötila oli noin 23°C. Mittauspisteiden ja laitteen lämpöanturin keskimääräinen lämpötilaero prosentteina oli 1,04 %. (Kuva 7)

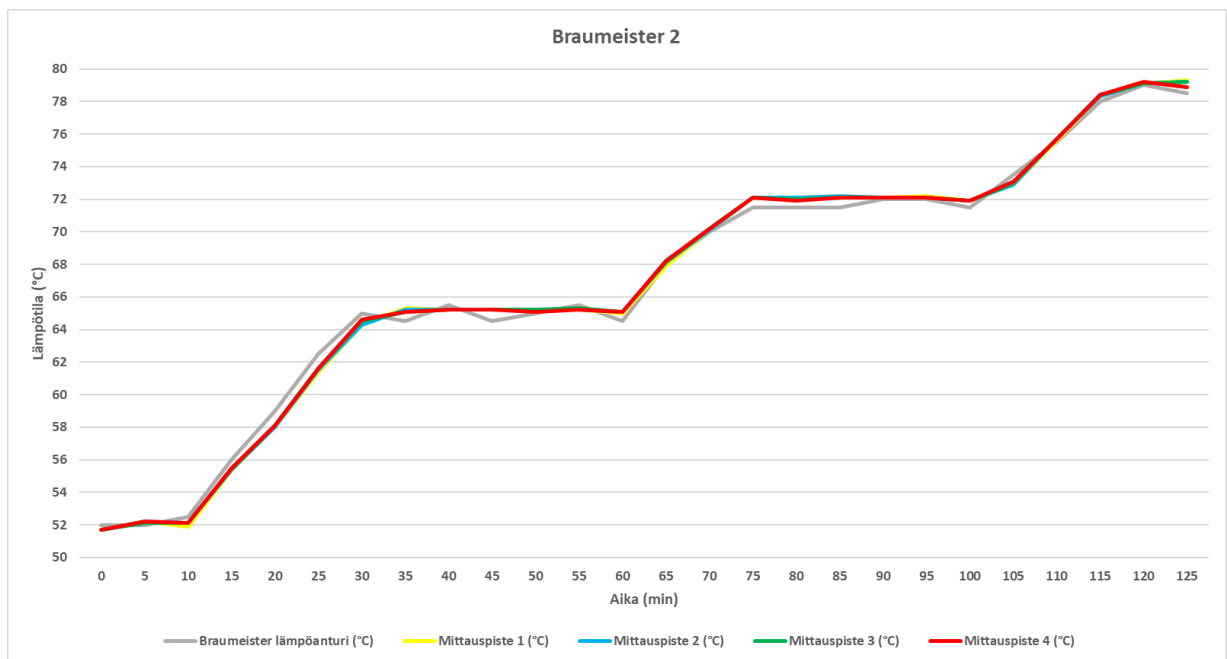
Kuva 7. Braumeister 1 mäsikäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen



4.4 Braumeister 2 mäsikäys

Mäsikäysohjelmaan kului toisellakin Braumeisterilla sama 125 minuuttia. Mittauspistettä vaihtaessa kolmannessa mittauspisteessä mäski tuntui huomattavasti muita mittauspisteitä tiiviimmältä, mutta sillä ei ollut havaittavaa vaikutusta tuloksiin. Opetuspanimon sisälämpötila oli noin 23,5°C. Mittauspisteiden ja laitteen lämpöanturin keskimääräinen lämpötilaero prosentteina oli 0,66 %. (Kuva 8)

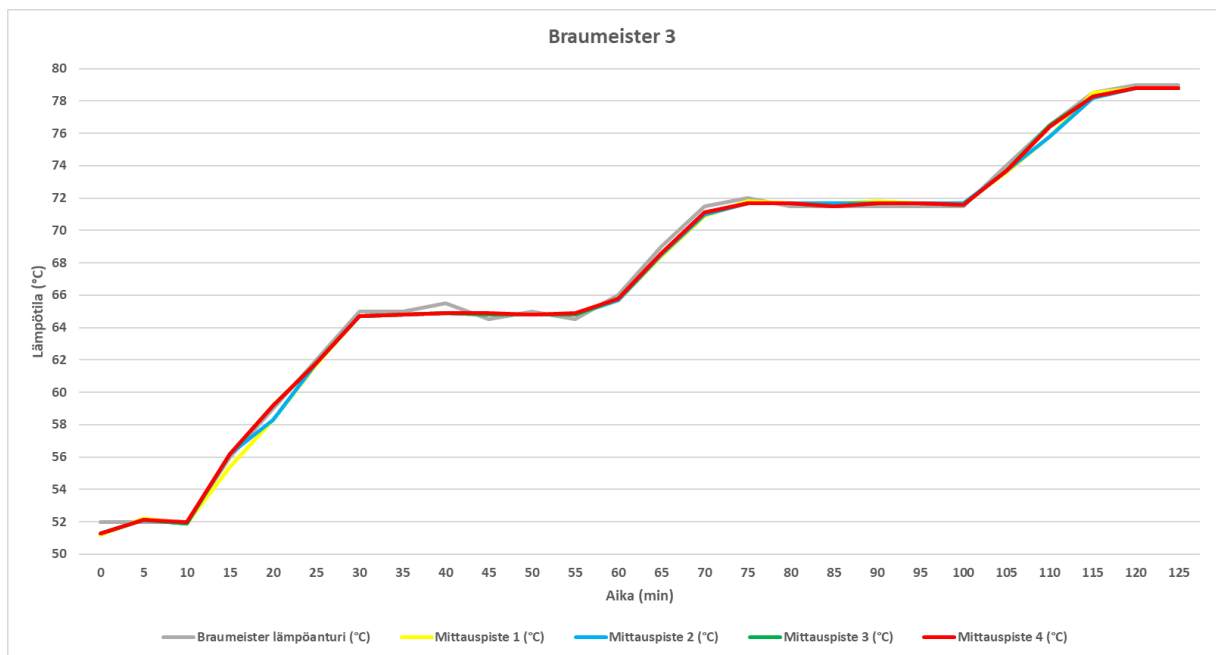
Kuva 8. Braumeister 2 mäsikäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen



4.5 Braumeister 3 mäsikäys

Kolmannella Braumeisterillakin mäsikäysohjelmaan kului 125 minuuttia. Ensimmäisessä mittauspisteessä mäski tuntui hieman tiiviimmältä kuin muissa. Tämä ei aiheuttanut havaittavaa vaikutusta lämpötilaheittoihin. Opetuspanimon sisälämpötila oli noin 23,5°C. Mittauspisteiden ja laitteen lämpöanturin keskimäärinen lämpötilaero prosentteina oli 0,41 %. (Kuva 9)

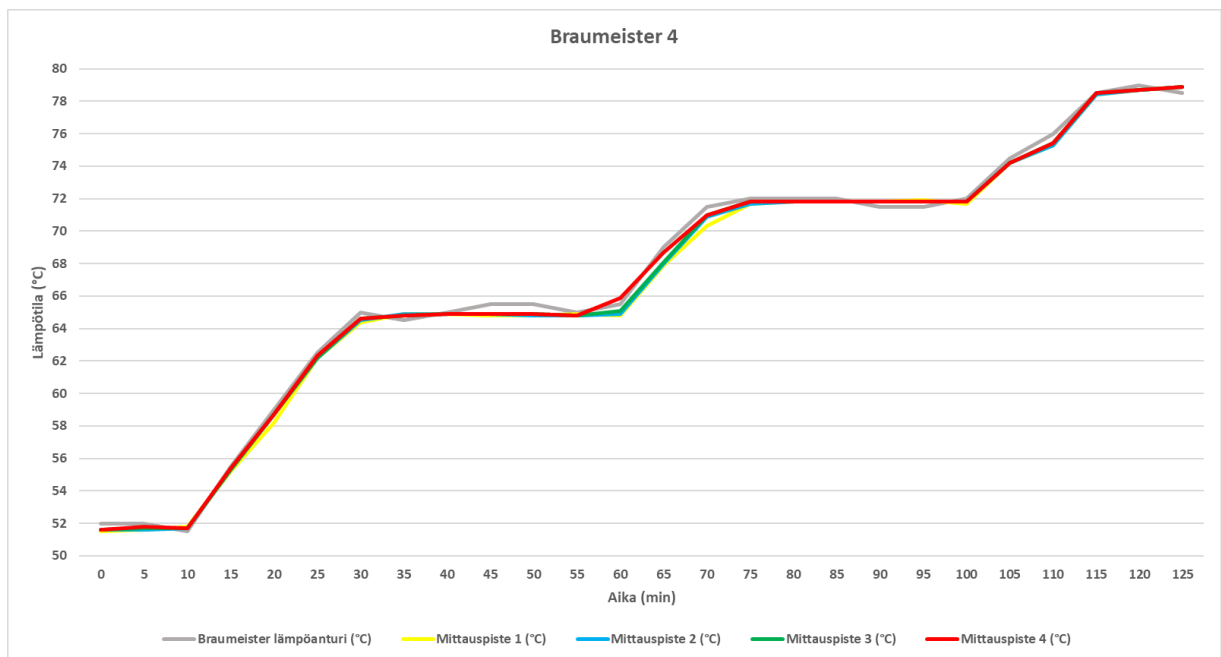
Kuva 9. Braumeister 3 mäsikäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen



4.6 Braumeister 4 mäsikäys

Mäskäykseen kulunut aika neljännelläkin Braumeisterilla oli 125 minuuttia. Mäskissä ei havaittu eroja tiiviyden osalta mittauspisteiden välillä. Opetuspanimon sisälämpötila oli noin 23,5°C. Mittauspisteiden ja laitteen lämpöanturin keskimääräinen lämpötilaero prosentteina oli 0,54 %. (Kuva 10)

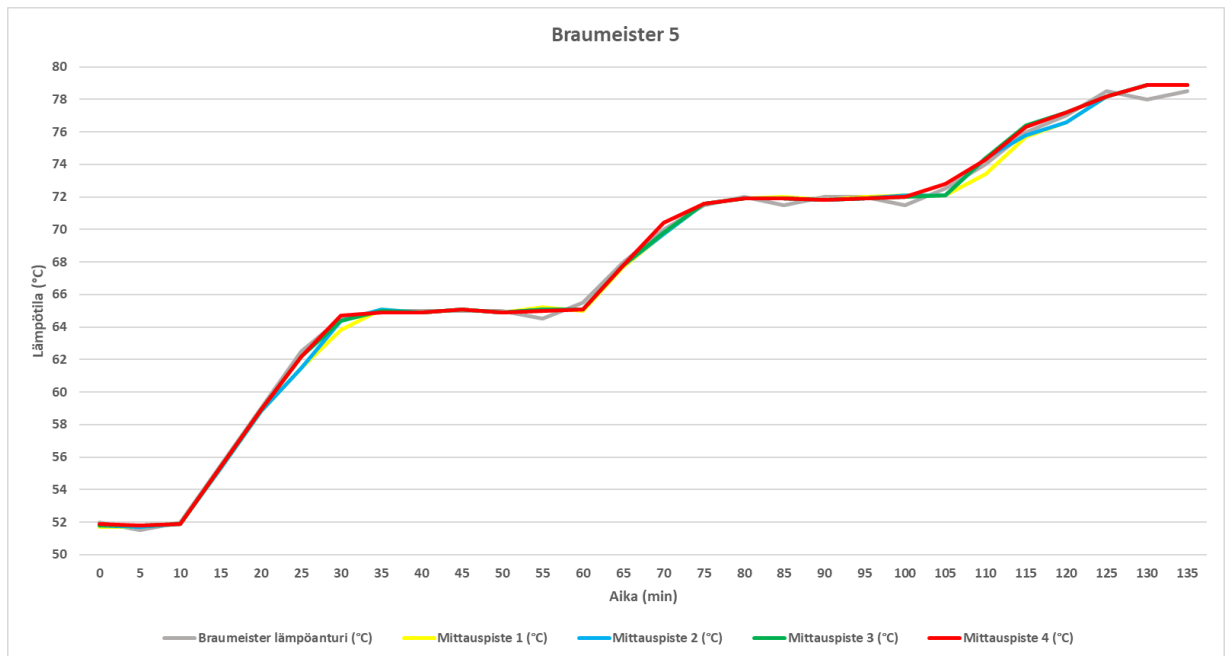
Kuva 10. Braumeister 4 mäsikäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen



4.7 Braumeister 5 mäsikäys

Viidennellä Braumeisterilla mäsikäysohjelman läpivientiin kului 135 minuuttia, joka on 10 minuuttia enemmän kuin muilla. Muiden laitteiden käyriin vertaamalla nähdään, että lämpötilakäyttämisen erot tapahtuivat viimeisen lämmönoston aikana (Kuva 12). Opetuspanimon sisälämpötila oli viidentenä päivänä 24°C. Mittauspisteiden ja laitteen lämpöanturin keskimäärinen lämpötilaero prosentteina oli mäsikäyksistä pienin 0,36 %. (Kuva 11)

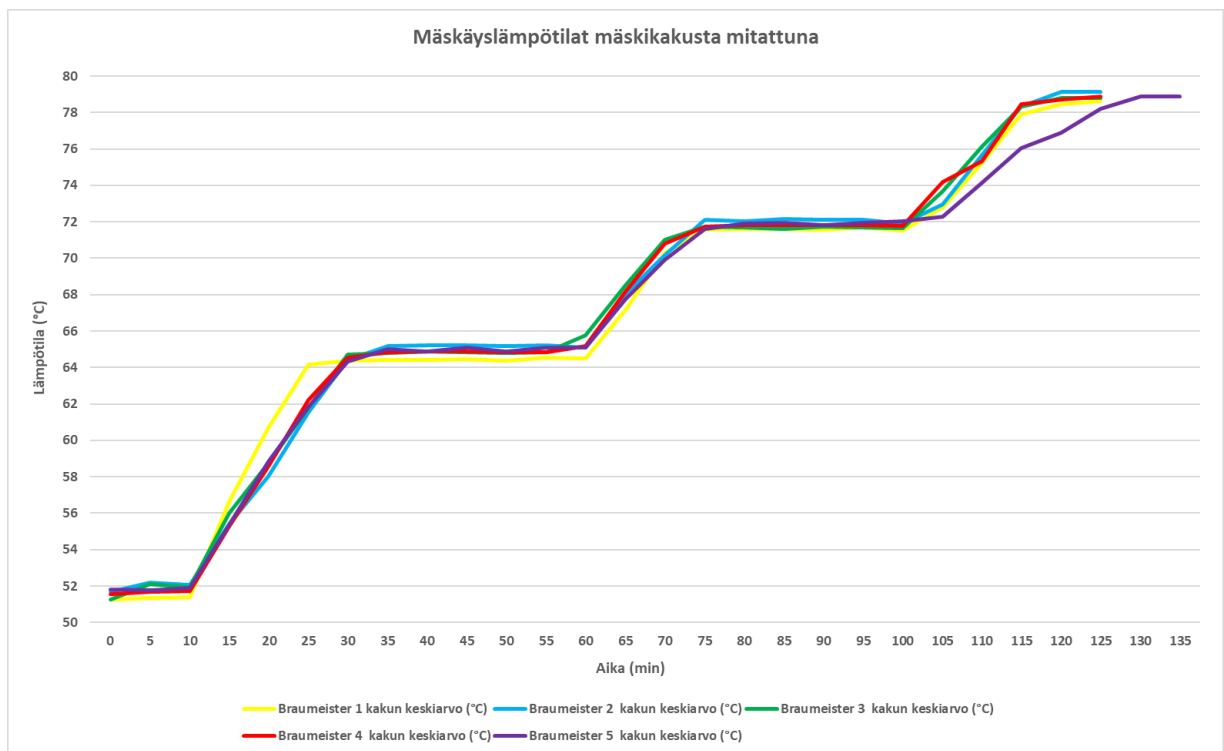
Kuva 11. Braumeister 5 mäsikäysohjelman lämpötilakäyttämisen



4.8 Braumeister laitteistojen välinen vertailu

Koska mäsikakun mittauspisteiden välillä ei ollut merkittäviä eroja lämpötiloissa, voidaan niiden keskiarvoa käyttää arvoina laitteita toisiinsa verratessa. Jokaisen laitteen käyrät esitetään kuvassa 12, josta havaitaan selvemmin Braumeister 5:n viimeisessä lämmönnostossa esiintynyt poikkeama. Muutoin käyrät kulkevat 2°C sisällä toisistaan, jota pidetään merkityksettömänä erona, kun mäsikäystauot pysyvät kuitenkin asetetussa lämpötilassa yhden asteen sisällä.

Kuva 12. Mäsikäysohjelman lämpötilakäyttäytyminen mittauspisteiden lämpötilojen keskiarvoa käyttämällä

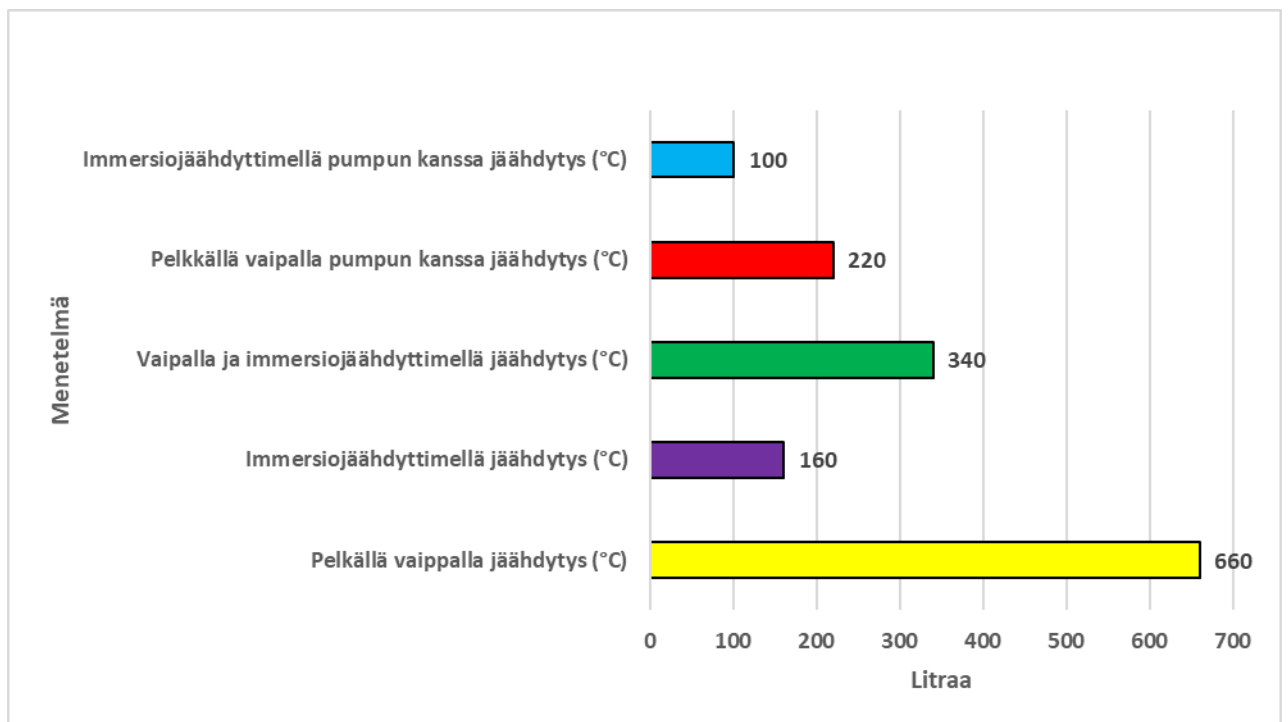


5 Jäähdytyskokeet

Jäähdytykset suoritettiin jokaiselle keitolle eri menetelmin ja verrattiin, miten nopea ja helppo mikäkin menetelmä on. Keskimääräinen vedenkulutus arvioitiin jo edellisellä viikolla. Virtausnopeus mitattiin päästämällä kylmää vettä molemmista käytettävistä hanoista sekä immersiojäähdyttimen läpi että laitteen vaipan läpi kahden litran mitta-astiaan aikaa ottaen. Saaduista tuloksista laskettiin karkea keskiarvo, jota käytettiin vedenkulutuksen vertailuun.

Vedenkulutuksista laadittiin palkkikaavio havainnollistamaan vedenkulutusten eroja (Kuva 13). Jäähdytyksen aikana lämpötila otettiin ylös kahden minuutin välein. Vierre pyrittiin jäähdyttämään 25°C:een, mutta osalla menetelmistä jäähdytys lopetettiin 30°C:ssa, koska lämmönsiirto hidastui niin paljon, että menetelmää voitiin pitää liian epäedullisena nopeuden ja vedenkulutuksen osalta. Jäähdytysmenetelmissä, joissa apuna käytettiin pumppua, pumppu käynnistyy automaattisesti, kun lämpötila laskee 88°C:een. Pumpun käytöllä on kuitenkin myös merkittäviä haittavaikutuksia, jotka täytyy ottaa huomioon pumpun käyttöä harkittaessa. Pumpun käyttö altistaa kuuman vierteen hapettumiselle, jota tulisi välttää. Jokaisesta jäähdytysmenetelmästä laadittiin lämpötila-aika-käyrä tulosten vertailua helpottamaan (Kuva 14).

Kuva 13. Vedenkulutus eri jäähdytysmenetelmillä



5.1 Laitteen vaipalla jäähdytys

Pelkkää laitteen omaa vaippaa käyttämällä vierrettä liikuttamatta jäähdytyksen kului aikaa 66 minuuttia 30°C:een, jonka jälkeen jäähdytys päätettiin keskeyttää. Koska vierrettä ei liikutettu millään tavalla, se jäähdyi epätasaisesti ja lämmönsiirto heikentyi. Jäähdytyksen jälkeen vierrettä sekoittamalla lämpötila asettui kuitenkin 17°C:een. Tällä menetelmällä vettä kului jäähdytykseen noin 660 litraa. Jäähdytysvaipan yläreuna on kattilan pohjasta

mitattuna 32,5 cm korkeudella ja 20 litran merkki vasta 22 cm korkeudella. Jäähdytysvaipan alareuna on 7,5 cm korkeudella, joten 20 litran erillä jäähdytyspinta-alasta peittyy vain 58 prosenttia. Vierrettä täytyisi olla ainakin 27 litraa, jotta koko jäähdytysvaippa peittyisi ja lämmönsiirto olisi tällä menetelmällä mahdollisimman tehokas.

5.2 Immersiojäähdyttimellä jäähdytys

Pelkkää immersiojäähdytintä käyttämällä vierteen jäähdyttäminen 25°C:een kesti 17 minuuttia. Sekoituksen jälkeen ei havaittu muutosta lämpötilassa. Tänä aikana vedenkulutus oli noin 160 litraa. Jäähdytys-elementistä 20 litran vierremäärään peittyi arviolta 75 prosenttia.

5.3 Laitteen vaipalla sekä immersiojäähdyttimellä jäähdytys

Käyttämällä vaippaa sekä immersiojäähdytintä jäädytykseen kului 34 minuuttia 30°C:een, jonka jälkeen jäähdytys keskeytettiin. Sekoituksen jälkeen lämpötila asettui 11°C:een. Molempia jäähdytys-elementtejä käytettäessä joudutaan ottamaan käyttöön toinen pari jäähdytysletkuja, jolloin työ monimutkaistuu ja panimossa liikkuminen hankaloituu, kun letkuja kulkee lattialla useammalta seinältä.

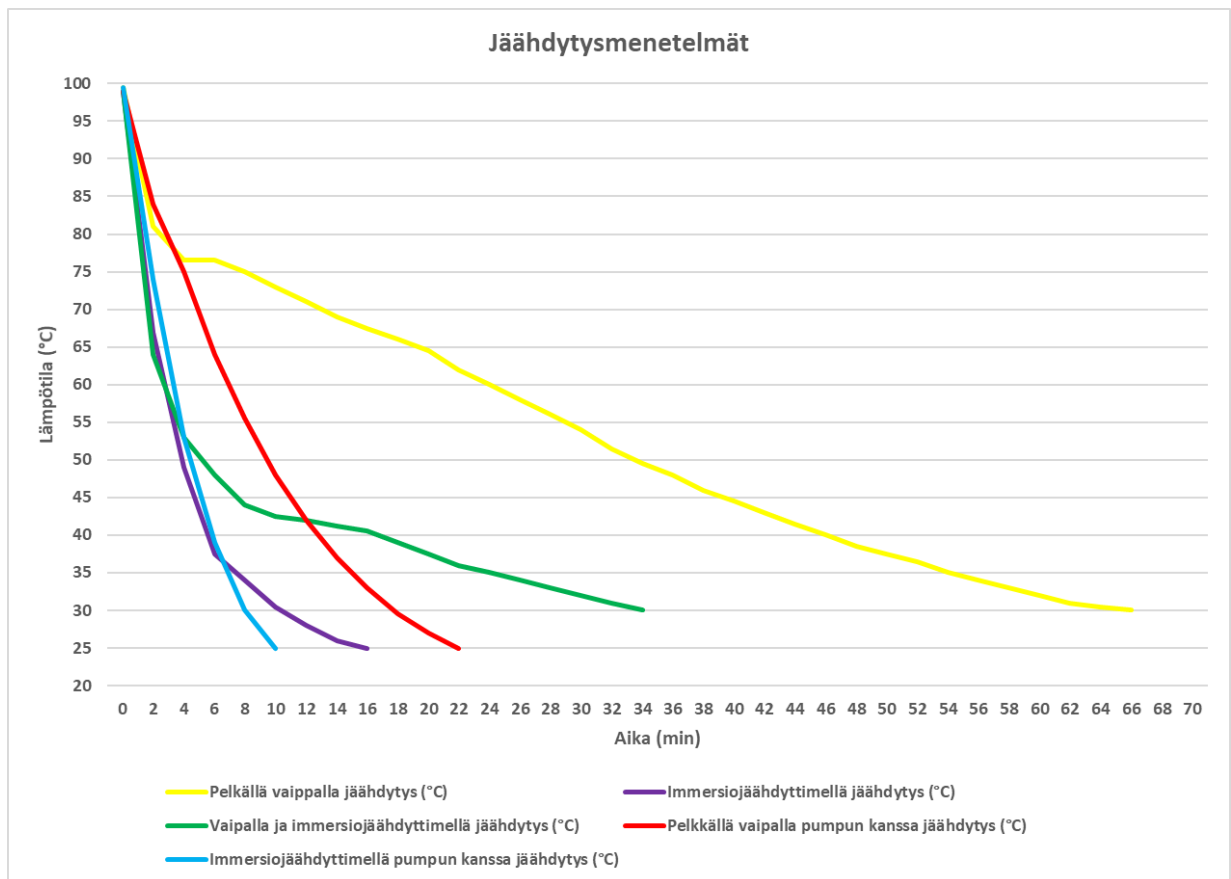
5.4 Vaippaa ja pumppua käyttämällä jäähdytys

Yhdistämällä vierteen liikuttaminen laitteen omalla pumpulla vaippajäähdytykseen jäähdytti vierteen 25°C:een 22 minuutissa. Vedenkulutus 22 minuutin aikana noin 160 litraa. Vaikka pumpun käyttö nopeuttaa jäähdytystä, ei sitä voi suositella hapettumisriskin vuoksi.

5.5 Immersiojäähdytintä ja pumppua käyttämällä jäähdytys

Upotettava immersiojäähdytin ja vierteen kierrätys pumpulla jäähdytti vierteen kymmenessä minuutissa 25°C:een. Vedenkulutus oli noin 130 litraa. Menetelmä oli nopein, mutta, pumpun käyttöä ei suositella laadullisista syistä, vaikka se todistaa, että jäähdytettävän nesteen liikuttaminen nopeuttaa lämmönsiirtoa.

Kuva 14. Jäähdytysmenetelmien nopeudesta laaditut käyrät



6 Johtopäätöksen ja pohdinta

Opinnäytetyön kokeellisen osuuden tulosten pohjalta ei voida tehdä johtopäätöksiä, että jokin laitteista olisi muita huonompi, mutta tulosten perusteella jatkotutkimuksiin voisi olla tarvetta. Tutkimuskysymyksiin saatiin vastaukset. Laitteiden välillä havaittiin eroja lämpötilakäyttäytymisessä. Mäskikakusta ei havaittu mitään merkittäviä lämpötilaheittoja. Valmistamalla verrokkituotteet, joita analysoidaan laboratoriossa ja aistinvaraisesti, voisi laitteiden mahdollisista eroista tehdä varmemmat johtopäätökset, onko erot tuotteissa merkittäviä opetustarkoitukselle. Jäähdytyskokeissa saatiin haluttu lopputulos, jossa menetelmien erot tulivat esille ja opetuspanimon laitteilla paras jäähdytysmenetelmä löydettiin. Eräkoko suurentamalla jopa 27 litraan jäähdytysalustien koko potentiaali saataisiin käyttöön ja erot todennäköisesti hieman pienenevät.

6.1 Mäskäyksen lämpötilaseuranta

Mäskäyksien aikana mäskikakusta mittaamalla ei havaittu merkittäviä lämpötilaheittoja. Valmistajan suosittelema mallasmäärä ja käytetyt maltaat eivät aiheuttaneet havaittavaa paakkuuntumista tai ongelmia vierteen virtauksessa mallaspiipussa. Mäskäysohjelman aikana laitteet 1–4 käyttäytyivät samanlailla mäskäyslämpöjen osalta, mutta Braumeister 5:ssä havaittiin hitaampaa lämmön nousua ulosmäskäyslämpöön noustessa. Laitteistoerojen todistamiseksi tarvittaisiin useampi toisto, jotta nähtäisiin, toistuuko vastaavanlainen käyttäytyminen. Kokeet antavat kuitenkin syytä Braumeister 5:n tarkempaan huomiointiin ja tarkkailuun tulevissa mäskäyksissä. Jos laitteen vastaava käyttäytyminen myöhemmin todettaisiin varmaksi, kannattaisi sen käyttöä välttää tärkeämmissä kokeissa, jossa eri laitteilla valmistettujen keittojen lopputulokset täytyvät olla verrattavissa toisiinsa. Mikäli laitteiden ero todetaan poikkeavan valmistajan toleransseista, kannattaa olla yhteydessä myyjään tai valmistajaan. Hitaampi lämmön nousu 72–79°C välillä on pääosin tärkkelystä pilkkovien entsyymien optimilämpötilojen ulkopuolella, eikä tämän takia vaikuta negatiivisesti kuin prosessin pituuteen ajallisesti.

6.2 Jäähdytyksen optimointi

Jäähdytysmenetelmistä parhaaksi todettiin pelkällä immersiojäähdyttimellä jäähdytys. Jäähdytykseen kulunut aika 17 minuuttia on alle valmistajan ilmoittaman 20–25 minuutin. Tällä menetelmällä jäähdytyksen arvioitu vedenkulutus oli vain 160 litraa. Vierrettä voidaan kierrättää laitteen pumpulla jäähdytyksen aikana, jolloin aikaa jäähdytykseen kului vain 10 minuuttia, mutta tätä ei suositella hapettumisriskin vuoksi. Vettä kului 10 minuutissa arviolta 100 litraa. Pumpun käyttö jäähdytyksen aikana myös sekoittaa vierteessä olevat humalan ja maltaan jäämät. Laitteen jäähdytysvaippa todettiin jäähdytysteholtaan heikoksi noin 20 litran eriä valmistaessa, koska vaipasta 42 prosenttia jäi vierteen pinnan yläpuolelle. Jos erä koko kasvatetaan noin 27 litraan, vaipan jäähdytyspotentiaali tulee kokonaan käyttöön. Siltikin immersiojäähdyttimen suurempi lämmönsiirtopinta-ala mahdollistaa tehokkaamman jäähdytyksen. Molempien jäähdytys-elementtien yhtäaikainen käyttö ennako-odotuksista poiketen ei toiminut toivottavalla tavalla. Jäähdytysnopeudesta ei saatu todellista tulosta, koska lämpöanturi näytti todellisen 11°C:n lämpötilan vasta vierteen sekoituksen jälkeen. Joko vierre jäähtyi liian nopeasti kerrostumalla heikentäen lämmönsiirtoa tai anturi oli

peittynyt laskeutuneella kiintoaineella. Joka tapauksessa, molempien jäähdytyselmenttien käyttö voi olla turhan vaivalloista sekä liian nopea jäähdytys voi aiheuttaa jopa ylimääräistä kiirehtimistä jäähdytyksen aikana hoidettavien toimien kanssa. Vaikka pelkkä immersiojäähdytin ei ollut nopein, on se suositeltavin, koska se on kuitenkin nopea, vaivaton ja laadullisesti riskittömin.

Lähteet

- Ahmed, J., & Rahman, M. S. (2012) *Handbook of food process design*. (ss. 329–331). John Wiley & Sons, Incorporated. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=871485>
- Boulton, C. (2013). *Encyclopaedia of Brewing*. (s. 397). John Wiley & Sons, Incorporated. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=1204057>
- Briggs, D.E., Hough, P.J., Stevens, S., Young, T.W. (1981) *Malting and Brewing Science Vol. 1, Malt and Sweet Wort*. (2. p.). Chapman & Hall.
- Enari, T-M. & Mäkinen, V. (2014). *Panimotekniikka*. Oy Panimolaboratorio-Bryggerilaboratorium AB.
- Fellows, P.J. (2009). *Food Processing Technology : Principles and Practice*. (3. p.). Woodhead Publishing Ltd.
- Fix, G. (1989). *Principles of Brewing Science*. Brewers Publications.
- Hough, P.J., Briggs, D.E., Stevens, S., Young, T.W. (1982) *Malting and Brewing Science Vol. 2, Hopped Wort and Beer*. (2. p.). Chapman & Hall.
- Kellershohn, J., Russell, I., & Stewart, G. (2008). *Beer : A Quality Perspective*. (s.169). Elsevier Science & Technology. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=403902>
- Noonan, G-J. (1986) *Brewing Lager Beer*. Brewers Publications.
- Smart, C. (2019). *The Craft Brewing Handbook : A Practical Guide to Running a Successful Craft Brewery*. (s. 104). Elsevier Science & Technology. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/detail.action?docID=5978779>

Speidel. (n.d). *20-litre Braumeister PLUS*. Speidel Tank- und Behälterbau GmbH. Haettu 14.10.2020 osoitteesta https://shop.speidels-braumeister.de/en/20-litre-braumeister/20-litre-braumeister-plus1?new_lang=en

Sysilä, I. (1997) *Small-scale Brewing*. Ilkka Sysilä.

Wagner, W. (1994) *Lämmönsiirto*. (O. Ranta, käänt.; 2. p.). Painatuskeskus Oy. (Alkuperäinen teos julkaistu 1988)

Liite 1: Braumeister 1 mäsikäslämpötaulukko

| Aika (min) | Braumeister lämpöanturi (°C) | Mittauspiste 1 | Mittauspiste 2 | Mittauspiste 3 | Mittauspiste 4 | Mäskikakun | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | | | keskiarvo (°C) | Lämpötilaheitto prosentteina | Itseisarvot (%) |
| 0 | 52 | 51,2 | 51,2 | 51,3 | 51,4 | 51,28 | 1,41 | 1,41 |
| 5 | 52,5 | 51,3 | 51,3 | 51,4 | 51,4 | 51,35 | 2,24 | 2,24 |
| 10 | 52,5 | 51,4 | 51,4 | 51,4 | 51,4 | 51,40 | 2,14 | 2,14 |
| 15 | 58 | 56,5 | 56,5 | 56,8 | 56,8 | 56,65 | 2,38 | 2,38 |
| 20 | 62 | 60,2 | 60,5 | 61 | 61 | 60,68 | 2,18 | 2,18 |
| 25 | 65 | 64 | 64,1 | 64,2 | 64,3 | 64,15 | 1,33 | 1,33 |
| 30 | 64,5 | 64,4 | 64,4 | 64,3 | 64,4 | 64,38 | 0,19 | 0,19 |
| 35 | 65,5 | 64,4 | 64,4 | 64,4 | 64,4 | 64,40 | 1,71 | 1,71 |
| 40 | 65,5 | 64,4 | 64,4 | 64,4 | 64,5 | 64,43 | 1,67 | 1,67 |
| 45 | 65,5 | 64,4 | 64,5 | 64,5 | 64,4 | 64,45 | 1,63 | 1,63 |
| 50 | 64,5 | 64,3 | 64,3 | 64,4 | 64,5 | 64,38 | 0,19 | 0,19 |
| 55 | 65 | 64,5 | 64,5 | 64,6 | 64,6 | 64,55 | 0,70 | 0,70 |
| 60 | 65 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,5 | 64,50 | 0,78 | 0,78 |
| 65 | 68 | 67,1 | 67,2 | 67,2 | 67,2 | 67,18 | 1,23 | 1,23 |
| 70 | 70,5 | 69,9 | 70,5 | 70,4 | 70,4 | 70,30 | 0,28 | 0,28 |
| 75 | 72 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,5 | 71,58 | 0,59 | 0,59 |
| 80 | 72 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,60 | 0,56 | 0,56 |
| 85 | 72 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,60 | 0,56 | 0,56 |
| 90 | 72 | 71,5 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,58 | 0,59 | 0,59 |
| 95 | 72 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,70 | 0,42 | 0,42 |
| 100 | 72 | 71,6 | 71,5 | 71,5 | 71,5 | 71,53 | 0,66 | 0,66 |
| 105 | 73,5 | 72,6 | 72,6 | 72,7 | 73,3 | 72,80 | 0,96 | 0,96 |
| 110 | 76 | 75,2 | 75,2 | 75,2 | 75,3 | 75,23 | 1,03 | 1,03 |
| 115 | 78,5 | 77,9 | 77,9 | 78 | 77,9 | 77,93 | 0,74 | 0,74 |
| 120 | 79 | 78,4 | 78,4 | 78,5 | 78,5 | 78,45 | 0,70 | 0,70 |
| 125 | 78,5 | 78,7 | 78,6 | 78,6 | 78,6 | 78,63 | -0,16 | 0,16 |
| | | | | | | | | 1,04 |

Liite 2: Braumeister 2 mäsikäslämpötaulukko

| Aika (min) | Braumeister lämpöanturi (°C) | Mittauspiste 1 | Mittauspiste 2 | Mittauspiste 3 | Mittauspiste 4 | Mäskikakun | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | | | keskiarvo (°C) | Lämpötilaheitto prosentteina | Itseisarvot (%) |
| 0 | 52 | 51,7 | 51,7 | 51,7 | 51,7 | 51,70 | 0,58 | 0,58 |
| 5 | 52 | 52,2 | 52,2 | 52,1 | 52,2 | 52,18 | -0,34 | 0,34 |
| 10 | 52,5 | 51,9 | 52,1 | 52,1 | 52,1 | 52,05 | 0,86 | 0,86 |
| 15 | 56 | 55,4 | 55,4 | 55,4 | 55,5 | 55,43 | 1,04 | 1,04 |
| 20 | 59 | 58 | 58 | 58,1 | 58,1 | 58,05 | 1,64 | 1,64 |
| 25 | 62,5 | 61,4 | 61,5 | 61,6 | 61,6 | 61,53 | 1,58 | 1,58 |
| 30 | 65 | 64,3 | 64,3 | 64,5 | 64,6 | 64,43 | 0,89 | 0,89 |
| 35 | 64,5 | 65,3 | 65,2 | 65,1 | 65,1 | 65,18 | -1,04 | 1,04 |
| 40 | 65,5 | 65,2 | 65,2 | 65,2 | 65,2 | 65,20 | 0,46 | 0,46 |
| 45 | 64,5 | 65,2 | 65,2 | 65,2 | 65,2 | 65,20 | -1,07 | 1,07 |
| 50 | 65 | 65,2 | 65,2 | 65,2 | 65,1 | 65,18 | -0,27 | 0,27 |
| 55 | 65,5 | 65,2 | 65,2 | 65,3 | 65,2 | 65,23 | 0,42 | 0,42 |
| 60 | 64,5 | 65 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,08 | -0,88 | 0,88 |
| 65 | 68 | 67,9 | 68,1 | 68,1 | 68,2 | 68,08 | -0,11 | 0,11 |
| 70 | 70 | 70,1 | 70,1 | 70,2 | 70,2 | 70,15 | -0,21 | 0,21 |
| 75 | 71,5 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,10 | -0,83 | 0,83 |
| 80 | 71,5 | 72,1 | 72,1 | 72 | 71,9 | 72,03 | -0,73 | 0,73 |
| 85 | 71,5 | 72,2 | 72,2 | 72,1 | 72,1 | 72,15 | -0,90 | 0,90 |
| 90 | 72 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,10 | -0,14 | 0,14 |
| 95 | 72 | 72,2 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,13 | -0,17 | 0,17 |
| 100 | 71,5 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,90 | -0,56 | 0,56 |
| 105 | 73,5 | 72,9 | 72,9 | 73 | 73,1 | 72,98 | 0,72 | 0,72 |
| 110 | 75,5 | 75,6 | 75,7 | 75,7 | 75,7 | 75,68 | -0,23 | 0,23 |
| 115 | 78 | 78,3 | 78,3 | 78,4 | 78,4 | 78,35 | -0,45 | 0,45 |
| 120 | 79 | 79,1 | 79,1 | 79,1 | 79,2 | 79,13 | -0,16 | 0,16 |
| 125 | 78,5 | 79,3 | 79,2 | 79,2 | 78,9 | 79,15 | -0,82 | 0,82 |
| | | | | | | | | 0,66 |

Liite 3: Braumeister 3 mäsikäslämpötaulukko

| Aika (min) | Braumeister lämpöanturi (°C) | Mittauspiste 1 | Mittauspiste 2 | Mittauspiste 3 | Mittauspiste 4 | Mäskikakun | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | | | keskiarvo (°C) | Lämpötilaheitto prosentteina | Itseisarvot (%) |
| 0 | 52 | 51,2 | 51,3 | 51,3 | 51,3 | 51,28 | 1,41 | 1,41 |
| 5 | 52 | 52,2 | 52,1 | 52,1 | 52,1 | 52,13 | -0,24 | 0,24 |
| 10 | 52 | 51,9 | 51,9 | 51,9 | 52 | 51,93 | 0,14 | 0,14 |
| 15 | 56 | 55,4 | 56,2 | 56,2 | 56,2 | 56,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 59 | 58,3 | 58,3 | 59,2 | 59,2 | 58,75 | 0,43 | 0,43 |
| 25 | 62 | 61,7 | 61,8 | 61,8 | 61,8 | 61,78 | 0,36 | 0,36 |
| 30 | 65 | 64,7 | 64,7 | 64,7 | 64,7 | 64,70 | 0,46 | 0,46 |
| 35 | 65 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,80 | 0,31 | 0,31 |
| 40 | 65,5 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,90 | 0,92 | 0,92 |
| 45 | 64,5 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,9 | 64,83 | -0,50 | 0,50 |
| 50 | 65 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,80 | 0,31 | 0,31 |
| 55 | 64,5 | 64,8 | 64,8 | 64,8 | 64,9 | 64,83 | -0,50 | 0,50 |
| 60 | 66 | 65,7 | 65,7 | 65,8 | 65,8 | 65,75 | 0,38 | 0,38 |
| 65 | 69 | 68,4 | 68,5 | 68,6 | 68,6 | 68,53 | 0,69 | 0,69 |
| 70 | 71,5 | 70,9 | 71 | 71,1 | 71,1 | 71,03 | 0,67 | 0,67 |
| 75 | 72 | 71,8 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,73 | 0,38 | 0,38 |
| 80 | 71,5 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,70 | -0,28 | 0,28 |
| 85 | 71,5 | 71,7 | 71,7 | 71,5 | 71,5 | 71,60 | -0,14 | 0,14 |
| 90 | 71,5 | 71,8 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,73 | -0,31 | 0,31 |
| 95 | 71,5 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,7 | 71,70 | -0,28 | 0,28 |
| 100 | 71,5 | 71,7 | 71,7 | 71,6 | 71,6 | 71,65 | -0,21 | 0,21 |
| 105 | 74 | 73,6 | 73,7 | 73,7 | 73,7 | 73,68 | 0,44 | 0,44 |
| 110 | 76,5 | 75,8 | 75,8 | 76,5 | 76,4 | 76,13 | 0,49 | 0,49 |
| 115 | 78,5 | 78,5 | 78,2 | 78,3 | 78,3 | 78,33 | 0,22 | 0,22 |
| 120 | 79 | 78,8 | 78,8 | 78,8 | 78,8 | 78,80 | 0,25 | 0,25 |
| 125 | 79 | 78,8 | 78,8 | 78,8 | 78,8 | 78,80 | 0,25 | 0,25 |
| | | | | | | | | 0,41 |

Liite 5: Braumeister 5 mäsikäslämpötaulukko

| Aika (min) | Braumeister lämpöanturi (°C) | Mittauspiste 1 | Mittauspiste 2 | Mittauspiste 3 | Mittauspiste 4 | Mäskikakun | | |
|---------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | | | keskiarvo (°C) | Lämpötilaheitto prosentteina | Itseisarvot (%) |
| 0 | 52 | 51,7 | 51,8 | 51,8 | 51,9 | 51,80 | 0,39 | 0,39 |
| 5 | 51,5 | 51,7 | 51,7 | 51,8 | 51,8 | 51,75 | -0,48 | 0,48 |
| 10 | 52 | 51,9 | 51,9 | 51,9 | 51,9 | 51,90 | 0,19 | 0,19 |
| 15 | 55,5 | 55,3 | 55,3 | 55,4 | 55,4 | 55,35 | 0,27 | 0,27 |
| 20 | 59 | 58,8 | 58,8 | 58,9 | 58,9 | 58,85 | 0,25 | 0,25 |
| 25 | 62,5 | 61,5 | 61,5 | 62,2 | 62,2 | 61,85 | 1,05 | 1,05 |
| 30 | 64,5 | 63,8 | 64,4 | 64,4 | 64,7 | 64,33 | 0,27 | 0,27 |
| 35 | 65 | 65,1 | 65,1 | 65 | 64,9 | 65,03 | -0,04 | 0,04 |
| 40 | 65 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,90 | 0,15 | 0,15 |
| 45 | 65 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,10 | -0,15 | 0,15 |
| 50 | 65 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,9 | 64,90 | 0,15 | 0,15 |
| 55 | 64,5 | 65,2 | 65,1 | 65,1 | 65 | 65,10 | -0,92 | 0,92 |
| 60 | 65,5 | 65 | 65,1 | 65,1 | 65,1 | 65,08 | 0,65 | 0,65 |
| 65 | 68 | 67,7 | 67,8 | 67,8 | 67,8 | 67,78 | 0,33 | 0,33 |
| 70 | 70 | 69,7 | 69,7 | 69,8 | 70,4 | 69,90 | 0,14 | 0,14 |
| 75 | 71,5 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,6 | 71,60 | -0,14 | 0,14 |
| 80 | 72 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,90 | 0,14 | 0,14 |
| 85 | 71,5 | 72 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,93 | -0,59 | 0,59 |
| 90 | 72 | 71,8 | 71,8 | 71,8 | 71,8 | 71,80 | 0,28 | 0,28 |
| 95 | 72 | 72 | 71,9 | 71,9 | 71,9 | 71,93 | 0,10 | 0,10 |
| 100 | 71,5 | 72,1 | 72,1 | 72 | 72 | 72,05 | -0,76 | 0,76 |
| 105 | 72,5 | 72,1 | 72,1 | 72,1 | 72,8 | 72,28 | 0,31 | 0,31 |
| 110 | 74 | 73,4 | 74,4 | 74,4 | 74,3 | 74,13 | -0,17 | 0,17 |
| 115 | 76 | 75,7 | 75,8 | 76,4 | 76,3 | 76,05 | -0,07 | 0,07 |
| 120 | 77 | 76,6 | 76,6 | 77,2 | 77,2 | 76,90 | 0,13 | 0,13 |
| 125 | 78,5 | 78,2 | 78,2 | 78,2 | 78,2 | 78,20 | 0,38 | 0,38 |
| 130 | 78 | 78,9 | 78,9 | 78,9 | 78,9 | 78,90 | -1,14 | 1,14 |
| 135 | 78,5 | 78,9 | 78,9 | 78,9 | 78,9 | 78,90 | -0,51 | 0,51 |
| | | | | | | | | 0,36 |

Liite 6: Jähdytystaulukko

| Aika (min) | Pelkällä vaippalla jäähdytys (°C) | Immersiojäähdyttimellä jäähdytys (°C) | Vaipalla ja immersiojäähdyttimellä jäähdytys (°C) | Pelkällä vaipalla pumpun kanssa jäähdytys (°C) | Immersiojäähdyttimellä pumpun kanssa jäähdytys (°C) |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|---|
| 0 | 99,5 | 99 | 99 | 99 | 99,5 |
| 2 | 81 | 67 | 64 | 84 | 74 |
| 4 | 76,5 | 49 | 53 | 75 | 53 |
| 6 | 76,5 | 37,5 | 48 | 64 | 39 |
| 8 | 75 | 34 | 44 | 55,5 | 30 |
| 10 | 73 | 30,5 | 42,5 | 48 | 25 |
| 12 | 71 | 28 | 42 | 42 | |
| 14 | 69 | 26 | 41,2 | 37 | |
| 16 | 67,5 | 25 | 40,5 | 33 | |
| 18 | 66 | | 39 | 29,5 | |
| 20 | 64,5 | | 37,5 | 27 | |
| 22 | 62 | | 36 | 25 | |
| 24 | 60 | | 35 | | |
| 26 | 58 | | 34 | | |
| 28 | 56 | | 33 | | |
| 30 | 54 | | 32 | | |
| 32 | 51,5 | | 31 | | |
| 34 | 49,5 | | 30 | | |
| 36 | 48 | | | | |
| 38 | 46 | | | | |
| 40 | 44,5 | | | | |
| 42 | 43 | | | | |
| 44 | 41,5 | | | | |
| 46 | 40 | | | | |
| 48 | 38,5 | | | | |
| 50 | 37,5 | | | | |
| 52 | 36,5 | | | | |
| 54 | 35 | | | | |
| 56 | 34 | | | | |
| 58 | 33 | | | | |
| 60 | 32 | | | | |
| 62 | 31 | | | | |
| 64 | 30,5 | | | | |
| 66 | 30 | | | | |
| 68 | | | | | |
| 70 | | | | | |