

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, bio- ja elintarviketekniikka

Opinnäytetyön valmistumisvuosi 2019

Juho Nieminen

PANIMOYMPÄRISTÖN KEHITYSTYÖ

- Vierteen jäähdytyksen optimointi Braumeister
200 L -pienpanimojärjestelmälle



Juho Nieminen

PANIMOYMPÄRISTÖN KEHITYSTYÖ

- Vierteen jäähdytyksen optimointi Braumeister 200 L -pienpanimojärjestelmälle

Oluen tuottamisprosessi alkaa vierteen valmistuksella panimojärjestelmän säiliössä. Vierteen valmistus tapahtuu järjestelmään syötetyn reseptin mukaisesti. Valmistuksen loppuvaiheessa vierre on kiehuvan kuumaa. Keittoajan loputtua vierre on jäähdytettävä käymislämpötilaan.

Panimojärjestelmän valmistajan Speidelin käyttöohjeen mukaan olisi jääkylmää vettä jäähdytinvetenä käytettäessä vierteen lämpötila saatu 50 minuutissa laskemaan vaippajäähdyttimellä kiehuvan kuumasta 25 °C käymislämpötilaan laitteiston säiliössä.

Opinnäytetyön toteutuksen perusteena oli, että käytettäessä kylmää hanavettä jäähdytysajan havaittiin pitenevän huomattavasti. Pidentynyt jäähdytysaika aiheuttaisi laitteiston käytössä kontaminaatoriskin suurenemisen jäähdytettäessä vierrettä. Vaippajäähdytyksen käyttö kylmällä hanavedellä vaikuttaisi myös merkittävästi työaikaa pidentäen.

Opinnäytetyön aikana kokeiltiin vaihtoehtoisia jäähdytystapoja käytettävissä olevilla välineillä vierteen jäähdyttämiseksi kiehuvaasta 25 °C lämpötilaan. Vierrettä matkittiin jäähdyttäen sen tilalla kiehuvaa vettä. Täytettynä ylimpään merkkiin asti, oli jäähdytettävän veden määrä 230 litraa.

Upotettava vierrejäähdytin sekä ulkoinen levylämmönvaihdin yhdessä vaippajäähdyttimen kanssa olivat molemmat jäähdytykseen soveltuvaksi todettuja välineitä. Ulkoista levylämmönvaihdinta ja upotettavaa jäähdytintä käytettiin erillisissä jäähdytyskokeissa.

Upotettavaa vierteenjäähdytintä käytettäessä vaippajäähdyttimen lisänä oli jäähdytysaika myös 50 minuuttia, aivan kuten valmistajan menetelmää käytettäessä.

Levylämmönvaihdinta käytettäessä vaippajäähdyttimen lisänä saatiin jäähdytettävä nestetilavuus myös siirrettyä jäähdytyksen aikana fermentoriin. Toistetuissa kokeissa myös jäähdyttämiseen samalla nestetilavuutta siirrettäessä kului 50 minuuttia.

ASIASANAT:

panimo, jäähdytys, vierteenjäähdytin, lämmönsiirto, lämmönvaihdin, levylämmönvaihdin

Juho Nieminen

DEVELOPMENT OF BREWERY ENVIRONMENT

- Optimizing wort cooling for Braumeister 200 L brewery system

The beer making process starts with the step of producing wort in the container of the brewery system. The pertinent is entered into the system to produce the wort. At the end of the brewing process the wort is boiling hot. When the boiling time is over, the hot wort must be cooled down to a temperature suitable for fermentation.

According to the instruction manual of the brewery system manufacturer Speidel, using the cooling jacket with ice cold water would lower the temperature of the boiling wort to the fermentation temperature of 25 °C inside the container within 50 minutes.

The reason for this thesis was that it was noticed that the cooling time was considerably increased when using cold tap water. The extended cooling time of the wort would increase the risk of contamination when cooling the wort in the open container. The duration of the work would also increase considerably by using the cooling jacket with cold tap water.

Available hardware was used to test different methods for cooling the boiling wort down to the temperature of 25 °C. Instead of wort, boiling water was used. When the container was filled up to the top mark with boiling water, the volume of the water to be cooled was 230 liters.

The immersion cooler as well as the external plate heat exchanger each used in combination with the cooling jacket, were shown to accelerate the cooling of the wort. The immerse cooler and the external heat exchanger were used in separate experiments.

When using a submersible cooler combined with the jacket cooler, the cooling time was 50 minutes, similarly to the manufacturer's method.

When using a plate heat exchanger combined with the jacket cooler, the amount of liquid to be cooled was also transferred to the fermenter during the duration of the cooling. In repeated tests the cooling while transferring the liquid also took 50 minutes to work out.

KEYWORDS:

brewery, cooling, wort cooler, heat exchange, heat exchanger, plate heat exchanger

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	1
2 TEORIA	2
2.1 Lämmönvaihto	2
2.2 Lämmönvaihdin	3
3 JÄÄHDYTYSKOKEISSA TUTKITTU LAITTEISTO	4
3.1 Panimojärjestelmä vaippajäähdyttimellä	4
3.2 Upotettava vierteenjäähdytin	5
3.3 Levylämmönvaihdin	6
4 JÄÄHDYTYSKOKEET	9
4.1 Jäähdytyskoe A	10
4.2 Jäähdytyskoe B	11
4.3 Jäähdytyskoe C	12
4.4 Jäähdytyskoe D	14
4.5 Jäähdytyskoe E	15
4.6 Jäähdytyskoe X	16
4.7 Jäähdytyskoe Y	17
4.8 Jäähdytyskoe Z	19
5 HAVAINNOT JA YHTEENVETO	21
5.1 Jäähdytyskokeet D ja E upotettavalla vierteenjäähdyttimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä	21
5.2 Jäähdytyskokeet X, Y ja Z levylämmönvaihtimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä	23
5.3 Veden kulutus ja jäähdytysveden lämpötila	24
6 LOPUKSI	26
LÄHTEET	28

KAAVAT

Kaava 1. Lämmönsiirtonopeus. (2)	2
Kaava 2. Jäähdytysveden kulutus.	24

KUVAT

Kuva 1. Braumeister 200 L -panimojärjestelmä.	4
Kuva 2. Upotettava Braumeister 20 L -laitteiston vierteenjäähdytin jäähdyttämässä Braumeister 200 L -laitteistossa.	5
Kuva 3. Levylämmönvaihtimen virtaussuunnat läpileikkauksessa. (5)	6
Kuva 4. Tutkitun levylämmönvaihtimen malli. (8)	7
Kuva 5. Liittimet levylämmönvaihtimen kytkemiseksi.	8
Kuva 6. Kaksi O-rengasta käytössä tiivistettäessä levylämmönvaihtimen kytkentää laitteistoon.	8
Kuva 7. Jäähaude jäähdytinletkuille.	10
Kuva 8. Kylmäpatjat kokeilussa säiliön ympärillä.	13
Kuva 9. Pumpaus levylämmönvaihtimen kautta fermentoriin.	18

KUVIOT

Kuvio 1. Jäähdytyskoe A.	10
Kuvio 2. Jäähdytyskoe B.	11
Kuvio 3. Jäähdytyskoe C.	12
Kuvio 4. Jäähdytyskoe D.	14
Kuvio 5. Jäähdytyskoe E.	15
Kuvio 6. Jäähdytyskoe X.	16
Kuvio 7. Jäähdytyskoe Y.	17
Kuvio 8. Jäähdytyskoe Z.	19
Kuvio 9. Jäähdytyskokeiden vertailu vaippajäähdyttimellä ja upotettavalla vierteenjäähdyttimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä.	22
Kuvio 10. Levylämmönvaihtimen kautta pumpatun vierreveden lämpötila.	23

TAULUKOT

Taulukko 1. Jäähdytysvesien kulutukset.	25
---	----

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

Lyhenne tai sana	Lyhenteen tai sanan selitys
A	Lämmönsiirtopinta-ala (m^2).
fluidi	Virtaava aine, eli neste tai kaasu.
jäähdytysvesi	Jäähdyttimissä kiertävä kylmä hanavesi, joka oli mitattaessa noin $10,0 - 10,5 \text{ }^\circ\text{C}$.
k	Kokonaislämmönsiirtokerroin ($W m^{-2} K^{-1}$).
konvektio	Konvektio, eli kuljettuminen, on lämmön siirtoa lämmön aiheuttamien virtausten mukana fluidissa (siis kaasussa tai nesteessä).
Q_h	Lämmönsiirtonopeus (W tai $J s^{-1}$).
ΔT	Lämpötilaero (K).
vierrevesi	Vierrevedellä tarkoitetaan vierteen sijaan työssä käymislämpötilaan ($\leq 25^\circ\text{C}$) jäähdytettävää vettä.
V_j	Jäähdytykseen kuluneen veden tilavuus kuutiometreinä (m^3).
V_b	Mitatun jäähdytinveden tilavuus (L).
t_b	Mitatun jäähdytinveden virtaukseen kulunut aika (s).
t_j	Jäähdyttimen käyttöaika (s).

1 JOHDANTO

Perinteisessä oluenvalmistusreseptissä käytetään vettä, ohramallasta, humalaa ja hiivaa. Oluen tuottamisprosessi alkaa vierteen valmistuksella panimojärjestelmän säiliössä. Vierteen valmistus tapahtuu järjestelmään syötetyn reseptin mukaisesti. Valmistuksen loppuvaiheessa vierre on kiehuvan kuumaa. Keittoajan loputtua vierre on jäähdytettävä käymislämpötilaan. Vierre on mäskäykseksi kutsutussa keitossa syntyvä sokeripitoinen liuos. Hiiva on tarkoitus lisätä käymislämpötilassa olevaan vierteeseen ennen oluen käymistä fermentorissa.

Panimojärjestelmän valmistajalla (Speidel) on ollut vaippajäähdytyksessä käytössä jääkylmää vettä. Tällöin jäähdytys on kestänyt 50 minuuttia. Jäähdytyksen loputtua tulisi vierteen tai työssä vierteen sijasta tutkitun vierreveden lämpötilan olla käymiskelpoisessa lämpötilassa, $\leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. (1)

Tutkittaessa työn alkuvaiheessa panimojärjestelmän vaippajäähdytystä kylmällä hanavedellä, todettiin menetelmän olevan huomattavasti hitaampi valmistajan käyttöohjeen mukaiseen menetelmään nähden.

Opinnäytetyössä kokeiltiin käytettävissä olevilla välineillä erilaisia vaihtoehtoisia tapoja jäähdytykselle, sekä tulkittiin niiden soveltuvuutta vierteen jäähdytyksessä. Laitteiston säiliössä jäähdytettiin kokeissa vierteen sijasta vettä.

Täytettynä joka työssä ylimpään merkkiin, oli panimojärjestelmän säiliössä aina 230 litraa kiehuvaa vettä jäähdytettävänä. Vettä käytettiin vierteen sijasta mukailemassa vierteen jäähdytystä käytännön syistä jäähdytyskokeissa. Jäähdytettävää, vierteen sijasta käytettyä, vettä kutsutaan työssä vierrevedeksi erotuksena jäähdytinvedestä.

2 TEORIA

2.1 Lämmönvaihto

Koetehtaissa ja laboratorioissa käytetään usein jäähdytinvaippoja suurten nestemäärien jäähdyttämiseksi. Niiden lämmönsiirtokapasiteettia rajoittaa kuitenkin suhteellisen pieni lämmönsiirtopinta-ala nestesäiliön tilavuuteen nähden. Suurten tilavuuksien jäähdyttämisessä suositaankin upotettavien jäähdyttimien tai sisäisten jäähdytysputkien käyttöä, jolloin suhteellinen lämmönsiirtopinta-ala jäähdytettävän nesteen tilavuuteen nähden kasvaa. Upotettavien jäähdyttimien ja sisäisten jäähdytysputkien päälle syntyy helposti biofilmiä, mikä alentaa lämmönsiirtokykyä ja lisää kontaminaation riskiä käytössä. Ulkoisen lämmönvaihtimen käyttö lisää lämmönsiirtokapasiteettia. Ulkoinen lämmönvaihdin on yleensä helppo muuntaa panimoympäristöön sopivaksi. (2)

Vierteen jäähdyttämiseen käytetään useimmiten kylmää vettä. Jäähdytysvesi kiertää useimmiten joko panimolaitteiston vaippajäähdyttimessä tai upotettavassa vierteenjäähdyttimessä. Ylimääräinen lämpö siirtyy vierteestä nesteet erottavan pinnan läpi jäähdytysveteen. Vierteen voimakas sekoitus ja etenkin jäähdytysveden suuri virtausnopeus tehostavat lämmönsiirtoa. (2)

Lämmönsiirtonopeus (Q_h) voidaan esittää yhtälöllä:

$$Q_h = k \cdot A \cdot \Delta T$$

missä Q_h = lämmönsiirtonopeus (W tai J s⁻¹)

k = kokonaislämmönsiirtokerroin (W m⁻² K⁻¹)

A = lämmönsiirtopinta-ala (m²)

ΔT = lämpötilaero = ($T_{\text{vierrevesi}} - T_{\text{jäähdytysvesi}}$) (K).

Kaava 1. Lämmönsiirtonopeus. (2)

Yhtälöä voidaan käyttää panimolaitteiston suunnittelussa jäähdytinlaitteita koskevien ratkaisujen arvioinnissa. Mikäli lämmönsiirtonopeuden lisäksi tiedetään k (taulukkokirjallisuudesta saatava tieto) sekä ΔT , pystytään yhtälöstä laskemalla arvioimaan tarvittava jäähdytyspinta-ala. (2)

2.2 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin eli lämmönsiirrin on energiatekniikan komponentti, jolla siirretään lämpöenergiaa eri lämpötilassa olevien fluidien välillä. (3)

Lämmönvaihtimissa lämpö siirtyy useimmin johtumalla tai lämpösäteilynä ilman, että fluidit sekoittuvat keskenään. Konvektiolla tapahtuvaan lämmönsiirtoon sen sijaan ei tarvita mitään erityistä lämmönvaihdinta vaan lämpö siirtyy aineen mukana. (3)

Lämmönvaihtimessa ei yleensä ole liikkuvia osia, poikkeuksena ovat pyörivät lämmönvaihtimet. Lämmönvaihdin koostuu lämmönvaihtoelementistä ja säiliöistä tai putkista, jotka erottavat fluidit toisistaan. (3)

3 JÄÄHDYTYSKOKEISSA TUTKITTU LAITTEISTO

3.1 Panimojärjestelmä vaippajäähdyttimellä

Työn jäähdytyskokeissa tutkittu panimojärjestelmä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Braumeister 200 L -panimojärjestelmä.

Laitteiston säiliön jäähdytinvaiippa näkyy kuvassa 1 säiliön ympärillä olevana epätasaisena pintana. Nestesäiliön tilavuus ylipäätään merkkiin asti täytettynä oli 230 litraa.

3.2 Upotettava vierteenjähdytin

Käytetty vierteenjähdytin (kuva 2.) oli tarkoitettu mittakaavaltaan kymmenesosan tilavuuden omaavan laitteiston jäähdytykseen. Upotettava vierteenjähdytin on käytössä tarkoitus steriloida asettamalla se paikoilleen vierteen yhä kiehuessa.

Upotettavan vierteenjähdyttimen tiedot:

Speidel -vierteenjähdytin

Ruostumatonta terästä oleva vierteenjähdytin Braumeister 20 L -laitteistolle.

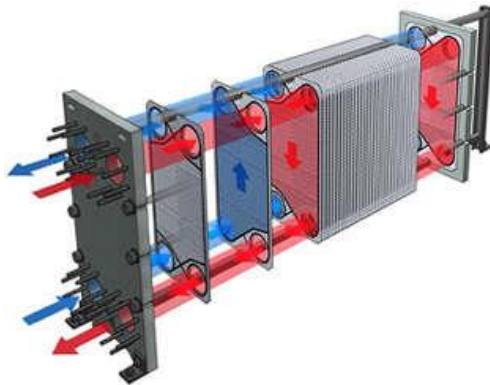
Kierteen \varnothing : 190 mm, korkeus: 465 mm. (4)

Putken \varnothing : 11 mm, Jäähdytyspinta-alan laskenta-arvio: 0,29 m².



Kuva 2. Upotettava Braumeister 20 L -laitteiston vierteenjähdytin jäähdyttämässä Braumeister 200 L -laitteistossa.

3.3 Levylämmönvaihdin



Kuva 3. Levylämmönvaihtimen virtaussuunnat läpileikkauksessa. (5)

Levylämmönvaihdin koostuu metallilevyistä, jotka toimivat lämmönsiirtiminä kahden nesteen välillä. Tällä on suuri etu perinteisiin vaippajäähdyttimiin, jäähdytyspinta-alan ollessa laajempi levyjen välillä. (5)

Lämmönsiirtoprosessiin osallistuvat nesteet ohjataan levylämmönvaihtimeen kanavalevyissä olevien reikien muodostamien virtaustunneleiden läpi. Levyt ovat nipussa, jossa tiivisteet ohjaavat nesteet kanavalevyjen välissä oleviin virtaussoliin. (6) (7)

Ensimmäinen nestevirtaus johdetaan joka toiseen solaan ja toinen nestevirtaus edellisten solien väliin. Joka toisessa välissä virtaa siis kuumaa ja joka toisessa kylmä neste. Nesteet eivät pääse ehjässä levylämmönvaihtimessa sekoittumaan keskenään, sillä niiden välillä on ohuesta metallista tehty kanavalevy, jonka kautta lämpö siirtyy. (6) (7)

Yleensä levyt on muotoiltu sisältämään uria. Levyt kestävät tällöin paremmin eri puolilla virtaavien nesteiden välistä paine-eroa. Lisäksi urat aiheuttavat turbulenssin, joka lisää lämmönsiirtokertoimen arvoja. (6) (7)

Levylämmönvaihtimia on olemassa sekä kiinteillä osilla varustettuja malleja, että irrotettavilla osilla olevia malleja. Irrotettavilla osilla varustetun levylämmönvaihtimien etuna on osien helppo puhdistettavuus, sekä levyjen lukumäärän muuttaminen tarpeen mukaan. (6) (7)

Tutkimuksessa mukana ollut levylämmönvaihdin sisältää 36 ruostumatonta terästä olevaa jäähdytinlevyä. Kapasiteetti on 45-60 litraa kuumaa vierrettä 10-15 minuutissa

käyttäen kaksinkertaista virtausnopeutta 10 °C jäähdytinvedellä. Liitännät ovat 3/4” standardikoko. (8)

Levylämmönvaihtimen tiedot:

Paino 2,159 kg

Pituus 21 cm

Korkeus 15.6 cm

Leveys 10 cm

EAN tunnus 5425000397809

Valmistaja Brewferm



Kuva 4. Tutkitun levylämmönvaihtimen malli. (8)

Kuvassa 3 oleva levylämmönvaihdin toimi parhaiten pystyasennossa täyden jäähdytinpinnan saavuttamiseksi. (8)

Silikonilla olevat 12mm laboratorioletkut soveltuivat koejärjestelyssä sekä jäähdytinveden ulostulolle, että tutkittavan vierreveden ulostulolle.

Levylämmönvaihtimen sisääntuloon jäähdytinveden PVC -letkulle hankittiin lukittavat messinkiset 3/4” liittimet.

Levylämmönvaihtimen sisääntuloon jäähdytettävän vierreveden liittämiseksi hankittiin 3/4” – 1” välityksellä oleva messinkinen adapteri. Kyseiset liittimet ovat esillä kuvassa 5. Adapterin tiivistäminen vaati toisen O-renkaan lisäyksen liitokseen Braumeister 200 L -

laitteiston 1" liittimen omaavaan letkuun liitettäessä vuotojen välttämiseksi, kuten kuvassa 6.



Kuva 5. Liittimet levylämmönvaihtimen kytkemiseksi.



Kuva 6. Kaksi O-rengasta käytössä tiivistettäessä levylämmönvaihtimen kytkentää laitteistoon.

4 JÄÄHDYTYSKOKEET

Jäähdytysvesi kiersi jäähdytinkokeiden aikana joko laitteiston säiliön jäähdytinvaipassa tai tämän lisäksi joko laitteeseen upotettavassa vierteenjäähdyttimessä tai levylämmönvaihtimessa. Vierreveden lämpö siirtyi nesteitä erottavan pinnan läpi jäähdytysveteen. Jäähdytysveden suuri virtausnopeus ja laitteiston säiliössä olevan vierreveden voimakas sekoitus tehosti työssä lämmönsiirtoa. Eniten merkitystä jäähdytyksen kannalta työssä oli käytetyillä vaihtoehtoisilla jäähdyttimillä, joissa käytettiin suurempia virtausnopeuksia, kuin vaippajäähdyttimellä oli mahdollista. (2)

Työssä kokeiltiin lämmönvaihtoa virtaavien nesteiden kesken levylämmönvaihtimella.

Säiliössä olevan nesteen jäähdytystä kokeiltiin vaippajäähdyttimellä, sekä vaippajäähdyttimen ja upotettavan kierteisen vierteenjäähdyttimen yhdistelmällä. Jälkimmäinen koejärjestely toistettiin myös sekoittaen Braumeister 200 L -laitteiston säiliössä jäähdytettävää nestettä käyttäen 8-voimakkuustason nestettä kierrättävää pumppausta säätöasteikon ollessa 1-10.

Lämpötilamittaukset, sekä jäähdytysveden kulutukset ja kuvaukset kokeilluista jäähdytysmenetelmistä on listattu tämän osion alle alaotsikoittain. Tulokset jäähdytysmenetelmien soveltuvuudesta vierteen jäähdytykselle Braumeister 200L -laitteistossa käydään läpi osiossa 5.

Mittauspisteenä laitteen osoittamalle lämpötilalle (laitteen näyttö) oli säiliön pohjassa oleva lämpötila-anturi. Tämän lisäksi lämpömittarilla mitattiin huoneen lämpötilaa, jäähdytinvaipasta ulos tulevan jäähdytinveden lämpötilaa (jäähdytinvaippa ulos), sekä varmistettiin lämpötilan mittaukset Braumeister 200 L -laitteiston säiliön nestepinnan keskeltä.

Lämpötilan mittauskohteena oli toisessa upotettavan vierrejäähdyttimen kokeessa, jäähdytyskokeessa E, myös jäähdyttimeltä poistuvan jäähdytysveden lämpötila.

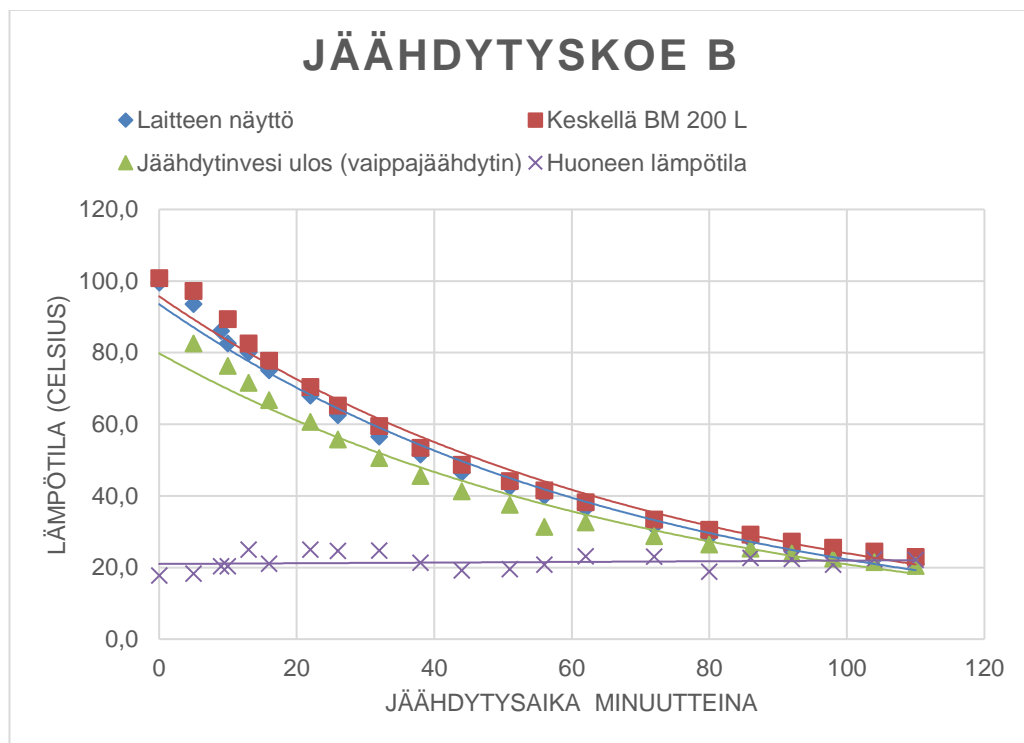
Levylämmönvaihdinta tutkittaessa oli lisäksi mittauskohteena levylämmönvaihtimelta poistuvan jäähdytetyn veden lämpötila, sekä levylämmönvaihtimesta poistuvan jäähdytinveden lämpötila. Vaippajäähdyttimen jäähdytysveden lämpötila mitattiin poikkeuksellisesti vain toistokokeissa Y ja Z. Jokaisessa jäähdytinkokeessa käytettiin jäähäudetta, jossa pidettiin jäähdytysvesien letkut kokeiden ajan, kuten kuvassa 7.

Jäähdytysveden kulutusarvio oli jäähdytinvaipassa 0,59 m³.

Jäähdytykseen kului noin 120 minuuttia, kuten huomataan kuviosta 1. Jäähdytyksen todettiin olevan liian pitkäkestoinen vierteen jäähdyttämiseksi.

4.2 Jäähdytyskoe B

Jäähdyttimenä käytettiin jäähdytinvaippaa kylmällä hanavedellä. Säiliössä oli käynnissä pyörittävä sekoitus pumpun voimakkuustasolla 8. Lämpötilamittaukset jäähdytyskoesta B ovat kuviossa 2.



Kuvio 2. Jäähdytyskoe B.

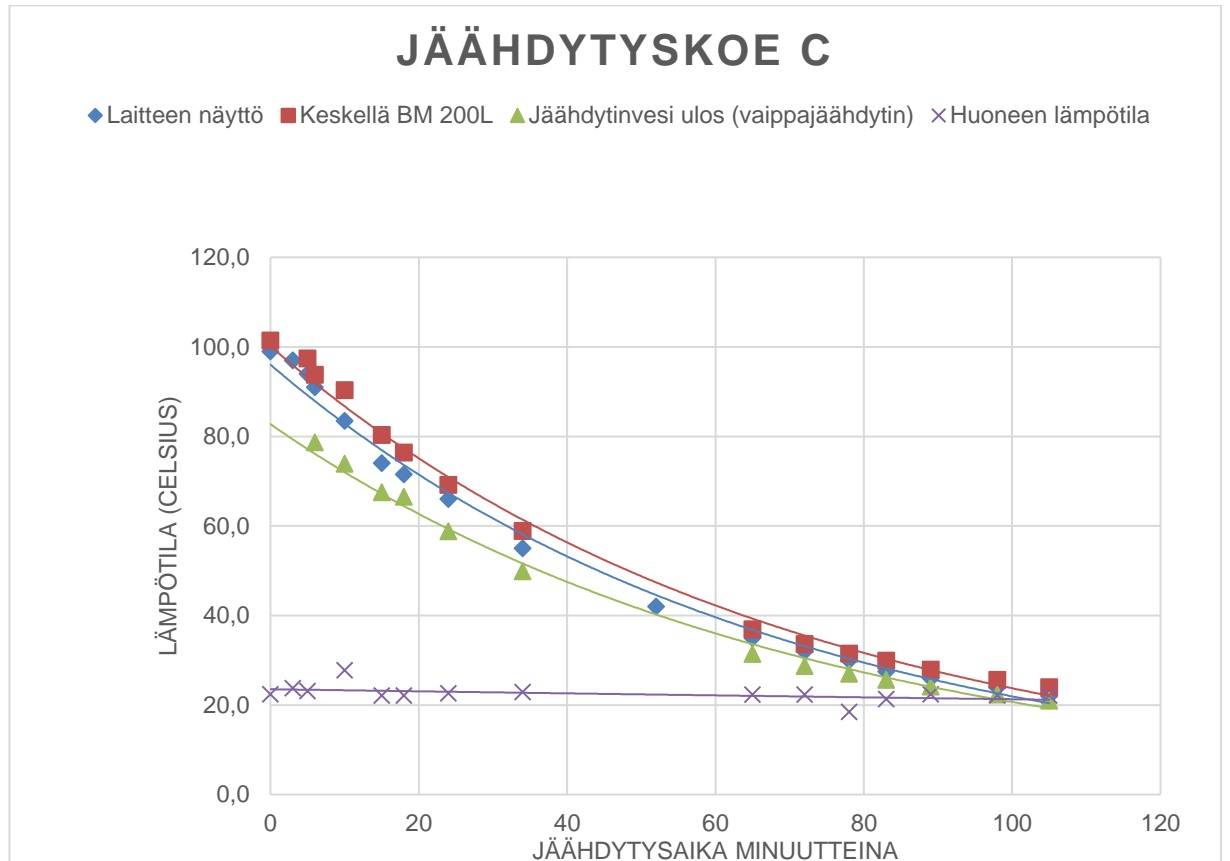
Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli 0,52 m³.

Jäähdytykseen kului noin 110 minuuttia, kuten huomataan kuviosta 2. Jäähdytyksen todettiin olevan liian pitkäkestoinen vierteen jäähdyttämiseksi tällä menetelmällä.

4.3 Jäähdytyskoe C

Jäähdyttimenä käytettiin jäähdytinvaippaa.

Jäähdytinvaipassa käyttö kylmällä hanavedellä ja säiliössä käytössä pyörittävä sekoitus pumpun voima kkuustasolla 8. Kylmäpatjat olivat sijoitettuna säiliön ympärille, kuten kuvassa 8. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta C ovat kuviossa 3.



Kuvio 3. Jäähdytyskoe C.

Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli 0,55 m³.

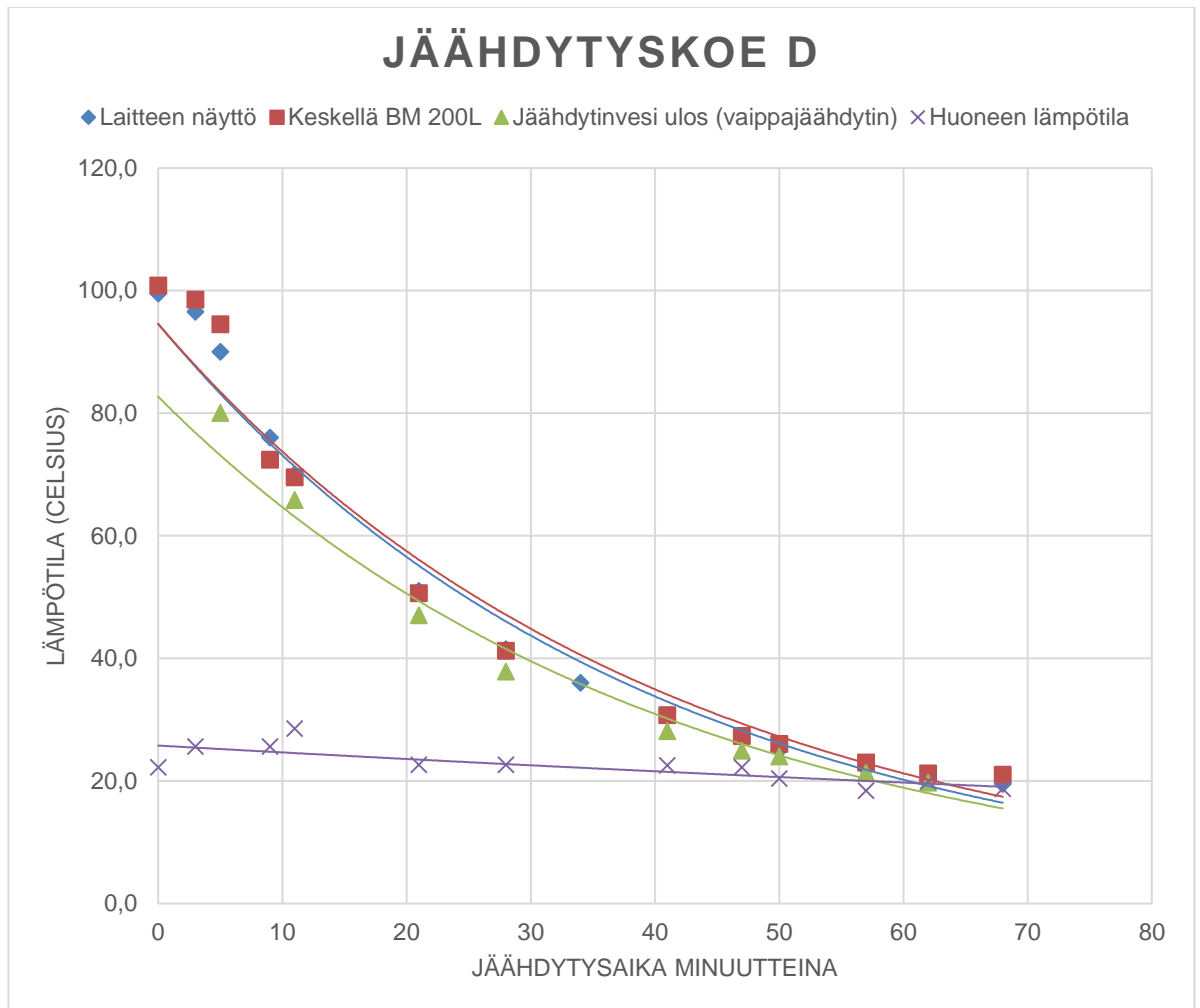
Jäähdytykseen kului noin 105 minuuttia, kuten huomataan kuviosta 3. Jäähdytyksen todettiin olevan liian pitkäkestoinen vierteen jäähdyttämiseksi tällä menetelmällä.



Kuva 8. Kylmäpatjat kokeilussa säiliön ympärillä.

4.4 Jäähdytyskoe D

Jäähdyttimenä kokeessa käytettiin jäähdytinvaippaa, sekä Braumeister 20L -kierrejähdytintä jäähdytinletkujen ollessa jäähauteessa. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta D ovat kuviossa 4.



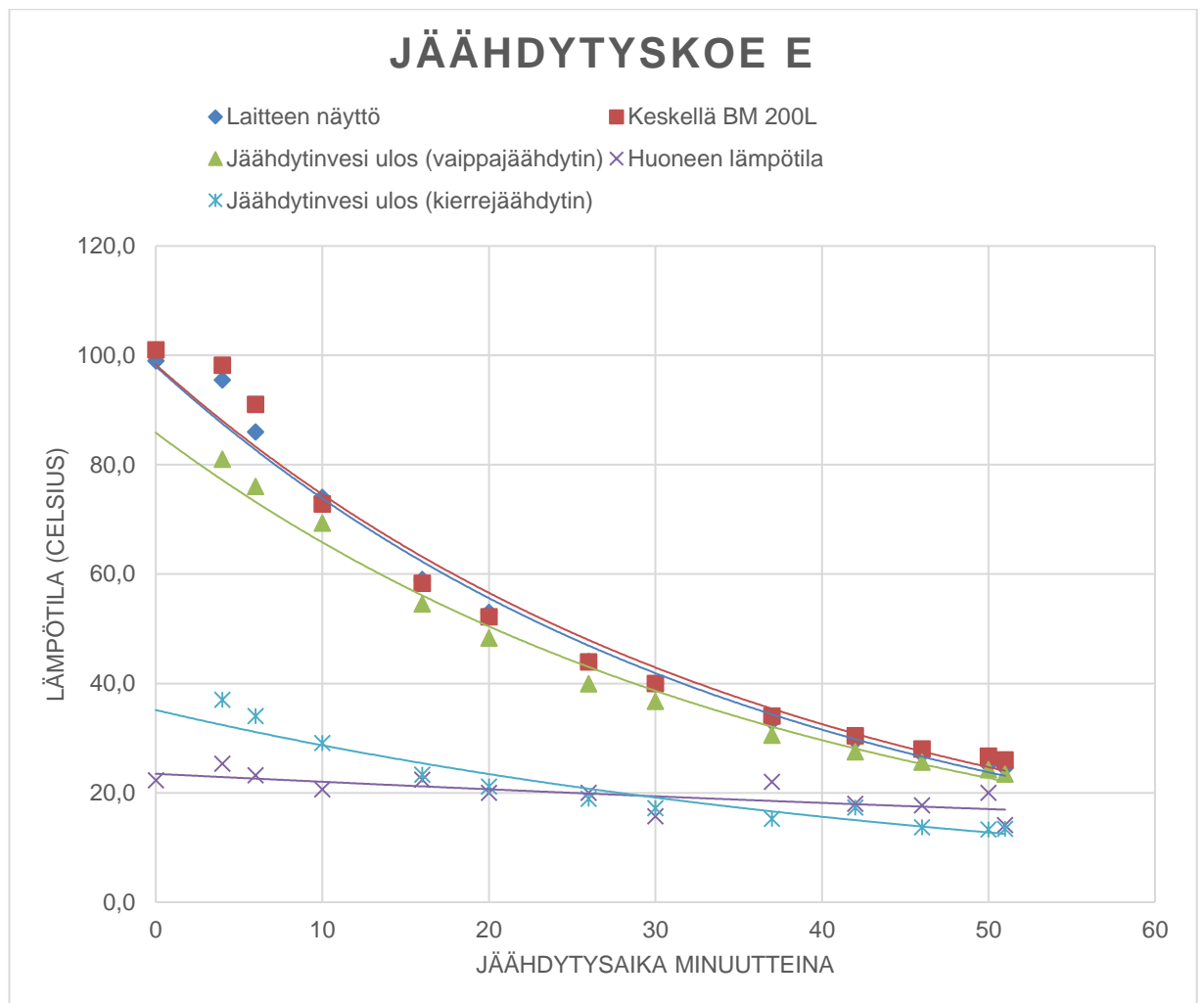
Kuvio 4. Jäähdytyskoe D.

Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli $0,27 \text{ m}^3$ ja kierrejähdyttimessä $1,05 \text{ m}^3$. Jäähdytysveden kulutusarvio kokeessa yhteensä oli $1,32 \text{ m}^3$.

Jäähdytyksen kesto $\leq 25 \text{ °C}$ käymislämpötilaan oli 50 min, kuten kuviosta 4 voidaan huomata.

4.5 Jäähdytyskoe E

Jäähdytyskoe E oli toistokoe, jossa mukailtiin jäähdytyskoetta D. Jäähdyttiminä käytettiin vaippajäähdytintä ja upotettavaa Braumeister 20L -vierteenjäähdytintä kylmällä hanavehdellä. Säiliössä käytettiin sekoitusta pumpun voimakkuustasolla 8. Kylmäpatjat olivat lisäksi sijoitettuna laitteen ympärille jäähdytyksen aikana. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta E ovat kuviossa 5.



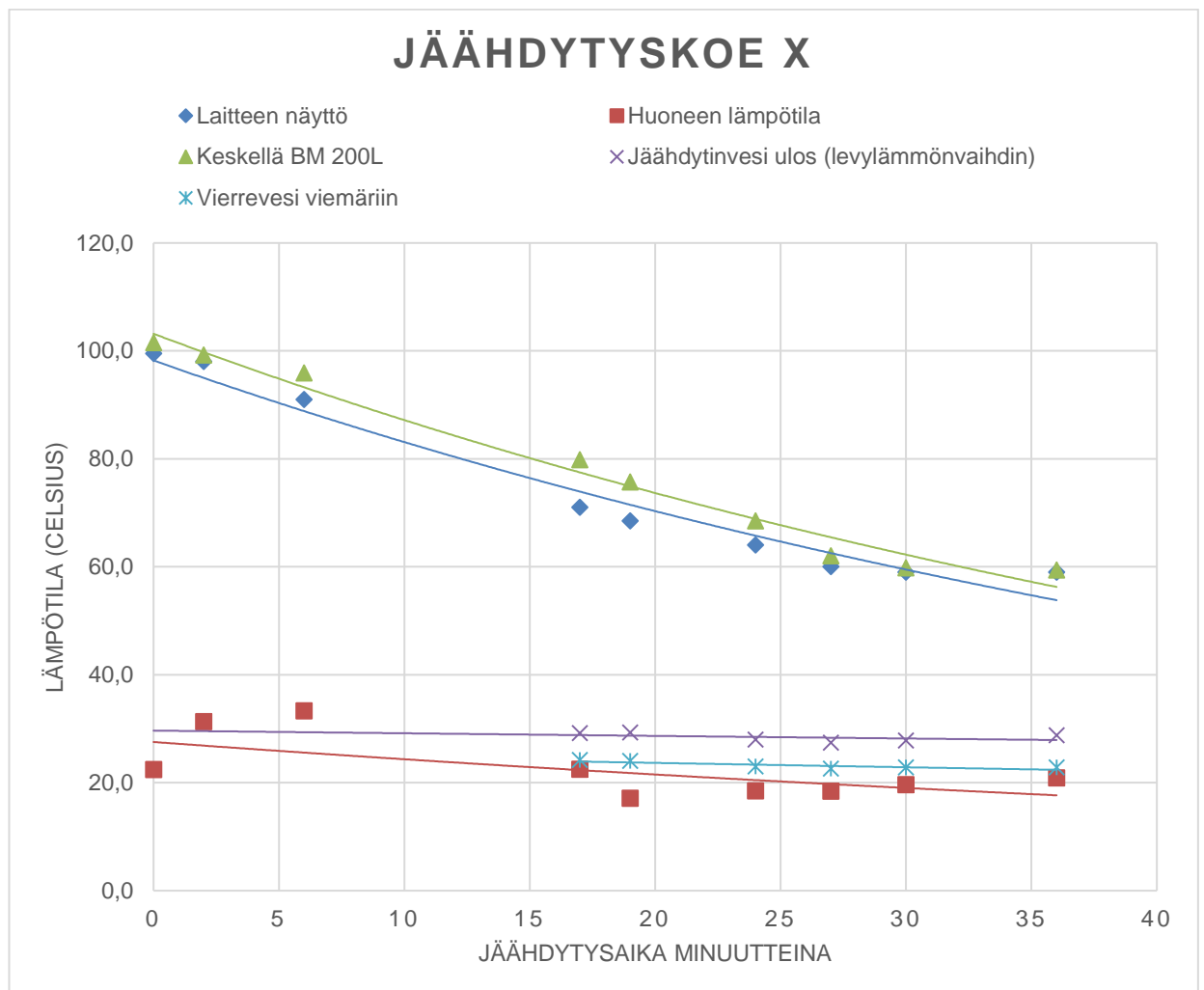
Kuvio 5. Jäähdytyskoe E.

Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli $0,24 \text{ m}^3$ ja kierrejäähdyttimessä $0,82 \text{ m}^3$. Jäähdytysveden kulutusarvio kokeessa yhteensä oli $1,06 \text{ m}^3$.

Jäähdytyksen kesto $\leq 25 \text{ °C}$ käymislämpötilaan oli 50 min, kuten kuviosta 5 voidaan huomata.

4.6 Jäähdytyskoe X

Jäähdytyksessä pumpattiin laitteiston säiliö tyhjäksi levylämmönvaihtimen läpi vaippajäähdyttimen ollessa käynnissä. Laitteiston säiliö tyhjennettiin jäähdytyskokeessa X viemäriin fermentorin sijasta. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta X ovat kuviossa 6.



Kuvio 6. Jäähdytyskoe X.

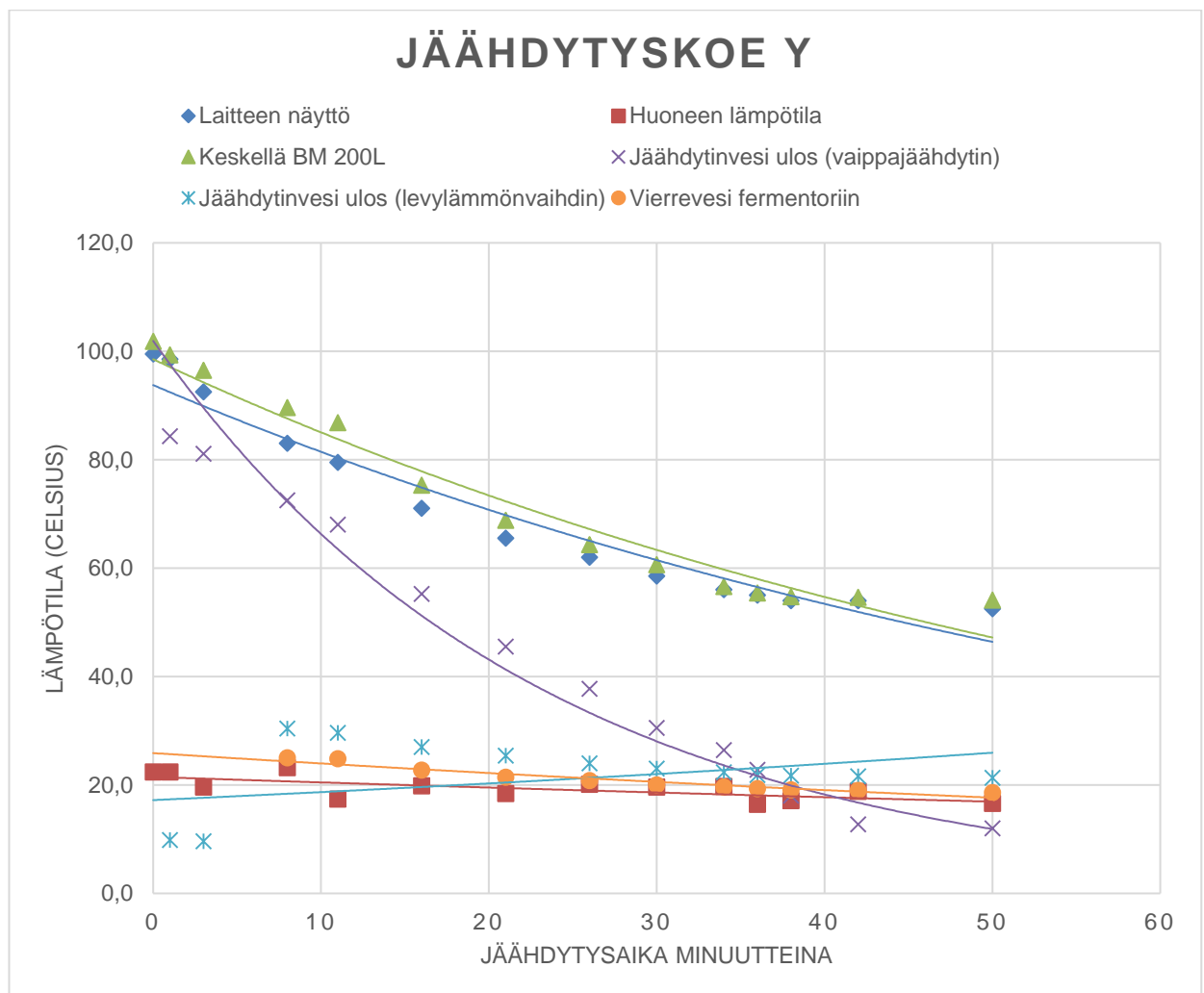
Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli $0,15 \text{ m}^3$ ja levylämmönvaihtimessa $0,43 \text{ m}^3$. Jäähdytysveden kulutusarvio kokeessa yhteensä oli $0,58 \text{ m}^3$.

Jäähdytyksen kesto $\leq 25 \text{ °C}$ käymislämpötilaan oli noin 40 minuuttia, kuten kuviosta 6 voidaan huomata.

Koejärjestely ei ollut yhtenevä jäähdytyskokeiden Y ja Z kanssa, sillä vierrevesi ohjattiin viemäriin.

4.7 Jäähdytyskoe Y

Jäähdytyskoe Y oli jäähdytyskokeen X toisto, jossa muutettiin pumppaus laitteelta viemärin sijasta fermentoriin pumpun voimakkuustasolla 8. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta Y ovat kuviossa 7.



Kuvio 7. Jäähdytyskoe Y.

Kuten kuvioista 7 voidaan huomata, jäähdytyksen kesto levylämmönvaihtimella ≤ 25 °C käymislämpötilaan oli 50 min. Jäähdytyksen aikana tapahtui myös pumppaus fermentoriin, kuvassa 9 näkyvällä menetelmällä.

Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli $0,23 \text{ m}^3$ ja levylämmönvaihtimessa $0,72 \text{ m}^3$. Jäähdytysveden kulutusarvio kokeessa yhteensä oli $0,94 \text{ m}^3$.

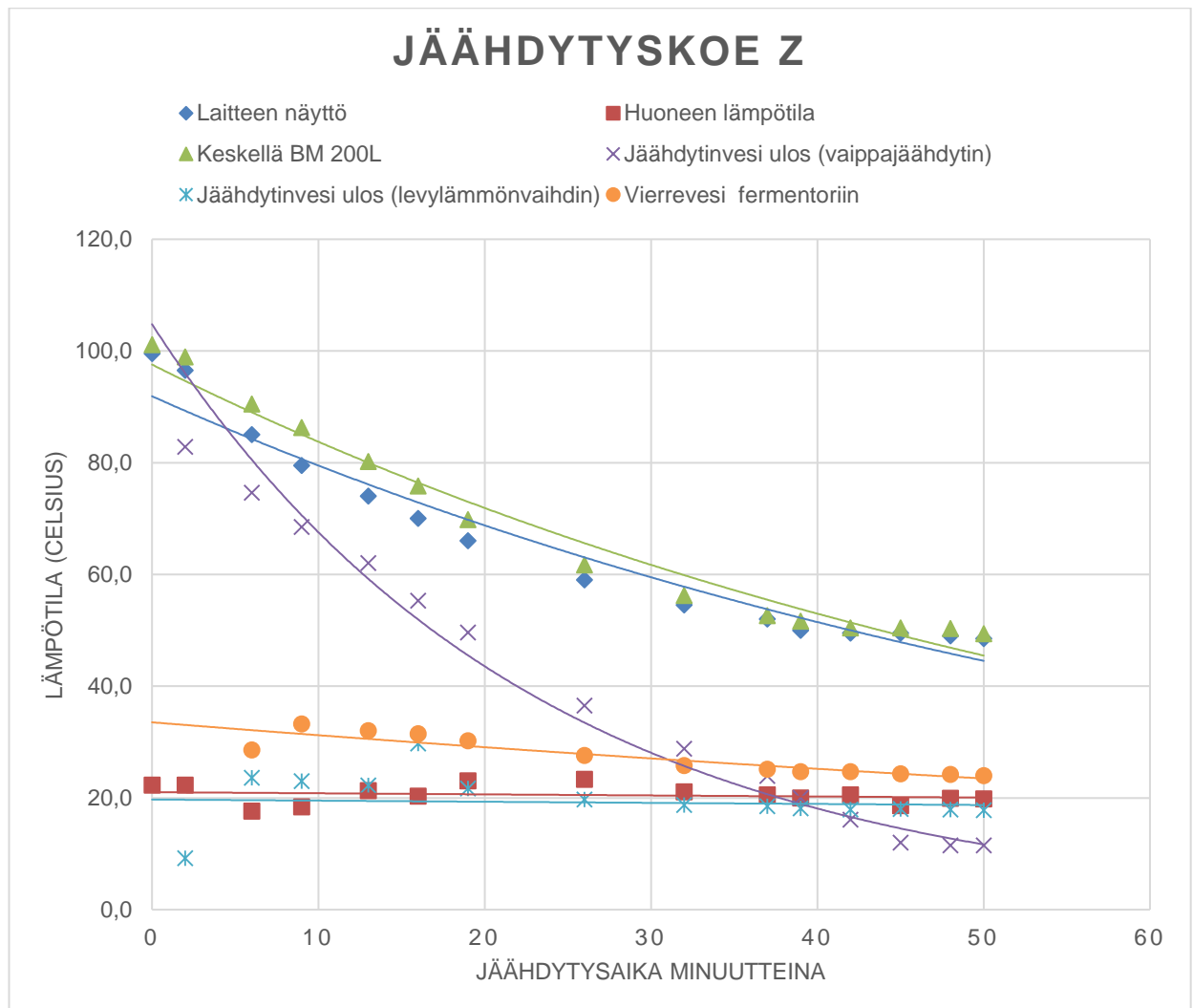


Kuva 9. Pumppaus levylämmönvaihtimen kautta fermentoriin.

Kuvassa 9 levylämmönvaihdin on korissa, siihen on kytketty jäähdytinveden sisään- ja ulostulo, sekä vierreveden sisään- ja ulostulo erilaisilla elintarvikelaatua olevilla letkuilla.

4.8 Jäähdytyskoe Z

Jäähdytyskoe Z oli jäähdytyskokeen X toisto, jossa vierrevesi pumpattiin jäähdytyksen aikana levylämmönvaihtimen läpi. Lämpötilamittaukset jäähdytyskokeesta Z ovat kuviossa 8.



Kuvio 8. Jäähdytyskoe Z.

Kuten kuviossa 8 voidaan huomata, jäähdytyksen kesto levylämmönvaihtimella ≤ 25 °C käymislämpötilaan oli 50 min. Jäähdytyksen aikana tapahtui myös pumppaus fermentoriin, kuvassa 9 näkyvällä menetelmällä.

Jäähdytinvaippaa ja levylämmönvaihdinta käytettiin kylmällä hanavedellä, jäähdytinletkujen ollessa jäähauteessa. Kylmäpatjat olivat sijoitettuna laitteiston säiliön ympärille jäähdytyksen aikana. Pumppaus laitteelta fermentoriin tapahtui pumpun voimakkuudella 8.

Jäähdytysveden kulutusarvio jäähdytinvaipassa oli $0,25 \text{ m}^3$ ja levylämmönvaihtimessa $0,75 \text{ m}^3$. Jäähdytysveden kulutusarvio kokeessa yhteensä oli $1,00 \text{ m}^3$.

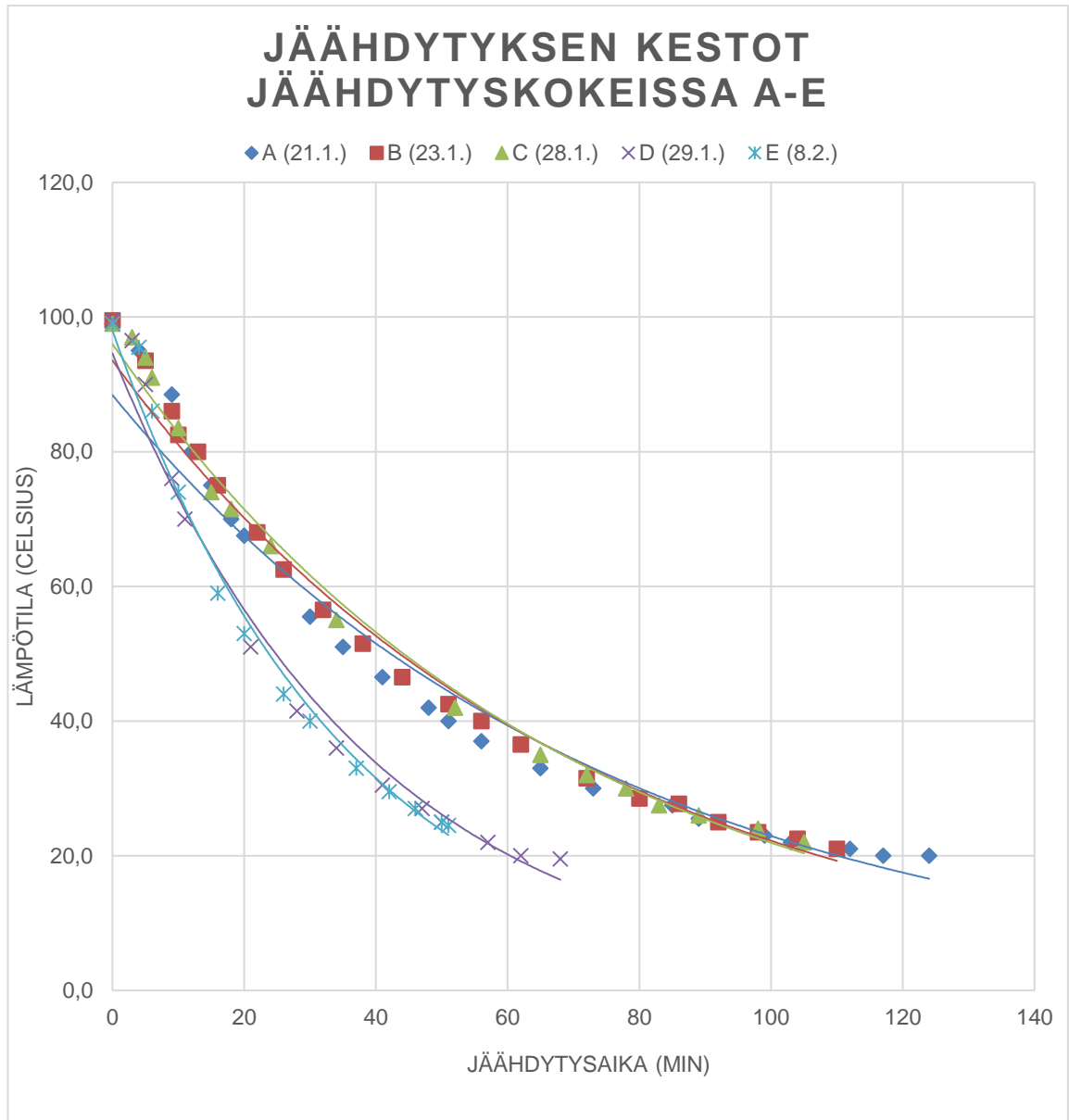
5 HAVAINNOT JA YHTEENVETO

5.1 Jäähdytyskokeet D ja E upotettavalla vierteenjäähdyttimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä

Upotettavan vierteenjäähdyttimen valmistusmateriaaliksi on ilmoitettu ruostumaton teräs. Valmistaja ei ole ilmoittanut tarkemmin käytetyn teräksen tietoja. Ferriittisen ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on $\sim 25 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, kun taas austeniittisen ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on $\sim 15 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. (9)

Jäähdytinkoe toistettiin kahdesti käyttäen upotettavaa vierteenjäähdytintä, joka oli tarkoitettu käytettäväksi Braumeister 20 L -laitteistossa. Käytettäessä yhdessä vaippajäähdytyksen kanssa tuloksena oli 50 minuutin jäähdytysaika. Jäähdytysaika oli siis sama kuin valmistajan ohjeessa ilmoitettu aika

Seuraavassa kuvaajassa on vertailtu laitteen osoittamaa lämpötilaa kuluneen ajan funktiona. Jäähdytinkokeet A, B ja C on tehty käyttäen vain laitteiston vaippajäähdytystä Jäähdytinkokeet D ja E on tehty Braumeister 20 L -laitteiston upotettavalla vierteenjäähdyttimellä yhdessä vaippajäähdytystä käyttäen.



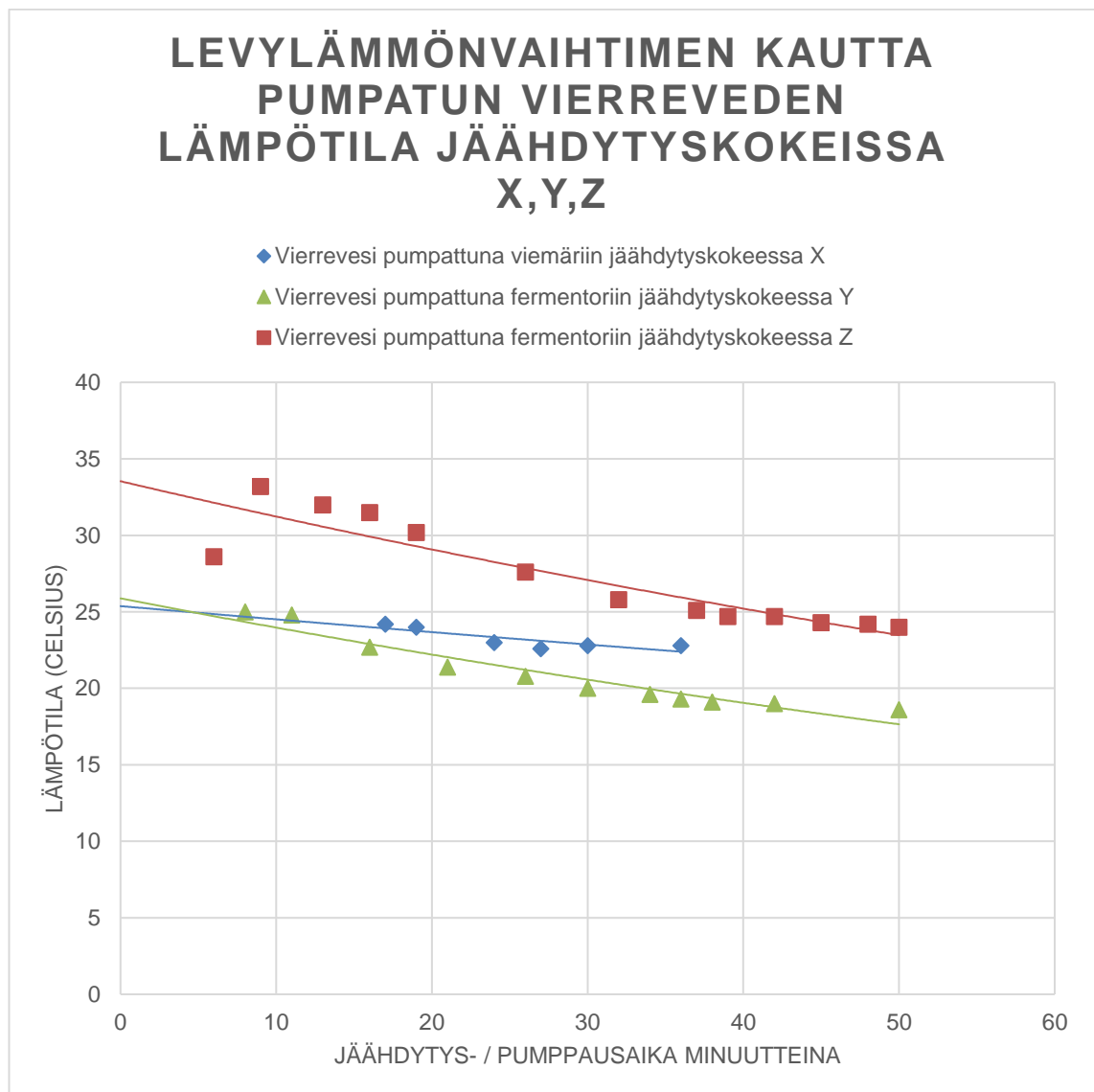
Kuvio 9. Jäähdytyskokeiden vertailu vaippajäähdyttimellä ja upotettavalla vierteenjäähdyttimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä.

Kuvaajasta 9 nähdään, että käymislämpötila, 25 °C tai alle oli saavutettu 50 minuutin aikana käyttäen upotettavaa vierteenjäähdytintä kokeissa D ja E. Kuvaaja perustuu laitteen näyttämiin arvoihin, jonka lukemat tulevat säiliön pohjalla olevasta lämpöanturista.

5.2 Jäähdytyskokeet X, Y ja Z levylämmönvaihtimen ja vaippajäähdyttimen yhdistelmällä

Levylämmönvaihtimen läpi pumpattaessa jäähdytysaika oli 50 minuuttia. Aika mitattiin pumpun käynnistymisestä, joka oli alle 10 minuuttia vaippajäähdyttimen käynnistämisestä. Braumeister 200 L -laitteiston pumpussa käytettiin 8-voimakkuustason pumpausta säätöasteikon ollessa 1-10. Lämpötila oli vaippajäähdyttimellä saatava laskemaan säiliössä kiehovasta aluksi alle 86 °C, joka on turvaraja pumpun käynnistymiselle.

Kuviossa 10 on mitattu vierteen tilalla käytetyn veden lämpötilaa ajan funktiona pumpattaessa laitetta tyhjäksi levylämmönvaihtimen läpi pumpun ollessa voimakkuustasolla 8.



Kuvio 10. Levylämmönvaihtimen kautta pumpatun vierreveden lämpötila.

Täytyttyään vierrevedellä, havaittiin fermentorin lämpömittarin osoittavan vierreveden olevan käymiseen soveltuvassa lämpötilassa, ≤ 25 °C. Jäähdytysaikojen todettiin olevan sama kuin laitteiston valmistajan menetelmässä myös levylämmönvaihtimen osalta mitattaessa levylämmönvaihtimen käyttöaika.

Jäähdytyskokeessa X pumpattiin vierrevesi fermentorin sijasta viemäriin. Jäähdytyskokeessa X vierreveden virtausnopeus oli nopeampi, mutta sen lämpötila pysytteli myös tässä kokeessa käymislämpöisenä tullessaan ulos levylämmönvaihtimesta.

5.3 Veden kulutus ja jäähdytysveden lämpötila

Jäähdytysveden kulutusmäärät ovat laskelma-arvioita. Virtausnopeutta mitattiin 10 litran ämpäriin täyttymiseen kuluneesta ajasta ja laskettiin veden kulutus jäähdyttimissä virtaavien vesimäärien mukaan jäähdytyksen käynnistämisestä sen sulkemiseen.

$$V_j = \left(\frac{V_b}{t_b} \right) \cdot t_j$$

missä V_j = jäähdytykseen kuluneen veden tilavuus kuutiometreinä (m³)

V_b = mitatun jäähdytysveden tilavuus (L)

t_b = mitatun jäähdytysveden virtaukseen kulunut aika (s)

t_j = jäähdyttimen käyttöaika (s).

Kaava 2. Jäähdytysveden kulutus.

Jäähdytyskokekohtaiset jäähdytysveden kulutusarvot on listattu taulukkoon 1. Jäähdytyskokeen X kulutusarvio on Y- ja Z- kokeiden kulutuksiin nähden alhainen johtuen koejärjestelyistä.

Taulukko 1. Jäähdytysvesien kulutukset.

Jäähdytyskoe	Jäähdytysveden kulutus kuutioina (m ³)	Käytössä olleet jäähdyttimet
A	0,59	Vaippajäähdytin
B	0,52	Vaippajäähdytin
C	0,55	Vaippajäähdytin
D	1,32	Vaippajäähdytin, upotettava vierteenjäähdytin
E	1,06	Vaippajäähdytin, upotettava vierteenjäähdytin
X	0,58	Vaippajäähdytin, levylämmönvaihdin
Y	0,94	Vaippajäähdytin, levylämmönvaihdin
Z	1,00	Vaippajäähdytin, levylämmönvaihdin

Veden kulutuksen kannalta merkittävää eroa jäähdytyksillä tehtynä upotettavalla vierteenjäähdyttimellä tai levylämmönvaihtimella ei juurikaan ollut, sillä ne olivat todellisuutta lähimpänä olevissa jäähdytyskokeissa Y ja Z samaa mittaluokkaa kuin upotettavalla vierteenjäähdyttimellä tehdyt kokeet D ja E. Pelkkää vaippajäähdytintä ei ole mielekästä käyttää pitkän jäähdytysajan vuoksi, vaikka menetelmässä kuluihin vähiten jäähdytysvettä.

Jäähdytysveden lämpötilaksi mitattiin työtä tehdessä 10,0 °C – 10,5 °C. Lämpötilan havaittiin olevan poikkeuksellisen korkea ja sen pääteltiin johtuvan tuloveden pitkästä kulkureitistä rakennuksen sisällä.

Laitteistoa käytettäessä olisi huomioitava myös jäähdytysveden lämpötilan kausivaihtelut. Jäähdytyskokeet tehtiin talvella.

6 LOPUKSI

Valmistettaessa olutta voivat mikrobikontaminaatiot olla riskinä. Kontaminaatio voi tapahtua joko valmistusprosessissa tai pullotuksen aikana. Maitohappobakteerit muodostavat orgaanisia happoja tai diasetyyliä, jotka vaikuttavat oluen aromiin voimakkaasti tehden siitä härskin ja rasvahappoisen. Villihiivat ja bakteerit saattavat aiheuttaa olueen päätyessään fenolimaisen ja sulfidimaisen flavorin. Vierteen valmistusprosessin kriittisin vaihe on jäähdytys lämpötilojen 40 – 20 °C välillä kontaminaatoriskin vuoksi. (1) (10)

Vaippajäähdytin oli yksittäin riittämätön jäähdytyksessä, mutta sen käyttö yhdistettynä muiden jäähdytinlaitteiden käyttöön oli välttämätöntä saatujen tulosten saavuttamiseksi.

Upotettavaa kierrejäähdytintä käytettäessä laitteiston säiliössä ollut vierrevesi saatiin jäähdytettyä yhtä nopeasti kuin laitteiston valmistajan menetelmällä. Säiliön tyhjentäminen pumppaamalla fermentoriin vie myös aikaa, joka on huomioitava upotettavaa kierrejäähdytintä käytettäessä. Tämä aika säästyy levylämmönvaihdinta käytettäessä, sillä pumppaus fermentoriin tapahtuu samanaikaisesti jäähdytyksen kanssa.

Jäähdytyskokeissa D ja E päästiin upotettavaa vierteenjäähdytintä vaippajäähdytyksen lisänä käyttäen 50 minuutin jäähdytysaikaan, joka oli valmistajan ilmoittama aika jäähdytykselle täynnä olevalle Braumeister 200 L -laitteistolle jääkylmällä vedellä.

Jäähdytysajan oltua huomattavasti lyhyempi, olisi mahdollisesti perusteltua teetättää vastaava jäähdytinosa käytössä olevalle Braumeister 200 L -laitteistolle säiliöön sopivassa mittakaavassa. Ruostumatonta terästä olisi mahdollista käyttää valmistusmateriaalina, kuten laitteistossa on käytetty. Kuitenkin käytettäessä kuparia saataisiin lämmönjohtavuus huomattavasti tehokkaammaksi, sen ollessa kuparilla $400 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Jäähdytyskokeet Y ja Z osoittivat levylämmönvaihtimen tehokkuuden pumpattaessa säiliötä tyhjäksi fermentoriin. Levylämmönvaihtimella tehdyissä kokeissa päästiin myös 50 minuutin jäähdytysaikaan. Pumpattaessa voimakkuustasolla 8 asteikolla 1-10 havaittiin riittävän siihen, että vierrevesi jäähtyi käymislämpötilaan siirrettäessä samalla fermentoriin.

Jäähauteen tehokkuus tulovesiletkujen jäähdytyksessä jäi työn aikana epäselväksi. Niiden käyttö oli kuitenkin helppoa ja hyöty ilmennettävissä osittaisena jäiden sulamisena kokeiden aikana. Kylmäpatjojen käyttö saattoi kiihdyttää jonkin verran jäähdytyksen

alkuvaihetta, niiden kuitenkin oltua lämpimiä ja sulaneita jäähdytyksen edettyä. Tämä saattaisi olla peruste niiden ottamiselle käyttöön levylämmönvaihtimella vierrettä jäähdyttäessä. Lämpötilan laskemista nopeasti 86 °C lämpötilaan pumpun käynnistämiseksi voidaan nopeuttaa kiinnittämällä kylmäpatjat astian ympärille, kuten kuvassa 9.

Mikäli levylämmönvaihdinta käytettäisiin vierteen jäähdytyksessä, tulisi vierteen syötössä ennen levylämmönvaihtimen sisääntuloa olla suodatin viereteessä esiintyvän karkean aineksen suodattamiseksi.

Veden kulutuksen vähentämisen kannalta olisi eduksi taltioida lämmennyt jäähdytysvesi jatkokäyttöä varten. Jäähdytinnestettä kierrättävän jäähdytinlaitteiston hankkimisen etuna olisi, että jäähdytyksissä kuluvan jäähdytysveden tilalla jäähdytysnesteenä voitaisiin käyttää esimerkiksi glykolia. Glykolin käyttö jäähdytyksessä lyhentäisi jäähdytysaikaa entisestään.

LÄHTEET

1. Speidel, 2015. Speidels Braumeister Operation manual/brewing instructions; Item No: 45200, 46500.
2. Aittomäki Esa ja muita, 2002. Bioprosessitekniikka, Sanomapro OY.
3. Viitattu 19.6.2019 <https://fi.wikipedia.org/wiki/L%C3%A4mm%C3%B6nsiirrin>, jossa lähteenä (Kuppan Thulukkanam, 2013. Heat Exchanger Design Handbook, CRC Press.).
4. Viitattu 8.4.2019 <https://www.lappo.fi/product/887/vierteenjaahdytin-braumeistereille>
5. Viitattu 21.5.2019 <http://www.gold-bar.co.il/new/products/heat-exchangers/plate-heat-exchangers/#General>
6. Norkamaa Matti, 1997. Alfa Laval Oy Tuoteluettelo 2000, toinen painos, Huhmari: Karprint Ky.
- 7., Mansukoski Raimo, 1975, Yleinen Prosessitekniikka III Lämmönsiirtoprosessit, Ammattikasvatushallitus; Valtion painatuskeskus.
8. Viitattu 16.5.2019 <https://www.brouwland.com/en/our-products/brewing/brewing-equipment/wort-chilling/d/wortchiller-platemodel-ss-36-plates>
9. Viitattu 17.6.2019 https://noppa oulu.fi/noppa/kurssi/465115s/materiaali/465115S_ruostumaton_teras.pdf
10. T-M. Enari ja V. Mäkinen, 2014. Panimotekniikka, Espoo: Oy Panimolaboratorio-Bryggerilaboratorium AB.