



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **OLUEN VALMISTUKSEN MITTAUKSET JA MALLINTAMINEN**

Iivari Lappeteläinen

Prosessitekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Oluen valmistuksen mittaukset ja mallintaminen

Iivari Lappeteläinen

Oulun yliopisto, Prosessiteknikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, **30 s.**

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Dos. Aki Sorsa ja Dos. Jari Ruuska

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tehdä kirjallisuuskatsaus oluen valmistuksen mittauksiin ja mallintamiseen sekä miten niillä vaikutetaan oluen laatuun ja aromiin. Työssä käsitellään perinteistä oluen valmistustapaa, eikä käydä läpi eri olut tyyppien valmistustapoja.

Työn alussa on esitelty oluen valmistusprosessi. Valmistusprosessin vaiheet on esitelty vaihe vaiheelta tiivistetysti. Valmistusprosessin jälkeen kerrotaan oluen valmistuksen mittauksista ja esitetään, miten ne vaikuttavat oluen laatuun. Työn loppuosassa esitellään oluen eri pääprosessien mallintamista.

Esiteltäessä oluen valmistusta pyritään selvittämään, miksi erilaisia mittauksia ja mallintamista tehdään, jotta varmistetaan oluen korkea laatu. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että oluen laadun varmistamiseksi tarvitaan useita erilaisia mittauksia.

*Asiasanat: olut, mittaus, mallinnus*

# ABSTRACT

Measurements and modeling of beer production

Iivari Lappeteläinen

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Bachelor thesis 2023, 30 pp.

Supervisor(s) at the university: Dos. Aki Sorsa ja Dos. Jari Ruuska

The aim of this bachelor's thesis is to conduct a literature review on measurements and modelling of beer production and how they affect the quality and aroma of beer. The work deals with the traditional way of making beer, and does not go through the ways of making different types of beer.

At the beginning of the work, the beer manufacturing process is presented. The stages of the manufacturing process have been presented step by step in a condensed manner. After the brewing process, the measurements of the beer production are explained and how they affect the quality of the beer is presented. The final part of the work presents the modelling of the different main processes of beer.

When introducing beer production, the aim is to find out why different measurements and modelling are done in order to ensure the high quality of the beer. In conclusion, it can be stated that several different measurements are needed to ensure the quality of beer.

*Keywords: beer, measurement, modelling.*

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	5
2 OLUEN VALMISTUSPROSESSI .....	6
2.1 Mallastus .....	6
2.1.1 Liuotus .....	7
2.1.2 Idätys.....	7
2.1.3 Kuivaus .....	7
2.2 Jauhatus .....	8
2.2.1 Kuivajauhatus .....	8
2.2.2 Märkäjauhatus.....	8
2.2.3 Esikäsitteleväjauhatus .....	9
2.3 Mäskäys.....	9
2.3.1 Infuusiomäskäys .....	9
2.3.2 Keittomäskäys.....	9
2.4 Vierteren erotus .....	10
2.5 Vierteren keitto .....	10
2.6 Vierteren selkeytys .....	10
2.7 Vierteren jäähdytys .....	11
2.8 Käyminen .....	12
3 MITTAUKSET .....	13
3.1 Lämpötilojen mittaus.....	13
3.1.1 Mäskäyksen lämpötilan mittaus .....	13
3.1.2 Käymislämpötilan mittaus .....	13
3.2 Oluen katkeruuden mittaus.....	14
3.3 Oluen alkoholikäymisen mittaus .....	14
3.4 Oluen värin mittaus .....	15
3.5 Oluen etanolipitoisuuden mittaus.....	16
3.6 Oluen kuplan koon mittaus .....	16
3.7 Oluen ulkoisten laatuominaisuuksien mittaus tietokonemenetelmillä.....	16
4 MALLINTAMINEN .....	18
4.1 Mallasseoksen mallintaminen .....	19
4.2 Maltaan jauhamisprosessien mallintaminen ja optimointi .....	21

4.3	Vierteen erotusprosessin mallintaminen ja optimointi.....	22
4.4	Vierteen kiehumisprosessin mallintaminen ja optimointi humalalla .....	23
4.5	Kiehumisprosessin mallintaminen ja optimointi teknisestä näkökulmasta .....	23
4.6	Käymisen ja kypsymisen mallintaminen ja optimointi .....	24
5	POHDINNAT .....	25
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
7	YHTEENVETO .....	27
LÄHDELUETTELO		

# 1 JOHDANTO

Olut on yksi suosituimmista ja kulutetuimmista alkoholijuomista ympäri maailman (Díaz et al. 2022). Oluella on yli 8000 vuoden historia ja sen valmistusprosessi ei ole muuttunut juuri lainkaan vuosisatojen aikana. Tekniset edistysaskeleet mahdollistavat oluen tuotannon hienostuneemmalla ja tehokkaammalla tavalla. Lager-oluiden valmistaminen muista viljoista kuin ohrasta on yleistymässä. (Guido 2019)

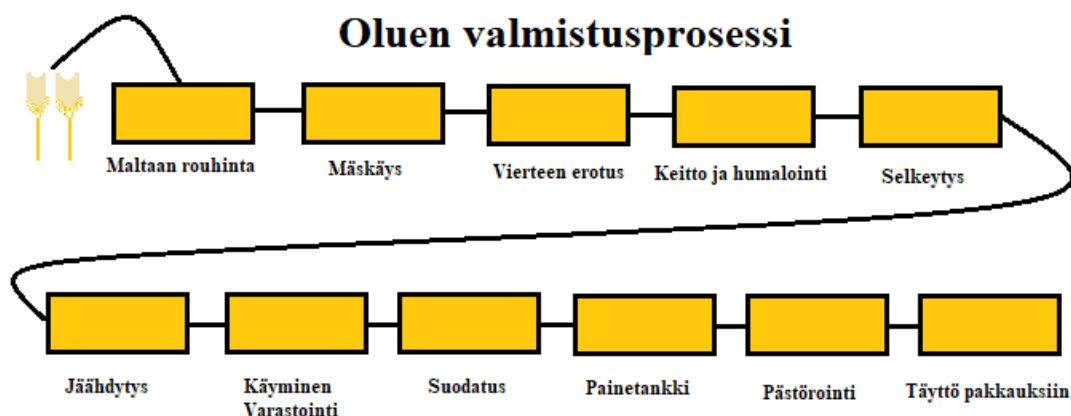
Vaikka oluen tuotannon tekniikka on ollut tiedossa jo vuosia, niin on edelleen tehtäviä, jotka suoritetaan tieteellisesti ja käytännön kannalta. Tänä päivänä kehitetään erilaisia juomavaihtoehtoja, jotka ovat hyödyllisiä ihmisen terveyden kannalta. Tällöin tuottajat optimoivat panimoprosessin niin, että juoman laatu varmistetaan kaikilta osin. (Shopska ym. 2022)

Oluen laatuun ja aromiin vaikutetaan pienilläkin muutoksilla, jotka takaavat tuotteen korkean laadun ja kuluttajan tyytyväisyyden. Nykyään on olemassa monia pienpanimoja, jotka eivät kuitenkaan pysty varmistamaan tuotteiden korkeaa laatua kalliiden mittausmenetelmien ja laitteiden takia.

Kandidaatintyön tavoitteena on esitellä perinteinen oluen valmistusprosessi ja kartoittaa sen erilaisia laatuun vaikuttavia mittauksia sekä mallintamista.

## 2 OLUEN VALMISTUSPROSESSI

Oluen biologinen valmistus muodostuu yksikköprosesseista: mallastuksesta, jauhatuksesta, mäskäyksestä, vierteen erotuksesta, kiehuttamisesta, selkeytyksestä ja jäädyttämisestä sekä käymisestä (Kuva 1). Oluen valmistuksen tärkeimmät raaka-aineet ovat vesi, mallasohra, humala ja hiiva. Valmistus tapahtuu panimossa, jossa mallas jauhetaan ja sekoitetaan haudutusveteen. Mäskäys tehdään joko infuusio menetelmällä tai keittomenetelmällä. Mäskäyksen tarkoituksena on erottaa vierre liukenemattomasta materiaalista, jonka jälkeen vierre keitetään kiehuvaan astiaan. Kun kiehuminen on valmis, vierre jäädytetään levylämmönvaihtimella haluttuun käymislämpötilaan asti. Tavoitteena on valmistaa mallasuute ja lisäaineet mahdollisimman tehokkaasti. Prosessin aikana polyfenolit hapettuvat, lipidiproteiinikomplekseja muodostuu ja proteiinit saostuvat. Oluen valmistuksesta ja sen eri vaiheista kerrotaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa. (Willaert 2007)



Kuva 1. Oluen valmistusprosessi kokonaisuudessaan. (mukaillen Sinebrychoff 2020)

### 2.1 Mallastus

Tavoitteena mallastuksessa on muuttaa viljoja, jotka sopivat tällöin mäskäykseen ja käymiseen. Mallastus on kontrolloitu itämisprosessi, jossa valmistetun mallaksen pitäisi mahdollistaa vierteen valmistus myöhemmin, jolloin se sisältää tarpeeksi aminohappoja, polypeptidejä, käymiskykyisiä sokereita ja välttämättömiä netaboliitteja, jotka tukevat hiivan kasvua. Itävyyden ilmetessä maltaassa jyvässä tapahtuu biokemiallisia muutoksia

ja niitä kutsutaankin modifiointiprosesseiksi. Mallastuksessa on kolme vaihetta: liuotus, idätys ja kuivaus. (Hornsey 2013)

### **2.1.1 Liuotus**

Mallatukseen otetaan vain jyviä, joiden kosteuspitoisuus on alle 20 %. Jos pidempi varastointi on tarpeen, jyvät tulee kuivata kosteuspitoisuudeltaan 12 %. Liuotuksessa jyvät liuotetaan vedessä kosteuspitoisuuden nostamiseksi, yleensä 42–46 %, jotta ne pystyvät itämään. Liian vähäinen veden saanti aiheuttaa heikon alkion kehityksen ja huonon muunnelman, kun taas liiallinen veden saanti aiheuttaa ylimodifiointia ja suuria mallastushäviöitä ja jopa alkion tuhoutumisen. Jyviä liuotettaessa ne altistetaan ajoittaisille tyhjennysjaksoille, jolloin hiilidioksidi leviää ja se edistää itävyyttä. Kun jyvät osoittavat itämisen merkkejä, ne siirretään itäviin. Noin 24 tunnin liuotuksen jälkeen tapahtuu geeniekspressio. Tätä pidetään tärkeänä ajankohtana muutoksille, koska se määrittää tulevat tapahtumat mallastuksen aikana. Myös jyvien itävyys ja mallastuksen laatu voivat vaihdella varastointiolosuhteiden mukaan. (Hornsey 2013)

### **2.1.2 Idätys**

Idätyksen tarkoituksena on möyhentää jyvän rakenne, jolloin se muuttuu helposti jauhautuvaksi. Idätyksessä aineenvaihduntalämpöä muodostuu. Tämä haihdutetaan haravavoinnilla säännöllisesti kahdesti päivässä. Haravoinnin tarkoitus on ehkäistä juurien mattatumista ja hiilidioksidin kertymistä prosessiin. Idätyksessä ympäristön lämpötila ei saa nousta yli 19 °C asteen. Lattiamallastuksella saadaan aikaan riittävä jäähditys konvektiolla ja hapen riittävyys saadaan aikaan puolestaan diffuusiolla, sillä viljapeti on matala. Lämpötilan noustessa petiä voidaan joko ohentaa levittämällä tai päinvastoin lämpötilan laskiessa petiä voidaan paksuntaa lämpötilan hallitsemiseksi. (Hornsey 2013)

### **2.1.3 Kuivaus**

Kuivauksen tarkoituksena on vähentää kosteuspitoisuutta varastointia varten ja lopettaa modifikaatioprosessi ja maltaan itäminen, jotta se saadaan jauhettavaan muotoon. Kuivauksella pyritään säilyttämään mallastuksen aikana syntyneet entsyymikompleksit. Kuivauksen aikana syntyy kemiallisia reaktioita, pääasiassa Maillard-reaktioita, joiden tuotteet ovat melanoidiineja, jotka tuovat olueen värin ja aromin. (Esslinger 2009)



## 2.2 Jauhatus

Jauhatuksen tarkoituksena on parantaa uuttoprosessia jauhamalla mallasta, jolloin tärkkelyspitoisen jyvän ytimen entsyymit tulevat paremmin ulottuville, joka parantaa uuttoprosessia. Jauhatustekniikka valitaan mäskäyksen ja vierteen erotusmenetelmän mukaan. Jauhatus suoritetaan olosuhteissa, jossa kuoren rakenne säilyy, kun erotusta tai mäskäysastiaa käytetään. Kuoria tarvitaan suodatuskerroksen rakentamiseen. Mallas yleensä kosteutetaan ennen jauhamista, jolloin kuoret vaurioituvat vähemmän. Jauhatus voi olla joko kuiva-, märkä- tai esikäsitteilyjauhatus. (Willaert 2007)

### 2.2.1 Kuivajauhatus

Kuivajauhatus on suosituin jauhatustekniikka. Telan pinnan sijainti ja malli, sekä maltaan modifikaatioaste määrittävät partikkelikokojakauman. Kuivajauhatukseen käytetään esimerkiksi rulla- ja vasaramyllyjä. Rullamyllyt toimivat ohjaamalla mallas lähekkäin sijaitsevien pyörivien telojen läpi. Teloille on olemassa erilaisia rullajärjestelyjä kuten kahdesta kuuteen rullien parit. Useimmissa malleissa on kaksi tai kolme paria, joissa on myös välierotusvaiheita, jotka mahdollistavat hienon materiaalin. Lisäjäysintää ei tarvita, kun taas kuorien erotus karkeasta materiaalista tarvitaan. Vasaramyllyssä mallas jauhetaan hienoksi jauhoksi suuressa pyörivässä rummussa, jossa on pieniä vasaroita, jotka liikkuvat vapaasti myllyssä ja työntävät kuivan viljan iskulevyä vasten. Hieno rouhe seulotaan rummun pohjassa. Vasaroiden pituus, koko, lukumäärä sekä seulan rei'ityskoko ja pyörimisnopeus vaikuttavat jauheen hiukkaskoon, kapasiteettiin sekä sähkönkulutuksen ja lämmöntuotannon määrään. (Willaert 2007)

### 2.2.2 Märkäjauhatus

Märkäjauhatuksessa kosteuspitoisuus nostetaan 20 %. Tällöin endospermi puristetaan pois rullien läpi viennin ansiosta. Mäskivesi lisätään heti jauhamisen jälkeen ja veden määrä riippuu maltaiden laadusta, modifikaatioasteesta ja saavutetusta liuotus asteesta. Liuotus kestää noin 10–30 minuuttia 30–50 °C lämpötilassa. Lämpötila ja kesto riippuvat muunnoksesta ja maltaan kosteuspitoisuudesta. Maltaiden kosteuspitoisuus nousee tällöin 25–30 %:iin. (Willaert 2007)

### 2.2.3 Esikäsitteilyjauhatuus

Esikäsitteilyjauhatuksessa mallas kosteutetaan kylmällä tai kuumalla vedellä tai höyryllä, jolloin kuoret taipuvat enemmän ja vaurioituvat vähemmän valsaamalla. Ytimen lämpötila ei saa nousta yli 40 °C asteen, ettei vaurioiteta entsyymejä. Kuorien vesipitoisuus kasvaa noin 1,5–1,7 % ja endospermin vesipitoisuus kasvaa 0,3–0,5 %. Käsitteilyn ansiosta kuoren tilavuus kasvaa, jauhe- ja kuorifraktio on helpompi erottaa, suodatusnopeus kasvaa siiviläammeessa, saanto lisääntyy ja tärkkelys hajoaa nopeammin. Esikäsitteily voidaan tehdä esimerkiksi käsitteilyruuvilla, jossa mallas kastuu ruuvikuljettimen läpi mentyään. (Willaert 2007)

## 2.3 Mäskäys

Mäskäys on prosessi, jossa maltaista tuotetaan sokereita vierteen saamiseksi, josta saadaan fermentoimalla olutta. Vesi on tärkeä ainesosa mäskäyksessä, sillä suurin osa oluen koostumuksesta on vettä (Díaz ym. 2022). Mäskäys aloitetaan sekoittamalla jauhetta ja veden haudutuksella. Tällöin nesteytys mahdollistaa, että mallasentsyymit pääsevät aktivoitumaan. Mäskäys onkin nykyään osa jauhamisprosessia. Mallaspitoisuus liukenee ja uute saadaan mäskäyksen aikana entsyymejä käyttämällä. Prosessi vaikuttaa esimerkiksi oluen alkoholipitoisuuteen, käymättömien sokerien pitoisuuteen, vierteen pH:hon ja fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten väriin. Mäskäysmenetelmät jaetaan infuusiomäskäykseen ja keittomäskäykseen. (Willaert 2007)

### 2.3.1 Infuusiomäskäys

Infuusiomäskäyksessä koko mäski kuumennetaan lopulliseen mäskäyslämpötilaan. Kuumennus voidaan tehdä portaittain tai lämpötila voidaan pitää vakiona. Infuusiomäskäyksen etuja: se on helppo automatisoida ja energiankulutus on 20–30 % pienempi kuin keittomenetelmässä, mutta panimon tuotto on pienempi. (Willaert 2007)

### 2.3.2 Keittomäskäys

Keittomäskäyksessä lämpötilaa nostetaan kuumentamalla osa mäskistä kiehuvaan ja ottamalla se erilliseen mäskikeittimeen ja pumpaamalla se takaisin muun mäskin joukkoon. Näin mäski lämmitetään haluttuun lämpötilaan. Keittomäskäys voidaan luokitella yhden-, kahden- tai kolmenkeittomäskäykseen, joista nykyään käytetään

yleisimmin yhden- tai kahdenkeittomäskäystä, sillä kolmenkeittomäskäys kuluttaa paljon energiaa. Keittomäskäykset ovat energiatehokkuudeltaan epäedullisia, mutta panimon tuotto on suurempi. (Willaert 2007)

## 2.4 Vierteen erotus

Vierteen erotuksen tarkoituksena on erottaa liukenemattomat aineet vierteestä. Liukenemattomat aineet ovat kuoria, taimia ja muita materiaaleja. Vierre erotetaan suodattamalla, jolloin mahdollisimman suuri osa uutteesta otetaan talteen (Willaert 2007). Suodatus voidaan tehdä usealla eri menetelmällä, kuten siiviläammeessa, mäskisuodattimessa, Strainmasterissa tai muilla suodatustyyppimenetelmillä. (Leiper & Miedl 2006)

## 2.5 Vierteen keitto

Vierteen keittäminen on hankala prosessi, jonka aikana tapahtuu kemiallisia, fysikaalisia ja biokemiallisia reaktioita. Keittäminen on energiaintensiivisin vaihe koko panimoprosessissa (Willaert 2007). Keittimet on varustettu lämmitysjärjestelmällä, joka lämmittää vierteen kiehumislämpötilaan. Keittoaika vaihtelee 30–120 minuutin välillä. Nestemäisiä lisäaineita ja humalaa voidaan lisätä eri kohdissa kiehumisen aikana. Kiehumisen jälkeen saostunut kiinteä aine poistetaan ja kirkas vierre jäädytetään valmiiksi käymistä varten. Prosessi stabiloii vierteen, poistaa epämiellyttäviä makuja ja uuttaa humalakomponentteja, jotka antavat oluelle erottuvan maun. (Leiper & Miedl 2006)

## 2.6 Vierteen selkeytys

Kuuma vierre täytyy selkeyttää mahdollisimman pian ennen jäädytystä poistamalla rupa ja humalan kiintoaineet, jotka eivät ole tarkoituksenmukaisia ja ne voivat aiheuttaa ongelmia myöhemmin. Rupa koostuu proteiini-, polyfenoli- ja hiilihydraattikomplekseista, jota on 2–8 g/l. Humalan määrä riippuu käytetystä humalatuotteen tyypistä. Rupan määrä vähennetään alle 0,1 g/l ennen jäädytystä. Saostunut rupa ei ole koskaan täydellinen, mutta sisään menevää kylmävierteen määrä tulee minimoida, sillä jos vierre jäähtyy ennen kirkastumista, rupa hyytyy ja jää astiaan. Tällöin hyytyneen rupan hiukkaset tuhoutuvat myöhemmin, kun vierre siirretään, jolloin

vierre on sameaa. Samea vierre voi hidastaa käymistä, huonontaa hiivan suorituskykyä, lisätä pilaantumisriskiä ja sameuttaa valmiin oluen. Rupan erottaminen voidaan tehdä sementoimalla, sentrifugoimalla tai suodattamalla. Erotusmenetelmiä on erilaisia riippuen käytetyn humalan tyypistä. Kokonaisissa humalissa vierre selkeytetään humalasiivilällä. Kun taas käytössä on pellettejä, vierteen selkeyttämiseen käytetään selkeytyssäiliöitä, suodattimia ja sentrifugointi- tai poreallaserotimia. (Leiper & Miedl 2006)

## 2.7 Vierteen jäähdytys

Erotuksen jälkeen vierre jäähdytetään tavoitellun käymislämpötilan mukaan. Jäähdytys tapahtuu yleensä levy- ja rungonlämmönvaihtimissa ja se suoritetaan mahdollisimman nopeasti selvennyksen jälkeen estäen liiallisen värin muodostumisen. Vierrettä on ilmastettava hiivan kasvun edistämiseksi. On tärkeää, että ilmastus tehdään kylmälle eikä kuumalle vierteelle, sillä kuuma vierre on erittäin altis mikrobipilaantumiselle. Kylmän vierteen käsittelyyn tarkoitetut laitteet on säilytettävä bakteerittomina. (Leiper & Miedl 2006)

Kun vierre on jäähtynyt, kylmä rupa, joka ei saostunut kuumana, poistetaan eri menetelmillä esimerkiksi kylmällä saostumissäiliöllä, jossa rupa poistetaan sedimentoimalla ennen hiivan lisäystä. Vierre pumpataan suljettuun saostumissäiliöön. (Leiper & Miedl 2006)

Vierrettä on ilmastettava, sillä vierteen hiiva tarvitsee happea lisääntyäkseen. Ilmastus voidaan tehdä vierteen jäähdyttimen kylmällä tai kuumalla puolella. Kuuman puolen etuna on lisääntynyt steriiliys ja sekoittuminen, mutta tällöin polyfenolit hapettuvat ja ne tummentavat vierrettä. Siksi ilmastus tehdään yleensä jäähdytettävään vierteeseen. (Leiper & Miedl 2006)

## 2.8 Käyminen

Goldhammerin (2008) mukaan käyminen on panimoprosessin ydin. Tavoitteena on käyttää hiivaa vierteen ainesosien, kuten sokerien ja aminohappojen, metaboloimiseksi etanoliksi, hiilidioksidiksi ja muiksi sivutuotteiksi. Nämä sivutuotteet vaikuttavat huomattavasti oluen makuun aromiin ja muihin ominaisuuksiin. Käyminen voi kestää 2–14 päivää. Osa hiivasta säilytetään käytettäväksi myöhemmin ja osa ylijäämästä toimitetaan hiivauutteiden tislaajille ja valmistajille. (Briggs ym. 2004)

## 3 MITTAUKSET

Tavanomaisia analyttisiä tekniikoita, kuten atomiabsorptiota, spektroskopiaa, kaasukromatografiaa ja massaspektroskopiaa sekä elektronisia menetelmiä ja kieliä käytetään yhä enemmän oluen laadun ja prosessin valvontaan ja mittauksiin sekä lopullisen tuotteen karakterisointiin. (Vautz ym. 2006) Seuraavissa kappaleissa esitellään erilaisia mittausmenetelmiä ja niiden käyttökohteita, jotka vaikuttavat oluen laatuun.

### 3.1 Lämpötilojen mittaus

#### 3.1.1 Mäskäyksen lämpötilan mittaus

On välttämätöntä tietää mäskäyslämpötilojen ja aikojen vaikutukset valitsemme loogiset mäskäysolosuhteet. Lämpötilat säädetään usein niin, että entsyymien lämpötilaherkkyys aktivoituu ennen lämpötilan nousemista niitä tuhoavalle tasolle. Lämpötilasäädöt voidaan toteuttaa suoralla höyryruiskutuksella, alivuorauksella, keittämällä, lämmittämällä suoraan astian seinien läpi tai lisäämällä kuumaa vettä. Prosessin lopussa vierteen talteenoton aikana lämpötila nousee kuumalla huuhtelunesteellä. Mäskin lämpötilan nostaminen lisää katalysoitujen kemikaalien ja entsyymien reaktion nopeutta, nopeuttaa proteiinien denaturoitumis- ja saostumisnopeutta sekä liukenemis- ja diffuusioprosesseja, kiihdyttää sekoittumista ja häiritsee modifioimattomien viljojen endospermikudoksien solujen rakennetta. Näin ollen jotkut aineet esimuodostuvat maltaissa. (Briggs ym. 2004)

#### 3.1.2 Käymislämpötilan mittaus

Kucharczykin & Tuszyńskin (2018) tutkimuksen mukaan käymislämpötila on yksi tärkeimmistä prosessiparametreista oluen valmistuksessa. Lämpötilan nostaminen sai käymisnopeuden lisääntymään ja lyhentämään prosessiaikaa. Korkeampi käymislämpötila vaikutti vierteen sokeriaineenvaihdunnan nopeuteen. Vaikka korkeampi lämpötila lyhensi prosessin kestoa, se lisäsi sivutuotteiden, kuten korkeampien alkoholien, esterien ja asetaldehydien muodostumista. Myös liian korkea lämpötila voi johtaa solunsisäisiin muutoksiin, kuolleiden hiivasolujen lisääntymiseen ja haihtuvien komponenttien pitoisuuden lisääntymiseen, kun taas liian alhainen lämpötila johtaa hitaaseen käymiseen. Korkeammat käymislämpötilat aiheuttavat uutteen nopeamman ja

täydellisemmän käymisen. Pienetkin prosessin lämpötilan muutokset ovat hyvin säädeltyjä ja kontrolloituja suurille käymissäiliöille.

### 3.2 Oluen katkeruuden mittaus

Humalan määrä tuottaa oluelle katkeran maun. Pääasialliset oluen katkeruuden aiheuttajat ovat iso-alfa-happoja. Oikein säädetty humalan määrä varmistaa tasaisen katkeruuden saman oluen eri erille. Siksi oluen katkeruuden mittaaminen on keskeinen osa tuotettaessa korkealaatuisia oluita. Humalan katkeruutta voidaan säätää suoralla elintarvikelaatuisten kaupallisten hydrattujen iso-alfa-happojen lisäyksellä. Pienten panimojen katkeruuden mittaamiseen tarvittavien laitteiden kustannukset ovat korkeita. (Calado ym. 2019)

Erilaisia menetelmiä katkeruuden mittaamiseen on paljon. Nykyaikaisia menetelmiä ovat muun muassa nestekromatografia (HPLC), ydinmagneettinen resonanssispektrometria (NMR), kapillaarielektroforeesi, fluoresenssispektoskopia ja elektroniset kielet. Suurin osa näistä menetelmistä tuottavat hyviä tuloksia, mutta ne vaativat kalliita laitteita ja korkeasti koulutettuja käyttäjiä. Lisäksi esimerkiksi HPLC vaatii iso-alfa-happojen standardiliuoksia, jotka ovat kalliita ja saatavuudeltaan vaikeita. Näin ollen ne voivat olla liian kalliita pienpanimoille. Perinteinen vaihtoehto katkeruuden mittaamiseen on International Bitterness Unit (IBU), joka mittaa valon absorbanssin mittauksen käyttämällä spektrofotometriä. Laajasta käytöstä huolimatta jotkin laitteet ovat kalliita ja menetelmä vaatii näytteen erotusvaiheen ja ei-toivotun orgaanisen aineen käytön. (Calado ym. 2019)

### 3.3 Oluen alkoholikäymisen mittaus

Yleensä käymisen säätelyyn käytetään epäsuoria menetelmiä (Vautz et al. 2006). Oluen käymisprosessia seurataan offline-vierrettiheysmittauksilla, kunnes saavutetaan ennalta määrätty etanolipitoisuus. Tämä vaatii manuaalista näytteenottoa ja vie paljon aikaa ja resursseja. Inline-mittaustekniikat mittaavat suoraan prosessimateriaalia ja online-menetelmät keräävät ja analysoivat näytteitä automaattisesti. Inline- ja online-tekniikat antavat reaaliaikaisia alkoholipitoisuuden mittauksia, varmistavat tuotteen laadun, havaitsevat poikkeamat, mahdollistavat tuotantolaitteiden tehokkaan ajoituksen ennustamalla päätepisteet ja vähentävät manuaalista näytteenottoa. (Bowler ym. 2021)

Useita inline- ja online-menetelmiä on tutkittu alkoholikäymisen seuraamiseksi. Ultraäänianturit ovat suosittuja niiden mittaustekniikan alhaisten kustannusten vuoksi, sillä niitä on aiemminkin käytetty käymisen tutkimiseen. Ultraäänianturit käyttävät korkeataajuisia ja pienitehoisia paineaaltoja materiaalin ominaisuuksien tutkimiseksi vahingoittamatta materiaalia. (Bowler ym. 2021)

### 3.4 Oluen värin mittaus

Panimon kyky ennustaa ja hallita oluen väriä on oluen ulkonäön yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, sillä kuluttajilla on tapana yhdistää väri makuun. Värin menetys nähdäänkin laadun heikkenemisenä, joten niillä on korkeat vaatimukset ulkoiselle laadulle. Oluen väri tulee ohramallas- ja vierretuotannosta. Väri syntyy aineista, kuten melanoidiineista ja polyfenoleista kemiallisten reaktioiden aikana. Polttoprosessin aikana tapahtuu Maillard-reaktio, joka tuottaa väri- ja aromikomponentteja. (Lukinac ym. 2019)

Ensimmäinen menetelmä värin mittaamiseen oli visuaalinen vertailumenetelmä, jossa väri ilmaistaan Lovibond-asteina. Menetelmässä verrataan visuaalisesti olutnäytteitä värillisten lasilevyjen viittauksiin. Tämän menetelmän heikkous on sen subjektiivisuus. Siksi uusia instrumentaalisia menetelmiä kehitetään värin arviointiin, kuten spektrofotometrinen ja tristimulus-menetelmä, jotka mahdollistavat värin objektiivisen arvioinnin. Tristimulus-menetelmässä näytteestä heijastava valo erotetaan suodattimen kautta kolmeen värikanavaan, jotka vastaavat ihmisen näkökykyä ja se vangitaan antureilla. Spektrofotometrinen menetelmä käyttää useita antureita mittaamaan spektrin läpäisykykyä tai heijastussuhdetta näkyvän valon spektrialueella (380–740 nm). American Society of Brewing Chemists (ASBC) on kehittänyt menetelmän oluen värin määrittämiseksi spektrofotometrillä nimeltään Standard Reference Method (SRM). SRM-menetelmä perustuu absorbanssimittaukseen, jossa väri ilmaistaan absorboituneen valon määränä aallonpituudella 430 nm 10 millimetrin kvartsikyvetti vettä vasten. European Brewing Convention (EBC) on kehittänyt myös vastaavan menetelmän. Molemmissa menetelmissä on tärkeää, että olutnäytteessä ei ole sameutta mittauksen aikana. On olemassa myös tietokonejärjestelmä (CVS), joka perustuu otetun valokuvan jokaisen pikselin analyysiin, joka mahdollistaa tarkan ja objektiivisen menetelmän. (Lukinac ym. 2019)



### 3.5 Oluen etanolipitoisuuden mittaus

Oluen ja hiivakäymisen etanolipitoisuuden online-mittaukseen on kehitetty kalvon sisääntuloionien liikkuvuuspektrometrinen menetelmä. Mittausjärjestelmä koostuu pääosin ioniliikkuvuuspektrometri, M90:stä ja oikean kokoisesta kalvon sisääntulosta. Liikkuvuuspektrometrissä mitataan samanaikaisesti positiivisia ja negatiivisia ioneja kuudessa eri kanavassa. Kalvon sisääntulossa käytetään mikrohuokoista polypropeenikalvoa näytteen syöttämiseen M90-instrumenttiin. Järjestelmä mahdollistaa etanolin analysoinnin. (Kotiaho ym. 1995)

### 3.6 Oluen kuplan koon mittaus

Kuplasumu on tärkeä laatuominaisuus ja kuluttajien suosima. Kuplasumu on yksi tärkeä laadun mittari ja siksi sitä on tärkeä mitata oluen valmistuksen aikana. Kuplasumun lisäksi on tärkeä määrittää kuplakoko, sillä se vaikuttaa oluen makuun ja maun jakautumiseen. On olemassa useita menetelmiä mitata kuplien muodostumistiheyttä, niiden kokoa ja jakautumista oluessa. Menetelmät on luokiteltu kolmeen ryhmään: kuva-analyysimenetelmät, optiset koetinmenetelmät ja sähkönjohtavuuden mittausmenetelmät. Kuva-analyysissä analysoidaan otettuja kuplakuvia. Optisissa koetinmenetelmissä analysoidaan kuplien tunkeutumispituutta kuplien intensiivisen kulkeutumisen alueella. Sähkönjohtavuuden mittausmenetelmissä analysoidaan kuplatilavuutta ultraääni- tai isokineettisellä näytteenottimella. (Lukinac ym. 2019)

### 3.7 Oluen ulkoisten laatuominaisuuksien mittaus tietokone menetelmillä

Tietokonejärjestelmä (CVS) sisältää erilaisia tekniikoita, kuten optisen, mekaanisen ja sähkömagneettisen instrumentoinnin sekä digitaalisen kuvankäsittelyn. CVS poimii automaattisesti tietoa digitaalisista kuvista ja se on nopea, objektiivinen ja tehokas menetelmä. CVS voi mitata tuotteiden ulkoisia ominaisuuksia, saada kvantitatiivista tietoa ja tunnistaa objektiivit digitaalisista kuvista. CVS toimii automatisoidusti, joka takaa tuotteen laadun. Järjestelmä koostuu peruskomponenteista, jotka ovat valaistuslaite, kuvanotto laite, kehys ja tietokonelaitteistot ja ohjelmistot. Valaistusta käytetään objektin valaistukseen testissä. Kuvanotto laite on digitaalikaamera tai skanneri. Kuvat muutetaan sähkösignaaleiksi kameralla ja signaalit digitalisoidaan kehyksellä. Tietokonelaitteistot ja ohjelmistot antavat tallennustilaa laskentakapasiteetille ja kuville tietyillä

ohjelmistosovelluksilla. Kuvien tarkkuutta ja analyysiä parannetaan korkea resoluutioisilla näytöillä. Kuvankaappaus, käsittely ja analyysi kuuluvat tietokoneen sisätyviin toimintoihin. Kuvankäsittelyllä parannetaan laatua ja vähennetään vikoja, kuten kohinaa, vääristymistä, vääränlaista valaistusta ja tarkennusta sekä kameran liikkeistä aiheutuvia virheitä. Analyysi erottaa kiinnostuksen kohteen taustasta kvantitatiivisten tietojen saamiseksi analysoidusta objektiivista. Käsittely ja analysointi sisältää monia vaiheita, jossa ensimmäisenä on kuvan hankinta ja esikäsittely laadun parantamiseksi, kuten kontrastien korjaaminen. Toinen vaihe sisältää segmentoinnin, esityksen ja kuvauksen. Viimeisessä vaiheessa tilastollisia työkaluja käytetään tietojen tunnistamiseen ja tulkitsemiseen. (Lukinac ym. 2019)

## 4 MALLINTAMINEN

Oluen valmistuksessa tärkeimmät ja välttämättömät parametrit ovat tuotannon pääprosesseissa. Pääprosesseja ovat mallasseosten kehittäminen, vierteen saanti mäsäyksessä, erotuksessa ja kiehutuksessa sekä käyminen ja kypsyminen. Kaikissa vaiheissa on useita teknologisia operaatioita, kietoutuneina parametreihin, jotka vaikuttavat valmiin oluen laatuun. Tietoja matemaattisista riippuvuuksista käytetään kuvaamaan oluen tuotannon eri vaiheita. Seuraavaksi käydään yleistä lähestymistapaa kuvaamaan mallintamis- ja optimointimenetelmiä riippumatta oluttyypistä ja näitä voidaan käyttää eri oluttyyppien mallintamiseen ja optimointiin. Jokaisessa tuotantovaiheessa oleva parametrivalinta takaa tarvittavan laadun ja mahdollisuuden hallita prosessia oikealla tavalla. Taulukossa 1 on esitetty joidenkin perusprosessien mallintamis- ja optimoinnin parametreja (Shopska ym. 2022)

**Taulukko 1.** Oluen tuotannon perusprosessien mallintamis- ja optimoinnin parametrit. (mukailten Shopska ym. 2022)

No.	Prosessi	Prosessin parametrit	Mallintamismenetelmä	Kohdefunktiot
1	Mallasseoksen mallinnus	Mallastetun/mallastamattoman raaka-aineen suhteet	Simplex-menetelmät seosten mallintamiseen ja optimointiin	i. Uutteen saanto ii. Fenolikapasiteetti iii. Antioksidantti aktiivisuus iv. Vierteen väri v. Muut vierteen parametrit
2	Jyrsintä	Jyrsintäaste	Empiirinen	Jauhetun maltaan hiukkaskoko
3	Mäskäys	Mäskäysmenetelmä Aika-lämpötila mäskäysmenetelmä	Empiirinen mäskäysmenetelmän valinta Yhden tekijän kokeiluja Kokeen suunnittelu Entsyymireaktiokinetiikka	i. Uutteen saanto ii. Käymiskykyisten sokereiden saanto iii. Fenolikapasiteetti iv. Antioksidantti aktiivisuus v. Muut vierteen parametrit
4	Vierteen erotus	Mäskin viskositeetti Erotuksen lämpötila Erotuksen aika Erotuksen paine Suodatuskakun korkeus (erotustynnyreille)	Yhden tekijän kokeet Kokeen suunnittelu mäskäystilan optimoimiseksi	i. Mäskin viskositeetti ii. Erotus aika
5	Vierteen kiehuttaminen	Haihtuvuus Lämmönvaihtopinta Sekoituksen/keittämisen voimakkuus Vierteen kiehumisaika Uutetun humalan katkeruuden määrä	Yhden tekijän kokeet Simplex-menetelmät sekoitusten mallintamiseen ja optimointiin humalalla	i. Haihtuvuus ii. DMS-haihtuvuus iii. Humala iv. Kiehumisintensiteetti
6	Oluen käyminen ja kypsyminen	Lämpötila Aika Alkoholi Vierteen uutepitoisuus Metaboliitit – esterit, korkeammat alkoholit, vierekkäiset diketonit, aldehydit	Yhden tekijän kokeet lämpötilan määrittämiseen Prosessin kinetiikka	i. Lämpötila ii. Käymisen ja kypsymisen aika iii. Estereiden, aldehydien, vierekkäisten diketonien, korkeampien alkoholien, alkoholin tuottokertoimet iv. Biomassan ominaiskasvu

#### 4.1 Mallasseoksen mallintaminen

Seoksia mallinnettaessa tutkitaan seoksen eri komponenttien osuuksia riippumattomiksi tekijöiksi ja niiden vaikutusta yhteen tai useampaan kohdetoimintoon. Komponenttien

kokonaismäärä seoksessa on koko mallasmäärä. Tällöin on mahdollista tutkia seoksen yksittäisten komponenttien vaikutusta. Erilaisia parametreja voidaan asettaa kohdefunktioiksi, kuten vierteen väri, antioksidanttikapasiteetti ja fenoliyhdisteiden pitoisuus. Kohdefunktio riippuu vain seoksen yksittäisen komponentin osuudesta eikä seoksen määrästä. (Shopska ym. 2022)

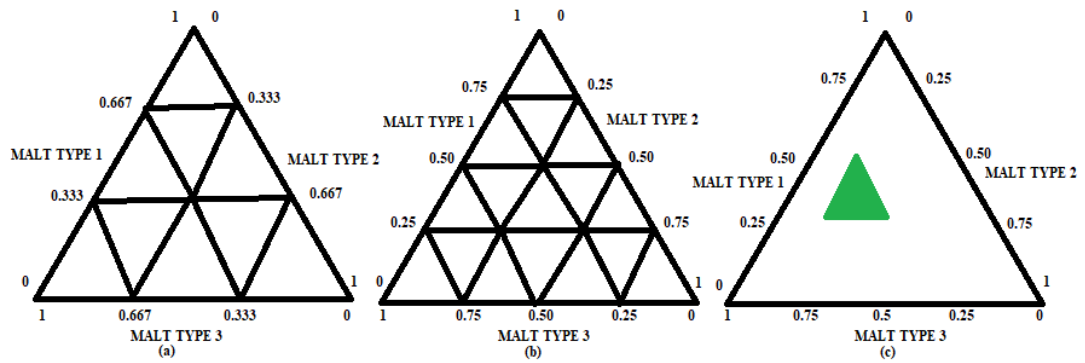
Simplex-ristikkomalleilla muodostetaan muotoa  $\{q,m\}$  oleva hila, jossa  $q$  on seoksen komponenttejen lukumäärä ja  $m$  on... Koepisteiden koordinaatit määritellään siten, että yksittäisen komponentin osuudet ovat tasaväliset välillä 0–1: (Shopska ym. 2022)

$$x_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1, i = 1, 2, 3, \dots, q, \quad (1)$$

kuvaamalla näin kaikkia mahdollisia yhdistelmiä seoksessa. Tämän suunnitelman mukaan kaikki pisteet, paitsi keskipiste, sijaitsevat simpleksin rajoilla. Yksipuolisen hilan toteutuksen tuloksena tavoitefunktion suhteen saadaan ns. kanoniset yhtälöt. (Shopska ym. 2022)

Simplex-Centroid malleilla kehitetään suunnitelma  $2 \cdot q - 1$  näytemäärällä, jossa  $q$  on seoksen komponenttien lukumäärä. Suunnitelman pisteet vastaavat  $q$  permutaatiota tai  $q$  seoksen yksittäisiä komponentteja tai kaikkia kaksikomponenttisia seoksia jne. loppuun riippuen  $q$ :sta. Suunnitelma johtaa myös kanonisiin yhtälöihin. Molemmat seosmallinnukset on rakennettu siten, että pisteet sijaitsevat simplex-rajoilla yhteistä keskipistettä lukuun ottamatta. Nämä kaksi suunnitelmaa ovat hyödyllisiä mallassekoitusten mallintamisessa, mutta yleisesti mallasseoksen optimointi ei ole helppo tehtävä, sillä mukaan pitäisi ottaa myös sellaisia kohdefunktioita, joilla ei ole numeerista lauseketta. (Shopska ym. 2022)

Pakotetuissa seosmalleissa asetetaan rajoituksia komponentin määrälle. Tällöin on mahdollista käyttää koesuunnitelmaa rajoitusten käyttöön otolla. Rajoitukset voivat olla ylä- ja alarajoissa. Yleisessä tapauksessa rajoitussuunnitelma on jälleen simpleksi, joten on mahdollista ottaa käyttöön uusi simpleksi pisteiden koordinaateilla. Tämä yksinkertaistus mahdollistaa jo kuvattujen kahden menetelmän mallintamisen käytön pienessä tilassa. Pakotettua seosmallia käytetään mallintamaan mallastamattomien raaka-aineiden osallistumista seokseen. Kuvassa 2 esitetään perustyyppit seosten mallintamiseen. (Shopska ym. 2022)



Kuva 2. Simplex-mallien perustyytit. (a) Simplex-ristikkomalli, (b) Simplex-Centroid malli, (c) Pakotettu seosmalli. (mukaillen Shopska ym. 2022)

## 4.2 Maltaan jauhamisprosessien mallintaminen ja optimointi

Prosessin mallintaminen ja optimointi liittyvät jyrinnän fysikaalisen luonteen tuntemiseen ja toisaalta sitä seuraavan mäsäysprosessin biologiseen luonteeseen. Prosessissa käytetään niin sanottua ”optimaalista jauhausastetta”, joka antaa suhteen yksittäisille osille mallasjauhossa. Tämä määräytyy yleensä empiiristen riippuvuuksien perusteella, koska se riippuu monista ei-numeerisista tekijöistä. Jauhausprosessin mallintamisen toinen tärkeä piirre on, että eri raaka-aineet jauhetaan eri suuruisiksi. Yleensä mallasraaka-aineet jauhetaan karkeammaksi, kun taas mallastamattomat raaka-aineet jauhetaan hienommaksi entsyymisysteemin vähäisen määrän vuoksi. Myös viljan eri osien erilainen fysikaaliskemiallinen koostumus on tärkeä ehto jauhausprosessissa. (Shopska ym. 2022)

Mallasjauhon sekoittaminen veteen ja sitä seuraava mallasmäskin sokerointi ovat päävaiheita, joissa vierreteen laadullinen ja määrällinen profiili muodostuu. Näissä kahdessa vaiheessa tapahtuu biopolymeerien entsymaattinen hydrolyysi, jonka astetta ja syntyvän vierreteen laatua säädellään ns. aikalämpötilatauoilla. Tällöin liukoiset aineet siirtyvät vierreeseen ja saatavilla olevat korkeamolekyylipainoiset aineet liukenevat vierreeseen pääasiassa entsymaattisten reaktioiden kautta. (Shopska ym. 2022)

### 4.3 Vierteen erotusprosessin mallintaminen ja optimointi

Prosessin tapahtuu kahdessa vaiheessa: vierteen valuttaminen, joka on täysin hydrodynamiikan lakien alainen ja käytettyjen jyvien pesu, joka on täysin massansiirron lakien alainen. (Shopska ym. 2022)

Vierteen erottamisprosessia kuvaa Poiseuillen laki, joka kirjoitetaan muunnetussa muodossa ja tunnetaan nimellä Darcyn yhtälö: (Shopska ym. 2022)

$$Q = \frac{\pi p r^4 t s z}{8 \eta l}, \quad (2)$$

missä  $Q$  on suodatetun nesteen tilavuus ajan  $t$  pinnan läpi  $s$  ( $m^3$ ),  $p$  paine-ero suodatinsulun molemmilla puolilla (Pa),  $r$  yhden kapillaarin keskimääräinen säde (m),  $s$  suodatuspinta-ala ( $m^2$ ),  $z$  kapillaarien lukumäärä neliömetrissä ( $m^2$ ),  $\eta$  dynaaminen viskositeetti (Pa\*s) ja  $l$  on yhden kapillaarin keskipituus (m).

Laki osoittaa sen, millä tekijöillä on suurin vaikutus suodatusprosessiin. Ensimmäiset tekijät ovat suodatuskerroksen rakenne ja paksuus, jotka ovat erittäin tärkeitä parametreja klassisissa suodatinlaitteissa. Optimointi liittyy ensisijaisesti jauhamistavan ja -menetelmän muutokseen. Karkea jauhatus muodostaa löysän ja erittäin läpäisevän kerroksen, mutta tuloksena oleva vierre on sameaa. Hienojauhatus on edullista uutteen uuttamiselle, mutta se vaikeuttaa suodatusta, sillä muodostuu tiheä kerros, jossa on pieniä kapillaareja, jotka tukkeutuvat nopeasti hienoista hiukkasista. Suodatusnopeus määräytyy kapillaarien lukumäärän ja koon mukaan. Jos kaikki muut asiat ovat pysyneet samansuuruisina, kapillaarit ovat pidempiä paksun suodatuskerroksen kanssa, joka johtaa suodatusnopeuden heikkenemiseen. Uuteaineiden diffuusio tapahtuu samanaikaisesti mäskin kuivatuksen kanssa. Tehokas uutto ja uuttoaineiden korkea saanto saadaan käyttämällä pieniä hiukkasia, joissa aineiden kulkema matka on minimoitu. Hydrodynaamisen vierteen erotusprosessin ja uuteaineiden diffuusion välisen yhteyden olemassaolo viittaa kompromissiin jauhatusasteessa ja suodatuspinnan ominaiskuormituksessa. (Shopska ym. 2022)

Poiseuillen laki osoittaa merkittävän vaikutuksen mallaslietteen viskositeettiin, joka riippuu paljon prosessin lämpötilasta. Lietteen korkea lämpötila alentaa nestefaasin viskositeettia ja lisää suodatusnopeutta. Liällinen lämpötilan nousu ei hyödytä prosessia;

syynä tähän on liukenemattoman tärkkelyksen sokeroituminen ja nesteen viskositeetin nousu. Usein vierteen erotusprosessi on osa mäsikäysprosessin tutkimusta, sillä mäskiviskositeetti voi olla mäsikäystavan optimoinnin tavoitefunktio. (Shopska ym. 2022)

#### 4.4 Vierteen kiehumisprosessin mallintaminen ja optimointi humalalla

Vierteen kiehumisprosessi on yksi oluen tuotannon pääprosesseista. Uusien tekniikoiden ansiosta prosessi on kehittynyt paljon ja kiehumisen tarkoitukset voidaan tiivistää lyhyesti seuraaviin asioihin: Ensymien inaktivointi, vierteen sterilointi, humalan uuttaminen ja isomerointi, proteiinien hyytyminen vierteessä, proteiinien/polyfenolikompleksien muodostuminen, aromaattisten ja värikompleksien muodostuminen, pH:n laskeminen, vierteen konsentraatio veden haihtumisella, haihtuvien komponenttien muodostuminen vierteessä jauhatuksen aikana ja haihtuvien komponenttien haihtuminen, jotka on lisätty humalan kanssa. (Shopska ym. 2022)

#### 4.5 Kiehumisprosessin mallintaminen ja optimointi teknisestä näkökulmasta

Teknisestä näkökulmasta tärkein mallinnettava elementti on energiankulutus. Vesihöyryn muodossa käytetty energia tulisi minimoida huomioimalla useita teknisiä päätöksiä, keskittyttäessä vierteeseen. Vierteen kiehumisprosessi on energiantensiivinen riippuen käytetystä panimojärjestelmästä. Tekniset päätökset eivät saa vaikuttaa kiehumisen lopussa saatujen vierteen laatuun. Tiedetään, että vierteen kemiallisten reaktioiden nopeus kasvaa kiehumislämpötilan noustessa. (Shopska ym. 2022)

Teknisestä näkökulmasta kiehumisprosessin mallintaminen sisältää laitteen uusien rakenteiden kehittämistä tai olemassa olevien rakenteiden optimoimista. Tällöin sovelletaan eri lähestymistapoja: keitinmateriaalin muutos, keitin lämmönvaihtoprosessin tutkimus ja laskennallisen nesteen dynaamisten menetelmien soveltaminen vierteen virtauksen mallintamiseksi laitteen sisällä. Optimointiprosessiin voi tyypillisesti sisältyä lämmönsiirtonopeuden mallintaminen, joka kuvataan Fourier-yhtälöllä, kun muutetaan laitteen parametreja: (Shopska ym. 2022)

$$q = \frac{K_a AT}{x}, \quad (3)$$



jossa,  $q$  on lämmönsiirtonopeus,  $K_a$  on materiaalin lämmönjohtavuuskerroin,  $A$  on poikkileikkaus, jota pitkin lämmönvaihto tapahtuu,  $\Delta T$  on keskimääräinen lämpötilaero höyryn ja kuumennetun nesteen välillä ja  $X$  on seinämän paksuus.

Empiirisiä riippuvuuksia tarvitaan mallintamisprosessissa prosessin monimutkaisuuden sekä lämmön pinnoille kertymisen vuoksi. Vierteen kiehumisprosessin alku johtaa lämpöfysikaalisten parametrien ja sen tiheyden muutokseen. Lämmityspinnalle muodostuu hieno vesihöyrykalvo intensiivisen kiehumisen aikana, joka vähentää lämmönsiirron tehokkuutta. Vaikutus on merkittävä järjestelmissä, joissa on sisäinen lämmityskappale johtuen siitä, että se vähentää vierteen sekoittamisen voimakkuutta. (Shopska ym. 2022)

#### 4.6 Käymisen ja kypsytymisen mallintaminen ja optimointi

Käymisprosessin mallintamisen kannalta matemaattisten riippuvuuksien valinta mallin kuvaamiseksi on tärkeää. Oluen valmistuksen käymisprosessi voidaan jakaa aineenvaihduntatuotteiden osalta kahteen pääosaan. Mallin ensimmäinen osa sisältää solujen ensisijaisen aineenvaihdunnan, kuten substraatin kulutuksen, etanolin kertymisen, CO<sub>2</sub>:n muodostumisen ja biomassan kertymisen. Mallin toinen osa sisältää solujen sekundaarisen aineenvaihdunnan ja kuvaa metaboliittien pääryhmien eli esterien, aldehydien, korkeampien alkoholien ja vierekkäisten diketonien kertymistä. Kineettinen malli perustuu alkoholin käymisprosessin biokemian tuntemukseen ja sitä kehitettäessä ja sovellettaessa on otettava huomioon hiivan aineenvaihdunnan eri elementit. (Shopska ym. 2022)

Aktiivinen käymisprosessi riippuu useista tekijöistä, kuten käymiseen käytetyn vierteen koostumuksesta, liuennan hapen määrästä, siirrosten määrästä ja iästä ja käymislämpötilasta. Näiden parametrien ohjauksella voidaan ohjata käymisprosessia suuntaan tai toiseen ja muuttaa tuotteen maku- ja aromiprofilia. Käytettävän mallin laadun kannalta on olennaista valita yhtälö, jota käytetään kuvaamaan hiivasolujen ominaiskasvunopeutta,  $\mu$ . Yleensä käytetään monodipohjaisia riippuvuuksia. (Shopska ym. 2022)

## 5 POHDINNAT

Oluen valmistaminen on todella tarkka ja yksityiskohtainen prosessi. Jokainen vaihe vaikuttaa seuraavaan vaiheeseen, joka vaikuttaa taas lopputulokseen. Kaikki mittaukset, jotka oluen valmistuksessa tehdään, ovat todella tärkeitä, jos halutaan tuottaa korkealaatuista olutta. Esimerkiksi moni tuskin tietää, että oluesta voidaan mitata kuplan koko, joka on oluen yksi tärkeimmistä laadun parametreista ja kuluttajien suosima ja maun kannalta tärkeä. Kuplasumu ja kuplan koko vaikuttavat suoraan oluen makuun ja maun jakautumiseen. Suurimmassa osassa lähteissä korostettiin oluen värin ja katkeruuden merkitystä sen laadun kannalta. Nämä laadun mittarit ovat todella tärkeitä, puhuttaessa hyvästä oluesta.

Suurin osa mittausmenetelmistä on kalliita käyttää ja hankkia. Miten siis pienpanimot saavat tehtyä yhtä korkea laatuista olutta kuin kokeneemmat ja pitkään alalla olleet valmistajat? Toisaalta pienpanimojen oluet maksavat yleensä enemmän kuin isompien valmistajien oluet. Tulevaisuudessa mittausjärjestelmiä voitaisiin kehittää halvemmiksi, jolloin pienpanimoilla olisi mahdollisuus kasvaa markkinoilla.

Kaikissa käytetyissä lähteissä ei puhuttu sen enempää valmistuksen tai mittausten energian kulutuksesta tai niiden vähentämisestä. Kuitenkin valmistuksen energiantensiivisin vaihe on vierteen kiehattaminen ja siinä tärkeimpänä mallinnettavana asiana on energiankulutus. Nykyään pyritään vähentämään energiankulutusta teollisuuden alasta riippumatta.

Tärkeimpiin mittauksiin, jotka vaikuttavat oluen makuun ja aromiin, kannattaisi panostaa enemmän kuin itse oluen ulkonäköön perustuviin mittauksiin. Lähes kaikki mittaukset ovat kalliita laitteiden tai itse mittaustoiminnon kannalta. Esimerkiksi värin mittaamiseen ei tarvitsisi välttämättä panostaa, mutta toisaalta kuluttajat yhdistävät värin makuun.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Oluen laadun varmistamiseksi tarvitaan useita eri mittauksia. Vaikka oluen valmistusprosessi on haastava ja mittaukset vaativat kalliita investointeja laitteisiin, silti yhä enemmän syntyy pienpanimoja, jotka valmistavat erilaisia oluita ympäri maailman, mukaan lukien Suomessa. Kuluttajat tulevat arvostamaan edelleen ulkoisia ominaisuuksia, kuten väriä ja katkeruutta.

Olut tulee olemaan suosittu juoma ja sen valmistaminen tulee yleistymään. Nykyään kuitenkin keskitytään yhä enemmän valmistamaan ihmisen terveydelle parempia alkoholituotteita, kuten vähäkalorisia tai kalorittomia juomia. Myös alkoholittomien oluiden tuotanto on kasvanut. Energiankulutusta pyritään vähentämään ja käyttämään enemmän vihreää energiaa ja mahdollisimman paljon kierrätettyjä materiaaleja oluen laadusta tinkimättä.

## 7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä kirjallisuuskatsaus oluen valmistusprosessin mittaamenetelmiin ja mallintamiseen, joilla taataan oluen korkea laatu. Oluen valmistusprosessi on todella tarkka ja pienet asiat ja muutokset vaikuttavat sen valmistukseen ja lopulliseen tuotteeseen. Tänä päivänä oluen valmistusmenetelmät kehittyvät jatkuvasti hienostuneempaan suuntaan, mutta valmistuksen perusta on pysynyt lähes samana. Kuitenkin uusia oluiden eri makuja ja terveydelle hyödyllisiä tuotteita kehitetään jatkuvasti.

Työn perustana käytettiin prosessikuvausta, jonka vaiheet tiivistettiin tärkeimpiin vaiheisiin oluen valmistuksen kannalta. Prosessikuvauksen avulla esitettiin valmistuksen tärkeimmät vaiheet ja kartoitettiin tärkeimmät tekijät laadun varmistamiseksi.

Työssä esitettiin erilaisia lähestymistapoja oluentuotannon pääprosessien mallintamiseen. Työssä esitettiin myös, miten tietokonemenetelmillä pystytään mallintamaan kiehumisprosessia. Prosessien mitta- ja mallintamismenetelmät ovat kalliita ja energiaa kuluttavia, jolloin pienpanimoilla ei ole mahdollisuutta ja varaa tuottaa niin korkealaatuisia tuotteita kuin isommat valmistajat.

## LÄHDELUETTELO

- Bowler, A., Escrig, J., Pound, M. and Watson, N., 2021. Predicting alcohol concentration during beer fermentation using ultrasonic measurements and machine learning. *Fermentation*, 7 (1), 34.
- Briggs, D. E., Brookes, P. A., Stevens, R. and Boulton, C. A., 2004. *Brewing: science and practice*. Woodhead Publishing.
- Calado, L. S., Lacerda, A. L. F., Fiaux, S. B., Sphaier, L. A., Silva, V. N. H. and Peixoto, F. C., 2019. Low-cost fluorescence-based method for beer bitterness measurement. *Journal of Food Engineering*, 262, 9–12.
- Díaz, A. B., Durán-Guerrero, E., Lasanta, C. and Castro, R., 2022. From the Raw Materials to the Bottled Product: Influence of the Entire Production Process on the Organoleptic Profile of Industrial Beers. *Foods*, 11 (20).
- Esslinger, H. M., 2009. *Handbook of brewing: processes, technology, markets*. John Wiley & Sons.
- Goldhammer, T., 2008. *The Brewers Handbook: The Complete Book to Brewing Beer*. Apex.
- Guido, L. F., 2019. Brewing and craft beer. *Beverages*.
- Hornsey, I. S., 2013. *Brewing*. Royal Society of Chemistry.
- Kotiahho, T., Lauritsen, F. R., Degn, H. and Paakkanen, H., 1995. Membrane inlet ion mobility spectrometry for on-line measurement of ethanol in beer and in yeast fermentation. *Analytica chimica acta*, 309 (1–3), 317–325.
- Kucharczyk, K. and Tuszyński, T., 2018. The effect of temperature on fermentation and beer volatiles at an industrial scale. *Journal of the Institute of Brewing*, 124 (3), 230–235.

- Leiper, K. A. and Miedl, M., 2006. Brewhouse technology. *In: Handbook of brewing*. CRC Press, 398–461.
- Lukinac, J., Mastanjević, K., Mastanjević, K., Nakov, G. and Jukić, M., 2019. Computer vision method in beer quality evaluation—A review. *Beverages*, 5 (2), 38.
- Shopska, V., Denkova-Kostova, R. and Kostov, G., 2022. Modeling in brewing—A review. *Processes*, 10 (2), 267.
- Sinebrychoff, 2020. Oluen valmistus Sinebrychoffilla. Saatavissa: <https://www.sinebrychoff.fi/olut/oluen-valmistus-sinebrychoffilla/> Viitattu 15.2.2023
- Vautz, W., Baumbach, J. I. and Jung, J., 2006. Beer fermentation control using ion mobility spectrometry—Results of a pilot study. *Journal of the Institute of Brewing*, 112 (2), 157–164.
- Willaert, R., 2007. The beer brewing process: Wort production and beer. *Handbook of food products manufacturing*, 2, 443.