



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sami Raitakangas

Hiilihapotus

Opinnäytetyö

Syksy 2024

Insinööri (AMK), Bio- ja elintarviketekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Bio- ja elintarviketekniikka

Tekijä: Sami Raitakangas

Työn nimi alaotsikoineen: Hiilihapotus

Ohjaaja: Ilmari Äijö

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 25

Liitteiden lukumäärä: 3

Työssä selvitetään hiilidioksidin liukenemiseen vaikuttavia tekijöitä, sekä Seinäjoen ammattikorkeakoululta löytyvän oluthanan aiheuttama hiilidioksidikato. Oluthanan hiilidioksidikatoa verrattiin pullontäyttöpistooliin. Työn tilasi Seinäjoen ammattikorkeakoulu.

Hiilidioksidia käytetään elintarviketeollisuudessa. Hiilidioksidia saadaan liuotettua käymisellä tai keinotekoisesti pakottamalla juomiin. Työssä käytetään Henryn lakia liuenneen kaasun konsentraation laskemiseen. Konsentraatioon tarvitaan laskettavaksi osapaine ja Henryn vakio. Vakio on lämpötila- ja kaasukohtainen. Osapaineen laskemisessa käytetään ideaalikaasuteoriaa. Hiilihapotettua juomaa voidaan tarjoilla paineella toimivalla annostelujärjestelmällä.

Hiilidioksidin liukenemista käsiteltiin kahdella tavalla. Ensimmäinen koe oli pikaliukenemistesti, jossa veteen liuotettiin hiilihappoa puolen tunnin ajan eri lämpötiloissa ja paineissa. Kokeen tarkoitus oli osoittaa, kuinka paine ja lämpötila vaikuttavat hiilidioksidin liukenemiseen. Toinen koe oli oluthanan ja pullontäyttöpistoolin välisen hiilidioksidikadon vertailu. Koetta varten vesi paineistettiin hiilidioksidilla 20 tunnin ajan. Sen tarkoituksena oli näyttää, vapauttaako oluthana epätavallisen paljon hiilidioksidia liuoksesta.

Työstä saatujen tulosten mukaan hiilidioksidi liukenee kylmään veteen voimakkaammin ja helpommin kuin lämpimään. Paineen vaikutus oli pienempi. Sen nostaminen vahvistaa ja parantaa liukenemista. Oluthana ja täyttöpistooli vapauttavat molemmat hiilidioksidia juomaa vapauttaessa. Tapojen väliset erot eivät olleet merkittävien suuret.

¹ Asiasanat: hiilidioksidi, liukoisuus, lämpötila, paine

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Food Processing and Biotechnology

Author/s: Sami Raitakangas

Title of thesis: Carbonation

Supervisor(s): Ilmari Äijö

Year: 2024

Number of pages: 25

Number of appendices: 3

This thesis researches the factors of carbon dioxide solubility, and the carbon dioxide loss of the beer tap found at the University of Applied Sciences of Seinäjoki. The beer tap's carbon dioxide loss was compared to bottle filling gun. This thesis was made for the University of Applied Sciences of Seinäjoki.

Carbon dioxide is used in the food industry. Carbon dioxide is added to drinks by fermentation or forcibly injecting it into liquids to create carbonated beverages. In this thesis, Henry's law is used to observe and calculate the concentration of dissolved carbon dioxide gas. Partial pressure and Henry's constant are needed to calculate the concentration.

The solubility of carbon dioxide was observed in two ways. The first experiment was a quick solubility test, where carbon dioxide was dissolved at different temperatures of water for 30 minutes under different pressures. The goal of the experiment was to demonstrate how temperature and pressure influence the amount of dissolved carbon dioxide. The second experiment compared the loss of dissolved carbon dioxide while using the beer tap and the bottle filling gun. For the second experiment, the water was pressured with carbon dioxide for 20 hours. The purpose of the experiment was to reveal if the beer tap releases an unusually high amount of carbon dioxide from the solution while used.

According to the results, carbon dioxide dissolves into cold water more strongly and easier than warm water. The effects of pressure were not as strong. However, increasing pressure increases the amount of gas dissolving. Both the beer tap and filling gun released carbon dioxide while used. The differences between the methods were not significant.

¹ Keywords: carbon dioxide, pressure, solubility, temperature

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	5
1 JOHDANTO JA TAVOITTEET	6
2 HIILIDIOKSIDIN OMINAISUUDET	7
2.1 Hiilidioksidi	7
2.2 Hiilidioksidin liukeneminen	8
2.3 Hiilihapotus.....	8
2.4 Liukenevuus ja Henryn laki	9
2.5 Osapaine.....	10
2.6 Nesteen paineistettu annostelujärjestelmä.....	11
3 TYÖN SUORITUS.....	14
3.1 Hiilidioksidin liukeneminen veteen puolessa tunnissa	14
3.2 Oluthanan hiilihappokato.....	15
4 TULOKSET	17
4.1 Hiilidioksidin liukeneminen	17
4.2 Oluthana.....	19
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	21
5.1 Hiilidioksidin liukeneminen	21
5.2 Oluthana.....	21
LÄHTEET	23
LIITTEET	25

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Hiilidioksidikaasupulloon liitetty regulaattori.	11
Kuva 2. Paineastia eli keg.....	12
Kuvio 1. Liuenneen hiilidioksidin massan (g) muutos lämpötilan noustessa.	17
Kuvio 2. Hiilidioksidin konsentraatioprosentti lämpötilan (°C) noustessa.	18
Kuvio 3. Konsentraatioprosentti paineen (bar) noustessa.....	19
Taulukko 1. Lasketut hiilidioksidin konsentraatioprosentit.....	18
Taulukko 2. Lasketut hiilidioksidipitoisuudet.	20

1 JOHDANTO JA TAVOITTEET

Hiilidioksidin käyttäminen elintarviketeollisuudessa on yleistä. Sen yleisimpiä käyttökohteita ovat elintarvikkeiden suojaaminen ja hiilihapon lisääminen virvoitusjuomien valmistamisessa (Ruokavirasto i.a.). Työ on tehty Seinäjoen ammattikorkeakoululle (SeAMK) ja sen tavoitteena on havainnollistaa hiilihapotusta ja selvittää hiilihapotetun juoman hiilihappokatoa oluthanaa käytettäessä. Oluthana on ollut käytössä koululla valmistettujen juomien tarjoilussa ja sen käytössä epäillään tavallista suurempaa hiilidioksidin katoa tuotteissa.

Hiilidioksidin liukoisuuteen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan lämpötilaa ja painetta muuttamalla. Näin voidaan nähdä, kuinka suuri vaikutus näillä on. Muita muuttujia ei työssä otettu huomioon vertailun helpottamiseksi.

Lisäksi työssä tarkasteltiin, kuinka paljon hiilidioksidia haihtuu Seinäjoen ammattikorkeakoulusta löytyvästä oluthanasta juomaa annosteltaessa. Tätä varten verrattiin oluthanan ja pulontäyttöpistoolin annostelun jälkeisiä hiilidioksidin konsentraatioita juomissa. Aistinvaraista arviointia ei suoritettu.

Liunneen kaasun konsentraatiota tarkasteltiin Henryn lain kautta. Hiilidioksidia saatiin liuotettua veteen paineastiassa, johon liitettiin hiilidioksidipullo. Hiilidioksidin syöttöpaineen ja hiilihapotetun juoman ulostyöntöpaineen säätelyssä käytettiin kaasupullossa olevaa regulaattoria.

Tuloksissa laskettiin saatujen arvojen pohjalta hiilidioksidin konsentraatiot. Vertailua varten laskettiin myös ilmakehänalainen hiilidioksidin konsentraatio. Niistä valmistettiin kuvaajat ja taulukot vertailun helpottamiseksi.

2 HIILIDIOKSIDIN OMINAISUUDET

2.1 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on luonnossa eliöiden hengityksen ja palamisen sivutuotteena syntyvä väritön yhdiste. Sen kemiallinen kaava on CO_2 . Se on suurina määrinä ihmisille haitallinen ja vaarallinen kaasu, joka syrjäyttää hapen (Työterveyslaitos, 2022). Sitä käytetään elintarvikkeissa kaasuna niin suojaamiseen kuin lisäaineena. Yhdestä litrasta nestemäistä hiilidioksidia saadaan 440 litraa hiilidioksidikaasua. Hiilidioksidi on inertti kaasu, eli se ei reagoi muiden aineiden kanssa. Kiinteänä sitä käytetään kuivajäänä viilennykseen ja erikoistehosteissa. Se liukenee hyvin veteen ja useimpiin orgaanisiin yhdisteisiin. Hiilidioksidia myydään kaasupulloissa korkean paineen alaisena nestekaasuna. Paineen täytyy silloin olla yli 5,2 baaria ja lämpötilan $-56,6 \dots 30,6 \text{ }^\circ\text{C}$ välillä.

Euroopan teollisuuskaasuyhdistys (EIGA) on laatinut EU-direktiiveihin perustuvan ohjeistuksen teollisen ja elintarvikkeisiin käytettävän hiilidioksidin puhtauden sen alkulähteen mukaan (EIGA, 2006, s. 11). Hiilidioksidia kerätään teolliseen käyttöön kemiallisin prosessein, fermentoinnin ja biokaasun sivutuotteena ja luonnon lähteistä (mts. s. 5–6). Näillä kaikilla tavoilla on omat vaaransa saastuttaa hiilidioksidikaasu jättäen siihen epäpuhtauksia kaasun keräyksen yhteydessä.

Ruokaviraston (i.a.) mukaan hiilidioksidia käytetään kaasuna virvoitusjuomien valmistuksessa ja elintarvikkeiden suojaamiseen. Hiilidioksidi estää aerobisten, eli hapesta riippuvaisien, reaktioiden syntymisen. Tämän vuoksi sitä voidaan käyttää myös suoja- ja säilöntäkaasuna elintarvikkeissa. Ruokavirasto ei ole asettanut käyttörajoitteita tai saantirajoitteita hiilidioksidille. E-koodi hiilidioksidille on E290.

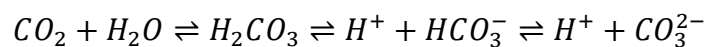
Kuivajäätä, eli kiinteää hiilidioksidia, voidaan käyttää elintarvikkeiden jäähdyttämiseen ja kylmäsäilytykseen. Sen lämpötila on $-78,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Koska kuivajää on niin kylmää, se jäädyttää sen kanssa kosketuksiin joutuvat tuotteet. Huoneen lämmössä kuivajää sublimoituu eli muuttuu kiinteästä suoraan kaasuksi. Tutkimuksessa, jossa nieriää säilöttiin kuivajäällä (Ngyen Duy Bao ym. 2007) todettiin, ettei tuotteelle koitunut merkittävää vahinkoa eikä virhemakuja syntyneet säilytyksen aikana.

2.2 Hiilidioksidin liukeneminen

Hiilidioksidi liukenee helposti veteen. Liuennut hiilidioksidi voidaan jakaa vapaaseen ja sidottuun hiilidioksidiin (Mortimer, 1996 s. 365). Vapaalla hiilidioksidilla tarkoitetaan hiilidioksidia, joka ylläpitää reaktiotasapainoa veden ja hiilidioksidikaasun kanssa muodostamalla vetysiltoja. Sidottu hiilidioksidi on karbonaatteihin ja vetykarbonaatteihin, eli hiilihapon suoloihin, sidottu hiilidioksidi. Vetykarbonaatit reagoivat paineen muutoksessa reaktiotasapainon ylläpitoon.

Mortimerin mukaan (1996, s. 364) hiilidioksidi liuetessaan veteen muodostaa hiilihappoa. Hiilihappo ja siitä muodostuvat karbonaatit eivät kuitenkaan ole pysyviä yhdisteitä, sillä ne pyrkivät tasapainotilaan ympäröivän paineen kanssa. Hiilihappo siis hajoaa vedessä karbonaattisuoloiksi ja vetykarbonaatiksi tai palautuu takaisin hiilidioksidiksi ja vedeksi reaktiokaavan R1 mukaisesti (Montgomery, 1997, s. 364):

(R1)

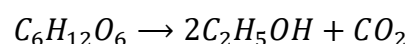


2.3 Hiilihapotus

Hiilihapotuksella tarkoitetaan hiilidioksidin tarkoituksen mukaista liuottamista veteen. Hiilihapotusta on kahdenlaista. Luonnollisessa hiilihapotuksessa, eli alkoholikäymisessä, hiilihapotus aiheutetaan juomaan käymisreaktiolla. Käymisreaktio syntyy hiivan tai bakteerin kuluttaessa sokeria (Cauvain, 2017, s. 122).

Alkoholijuomien valmistuksessa hyödynnetään tätä menetelmää paljon. Menetelmä on anaerobinen ja tämän vuoksi hiilidioksidi ei haihdu valmistettaessa pois vaan liukenee suoraan tuotteeseen. Hiiva kuluttaa sokeria, jonka reaktion sivutuotteena juomaan syntyy etanolia ja hiilidioksidia reaktiokaavan R2 mukaan (Cauvain, 2017, s.122):

(R2)



Yleensä tällä tavalla saadut hiilidioksidimäärät ovat kuitenkin pieniä, minkä vuoksi hiilidioksidia lisätään käymisvaiheen jälkeen keinotekoisesti. Tunnetuin luonnollisesti hiilihapotettu alkoholijuoma on samppanja, jonka valmistuksessa on kaksi käymisvaihetta (Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, i.a.).

Toinen yleinen hiilihapotuksen menetelmä on lisätä kaasua suoraan juomaan. Tämä keinotekoinen tapa on yleisesti käytössä juomateollisuudessa. Näin valmistetaan useimmat hiilihapolliset virvoitusjuomat (Woikoski, 2024). Keinotekoisessa hiilihapotuksessa voidaan hallita hiilihapon määrää ja hapotuksen laatua.

2.4 Liukenevuus ja Henryn laki

Kaasujen liukenemista nesteeseen on tutkittu paljon. Kaasujen liukenemiseen on todettu vaikuttavan kaasun paine ja liuottimen lämpötila (Zumdahl, 1997). Lämpötilan noustessa kaasujen liukoisuus vähenee. Korkeissa lämpötiloissa kaasut haihtuvat pois nesteistä, joihin niitä yritetään liuottaa. Jos kaasu on lämpötilaltaan korkea, sen energia on liian suuri liukenemiseen. Tämän vuoksi kaasujen liuottaminen tapahtuu mahdollisimman alhaisissa lämpötiloissa.

Heikkojen vesi-kaasuliuosten pitoisuutta voidaan laskea käyttämällä Henryn lakia (Zumdahl, 2017). Henryn laissa liunneen kaasun määrä voidaan määrittää kaasun suhteellisesta osapaineesta liuoksen yläpuolella. Kaasun osapaineella tarkoitetaan kaasussa olevan aineen aiheuttamaa painetta. Esimerkiksi hiilidioksidin aiheuttama paine ilmakehässä ei ole sama kuin hapen. Henryn laki voidaan esittää kaavalla (Zumdahl, 2017. s 516):

(1)

$$P = kC$$

missä

P on kaasun osapaine (bar)

k on lämpötilasta riippuva Henryn vakio

C on konsentraatio

Henryn vakio on kaasu- ja lämpötilakohtainen. Sander (2023) on koonnut tutkimuksissa saatuja Henryn vakioita tietopankkiin. Vakiota ei voida laskea ilman tietoa osapaineen ja konsentraation arvoista, joten vakio saadaan vain kokeiden kautta. Kaasujen liukoisuutta tutkitaan jatkuvasti, mikä lisää tutkimuksissa saatujen vakioiden määrää.

Henryn laki toimii vain laimeiden liuosten kanssa ja muuttuu epäluotettavaksi erittäin korkeissa paineissa ja lämpötiloissa. Sitä myöskään ei voi käyttää, jos liuotin ja liuotettava reagoivat kemiallisesti toisiinsa muodostaen pysyviä yhdisteitä. Corvetton mukaan (Corvetto, 1991) Henryn vakion luotettavuus laskee korkeissa lämpötiloissa.

2.5 Osapaine

Osapaine voidaan laskea ideaalikaasuteoriaa käyttäen (LeTran, i.a.). Ideaalikaasuteoria on yksinkertaistettu väline kaasujen tarkasteluun, sillä siinä ei oteta huomioon kaasuatomien vuorovaikutusta. Siinä yhdistyvät Boylen, Charlesin ja Avogadron lait. Osapaine voidaan laskea ideaalikaasuteoriasta johdetulla yhtälöllä (LeTran, i.a.):

(2)

$$P = \frac{nRT}{V}$$

Missä

P on paine (Pa)

V on kaasun tilavuus (l)

n on ainemäärä (mol)

T on lämpötila (K)

R on kaasuvakio

Paineen kanssa käytetty yksikkö määrittää kaasuvakion suuruuden (LeTran, i.a.). Kaasuvakion SI-yksikkö on $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$. SI-yksikkö korvataan tarvittavan yksikön mukaan.

Muita liukoisuuteen vaikuttavia tekijöitä on myös tutkittu. Sokeripitoisuuden ja pH:n vaikutusta hiilidioksidin liukenemiseen on tutkittu hedelmämehujen avulla (Illera, ym. 2018). Tutkimuksessa todettiin matalan pH:n ja korkean sokeripitoisuuden alentavan hiilidioksidin

liukoisuutta. Tutkimus mahdollisti pH:n ja sokeripitoisuuden muuttujien lisäämisen hiilidioksidin konsentraation laskukaavaan.

2.6 Nesteen paineistettu annostelujärjestelmä

Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (Tukes, i.a.) mukaan Suomessa käytettävissä kaasupulloissa tulee olla vuoden 2001 jälkeen EU-direktiivin mukainen π -merkki ja tarkastuslaitoksen tunnusnumero. EU:n ulkopuolelta laillisessa kaasupullossa on UN-tunnus. Kaasupullon täytyy myös kestää $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaa. Nämä tiedot löytyvät useimmiten etiketistä venttiilin alapuolelta.

Regulaattori on väline, jolla voidaan hallita kaasupullosta ulos tulevan kaasun painetta. Kuvassa 1 on Seinäjoen ammattikorkeakoulun hiilidioksidikaasupullon regulaattori. Beswick engineering (i.a.) jakaa regulaattorin kolmeen osaan, joilla hallintaan ulos tulevaa painetta: painetta vähentävä tai estävä venttiili, kalvo tai mäntä, ja jousi. Ulos tulevaa painetta hallitaan säätämällä pullosta tulevan sisääntuloilman aiheuttamaa painetta jouselle. Jouseen kohdistuva voima kertoo kalvolle tai männälle ulos päästettävän ilman paineen. Kalvo painaa venttiilin pois tieltä, jolloin ilma pääsee ulos. Regulaattorin tarkkuus saadaan, kun tarkastellaan paineen ja ulosvirtauksen suhdetta. On normaalia, että paine ei täysin pysy asetetussa arvossa. On siis tärkeää selvittää käytettävä toiminta alue, jotta regulaattorin tarkkuus saadaan tarpeeksi lähelle haluttua.



Kuva 1. Hiilidioksidikaasupulloon liitetty regulaattori (Raitakangas, 2024, CC BY-NC-ND 4.0).

Mathesonin (2021 s. 4) mukaan regulaattoreiden hygienialuokitus muodostuu kolmesta osasta: rungon tekotavasta, kalvon materiaalista sekä kalvon ja regulaattorin välisestä sinetistä. Rungon tekotapoja ovat muotoon valaminen ja puristaminen. Hygieenisin regulaattori saadaan Mathesonin (2021 s. 4–5) mukaan muotoon puristamisella, sillä se mahdollistaa osien ja sisäosien koon hallinnan. Näin saadaan pienennettyä sisäosia, jotka voivat kerätä epäpuhtauksia ja saastuttaa tuotteen. Puristamalla saadaan myös pienempi huokoisuus ja sileämpi pinta, jotka estävät bakteerien kasvun. Kalvon ja sinetin materiaaleissa hygieenisin on ruostumaton teräs helpon puhdistamisen ja kulutuksen kestämisen takia.

Paineastia, eli keg, on tässä työssä käytetyn hiilihapotetun ja paineistetun veden säilytysastia kuvassa 2. Pera Industry Shanghaiin (i.a.) mukaan kegit on valmistettu usein kestävästä ruostumattomasta teräksestä tai alumiinista. Yleensä niitä käytetään oluen säilyttämisessä ja tarjoilemisessa. Niissä on yksi tai kaksi venttiiliä, joiden kautta sisälle saadaan haluttu neste ja paineistettu ilma. Paineistettu ilma on usein hiilidioksidia, joka on liitetty kegiin elintarviketaisoisella materiaalilla valmistetusta putkesta ja venttiilistä. Kegissä on sisällä kaksi putkea, joista toinen työntää paineistettua ilmaa sisään ja toinen johtaa sisältö ulos. Kaasua työntävän putken ei tarvitse olla pitkä.



Kuva 2. Paineastia eli keg (Raitakangas, 2024, CC BY-NC-ND 4.0).

Hana on paineistetun annostelujärjestelmän osa, josta saadaan kegissä oleva juoma ulos hallitusti. Siihen vaadittavaa työntöpainetta hallitaan kaasupullon regulaattorilla ja oluthanassa olevalla vivulla ja säätöventtiilillä (Lindr, 2022, s. 17–22). Oluthana on yhdistetty kegistä hanaan. Osassa oluthanoja on lisävarusteena viilentävä ilmakompressori, jolla viilennetään ulos tulevaa tuotetta, ja mahdollisuus liittää useampi kuin yksi paineastia.

3 TYÖN SUORITUS

3.1 Hiilidioksidin liukenemistesti

Työtä aloittaessa varmistettiin välineiden puhtaus ja tarvittavan kaasun riittävä määrä. Nesteenä kokeissa käytettiin hanavettä. Kokeessa on tarkoitus osoittaa, kuinka paineen ja lämpötilan muutokset vaikuttavat hiilidioksidin liukenevuuteen. Kokeessa hiilidioksidia paineistetaan eri lämpöiseen veteen eri paineilla puolen tunnin ajan. Tarkasteltaviksi veden lämpötiloiksi valittiin 5 °C, 10 °C, 15 °C ja 20 °C ja hiilidioksidin 1, 1,5 ja 2 baarin paineet. Veden lämpötilaa säädettiin hanasta löytyvällä säätimellä. 5 °C:n vesi jäähdytettiin pakastimessa oikeaan lämpötilaan, sillä hanasta saatava vesi ei ollut tarpeeksi kylmää. Hiilidioksidin painetta säädettiin kaasupulloon liitetyllä regulaattorilla.

Hiilidioksidin liukenevuuteen vaikuttavat lämpötila, liuottimena käytettävä aine, paine ja mekaaninen voima. Työssä keskityttiin paineen ja lämpötilan vaikutuksen tutkimiseen. Työ suoritettiin neljän päivän aikana ja siinä käytettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulusta löytyvää laitteistoa, johon kuuluu elintarvikekelpoinen hiilidioksidikaasu pullossa, hiilidioksidipullossa oleva paineregulaattori, yhdeksän litran metallinen paineastia, putket paineelle ja pullojen täyttämiseen tarkoitettu täyttöpistooli. Tulosten mittaamiseen käytettiin vaakaa ja 120 millilitran muovista mittakuppia.

Koe aloitettiin valuttamalla vettä metalliseen paineastiaan. Lämpötila mitattiin veden ulostulo-
hetkellä ja sitä seurattiin tarkasti täyttöhetkellä. Näin varmistettiin oikean lämpöinen vesi. Paineastia täytettiin vedellä niin, että se oli kaasun sisääntuloventtiin kanssa samalla tasolla. Tämän jälkeen astian suu suljettiin ilmatiiviillä kannella ja liitettiin kaasupulloon letkulla ja yksisuuntaisella venttiilillä. Kaasupullo ja siihen liitetty putkisto avattiin, minkä jälkeen varmistettiin, että paineastia ei vuoda. Tämän jälkeen säädettiin kaasupullon regulaattorista haluttu paine, jolla hiilidioksidi menee astiaan. Tämän jälkeen poistettiin astiaan jäänyt ilma varoventtiilistä, jotta voitiin varmistua veteen liukenevan vain hiilidioksidia halutulla paineella. Puolen tunnin aikana liukenemista nopeutettiin ravistamalla, eli mekaanista voimaa lisäämällä, noin kolme sekuntia viiden minuutin välein. Tätä tapaa käytettiin jokaisen lämpötilan ja paineen yhdistelmän valmisteluun kokeen ajan.

Jokaisesta paineen ja lämpötilan yhdistelmästä otettiin 20 näytteen tulokset, eli koe toistettiin kaksitoista kertaa. Tulosten mittaaminen tapahtui vapauttamalla hiilihapotettua vettä kuppiin täyttöpistoolilla mittakuppiin ja punnitsemalla se vaa'alla. Mittakuppina käytettiin Seinäjoen ammattikorkeakoulun tilaamia läpinäkyviä muovisia mittakuppeja, joiden sivussa on mitta-asteikko. Merkkiastia täytettiin mitta-asteikon sadan millilitran merkin alarajaan. Liuoksen ulostyöntöpaineena oli 1 baari. Ylimääräinen neste mittakupista poistettiin pasteur-pipetillä. Mittauksia otettiin yhteensä kaksikymmentä. Mittausharhan estämiseksi vaa'an osoittama luku oli piilotettu ennen lukeman kirjoittamista muistiin. Näin saatiin varmistettua, että vaa'an antama luku ei vaikuttanut mittaustapahtumaan. Vertailun laskujen luotettavuuden mahdollistamiseksi mitattiin vielä hiilihapottoman veden paino kupissa.

3.2 Oluthanan hiilihappokato

Toinen suoritettu työ liittyi Seinäjoen ammattikorkeakoulun oluthanan hiilihappokadon tutkimiseen. Koulun oluthana on tšekkiläisen PYGMY 25 -mallinen Lindr-oluthanavalmistajan laite. Hanan epäiltiin vapauttavan sen läpi kulkevan juoman hiilidioksidia haluttua enemmän. Hanan mukana oli oma hiilidioksidisäiliö, joka oli koetta suorittaessa tyhjä. Sen vuoksi käytettiin koululta löytyvää hiilidioksidipulloa.

Työn suorituksessa käytettiin pullontäyttöpistoolia, elintarvikelaatuista hiilidioksidia kaasupullossa, kaasupullossa olevaa regulaattoria, metallisia paineestioita, yksisuuntaisia venttiileitä ja kaasuputkia. Lisäksi metallisen paineastian säilyttämiseen käytettiin lämpötilatasaista viileäkaappia. Työn suorittamiseen kului neljä päivää, joista kahtena valmisteltiin koeasetelma. Työ suoritettiin kahdesti. Metallinen paineastia oli ensimmäisessä mittauksessa tilavuudeltaan 19 litraa ja toisessa yhdeksän litraa. Paineastian täyttämisen jälkeen se jätettiin 20 tunniksi 8,9 °C:een viileäkaappiin paineistettuna 1,5 baarilla.

Mittaamisessa käytettiin muovista 120 millilitran mittakuppia ja vaakaa. Mittaamiseen käytettiin tutkimuskohteena ollutta oluthanaa ja pullontäyttöpistoolia. Ulostyöntöpaine mitattaessa oli ensimmäisen ajon aikana 1 baari oluthananvalmistajan suosituksen mukaisesti. Toisen mittauksen aikana ulostyöntöpaine oli 1,5 baaria. Mittaustuloksia otettiin kaksikymmentä pullontäyttöpistoolilla ja oluthanasta valuttamalla molemmissa kokeissa. Ylimääräinen neste poistettiin pasteur-pipetillä punnituksen aikana. Vaa'an osoittama luku oli piilotettu

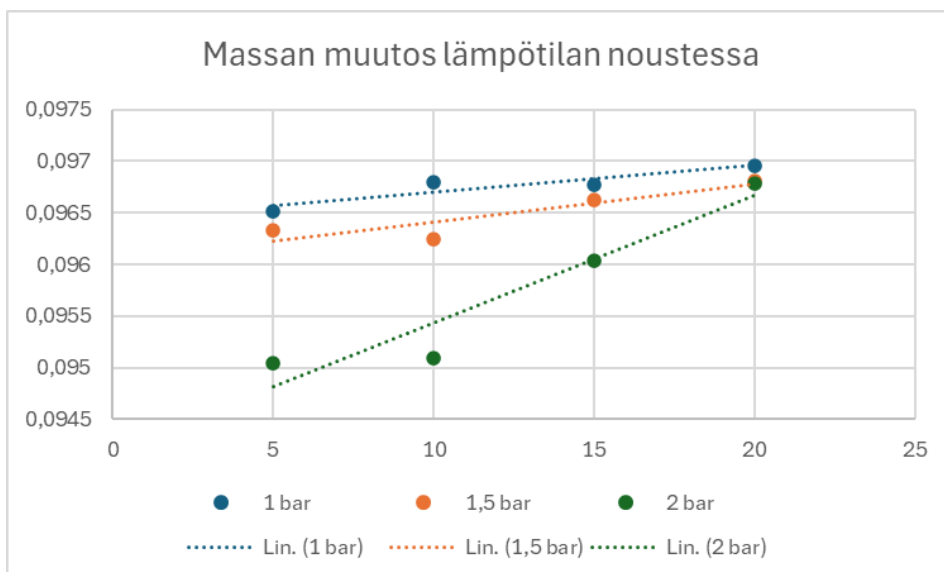
mittausharhan minimoimiseksi. Näin saatiin varmistettua, ettei luku vaikuttanut mittaustapah-
tumaan. Työssä mitattiin myös hapottamattoman veden massa vertailua varten.

4 TULOKSET

4.1 Hiilidioksidin liukeneminen

Jokaisen mittauksen tulokset käsiteltiin Excelissä, jossa niistä laskettiin keskiarvo ja hajonta. Tulokset saatiin grammoina, josta ne muutettiin millilitroiksi ja edelleen litroiksi käsittelemisen helpottamiseksi. Tulosten keskiarvot (liite 1) ja hajonnat (liite 2) on esitetty liitteissä. Tuloksista käy ilmi, että paineella ja lämpötilalla on vaikutus hiilidioksidin liukenevuuteen.

Kuviosta 1 voidaan nähdä, kuinka näytteiden massa nousee lämpötilan noustessa eri paineissa, kaasun vähentyneen liukenemisen seurauksena. Liuenut kaasu vähentää veden tiheyttä ja massaa. Tämä vastaa useita aiempia tutkimuksia ja havaintoja yleisesti kaasujen liukenemisestä.



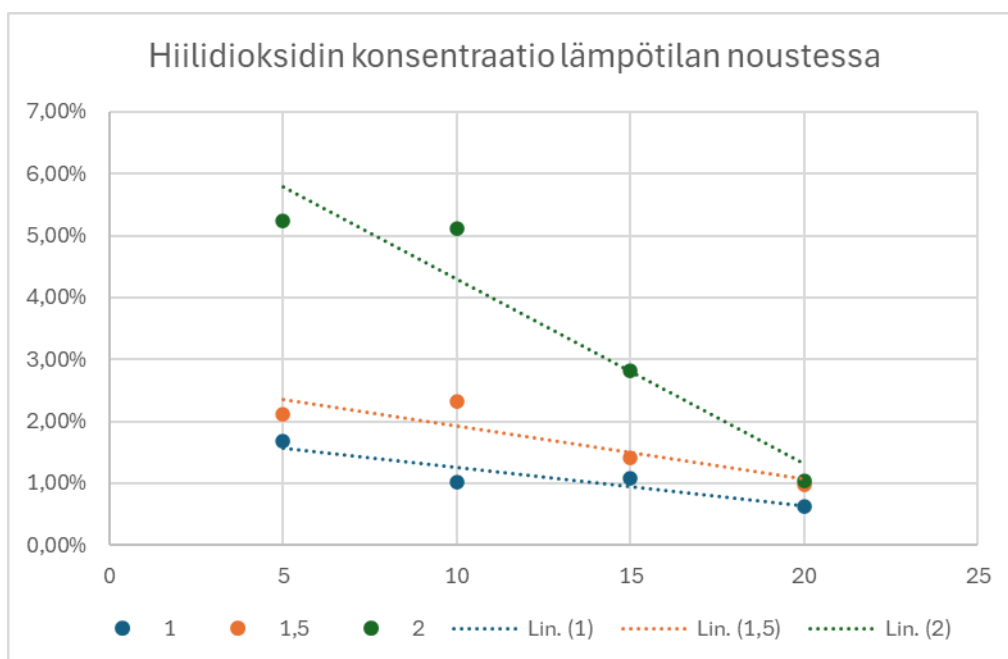
Kuvio 1. Liuenneen hiilidioksidin massan (g) muutos lämpötilan noustessa.

Taulukossa 1 on tuloksista lasketut konsentraatioprosentit. Konsentraatioprosentit laskettiin oletetun hiilidioksidin liuenneesta määrästä koko näytteen painoon. Ne näyttävät selvästi, kuinka lämpötilan noustessa liuennan hiilidioksidin osuus vähenee. Korkein hiilidioksidin konsentraatiotulos saatiin 5 °C:n vedessä 2 baarin paineessa, jossa liuennan hiilidioksidin osuus on 5,23 %. 1 ja 1,5 baarin paineessa ero viiden- ja kymmenenasteisen seoksen konsentraation välillä alkavat tasoittua ja lähenevät toisiaan. Tuloksia laskettaessa oletettiin, ettei kumpikaan aine muuta massaansa hiilidioksidin liuetessa. Alimmat konsentraatiot tapahtuivat 20 °C lämpötilassa, jossa konsentraation nousu on huomattavasti vähäisempää.

Taulukko 1. Lasketut hiilidioksidin konsentraatioprosentit.

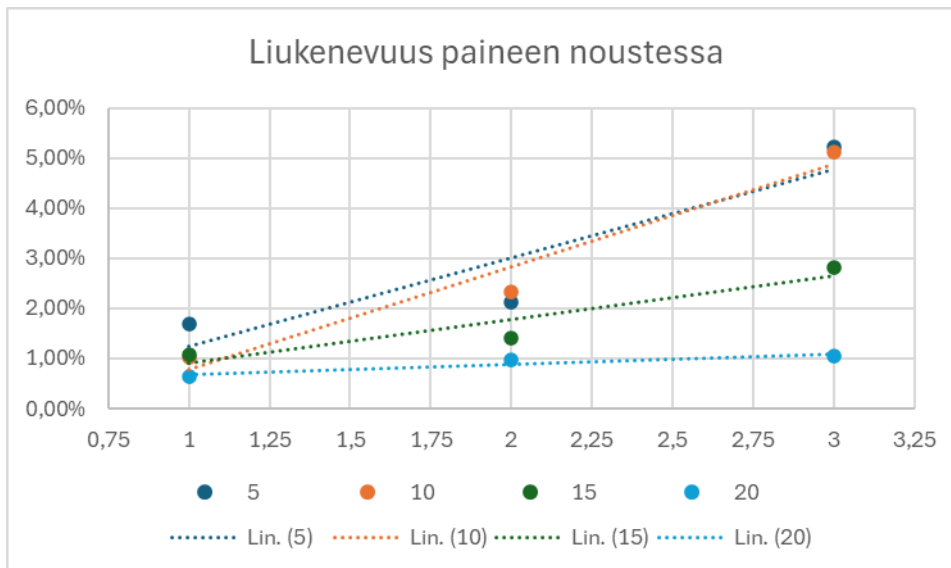
Lämpötila (°C)	1 bar	1,5 bar	2 bar
5	1,68 %	2,12 %	5,23 %
10	1,02 %	2,33 %	5,11 %
15	1,08 %	1,14 %	2,82 %
20	0,63 %	0,98 %	1,05 %

Kuviossa 2 on kuvattuna hiilidioksidin konsentraatio lämpötilan noustessa. Siitä voidaan nähdä, kuinka konsentraatiot lähenevät nopeasti toisiaan lämpötilan noustessa. 5 °C lämpötilassa konsentraatio on suurin ja laskee jyrkästi lämpötilan noustessa. Paine alhaisessa lämpötilassa tehostaa hiilidioksidin liukenemista huomattavasti. Lämpötilan noustessa konsentraatiot lähenevät toisiaan.



Kuvio 2. Hiilidioksidin konsentraatioprosentti lämpötilan (°C) noustessa.

Paineen vaikutus lämpötilan noustessa on huomattavasti pienempi. Kuviossa 3 voidaan nähdä, kuinka liukenevuus muuttui paineen noustessa. Vaikka 10 °C ja 15 °C näytteiden yhden baarin pitoisuudet ovat samantasoisia, on jo 10 °C pitoisuus lähempänä 20 °C arvoja. Hiilidioksidin konsentraatio nousi alle puoliprosenttia 20 °C veden kanssa. 5 °C ja 10 °C veden kanssa konsentraatio lähenee toisiaan jo 1,5 baarin paineessa. Suurentamalla painetta voidaan siis tehostaa kaasun liukenemista.



Kuvio 3. Konsentraatioprosentti paineen (bar) noustessa.

4.2 Oluthana

Yksi kokeen tavoitteista oli nähdä, vapauttaako koululta löytyvä oluthana käytön yhteydessä paljon hiilidioksidia. Tämän vuoksi laskettiin teoreettiset hiilidioksidipitoisuudet, joista sitä voidaan tarkastella. Saadut tulokset taulukoitiin, muutettiin grammoista millilitroiksi ja edelleen litroiksi ja niistä laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Tulosten keskiarvot ja niiden hajonta on esitetty liitteessä 3.

Teoreettisissa paineen laskuissa käytettiin työssä käytettyä paineistuspainetta, eli 1,5 baaria. Sitä käyttäen voitiin laskea kaavan (1) mukaan liuenneen hiilidioksidin konsentraatioksi paineastiassa 0,045 mol/l. Konsentraatioiden laskemisessa käytettiin Henryn vakion arvoa $3,3 \cdot 10^{-2}$ (Sander, 2023). Kegistä vapautetulle seokselle laskettiin teoreettinen hiilidioksidipitoisuus ylimääräisen hiilidioksidin haihduttua ja reaktiotasapainon saavutettua. Näytteiden hiilidioksidipitoisuuksille laskettiin myös konsentraatiot, joissa oletettiin seoksen olevan kylläinen ennen ulostuloa. Hiilidioksidia ilmakehässä on 0,0004 %, eli 400 ppm, (Woikoski, 2024).

Siitä voidaan laskea osapaineeksi 43,53 Pa. Kaavalla (1) voidaan laskea konsentraatioksi $1,32 \cdot 10^{-5}$ mol/l.

Taulukossa 2 on esitettyä lasketut konsentraatiot. Oluthanalla ja pistoolilla saadut konsentraatiot ovat korkeammat kuin niille lasketut normaali ilmanpaineen alaiset hiilidioksidipitoisuudet. Normaali ilmanpaineella tarkoitetaan ilmakehän alaista painetta. Liuoksesta kuitenkin haihtuu suurin osa kaasusta, mikä voidaan huomata paineastian teoreettisen pitoisuuden huomattavana muutoksena. Liuokseen siis jää hiilidioksidia, joka ei haihdu heti paineen muuttuessa. Pullotuspistoolilla saadut pitoisuudet ovat hieman korkeammat kuin oluthanalla. Oluthanan ja täyttöpistoolin väliset erot eivät kuitenkaan ole huomattavan suuret.

Taulukko 2. Lasketut hiilidioksidipitoisuudet.

	Ulostyöntö 1 bar	Ulostyöntö 1,5 bar	teoreettiset arvot
paineastia			0,045 mol/l
oluthana	$3,16 \cdot 10^{-4}$ mol/l	$2,57 \cdot 10^{-4}$ mol/l	$1,32 \cdot 10^{-5}$ mol/l
pistooli	$3,51 \cdot 10^{-4}$ mol/l	$2,74 \cdot 10^{-4}$ mol/l	$1,32 \cdot 10^{-5}$ mol/l

Massan keskiarvoja vertailemalla tuloksista ei löytynyt merkittäviä eroja, joiden perusteella voisi sanoa oluthanalla olevan taipumusta ylimääräisen hiilidioksidin vapauttamiseen. Tuloksista laskettiin myös hiilidioksidin konsentraatio. Konsentraatioita vertaamalla hanan hiilidioksidikato on hieman suurempi.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

5.1 Hiilidioksidin liukeneminen

Tuloksista voidaan nähdä, kuinka hiilidioksidi liukenee helpoiten alhaisissa lämpötiloissa ja korkealla paineella voidaan tehostaa hiilidioksidin liukenemistä. Paineistaessa kannattaa siis viilentää hiilihapotettava mahdollisimman viileäksi ja tehostaa liukenemistä korkealla yli 1,5 baarin paineella. Korkeampi paine on hyödyllinen liukenemisen lisäämisessä alle 10 °C lämpötilassa.

Kokeessa saadut tulokset olivat hajonnaltaan suuria. Tämän voisi välttää ottamalla käyttöön tarkemman mittaustavan. Mittaukseen kannattaa käyttää tarkkaa mittalasia. Massan mittaamiseen tarkempia välineitä voisivat olla mittapipetti ja tarkempi vaaka. Hiilihapon määrää voisi mitata myös titraamalla ja nestekromatografialla. Näiden tapojen hyödyntäminen on kuitenkin kallista ja tarvitsee valmistelua ja aikaa. Hiilidioksidia vähenee näytteestä heti tullessaan ulos paineistetusta tilasta, joten kaasun määrää mittaavat laitteet olisivat parhaimpia tutkimusvälineitä tutkimuksessa. Mekaanisesta sekoituksesta johtuva epätasaisuus voi aiheuttaa piikkejä liukenevuuteen. Jatkotutkimuksena voisi kasvattaa datapisteiden keräämistä suuremmalta alueelta tarkemmalla tutkimusmenetelmällä.

5.2 Oluthana

Paineistetun annostelujärjestelmän ollessa tiivis siitä ei katoa hiilidioksidia. Näyttää siltä, että ulostyöntöpaineella on enemmän merkitystä kuin välineillä, joilla tuote saatetaan järjestelmästä ulos, vaikka pitoisuuksissa on hieman eroa. On huomattava kuitenkin, että ulos työnnettäessä hiilidioksidia haihtuu pois tuotteesta paineen muuttuessa. Haihtuvan hiilidioksidin määrää ei tässä tutkimuksessa mitattu. Tuotteeseen kuitenkin jää liuennutta hiilidioksidia, mikä osoittaa hiilihapotuksen onnistuneen.

Oluthanasta ja täyttöpistoolista saatujen konsentraatioiden väliset erot olivat pieniä. Suuren hajonnan vuoksi saadut tulokset ovat hieman epäluotettavia. Kummassakin mittauksessa oluthanan pitoisuudet ovat kuitenkin pienempiä, mistä voisi päätellä oluthanan luovuttavan himan enemmän hiilidioksidia.

Oluthanan valmistajan suositus ulostyöntöpaineen säätäminen 1 baariin on asianmukainen. Lisäkokeilla voitaisiin todeta olisiko 0,5 baarin ulostyöntöpaineella hiilidioksidia säästävää vaikutusta.

Tässä kokeessa ei otettu huomioon oluthanalla tai täyttöpistoolilla saadun tuotteen nautintomukavuutta. Aistinvaraisella tutkimuksella voitaisiin tutkia kuinka paljon ulostyöntöpaine vaikuttaa makuun ja nautintomukavuuteen sekä onko paineastiasta laskevalla välineellä väliä. Oluthanassa olleen viilentävän ilmakompressorin käyttö oli myös vähäistä valmistajan ohjeiden mukaisesti alkoholittomalla tuotteella. Jatkotutkimuksena oluthanalla voitaisiin suorittaa aistinvaraisia kokeita, joilla saataisiin selville parhaimmat asteukset nautintomukavuudelle.

LÄHTEET

- Beswick engineering. (i.a.). *The basics of pressure regulators*.
<https://www.beswick.com/resources/the-basics-of-pressure-regulators/>
- Cauvain, S. (2017). *Baking problems solved*. (2. painos). Elsevier.
- Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne. (i.a.). *Le tirage et la prise de mousse: Quand le Champagne se dote de ses bulles*. <https://www.champagne.fr/fr/decouvrir-le-champagne/elaboration-du-champagne/le-tirage-et-la-prise-de-mousse>
- Corvetto, R. (1991). Evaluation of solubility data of the system CO₂-H₂O from 273 K to the critical point of water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 20. (s. 582)
<https://srdata.nist.gov/jpcrdreprint/1.555905.pdf>
- European Industrial Gas Association (EIGA). (2016). *Carbon dioxide food and beverages grade, source qualifications, quality standards and verification*. EIGA Doc 70/17.
<https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC070.pdf>
- Illera, A., Sanz, M, Beltrán, S & Melgosa, R. (2018). High pressure CO₂ solubility in food model solutions. *The journal of supercritical fluids and fruit juices* (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.07.009>
- LeTran, D. (i.a.). *The ideal gas law*. LibreTexts.
[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Gases/Gas_Laws/The_Ideal_Gas_Law](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Gases/Gas_Laws/The_Ideal_Gas_Law)
- Lindr. (01.01.2020). *PYGMY 20/K: Manual*. <https://www.lindr.cz/en/c-272-dispensing-equipment/s-273-contact/p-13632-pygmy-20-k-new-green-line>
- Matheson. (2021). *Guide to regulators*. Matheson tri-gas.
<https://www.mathesongas.com/pdfs/litcenter/Guide-to-Regulators.pdf>
- Mortimer, C. (1997). *Kemia*. (M. Hakkarainen, käänt.). Opetushallitus
- Pera industries Shanghai. (a.i.). *Oluttynnyrit*. <https://fi.perabar.com/beer-kegs/>
- Nguyen Huy Bao, H., Arason, S., & Thorarinsdottir, K. (2007). *Effects of dry ice and superchilling on quality and shelf life of arctic charr (Salvelinus alpinus) fillets*. *International Journal of food engineering*. 3.
https://www.researchgate.net/publication/263921396_Effects_of_Dry_Ice_and_Superchilling_on_Quality_and_Shelf_Life_of_Arctic_Charr_Salvelinus_alpinus_Fillets

Ruokavirasto. (i.a.). *E290 – Hiilidioksidi*. <https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/ohjeita-kuluttajille/e-kooditlisaaaineet/e-koodit/e290/>

Sander, R., (2023). Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent, Atmos. (10901–12440). <https://acp.copernicus.org/articles/23/10901/2023/>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). (i.a.). *Kaasupullot*. <https://tukes.fi/vak/kaasupullojen-vaatimustenmukaisuus>

Työterveyslaitos. (25.05.2022). *Hiilidioksidi*. OVA-ohjeet. <https://ova.ttl.fi/hiilidioksidi>

Woikoski. (2024). *Hiilidioksidi CO₂*. <https://www.woikoski.fi/hitsaus/hitsauskaasut/hiilidioksidi.html>

Zumdahl S. (1997). *Chemistry*. (4. painos) Houghton Mifflin Company

LIITTEET

Liite 1. Mittaustulokset liukenevuudesta puolessa tunnissa. Tulokset litroina (l).

Liite 2. Liukenevuudesta saatujen tulosten hajonta

Liite 3. Oluthana ja pullontäyttöpistoolin tulosten keskiarvot (l) ja hajonnat

Liite 1. Mittaustulokset (I) liukenevuudesta puolessa tunnissa.

Lämpötila (°C)	1 bar	1,5 bar	2 bar
5	0,096515	0,0963325	0,950415
10	0,096797	0,096243	0,950895
15	0,096771	0,096629	0,060395
20	0,096961	0,0968105	0,967845

Liite 2. Liukenevuudesta saatujen tulosten hajonta

	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C
1 bar	0,353	0,291	0,132	0,136
1,5 bar	0,245	0,327	0,164	0,212
2 bar	0,347	0,351	0,354	0,171

Liite 3. Oluthana ja pullontäyttöpistoolin tulosten keskiarvot (l) ja hajonnat

	Pullontäyttöpistooli	Oluthana
1. mittaus	0,09575	0,095896
hajonta	0,299833	0,221617
2. mittaus	0,096071	0,096141
hajonta	0,377692	0,0349383