

Opinnäytetyö (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

2023

Ronja Zajac

Viskositeettimittausten
hyödyntäminen
elintarvikevalmistuksen
laadunvalvonnassa

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Bio- ja kemiantekniikka

2023 | 58 sivua

Ronja Zajac

Viskositeettimittausten hyödyntäminen elintarvikevalmistuksen laadunvalvonnassa

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää toimeksiantajayrityksen elintarvikevalmistuksen laadunvalvontaa viskositeettimittausten avulla. Työssä alustettiin tuotteiden tasalaatuisuuden ja tuotantoprosessien sujuvuuden parantamista tutkimalla kolmen valikoidun tuotteen viskositeettikäyttäytymistä ja viskositeettien vaihteluväliä sekä selvittämällä yrityksen tarpeisiin soveltuvia viskosimetrivaihtoehtoja. Toimeksiantajana työlle toimi Oy Lunden Ab Jalostaja.

Viskositeetti on tärkeä tekijä elintarvikkeiden valmistuksessa, pakkaamisessa ja kulutuskokemuksessa. Ymmärrys tuotteiden viskositeettikäyttäytymisestä on ehdotonta tuotannon sujuvuuden ja tuotantolinjojen suunnittelun kannalta. Se edesauttaa ratkomaan tuotteiden vääränlaisesta koostumuksesta johtuvia tuotannon ongelmia, syventymään ongelmien juurisyihin ja poistamaan ne. Tämän myötä myös koostumuksesta johtuvaa tuotehävikkiä voidaan vähentää.

Mittausten avulla selvisi, että tuotteet olivat leikkausohenteisia ja siten ei-Newtonisia. Lämpötilan nousu laski kaikkien tuotteiden viskositeetteja. Jokaisella tuotteella viskositeetti vaihteli tietyllä välillä. Tuloksiin kuitenkin liittyi useampi luotettavuutta mahdollisesti alentava tekijä. Tulosten pohjalta projektia voidaan jatkaa esimerkiksi lisäämällä tuotteiden valmistukseen vaihe, jossa viskositeetti mitataan ja tarpeen vaatiessa tehdään muutoksia ennen kuin tuote pakataan. Vaihtoehtoisesti vaihe voi olla myös pelkästään viskositeetin jatkuvaa todentamista ja seuranta varten.

Asiasanat:

viskositeetti, laadunvalvonta, viskosimetri, viskositeettimittaus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Biotechnology and Chemical Engineering

2023 | 58 pages

Ronja Zajac

Utilization of viscosity measurements in food manufacturing quality control

The purpose of this thesis was to develop the quality control of the commissioning company by utilizing viscosity measurements. The work initiated the improvement of product uniformity and fluency of production processes by studying the viscosity behaviour and the viscosity ranges of three selected products. In addition, suitable viscometer options for the company's needs were examined. The commissioning company was Oy Lunden Ab Jalostaja.

Viscosity is an important factor in food manufacturing and packaging as well as for the consumer experience. An understanding of the viscosity behaviour of products is essential for the smoothness of production and the design of production lines. It helps to resolve and eliminate the root causes of production issues caused by the incorrect composition of products. As a result, product loss due to the incorrect composition can also be reduced.

The measurements showed that the products were shear-thinning and therefore non-Newtonian. The rise in temperature reduced the viscosities of all products. The viscosity of each product varied within a specific range. However, there were a number of factors that might have lowered the reliability of the results. Based on the results, the project can be continued by adding a phase to the manufacturing process, where viscosity is measured and changes are made if necessary before the product is packaged. Alternatively, the phase may also be for the sole purpose of continuous verification and monitoring of viscosity.

Keywords:

viscosity, quality control, viscometer, viscosity measurement

Sisältö

Käytetyt lyhenteet	7
1 Johdanto	8
2 Viskositeetti	9
2.1 Määritelmä	9
2.2 Fluidityypit	10
2.2.1 Newtoniset fluidit	10
2.2.2 Ei-Newtoniset fluidit	10
2.3 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	12
2.4 Dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti	14
3 Erilaiset viskosimetrit	15
3.1 Kapillaariviskosimetrit	15
3.2 Rotaatioviskosimetrit	16
3.3 Kuulaviskosimetrit	18
3.4 In-line ja on-line viskosimetrit	19
4 Viskositeettimittaukset osana laadunvalvontaa	21
4.1 Viskositeettimittausten hyödyt	21
4.2 Viskosimetrin valintaan vaikuttavat tekijät	22
4.3 Heterogeenisten tuotteiden viskositeetti ja mittaus	22
4.3.1 Vane-spindeli	23
4.3.2 T-bar-spindeli	24
4.4 Mittausolosuhteet	25
5 Viskositeettitulosten vertailukelpoisuus	26
5.1 Viskositeetin yksiköt	26
5.2 Mittausmenetelmän vaikutus tulosten vertailukelpoisuuteen	27
6 Yrityksen tarpeisiin soveltuvat viskosimetrit	28
6.1 Partikkeleita sisältävät näytteet	28
6.2 Tarkkaa lämpötilakontrollointia vaativat näytteet	29

6.3 Tuotantolinjalla tapahtuvat mittaukset	30
7 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetti	31
7.1 Mittauslaite	31
7.2 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettikäyttäytyminen	32
7.2.1 Mittausolosuhteiden vakiointi	32
7.2.2 Lämpötilan vaikutus tuotteiden 1 ja 2 viskositeetteihin	33
7.2.3 Leikkausohenevuuden testaus	34
7.3 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettien vaihteluväli	35
8 Tuotteen 3 viskositeetti	39
8.1 Mittauslaite	39
8.2 Tuotteen 3 viskositeettikäyttäytyminen	39
8.2.1 Mittausolosuhteiden vakiointi	39
8.2.2 Lämpötilan vaikutus tuotteen 3 viskositeettiin	40
8.2.3 Leikkausohenevuuden testaus	41
8.3 Tuotteen 3 viskositeetin vaihteluväli	42
9 Tulokset ja pohdinta	46
9.1 Tuotteet 1 ja 2	46
9.1.1 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettikäyttäytyminen	46
9.1.2 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettien vaihteluväli	47
9.1.3 Mittaustulosten luotettavuus ja virhetarkastelu	48
9.2 Tuote 3	49
9.2.1 Tuotteen 3 viskositeettikäyttäytyminen	49
9.2.2 Tuotteen 3 viskositeetin vaihteluväli	50
9.2.3 Mittaustulosten luotettavuus ja virhetarkastelu	50
10 Yhteenveto	53
Lähteet	54

Kuvat

Kuva 1. Näennäinen viskositeetti (Singh & Heldman 2014, 158).	11
Kuva 2. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (Bourne 2002, 74).	13
Kuva 3. Erilaisia kapillaariviskosimetrejä (Mezger 2011, 316).	16
Kuva 4. Koaksiaalinen rotaatioviskosimetri (Bourne 2002, 244).	17
Kuva 5. Kuulaviskosimetri (Viswanath ym. 2007, 73).	18
Kuva 6. In-line viskosimetri ja sen asennuskohtia (Marimex 2023).	20
Kuva 7. Vane-spindeli (Thermo Fisher Scientific 2023).	23
Kuva 8. Heliksijalusta ja T-bar-spindeli (Brookfield Engineering 2023b).	24

Kuviot

Kuvio 1. Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetit lämpötilan funktiona.	33
Kuvio 2. Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetit pyörimisnopeuden funktiona.	34
Kuvio 3. Tuotteen 3 viskositeetti lämpötilan funktiona.	41
Kuvio 4. Tuotteen 3 viskositeetti pyörimisnopeuden funktiona.	42

Taulukot

Taulukko 1. Viskositeetin yksiköt (mukaiillen Mezger 2011, 394).	26
Taulukko 2. Tuotteen 1 viskositeettimittausten mittausparametrit.	36
Taulukko 3. Tuotteen 2 viskositeettimittausten mittausparametrit.	37
Taulukko 4. Tuotteen 3 viskositeettimittausten mittausparametrit.	44

Käytetyt lyhenteet

CGS-järjestelmä	Senttimetri-gramma-sekunti-mittayksikköjärjestelmä
mPas	Millipascalsekunti, viskositeetin yksikkö
P	Poise, viskositeetin yksikkö
Pa	Pascal, paineen yksikkö
Pas	Pascalsekunti, viskositeetin yksikkö
Re	Reynoldsin luku, virtausolosuhteita kuvaava dimensioton luku
Rpm	Revolutions per minute, kierrosta minuutissa
s ⁻¹	Käänteissekunti
SI-järjestelmä	Kansainvälinen mittayksikköjärjestelmä
St	Stoke, viskositeetin yksikkö

1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää toimeksiantajayrityksen elintarvikevalmistuksen laadunvalvontaa viskositeettimittauksilla. Tavoitteena on alustaa tuotteiden tasalaatuisuuden ja tuotannon sujuvuuden parantamista tutkimalla valikoitujen tuotteiden viskositeettikäyttäytymistä ja viskositeettien vaihteluväliä. Lisäksi selvitetään, minkälaiset mittausmenetelmät ja viskosimetrit soveltuvat yrityksen tarpeisiin ja tuotteisiin sekä miten eri viskosimetreillä saadut tulokset ovat vertailtavissa keskenään.

Elintarvikevalmistuksessa viskositeetilla on tärkeä merkitys tuotteiden pakkaamisessa, tuotannon sujuvuudessa ja kulutuskokemuksessa. Tietämys tuotteen viskositeettikäyttäytymisestä ja viskositeetin vaihteluvälistä auttaa ymmärtämään ja tutkimaan juurisyitä tuotteen koostumuksesta johtuville ongelmille. Näin ollen on myös mahdollista vähentää koostumusongelmista aiheutuvaa tuotehävikkiä.

Opinnäytetyön ensimmäiset luvut taustoittavat työn tietopohjaa käsittelemällä teoriaa viskositeetin taustalla sekä syventymällä erilaisiin viskosimetreihin ja niiden soveltuvuuteen erityyppisten elintarvikkeiden mittauksessa. Teorian lähdeaineistona toimii pääasiassa kirjallisuus sekä tieteelliset artikkelit ja julkaisut. Työn aikana hankitun teorian ja tutkimustulosten avulla pohditaan yrityksen tarpeisiin sopivia viskosimetrivaihtoehtoja ja mittausmenetelmiä. Työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan tuotteiden viskositeettikäyttäytymistä ja viskositeetin vaihteluväliä sekä pohditaan mittauksiin vaikuttavia tekijöitä. Lopuksi kootaan yhteen työn tulokset ja pohditaan niiden luotettavuutta.

Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimii Oy Lunden Ab Jalostaja. Yrityksen Turussa sijaitsevassa elintarviketehtaassa valmistetaan monipuolisesti erilaisia elintarvikkeita ja tunnettujen brändien tuotteita.

2 Viskositeetti

2.1 Määritelmä

Viskositeetti mittaa materiaalin kykyä vastustaa virtausta. Materiaali reagoi siihen kohdistettuun leikkausjännitykseen osoittamalla joko elastista tai viskoosista käyttäytymistä. Yleisimmin materiaalissa esiintyy näiden yhdistelmä, jolloin puhutaan viskoelastisuudesta. (De Vicente 2012, 3.)

Leikkausjännitys on voimavektori, jolla on sekä suuruus että suunta. Se ilmaistaan voimayksikkönä poikkipinta-alaa kohden ja sen yksikkö on pascal (Pa). Leikkausnopeus on nopeusgradientti, jonka fluidi saa liikkeessaan leikkausjännityksen seurauksena. Sen yksikkö on käänteissekunti (s^{-1}). (Bourne 2002, 77.) Viskositeetti lasketaan jakamalla leikkausjännitys leikkausnopeudella ja se ilmaistaan yleisimmin yksikössä pascalsekunti (Pas) tai millipascalsekunti (mPas). Muita usein käytettäviä viskositeetin yksiköjä ovat poisi (P) ja senttipoisi (cP). Yksi pascalsekunti vastaa 10 poisia ($1 \text{ Pa} = 10 \text{ P}$). (Rao 2007, 6.)

Liikkeessä olevan fluidin sisällä voidaan kuvitella olevan kerroksia, jotka liukuvat toistensa yli. Viskoosivoimat toimivat näiden kuvitteellisten kerrosten välillä tangentiaalisesti ja niillä on taipumus vastustaa virtausta kerrosten välisellä alueella. Tämän vuoksi esimerkiksi hunaja, jonka viskositeetti on erittäin korkea, liikkuu kaadettaessa paljon hitaammin, kuin maito, jonka viskositeetti on huomattavasti pienempi. (Singh & Heldman 2014, 66.)

Viskositeetti aiheutuu molekyylien välisistä koheesivoimista. Liikkuakseen pois toistensa vuorovaikutuskentästä, molekyylit tarvitsevat energiaa. Näin ollen viskositeetti on termodynaaminen ominaisuus. (Kaski 2008.) Nesteiden viskositeetti on erittäin riippuvainen lämpötilasta ja osittain riippuvainen paineesta (Berg 2013, 30). Lämpötilan ja viskositeetin välillä vallitsee useimmiten käänteinen verrannollisuus, eli kun lämpötila nousee, aineen viskositeetti laskee. Vastaavasti kun lämpötila laskee, aineen viskositeetti nousee. (Bourne 2002, 80–81.)

2.2 Fluidityypit

Materiaaleja, jotka selvästi osoittavat virtauskäyttäytymistä, kutsutaan fluideiksi. Näitä ovat nesteet ja kaasut. (Mezger 2011, 26.) Fluidit voidaan käyttäytymisensä perusteella jakaa Newtonisiin ja ei-Newtonisiin, joista jälkimmäiset jakautuvat vielä omiin kategorioihinsa.

2.2.1 Newtoniset fluidit

Fluidia kutsutaan Newtoniseksi, jos sen viskositeetti on riippumaton leikkausnopeudesta (Jyväskylän Yliopisto 2009, 3). Newtoniset nesteet osoittavat suoran verrannollisuuden leikkausnopeuden ja leikkausjännityksen välillä. Kuvaaja leikkausjännityksestä leikkausnopeuden funktiona olisi siis origon kautta kulkeva suora, jonka kaltevuus kertoo viskositeetin arvon. (Singh & Heldman 2014, 78.)

Newtonista käyttäytymistä esiintyy yksinkertaisissa nesteissä, jotka koostuvat pienistä molekyyleistä, joiden välinen vuorovaikutus on vähäistä eikä ne muodosta toisiinsa liittyviä rakenteita. On kuitenkin huomioitava, että pieninä pitoisuuksina myös pitkäketjuiset polymeerit voivat osoittaa Newtonista käyttäytymistä. (Sahi 2014, 64.)

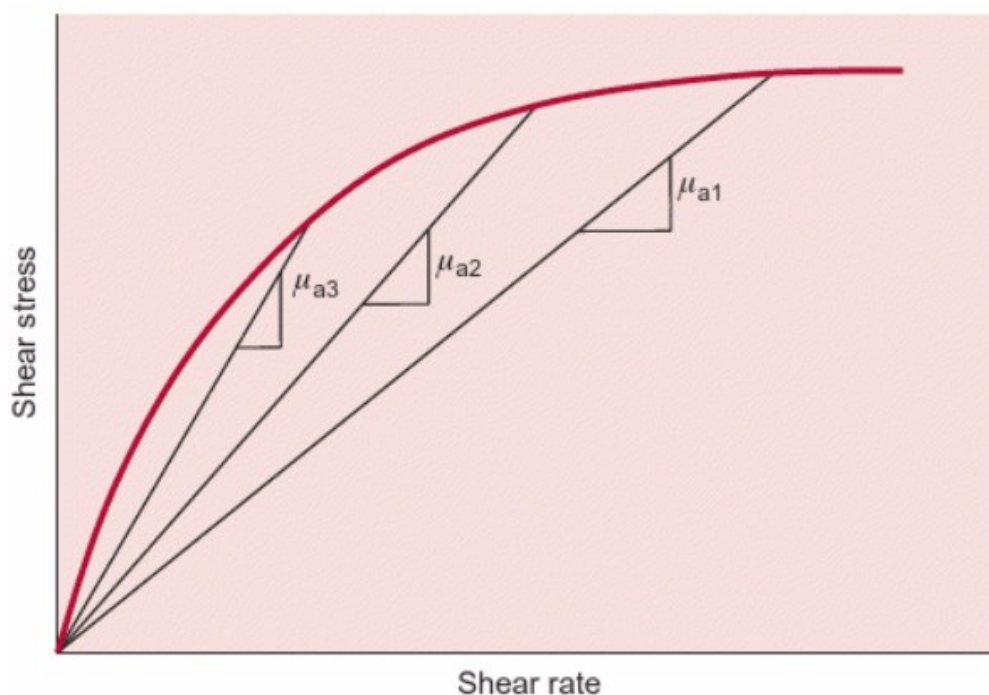
2.2.2 Ei-Newtoniset fluidit

Ei-Newtonisista fluideista puhutaan silloin, kun aineen viskositeetti muuttuu leikkausnopeuden tai ajan funktiona. Ei-Newtoninen neste on ajasta riippumaton, kun sen viskositeetti pysyy mitattaessa vakiona ajan suhteen. Kun viskositeetti muuttuu ajan kuluessa, kyseessä on ajasta riippuva neste. (Jyväskylän Yliopisto 2009, 3.) Ei-Newtonisten nesteiden kuvaaja leikkausjännityksestä leikkausnopeuden funktiona ei siis ole lineaarinen, kuten Newtonisilla nesteillä (Singh & Heldman 2014, 157).

Ajasta riippuvia fluideja ovat tiksotrooppiset ja reopektiset aineet.

Tiksotrooppisen materiaalin viskositeetti pienenee ajan kuluessa, kun siihen kohdistetaan leikkausjännitys, mutta se palautuu ajan myötä alkuperäiseen tilaansa. Reopektisen fluidin viskositeetti puolestaan kasvaa ajan kuluessa ja leikkausjännityksen vaikutuksesta. (Kealy 2007, 3.)

Ajasta riippumattomat ei-Newtoniset nesteet voidaan jakaa leikkausohenteisiin ja leikkauspaksuuntuviin nesteisiin. Näiden eroavaisuudet voidaan selittää näennäisen viskositeetin avulla. Näennäinen viskositeetti lasketaan käyttämällä karkeaa oletusta, jonka mukaan ei-Newtoninen neste noudattaa Newtonin viskositeettilakia. Näin ollen käyrään, joka esittää leikkausjännitystä leikkausnopeuden funktiona, piirretään suora viiva mistä tahansa valitusta pisteestä origoon (kuva 1). Tämän suoran kaltevuus antaa arvon näennäiselle viskositeetille. Arvo on riippuvainen valitusta leikkausnopeuden pisteestä ja on aina ilmaistava yhdessä sen laskemiseen käytetyn leikkausnopeuden arvon kanssa, muuten se on merkityksetön. (Singh & Heldman 2014, 157–158.)



Kuva 1. Näennäinen viskositeetti (Singh & Heldman 2014, 158).

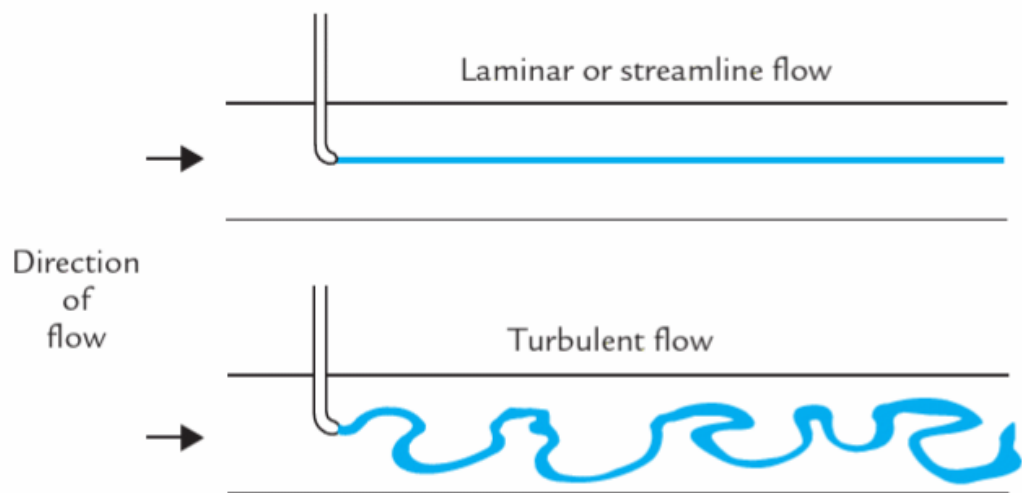
Leikkausohenteisten eli pseudoplastisten nesteiden kohdalla leikkausnopeuden kasvaessa näennäinen viskositeetti pienenee. Esimerkkinä leikkausohenteisista aineista voidaan käyttää sinappia ja majoneesia. Kun tuotetta ravistaa purkissa tai tuubissa, se muuttuu juoksevammaksi. (Singh & Heldman 2014, 158.)

Leikkausohenteista käyttäytymistä kohdataan monissa eri elintarvikeryhmissä. Käyttäytymisen taustalla on liuosten ja seosten sisältämien pienien hiukkasten, hiukkasrykelmien tai erikokoisien pisaroiden muutokset virtauksen vaikutuksesta. Ne asettuvat virtauksen suuntaisesti ja niiden molekyyliarakenteet voivat avautua. Pyöreiden pisaroiden muoto venyy soikeaksi ja hiukkasryhmät hajoavat. Näin ollen viskositeetti pienenee. (Rantamäki 2005.)

2.3 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Fluidien virtaus voidaan jakaa laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Laminaarisessa virtauksessa fluidi liikkuu tasaisesti yhteen suuntaan fluidin jokaisesta pisteestä katsottuna. Laminaarinen virtaus on yleistä elintarvikeprosesseissa, joissa virtausnopeus on pieni ja aineen viskositeetti suuri. (Berg 2013, 31.)

Turbulenttisisä virtauksessa hetkellinen nopeus fluidin tietyssä pisteessä vaihtelee suuruudeltaan ja suunnaltaan sattumanvaraisesti. Tämä aiheuttaa virtaukseen pyörteitä ja sekoittumista. Elintarvikeprosesseissa turbulenttista virtausta esiintyy tilanteissa, joissa virtausnopeus on suuri ja aineen viskositeetti pieni. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi veden, maidon tai muiden laimeiden liuosten pumppaus putkistoissa. (Berg 2013, 32.) Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen ero havainnollistetaan kuvassa 2, jossa ylempänä esitetään laminaarinen ja alempana turbulenttinen virtaus. Nuolet osoittavat virtauksen suunnan.



Kuva 2. Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus (Bourne 2002, 74).

Virtauksen laminaarisuuteen tai turbulentsuuteen vaikuttaa virtausnopeus, aineen tiheys ja viskositeetti sekä virtauskanavan geometria. Nämä muuttujat yhdistyvät dimensiottomaksi suureksi, joka tunnetaan nimellä Reynoldsin luku (Re). (Berg 2013, 31.) Reynoldsin luku voidaan määrittää Bergin (2013, 31) mukaan seuraavasti:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu},$$

jossa

D on virtausputken halkaisija (m)

v on virtausnopeus (m/s)

ρ on fluidin tiheys ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

μ on fluidin viskositeetti (Pas).

Reynoldsin luku kuvaa inertiaivoimien ja viskoosisten voimien suhdetta. Sen suuruus antaa tietoa virtauksen tyypistä. Laminaariseksi virtaukseksi voidaan yleisesti kutsua virtausta, jossa Reynoldsin luku saa arvon <2100 . (Chakraborty 2014, 45.)

2.4 Dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti

Dynaaminen viskositeetti, jota myös kutsutaan absoluuttiseksi viskositeetiksi, tarkoittaa aineen sisäistä kitkaa, eli sen kykyä vastustaa virtausta. Sen arvo saadaan jakamalla leikkausjännitys leikkausnopeudella. Dynaamisen viskositeetin yksikkö on pascalsekunti. (Bourne 2002, 76.) Se mittaa nesteen virtausvastusta, kun siihen kohdistetaan ulkoinen voima (Gatenby 2020).

Viskositeetti voidaan myös ilmaista kinemaattisena viskositeettina, joka lasketaan jakamalla dynaaminen viskositeetti aineen tiheydellä. Sen arvo saa yksikökseen neliömetrin per sekunti (m^2/s). (Singh & Heldman 2014, 79.) Tämä on SI-järjestelmän yksikkö, mutta kinemaattinen viskositeetti ilmaistaan usein myös yksikössä stoke, eli St (cm^2/s) (Jyväskylän Yliopisto 2009). Kinemaattinen viskositeetti tarkoittaa nesteen kykyä vastustaa virtausta painovoiman vaikutuksesta (ISO 3104:2020, 6).

Kahdella nesteellä, joilla on sama dynaaminen viskositeetti, voi olla erilaiset kinemaattiset viskositeetit. Tämä johtuu siitä, että kinemaattinen viskositeetti riippuu nesteen tiheydestä. Dynaamisessa viskositeetissa tiheydellä ei ole vaikutusta. (Gatenby 2020.)

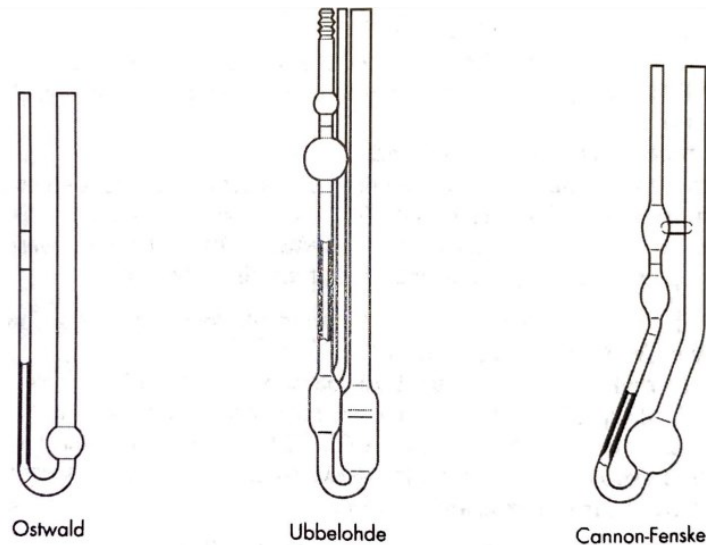
3 Erilaiset viskosimetrit

Viskositeetin mittaukseen käytettävä laite on viskosimetri. Viskosimetrejä on monenlaisia ja ne voidaan kategorisoida niiden toimintaperiaatteen mukaisesti. (Bourne 2002, 235.) Yleisimmin käytettyjä viskosimetrejä ovat kapillaariviskosimetrit, kuulaviskosimetrit ja rotaativiskosimetrit. (Abbas ym. 2010.) Edellä mainitut ovat tavallisesti laboratoriokäyttöön tarkoitettuja laitteita. Luvussa 3.4 esitellään myös prosessiviskosimetrejä.

3.1 Kapillaariviskosimetrit

Kapillaariviskosimetrin toimintaperiaate perustuu nesteen virtaamiseen yleensä lasista tehdyn pitkän kapillaarin läpi. Mittausta varten on tunnettava nesteen tilavuus sekä kapillaarin tarkka pituus ja halkaisija. Määrittäessä mitataan nesteen virtausaika kapillaariin merkittyjen kahden pisteen välillä. Nestemäinen näyte virtaa kapillaarissa painovoiman seurauksena. Virtausta ohjaava hydrostaattinen paine on verrannollinen syntyvään leikkausjännitykseen ja leikkausnopeuteen. Näytteeseen ei siis kohdisteta ulkoista painetta. (Mezger 2011, 315.)

Lasisilla kapillaariviskosimetreillä mitataan yleisesti alhaisen tai keskisuuren viskositeetin omaavia Newtonisia fluideja. Ne ovat helppokäyttöisiä, edullisia ja mittaustarkkuudeltaan hyviä. (Bourne 2002, 238.) Yleisesti käytössä olevia erilaisia kapillaariviskosimetrin variaatioita ovat Ostwald-, Ubbelohde- ja Cannon-Fenske-kapillaariviskosimetrit (Mezger 2011, 315–316). Nämä variaatiot esitetään kuvassa 3. Kapillaarit ovat kuvan mukaisesti U-putken muotoisia ja niiden varsiin on merkattu se näytteen virtaama matka, josta virtausaika mitataan.



Kuva 3. Erilaisia kapillaariviskosimetrejä (Mezger 2011, 316).

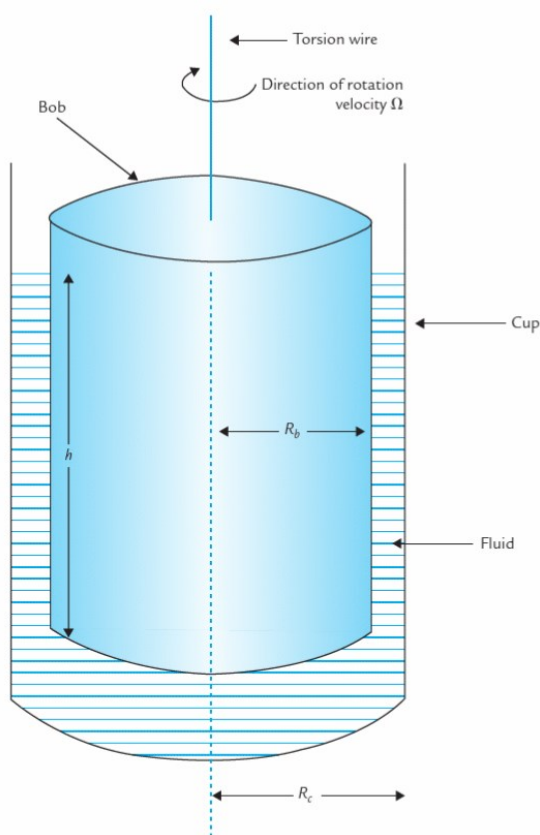
Kapillaariviskosimetrin käytössä on tärkeää, että kapillaari pidetään täsmälleen vertikaalisessa asennossa. Näytteen ja kapillaarin lämpötila tulee pitää vakaana ja ilmakuplien sekä vaahtoamisen muodostumista tulee välttää. Sisään- ja ulosmenovirtauksen häiriötekijöiden vaikutusta virtaukseen voi vähentää ottamalla huomioon kapillaarin pituus/halkaisija-suhde. Pituuden suhde halkaisijaan tulisi olla enemmän, kuin 10:1. (Mezger 2011, 315–316.) Kapillaarin halkaisijan tulee kuitenkin olla tarpeeksi pieni laminaarisen virtauksen varmistamiseksi (Abbas ym. 2010).

3.2 Rotaatioviskosimetrit

Tyypillisten rotaatioviskosimetrien toiminta perustuu mitattavassa fluidissa pyörivän spindelin tai sylinterin aiheuttamaan vääntömomenttiin. Fluidin kääntämiseen tarvittava vääntömomentti on kyseisen fluidin viskositeetin funktio. Viskositeetti voidaan siis laskea, kun tiedetään spindelin pyörimisnopeus ja tarvittava vääntömomentti. (Rahman ym. 2014.)

Koaksiaalinen ("coaxial") rotaatioviskosimetri on kaikista yleisin elintarviketeollisuudessa käytettävä viskosimetri ja se soveltuu sekä Newtonisten että ei-Newtonisten fluidien mittaukseen. Laitteeseen kuuluu

sylinterin muotoinen kuppi, johon näyte tulee, sekä näytteeseen upotettava sylinteri. Mittauksessa jompaakumpaa sylinteriä pyöritetään, mutta toinen näistä pysyy paikallaan. Leikkausnopeuden ja leikkausjännityksen suhde on sama riippumatta siitä, kumpaa osaa pyöritetään. Pyörimiseen vaadittavaa vääntömomenttia mittaa laitteeseen kuuluva sensori. (Bourne 2002, 243.) Kuvassa 4 esitetään koaksiaalisen rotaatioviskosimetrin toimintaperiaate. Kuvan ulompi sylinteri kuvaa avointa kuppia, johon näyte asetetaan. Sisempi sylinteri kuvaa näytteeseen upotettavaa osaa, joka on umpinainen.



Kuva 4. Koaksiaalinen rotaatioviskosimetri (Bourne 2002, 244).

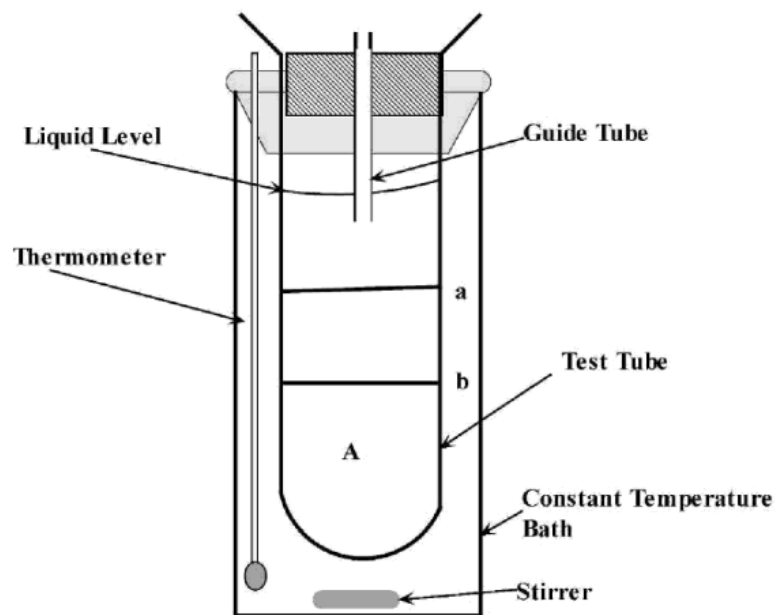
Koaksiaalisen rotaatioviskosimetrin käyttöön liittyy useita etuja. Se mahdollistaa useamman mittauksen samalla näytteellä käyttäen eri leikkausnopeutta. Mahdollisuus pyörittää sylinteriä eri nopeuksilla auttaa analysoimaan nesteen viskositeetin riippuvuutta leikkausnopeudesta ja analysoimaan ajasta riippuvaisia nesteitä. Lisäksi laite on helppokäyttöinen ja se tarjoaa vakaan suorituskyvyn sekä mittausolosuhteet. (Islam ym. 2016.)

3.3 Kuulaviskosimetrit

Kuulaviskosimetrimittauksissa mitataan aikaa, joka kuulalla kestää painovoiman vaikutuksesta pudota määritetty matka mitattavan nesteen läpi.

Kuulaviskosimetrin käyttö soveltuu Newtonisten fluidien mittaukseen, mutta sen sovellettavuus ei-Newtonisten fluidien mittaukseen on rajoittuneempi. Käyttöä rajoittaa myös fluidin sameus. Fluidin tulee olla tarpeeksi läpinäkyvää, jotta putoava kuula voidaan havaita sen sisällä. (Bourne 2002, 250.) Menetelmä on kuitenkin helppokäyttöinen, eikä näytteen haihtumista pääse tapahtumaan, sillä astia on suljettu (Mezger 2011, 334).

Kuula voi olla esimerkiksi terästä tai lasia. Kuulan putoamisnopeuteen vaikuttaa sen halkaisija ja tiheys. Suuremman halkaisijan ja tiheyden omaava kuula putoaa nopeammin, kuin kooltaan ja tiheydeltään pienempi kuula. Tämä tulee huomioida kuulan valinnassa. Putoamisnopeuden tulisi olla tarpeeksi hidas, jotta putoamisaikaa voidaan mitata riittävän hyvällä tarkkuudella. (Bourne 2002, 250.) Siksi kevyemmät lasikuulat soveltuvat paremmin matalaviskositeettisten ja tiheydeltään pienien näytteiden mittaukseen (Mezger 2011, 334). Kuva 5 esittää yksinkertaisen mallin kuulaviskosimetrinä ja siihen kuuluvista osista.



Kuva 5. Kuulaviskosimetri (Viswanath ym. 2007, 73).

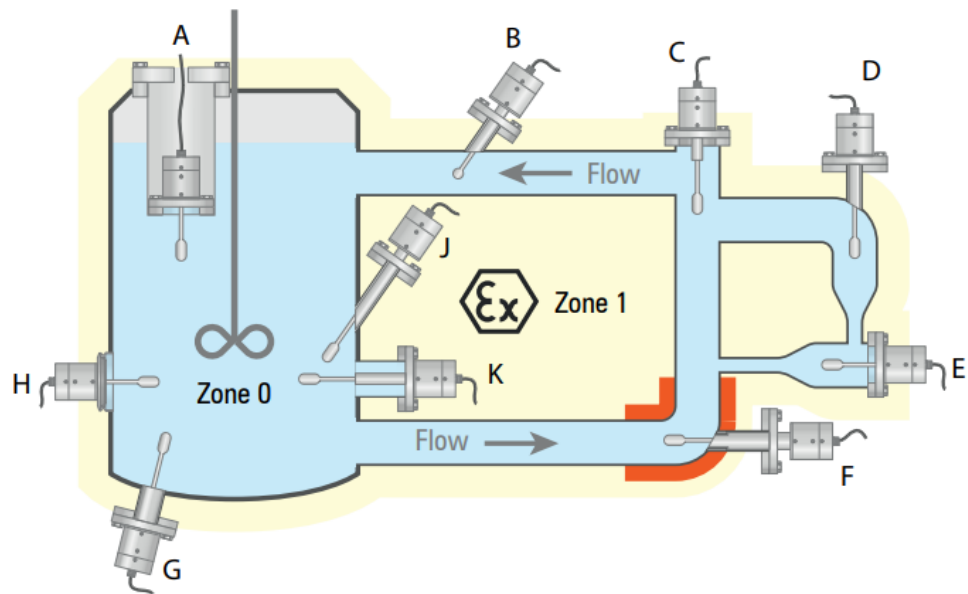
Putkeen A tulee mitattava näyte ja putki asetetaan vertikaalisesti astiaan, joka sisältää vakiolämpötilassa pidettävää nestettä. Putkea pidetään nesteastiassa, kunnes näyte saavuttaa tasaisen lämpötilan ja on vapaa ilmakuplista. Tämän jälkeen kuula viedään näyteputkeen sen yläpäässä olevaa kapeaa ohjausputkea pitkin. Kuula tulisi olla puhdistettu ja samassa lämpötilassa näytteen kanssa. Kuulan putoamisaika mitataan sen kulkiessa a:n ja b:n välisen alueen. Kuulan kulun ja ajan tarkan mittaamisen apuna voidaan hyödyntää erilaisia optisia laitteita tai magneettisia sensoreita. (Viswanath ym. 2007, 73–74.)

3.4 In-line ja on-line viskosimetrit

Prosessiviskosimetrit mahdollistavat jatkuvan ja reaaliajassa tapahtuvan viskositeetin mittauksen. In-line viskosimetrit voidaan asentaa prosessin päävirtaan, sivuvirtaan tai säiliöön, jolloin mittaus tapahtuu jatkuvasti ja automaattisesti prosessiolosuhteissa. Tavallisesti laite asennetaan esimerkiksi putkeen, jossa tuote virtaa. Laitteen sijainnissa on tärkeää ottaa huomioon, miten sen puhdistus tai huolto voi tarvittaessa tapahtua. (Steffe 1996, 58; Cicchese 2013.)

In-line mittauksissa näytettä ei erikseen tarvitse ottaa, vaan viskosimetri mittaa tuotteen viskositeettia jatkuvasti suoraan virrasta. On-line mittaus puolestaan tarkoittaa sitä, että tuotevirrasta otetaan automaattisesti näyte viskositeettimittaukseen, minkä jälkeen se voidaan palauttaa takaisin virtaan pysäyttämättä prosessia missään välissä. (Bowler ym. 2020.)

Kuvassa 6 esitetään eräs in-line viskosimetrin malli ja sen mahdollisia asennuskohtia. Riippuen laitteen mallista, se voidaan asentaa vertikaaliseen tai horisontaaliin asentoon, mutta myös kaltevasti. Se voi olla kohtisuorasti putkea vasten, mutta myös esimerkiksi putken kulmassa tai tankin pohjassa.



Kuva 6. In-line viskosimetri ja sen asennuskohtia (Marimex 2023).

Oikeanlainen asennus riippuu kuitenkin prosessin ja mitattavan aineen parametreista. Laitteen valintaan vaikuttaa myös se, mihin kohtaan prosessia se halutaan asentaa. (Cicchese 2013.)

4 Viskositeettimittaukset osana laadunvalvontaa

4.1 Viskositeettimittausten hyödyt

Viskositeetilla on tärkeä merkitys lopputuotteen laadussa, mutta se on myös keskeinen parametri virtausolosuhteiden optimoinnissa, pumppujen ja putkistojen mitoituksessa, energian kulutuksessa sekä jätteen vähentämisessä. Viskositeetin mittaamiseen käytettävät tekniikat ovat usein yksinkertaisia ja nopeita, mutta oikeanlaisen laitteen valinta on olennaista laadukkaiden tulosten saavuttamiseksi. (Rodrigues 2022.)

In-line mittauksilla vaihtelu tuotteen viskositeetissa voidaan havaita ja korjata välittömästi, ennen kuin se ehtii vaikuttamaan tuotteen laatuun negatiivisesti. Näin ollen on myös mahdollista vähentää liian alhaisesta tai korkeasta viskositeetista aiheutuvaa tuotehävikkiä. Koska in-line mittaukset tapahtuvat automaattisesti tuotannon aikana laboratorion sijasta, ei mittaukseen pääse vaikuttamaan ihmisestä johtuvat mittausvirheet. Säännöllisten mittausten ansiosta in-line menetelmä tarjoaa kokonaisvaltaisemman datan viskositeetin vaihtelusta tuotannon aikana, kuin laboratoriossa suoritettavat yksittäiset mittaukset. In-line mittauksilla voidaan saavuttaa hyvä kontrolli, mikäli viskositeettiin vaikuttavat tekijät, kuten lämpötila, mahdolliset ilmakuplat, turbulenssi ja painevaihtelut, pystytään pitämään suhteellisen vakaina. (Brookfield Engineering 2023a, 2–3.)

Viskositeetin valvonta kriittisissä leikkauspisteissä varmistaa, että tuote toimii sen käyttäjälle joka kerta samalla tavalla. Erityisesti in-line viskosimetrien käyttö haluttujen nesteominaisuuksien hallinnan automatisoimiseksi on nousussa. Laatu, johdonmukaisuus ja kuluttajan tyytyväisyys edellyttävät keskeisten parametrien, kuten viskositeetin, testausta ja hallintaa. (Cicchese 2013.)

4.2 Viskosimetrin valintaan vaikuttavat tekijät

Kun valitaan viskosimetriä prosessi- tai laboratoriokäyttöön, on huomioon otettavia tekijöitä useita. Prosessi- ja laboratorioviskosimetricien käyttötarkoitukset ovat erilaiset, vaikka niiden tekniikassa ja menetelmissä saataakin olla jonkin verran päällekkäisyyttä. (Riley 2022.)

Mitattavan tuotteen reologiset ominaisuudet ovat tärkeitä tekijöitä viskosimetrin valinnassa. Laitteen hankintaa varten tulee tietää, onko fluidin käyttäytyminen Newtonista vai ei-Newtonista, sisältääkö se kiinteitä partikkeleita ja kuinka paljon sekä mikä on sen viskositeetin vaihteluväli. Prosessiviskosimetrin hankinnan osalta laitteen valintaan vaikuttaa lisäksi tuotteen pH, linjan halkaisija, virtausnopeus ja lämpötilan vaihteluväli. (Riley 2022.)

4.3 Heterogeenisten tuotteiden viskositeetti ja mittaus

Nesteen sisältämät kiinteät partikkelit toimivat eräänlaisena esteenä nesteen virtaukselle ja lisäävät siten virtausvastusta eli viskositeettia. Partikkelien koko vaikuttaa siihen, miten suurena esteenä ne toimivat virtaukselle. Partikkelien pienempi koko johtaa suurempaan partikkelimäärään, mikä puolestaan vaikuttaa partikkelien välisen vuorovaikutuksen lisääntymiseen ja näin ollen kasvattaa viskositeettia. Partikkelit pakkaantuvat tiiviimmin yhteen, jolloin niiden on vaikeampi liikkua vapaasti. (Hill & Carrington 2006; Anton Paar 2023a.) Aineen viskositeetti siis suurenee, mikäli sen sisältämät kiinteät partikkelit pilkkotaan pienemmäksi, vaikka partikkelien kokonaistilavuus ei muuttuisi.

Rotaatioviskometri soveltuu sekä nestemäisten että puolikiinteiden näytteiden viskositeetin mittaukseen (Anton Paar 2023b). Näytteestä ja sen määrästä riippuen laitteeseen tulee valita mittaukseen sopiva spindeli laadukkaiden tulosten saamiseksi.

4.3.1 Vane-spindeli

Vane-spindeli on yksi rotaatioviskosimetrissä käytettävistä spindelivaihtoehdoista. Ulkomuodoltaan se on ohut ja yleensä neliteräinen (kuva 7). Sen ohut profiili mahdollistaa spindelin asettamisen näytteeseen ilman, että se aiheuttaa näytteelle vahinkoa tai häiriötä. Pyöriessään se tarttuu näytteeseen ja työntää sitä mukanaan. (Moonay 2009.)



Kuva 7. Vane-spindeli (Thermo Fisher Scientific 2023).

Vane-spindelit ovat erittäin hyödyllisiä mitattaessa heterogeenisiä materiaaleja, kuten partikkeleita sisältäviä elintarvikkeita. Tasaisen geometrian omaavalla spindelillä näytteen partikkelit saattavat työntyä pois päin pyörivän spindelin pinnasta, jolloin laite mittaa vain jäljelle jäävän nesteen viskositeettia. Vane-spindelin geometria mahdollistaa näytteen pysymisen kasassa spindelin pinnalla partikkeleineen, jolloin myös mittaustulos antaa paremman kuvan koko näytteen viskositeetista. (Moonay 2009.)

Vane-spindelin käyttö soveltuu myös tuotteille, jotka voivat liukua pois tasaisen geometrian omaavan spindelin vaikutusalueelta. Väärän spindelin käyttö näkyy esimerkiksi majoneesin viskositeettimittauksissa. Sylinterin muotoinen spindeli ikään kuin poraa majoneesin rakenteeseen itsensä muotoisen reiän, loput

näytteestä työntyy pois spindelin tieltä astian reunoille. Tämä näkyy mittaustuloksissa ensin korkeina lukemina, jotka kuitenkin laskevat lopulta vähäpätöisiksi. Vane-spindeli pitää majoneesin teriensä avulla mukana pyöryksessä. (Moonay 2009.)

4.3.2 T-bar-spindeli

Luvussa 4.3.1 esitetyt haasteet heterogeenisten tuotteiden mittaamiseen voidaan ratkaista myös heliksijalustalla ja T-bar-spindelillä. Tätä menetelmää käytetään usein esimerkiksi korkeaviskoosiin heterogeenisiin tuotteisiin, geeleihin, kermoihin ja tahnoihin (Brookfield Engineering 2013). Kyseinen systeemi esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Heliksijalusta ja T-bar-spindeli (Brookfield Engineering 2023b).

Menetelmässä heliksijalusta liikkuu vertikaalisesti samalla, kun T-bar-spindeli pyörii. Tämä liike muodostaa heliksin muotoisen polun spindelille mitattavassa aineessa. Näin ollen nesteen sisältämät kiinteät partikkelit eivät pääse ajautumaan poispäin spindelistä, eikä nesteeseen pääse muodostumaan mittausta häiritseviä uria. (Brookfield Engineering 2013.)

4.4 Mittausolosuhteet

Perinteinen tapa suorittaa viskositeettimittauksia on ottaa tuotantolinjalta näytteitä ja viedä ne laboratorioon analysoitavaksi. Laboratoriossa mittauksen olosuhteet voivat kuitenkin poiketa huomattavasti tuotanto-olosuhteista. Koska monien näytteiden reologiset ominaisuudet liittyvät läheisesti prosessin virtausolosuhteisiin, laboratoriomittaukset voivat johtaa epätarkkoihin tuloksiin. (Završnik & Joseph-Strasser 2013.) Näytteiden vieminen tuotantolinjalta laboratorioon vaatii myös asianmukaiset kuljetusolosuhteet luotettavan viskositeettiarvon saamiseksi (Anton Paar 2023c). Laboratoriossa tehtävissä mittauksissa on tärkeää huolehtia, että mittausolosuhteet ovat jokaisella kerralla samanlaiset, mikäli eri näytteistä saatuja tuloksia halutaan vertailla keskenään. Tällöin laitteen asetuksien ja esimerkiksi mittauksessa käytetyn spindelin tulee olla jokaisella kerralla samat.

Viskositeetin mittauksessa on ensiarvoisen tärkeää muistaa, että fluidien viskositeetti on erittäin riippuvainen lämpötilasta. Tämän vuoksi lämpötilan mittaus ja kontrollointi ovat hyvin oleellisia viskositeettia mitattaessa. Mittauslämpötilat tulisi esittää viskositeettiarvojen yhteydessä, jotta datasta olisi hyötyä. (Bourne 2002, 235.) Lämpötilan nostaminen saa nesteen molekyylit liikkumaan vilkkaammin, jolloin ne viettävät vähemmän aikaa kontaktissa toistensa kanssa. Tämä vähentää nesteen sisäistä kitkaa ja näin ollen nesteen viskositeettia. (Sahi 2014, 66.)

In-line mittauksissa tulee huomioida, että laite mittaa sen kanssa kontaktiin virtaavan näytteen, jolloin on mahdollista, että mittaustulos on peräisin epäedustavasta näytteestä. Epäedustava näyte voi johtua esimerkiksi näytteen kerrostumisesta (stratifikaatio), sekoituksesta tai turbulenssista. On siis hyvä varmistaa, että laitteen asennuskohta on sellainen, että se pääsee mittaamaan edustavaa näytettä. (Cicchese 2013.)

5 Viskositeettitulosten vertailukelpoisuus

5.1 Viskositeetin yksiköt

Viskositeettityyppejä on erilaisia ja niillä on omat yksiköt. Tämän lisäksi eri sovellukset voivat käyttää eri järjestelmien, kuten SI- tai CGS-järjestelmien yksiköitä. (Rheosense 2023.) Siksi on tärkeää ymmärtää eri yksiköiden suhteista toisiinsa. Koska eri viskosimetrit ja laskukaavat voivat antaa viskositeettituloksen eri yksiköissä, on tulosten vertailtavuuden vuoksi olennaista muuttaa tulokset samaan yksikköön.

Poisi (P) ja stoke (St) ovat CGS-järjestelmän yksiköitä dynaamiselle ja kinemaattiselle viskositeetille. Vastaavat yksiköt SI-järjestelmässä ovat pascalsekunti (Pas) ja neliometri per sekunti (m^2/s). (Rheosense 2023.) Taulukossa 1 esitetään, miten edellä mainitut yksiköt vastaavat toisiaan.

Taulukko 1. Viskositeetin yksiköt (mukaillen Mezger 2011, 394).

Viskositeetti- tyyppi	SI-järjestelmä	CGS- järjestelmä	Järjestelmien väliset yksikkömuunnokset
Dynaaminen viskositeetti	Pas pascalsekunti	P poisi	1 Pas = 10 P = 1000 cP 1 mPas = 1 cP 1 P = 100 cP = 0,1 Pas
Kinemaattinen viskositeetti	m^2/s	St stoke	1 cm^2/s = 1 St = 100 cSt 1 mm^2/s = 1 cSt 1 m^2/s = $10^4 cm^2/s$ = $10^6 mm^2/s$

SI-järjestelmässä kinemaattisen viskositeetin yksikkö on m^2/s , mutta useimpien fluidien viskositeettiarvojen vuoksi yleisemmin käytetty muunnos tästä on cm^2/s . Vastaavasti pascalsekunneista käytetään useimmiten variaatiota millipascalsekunti (mPas), sillä useimpien fluidien viskositeetti jää alle arvon 1 Pas. (Rheosense 2023.)

5.2 Mittausmenetelmän vaikutus tulosten vertailukelpoisuuteen

Eri viskosimetreillä saatujen tulosten vertailussa on otettava huomioon useita tekijöitä. Newtonisten fluidien mittauksissa eri laitteilla saadut tulokset ovat vertailtavissa keskenään sellaisenaan, sillä fluidin käyttäytyminen ei riipu leikkausjännityksestä. Jos näytteen lämpötila on molemmilla mittauskerroilla sama, pitäisi mittaustulosten myös vastata toisiaan. Ei-Newtonisten fluidien kohdalla vertailtavuus on monimutkaisempaa, sillä niiden viskositeetti riippuu leikkausnopeudesta. Jos mittaus toistetaan eri tyyppisellä viskosimetrillä, spindelillä tai nopeudella, mittausta ei ole toistettu samoissa olosuhteissa eivätkä tulokset näin ollen ole vertailtavissa. (Labomat 2023.)

Kun halutaan verrata kahdella eri Brookfield-viskosimetrillä saatuja tuloksia, tulee varmistaa käytettyjen parametrien yhtäläisyys. Laitteen tyyppi (LV, RV, HA, HB), käytetyn spindelin tyyppi, koko ja pyörimisnopeus sekä näytteen mittausaika tulee olla samat. Näytteen tulee molemmilla mittauksilla olla samassa lämpötilassa ja näyteastian tulee käyttää samankokoisia dekantterilaseja. Lisäksi näytteen tilavuuden tulee olla molemmilla mittauskerroilla sama. Myös mahdollisen spindelin suojakehikon käyttämisellä tai sen puuttumisella on vaikutus mittaustulosten vertailtavuuteen. Jos toista näytettä on hiljattain sekoitettu, se ei välttämättä tuota samaa tulosta kuin näyte, joka on ollut levossa minuutteja tai tunteja. Näin ollen näytteen leikkaushistorialla on myös merkitystä. (Brookfield 2015, 52; Labomat 2023.)

6 Yrityksen tarpeisiin soveltuvat viskosimetrit

Oikeanlaisen viskosimetrin valinta perustuu useisiin tekijöihin, joista tärkeimpiin kuuluu näytteen tyyppi. Vaikka jotkut elintarvikkeet voivatkin olla Newtonisia, suurin osa on ei-Newtonisia ja osa lisäksi viskoelastisia (Barbosa-Cánovas 2009, 11). Yrityksen valmistamista tuotteista valtaosa on heterogeenisiä ja sisältää kiinteitä partikkeleita. Tuotteita valmistetaan myös hyvin erilaisissa lämpötiloissa ja olosuhteissa. Edellä mainituilla seikoilla on hyvin tärkeä merkitys viskosimetrin valinnassa.

6.1 Partikkeleita sisältävät näytteet

Laboratorioviskosimetreistä rotaatioviskosimetri soveltuu partikkeleita sisältävien heterogeenisten näytteiden mittaamiseen paremmin, kuin esimerkiksi kapillaari- tai kuulaviskosimetri. Oikeanlaisen spindelin valinta on kuitenkin oleellista luotettavien tulosten saamiseksi. Kappaleessa 4.3 esitetyt spindelivaihtoehdot voivat tarjota luotettavampia tuloksia tietyille tuotetyypeille, kuin yrityksen tämänhetkisessä käytössä olevat disc-tyyppiset spindelit. Tämä pätee erityisesti korkeaviskositeettisiin tuotteisiin, joihin disc-spindeli ikään kuin poraa sylinterin muotoisen käytävän. Korkean viskositeetin omaava näyte jää siihen asentoon, johon spindeli on sen työntänyt, eikä virtaa tasaisesti sen ympärille. Disc-spindelit ovat kuitenkin yleiskäyttöisiä spindeleitä, jotka tuottavat tarkkoja ja toistettavissa olevia viskositeettimääryityksiä useimmille fluideille (Brookfield 2017, 4).

Disc-spindelien soveltuvuus tuotteille, joilla on myötöraja, ei ole optimaalinen. Tämä johtuu siitä, että näyte voi liukua pois spindelin pinnalta ja spindelin upotus näytteeseen voi aiheuttaa näytteelle merkittävää häiriötä. (Potanin & Marron 2021, 1.) Myötöräjäksi kutsutaan sellaista voimaa, joka täytyy kohdistaa näytteeseen, jotta se alkaa virrata. Aineita, joilla on myötöraja, kutsutaan plastisiksi aineiksi. Plastiset aineet käyttäytyvät kiinteän aineen tavoin niin kauan, kun niitä ei liikutella tai niihin ei kohdisteta voimaa. Kun niihin kohdistettu

voima ylittää aineen sidosvoimat, sen rakenne hajoaa ja se voi virrata vapaasti. (Rantamäki 2005, 1–2.)

6.2 Tarkkaa lämpötilakontrollointia vaativat näytteet

Mikäli näyte täytyy mitata tietyssä lämpötilassa tai lämpötilalla on suuri vaikutus tuotteen viskositeettiin, voi perinteisellä laboratorioon sijoitetulla rotaatioviskosimetrillä mittaaminen tuottaa hankaluuksia. Kuumat ja kylmät näytteet voivat jäähtyä tai lämmetä liikaa, kun näytettä kuljetetaan tuotantolinjalta laboratorioon. Näytteen lämpötila jatkaa muuttumista myös mittauksen aikana etenkin, jos mittaus kestää kauan tai samaa näytettä halutaan tutkia esimerkiksi erilaisin laiteasetuksin. Näytteen uudelleenlämmittäminen tai -jäähdyttäminen voi vaikuttaa sen viskositeettiin ja ominaisuuksiin, jolloin mittaustulos ei välttämättä ole enää luotettava.

Jos tällaisen tuotteen viskositeettia halutaan seurata säännöllisesti ja automaattisesti, saattavat prosessiviskosimetrit olla paras vaihtoehto. Ne soveltuvat ei-Newtonisten ja partikkeleita sisältävien näytteiden mittaamiseen. Lisäksi niiden asennus suoraan tuotantolinjalle esimerkiksi putkeen tai tankkiin varmistaa, että näyte mitataan samoissa olosuhteissa, kuin missä se pakataan tai valmistetaan. Näin ollen ei tarvitse huolehtia näytteen jäähtymisestä tai lämpenemisestä kuljetuksen ja mittauksen aikana.

Mikäli taas tuotteen jatkuvalle viskositeetin todentamiselle ei ole tarvetta vaan mittaukset perustuvat satunnaiselle mittaustarpeelle, voi laboratorioviskometri riittää, kun näytteen lämpötilan kontrollointiin panostetaan. Näytteen kuljetuksessa kannattaa käyttää kannellista lämpöä eristävää astiaa, joka voidaan tarvittaessa vielä sulkea kylmä- tai kuumalaukkuun. Kuljetusastian voi tarvittaessa esilämmittää tai -jäähdyttää. Laboratorioon päästyä näyte voidaan laittaa nopeasti valmiiksi säädettyyn vesihauteeseen. Mittausastia sekä mahdollinen spindeli ja sen suojakehikko voidaan esilämmittää tai -jäähdyttää vesihauteessa myös. Kuumien tuotteiden mittauksessa voi hyödyntää mittausastian alle asetettavaa pientä lämpölevyä, jotta näyte pysyy kuumana

myös mittauksen aikana. Kylmille tuotteille puolestaan voi tehdä jäähauteen mittausastian ympärille. Jäähaude voi kuitenkin asettaa hankaluuksia lämpötilan tarkalle ylläpidolle, sillä hauteen lämpötilaa ei voi säätää. Tällaisten näytteiden mittaukseen hyvä vaihtoehto olisi myös viskosimetri, joka itsessään sisältää lämpötilan kontrollointiyksikön, kuten vesihauteen. Lämpötilan kontrollointiyksikkö on hankittavissa joihinkin viskosimetreihin myös lisäosana, jolloin kokonaan uudelle laitteelle ei ole tarvetta.

6.3 Tuotantolinjalla tapahtuvat mittaukset

Tuotteiden viskositeettimittauksia on mahdollista tehdä myös tuotantolinjalla esimerkiksi tuotannon työntekijöiden toimesta. Tätä varten on olemassa helppokäyttöisiä kannettavia viskosimetrejä, jotka ovat suunniteltu kestäviksi ja nopeakäyttöisiksi. Tällaisesta laitteesta esimerkkinä voidaan käyttää Viscolite 700 -viskosimetriä.

Viscolite 700 on käsikäyttöinen kannettava viskosimetri, jota voidaan operoida missä tahansa ilman mittauksia edeltävää asettelua tai säätöjä. Sen toiminta perustuu värähtelyyn mitattavassa fluidissa. Värähtelevä sensori menettää energiaa fluidin viskositeetin seurauksena, minkä kautta viskositeetti määrittyy. Laite on paristokäyttöinen ja sen anturi on kiinteä eikä sisällä liikkuvia osia. Koska sitä voidaan käyttää millä tahansa näytetilavuudella, voi viskositeetin mitata suoraan siitä säiliöstä, jossa tuotetta muutenkin pidetään, oli se sitten tankki tai pieni astia. Näin ollen näytettä ei tarvitse erikseen ottaa, mikä nopeuttaa mittauksia. Viscolite 700 soveltuu lämpötilavälillä $-20\dots+120\text{ °C}$ olevien näytteiden mittaukseen ja sen mittausalue on 0-10 000 cP. (Hydramotion 2013, 5–7.)

Viscolite 700 on vain yksi esimerkki kannettavista viskosimetreistä. Sopiva laite olisi kuitenkin sellainen, jonka mittausalue vastaa mitattavan tuotteen viskositeettia. Tuotantolinjalla työntekijöiden toimesta tapahtuvat viskositeettimittaukset ovat kätevä tapa seurata tuotteen viskositeetin vaihteluväliä, mikäli in-line mittarille ei ole tarvetta tai mahdollisuutta.

7 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetti

Tutkimuksen kohteena oli kaksi samaan tuoteryhmään kuuluvaa tuotetta. Kummankaan tuotteen viskositeettikäyttäytymisestä ei ollut aiempaa tutkimusdataa, joten ennen viskositeetin vaihteluvälin tutkimista oli tarpeen perehtyä tuotteiden viskositeettikäyttäytymiseen yleisesti. Työssä tutkittiin lämpötilan vaikutusta tuotteiden viskositeetteihin sekä tuotteiden fluidityyppejä. Tämän jälkeen kerättiin dataa tuotteiden viskositeettien vaihteluväleistä.

7.1 Mittauslaite

Työ toteutettiin Brookfield DV-1 Prime -rotaatioviskosimetrillä ja Brookfieldin disc-tyyppisellä RV6-spindelillä. Mittaus perustuu siihen, kuinka suuri jousivoima tarvitaan spindelin pyörittämiseen tietyllä nopeudella näytteessä. Laite tarjoaa 10 eri pyörimisnopeutta (rpm). Näin ollen viskositeettia voitiin mitata joko vakiopyörimisnopeudella tai sen muutosta voitiin tutkia pyörimisnopeuden funktiona. Pyörimisnopeus on verrannollinen leikkausnopeuteen (Brookfield 2017, 24). Laite sisälsi lisäksi lämpömittarin, joka voitiin kiinnittää kiinnikkeellä joko mittausastiaan tai spindeliä suojaavaan kehikkoon.

Spindeli tulee upottaa näytteeseen sen akselin syvennyiskohtaan saakka. Spindelin upottaminen liian syväälle tai liian korkealle voi aiheuttaa vääriä viskositeettilukemia. Jossain tapauksissa näytteen reologiset ominaisuudet voivat muuttua, kun spindeli lasketaan näytteeseen. Tällöin spindelin voi laskea näytteessä eri kohtaan, kuin mistä mittaus on tarkoitus tehdä. Kun spindeli on upotettu, sen voi siirtää horisontaalisesti näyteastian keskelle ja kiinnittää vasta sitten laitteeseen. (Brookfield 2017, 12.)

Ennen viskositeettituloksen lukemista tulee odottaa, että laitteen lukemat tasaantuvat. Tämä voi joskus viedä jopa 5 minuuttia. Jotta mittausmenetelmä olisi hyvin toistettavissa, kannattaa jokaisen näytteen kohdalla ottaa aina tietty aika, jonka jälkeen lukema luetaan. Jos lukema ei saavuta tasapainoa ja jatkaa

heilahtelua, kyseessä on mahdollisesti näyte, jolla on sekä viskoosisia että elastisia komponentteja. Jos lukema puolestaan jatkaa joko nousemista tai laskemista ajan kuluessa, kyseessä on todennäköisesti ajasta riippuva ei-Newtoninen näyte. (Brookfield 2017, 12.)

7.2 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettikäyttäytyminen

Ennen varsinaista viskositeettikäyttäytymisen tutkimista selvitettiin, minkälaiset mittausolosuhteet sopivat tuotteiden mittaukseen. Vakioidut mittausolosuhteet ovat olennainen osa tulosten vertailukelpoisuutta. Viskositeettikäyttäytymisen osalta tutkittiin, miten lämpötilan nousu vaikuttaa tuotteiden viskositeetteihin. Lisäksi testattiin, osoittavatko tuotteet leikkausohenevaa käyttäytymistä, minkä myötä määritettiin myös, ovatko ne Newtonisia vai ei-Newtonisia.

7.2.1 Mittausolosuhteiden vakiointi

Mittausolosuhteiden vakiointi oli tärkeä vaihe ennen mittausten aloittamista, jotta eri eristä otettujen näytteiden mittaustulokset olisivat luotettavammin vertailtavissa toisiinsa. Näytteille sopivaan spindelikokoon päädyttiin kokeilemalla eri kokoja ja pyörimisnopeuksia. Mittauksessa tavoitteena oli saada jousivoiman (%) lukema välille 10-100 ottaen huomioon, että suhteellinen mittausvirhe paranee lukeman lähestyessä arvoa 100 (Brookfield 2017, 11). Kokeilemalla eri yhdistelmiä todettiin, että spindelillä RV6 ja pyörimisnopeudella 10 rpm päästiin jousivoiman osalta lähimmäksi arvoa 100 ilman vaaraa siitä, että lukemat nousisivat skaalan ulkopuolelle, jolloin laite ei anna tulosta.

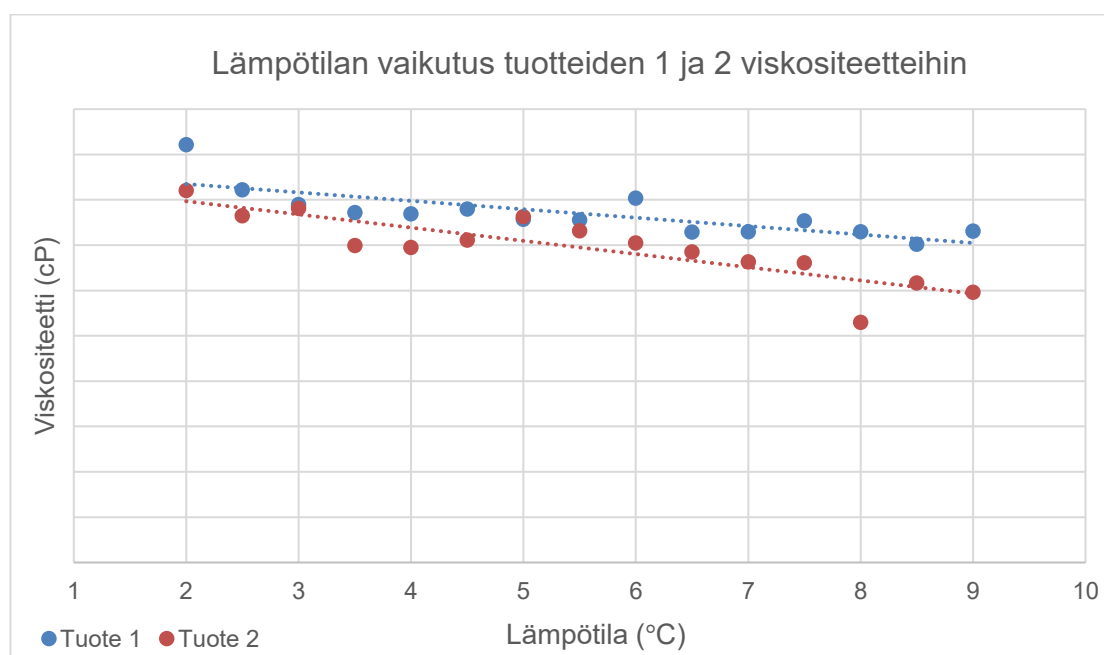
Kun mittaus aloitetaan, tulee näytöllä olevien parametrien antaa saavuttaa näennäinen tasapaino ennen, kuin viskositeetti-arvo luetaan. Tätä varten voidaan yleensä odottaa kohtuullinen aika ja seurata, milloin lukemat tasoittuvat. (Brookfield 2017, 12.) Mittausolosuhteiden vakiointia varten testattiin, mikä on sopiva odotusaika ennen viskositeetti-arvon lukemista. Tuotteita mitattiin 10 minuuttia, minkä jälkeen taulukoiduista tuloksista

määritettiin, missä kohdassa tulos alkoi vakiintua. Testin perusteella todettiin, että noin 2 minuuttia on sopiva aika odottaa ennen tuloksen lukemista. Näin ollen päätettiin, että viskositeetin arvo luetaan aina 2 minuutin päästä mittauksen aloittamisesta. Mittausastiana käytettiin lasisia 600 ml dekanttereita.

Lämpötilan osalta mittaukset pyrittiin suorittamaan tuotteiden ollessa samassa lämpötilavälissä, kuin tuotantolinjalla niiden pakkauksen aikana. Koska lämpötilalla on suuri vaikutus viskositeettiin, näytteet eivät saaneet lämmetä liikaa ennen mittausta tai sen aikana.

7.2.2 Lämpötilan vaikutus tuotteiden 1 ja 2 viskositeetteihin

Lämpötilan vaikutusta viskositeettiin tutkittiin mittaamalla näytteiden viskositeettia lämpötilan kasvaessa. Tutkittavaksi lämpötilaväliksi valittiin 2-9 °C. Näytteet jäähdytettiin jäähautteessa, minkä jälkeen lämpötilan annettiin nousta hiljalleen huoneenlämmössä. Viskositeetti mitattiin puolen celsiusasteen välein. Tulosten havainnollistamiseksi muodostettiin kuvaajat viskositeeteista lämpötilan funktiona. Molempien tuotteiden kuvaajat esitetään rinnakkain kuviossa 1.

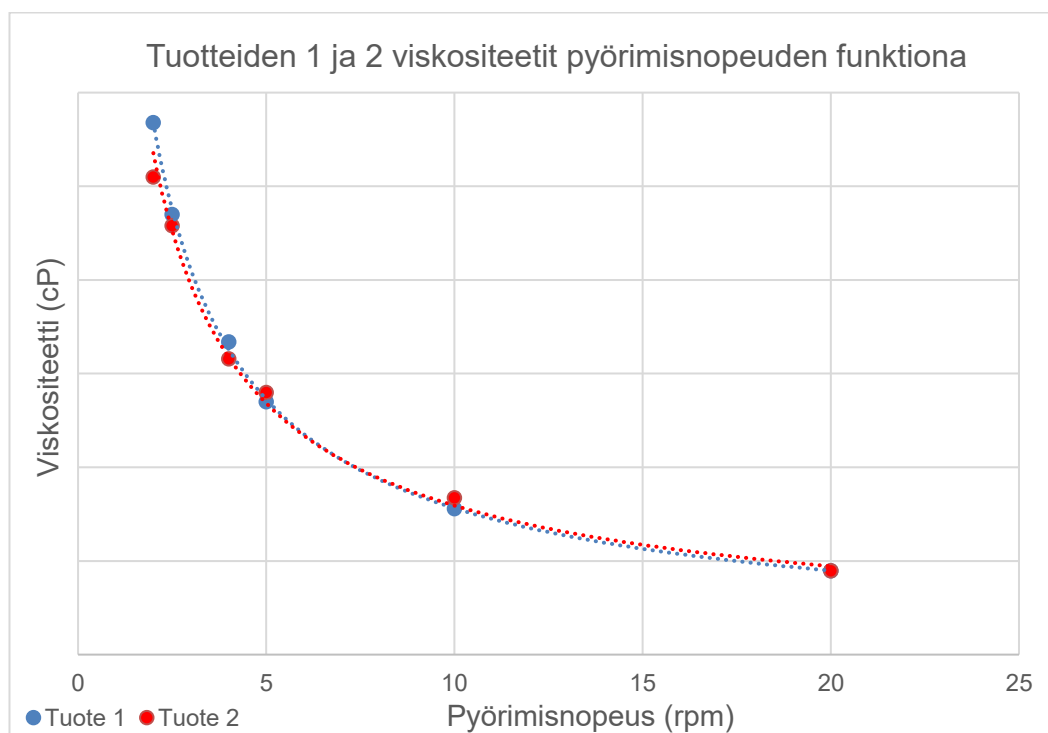


Kuvio 1. Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetit lämpötilan funktiona.

Tulokset osoittivat, että tuotteiden viskositeetit laskivat lämpötilan noustessa, mikä on tyypillistä erityisesti elintarvikkeille. Kuvaajan mukaan tuotteen 2 suora on hieman kaltevampi, mikä viittaa siihen, että sen viskositeetti laskee hieman enemmän lämpötilan vaikutuksesta, kuin tuotteen 1.

7.2.3 Leikkausohenevuuden testaus

Viskositeettikäyttäytymiseen liittyen tutkittiin, osoittavatko tuotteet leikkausohenevaa käyttäytymistä. Koska useista tutkimuksista selvinneen tiedon perusteella yksi tuotteiden pääraaka-aineista on tyypillisesti leikkausohenevaa, todettiin tämän testin olevan aiheellinen. Testi suoritettiin mittaamalla tuotteiden viskositeettia spindelin pyörimisnopeuden kasvaessa. Rotaatio aloitettiin alhaisella nopeudella ja nostettiin hiljalleen korkeammaksi pysäyttämättä laitetta välissä. Tulos luettiin aina 2 minuutin kuluttua pyörimisnopeuden säädöstä, jotta lukema ehti tasoittua. Mittaustulosten perusteella muodostettiin käyrät tuotteiden viskositeettien muutoksista pyörimisnopeuden funktiona. Käyrät esitetään kuviossa 2.



Kuvio 2. Tuotteiden 1 ja 2 viskositeetit pyörimisnopeuden funktiona.

Molempien tuotteiden kohdalla oli selvää, että viskositeetti laski pyörimisnopeuden kasvaessa. Testissä käytettiin kuutta eri pyörimisnopeutta ja molemmat tuotteet mitattiin suurinpiirtein lämpötilassa 10 °C. Molemmissa tuotteissa viskositeetin lasku oli samaa suuruusluokkaa.

Tuotteiden viskositeettien laskeminen pyörimisnopeuden kasvamisen seurauksena viittaa siihen, että näytteet osoittavat leikkausohenteista käyttäytymistä ja ovat siten ei-Newtonisia. Kuviosta nähdään, että viskositeetti muuttui lähes identtisesti molemmilla tuotteilla, sillä käyrät ovat lähes päällekkäiset.

7.3 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettien vaihteluväli

Tuotteiden viskositeettien vaihteluväliä tutkittiin mittaamalla eri eristä otettuja näytteitä. Jokaisesta erästä pyrittiin saamaan useampi näyte, jotta otannasta tulisi tarpeeksi laaja. Näytteet mitattiin aina mahdollisimman tuoreeltaan niiden ottamisen jälkeen, jotta ne vastaisivat mittausten aikana mahdollisimman hyvin niiden ominaisuuksia pakkaamisen aikana.

Mittauksissa käytettiin luvussa 7.2.1 esiteltyjä vakioituja mittaolosuhteita, eli pyörimisnopeutta 10 rpm ja spindeliä RV6. Viskositeetin arvo luettiin aina 2 minuutin jälkeen. Taulukossa 2 esitetään tuotteen 1 näytetiedot sekä viskositeettimittausten mittauseräparametrit.

Taulukko 2. Tuotteen 1 viskositeettimittausten mittausparametrit.

Erä	Näyte	Lämpötila (°C)	Jousivoima (%)
26.10.23	1	5,3	83,1
	2	5,7	70,6
	3	5,6	76,2
31.10.23	1	4,6	74,2
	2	4,8	86,0
	3	5,3	80,8
	4	5,3	74,5
	5	5,8	81,3
1.11.23	1	6,0	72,1
	2	5,4	75,0
3.11.23	1	5,1	89,2
	2	5,4	79,1
	3	5,3	69,2
6.11.23	1	5,1	80,7
	2	5,0	90,5
	3	4,7	78,5
7.11.23	1	5,4	99,4
	2	5,6	87,1
	3	5,1	59,0
	4	5,5	65,1
	5	5,5	82,5
8.11.23	1	5,6	73,4
	2	5,1	94,0
	3	5,0	98,4

Tuotteelle 2 toteutettiin mittaukset vastaavalla tavalla. Taulukossa 3 esitetään tuotteen 2 näytetiedot sekä viskositeettimittausten mittausparametrit.

Taulukko 3. Tuotteen 2 viskositeettimittausten mittausparametrit.

Erä	Näyte	Lämpötila (°C)	Jousivoima (%)
26.10.23	1	6,5	73,0
	2	6,3	82,6
	3	6,4	96,0
30.10.23	1	6,8	84,8
31.10.23	1	6,4	96,8
	2	6,4	88,3
	3	6,5	74,7
1.11.23	1	6,1	82,6
	2	5,7	81,2
	3	6,3	84,6
3.11.23	1	5,3	63,8
	2	5,9	71,5
	3	5,8	68,3
6.11.23	1	5,6	67,7
	2	6,1	66,6
	3	5,5	99,2
7.11.23	1	5,8	51,1
	2	6,0	75,8
	3	6,1	92,6
8.11.23	1	5,6	96,2
	2	5,7	73,1
	3	5,6	94,8

Viskositeettimittausten perusteella voitiin päätellä, että molemmissa tuotteissa viskositeetti vaihtelee suhteellisen suurella välillä. Vaihtelua esiintyi kummassakin tuotteessa sekä eräkohtaisesti että erien sisälläkin. Samasta erästä otetuissa näytteissä oli havaittavissa toisinaan runsaastikin vaihtelua.

Vaihteluväliin on mahdollisesti vaikuttanut esimerkiksi tuotteissa olevien partikkelien jakautuneisuus. Jos otettuun näytteeseen on sattunut keskimääräistä vähempi määrä kiinteitä partikkeleita, on sen viskositeetti todennäköisesti myös alhaisempi. Partikkelien määrään näytteessä puolestaan vaikuttaa se, kuinka hyvin tuote on sekoittunut valmistusastiassa ennen

näytteenottoa. Viskositeetin vaihteluväliin voi vaikuttaa myös vaihtelu raaka-aineissa. Esimerkiksi tuotteissa käytetyn raaka-aineen nestepitoisuus voi vaihdella tietyllä välillä, mikä voi tuoda myös tuotteiden viskositeetteihin vaihtelua. Myös tuotteiden leikkaushistorialla voi olla merkitystä. Jos yhtä tuotetta on esimerkiksi sekoitettu enemmän, kuin toista, voi sillä olla alhaisempi viskositeetti. Vaihteluväliin vaikuttavia tekijöitä käsitellään lisää luvussa 9.1.3.

8 Tuotteen 3 viskositeetti

Kolmas tutkittava tuote kuului eri tuoteryhmään, kuin aiemmat. Näytteet otettiin tuotantolinjalta vaiheesta juuri ennen tuotteen pakkaamista. Tuotteen viskositeettikäyttäytymisestä ei ollut aiempaa dataa, joten tutkimus aloitettiin perehtymällä ensin siihen. Tämän jälkeen tutkittiin viskositeetin vaihteluväliä.

8.1 Mittauslaite

Mittauslaitteena käytettiin luvussa 7.1 esiteltyä Brookfield DV-1 Prime rotaatioviskosimetriä ja disc-tyyppistä RV5-spindeliiä.

8.2 Tuotteen 3 viskositeettikäyttäytyminen

Tuotteen 3 osalta tutkittiin vastaavia asioita, kuin tuotteista 1 ja 2. Tutkimus alkoi mittausolosuhteiden vakioinnista, minkä jälkeen tarkasteltiin lämpötilan vaikutusta viskositeettiin. Lisäksi tutkittiin, osoittiko tuote leikkausohenevaa käyttäytymistä. Erityisenä kiinnostuksen kohteena oli lämpötilan vaikutus viskositeettiin, sillä tuotteen tiedettiin muuttavan koostumustaan jäähtyessään.

Viskositeettikäyttäytymisen tutkimisessa haasteita asetti tuotteen viskositeetin herkkyys lämpötilan muutoksille. Tuote jäähdyi melko nopeasti ja sen koostumus muuttui jäähtymisen myötä. Käytössä oli vesihaude, jotta näytteet saatiin tarvittaessa pidettyä sopivassa lämpötilassa, mutta mittausten aikana ei pystytty ylläpitämään minkäänlaista lämpötilan kontrollointia.

8.2.1 Mittausolosuhteiden vakiointi

Tuotteelle sopiva spindelikoko testattiin kokeilemalla eri spindeleitä eri pyörimisnopeuksilla. Tavoitteena oli löytää sellainen spindelikoko, joka antaa tuloksen kolmella eri pyörimisnopeudella, joista ylin valittiin mittauksiin. Testi osoitti, että spindelillä RV5 ja pyörimisnopeudella 20 rpm päästiin jousivoiman

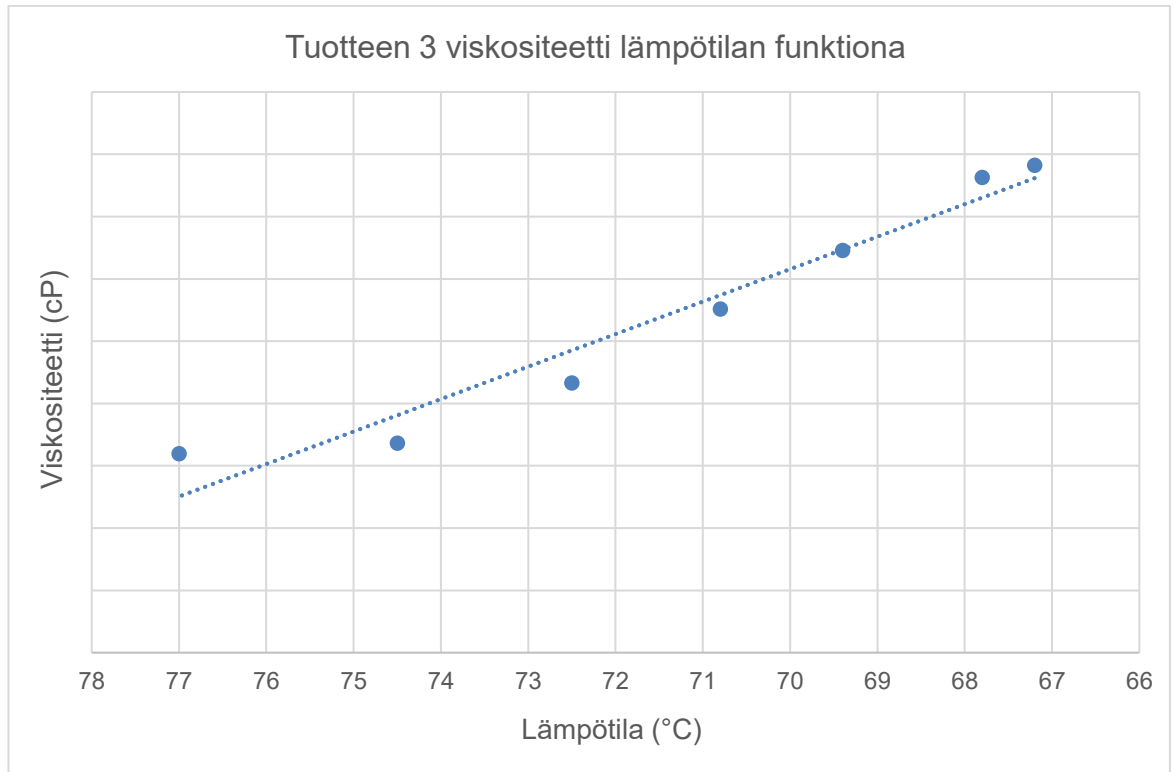
osalta lähimmäksi lukemaa 100. Näin ollen tämä yhdistelmä valittiin viskositeetin vaihteluvälin tutkimista varten suoritettaviin mittauksiin. Viskositeetilukema otettiin ylös aina 30 sekunnin päästä mittauksen aloittamisesta, jotta lukemalla oli tarpeeksi aikaa tasaantua, mutta kuitenkin tarpeeksi nopeasti, ettei näyte ehtinyt jäähtymään liikaa. Mittausastioina käytettiin lasisia 600 ml dekantereita.

Näytteet haettiin kuumana tuotantolinjalta, minkä jälkeen ne pyrittiin saamaan mahdollisimman nopeasti laboratorioon. Mittauslämpötilaksi valittiin 80 °C, sillä huomattiin, että näytteet eivät kuljetuksen aikana ehtineet jäähtyä alle kyseisen lämpötilan. Mikäli näytteen lämpötila oli mittausvalmiina yli 80 °C, annettiin sen jäähtyä hetki mittauslämpötilaan, jotta tulosten vertailukelpoisuus säilyisi.

8.2.2 Lämpötilan vaikutus tuotteen 3 viskositeettiin

Lämpötilan vaikutusta tuotteen viskositeettiin tutkittiin mittaamalla tuotantolinjalta haettua kuumaa näytettä, jonka annettiin mittausten aikana jäähtyä huoneenlämmössä. Testissä käytettiin vakioiduista mittausolosuhteista poiketen pyörimisnopeutta 10 rpm. Päätös perustui tietoon siitä, että tuote paksuuntuu jäähtyessään. Näin ollen RV5-spindelien ja pyörimisnopeuden 20 rpm yhdistelmällä laitteen mittausalue ei olisi riittänyt paksuuntuneen näytteen mittaamiseen.

Testi sisälsi seitsemän mittauspistettä, minkä jälkeen mittausalue ei enää riittänyt paksuuntuneen näytteen viskositeetille. Mittaustulosten pohjalta ja tulosten havainnollistamiseksi luotiin kuvaaja, joka esitetään kuviossa 3.



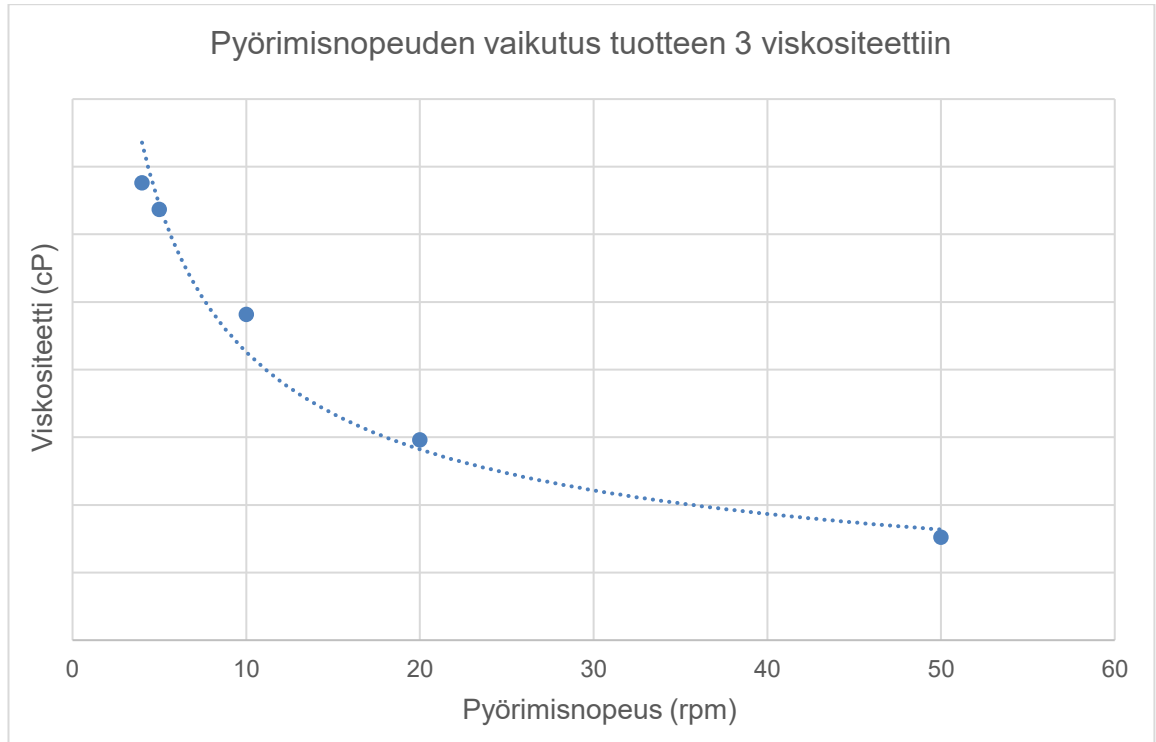
Kuvio 3. Tuotteen 3 viskositeetti lämpötilan funktiona.

Tuloksista selvisi, että viskositeetti nousee huomattavasti jo pienenkin lämpötilamuutoksen seurauksena. Testi kesti kokonaisuudessaan 15 minuuttia, jonka aikana näyte jäähtyi noin 10 celsiusastetta ja sen viskositeetti 2,5-kertaistui. Viskositeetin kasvu oli myös visuaalisesti selkeästi havaittavissa. Näin ollen todettiin, että viskositeetin vaihteluvälin seurannassa mittaus on aina toteutettava tarkasti samassa lämpötilassa, jotta tulosten vertailukelpoisuus säilyisi.

8.2.3 Leikkausohenevuuden testaus

Leikkausohenevaa käyttäytymistä tutkittiin mittaamalla viskositeettia spindelin pyörimisnopeuden kasvaessa. Testissä käytettiin spindeliä RV5 ja viittä eri pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeutta nostettiin mittauksen ollessa käynnissä pysäyttämättä laitetta välissä. Tulos luettiin aina 30 sekunnin kuluttua nopeuden säädön jälkeen.

Lämpötilaa ei pystytty kontrolloimaan testin aikana, joten se pääsi putoamaan 2,4 °C:ta mittauksen ollessa käynnissä. Mittausdatan pohjalta luotiin kuvaaja, joka esitetään kuviossa 4.



Kuvio 4. Tuotteen 3 viskositeetti pyörimisnopeuden funktiona.

Koska viskositeetti laski selvästi pyörimisnopeuden kasvaessa, voitiin todeta, että tuote osoitti leikkausohenevaa käyttäytymistä. Tuotteen leikkausohenevuus tarkoitti myös sitä, että tuote kuuluu ei-Newtonisten fluidien kategoriaan.

8.3 Tuotteen 3 viskositeetin vaihteluväli

Viskositeetin vaihteluvälin tutkiminen toteutettiin ottamalla eri eristä näytteitä, mittaamalla ne ja taulukoimalla tulokset. Jokaisesta erästä pyrittiin saamaan useampi näyte mitattavaksi, sillä otannasta haluttiin saada mahdollisimman kattava. Koska tuotteen viskositeetin tiedettiin olevan erittäin herkkä reagoimaan lämpötilan muutoksille, pyrittiin mittauslämpötila pitämään tarkasti välillä 80 ± 1 °C. Mittauksissa käytettiin vakioituja mittausolosuhteita, eli spindelä

RV5 ja pyörimisnopeutta 20 rpm. Tulos luettiin aina 30 sekunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta.

Mittaukset haluttiin suorittaa mahdollisimman lähellä sitä lämpötilaa, jossa tuote tuotantolinjalla oli, mutta mittauslämpötila jäi väistämättä hieman sen alle. Tämä johtui siitä, että näytteet jäähtyivät kuljetuksen aikana tuotantolinjalta laboratorioon ja vielä siirrettäessä kuljetusastiasta mittausastiaan. Lisäksi näytteeseen upotettavat ja näytettä huomattavasti viileämmät spindelit ja sen kehikko saattoivat vielä edesauttaa näytteen jäähtymistä. Liiallinen jäähtyminen ja uudelleenlämmittäminen olisi saattanut aiheuttaa muutoksia tuotteen koostumukseen, joten oli suotavampaa toteuttaa mittaukset tällä menetelmällä, vaikka se tarkoittikin näytteiden mittausta hieman tuotanto-olosuhteita matalammassa lämpötilassa.

Otanta perustui pääosin yhden tuotteen mittauksiin, mutta siihen otettiin mukaan myös muutama mittaus saman tuotteen muista variaatioista. Tuotteen 3 näytetiedot sekä viskositeettimittausten mittausparametrit taulukoitiin taulukkoon 4.

Taulukko 4. Tuotteen 3 viskositeettimittausten mittausparametrit.

Erä	Näyte	Lämpötila (°C)	Jousivoima (%)
10.11.23	1	79,8	71,6
14.11.23	1	79,8	43,6
	2	80,1	56,7
	3	80,0	61,5
15.11.23	1	80,0	53,4
	2	80,6	53,6
	3	80,2	62,4
	4	79,9	46,3
	5	80,2	40,6
16.11.23	1	79,9	49,2
	2	80,3	55,4
	3	80,2	64,8
	4	80,2	56,3
	5	79,9	80,4
17.11.23	1	79,8	44,4
	2	80,0	50,8
	3	80,3	58,6
	4	80,4	56,2
21.11.23	1	80,5	67,1
	2	79,8	95,7
	3	80,2	70,9
22.11.23	1	79,9	62,2
	2	80,0	51,0
	3	80,2	68,5
23.11.23	1	80,0	43,9
	2	80,0	44,1
	3	79,5	41,6
24.11.23	1	80,0	56,1
	2	80,2	42,1
	3	79,7	42,6

Näytteiden välinen viskositeetin vaihtelu oli tuotteen 3 kohdalla pienempää, kuin tuotteilla 1 ja 2. Muutamaa näytettä lukuunottamatta tuotteen viskositeetti

vaihteli melko pienellä välillä, ollen suhteellisen tasalaatuista. Silmämääräisesti arvioituna eri näytteiden välillä havaittiin vain satunnaisesti hyvin pieniä eroja.

Otannassa oli mukana myös muutama näyte tuotteen 3 muista variaatioista. Tulosten perusteella kuitenkin kaikki tuotteet olivat viskositeetin osalta hyvin samankaltaisia. Otantaan haluttiin ottaa mukaan tuotteen 3 eri variaatioita, sillä ne valmistetaan samalla linjalla ja ne kulkevat samoja putkistoja pitkin. Mikäli myöhemmin harkitaan esimerkiksi in-line viskosimetrin hankintaa, on hyvä tietää muidenkin kuin vain yhden linjalla valmistettavan tuotteen viskositeetista.

Vaihteluväliin saattoi tässäkin tuotteessa vaikuttaa esimerkiksi partikkelien jakautuneisuus ja niiden määrä näytteessä. Mikäli näytteeseen sattui tavallista enemmän partikkeleita, saattoi se olla myös tavallista viskoosisempi. Tuloksiin vaikuttavia tekijöitä käsitellään lisää luvussa 9.2.3.

9 Tulokset ja pohdinta

Luvussa kootaan yhteen tutkittujen tuotteiden mittauksissa saadut tulokset ja pohditaan niiden luotettavuutta sekä mittauksiin mahdollisesti vaikuttaneita tekijöitä.

9.1 Tuotteet 1 ja 2

Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettikäyttäytymisen osalta haluttiin tutkia, ovatko tuotteet Newtonisia vai ei-Newtonisia ja jälkimmäisen kohdalla vielä sitä, mihin ei-Newtonisten fluidien kategoriaan tuotteet kuuluvat. Tutkimuksen kohteena oli lisäksi lämpötilan vaikutus tuotteiden viskositeettiin. Tavoitteena oli selvittää, kuinka merkittävää viskositeetin vaihtelu oli tietyllä lämpötilavälillä. Näiden lisäksi kartoitettiin, millä välillä tuotteiden viskositeetti yleisesti vaihtelee. Mittauksissa esiintyi kuitenkin useita tekijöitä, jotka vaikuttivat saatujen tulosten tarkkuuteen ja luotettavuuteen.

9.1.1 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettikäyttäytyminen

Tutkimuksen perusteella selvisi, että molemmat tuotteet osoittivat leikkausohenevaa käyttäytymistä. Leikkausohenevuutta testattiin kasvattamalla spindelin kierrosnopeutta asteittain ja mittaamalla näytteen viskositeetti kunkin kierrosnopeuden kohdalla. Viskositeetin lasku kierrosnopeuden kasvaessa viittasi siihen, että tuotteet ovat leikkausohenevia. Näin ollen ne ovat myös ei-Newtonisia.

Lämpötilan nouseminen vaikutti molempien tuotteiden viskositeettien vähenemiseen. Lämpötilan vaikutusta tutkittiin mittaamalla jäähdytettyjä näytteitä säännöllisin väliajoin niiden lämmitessä huoneenlämmössä. Testin tulos oli odotettavissa, sillä viskositeetin aleneminen lämpötilan noustessa on hyvin yleinen ilmiö erityisesti elintarvikkeiden kohdalla. Mittauspisteet eivät asettuneet täysin lineaarisesti suoralle, mutta trendi oli silti selkeästi laskeva.

Tuloksista kuitenkin havaittiin, että lämpötilasta johtuva viskositeetin vaihtelu ei vaikuttaisi olevan merkittävän suurta etenäkään sillä lämpötilavälillä, jossa tuote pakataan.

Mittausten aikana havaittiin merkki tuotteiden viskoelastisuudesta. Viskosimetrin lukema ei milloinkaan tasaantunut täydellisesti, vaan jatkoi heilahtelua huolimatta siitä, kuinka kauan tulosten tasaantumista odotettiin, mikä voi olla merkki viskoelastisesta näytteestä. Asian luotettavampi todentaminen vaatisi kuitenkin tarkempia tutkimuksia. Viskoelastisuudella tarkoitetaan sellaisia tuotteita, joilla on sekä viskoosisia että elastisia ominaisuuksia. Ne virtaavat, kun niihin kohdistetaan ulkoista voimaa, mutta palautuvat osittain alkuperäiseen muotoonsa, kun voiman käyttö loppuu (Bourne 2002, 97).

9.1.2 Tuotteiden 1 ja 2 viskositeettien vaihteluväli

Mittausdataa kertyi tuotteelle 1 seitsemästä erästä kokonaisuudessaan 24 näytettä. Tuotteelle 2 näytteitä kerättiin kahdeksasta erästä yhteensä 22. Otantojen koot perustuivat käytössä olevaan aikaan ja tuotannon ajosuunnitelmiin, eli milloin ja minkä verran tuotteita valmistettiin. Vaihtelua molempien tuotteiden viskositeeteissa oli runsaasti. Viskositeetin vaihtelu ei ollut eräkohtaista, vaan myös erien sisällä vaihteluväli oli toisinaan melko suuri.

Silmin havaittavaa eroa samasta tuotteesta otetuissa näytteissä ei juurikaan ollut, joten vaihtelu voi osittain johtua myös luvussa 9.1.3 esitetyistä syistä. Toisaalta silmämääräisesti arvioituna eroja viskositeetissa voi olla vaikea havaita, eikä pelkkä silmämääräinen arviointi aina riitä tulkitsemaan, onko jokin näyte viskoosisempi kuin toinen. Näytteiden tutkimisen aikana kohdalle ei sattunut koostumukseltaan vääränlaista tuotetta, joka olisi aiheuttanut tuotantolinjalla ongelmia tai hävikkiä. Voidaan siis päätellä, että molemmat tuotteet sallivat melko suuren viskositeetin vaihteluvälin ilman, että niiden laatu tai pakkaaminen kärsii. Toisaalta, koska koostumukseltaan vääränlaisia tuotteita ei sattunut otantaan mukaan, on vaikea arvioida kokonaisuudessaan,

minkäläisen vaihteluvälin tuotteet sallivat ilman tuotannon ongelmia. Data ei siis kerro siitä, minkälaiset raja-arvot viskositeeteille voitaisiin asettaa.

9.1.3 Mittaustulosten luotettavuus ja virhetarkastelu

Viskosimetrille suoritettiin sen manuaalin ohjeen mukainen kalibroinnin tarkastus. Käytetyn kalibrintiliuoksen viskositeetiksi ilmoitettiin 4925 cP. Manuaalin ohjeella laskettiin, kuin paljon mittaustulos sai poiketa liuoksen todellisesta arvosta. Sallitun poikkeaman tulokseksi saatiin 99,25 cP. Kalibrintiliuos mitattiin ja sen arvoksi saatiin 4620 cP. Lukema oli siis 305 cP vähemmän, kuin todellinen arvo ja poikkesi yli 200 cP sallitusta poikkeamasta. On siis mahdollista, että mittaustilaite oli uudelleenkalibroinnin tarpeessa. Näin ollen myös muiden mittaustulosten luotettavuus heikkenee.

Tuotteiden 1 ja 2 mittauksien aikana käytettävissä oli vain disc-spindelit. Kuten luvussa 6.1 todettiin, disc-spindeli ei ole optimaalinen valinta korkeaviskoosisille partikkeleita sisältäville näytteille. Spindelin aiheuttama häiriö näytteelle voi olla merkittävä tekijä tulosten luotettavuuden arvioinnissa. Mittausten aikana viskositeettilukema ei koskaan tasaantunut täydellisesti, mikä voi olla merkki tuotteiden viskoelastisuudesta, mutta se voi myös kertoa vääränlaisen spindelin käytöstä. Mittauksissa oli toisinaan havaittavissa luvussa 4.3.1 esitelty ilmiö, jossa näytteelle sopimaton spindelin geometria aiheuttaa ensin todella korkean viskositeettilukeman, joka kuitenkin laskee nopeasti mittauksen edetessä huomattavasti alhaisemmaksi. Tämä puoltaa myös päätelmää siitä, että disc-spindeli ei ole optimaalinen valinta kyseiselle näytetyypille.

Näytteisiin jääneillä ilmakuplilla saattoi myös olla vaikutusta viskositeettilukemiin. Ilmakuplien täydellinen poistaminen näytteistä oli erityisen haastavaa näytteiden paksun koostumuksen ja sameuden vuoksi. Tämän lisäksi näytteiden sisältämät, erityisesti spindelin kohdalla olleet partikkelit mahdollisesti häiritsivät mittauksia. Mikäli tuote oli ollut epätasaisesti sekoitettua, oli näytteeksi saattanut päätyä keskimääräistä viskoosisempi, nestemäisempi tai parikkeliä osalta epätasaisesti jakaantunut näyte. Näin ollen

samasta erästä otettu toinen näyte olisi voinut antaa erilaisen tuloksen, kuin ensimmäinen näyte.

9.2 Tuote 3

Myös tuotteen 3 osalta tutkittiin lämpötilan vaikutusta viskositeettiin sekä tuotteen mahdollista leikkausohenevuutta. Koska tuotteen viskositeetti oli erittäin herkkä muuttumaan lämpötilan vaihtelun seurauksena, piti näytteenottoon ja mittausolosuhteisiin kiinnittää lämpötilan osalta erityistä huomiota. Viskositeettikäyttäytymisen tutkimisen lisäksi kerättiin mittausdataa siitä, millä välillä tuotteen viskositeetti vaihtelee. Vaihteluväliä tutkittiin tuotteesta 3 useammasta variaatiosta.

9.2.1 Tuotteen 3 viskositeettikäyttäytyminen

Leikkausohenevuutta tutkittiin vastaavalla tavalla, kuin tuotteiden 1 ja 2 kohdalla, käyttäen kuitenkin eri spindelä ja nopeuksia. Tuotteen 3 viskositeetissa tapahtui selkeää laskua pyörimisnopeuden kasvaessa, mikä oli selvä merkki leikkausohenevasta käyttäytymisestä. Näin ollen saatiin myös selville, että tuote on ei-Newtoninen.

Lämpötilan vaikutus viskositeettiin antoi mielenkiintoisia tuloksia, sillä tuotteen viskositeetti 2,5-kertaistui jo 10 °C:n muutoksesta. Kuumen näytteen annettiin jäähtyä huoneenlämmössä, minkä aikana mittaustuloksia otettiin ylös tasaisin väliajoin. Viskositeetin kasvu jäähtymisen aikana oli melko lähellä lineaarista. Tuotteen lämpötilalla on todennäköisesti melko suuri vaikutus sen pakkaamisen sujuvuuteen, sillä se paksuuntuu huomattavasti jo pienestä lämpötilan laskusta. Tutkimuksen aikana tehtiin myös visuaalinen huomio siitä, että jäähtyessään tuotteen pinnalle syntyi viskoosisempi ”kuori”, mikäli tuotteeseen ei koskettu. Kun tuotetta sekoitti, sen päälle syntynyt paksumpi kerros hajosi ja tuotteesta tuli jälleen tasapaksua. Paksu kerros tuotteen pinnalle syntyi jo muutaman minuutin kuluessa.

9.2.2 Tuotteen 3 viskositeetin vaihteluväli

Tuotteen 3 viskositeetin vaihteluvälin tutkiminen perustui 30 näytteen otantaan, joka oli peräisin yhdeksästä eri erästä. Otannassa oli mukana viisi eri variaatiota tuotteesta 3. Viskositeetin vaihtelua esiintyi sekä eräkohtaisesti että erien sisälläkin. Pääsääntöisesti viskositeetin vaihtelu oli melko pientä, lukuunottamatta muutamia yksittäisiä näytteitä. Otannan koko perustui käytössä oleviin resursseihin, kuten aikaan ja mitattavien tuotteiden tuotannon ajosuunnitelmiin, eli milloin ja minkä verran tuotteita valmistettiin.

Tutkimuksen perusteella on vaikea arvioida, kuinka suuren viskositeetin vaihteluvälin kyseinen tuote sallii ilman tuotannon ongelmia, sillä tässä otannassa näytteiden välinen viskositeetin vaihtelu oli pääosin suhteellisen pientä. On kuitenkin huomioitava, että mittaukset perustuvat vain yhteen tarkkaan lämpötilaan, jossa jokainen näyte mitattiin. Säiliö, josta näytteet otettiin, ylläpitää tuotteelle suurempaa lämpötilaväliä, jolloin viskositeetti luonnollisesti myös vaihtelee enemmän säiliössä, kuin tässä otannassa. Pääosin pienen vaihteluvälin perusteella voidaan toisaalta todeta, että tuote on melko tasalaatuista viskositeetin osalta. Mittaukset suoritettiin aina vakaisissa ja vakioiduissa olosuhteissa, mutta on kuitenkin tekijöitä, jotka saattoivat osaltaan vaikuttaa tulosten luotettavuuteen.

9.2.3 Mittaustulosten luotettavuus ja virhetarkastelu

Mittauslaitteena käytettiin samaa Brookfield DV-1 Prime -rotaatioviskosimetriä, kuin tuotteiden 1 ja 2 mittauksessa. Näin ollen tuotteen 3 osalta on myös huomioitava laitteen mahdollisesti aiheuttama mittausvirhe. Huomio perustuu luvussa 9.1.3 tarkastellun kalibroinnin tarkastuksen tulokseen, joka ylitti valmistajan ilmoittaman sallitun poikkeaman. Tämän lisäksi on tarkasteltava laitteen mittauksissa käyttämää jousivoimaa. Jousivoima on ideaalinen välillä 90-100 %. Mitä alemmaksi jousivoima laskee, sitä enemmän suhteellinen virhe kasvaa. Tuotteen 3 viskositeetista ei ollut aiempaa dataa tai tietoa siitä, millä välillä se vaihtelee. Näin ollen spindelin ja pyörimisnopeuden yhdistelmä oli

valittava niin, että mittausalue riitti mittaamaan tarvittaessa myös viskoosisemman näytteen. Tuote osoittautui melko tasalaatuiseksi ja sen mittaamiseen olisi voinut riittää pienempikin mittausalue, jolloin jousivoiman osalta oltaisiin päästy lähemmäksi lukemaa 100. Brookfield (2017, 11) kuitenkin ilmoittaa, että tavoitteena on saada jousivoima välille 10-100 %. Tämä toteutui kaikissa mittauksissa, joten arvioitiin, että suhteellinen virhe ei vaikuttanut merkittävästi tulosten luotettavuuteen.

Muita tulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat esimerkiksi näytteeseen mahdollisesti jääneet ilmakuplat sekä näytteen sisältämät kiinteät partikkelit ja niiden jakautuneisuus. Partikkelien painuminen näytteen pohjalle olisi aiheuttanut sen, että mittaus olisi tapahtunut pääosin näytteen nestemäisestä osasta, jolloin viskositeettitulokset olisi ollut todellisuutta alhaisempi. Koska mittaukset kuitenkin tehtiin nopeasti sen jälkeen, kun näyte oltiin siirretty mittausastiaan, oli tämän vaikutus luultavasti vähäinen tai merkityksetön. Tuote oli tarpeeksi paksua, että partikkelien painuminen astian pohjalle olisi kestänyt jonkin aikaa.

Näytteiden partikkelimäärä yleisesti on kuitenkin huomionarvoista. Koska näytteet otettiin suuresta säiliöstä, on mahdollista, että näytteissä oli hieman eroavaisuuksia riippuen mistä kohtaa säiliötä se otettiin ja miten tuote oli säiliössä sekoittunut. Osaan saattoi sattua enemmän partikkeleita, kuin toisiin, mikä osaltaan lisää vaihtelua eri näytteiden viskositeetteihin. Kuten tuotteet 1 ja 2, myös tuote 3 sisälsi runsaasti partikkeleita. Suuret partikkelit spindelin kohdalla aiheuttavat mittaukseen häiriötä. Näytteisiin mahdollisesti jääneiden ilmakuplien vaikutus arvioitiin melko vähäiseksi, sillä visuaalisesti niitä havaittiin hyvin vähän ja näytteiden nestemäisyyden vuoksi oli epätodennäköistä, että ne olisivat pitäneet sisällään suuria ilmakuplia.

Disc-spindelin soveltuvuus tuotteen 3 mittaamiseen oli parempi, kuin tuotteiden 1 ja 2 mittaamiseen. Koska tuote on nestemäisempää, se virtasi itsestään spindelin ympärille, kun spindeli upotettiin näytteeseen. Näin ollen näytteeseen ei syntynyt sylinterin muotoista aukkoa, kuten tuotteiden 1 ja 2 kohdalla, jolloin myös mittaustulos oli luotettavampi. Lisäksi laitteen lukema tasapainottui

tuotteella 3 paremmin, kuin tuotteiden 1 ja 2 kohdalla. Ei kuitenkaan täydellisesti, mutta pienemmällä välillä heilahdellen.

10 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli tutkia valikoitujen tuotteiden viskositeettikäyttäytymistä ja viskositeetin vaihteluväliä elintarvikkeiden laadunvalvonnan kehittämiseksi. Tuotteiden tasalaatuisuuden ja tuotannon sujuvuuden varmistaminen tuotteiden koostumuksen osalta vaatii ymmärrystä siitä, miten tuotteiden viskositeetti käyttäytyy eri olosuhteissa. Viskositeetilla on olennainen merkitys myös viskosimetrien hankinnassa ja mittausmenetelmien valinnassa.

Hankitun teoriatiedon ja tutkimustulosten pohjalta selvitettiin, että yrityksen tarpeisiin sopivia viskosimetrivaihtoehtoja ovat esimerkiksi rotaatioviskosimetrit, in-line viskosimetrit ja kannettavat viskosimetrit. Viskosimetrin valinta pohjautuu olennaisesti siihen, mitä mittauksilla halutaan saavuttaa. Vaihtoehtoja löytyy sekä laboratoriokäyttöön että tuotantoon joko automaattista ja jatkuvaa todentamista varten tai vaihtoehtoisesti tuotannon työntekijöiden toimesta suoritettavia mittauksia varten. Kokeellisen tutkimuksen pohjalta onnistuttiin saamaan tietoa kaikkien valikoitujen tuotteiden viskositeettikäyttäytymisestä sekä selvittämään niiden viskositeettien vaihteluväli tiettyjen otantojen rajoissa. Mittausmenetelmän luotettavuutta ja mittauksiin vaikuttavia tekijöitä pohdittiin tulosten yhteydessä perusteellisesti. Vaikka mittauksissa esiintyikin mittausepä tarkkuutta aiheuttavia tekijöitä, työssä onnistuttiin keräämään arvokasta tietoa kunkin tuotteen viskositeetista sekä käytössä olleen mittausmenetelmän soveltuvuudesta tuotteiden mittaukseen.

Opinnäytetyö antaa hyvän pohjan jatkotutkimuksille. Työssä käytettyjä mittausmenetelmiä voi hyödyntää esimerkiksi pohjana muidenkin tuotteiden tutkimiselle. Jo käsitellyjä tuotteita voi myös tutkia lisää kokeilemalla esimerkiksi työssä ehdotettuja tuotteille mahdollisesti soveltuvampia spindelivaihtoehtoja. Tieto viskositeettien vaihteluväleistä sujuvoittaa mahdollisia tulevaisuuden viskosimetrinhankintoja ja niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi viskositeettien raja-arvomäärittämisä varten. Tulevaisuudessa tuotantoon voi lisätä jopa vaiheen, jossa viskositeetti mitataan ennen tuotteiden pakkausta ja varmistetaan, että arvo osuu sopivalle välille.

Lähteet

Abbas, K. A.; Abdulkarim, S. M.; Saleh, A. M. & Ebrahimian, M. 2010. Suitability of viscosity measurement methods for liquid food variety and acceptability in food industry – A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Vol. 8, No 3-4, 100–107. Viitattu 14.10.2023.

https://www.researchgate.net/publication/236268492_Suitability_of_viscosity_measurement_methods_for_liquid_food_variety_and_applicability_in_food_industry_-_A_review

Anton Paar 2023a. The influence of particles on suspension rheology. Viitattu 19.10.2023. <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>

Anton Paar 2023b. Rotational Viscometry. Viitattu 22.10.2023. <https://wiki.anton-paar.com/en/rotational-viscometry/>

Anton Paar 2023c. Viscosity control with process viscometers. Viitattu 16.10.2023. <https://wiki.anton-paar.com/fi-en/viscosity-control-with-process-viscometers/>

Barbosa-Cánovas, G. V. 2009. *Food Engineering – Volume II*. E-kirja Google Kirjat -kirjapalvelussa. Oxford: EOLLS Publishers. Viitattu 3.11.2023. https://www.google.fi/books/edition/Food_Engineering_Volume_II/JO2yCwAAQBAJ?hl=fi&gbpv=1&dq=food+engineering+vol+2&printsec=frontcover

Berg, Z. 2013. *Food Process Engineering and Technology*. 2. painos. E-kirja Ebook Central™ -kirjapalvelussa. Lontoo: Academic Press. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 8.10.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/reader.action?docID=1213924#>

Bourne, M. C. 2002. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. 2., uudistettu painos. E-kirja Ebook Central™ -kirjapalvelussa. San Diego: Academic Press. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 8.11.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/reader.action?docID=294600&query=food+texture+and+measurement>

Bowler, A. L.; Bakalis, S. & Watson, N. J. 2020. A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes. *Chemical*

Engineering Research and Design, Vol. 153, 463–495. Viitattu 11.10.2023.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.045>

Brookfield 2015. Brookfield DV-1 Prime. Tuotemanuaali. Viitattu 29.10.2023.
<https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/manuals/obsolete%20manuals/dv-1%20prime%20m07-022-d0613.pdf?la=en>

Brookfield 2017. More Solutions to Sticky Problems. Viitattu 25.10.2023.
<https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/tech%20sheets/more%20solutions%202017.pdf?la=en>

Brookfield Engineering 2013. Simplified Viscosity Analysis Of Paste-like Materials. Lab Manager, Vol. 8, No 7. Viitattu 17.10.2023.
<https://www.labmanager.com/simplified-viscosity-analysis-of-paste-like-materials-10333>

Brookfield Engineering 2023a. Process control viscometers. Tuotekatalogi. Viitattu 16.10.2023.
https://www.tecalemitflow.fi/Download/26098/Brookfield%20Process%20Catalog_Tecaflo.pdf

Brookfield Engineering 2023b. Helipath Stand™ – designed for measurement of non-flowing substances. Käyttöohje. Viitattu 17.10.2023. <https://eng-web1.eng.famu.fsu.edu/nsfscholars/pdf/Helipath.pdf>

Chakraborty, S. K. 2014. Fundamental Food Engineering. 1. painos. E-kirja Ebook Central™ -kirjapalvelussa. Englanti: Alpha Science International Ltd. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 8.10.2023.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/reader.action?docID=5324452#>

Cicchese, S. 2013. Inline viscosity measurements: process viscometers can help keep process control and product quality in check. Chemical Engineering, Vol. 120, No 5. Viitattu 20.10.2023.
<https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&u=googlescholar&id=GALE|A343158024&v=2.1&it=r&sid=AONE&asid=44120208>

De Vicente, J. 2012. Rheology. Kroatia: IntechOpen. Viitattu 4.10.2023.
https://mts.intechopen.com/storage/books/1601/authors_book/authors_book.pdf

Gatenby 2020. What is the Difference Between Dynamic and Kinematic Viscosity? CSC Scientific Company. Viitattu 21.10.2023.

<https://www.cscscientific.com/csc-scientific-blog/whats-the-difference-between-dynamic-and-kinematic-viscosity>

Hill, A. & Carrington, S. 2006. Understanding the Links Between Rheology and Particle Parameters. American Laboratory. Viitattu 19.10.2023.

<https://www.americanlaboratory.com/913-Technical-Articles/35729-understanding-the-Links-Between-Rheology-and-Particle-Parameters/>

Hydramotion 2013. Viscolite 700 Portable Viscometer – User Manual.

Tuotemanuaali. Viitattu 5.11.2023. <https://www.milktronics.com/wp-content/uploads/2017/08/Viscolite-manual-1.pdf>

Islam, R.; Rahman, M.; Ahmed, S. & Halder, M. R. 2016. A Coaxial Cylinder Type Rotational Viscometer – Design and Optimization. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 7, No 10. Viitattu 9.10.2023.

<https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx?A-Coaxial-Cylinder-Type-Rotational-Viscometer-Design-and-Optimization.pdf>

ISO 3104:2020. Petroleum products. Transparent and opaque liquids. Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity (ISO 3104:2020). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Jyväskylän Yliopisto 2009. Viskositeettimittauksia. Viitattu 5.10.2023

https://www.jyu.fi/science/fi/fysiikka/opiskelu/tyoosasto/syventavien-opintojen-laboratoriotyot/virtausmekaniikka/fyss6351_lt1_viskositeettimittauksia.pdf

Kaski, S. P. 2008. Polyvinyylialkoholin molekyyli­massan määrittäminen viskositeetista. Viitattu 6.10.2023

koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/kems448/suomeksi/ohjeet/liuokset/viskositeetti

Kealy, T. 2007. How To Measure Thixotropy For Food Industries. Rheology Solutions. Viitattu 25.10.2023.

<http://www.rheologysolutions.com/downloads/resources/rheo360-361%20-%20Food%20-%20Thixotropy.pdf>

Labomat 2023. Can I compare measurements between two different

viscometers? Viitattu 29.10.2023. <https://labomat.eu/gb/faq/626-can-i-compare-measurements-between-two-different-viscometers.html>

Marimex 2023. ViscoScope® inline viscometer. Tuote-esite. Viitattu 20.10.2023.
<https://www.marimex.de/documents/AD-VS-EN.pdf>

Mezger, T. 2011. The Rheology Handbook: For users of rotational and oscillatory rheometers. 3., uudistettu painos. Hannover: Vincentz Network.

Moonay, D. J. 2009. Use of Rotational Vane Rheometry to Solve Practical Problems. American Laboratory. Viitattu 17.10.2023.

<https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/552-Use-of-Rotational-Vane-Rheometry-to-Solve-Practical-Problems/>

Potantin, A. & Marron, G. 2021. Rheological Characterization of Yield-Stress Fluids with Brookfield Viscometer. Applied Rheology, Vol. 31, No 1-9, 1. Viitattu 3.11.2023. <https://doi.org/10.1515/arh-2021-0001>

Rahman, M.; Islam, R.; Rana, G. M. S. M.; Halder, M. R.; Hassan, T. & Ahmed, S. 2014. Design, Construction & Performance Test of a Rotational Digital Viscometer. Viitattu 9.10.2023. <http://www2.kuet.ac.bd/icmiee2014/wp-content/uploads/2015/02/ICMIEE-PI-140403.pdf>

Rantamäki, P. 2005. Reologia on elintarviketutkijan apukeino. Maaseudun Tulevaisuus, Vol. 62, No 4, 13. Helsinki: Maaseudun Tulevaisuus. Viitattu 22.10.2023. <https://core.ac.uk/download/pdf/52228683.pdf>

Rao, M. A. 2007. Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications. 2. painos. USA: Springer. Viitattu 25.10.2023. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-1913-81d42dab95.pdf>

Rheosense 2023. Viscosity units. Viitattu 28.10.2023.
<https://www.rheosense.com/basics/viscosity-units>

Riley, P. 2022. How to Choose a Viscometer. Cambridge Viscosity Blog. Viitattu 19.10.2023. <https://www.cambridgeviscosity.com/blog/how-to-choose-a-viscometer>

Rodrigues, R. 2022. The Viscometer and Its Role in the Food and Beverage Industry. Technology Networks. Viitattu 14.10.2023.
<https://www.technologynetworks.com/applied-sciences/articles/the-viscometer-and-its-role-in-the-food-and-beverage-industry-364302>

Sahi, S. 2014. Viscosity measurements in food products and manufacturing. New Food Magazine, Vol. 17, No 5, 66. Viitattu 16.10.2023.

<https://www.newfoodmagazine.com/digital/nf-issue-5-2014/offline/download.pdf#page=66>

Singh, R. P. & Heldman, D. R. 2014. Introduction to Food Engineering. 5. painos. E-kirja Ebook Central™ -kirjapalvelussa. Amsterdam: Elsevier/Academic Press. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 11.10.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/reader.action?docID=5754443#>

Steffe, J. F. 1996. Rheological Methods in Food Process engineering. 2. painos. E-kirja Google Kirjat -kirjapalvelussa. USA: Freeman Press. Viitattu 14.10.2023. https://books.google.pt/books?hl=ptPT&lr=&id=LrrdONuST9kC&oi=fnd&pg=PR9&ots=kVRhv28b1&sig=q4OKcOCRQgjqWja0TvedXPjhys&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Thermo Fisher Scientific 2023. IKA™ ROTAVISC Vane Spindle. Viitattu 17.10.2023. <https://www.fishersci.ie/shop/products/rotavisc-vane-spindle/17277549>

Viswanath, D. S.; Ghosh, T. K.; Prasad, D. H. L.; Dutt, N. V. K. & Rani, K. Y. 2007. Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment and Data. E-kirja Google Kirjat -kirjapalvelussa. Alankomaat: Springer. Viitattu 10.10.2023. https://books.google.fi/books?id=TD3TeErQD-oC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Završnik, M. & Joseph-Strasser, M. 2013. Inline viscometry for non-Newtonian viscosity characterization. Itävalta: AMA conferences 2013. Viitattu 16.10.2023. <https://www.ama-science.org/proceedings/getFile/ZGH3ZD==>