



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuuli Kupiainen

Optisen mittauksen ja laskennallisten pitoisuusarvojen välinen korrelaatio: maito ja maidon partikkelit

Opinnäytetyö

Kevät 2025

Insinööri (AMK), Bio- ja elintarviketekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

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

Tekijä: Tuuli Kupiainen

Työn nimi alaotsikoineen: Optisen mittauksen ja laskennallisten pitoisuusarvojen välinen korrelaatio: maito ja maidon partikkelit

Ohjaaja: Ilmari Äijö

Vuosi: 2025

Sivumäärä: 29

Liitteiden lukumäärä:

Maidon koostumuksen mittaaminen on tärkeää sekä elintarviketurvallisuuden että laadunhallinnan näkökulmasta. Perinteisten laboratoriomenetelmien rinnalle etsitään nopeampia ja helpommin sovellettavia mittaustekniikoita, joilla voidaan seurata maidon ja sen johdannaisen koostumusta prosessien eri vaiheissa.

Tässä työssä keskityttiin turbidimetrin toimintaperiaatteeseen ja optisten mittausten soveltuvuuteen nesteiden komponenttipitoisuuksien arvioinnissa. Esimerkkiaineistona tarkasteltiin maidon kemiallista rakennetta sekä rasva- ja proteiinipitoisuuksien vaikutusta sameuden muodostumiseen.

Mittauksissa käytettiin erilaisia maitoja sekä hera- ja kerma-vesiliuoksia, joiden pitoisuudet oli laskennallisesti määritelty. Näytteiden sameutta mitattiin turbidimetrillä useilla eri aallonpituuksilla (sininen, vihreä, punainen ja NIR). Tuloksia verrattiin komponenttien tunnettuihin pitoisuuksiin ja analysoitiin mitatun valonläpäisyn korrelaatiota eri pitoisuuksien kanssa.

Tulokset osoittivat, että turbidimetrinen mittausten menetelmä kykenee havaitsemaan selkeitä eroja näytteiden välillä, erityisesti pitoisuuden kasvaessa. Mittaustuloksilla ja näytteiden pitoisuuksilla havaittiin vahva lineaarinen korrelaatio, etenkin hera-vesiliuoksella. Eri aallonpituuksien välillä havaittiin myös pieniä eroja vasteessa. Opinnäytetyön perusteella valonsirontaan perustuvat optiset menetelmät tarjoavat nopean ja tehokkaan tavan arvioida maitopohjaisten näytteiden kokonaiskiintoainepitoisuutta, kunhan näytematriisin erityispiirteet ja mittausolosuhteet otetaan huomioon. Tulokset tukevat optisten menetelmien soveltuvuutta elintarviketeollisuuden laadunvalvontaan ja prosessiseurantaan.

¹ Asiasanat: maito, sameus, korrelaatio

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Food Processing and Biotechnology

Author/s: Tuuli Kupiainen

Title of thesis: Correlation between optical measurement and calculated concentration values: milk and milk particles

Supervisor(s): Ilmari Äijö

Year: 2025

Number of pages: 29

Number of appendices:

Accurate determination of milk composition is essential for both food safety and quality control in the dairy industry. As an alternative to traditional laboratory methods, there is growing interest in rapid and practical measurement techniques that can monitor milk and its derivatives throughout various processing stages. This thesis explored the chemical structure of milk, with a particular focus on how fat and protein content influence turbidity. The principles of turbidimetric analysis and the potential of optical measurements for assessing component concentrations were also discussed.

The experimental work involved analyzing a range of milk samples as well as whey and cream solutions with precisely calculated concentrations. Turbidity was measured using a turbidimeter at multiple wavelengths (blue, green, red, and near-infrared) and the results were compared to known component levels to evaluate the correlation between optical response and sample composition.

The results show that turbidimetric measurements can effectively distinguish between different sample types, especially as concentration increases. A strong linear correlation was observed between turbidity readings and sample concentrations, particularly for whey solutions. Minor differences in optical response were noted between the tested wavelengths.

Overall, this study supports the use of light scattering-based optical methods as a fast and efficient approach for determining total solids in milk-based samples, if sample matrix characteristics and measurement conditions are carefully considered. The results highlight the potential of these techniques for quality assurance and process monitoring in the dairy sector.

¹ Keywords: milk, turbidity, correlation

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkuuettelo	5
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	6
1 JOHDANTO	7
2 MITTAUSTEKNIikka - TURBIDIMETRI.....	8
3 KORRELAATIO.....	9
4 MAIDON RAKENNE JA KOOSTUMUS.....	10
4.1 Rasvat.....	10
4.2 Hiilihydraatit ja laktoosi.....	12
4.3 Proteiinit	12
5 TUTKIMUKSEN MITTAUKSET	14
5.1 Maito	15
5.2 Hera-vesiliuos.....	15
5.3 Kerma-vesiliuos.....	16
6 TULOKSET	17
6.1 Maito	17
6.2 Hera-vesiliuos.....	20
6.3 Kerma-vesiliuos.....	22
6.4 Korrelaatiokertoimet	24
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	26
LÄHTEET	28

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Mittauksissa käytetty laitteisto, edessä alla turbidimetri (kuva: Tuuli Kupiainen).	14
Kuvio 1. Maidon laktoosi.....	18
Kuvio 2. Maidon rasvapitoisuus.	18
Kuvio 3. Maidon hiilihydraattipitoisuus.	19
Kuvio 4. Maidon proteiinipitoisuus.	20
Kuvio 5. Heran kokonaiskiintoaine, mittaukset tehty mattamustaa taustalevyä käyttäen.....	21
Kuvio 6. Heran kokonaiskiintoaine, mittaukset tehty kirkasta taustalevyä käyttäen.	21
Kuvio 7. Kerma-vesiliuoksen kokonaiskiintoaine.	22
Kuvio 8. Kerma-vesiliuoksen rasvapitoisuus.....	23
Kuvio 9. Kerma-vesiliuoksen hiilihydraattipitoisuus.....	23
Kuvio 10. Kerma-vesiliuoksen proteiinipitoisuus.	24
Taulukko 1. Korrelaatiokertoimet	25

Käytetyt termit ja lyhenteet

CCP	Kolloidinen kalsiumfosfaatti
EDTA	Etyleenidiamiinitetraetikkahappo
ISO	International Organization for Standardization
NIR	Near-infrared, lähi-infrapuna
NTU	Neuphelometric Turbidity Unit, sameusyksikkö

1 JOHDANTO

Elintarviketeollisuudessa ja erityisesti maitotuotteiden analytiikassa tarvitaan tarkkoja ja luotettavia mittausmenetelmiä tuotelaadun, koostumuksen ja prosessien hallintaan. Maidon koostumuksen tarkka ja nopea määrittäminen on keskeisessä roolissa niin elintarviketeollisuuden laadunvalvonnassa kuin tutkimustyössäkin. Proteiinien, rasvan ja hiilihydraattien pitoisuuksien mittaamiseen kehitetään jatkuvasti uusia menetelmiä, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen analyysin ja tuotantoprosessien optimoinnin sekä tarjoavat parhaimmillaan nopeita ja ei-destruktiivisiä analyysivaihtoehtoja.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan optisen mittalaitteen, turbidimetrin, mittaustulosten korrelaatiota näytteiden laskennallisiin pitoisuuksiin. Tutkimuksessa käytetään erilaisia maitotuotteita, sekä hera- ja kerma-vesiliuoksia. Optisessa mittauslaitteistossa hyödynnetään useita eri aallonpituuksia, joiden avulla pyritään tunnistamaan näytteiden pitoisuuseroja sekä arvioimaan, millä aallonpituuksilla eri komponentit ovat parhaiten havaittavissa.

Työn päätavoitteena on arvioida, voidaanko optisella mittalaitteella erottaa maidon eri komponentteja luotettavasti ja mikä aallonpituusalue tarjoaa parhaat edellytykset näiden erojen havainnointiin. Työn taustaksi on tarkasteltu maidon kemiallista ja mikrobiologista rakennetta sekä turbidimetrin toimintaperiaatetta, joiden ymmärtäminen on olennainen osa mittaustulosten tulkintaa. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää elintarviketeollisuuden mittauskäytön kehittämisessä, erityisesti maidon ja sen johdannaisten laadunvalvonnassa. Tarkempi ymmärrys tulosten yhteydestä voi johtaa entistä tehokkaampiin ja luotettavampiin analyysimenetelmiin, jotka tukevat tuotannon hallintaa ja tuotekehitystä.

2 MITTAUSTEKNIikka - TURBIDIMETRI

Turbidimetri on optinen mittalaite, joka mittaa sameutta (Kelley ym. 2014). Sameus on näytteen optinen ominaisuus, joka aiheutuu väliaineessa esiintyvistä hiukkasista ja saa valon siroamaan ja absorboitumaan sen sijaan, että valo kulkisi suoraviivaisesti näytteen läpi (Lawler, 2001).

ISO 7027 -standardin mukaisesti sameus määritellään liukenemattomasta aineesta johtavaksi nesteen läpinäkyvyyden vähenemiseksi. (International Organization for Standardization (ISO), 2016, luku 3). Liukenemattomat aineet, kuten hienojakoiset hiukkaset, kaasukuplat ja tiheyseroista johtuvat epäjatkuvuudet aiheuttavat valon sirontaa ja absorptiota väliaineessa, mikä heikentää nesteen läpinäkyvyyttä ja johtaa sameuteen (Lawler, 2001). Sameuden mittausta tehdään valonsirontaan perustuvilla menetelmillä, jotka havaitsevat sironnasta tai absorptiosta johtuvan tulevan valon vähenemisen (Morais ym., 2006).

Valon sironta nesteessä riippuu sekä sirottavien partikkelien koosta että käytetyn valon aallonpituudesta (Bohren & Huffman, 1983, s.98–105). Rayleigh'n sirontan mukaan lyhytaaltainen valo (esim. sininen) siroaa voimakkaammin kuin pitkäaaltoinen (esim. punainen tai NIR), mikä näkyy korkeampina sameusarvoina NTU -mittauksissa silloin, kun näytteessä on runsaasti pieniä partikkeleita. Jos valonsäde kulkee samean näytteen läpi, sen intensiteetti pienenee sirontan vaikutuksesta ja sironneen valon määrä riippuu hiukkaskoon pitoisuudesta ja jakautumisesta.

Valonsirontatekniikoilla on suuri etu, sillä ne ovat ei-invasiivisia ja tarjoavat tietoa lähes reaaliajassa (Anzini ym., 2022). Ne ovat myös erittäin luotettavia tilastollisesta näkökulmasta, koska niitä sovelletaan näytteisiin, jotka on valmistettu suuresta määrästä hiukkasia.

3 KORRELAATIO

Korrelaatio kuvaa kahden muuttujan välistä yhteyttä eli sitä, miten hyvin yhden muuttujan arvot ennustavat toisen muuttujan arvoja (Asuero ym., 2006). Käytännössä korrelaatio kertoo, esiintyykö kahden muuttujan välillä säännönmukaisuutta: kun toisen muuttujan arvo kasvaa tai pienenee, tapahtuuko toisessa muuttujassa samansuuntaista tai päinvastaista muutosta, vai ovatko muuttujat toisistaan riippumattomia. Korrelaation avulla voidaan siis arvioida, onko muuttujien välillä yhteyttä ja kuinka vahvaa tämä yhteys on.

Korrelaatio r on tilastollinen tunnusluku, joka mittaa kahden muuttujan lineaarisen yhteyden voimakkuutta ja suuntaa (Asuero ym., 2006). Pearsonin korrelaatiokerroin saa arvoja välillä -1 ja 1 (Finnish Social Science Data Archive (FSD), 2024). Jos $r = 1$, kyseessä on täydellinen positiivinen lineaarinen yhteys: kun toinen muuttuja kasvaa, myös toinen kasvaa täsmälleen samassa suhteessa (Asuero ym., 2006). Jos $r = -1$, muuttujien välillä on täydellinen negatiivinen lineaarinen yhteys, eli kun toisen muuttujan arvo kasvaa, toisen arvo pienenee täsmälleen samassa suhteessa. Jos $r = 0$, muuttujien välillä ei ole lineaarista yhteyttä.

Käytännön tutkimuksissa korrelaatiokerrointa käytetään usein arvioimaan mittausmenetelmien luotettavuutta ja muuttujien välisten riippuvuuksien voimakkuutta (Asuero ym., 2006). Esimerkiksi luonnontieteissä ja insinööritieteissä korrelaatiota hyödynnetään vertailemaan, kuinka hyvin uusi mittausmenetelmä tuottaa samoja tuloksia kuin vakiintunut menetelmä tai kuinka vahvasti jonkin fysikaalisen ominaisuuden muutos näkyy toisessa mitattavassa suureessa (Ratner, 2009). Lisäksi korrelaatiokerroin mittaa vain lineaarisia yhteyksiä; jos muuttujien välinen yhteys on epälineaarinen, korrelaatiokerroin voi olla lähellä nollaa, vaikka muuttujien välillä olisi selkeä riippuvuus.

4 MAIDON RAKENNE JA KOOSTUMUS

Maito koostuu pääosin vedestä, jota se sisältää 87 % (Milkworks, i.a.). Muut ainesosat ovat maidossa liuenneena tai suspendoituneena. Veden lisäksi maito sisältää keskimäärin 4,2 % rasvaa, 4,7 % hiilihydraatteja, 3,5 % proteiinia ja 0,7 % kivennäisaineita. Maidossa on myös paljon sekä vesi- että rasvaliukoisia vitamiineja.

4.1 Rasvat

Maidon rasvapitoisuus on keskimäärin 4,2 % (Milkworks, i.a.). Maitorasva esiintyy maidossa öljy vedessä -emulsion muodossa, jossa rasvapisarat ovat dispergoituneet vesifaasin joukkoon (Dairy processing handbook, i.a.). Pääosin maitorasva koostuu triglyserideistä, joita on noin 98 % rasvan kokonaismäärästä (Milkworks, i.a.). Loput 2 % muodostuu diglyserideistä, fosfolipideistä, steroleista, karotenoideista sekä pienistä määristä vapaita rasvahappoja.

Maidon triglyserideille on ominaista korkea tyydyttyneiden rasvahappojen osuus: tyypillisesti noin 67 % maidon rasvahapoista on tyydyttyneitä, 24 % kertatyydyttymättömiä ja vain noin 3 % monitydyttymättömiä (Milkworks, i.a.). Lisäksi maitorasva sisältää suhteellisen runsaasti lyhytketjuisia rasvahappoja, joiden hiiliketjun pituus on 4–10 hiiliatomia. Esimerkiksi voihapo on tyypillinen lehmänmaidossa esiintyvä tyydyttynyt rasvahappo. Tyydyttymättömistä rasvahapoista merkittävin on öljyhappo. Maitorasvan rasvahappokoostumus määrää sen keskeiset kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, kuten sulamispisteen, kemiallisen reaktiivisuuden sekä ravintoarvon.

Maitorasva esiintyy maidossa emulgoituneena pienten rasvapallosten muodossa, joiden koko vaihtelee 0,1 ja 20 mikrometrin välillä (Dairy processing handbook, i.a.). Tyypillisesti näiden pallosten koko on noin 3–4 mikrometriä, ja yhdessä millilitrassa maitoa on arviolta 15 biljoonaa rasvapallosta. Jokaista rasvapallosta ympäröi kalvo, joka koostuu fosfolipideistä, lipoproteiineista, kerebrosideista, proteiineista, aminohapoista, entsyymeistä sekä hivenaineista. Nämä rasvapalloset ovat maidon suurimpia ja samalla kevyimpiä partikkeleita.

Maitorasva on monimutkainen seos, joka sisältää yli 400 erilaista rasvahappoa, joiden suhteelliset määrät voivat vaihdella merkittävästi eri maitojen välillä (Milkworks, i.a.). Näistä rasvahapoista noin 12 on erityisen tärkeitä maidon ominaisuuksien kannalta. Tyydyttyneille rasvahapoille on tunnusomaista, että niiden hiiliketjuissa on ainoastaan yksinkertaisia sidoksia.

Maidon tärkeimpiä tyydyttyneitä rasvahappoja ovat muun muassa voihamppo, kapronihappo, kapryylihamppo, kapriinihamppo, lauriinihamppo, myristiinihamppo, palmitiinihamppo ja steariinihamppo.

Maitorasvan kiinteys on suoraan yhteydessä sen rasvahappokoostumukseen (Milkworks, i.a.). Mitä enemmän rasva sisältää tyydyttyneitä rasvahappoja, kuten palmitiini- ja steariinihamppoa, sitä kovempaa se on ja sitä korkeampi on sen sulamispiste. Kertatyydyttymättömän rasvahapon hiiliketjussa esiintyy ainoastaan yksi kaksoissidos. Öljyhamppo maidon on yleisin kertatyydyttymätön rasvahappo. Suuri öljyhapon määrä tekee maitorasvasta pehmeämpää ja alentaa sen sulamispistettä, joka on tyypillisesti 32–37 astetta.

Monityydyttymättömien rasvahappojen hiiliketjuissa esiintyy useita kaksoissidoksia (Milkworks, i.a.). Maidon merkittävimpiä monityydyttymättömiä rasvahappoja ovat linolihappo, alfa-linolihappo ja arakidonihappo. Lehmien ruokinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi maitorasvan rasvahappokoostumukseen, mikä puolestaan vaikuttaa esimerkiksi rasvan kovuuteen.

Muut maidon rasvat, kuten mono- ja diglyseridit, syntyvät, kun bakteerien tuottama lipaasientsyymi irrottaa rasvahappoja glyserolista (Milkworks, i.a.). Mono- ja diglyseridien määrä lisääntyy maidon vanhetessa, mutta niitä on havaittavissa myös aivan tuoreessa maidossa.

Fosfolipidit muodostavat monimuotoisen lipidien ryhmän, jossa glyserolin yhteen hydroksyyli-ryhmään on sitoutunut fosfaattiryhmä (Milkworks, i.a.). Ne ovat amfifiilisiä molekyylejä, mikä tarkoittaa, että niillä on sekä hydrofiilinen että lipofiilinen pää. Tämän ominaisuuden ansiosta ne asettuvat öljyn ja veden rajapinnoille siten, että lipofiilinen pää on öljyyn päin ja hydrofiilinen pää veteen päin, toimien näin emulgaattoreina, jotka edesauttavat vesi-öljyemulsioiden muodostumista ja stabiilisuutta. Tietyissä olosuhteissa fosfolipidit voivat muodostaa membraanirakenteita, kuten lamelleja, liposomeja ja misellejä. Esimerkiksi maidossa fosfolipidit sijaitsevat rasvapallosten pintakelmussa, missä ne toimivat emulgaattoreina pitäen maitorasvan emulgoituneena maidon vesiosaan. Fosfolipidit vaikuttavat myös sidotun veden määrään maitovalmisteissa, joissa on sekä rasvaa että proteiineja. Ne ovat kuitenkin herkkiä hapettumiselle ja siten alttiita pilaantumiselle. Lesitiini on merkittävin maidon fosfolipidi.

Tärkeimmät sterolit ovat kolesteroli ja ergosteroli (Milkworks, i.a.). Sterolit ovat rengasrakenneisiä yhdisteitä, jotka sisältävät hiiltä, vetyä ja happea. Kolesteroli on yleisin eläinkunnassa esiintyvä steroli, joka toimii solukalvojen rakenneosana sekä sappihappojen ja eräiden hormonien esiasteena. Kolesteroli ei hajoa elimistössä, vaan se erittyy ohutsuoleen sapen

mukana, ja sitä saadaan ravinnosta ainoastaan eläinkunnan tuotteista. Ergosteroli puolestaan on kolesterolin pelkistymistuote ja D2-vitamiinin esiaste, joka muuttuu ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta ergokalsiferoliksi. Vapaita rasvahappoja syntyy maitoon lipaasientsyymin aiheuttaman lipolyysin seurauksena, ja ne voivat aiheuttaa maitoon erilaisia virhemakuja.

4.2 Hiilihydraatit ja laktoosi

Pääosa maidon hiilihydraateista on laktoosia (Milkworks, i.a.). Maidossa on muitakin hiilihydraatteja, mutta niiden pitoisuudet ovat merkittävästi pienempiä. Laktoosi eli maitosokeri on disakkaridi ja se koostuu galaktoosista ja glukoosista. Se ei maistu yhtä makealta kuin tavallinen sokeri, sakkaroosi. Luonnostaan laktoosia löytyy vain maidosta (Ruokavirasto, i.a.). Vähälaktoosisissa maitovalmisteissa laktoosi pilkotaan entsyymaattisesti glukoosiksi ja galaktoosiksi, mikä lisää tuotteiden makeutta, sillä nämä monosakkaridit ovat laktoosia makeampia. Laktoosittomissa maitovalmisteissa osa laktoosista poistetaan kokonaan ja jäljelle jäänyt laktoosi hajotetaan entsyymaattisesti monosakkarideiksi (Ruokavirasto, i.a.).

4.3 Proteiinit

Maito sisältää lukuisia erilaisia proteiineja, joista suurin osa esiintyy vain pieninä pitoisuuksina (Dairy Processing Handbook, i.a.). Proteiinit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: kaseiineihin ja heraproteiineihin (Milkworks, i.a.). Kaseiinit muodostavat noin 80 % maidon kokonaissisällöstä ja ne saostuvat helposti useiden tekijöiden vaikutuksesta, kun taas heraproteiinit jäävät pääsääntöisesti liuokseen.

Kaseiini on seos useista eri proteiinikomponenteista (Dairy Processing Handbook, i.a.). Tärkeimmät alatyypit ovat α_{s1} -kaseiini, α_{s2} -kaseiini, κ -kaseiini ja β -kaseiini. Kaseiinit aggregoituvat eli liittyvät toisiinsa spontaanisti muodostaen suuria, klustereista koostuvia rakenteita, joita kutsutaan miselleiksi. Misellit koostuvat jopa tuhansista kaseiinimolekyyleistä ja niiden koko vaihtelee kymmenistä satoihin nanometreihin. Näiden kolloidisten partikkelien valoa sirottava vaikutus on syy rasvattoman maidon valkoiseen väriin.

Misellirakenne vaikuttaa olennaisesti maidon fysikaalisiin ominaisuuksiin (Dairy Processing Handbook, i.a.). Kaseiinimisellit määräävät esimerkiksi kuumentamisen ja varastoinnin aikaisen stabiilisuuden, osallistuvat oleellisesti juuston valmistukseen ja vaikuttavat fermentoitujen

sekä tiivistettyjen maitotuotteiden reologisiin ominaisuuksiin. Misellit ovat tiiviitä mutta huokoisia rakenteita, joiden sisällä esiintyy kolloidista kalsiumfosfaattia eli CCP:tä. Tämä CCP yhdistää misellin komponentteja, mutta sen poisto esimerkiksi happamoittamalla tai lisäämällä EDTA:ta tai sitraattia johtaa misellien hajoamiseen. Samoin hajoamista tapahtuu, kun pH nousee yli yhdeksän.

Kaseiinimisellien rakenne on dynaaminen (Dairy Processing Handbook, i.a.). α_s - ja β -kaseiinit sijoittuvat pääasiassa misellin sisäosiin, kun taas κ -kaseiini hallitsee pintaa. Misellin ulkokerroksessa sijaitsee niin kutsuttu ”karvainen kerros”, joka muodostuu κ -kaseiinin hydrofiilisestä ja negatiivisesti varautuneesta C-päästä. Tämä kerros työntyy 5–10 nanometriä misellin pinnasta ulospäin ja tarjoaa miselleille tilavaikutteista stabiilisuutta. Jos tämä kerros häviää esimerkiksi lisäämällä etanolia tai juuston valmistuksessa käytetyn juokсутteen vaikutuksesta, misellit menettävät kolloidisen stabiilisuutensa ja alkavat aggregoitua tai saostua.

Heraproteiineilla tarkoitetaan maidon seerumiproteiineja, jotka jäävät liuokseen kaseiinin saostamisen jälkeen (Dairy Processing Handbook, i.a.). Seerumiproteiinit pysyvät liuenneina niin kauan, kun niitä ei denaturoida esimerkiksi lämpökäsittelyllä. Heraproteiineja ovat mm. β -laktoglobuliini ja α -laktalbumiini. Erityisesti α -laktalbumiini tunnetaan korkeasta ravintoarvostaan ja sen aminohappokoostumus onkin hyvin lähellä biologista optimia.

Lämpökäsittelyllä on merkittävä vaikutus heraproteiineihin (Dairy Processing Handbook, i.a.). Denaturoituneet heraproteiinit voivat muodostaa komplekseja kaseiinin kanssa, mikä vähentää kaseiinin herkkyttä entsyymaattiselle hajoamiselle sekä sen kalsiumin sitomiskykyä. Proteiinien denaturoituminen tarkoittaa niiden kolmiulotteisen rakenteen muutosta. Tämä voi johtua korkeasta lämpötilasta, epäsopivasta pH:sta, säteilystä tai korkeasta paineesta. Denaturoituneet proteiinit menettävät biologisen aktiivisuutensa, ja esimerkiksi entsyymien toiminta lakkaa. Joissain tapauksissa lievä denaturoituminen voi olla palautuva prosessi, mutta useimmiten muutos on pysyvä, kuten kypsennetyssä kananmunassa, jonka proteiineja ei voi enää palauttaa alkuperäiseen tilaansa.

5 TUTKIMUKSEN MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin turbidimetrillä testilaboratoriossa kuvan 1 mukaisella laitteistolla. Mittaukset tehtiin pääasiassa erilaisilla maidoilla sekä itse valmistetuilla, eri rasva- sekä proteiinkonsentraation sisältävillä näytteillä. Näitä olivat herasta sekä kermasta vedellä laimentamalla valmistetut liuokset. Kaikki laimennukset valmistettiin analyttisellä vaa'alla, jonka tarkkuus oli 0,1 g. Ennen varsinaisia mittauksia mittalaitteet kalibroitiin vedellä.



Kuva 1. Mittauksissa käytetty laitteisto, edessä alla turbidimetri (kuva: Tuuli Kupiainen).

Mittaukset suoritettiin toistettavasti vakioituissa olosuhteissa, jotta tulosten vertailtavuus säilyisi. Kaikki mittaukset suoritettiin huoneenlämpöisissä olosuhteissa, lämpötilan vaihdeltaessa 23,2–26,9 °C (ka 24,0 °C). Lämpötilan vaihtelu oli vähäistä, eikä sen arvioida vaikuttaneen merkittävästi mittaustuloksiin. Mittaus suoritettiin kaatamalla pystyssä olevaan metalliputkeen näytettä. Putken vetoisuus oli noin yksi litra. Putkeen oli asennettu turbidimetri. Putken alla oli hana, josta näytteen sai ulos.

Optisen mittalaitteen toimintaperiaatteen mukaisesti valon osuessa putken toiselle puolelle taustalevyyn se heijastui sieltä takaisin käytännössä täysin. Osa mittauksista suoritettiin kirkkaalla taustalevyllä ja osa mattamustalla taustalevyllä, jotta voitiin arvioida taustamateriaalin vaikutusta mittaustuloksiin. Mattamustan taustalevyn käyttö valittiin erityisesti heijastuksen minimoimiseksi, sillä kirkas taustalevy voi lisätä takaisinsirontaa ja aiheuttaa virhettä

optisessa mittauksessa. Mattamusta taustalevy valmistettiin maalaamalla levy laboratoriossa, jotta saatiin aikaan mahdollisimman vähän valoa heijastava pinta. Näin voitiin vertailla, miten taustalevyn ominaisuudet vaikuttavat optisen mittauksen tarkkuuteen ja toistettavuuteen.

5.1 Maito

Mittaukset aloitettiin rasvattomalla maidolla. Näyte kaadettiin mittausputkeen, ja ennen mit-taustulosten kirjaamista odotettiin, että mittalaitteiden arvot tasaantuivat. Tämän jälkeen mit-talaitteista luettiin NTU-arvot eri aallonpituuksilla. Seuraavaksi maitonäyte kerättiin talteen putken alla olevan hanan kautta, taustalevy vaihdettiin ja mittaus toistettiin samalla näytteellä. Mittaukset suoritettiin tämän jälkeen seuraavassa järjestyksessä: rasvaton laktoositon maito, kevytmaito, täysmaito, ykkösmaito, laktoositon kevytmaito sekä laktoositon täysmaito. Kaik-kien näytteiden kohdalla noudatettiin samaa mittausprotokollaa kuin ensimmäisen näytteen kohdalla. Jokaisesta maitonäytteestä tehtiin kaksi rinnakkaista mittausta, käyttäen sekä kir-kasta että mattamustaa taustalevyä.

5.2 Hera-vesiliuos

Hera-vesiliuosten mittaukset aloitettiin valmistamalla 5-prosenttinen heraliuos kaupasta saa-tavasta heraproteiinijauheesta. Tämän jälkeen liuosta laimennettiin sarjalla, jossa pitoisuutta pienennettiin aina 0,5 prosenttiyksikön välein 0,5 prosenttiin saakka. Lisäksi valmistettiin erik-seen 0,2-prosenttiset ja 0,1-prosenttiset heraliuokset. Näiden näytteiden sameusmittaukset suoritettiin käyttäen kirkasta taustalevyä.

Alkuperäisen mittaussarjan jälkeen mittausasetelmaa laajennettiin kattamaan myös matalam-mat pitoisuudet. Uudessa sarjassa mittaukset aloitettiin 0,1 % heraliuoksella ja pitoisuutta kasvatettiin 0,1 prosenttiyksikön askelin aina 1 %:iin saakka. Näissä mittauksissa käytettiin mattamustaa taustalevyä. Kaikissa mittauksissa käytettiin samaa mittausprotokollaa kuin maitonäytteiden kohdalla: näyte annosteltiin mittausputkeen, odotettiin laitteiden tasaantu-mista ja mitattiin sameusarvot eri aallonpituuksilla. Jokainen mittaus suoritettiin huolellisesti samoissa olosuhteissa mittaustulosten vertailtavuuden varmistamiseksi.

5.3 Kerma-vesiliuos

Kerma-vesiliuosten mittauksiin valittiin raaka-aineeksi rasvapitoisuudeltaan 35 % kermaa. Ensimmäinen mittausnäyte valmistettiin laimentamalla kerma vedellä 11 %:n rasvapitoisuuteen. Tämän jälkeen liuosta laimennettiin portaittain yhden prosenttiyksikön välein aina 3 %:iin asti. Laimennussarjaa jatkettiin 3 %:sta alaspäin puolen prosenttiyksikön välein 1 %:iin saakka. Lisäksi valmistettiin liuokset, joiden rasvapitoisuudet olivat 0,8 %, 0,6 %, 0,4 %, 0,2 % sekä 0,1 %.

Myös kerma-vesiliuosten sameusmittaukset suoritettiin käyttäen samaa mittausprotokollaa kuin muilla näytteillä: näyte annosteltiin mittausputkeen, odotettiin mittalaitteiden tasaantumista ja mitattiin sameusarvot eri aallonpituuksilla. Mittaukset toteutettiin yhdenmukaisissa olosuhteissa mittaustulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi.

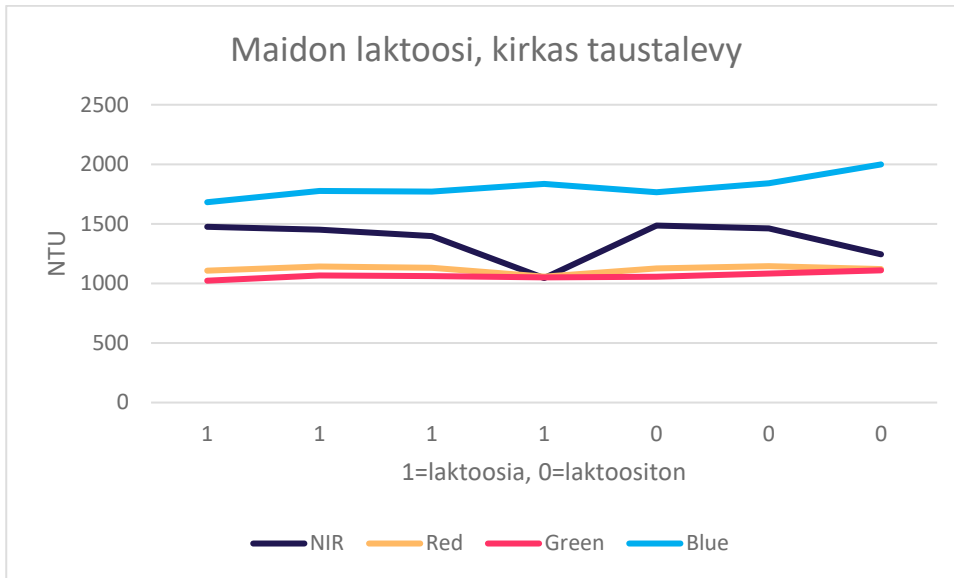
6 TULOKSET

Tutkimuksessa arvioitiin optisen mittauksen ja laskennallisten pitoisuusarvojen välistä korrelaatiota maidon, heran vesiliuoksen ja kerman vesiliuoksen osalta. Optisen mittauksen vasteita (sininen, vihreä, punainen ja NIR) verrattiin näytteiden kokonaiskiintoainepitoisuuksiin sekä rasva-, proteiini- ja hiilihydraattipitoisuuksiin. Tulokset osoittavat, että erityisesti sininen kanava oli herkin muutoksille kaikissa näytetyypeissä, mutta selkeää lineaarista yhteyttä yksittäisten komponenttien ja optisen vasteen välillä ei voitu osoittaa kaikissa tapauksissa.

Taustalevyn materiaalilla oli merkittävä vaikutus vasteiden voimakkuuteen heran vesiliuoksissa. Kerman vesiliuoksissa komponenttien pitoisuudet muuttuivat samassa suhteessa, mikä rajoitti optisen mittauksen kykyä erottaa yksittäisten komponenttien vaikutusta. Maitonäytteiden mittauksissa ei havaittu merkittäviä eroja mattamustan ja kirkkaan taustalevyn välillä saadussa mittausdatassa. Tästä syystä tulososiossa esitetään ainoastaan kirkkaalla taustalevyllä saadut arvot.

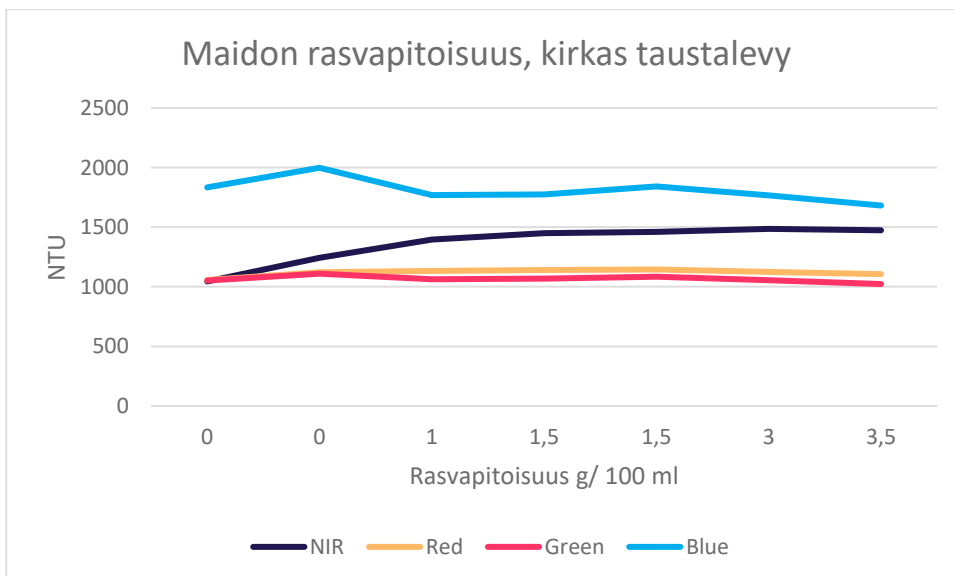
6.1 Maito

Optisen mittauksen vasteet laktoosia sisältävissä (1) ja laktoosittomissa (0) maitonäytteissä on esitetty kuviossa 1. Sininen kanava antaa selvästi korkeimmat vasteet kaikissa näytteissä, eikä siinä näy merkittävää eroa laktoosillisen ja laktoosittoman maidon välillä. NIR-kanavassa vasteet ovat hieman matalampia, mutta siinä näkyy selvä notkahdus yhdessä laktoosia sisältävässä näytteessä: arvo laskee hetkellisesti muiden kanavien tasolle ja palautuu sitten takaisin. Punainen ja vihreä kanava pysyvät koko ajan lähes muuttumattomina eikä laktoosin esiintyminen näytä vaikuttavan niihin. Sinisen ja NIR-kanavan vasteet ovat selvästi korkeammat kuin punaisen ja vihreän, mutta laktoosin esiintyminen (1) tai puuttuminen (0) ei aiheuta systemaattista muutosta vasteissa.



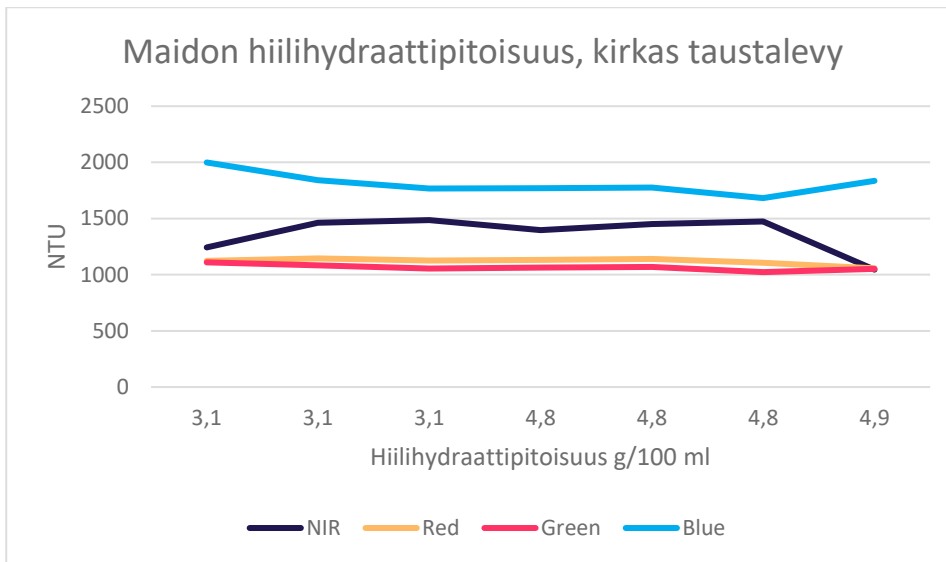
Kuvio 1. Maidon laktoosi.

Kuviossa 2 on esitettyä maidon rasvapitoisuuden vasteet. Sininen kanava antaa selvästi korkeimmat vasteet ja sen arvot vaihtelevat rasvapitoisuuden mukaan, mutta eivät muodosta selvää nousevaa tai laskevaa trendiä. NIR-kanavan vasteet ovat toiseksi korkeimmat ja näyttävät kasvavan hieman rasvapitoisuuden kasvaessa, mutta vaihtelu on maltillista. Punainen ja vihreä kanava pysyvät lähes vakioina koko rasvapitoisuusalueella, eikä niissä havaita merkittävää muutosta. Sinisen kanavan voimakas vaste voi johtua rasvapartikkeleiden valon sironnasta, mutta selkeää lineaarista yhteyttä ei kuitenkaan muodostu.



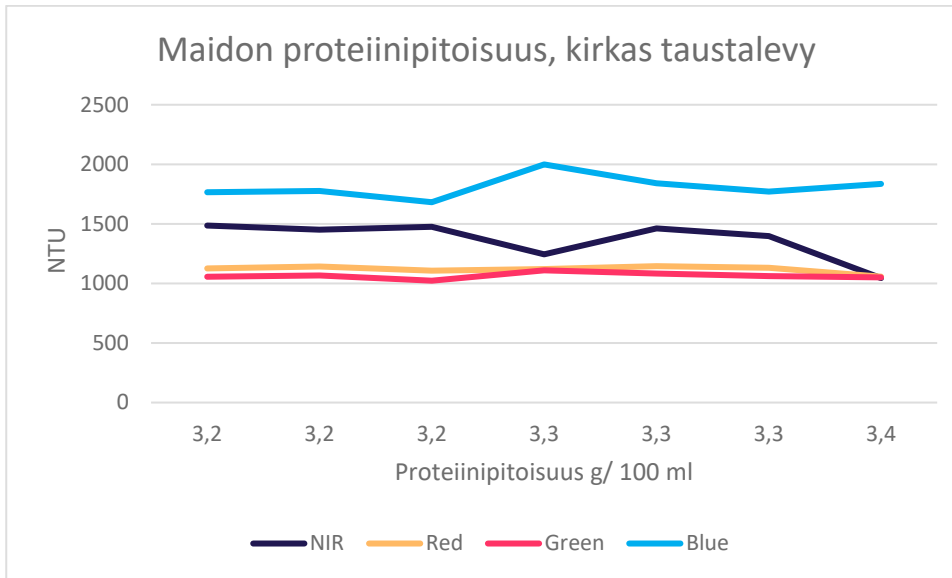
Kuvio 2. Maidon rasvapitoisuus.

Kuviosta 3 huomataan, että sininen kanava antaa korkeimmat vasteet, mutta sen arvot laskevat hieman pitoisuuden kasvaessa ja lopussa tapahtuu selvä pudotus. NIR-kanava seuraa sinistä ja sen arvot pysyvät melko tasaisina lukuun ottamatta viimeistä arvoa, jossa nähdään selvä lasku. Punainen ja vihreä kanava pysyvät lähes muuttumattomina koko pitoisuusalueella.



Kuvio 3. Maidon hiilihydraattipitoisuus.

Kuviossa 4 on esitettyä maidon proteiinipitoisuus. Siinä sininen kanava antaa korkeimmat vasteet, mutta arvot vaihtelevat epäsäännöllisesti proteiinipitoisuuden kasvaessa. NIR-kanava seuraa sinistä kanavaa, mutta myös sen arvot vaihtelevat ilman selvää trendiä. Punainen ja vihreä kanava pysyvät lähes muuttumattomina koko pitoisuusalueella.

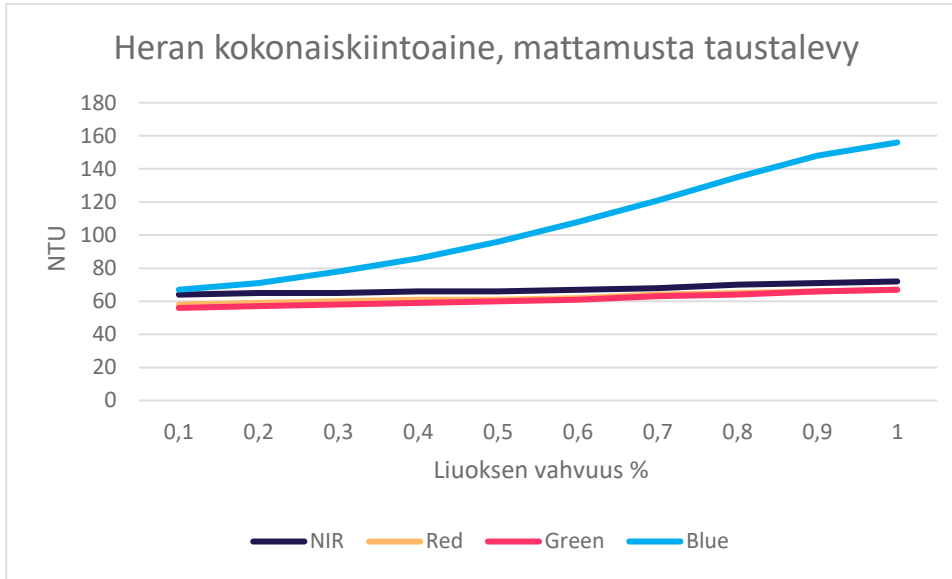


Kuvio 4. Maidon proteiinipitoisuus.

6.2 Hera-vesiliuos

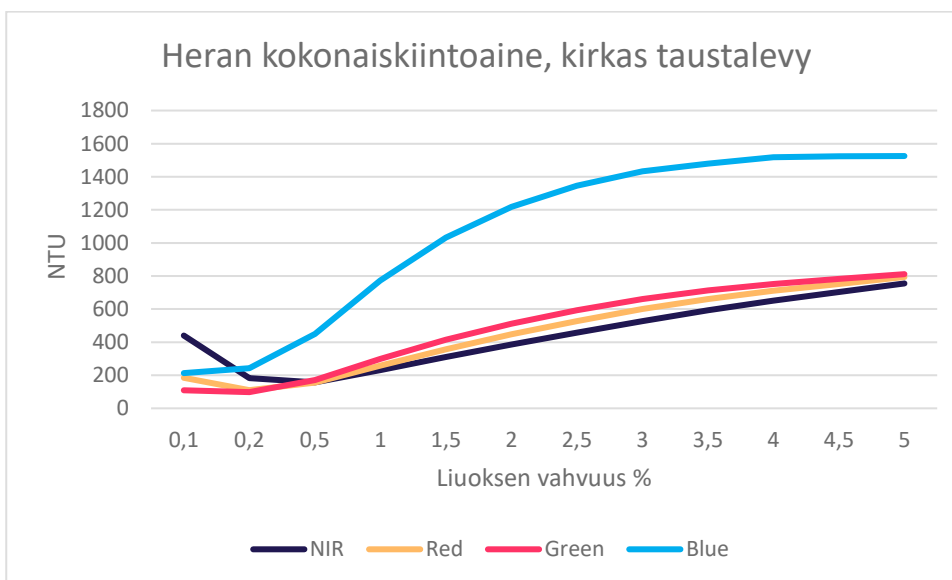
Kuviosta 5 huomataan, että mattamustan taustalevyn kanssa mitattaessa sininen aallonpituus reagoi kiintoainepitoisuuden kasvuun selkeimmin, esittäen voimakkaan nousun pitoisuuksien kasvaessa, erityisesti korkeimmilla arvoilla. Sininen kanava antaa selvästi korkeimmat NTU-arvot koko pitoisuusalueella. Muut kanavat pysyvät lähes samoissa arvoissa koko ajan, ja niiden kasvu liuksen vahvuuden mukana on hyvin loivaa. Kaikkien kanavien vasteet kasvavat pitoisuuden lisääntyessä, mutta sinisen kanavan kasvu on selvästi jyrkempää.

Mattamusta taustalevy vaimentaa valon heijastusta, jolloin mittaus perustuu lähinnä suoraan näytteen läpi kulkevaan ja sironneeseen valoon. Sininen kanava on selvästi herkin havaitsemaan heran kokonaiskiintoaineen muutoksia tällä asetelmalla. Muut kanavat reagoivat vain vähän pitoisuuden kasvuun, mikä kertoo niiden rajallisesta herkkyydestä tässä mittauksessa.



Kuvio 5. Heran kokonaiskiintoaine, mittaukset tehty mattamustaa taustalevyä käyttäen.

Kuviossa 6 kirkkaan taustalevyn kanssa mitattaessa sinisen aallonpituuden vaste kasvoi lähes eksponentiaalisesti antaen selvästi korkeimmat NTU-arvot koko pitoisuusalueella. Muut kanavat seuraavat toisiaan hyvin läheisesti ja niiden vasteet kasvavat lähes lineaarisesti pitoisuuden kasvaessa, mutta jäävät sinisestä selvästi. Sinisessä nähdään jyrkkä kasvu erityisesti pitoisuuksien 0,5–2 % välillä, jonka jälkeen kasvu loivenee ja tasoittuu korkeammilla pitoisuuksilla. Pienimmillä pitoisuuksilla (0,1–0,3 %) on notkahdus, jonka jälkeen kasvu alkaa.

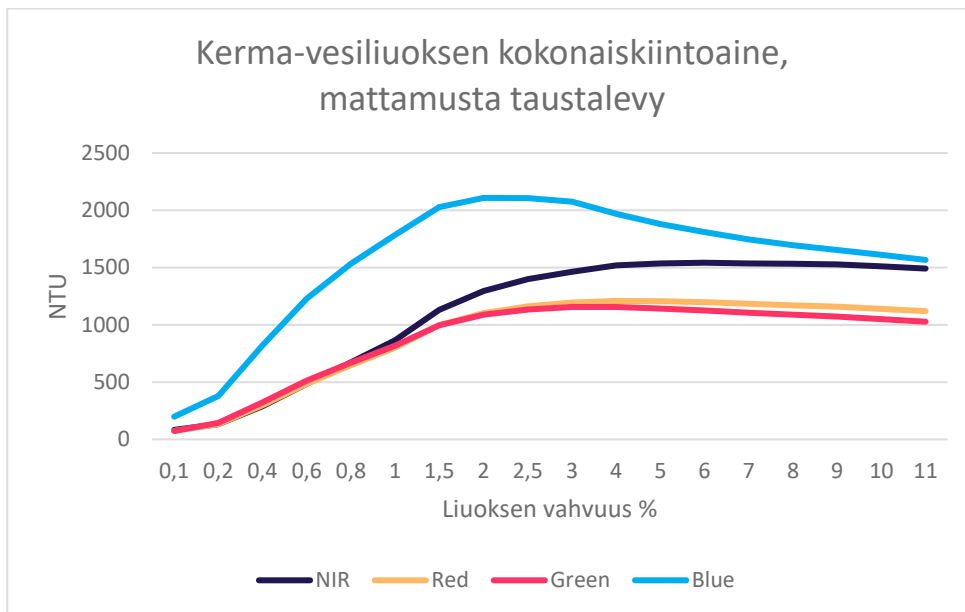


Kuvio 6. Heran kokonaiskiintoaine, mittaukset tehty kirkasta taustalevyä käyttäen.

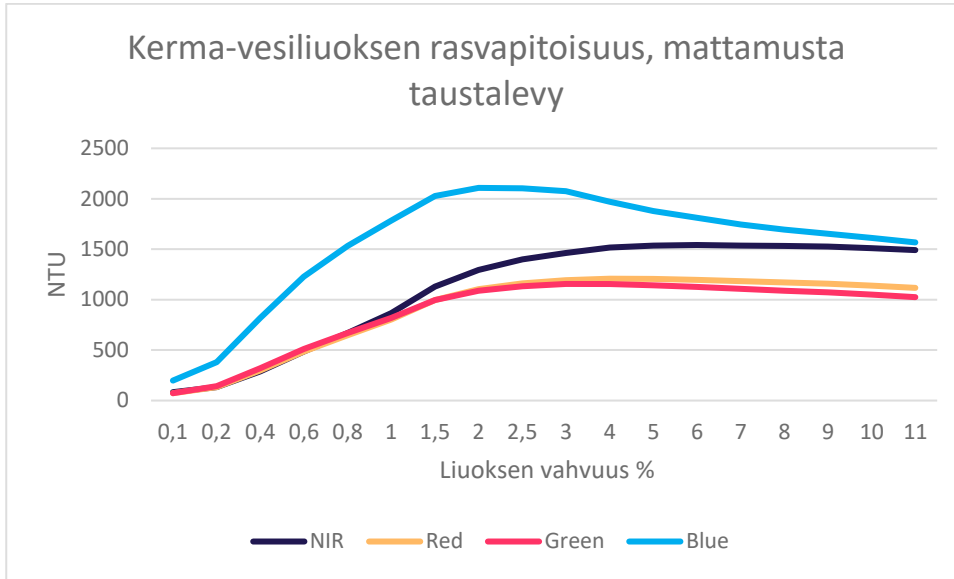
6.3 Kerma-vesiliuos

Kerma-vesiliuosten optisen mittauksen vasteet eri aallonpituuksilla osoittivat samankaltaista käyttäytymistä riippumatta siitä, tarkasteltiin kokonaiskiintoaine-, rasva-, hiilihydraatti- tai proteiinipitoisuutta. Nämä havaitaan kuvioista 7–10, jotka ovat keskenään lähes identtisiä. Kaikissa kuvaajissa sininen kanava antoi selvästi korkeimmat vasteet, kun taas muiden kanalien vasteet olivat matalampia ja kasvoivat tasaisesti pitoisuuden mukana. Vasteiden kasvu oli lähes lineaarista kaikilla tarkastelluilla pitoisuuksilla.

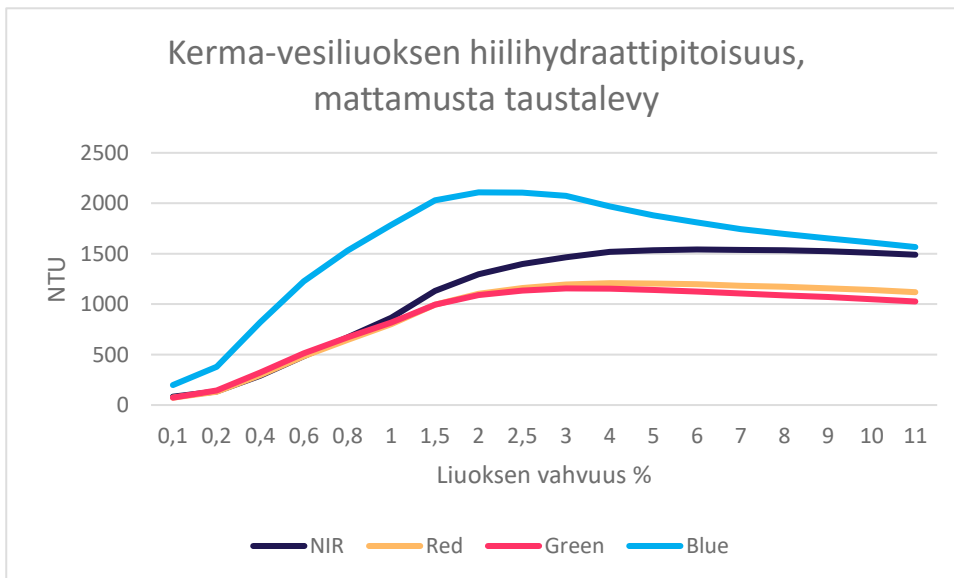
Tämä samankaltaisuus johtuu siitä, että kerma-vesiliuoksessa eri komponenttien pitoisuudet muuttuvat samassa suhteessa liuosta laimennettaessa tai väkevöittäessä. Koska kerma sisältää kaikkia näitä komponentteja, niiden pitoisuudet ovat vahvasti korreloituneita. Näin ollen optisen mittauksen vaste heijastaa näytteen kokonaispartikkelipitoisuutta eikä yksittäisen komponentin vaikutusta voida erottaa, kun kaikki pitoisuudet muuttuvat samanaikaisesti.



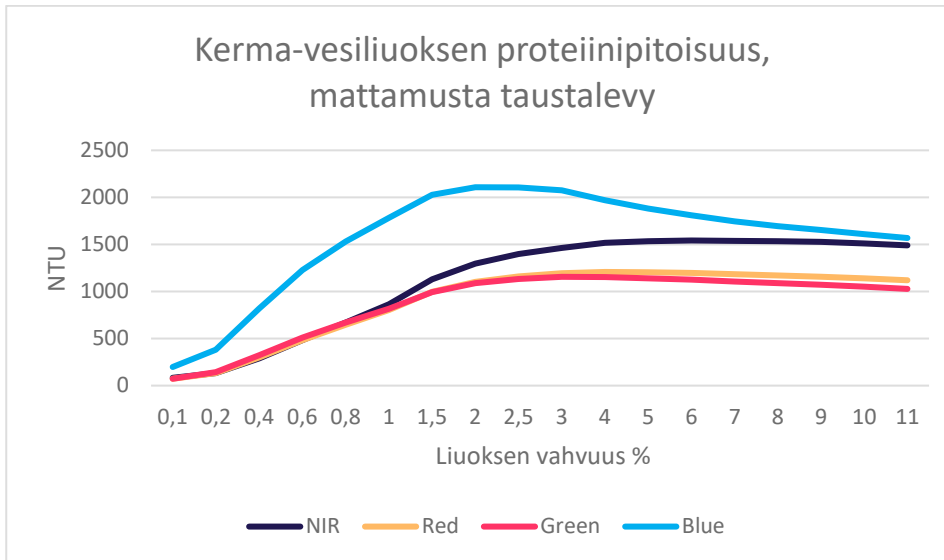
Kuvio 7. Kerma-vesiliuoksen kokonaiskiintoaine.



Kuvio 8. Kerma-vesiliuoksen rasvapitoisuus.



Kuvio 9. Kerma-vesiliuoksen hiilihydraattipitoisuus.



Kuvio 10. Kerma-vesiliuoksen proteiinipitoisuus.

6.4 Korrelaatiokertoimet

Tässä tutkimuksessa korrelaatioanalyysi keskittyi kokonaiskiintoainepitoisuuden ja optisen mittauksen vasteiden väliseen lineaariseen yhteyteen. Kokonaiskiintoainepitoisuus määritettiin laskennallisesti näytteeseen lisättyjen komponenttien tunnettujen määrien perusteella. Kullekin näytteelle oli tiedossa sekä kokonaiskiintoainepitoisuus että vastaava optisen mittauksen arvo kullakin aallonpituudella.

Koska kerma-vesiliuoksessa rasvan, proteiinin ja hiilihydraattien pitoisuudet muuttuvat samassa suhteessa laimennuksen myötä, niiden ja optisen vasteen väliset korrelaatiot ovat käytännössä identtiset kokonaiskiintoainepitoisuuden kanssa. Tästä syystä korrelaatioanalyysi esitetään kokonaiskiintoainepitoisuuden ja optisten vasteiden välillä.

Analyysin tavoitteena oli selvittää, kuinka vahvasti optisen mittauksen vasteet eri aallonpituuksilla heijastavat kokonaiskiintoainepitoisuuden muutoksia. Tulokset esitetään taulukossa, jossa näkyvät kunkin aallonpituuden ja kokonaiskiintoainepitoisuuden väliset korrelaatiokertoimet. Korrelaatiokertoimet laskettiin Microsoft Excel -ohjelman CORREL-funktiolla. Tämä funktio laskee Pearsonin korrelaatiokertoimen kahden muuttujan välille.

Taulukosta 1 huomataan, että hera-vesiliuoksissa korrelaatiokertoimet ovat erittäin korkeita kaikilla kanavilla. Tämä tarkoittaa, että optisen mittauksen vasteet eri aallonpituuksilla ovat lähes täydellisessä positiivisessa lineaarisessa yhteydessä kokonaiskiintoainepitoisuuteen.

Toisin sanoen, kun kokonaiskiintoaineen määrä kasvaa, myös optinen vaste kasvaa lähes suoraviivaisesti kaikilla mitatuilla aallonpituuksilla. Tämä osoittaa, että optinen mittaus on erittäin luotettava hera-vesiliuoksen kokonaiskiintoaineen arvioinnissa riippumatta taustalevyn väristä. Sen sijaan kerma-vesiliuoksessa korrelaatiokertoimet ovat selvästi matalampia. Tämä viittaa siihen, että optisen vasteen ja kokonaiskiintoainepitoisuuden välinen lineaarinen yhteys on heikompi. Paras yhteys havaitaan NIR-kanavalla, mutta sinisellä kanavalla yhteys on jo varsin heikko. Tämä voi johtua kerman monimutkaisemmasta koostumuksesta ja partikkelien erilaisesta käyttäytymisestä valon sironnassa, jolloin optinen mittaus ei reagoi kokonaiskiintoaineen muutoksiin yhtä johdonmukaisesti kuin hera-vesiliuoksessa.

Taulukko 1. Korrelaatiokertoimet

	Blue	Green	Red	NIR
Hera-vesiliuos mattamusta	0,99	0,99	0,99	0,97
Hera-vesiliuos kirkas	0,93	0,97	0,98	0,91
Kerma-vesiliuos	0,35	0,62	0,67	0,75

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikki mitatut aallonpituudet osoittavat selkeää positiivista korrelaatiota liuoksen vahvuuden ja sameuden välillä, sillä liuoksen pitoisuuden kasvaessa sameusarvot kasvavat systemaattisesti kaikilla aallonpituuksilla. Tämä on odotettua, sillä suurempi liuospitoisuus lisää hiukkasten määrää nesteessä, mikä puolestaan hajottaa valoa voimakkaammin.

Maidon hiilihydraatti-, rasva-, ja proteiinipitoisuuden kuvaajassa sininen ja NIR-kanava ovat herkimpiä maidon koostumuksen muutoksille, mutta vasteiden muutokset ovat pieniä ja epälineaarisia. Punainen ja vihreä kanava pysyvät lähes muuttumattomina kaikilla tutkituilla pitoisuusalueilla. Vaikka sinisen kanavan vaste osoittautui selkeästi korreloivaksi rasvapitoisuuden kanssa, punaisen kanavan osalta vasteiden yhteys oli nykyisellä mittausresoluutiolla epäselvempi. Tämä viittaa siihen, että punaisen kanavan potentiaali rasvapitoisuuden arvioinnissa voi avautua paremmin laajemmalla skaalausmenetelmällä tai tarkemmilla mittauksilla. Jatkossa olisi tärkeää tutkia punaisen kanavan vasteita tarkemmin, jotta sen soveltuvuus rasvapitoisuuden mittaamiseen voidaan varmistaa. Optisen mittauksen käyttökelpoisuus maidon koostumuksen arvioinnissa vaatii lisäkalibrointia ja mahdollisesti muita mittausmenetelmiä tueksi.

Heran kokonaiskiintoaineen mittaamiseen kirkkaalla taustalevyllä sininen kanava on ylivoimaisesti herkin ja käyttökelpoisin. Muut kanavat antavat myös käyttökelpoista tietoa, mutta niiden herkkyys jää selvästi sinisen kanavan alle. Taustalevyn valinta vaikuttaa merkittävästi mittauksen herkkyyteen ja vasteisiin etenkin matalilla sameuksilla, jolloin taustamateriaalin heijastavuus voi vääristää tuloksia. Mattamusta taustalevy vaimentaa valon heijastusta, jolloin mittaus perustuu lähinnä suoraan näytteen läpi kulkevaan ja sironneeseen valoon. Myös mattamustalla taustalevyllä sininen kanava on käyttökelpoisin heran kokonaiskiintoaineen mittaamiseen, sillä sen vaste kasvaa selvästi pitoisuuden mukana. Muilla kanavilla muutokset ovat pieniä, joten niiden hyödyntäminen analyysissä on rajallista. Tämä viittaa siihen, että sininen valo voi olla käyttökelpoinen komponentti optisessa mittauksessa, kun mitataan heran kiintoainepitoisuutta.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että optinen mittaus reagoi herkästi kerma-vesiliuoksen kokonaispartikkelipitoisuuden muutoksiin, mutta ei kykene erottamaan yksittäisten komponenttien vaikutusta silloin, kun kaikkien pitoisuudet muuttuvat rinnakkain. Sinisen kanavan havaittu erityinen herkkyys johtuu maitotuotteiden partikkelien tehokkaasta valon sironnasta

tällä aallonpituudella. Jos jatkossa halutaan selvittää yksittäisten komponenttien vaikutusta optiseen vasteeseen, tulisi kokeellinen asetelma suunnitella siten, että vain yhden komponentin pitoisuutta muutetaan kerrallaan muiden pysyessä vakiona.

Jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä selvittää tarkemmin optisen mittauksen ja pitoisuusarvojen välistä epälineaarista yhteyttä erityisesti matalilla pitoisuuksilla, joissa nykyisen tutkimuksen perusteella havaittiin mahdollisia poikkeamia lineaarisesta korrelaatiosta. Lisäksi tutkimusta olisi perusteltua laajentaa muihin maitopohjaisiin tuotteisiin, kuten jogurttiin ja juustoon, jotta menetelmän soveltuvuutta ja luotettavuutta voitaisiin arvioida laajemmin erilaisissa matriiseissa. Myös mittausolosuhteiden, kuten lämpötilan, vaikutusta optisen mittauksen tarkkuuteen ja toistettavuuteen olisi syytä tarkastella systemaattisemmin tulevaisuudessa. Näin saataisiin kattavampaa tietoa menetelmän rajoituksista ja mahdollisuuksista maitoteollisuuden reaaliaikaisessa laadunvalvonnassa.

LÄHTEET

- Anzini, P., Redoglio, P., Rocco, M., Masciocci, N., & Ferri, F. (2022). Light scattering and turbidimetry techniques for the characterization of nanoparticles and nanostructured networks. *Nanomaterials*, 12(13), 2214. <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/13/2214>
- Asuero, A., Sayago, A., & Gonzalez, A. (2006). The correlation coefficient: an overview. Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Bohren, C.F., & Huffman, D.R (1983). *Absorption and scattering of light by small particles*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527618156>
- Dairy processing handbook. (i.a.). Tetra Pak. <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com>
- Finnish Social Science Data Archive (FSD). (2024). *Kovarianssi ja korrelaatio – Pearsonin korrelaatiokerroin*. Tietoarkisto. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/korrelaatio/korrelaatio/>
- International organization for standardization (ISO). (2016). *Water quality- Determination of turbidity Part 1: Quantitative methods* (ISO Standard No. 7027-1:2016)
- Kelley, C., Krolick, A., Brunner, L., Burklund, A., Kahn, D., Ball, W., & Weber-Shirk, M. (2014). An affordable open-source turbidimeter. *Sensors*, 14(4), 7142–7155. <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/7142>
- Lawler, D.M. (2001). Spectrometry | Turbidimetry and nephelometry. Teoksessa P. Worsfold, A. Townshend, & C. Poole (toim.), *Encyclopedia of Analytical Science* (2. p., Volume 3, s. 54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00718-4>
- Milkworks. (i.a.). *Maidon kemiaa*. <https://milkworks.fi/maidon-kemiaa/>
- Morais, I., Tóth, I., & Rangel, A. (2006). Turbidimetric and nephelometric flow analysis: concepts and applications. *Spectroscopy letters*, 39(6), 547–579. <https://doi.org/10.1080/00387010600824629>
- Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between +1/–1, or do they? *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, 17(2), 139–142. <https://doi.org/10.1057/jt.2009.5>
- Ruokavirasto. (i.a.). Vähälaktoosiset ja laktoosittomat elintarvikkeet. <https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/elintarvikeala/tuote--ja-toimialakohtaiset-vaatimukset/erityisille-ryhmille-tarkoitettut-elintarvikkeet/vanhat-erityisruokavalmisteet/vahalaktoosiset-ja-laktoosittomat-elintarvikkeet/>

