

**Atte Rautio**

**Ohutpinnoitekalvojen paksuuden mittaaminen  
hyperspektrikuvantamisella**

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

12. maaliskuuta 2019

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Atte Rautio

**Yhteystiedot:** `atte.rautio@student.jyu.fi`

**Ohjaajat:** Ilkka Pölönen ja Tero Tuovinen

**Työn nimi:** Ohutpinnoitekalvojen paksuuden mittaaminen hyperspektrikuvantamisella

**Title in English:** Measuring the Thickness of Thin Layer Foils Using Hyperspectral Imaging

**Työ:** Pro gradu -tutkielma

**Suuntautumisvaihtoehto:** Ohjelmistotekniikka

**Sivumäärä:** 54+0

**Tiivistelmä:** Ohutpinnoitekalvoja käytetään eri teollisuuden aloilla muun muassa optisiin tarkoituksiin ja suojakerroksina. Hyperspektrikuvantamisessa mitataan sähkömagneettisen spektrin voimakkuutta usealla eri aallonpituudella. Hyperspektrikuvakuution sisältämän valtavien datamäärien takia hyperspektrikuvantamista voidaan hyödyntää useisiin eri tutkimustarkoituksiin. Tutkielmassa tutkittiin valon transmissiota ja reflektanssia ja pyrittiin kehittämään menetelmä, jolla ohutpinnoitekalvojen paksuuksia voisi mitata. Tutkimustulokset ovat tässä suuntaa-antavia, ja jatkotutkimusta menetelmän kehittämiseksi tarvitaan. Luotettavaa mallia pinnoitteiden paksuuden mittaamiseen ei onnistuttu kehittämään.

**Avainsanat:** hyperspektrikuvantaminen, Kubelka-Munkin malli, Beer-Lambertin laki, ohutpinnoitteet

**Abstract:** Industrial applications for thin layer foils include optical and protective layers. Hyperspectral imaging measures the intensity of the electromagnetic spectrum at several wavelengths. The vast amount of data contained in a hyperspectral image allows the use of hyperspectral imaging in many different types of analysis. The aim of the present study was to develop a method for measuring the thickness of a thin layer foil by examining the transmission and reflectance of light. The results of the research were approximate and further research is required. A reliable method for measuring the thickness of thin layer foils was not discovered.

**Keywords:** Hyperspectral Imaging, Kubelka-Munk model, Beer-Lambert's law, Thin Layer Foil

Atte Rautio

## Termiluettelo

elektromagneettinen spektri	Elektromagneettinen säteily jaetaan aallonpituuden mukaan eri alueisiin. Näkyvä valo käsittää pienen osa elektromagneettisesta spektristä.
hyperspektrikuvakuutio	Hyperspektrikuvakuutiossa on kuvattu kuvan jokaiselle pikselille spektrin voimakkuus jokaisella mitatulla aallonpituudella.
NIR-CI	Kuvantamismenetelmä, jossa keskitytään lähi-infrapuna-alueen spektrin kuvantamiseen.
RGB-kamera	Perinteinen kamera, jossa kuva muodostuu yhdistämällä punaisen, vihreän ja sinisen aallonpituuden spektrit.
Beer-Lambertin laki	Beer-Lambertin laki kuvaa, miten valo absorboituu näytteen kulkiessa näytteen läpi.
transmissio	Valon kulkiessa aineen läpi osa valosta absorboituu aineeseen tai siroaa siitä pois. Loput valosta jatkaa matkaansa aineen toiselta puolelta. Tätä ilmiötä kutsutaan transmissioksi.
reflektanssi	Valon osuessa aineeseen osa valosta siroaa tai heijastuu takaisin. Tätä ilmiötä kutsutaan reflektanssiksi.

## Symboliluettelo

$\lambda$	aallonpituus
$A$	Absorbanssi
$I_{det}$	Näytteestä mitatun valon intensiteetti
$I_{inc}$	Näytteeseen kohdistetun valon intensiteetti
$a$	absorptiokerroin
$b$	valonsäteen kulkema matka aineessa
$c$	absorboivan aineen konsentraatio
$R$	Reflektanssi
$R_g$	Taustamateriaalin reflektanssi
$I$	Näytteeseen kohdistetun valon intensiteetti (Kubelka-Munkin malli)
$J$	Näytteestä heijastuneen valon intensiteetti
$L$	Näytteen paksuus (Kubelka-Munkin malli)
$K$	Kubelka-Munkin mallin absorptiokerroin
$S$	Kubelka-Munkin mallin sirontakerroin
$\mu$	Kubelka-Munkin mallissa sironnan aiheuttaman polun pituuden vaihtelun kerroin

## Kuviot

Kuvio 1. Elektromagneettinen spektri .....	7
Kuvio 2. Kubelka-Munk -malli reflektanssille .....	9
Kuvio 3. Transmissiokuva .....	15
Kuvio 4. Valon kulku transmissiokuvassa.....	16
Kuvio 5. Transmissiokuvasta poimittujen alueiden absorbanssit .....	17
Kuvio 6. Teipin ja lasin absorptiokertoimet .....	18
Kuvio 7. Teipin paksuudet .....	19
Kuvio 8. Teipin paksuus (mm).....	20
Kuvio 9. Teipinpaloja kerroksittain.....	22
Kuvio 10. Naarmu pinnoitteen alla .....	22
Kuvio 11. Reikä pinnoitteessa .....	23
Kuvio 12. Reikä pinnoitteen alla .....	23
Kuvio 13. Reflektanssi aallonpituudella 561.35 nm .....	25
Kuvio 14. Reflektanssin referenssi .....	26
Kuvio 15. Reflektanssikäyrät .....	27
Kuvio 16. Paksuuskuva, malli 1 .....	28
Kuvio 17. Paksuuskuva, malli 2 .....	29
Kuvio 18. Reflektanssikuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa .....	30
Kuvio 19. Paksuuskuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa (malli 1).....	31
Kuvio 20. Paksuuskuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa (malli 2).....	31
Kuvio 21. Reflektanssikuva, reikä teipissä .....	32
Kuvio 22. Paksuuskuva, reikä teipissä.....	33
Kuvio 23. Reflektanssikuva, reikä alemmassa teippikerroksessa .....	34
Kuvio 24. Paksuuskuva, reikä alemmassa teippikerroksessa.....	34
Kuvio 25. Laskettuja paksuuksia eri tavoin skaalatuilla taustareflektansseilla .....	38

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	TEORIAOSA .....	3
2.1	Hyperspektrikuvantamisen käyttökohteita .....	3
2.2	Ohutpinnoitekalvojen käyttökohteita .....	5
2.3	Koeasetelmissa esiintyvät fysikaaliset ilmiöt .....	6
2.3.1	Elektromagneettinen spektri .....	6
2.3.2	Valon absorptio ja transmissio .....	7
2.3.3	Reflektanssi .....	8
2.3.4	Sirontakertoimen määrittely .....	10
2.3.5	Kubelka-Munkin mallin rajoitukset.....	11
3	KOEASETELMA.....	14
3.1	Transmissiokuva.....	14
3.1.1	Transmissiokuvan tulokset .....	20
3.2	Reflektanssikuvat .....	21
3.2.1	Mittauksessa käytetyt kuvat .....	21
3.2.2	Teipin paksuuden mittaaminen .....	24
3.2.3	Sirontakertoimen generointi .....	24
3.2.4	Mallien epävarmuuksien mittaaminen .....	35
4	TULOSTEN ANALYYSI .....	39
5	YHTEENVETO.....	41
	LÄHTEET .....	43

# 1 Johdanto

Ohutpinnoitekalvoja hyödynnetään laajasti eri teollisuuden aloilla. Niitä käytetään muun muassa erilaisissa linsseissä valon suodattamiseen, käyttöesineissä koristeellisten pintojen luomiseen, aurinkokennoissa energiantuotantoon ja satelliiteissa lämpösuojina. Ohutpinnoitekalvojen valmistuksessa, kuten muissakin teollisissa valmistusprosesseissa, laadunvarmistus on olennainen osa valmistusprosessia. Eräs ohutpinnoitekalvojen laadullisista vaatimuksista on, että pinnoite on tasainen ja oikean paksuinen.

Hyperspektrikuvantaminen on monikäyttöinen menetelmä tiedon hankkimiseksi tutkittavasta kohteesta. Menetelmä soveltui aluksi kameroiden epätarkkuuden takia ainoastaan kaukokartoitussovelluksiin, mutta kamerateknologian kehittyttyä hyperspektrikuvien käyttöä on hyödynnetty myös esimerkiksi lääketeollisuudessa ja ruokatuotannossa. Yhdestä hyperspektrikuvasta voidaan saada paljon erilaista tietoa kuvan sisältämän datamäärän ansiosta. Koska hyperspektrikuvantamisella voidaan selvittää monenlaisia asioita tutkittavasta kohteesta, on perusteltua etsiä sille käyttökohteita myös ohutpinnoitekalvojen valmistuksessa ja laadunvalvonnassa.

Tässä tutkielmassa haluttiin selvittää, miten hyperspektrikuvantamista voidaan hyödyntää ohutpinnoitekalvojen paksuuden mittaamiseen. Tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

1. Millaisilla matemaattisilla malleilla ohutpinnoitekalvojen paksuutta voidaan mitata hyperspektrikuvasta?
2. Miten erilaiset vauriot pinnoitteessa vaikuttavat laskujen tuloksiin?

Tutkielmaa varten ei ollut saatavilla varsinaisia ohutpinnoitenäytteitä, joten ohutpinnoitteeksi valittiin lasilevyyn ja paperiarkkiin liimattuja toimistoteipinpaloja. Toimistoteippi on huomattavasti paksumpaa kuin kaikkein ohuimmat ohutpinnoitteet, joiden paksuudet ilmoitetaan nanometreissä, joten tutkimustulosten tiedostettiin olevan suuntaa-antavia ja menetelmien kehityksen vaativan jokatapauksessa lisätutkimusta.

Tutkielmaraportti sisältää johdannon lisäksi neljä lukua. Luvussa 2 kuvataan hyperspektrikuvantamisen ja ohutpinnoitekalvojen historiaa sekä tutkimuksen kannalta oleellisia fysikaali-



sia ilmiöitä. Luvussa 3 kuvataan koeasetelmaa tarkemmin, ja käydään läpi tutkittavista kuvista saadut tulokset. Luvussa 4 arvioidaan tutkimuksen tuloksia sekä tuloksiin vaikuttaneita virhelähteitä. Lopuksi luku 5 sisältää yhteenvedon tutkielmasta ja ehdotuksia jatkotutkimukseen.

## 2 Teoriaosa

Tämä luku koostuu kolmesta kokonaisuudesta. Aluksi kuvataan hyperspektrikuvantamisen eri käyttökohteita. Sitten kuvataan ohutpinnoitekalvojen valmistusmenetelmiä ja käyttökohteita. Lisäksi käydään läpi hieman menetelmiä, joilla ohutpinnoitekalvojen ominaisuuksia, mukaan lukien paksuutta, mitataan. Lopuksi esitellään koeasetelmassa esiintyvät fysikaaliset ilmiöt, jotka määrittelevät kokeen tulokset. Nämä ovat valon absorptio, transmissio sekä reflektanssi.

### 2.1 Hyperspektrikuvantamisen käyttökohteita

Hyperspektrikameran avulla saadaan mitattua elektromagneettisen spektrin voimakkuutta aallonpituuksilta, jotka ulottuvat ihmissilmälle näkyvästä valosta lähi-infrapunan alueelle. Hyperspektrikuvantamisen avulla saadaan kuvattua kokonainen spektrin alue kohdekuvan jokaiselle pikselille (Amigo, Babamoradi ja Elcoroaristizabal 2015). Hyperspektrikuvantaminen tuottaa kohteesta datakuution, jossa  $x$ - ja  $y$ -akseli vastaavat kuvan korkeutta ja leveyttä, ja  $\lambda$ -akseli aallonpituutta.

Hyperspektrikuvantamista on alunperin sovellettu kaukokartoitussovelluksissa. Ensimmäinen Landsat Multispectral Scanner System (MSS) otettiin käyttöön vuonna 1972. Sillä pystyttiin kuvaamaan 4 eri aallonpituusaluetta ja sen pikselikoko oli 80 m. Sittemmin on kehitetty satelliittijärjestelmiä, joilla saadaan mitattua lähes koko elektromagneettinen spektri. Niissä on tusinoittain aallonpituusalueita ja niiden pikselitarkkuus on suurempi. Satelliittien rinnalle on vielä kehitetty erilaisia lennokkeihin perustuvia hyperspektrikuvantamisjärjestelmiä, joiden spektrikanavat ovat vain noin 10 nm pitkiä. (Schowengerdt 2007)

Jyväskylän yliopistossa on kehitetty kaukokartoitussovelluksia eritoten maa- ja metsätalouksikäyttöön. Näissä tutkimuksissa on alunperin kuvattu peltoalueita miehittämättömällä lennokilla. Kuvadataa on voitu hyödyntää esimerkiksi biomassan estimointiin, mikä puolestaan edesauttaa lannoitekarttojen laatimiseen tehokkaan ja taloudellisen lannoituksen suunnittelun tueksi. (Pölonen ym. 2012, Kaivosoja ym. 2013)

Myöhemmin lennokkisovelluksia alettiin kehittämään siten, että ne eivät tarvitse referenssi-kohteita kuvattavalle alueelle, jolloin niitä pystytään hyödyntämään myös metsä- ja vesialueiden tutkimiseen (Honkavaara ym. 2014). Viimeisimmissä metsäsovelluksissa lennokin avulla on kartoitettu muun muassa eri puulajien määriä (Tuominen ym. 2015) sekä tunnistettu puulajeja (Näsi ym. 2016).

Hyperspektrikuvantamista hyödynnettiin pääsääntöisesti kaukokartoitussovelluksissa, kunnes tekniikan kehityttyä sitä pystyttiin soveltamaan laajemminkin (Amigo, Babamoradi ja Elcoroaristizabal 2015). Lääketieteessä hyperspektrikuvantamista voidaan hyödyntää sekä farmaseuttisessa tutkimuksessa, lääketuotannossa laadunvarmistukseen että sairauksien diagnosoinnin apuna. Farmasiassa lähi-infrapuna-alueen kuvantamisella (NIR-CI) saadaan tietoa lääke tabletin rakenteesta vahingoittamatta itse näytteen rakennetta (Amigo ym. 2008). NIR-CI:llä tuotetuilla kuvakuutioilla saadaan esimerkiksi kontrolloitua eri komponenttien jakautumista lääkekapseleissa. Komponenttien jakautuminen vaikuttaa lääkkeen käyttäytymiseen sulamisvaiheessa, joten sen seuraaminen on ehdottoman tärkeää. Toinen lääkkeen käyttäytymiseen vaikuttava tekijä on tabletin homogeenisyys, jonka varmistamiseen NIR-CI soveltuu. Homogeenisyydellä saadaan varmistettua paitsi lääkkeen haluttu käyttäytyminen, myös se, että lääke sisältää halutun määrän eri ainesosia. Lisäksi voidaan esimerkiksi tutkia lääkeaineiden eri polymorfisia esiintymiä ja hiukkaskokoja sekä tunnistaa väärennöksiä. (Gendrin, Roggo ja Collet 2008)

Lääketieteelliseen käyttöön on Jyväskylän yliopistossa tutkittu hyperspektrikuvantamista ihossa esiintyvien poikkeamien havainnointiin ja rajaamiseen. Vuonna 2013 julkaistiin artikkeli pilottitutkimuksesta, jossa pyrittiin havaitsemaan erilaisten ihosyöpien esiintymistä jo varhaisessa vaiheessa. Tutkimuksessa onnistuttiin havaitsemaan kaikki tutkimusaineistossa esiintyneet paljaalla silmällä havaittavat syöpäkasvaimet sekä lukuisia kasvaimia, jotka eivät olleet paljaalla silmällä havaittavissa. Lisäksi onnistuttiin havaitsemaan laajempia ihoalueita, joissa ihosyöpää esiintyi. (Neittaanmäki-Perttu ym. 2013)

Hyperspektikuvantaminen osoittautui siis lupaavaksi työkaluksi ihosyövän diagnosoinnissa. Vuonna 2016 julkaistussa pilottitutkimuksessa sovellettiin hyperspektrikuvantamista ihosyöpäalueen rajaamiseen leikkausta varten. Paljaalla silmällä arvioitaessa on riskinä, että rajataan liian pieni alue, jolloin kehoon jää syöpäsoluja vielä leikkauksen jälkeenkin. Hypers-

pektrikuvantamisella pystyttiin havaitsemaan reunat tarkemmin myös silloin, kun ne eivät olleet ihmissilmällä erotettavissa. (Neittaanmäki-Perttu ym. 2015)

Ruokatuotannossa laadunvalvonta tuotannon jokaisessa vaiheessa on äärimmäisen tärkeää, koska tuotteet pitää saada valmistettua nopeasti ja luotettavasti. Perinteiset ruokatuotannossa käytettävät analysointimenetelmät antavat toki luotettavaa tietoa, mutta ne ovat kalliita, vaativat usein näytteen tuhoamista, ja ne eivät pysty tarjoamaan tietoa reaaliaikaisesti. Tämän takia erilaiset konenäkösovellukset yleistyivät ruokateollisuudessa 2000-luvun alussa. Nämä perustuvat yleensä RGB-kameroihin, mutta niiden havainnointikyky on vajaavainen hyperspektrikuvantamiseen verrattuna. Hyperspektrikuvantamista sovelletaankin eritoten laboratorioissa ja tuotantolinjastoilla, koska sen avulla saa valtavan määrän informaatiota kuvattavan kohteen spektristä suhteellisen lyhyessä ajassa. Erilaisia käyttökohteita hyperspektrikuvantamiselle ovat muun muassa hedelmän kypsymisen arviointi, erilaisten vaurioiden havaitseminen, kivien havainnointi kirsikoista ja pilaantumisen arviointi. (Amigo, Martí ja Gowen 2013)

Eri tutkimuksen ja teollisuuden aloilla hyödynnetään hyperspektrikuvantamista usein hyvin samantapaisista syistä. Tutkittavasta kohteesta saa todella paljon dataa; jokaisen pikselin koko spektri saadaan mitattua. Kun tähän dataan sovelletaan erilaisia matemaattisia algoritmeja, voidaan saada selville suuri määrä eri ominaisuuksia, kuten pinnanmuodot, koostumus, eri aineiden pitoisuudet, vauriot ja niin edelleen. Lisätuna hyperspektrikuvantamisessa on se, että itse kuvaaminen on suhteellisen nopeaa eikä vahingoita näytettä millään tavalla. Tämän takia on ymmärrettävää, että hyperspektrikuvantamista halutaan soveltaa eri aloilla heti kun teknologia mahdollistaa sen.

## **2.2 Ohutpinnoitekalvojen käyttökohteita**

Ohutkalvojen paksuudet ja valmistustavat vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Vanhempia käyttötarkoituksia on ollut esimerkiksi peilien valmistus ja koristeelliset pinnoitteet. Esimerkiksi erilaisissa lasiesineissä voidaan käyttää pinnoitteita, joilla on heijastusta ehkäiseviä ominaisuuksia mahdollistaen hyvän transmission ja täten halutun värin lasiin. Kalvon paksuudet vaihtelevat noin 500 nm:sta yli mikrometriin. (Du ja He 2012)

Nykyään menetelmien kehityttyä käyttötarkoitukset ovat laajentuneet. Avaruustutkimuksessa ohutpinnoitekalvoja käytetään usein lämpösuojina raketeissa. Niiden avulla saadaan suojattua ympäröivät järjestelmät polttoainesuihkulta. Suojat toimivat heijastamalla ylimääräisen lämmön avaruuteen. Lämpöeristyskäyttöön on tutkittu oksidi- ja karbiittipohjaisia ohutkalvoratkaisuja sekä SiO<sub>2</sub>-pohjaisia ohutkalvoja. Reddy et al. vuonna 2013 julkaistussa tutkimuksessa käytettyjen kalvojen paksuudet olivat noin 925 nm sekä 1000 nm. (Reddy ym. 2013)

Aurinkoenergiatuotannossa valosähköiset ohutkalvot ovat ohittaneet muut valosähköiset moduliratkaisut 2000-luvun alussa. Ohutkalvoteknologiat ovat hinta-laatusuhteeltaan selvästi Pii-kristallipohjaisia teknologioita parempia. Ohutkalvojen paksuudet ovat näissä sovelluksissa parin kymmenen  $\mu\text{m}$ :n luokkaa. (Fried 2014)

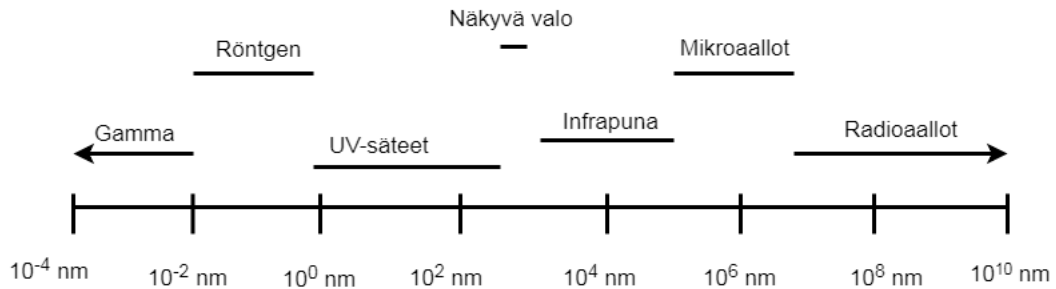
## **2.3 Koeasetelmissa esiintyvät fysikaaliset ilmiöt**

Tässä luvussa annetaan lyhyt kuvaus elektromagneettisesta spektristä ja kuvataan koeasetelman kannalta oleelliset fysikaaliset ilmiöt.

### **2.3.1 Elektromagneettinen spektri**

Elektromagneettinen spektri jakautuu aallonpituuksien mukaan eri alueisiin. Pienimmällä alueella sijaitsevat gammasäteet, joiden aallonpituudet ovat korkeintaan 0.01 nm. Seuraavana ovat röntgensäteet, joiden aallonpituudet vaihtelevat 0.01 - 1 nm. Ultraviolettivalon aallonpituudet ovat välillä 1 - 400 nm. Näkyvän valon alue käsittää vain pienen osan koko elektromagneettisesta spektristä ja alkaa 400 nm:stä, joka vastaa violettia väriä ja jatkuu punaiselle aallonpituudelle 780 nm:iin. Näkyvän valon alueen jälkeen on infrapunalue, joka voidaan edelleen jakaa kolmeen osaan: lähi-infrapuna (780 nm - 2500 nm), keski-infrapuna (2500 nm - 10  $\mu\text{m}$ ) ja kaukoinfrapuna (10  $\mu\text{m}$  - 1 mm). Infrapuna-alueen jälkeen tulee mikroaaltoalue (1 mm - 10 cm) ja viimeisenä radioaaltojen alue (10 cm ja suuremmat aallonpituudet). Hyperspektrikuvantamisessa mitataan elektromagneettisen spektrin intensiteettiä näkyvän valon ja lähi-infrapun aallonpituuksilla.

Kuvio 1: Elektromagneettinen spektri



Elektromagneettisen spektrin eri aallonpituusalueet

### 2.3.2 Valon absorptio ja transmissio

Yksittäisen valonsäteen osuessa mihin tahansa aineeseen tapahtuu yksi kolmesta vaihtoehdosta: valonsäde heijastuu takaisin, se kulkee aineen läpi, tai aine absorboi sen muuttaen valonsäteen lämpöenergiaksi. Normaalisti valo sisältää useita aallonpituuksia, joista aine absorboi osan, heijastaa osan ja loput transmittoituvat aineen läpi. Transmissiossa valon absorboitumista aineeseen kuvaa Beer-Lambertin laki, jonka mukaan absorboituminen riippuu aineen paksuudesta ja aineen absorptiivisuudesta. Beer-Lambertin laki voidaan kirjoittaa seuraavaksi kaavaksi:

$$A = -\log_{10} \left( \frac{I_{det}}{I_{inc}} \right) = abc \quad (2.1)$$

missä  $A$  on aineen absorbanssi,  $I_{det}$  on valon mitattu intensiteetti,  $I_{inc}$  on valonlähteen intensiteetti,  $a$  on aineen absorptiokerroin,  $b$  valonsäteen kulkema matka aineessa eli aineen paksuus ja  $c$  absorboivan aineen konsentraatio (Swinehart 1962). Konsentraatiolla on merkitystä silloin, kun ollaan kiinnostuneita jostain tietyistä ainesosasta absorboivassa aineessa. Esimerkiksi kemiassa spektrikuvantamista voidaan käyttää mitattaessa eri aineiden konsentraatioita liuoksessa. Koska tässä tutkimuksessa tarkastellaan koko absorboivaa ainetta, on konsentraatio 1. Täten kaava supistuu seuraavaan muotoon:

$$A = -\log_{10} \left( \frac{I_{det}}{I_{inc}} \right) = ab \quad (2.2)$$

Kun näytteessä on useampi kerros absorboivia materiaaleja, absorptiot ovat kumulatiivisia:

$$A = \sum_{i=1}^n A_i, \text{ missä } n \text{ on absorboivien materiaalien määrä.} \quad (2.3)$$

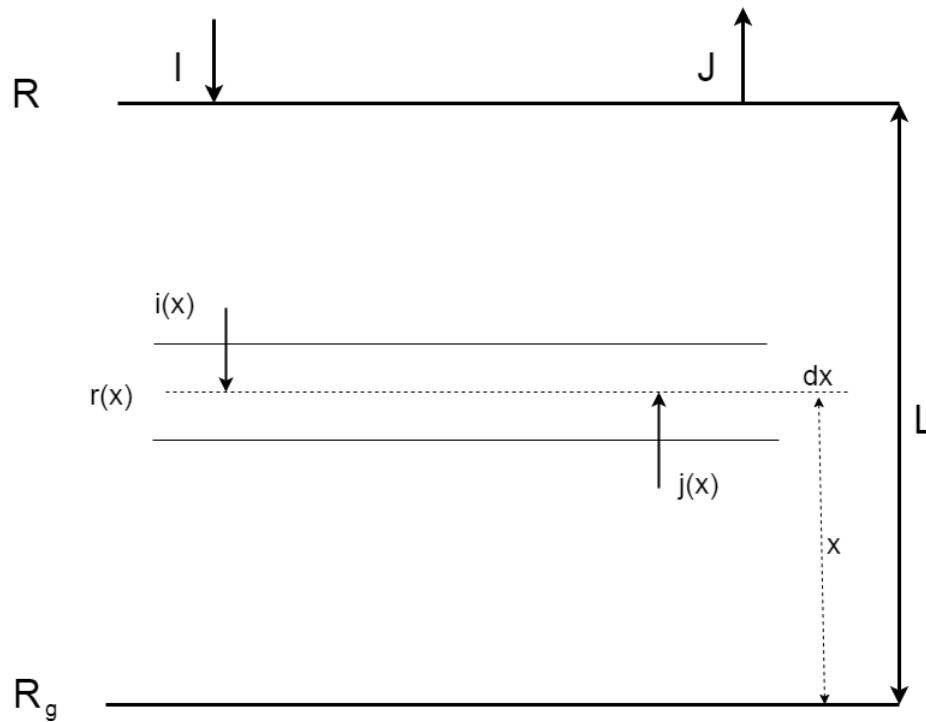
On huomioitava, että kaava pätee sellaisenaan vain monokromaattiselle valonsäteelle eli sellaiselle valolle, jossa esiintyy vain yhtä aallonpituutta. Pinnoitteen paksuus pysyy samana, mutta absorptiokerroin vaihtelee aallonpituuden funktiona. Absorptiokerroin on siis vektori, jossa on yhtä monta arvoa kuin mitattuja aallonpituuksia.

### 2.3.3 Reflektanssi

Reflektanssilla tarkoitetaan valon heijastumista aineesta. Kubelka ja Munk kehittivät mallin, joka kuvaa reflektanssia tapauksessa, jossa valo kulkee absorboivan aineen läpi ja heijastuu aineen alla olevasta taustamateriaalista takaisin (Kubelka ja Munk 1931). Malli kehitettiin alunperin ohuille maalikerroksille, mutta se soveltuu myös paperille. Mallia onkin käytetty paperiteollisuudessa paljon, koska se on selkeä, helppokäyttöinen ja riittävän tarkka (Džimbeg-malčić, Barbarić-mikočević ja Itrić 2011). Kubelka-Munkin mallia on käytetty myös muun muassa maalausten analysointiin (Kirchner ym. 2018), soveltavassa fysiikassa (Fischer ym. 2012), puuteollisuudessa (Huang ym. 2012) ja vaateteollisuudessa (Senthilkumar, Selvakumar ja Shamey 2011).

Kaaviossa  $R$  kuvaa näytteen reflektanssia ja  $R_g$  taustamateriaalin reflektanssia, jonka tulee olla tunnettu.  $I$  kuvaa näytteeseen kohdistetun valon intensiteettiä ja  $J$  näytteestä heijastuneen valon intensiteettiä.  $L$  on näytteen kokonaispaksuus. Näyte on jaettu joukkoon samanpaksuisia kaistaleita  $dx$ . Yksittäiseen kaistaleeseen osuu ylhäältäpäin valo intensiteetillä  $i$  ja alhaaltapäin valo intensiteetillä  $j$ . Absorption ja sironnan takia sekä  $i$  että  $j$  pienenevät. Toisaalta  $i$ :stä sironnut valo voimistaa  $j$ :tä ja päinvastoin. (Kubelka ja Munk 1931)

Kuvio 2: Kubelka-Munk -malli reflektanssille



Kubelka-Munk -mallissa pätevät seuraavat oletukset:

1. Näytteellä on rajattu paksuus, mutta ääretön pituus ja leveys, joten näytteellä ei ole reunoja, jotka vaikuttavat tulokseen.
2. Näytteen valaistus on tasainen ja homogeeninen.
3. Ainoastaan valon absorptio sekä sironta otetaan huomioon. Polarisaatiota ja fluoresenssia ei oteta huomioon.
4. Näyte on isotrooppinen ja homogeeninen.
5. pinnoista aiheutuvia heijastuksia ei tapahdu.
6. Näytteen absorptiokerroin sekä sirontakerroin ovat riippumattomia näytteen paksuudesta.

(Džimbeg-malčić, Barbarić-mikočević ja Itrić 2011)

Kubelka-Munkin mallissa reflektanssi määritellään samaan tapaan kuin transmissio Beer-Lambertin laissa eli



$$R = \frac{J}{I}$$

Toisaalta reflektanssi määrittyy Kubelka-Munkin mallissa näytteen absorptiokertoimen  $K$ , sirontakertoimen  $S$ , paksuuden  $L$  ja taustamateriaalin reflektanssin  $R_g$  avulla kaavalla

$$R = \frac{1 - R_g[a - b \cdot \coth(bSL)]}{a - R_g + b \cdot \coth(bSL)} \quad (2.4)$$

Kaavan termit  $a$  ja  $b$  määritellään seuraavasti:

$$a = \frac{S + K}{S}, b = \sqrt{a^2 - 1} \quad (2.5)$$

(Džimbeg-malčić, Barbarić-mikočević ja Itrić 2011)

#### 2.3.4 Sirontakertoimen määrittely

Kubelka-Munkin mallissa esiintyvän sirontakertoimen määrittely voi olla hankalaa. Sitä voidaan kuitenkin estimoida aallonpituuden funktiona. Jacques summasi eri ihmiskudosten sirontakertoimen parametrien  $a_s$  ja  $b_s$  avulla siten, että parametrit määrittävät sirontakäyttämisen aallonpituuden vaihdellessa (Jacques 2013).

Jacques sovitti kirjallisuudesta keräämänsä datan sirontakertoimeen kaksi funktiota

$$s = a_s \left( \frac{\lambda}{500(nm)} \right)^{-b_s} \quad (2.6)$$

ja

$$s(\lambda) = a'_s \left( f_{Ray} \left( \frac{\lambda}{500(nm)} \right)^{-4} + (1 - f_{Ray} \left( \frac{\lambda}{500(nm)} \right)^{-b_{Mie}}) \right) \quad (2.7)$$

Yhtälössä 2.6 aallonpituus  $\lambda$  normalisoidaan referenssiaallonpituudella 500 nm. Saatu arvo korotetaan potenssiin  $-b_s$ , joka kuvaa  $s$ :n riippuvuutta aallonpituudesta. Tekijä  $a_s$  on yhtälön  $s(\lambda = 500nm)$  arvo, mikä skaalaa aallonpituudesta riippuvan termin.

Yhtälössä 2.7 sironnan riippuvuus aallonpituudesta on kuvattu Rayleigh'n ja Mien sironnan summana. Tekijä  $a'_s$  on yhtä kuin  $s(\lambda = 500nm)$ . Rayleigh'n sironta on  $a' f_{Ray}(\lambda/500nm)^{-4}$  ja Mien sironta on  $a'_s(1 - f_{Ray})(\lambda/500nm)^{-b_{Mie}}$ .

Jacques'in mukaan yhtälöt 2.6 ja 2.7 ovat yhtä hyviä mallintamaan sirontaa aallonpituusalueella 400-1300 nm, mutta tämän alueen ulkopuolella yhtälöt erkanevat.

### 2.3.5 Kubelka-Munkin mallin rajoitukset

Kubelka-Munkin mallia on käytetty laajasti esimerkiksi paperiteollisuudessa mallin yksinkertaisuuden vuoksi. Mallin yksinkertaisuus asettaa sille kuitenkin tiettyjä rajoituksia sekä tarkkuuden että soveltuvuuden suhteen.

Vargas ja Niklasson vertasivat Kubelka-Munkin mallia tilanteessa, jossa näyte valaistetaan kohtisuoralla kollimoidulla valolla hajotetun valon sijaan. He vertasivat Kubelka-Munkin mallia nelifluksimalliin (Maheu, Letoulouzan ja Gouesbet 1984), jonka soveltaminen on vain hieman hankalampaa, mutta on havaittu hyvin tarkaksi. Kollimoidun valon tapauksessa Kubelka-Munkin malli osoittautui hyväksi tapauksissa, joissa on optisesti tiheä kalvo, joka sisältää heikosti absorboivia keskisuuria partikkeleita. Jos kalvo sisältää todella pieniä partikkeleita, Kubelka-Munkin malli soveltuu vain, jos kalvon reflektanssi on pieni ja partikkelit ovat vahvasti absorboivia. (Vargas ja Niklasson 1997)

Yang, Zhu ja Pan tutkivat Kubelka-Munkin mallin kanssa esitettyä oletusta, jonka mukaan seoksen, jossa on useampia väriaineita, eri väriaineiden absorptio- ja sirontakertoimet olisivat additiivisia. He havaitsivat, että väriaineen konsentraation kasvaessa  $K$  kasvaa, mutta  $S$  pienenee. Tämä merkitsee sitä, että  $K$ :n ja  $S$ :n arvot on määritettävä jokaiselle tutkittavalle aineelle, eikä aineista voi välttämättä kerätä viitearvoja. (Yang, Zhu ja Pan 2010)

Alkuperäinen oletus Kubelka-Munkin mallissa oli, että hajaantuneen valon tapauksessa vakiot  $K$  ja  $S$  määritellään absorptiokertoimen  $a$  ja sirontakertoimen  $s$  avulla seuraavasti:

$$S = s, K = 2a \quad (2.8)$$

Kaavan 2.8 mukaan  $S$  ja  $K$  ovat lineaarisessa suhteessa näytteen fyysisten ominaisuuksien kanssa. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että näin ei ole. Yang, Kruse ja Micklavcic esittivät kolmiosaisessa artikkelissaan mallista muokatun version, jolla he pyrkivät ratkaisemaan tämän ongelman. Heidän mallissaan otetaan huomioon  $S$ :n ja  $K$ :n keskinäiset riippuvuudet (Yang ja Kruse 2004, Yang, Kruse ja Miklavcic 2004 ja Yang ja Miklavcic 2005).

Yang ja Kruse nostavat esiin alkuperäisen Kubelka-Munkin mallin virheelliset oletukset. Virheen havainnollistamiseksi he käyttivät värjättyä paperiliuskaa. Kubelka-Munkin mallin mukaan mustekerroksen reflektanssispektrin voi laskea hyödyntämällä musteen Kubelka-Munkin absorptiokerrointa  $K_i$ , sirontakerrointa  $S_i$  sekä mustekerroksen paksuutta  $z_i$ . Vastavasti paperin reflektanssispektrin voi laskea muuttujilla  $K_p$ ,  $S_p$  ja  $z_p$ . Kun muste on sekoitettu paperiin homogeenisesti, alkuperäisen Kubelka-Munkin mallista johdetun additiivisuussäännön mukaan värjätyn paperin Kubelka-Munk -kertoimet saadaan seuraavilla kaavoilla:

$$K_{ip}z_p = K_i z_i + K_p z_p \quad (2.9)$$

$$S_{ip}z_p = S_i z_i + S_p z_p \quad (2.10)$$

Reflektanssispektrit, jotka on laskettu Kubelka-Munkin mallilla soveltamalla kaavoja 2.9 ja 2.10, ovat kuitenkin kaukana oikeista mittaustuloksista. Yang ja Kruse pyrkivät korjaamaan alkuperäisen Kubelka-Munkin mallin ottamalla huomioon valon sironnan valonsäteen kulkiessa aineen läpi. Yangin ja Krusen mukaan Kubelka-Munkin mallissa ei oteta huomioon sitä, että valonsäteen kulkiessa aineen läpi kuljetun matkan pituus vaihtelee sironnan takia. He lisäsivät malliin sironnasta johtuvaa matkan vaihtelua kuvaavan termin  $\mu$ . Hajaantuneen valon tapauksessa kaavat 2.8 muuttuvat muotoon

$$S = \mu s, K = 2\mu a \quad (2.11)$$

Ylläolevassa kaavassa termi  $\mu$  määritellään aallonpituuden  $\lambda$  suhteen seuraavasti:

$$\mu(\lambda) = \begin{cases} (s(\lambda)/a(\lambda))^{1/2} & ,\text{kun } s(\lambda) \geq a(\lambda) \\ 1 & \text{muulloin} \end{cases} \quad (2.12)$$

Yang ja Kruse nimesivät  $\mu$ :n nimellä *scattering-induced-path-variation factor (SIPV)* eli sironnan aiheuttaman polun pituuden vaihtelun kerroin. (Yang ja Kruse 2004)

Kolmiosaisen artikkelinsa toisessa osassa Yang, Kruse ja Miklavcic laajensivat malliaan siten, että sitä voitaisiin soveltaa epähomogeenisissa medioissa eli esimerkiksi tapauksissa, joissa tutkitaan musteella värjättyä paperiarkkia, jossa muste on sekoittunut epätasaisesti paperiin (Yang, Kruse ja Miklavcic 2004). Tutkimusartikkelin viimeisessä osassa Yang ja Miklavcic yleistivät mallia siten, että mallin avulla pystyttiin kuvaamaan yleisemmin fotonin käyttäytymistä sakeassa mediassa (Yang ja Miklavcic 2005). Yangin, Krusen ja Miklavcicin mallin avulla alkuperäisen Kubelka-Munkin mallin termit  $K$  ja  $S$  saatiin sidottua tutkittavien aineiden oikeisiin fyysisiin ominaisuuksiin eli absorptiokertoimeen  $a$  ja sirontakertoimeen  $s$ .

### 3 Koeasetelma

Tässä luvussa esitellään koeasetelma eli kamera, kuvantamisessa käytetyt asetukset, aineisto sekä kuvantamisemenetelmät. Pinnoitteena koeasetelmissa käytettiin Scotch® Magic™ Tape 810 -teippiä, jonka kokonaispaksuus on  $60 \mu\text{m}$ .

Tutkimuksessa käytetyt kuvat otettiin Jyväskylän yliopiston JyU Modular Spectral Imager Prototype V2 -kameralla. Spektrin voimakkuutta mitattiin 133 eri aallonpituudelta. Pienin aallonpituus oli 456 nm ja suurin 840 nm. Jokaiselle kuvan pisteelle mitattiin siis 133 eri spektrin voimakkuuden arvoa.

Tutkimuksessa keskityttiin seuraamaan näytteen absorboimasta valosta johtuvaa spektrin muutosta. Kaikkein ohuimmissa ohutkalvoissa eli sellaisissa, joiden paksuudet ovat samaa luokkaa valon aallonpituuden kanssa, valon spektrin muutos ei johdu niinkään absorptios- ta vaan interferenssistä. Tämän vuoksi käytetyt menetelmät eivät sovellu yleisesti kaikkiin ohutkalvoihin. Esimerkkeinä ohutkalvointerferenssistä ovat sateenkaarikuviot saippuakuplan tai vedessä kelluvan öljykerroksen päällä.

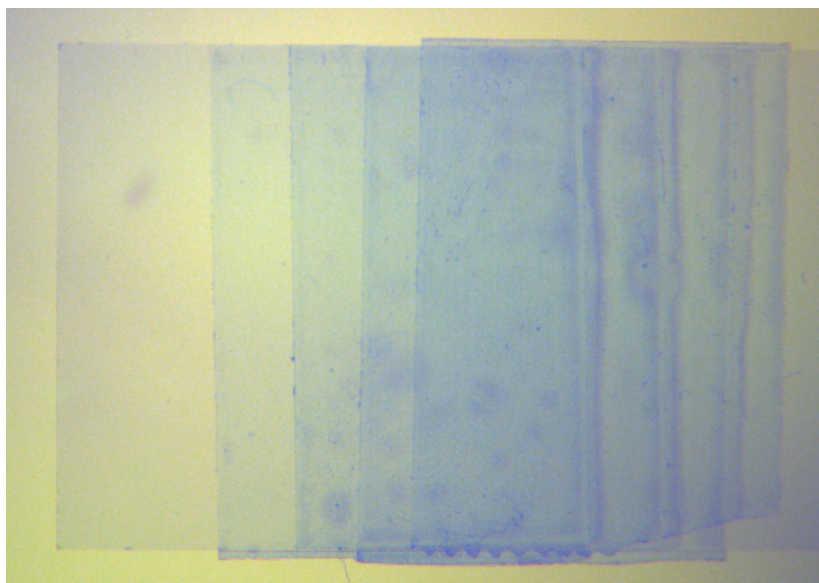
#### 3.1 Transmissiokuva

Ensimmäisessä koeasetelmassa kuvattiin pinnoite siten, että valonlähde sijoitettiin näyte- kappaleen alle, jolloin se kulkeutui näytteen läpi kameraan. Lisäksi otettiin yksi kuva ilman näytettä, jotta saatiin valonlähteen spektri mitatuksi.

Kuviossa 3 näkyy transmissiokuvan koeasetelma. Näytteessä on 1 mm paksuisen lasilevyn päälle liimattu teippinaloja siten, että teipit ovat levyssä kerroksittain. Kuvasta näkyy vasem- malta oikealle katsottuna pelkkä lasilevy, 1 teippikerros, 2 teippikerrosta, 3 teippikerrosta ja paksuimmassa kohdassa 4 teippikerrosta. Vastaavasti teippikerrosten paksuudet vähenevät tästä oikealle siirryttäessä.

Itse teipissä on jonkin verran epäpuhtauksia. Nämä näkyvät kuvassa tummempina pistei- nä. Lisäksi teippikerrosten oikeat puolet menevät alapuolisten kerrosten yli, mikä aiheuttaa pienen kaarevuuden teipissä. Kaarevuus on kuitenkin selvästi silmin havaittavissa. Häiriöt

Kuvio 3: Transmissiokuva



Kuvassa lasilevyyn liimattu neljä teipinpalaa, jotka on asetettu limittäin niin, että kuvasta erottuu yhdestä neljään päällekkäistä teippikerrosta.

kuvassa aiheuttavat selkeää laskennallista poikkeamaa sekä teipin absorptiokerrointa, että teipin paksuutta laskettaessa. Täten on ehdottoman tärkeää etsiä kuvasta puhtaat alueet mahdollisen tarkkojen tulosten saamiseksi.

Valon kulkua havainnollistava kaavio on kuviossa 4. Transmissiokuvassa valo kulkee siis ensin lasilevyn ja sitten teipin läpi. Näytteen absorptio on kumulatiivinen eli  $A_{tot} = A_l + A_t$ , missä  $A_{tot}$  on näytteen kokonaisabsorbanssi,  $A_l$  lasilevyn absorbanssi ja  $A_t$  teipin absorbanssi. Sijoittamalla  $A_l = a_l l_l$  ja  $A_t = a_t l_t$  saadaan teipin absorptiokerroin  $a_t$  kaavalla

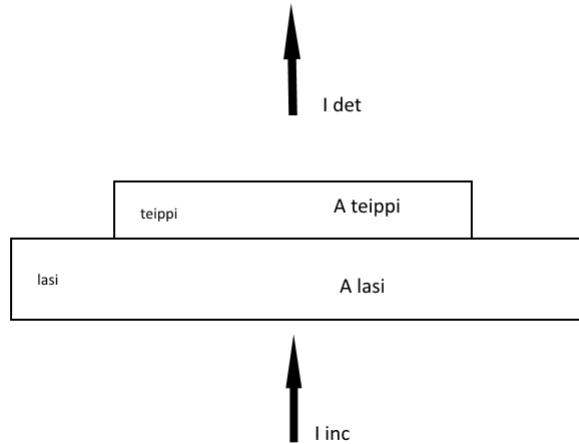
$$a_t = (A_{tot} - l_l \cdot a_l) / l_t \quad (3.1)$$

ja vastaavasti teipin paksuus  $l_t$  kaavalla

$$l_t = (A_{tot} - l_l \cdot a_l) / a_t \quad (3.2)$$

Lasin absorptiokerroin saadaan laskettua tarkastelemalla absorptiota sellaisesta kuvan koh-

Kuvio 4: Valon kulku transmissiokuvassa



Transmissiokuvassa valonlähde on sijoitettu näytteen alapuolelle siten, että valo kulkee lasin ja teipin läpi kameraan. Lasi ja teippi absorboivat osan valosta.

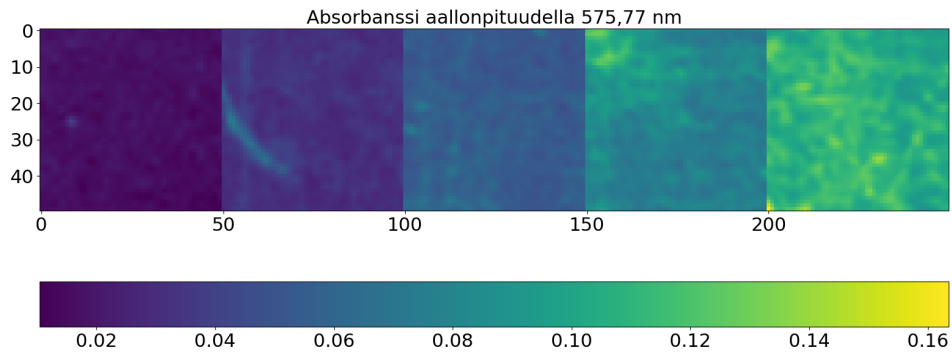
dasta, jossa teippiä ei ole. Tällöin lasin absorptiokerroin saadaan laskettua tarkasti ratkaisemalla  $a_l$  kaavasta  $A_l = a_l l_l$ .

Teipin absorptiokertoimen laskemiseksi valittiin kuvasta alueita, joiden spektristä absorptiokerroin laskettiin. Kuvasta valittiin yhteensä viisi aluetta ( $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ ) siten, että alueella  $a_0$  oli pelkästään lasia ja alueilla  $a_1 - a_4$  päällekkäisiä teippikerroksia 1 – 4 kappaletta. Alueen  $a_0$  avulla laskettiin lasin absorptiokerroin. Vastaavasti alueilta  $a_1 - a_4$  laskettiin teipin absorptiokerroin, joka sitten keskiarvoistettiin. Valittujen alueiden absorptiot aallonpituudella 575,76 nm näkyvät kuviossa 5. Kuviossa alue  $a_0$  on vasemmalla ja  $a_4$  oikealla. Laskettujen absorptiokertoimien kuvaajat ovat kuviossa 6.

Absorptiokerrointen käyrissä on havaittavissa selvää vaihtelua käyrien loppupäässä aallonpituusalueilla 742 – 840 nm. Vaihtelu näillä alueilla on niin voimakasta, että se voidaan selvästi tulkita virheeksi datassa. Täten lopullisessa laskennassa hyödynnettiin aallonpituusaluetta 460 – 740 nm.

Teipin absorptiokerroin laskee melko tasaisesti aallonpituuden kasvaessa. 540 – 610 nm:n

Kuvio 5: Transmissiokuvasta poimittujen alueiden absorbanssit



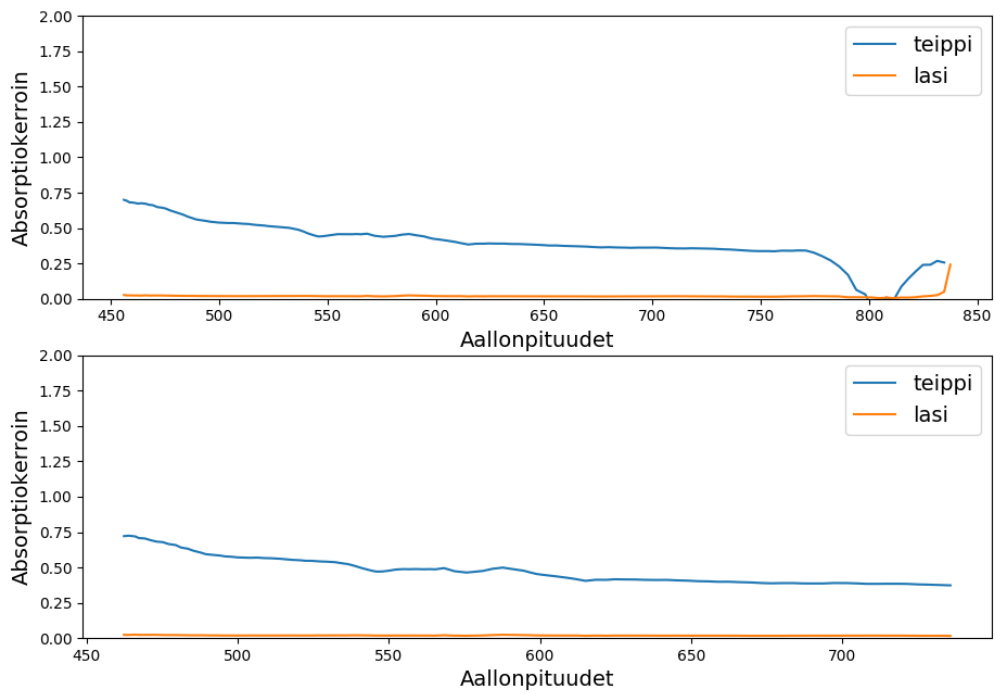
Alueilla vasemmalta oikealle luettaessa 0, 1, 2, 3 ja 4 teippikerrosta.

alueella tapahtuu pientä vaihtelua. Vaihtelu on kuitenkin niin vähäistä, ettei ole syytä olettaa datassa olevan enempää tuloksiin huomattavasti vaikuttavia virheitä. Lasin absorptiokerroin pysyy hyvin lähellä nollaa lähes koko mittausalueella. Absorptiokerroin on itse asiassa niin matala, ettei lasin absorboima valo juurikaan vaikuta mittaustulokseen, ja se voitaisiin hyvin jättää huomioimatta.

Teipin paksuuksia laskettiin sijoittamalla kaavaan 3.2 kuvan eri kohdista laskettuja absorptiospektrejä sekä teipin absorptiokerroin. Mittauskohdat valittiin kuvion 3 vasemmalta puolelta siten, että jokaisen teippikerroksen kohdalta valittiin yksi alue. Transmissiokuvasta laskettiin myös toinen joukko paksuuksia. Nämä joukot valittiin kuvan oikeassa reunassa näkyvistä kerroksista. Lasketut paksuudet on kuvattu kuviossa 7.

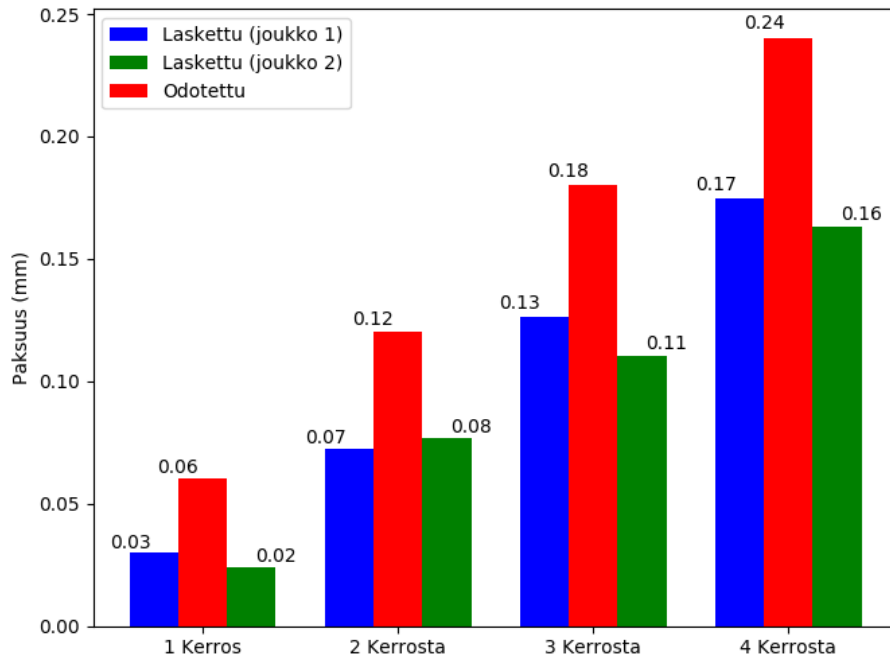


Kuvio 6: Teipin ja lasin absorptiokertoimet



Kuvio 6. Ylemmässä kuvaajassa on koko aallonpituusalue. Alemmasta kuvaajasta on pienimmät ja suurimmat aallonpituusalueet jätetty pois.

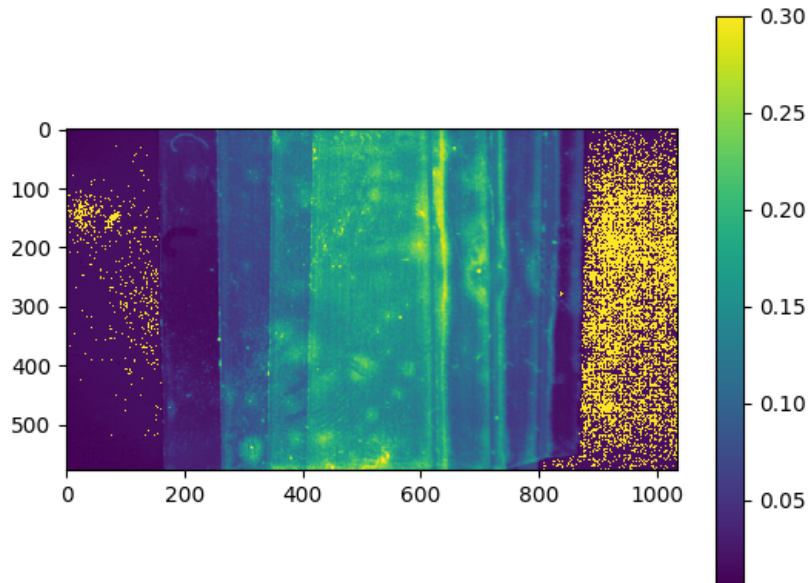
Kuvio 7: Teipin paksuudet



Pylväsjoukoissa sininen pylväs kuvaa alueista  $a1 - a4$  laskettuja paksuuksia ja vihreä pylväs kuvan oikeasta laidasta valituista vastaavista alueista laskettuja paksuuksia. Punainen pylväs kuvaa teipin todellista paksuutta.

Kuvion 7 mukaan teippikerrosten lasketut paksuudet jäävät selvästi alle todellisen paksuuden. Yhden teippikerroksen kohdalla laskettu paksuus on vain puolet todellisesta paksuudesta. Kahden kerroksen kohdalla paksuus on vain noin kaksi kolmasosaa todellisesta paksuudesta. Kolmen ja neljän kerroksen kohdalla lasketut paksuudet ovat noin kolme neljäsosaa todellisesta paksuudesta. Koeasetelmassa oli useita epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä, jotka osaltaan selittävät tämän. Lasilevyn ja teipin paksuuksia ei mitattu erikseen, vaan käytettiin valmistajan ilmoittamia paksuuksia, jotka ovat kuitenkin vain likiarvoja oikeista paksuuksista. Kuvion 5 alueissa on silminnähden havaittavia epäpuhtauksia. Teoreettisissa olosuhteissa absorptio tietyllä aallonpituudella on aina sama mutta käytännössä näin ei selvästikään ole. Koska teipin absorptiokerroin laskettiin transmissiokuvan perusteella, on selvää, että teipin epäpuhtaudet vaikuttavat laskettuun absorptiokertoimeen ja sitä kautta myös itse paksuus-

Kuvio 8: Teipin paksuus (mm)



Transmissiokuvan paksuudet millimetreinä. Kuvan reunoilla olevilla alueilla näkyy paljon häiriötä.

laskuihin. Lasketuissa paksuuksissa tapahtuu kuitenkin selkeä muutos teippikerrosten lukumäärän vaihtuessa, mikä on havaittavissa kuviosta 8, jossa on kuvattuna teipin paksuudet laajemmalla alueella. Epäpuhtauksien vaikutus paksuuden laskentaan näkyy kuvassa selvästi.

### 3.1.1 Transmissiokuvan tulokset

Koska lasilevyn ja teipin absorptiokertoimia ei ollut saatavilla valmiiksi, oli ne laskettava suoraan kuvasta. Saadut kertoimet ovat laskutavasta johtuen keskiarvoja oikeiden arvojen likiarvoista. Lisäksi epäpuhtaudet sekä teipissä että lasissa vaikuttivat tarkkuuteen. Laskettaessa paksuutta näillä likiarvoilla saavutettiin jälleen likiarvoistettuja tuloksia, mikä selittää tulosten epätarkkuutta. Absorptiokertoimen tunteminen mahdollisimman tarkasti tutkittavalle aineelle on siis ensiarvoisen tärkeää paksuuden mittaamisessa.

On myös huomioitava, että teipin valmistajan ilmoittama paksuus teipille on myös likiarvo. Tuotekuvauksessa mainitaan kaikkien teipin ominaisuuksien olevan testauksella määritettyjä keskiarvoja ja yksittäisen teippirullan ominaisuuksien arvot voivat hieman vaihdella näistä. Tämä tarkoittaa siis sitä, että odotusarvot, joihin laskennan tuloksia verrattiin, eivät välttämättä ole täysin oikeita.

## **3.2 Reflektanssikuvat**

Toisessa koeasetelmassa asetettiin valonlähde kameran puolelle siten, että se valaisi näytteen mahdollisimman kohtisuorasti. Tässä koeasetelmassa hyperspektrikameralla siis mitattiin näytteestä heijastuvaa valoa. Koeasetelma on transmissiokoetta monimutkaisempi. Transmissiokuvassa valo kulkee kertaalleen näytteen läpi kameraan. Reflektanssikuvassa näytteen läpi kulkee kaksi vastakkaista valofluksia, jotka paikoin vahvistavat ja paikoin heikentävät toisiaan. Koeasetelmassa tapahtuvaa ilmiötä on kuvattu luvussa 2.3.3 ja kaaviossa 2.

### **3.2.1 Mittauksessa käytetyt kuvat**

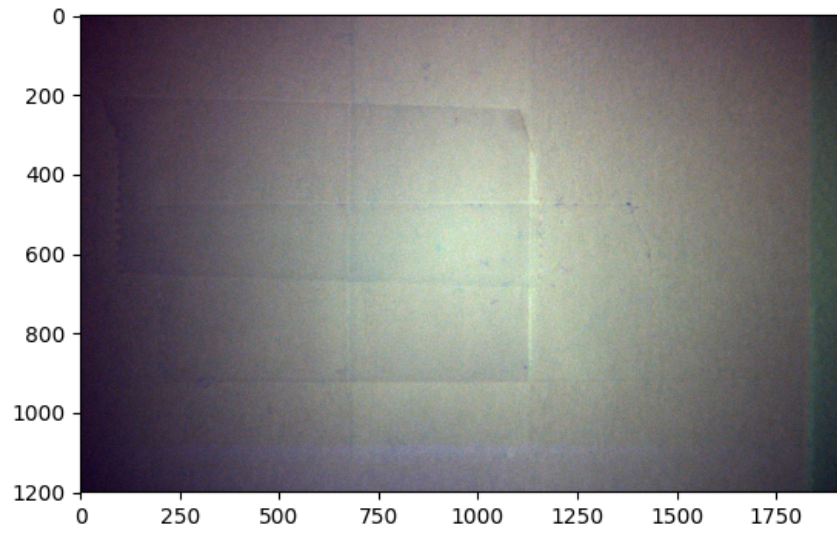
Reflektanssikuvat otettiin valkoiselle paperille liimatusta teipistä. Kuvattuja tapauksia oli neljä:

1. useampi päällekkäinen teippikerros, Kuvio 9
2. naarmu alemmassa teippikerroksessa, Kuvio 10
3. reikä pinnoitteessa, Kuvio 11
4. reikä alemmassa teippikerroksessa, Kuvio 12

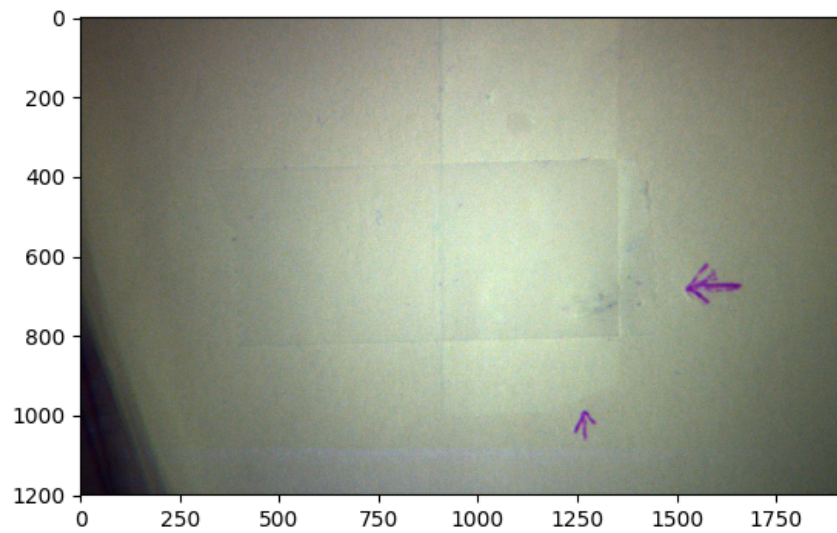
Kuvilla haluttiin saada mitattua teipin paksuus sekä tutkittua, miten erilaiset vauriot pinnoitteessa vaikuttavat mittaustulokseen. Lisäksi kuvattiin pelkkä paperi, jotta saatiin referenssi paperin heijastaman valon spektristä.

Kuviossa 9 kolme teippipalaa on aseteltu päällekkäin siten, että kuvasta on poimittavissa kohtia, joissa on yhdestä kolmeen päällekkäistä kerrosta. Tämä kuva toimii reflektanssimittausmenetelmän perustapauksena. Toisin sanoen mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät on pyritty kuvassa minimoimaan, jotta saadaan perusta itse mittausmenetelmän tarkkuudelle.

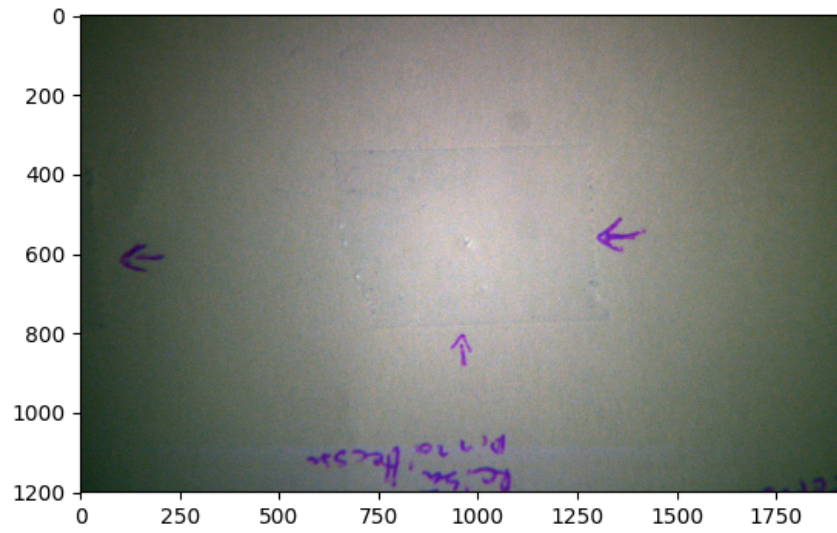
Kuvio 9: Teipinpaloja kerroksittain



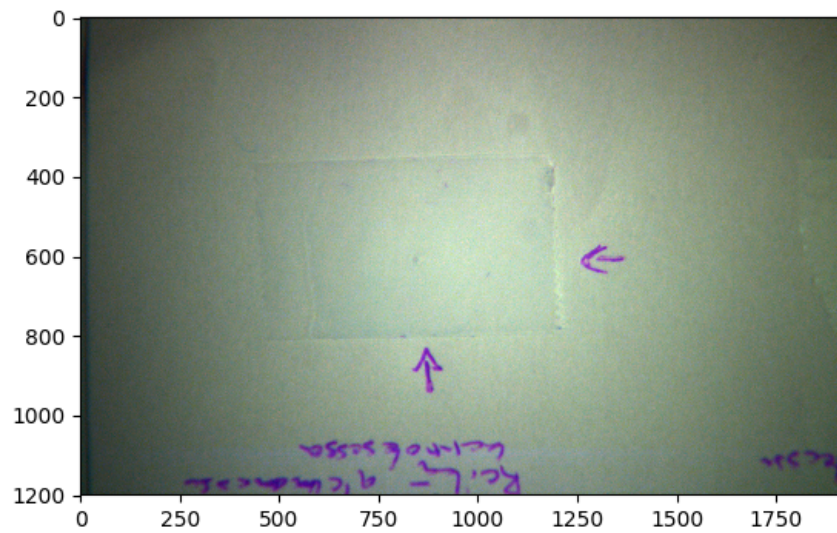
Kuvio 10: Naarmu pinnoitteen alla



Kuvio 11: Reikä pinnoitteessa



Kuvio 12: Reikä pinnoitteen alla



Kuviossa 10 on kaksi päällekkäistä teippikerrosta. Alempaan kerrokseen on tehty naarmuja, jotka ovat silmin havaittavissa. Päällimmäisempi teippikerros on ehjä. Kuviossa 11 on teippiin pistetty neulalla reikä. Kuviossa 12 on vastaava tilanne, mutta reiän päälle on asetettu ehjä teippikerros. Kuvioden 10, 11 ja 12 avulla oli tarkoitus selvittää, kuinka paljon erilaiset vauriot vaikuttavat mittaustarkkuuteen.

### **3.2.2 Teipin paksuuden mittaaminen**

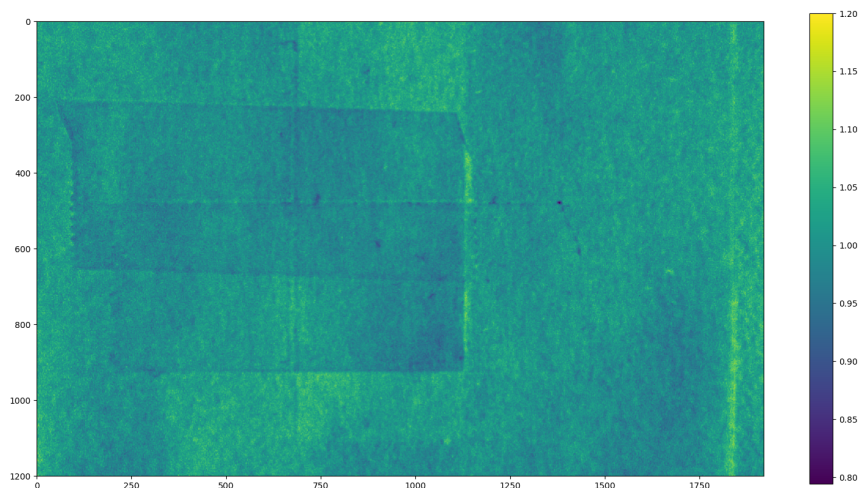
Teipin paksuuden laskentaan sovellettiin Kubelka-Munkin malliin pohjautuvia kaavaa 2.4, jossa heijastuneen valon spektri määritellään näytteen paksuuden, absorptiokertoimen sekä sirontakertoimen avulla, ja kaavaa 2.5, joka määrittelee kaavan 2.4 termit  $a$  ja  $b$ .

### **3.2.3 Sirontakertoimen generointi**

Sirontakertoimen generoimiseksi poimittiin kuviosta 9 reflektanssispektri alueilta, joista toisessa oli näkyvissä pelkkä paperi ja toisessa teippikerroksia. Kuvan reflektanssi aallonpituudella 561.35 nm näkyy kuviossa 13. Kuvasta valittiin kaksi aluetta, joista ensimmäisessä oli pelkkää paperia ja toisessa kolme päällekkäistä teippikerrosta. Valittujen alueiden keskiarvoistettuja reflektansseja käytettiin referenssinä sirontakertoimen määrittelyssä sekä paksuuslaskuissa.

Kaavan 2.4 mukaan näytteen paksuuden laskemiseen tarvitaan valon mitattu reflektanssi, näytteen absorptiokerroin sekä näytteen sirontakerroin. Reflektanssin laskemiseksi tarvitaan valonlähteen intensiteetti. Tätä ei kuitenkaan ollut reflektanssikuvassa saatavilla. Valkoinen tausta heijastaa takaisin suurimman osan valosta, joten valonlähteen intensiteetin määrittelyä otettiin referenssikuva pelkästä paperista ja valittiin referenssispektri samasta kohdasta kuin teippikuvasta otettu spektri. Paperin valkoinen väri johtuu siitä, että suurin osa valosta heijastuu takaisin, joten kuvaa voitiin käyttää valonlähteen intensiteetin likiarvona. Lasketun reflektanssin kuvaaja kolmen teippikerroksen kohdalta ja pelkän paperin kohdalta on piirretty kuviossa 14. Teippikerrosten reflektanssi on matalammilla aallonpituuksilla selkeästi paperin reflektanssia pienempi. Suuremmilla aallonpituuksilla reflektanssien ero on paljon pienempi.

Kuvio 13: Reflektanssi aallonpituudella 561.35 nm



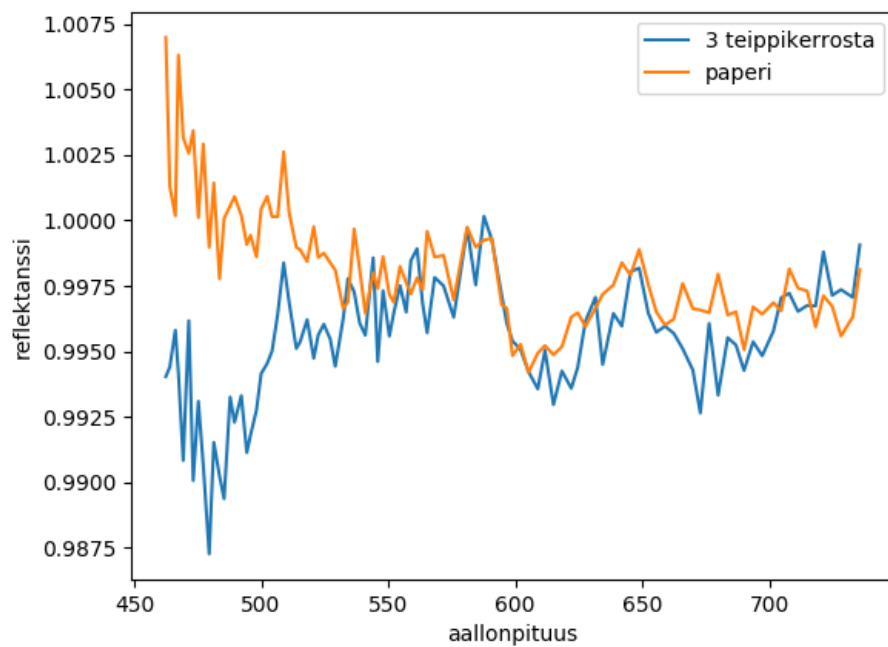
Teippikerrokset erottuvat kuvasta hieman tummempina alueina.

Teipin sirontakerroin arvioitiin soveltamalla kaavaa 2.6 sopivilla  $a$ :n ja  $b$ :n arvoilla. Kaava 2.6 valittiin, koska se on huomattavasti kaavaa 2.7 yksinkertaisempi. Kuvauksessa käytetyt aallonpituudet ovat välillä 400 - 1300 nm, jolloin molemmat kaavat soveltuvat yhtä hyvin.

Kubelka-Munkin mallista sovellettiin kahta eri variaatiota. Yksinkertaisemmassa mallissa (malli 1) termeihin  $K$  ja  $S$  sijoitettiin suoraan transmissiokuvasta laskettu absorptiokerroin sekä kaavalla 2.6 laskettu sirontakerroin. Kuten luvussa 2.3.5 kuitenkin todettiin, ei Kubelka-Munkin mallin termit  $S$  ja  $K$  vastaa suoraan sirontakerrointa  $s$  ja absorptiokerrointa  $a$ . Tämän vuoksi sovellettiin myös mallia, jossa aluksi määriteltiin luvussa 2.3.5 esitelty termi  $\mu$  absorptiokertoimen ja sirontakertoimen pohjalta. Tämän jälkeen laskettiin  $\mu$ :n avulla Kubelka-Munkin mallin muuttujat  $K$  ja  $S$  (malli 2). Koska molemmissa kaavoissa hyödynnettiin transmissiokuvasta laskettua absorptiokerrointa, rajattiin tarkasteltavat aallonpituudet samoiksi kuin transmissiokuvassa.

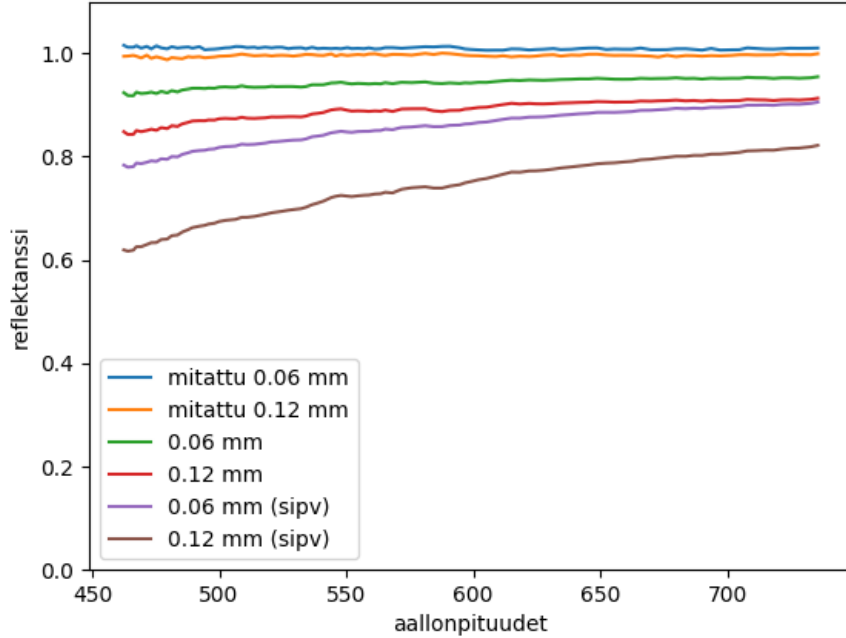


Kuvio 14: Reflektanssin referenssi



Reflektanssit eroavat toisistaan pienillä aallonpituuksilla, mutta ovat hyvin samansuuruiset yli 550 nm:n aallonpituuksilla.

Kuvio 15: Reflektanssikäyrät



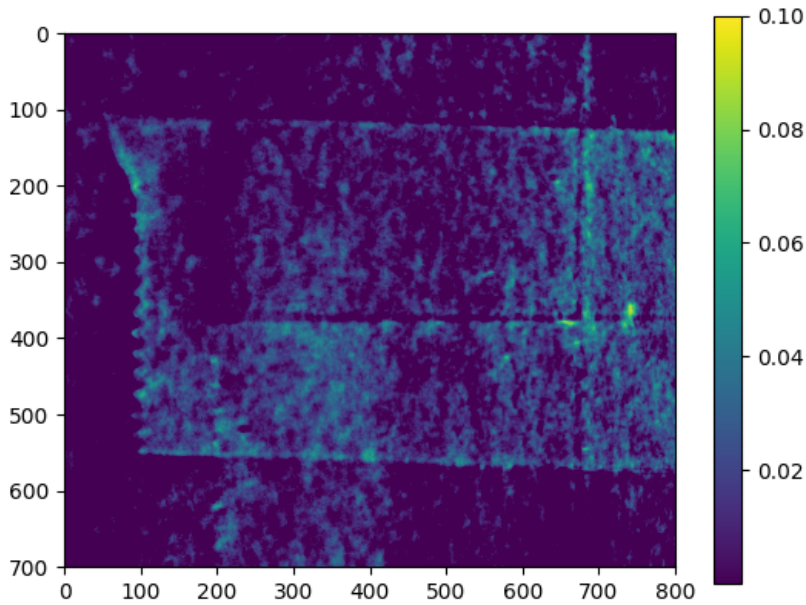
Optimoidut reflektanssit jäävät selvästi mitattuja reflektansseja pienemmiksi.

Sirontakertoimen generoinnissa hyödynnettiin differentiaalievoluutiota, jossa pyrittiin minimoimaan mitatun reflektanssin sekä Kubelka-Munkin mallin avulla generoidun reflektanssin erotuksen Frobenius-normia:

$$\|M\|_f = \sqrt{\sum_{i,j} |m_{i,j}|^2} \quad (3.3)$$

Optimoiduilla sirontakertoimilla generoidut reflektanssit ovat kuviossa 15. Käyrät lähestyvät toisiaan aallonpituuden kasvaessa. On kuitenkin selvää, että generoidut reflektanssit ovat huomattavasti liian pieniä. Varsinkin mallin 2 tuottama reflektanssi jää selkeästi mitattua reflektanssia pienemmäksi. Mallien tuottamat arvot  $S$  poikkeavat suuruudeltaan toisistaan huomattavasti. Mallin 1  $S$  pienenee matalimman aallonpituuden 0.0588:sta korkeimman aallonpituuden 0.0311:een. Mallissa 2 arvo  $S$  on matalimmalla aallonpituudella 5.459 ja korkeimmalla 2.922.

Kuvio 16: Paksuuskuva, malli 1

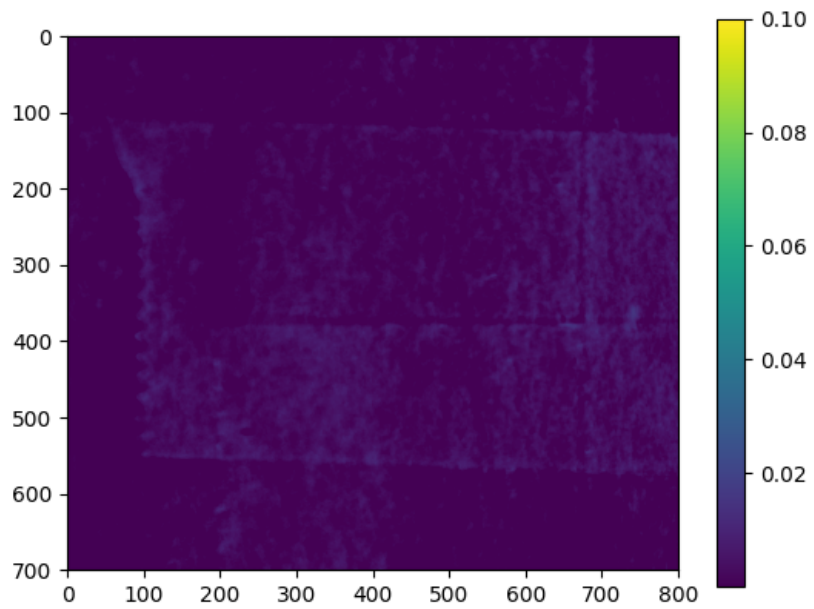


Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm.

Teipin paksuudet laskettiin soveltamalla optimoituja sirontakertoimia reflektanssin vasemmasta yläkulmasta poimittuun alueeseen, jossa oli näkyvillä nolhasta kolmeen teippikerrosta. Teipin paksuus vaihteli siis alueella 0 ja 0.18 mm:n välillä. Paksuudet optimoitiin samalla tavalla kuin sirontakertoimetkin eli minimoimalla generoidun ja mitatun reflektanssin erotusta differentiaalievoluutiota hyödyntämällä. Paksuus laskettiin jokaiselle valitun kuva-alueen pikselille erikseen. Mallilla 1 lasketut paksuudet näkyvät kuviossa 16 ja mallilla 2 lasketut paksuudet kuviossa 17.

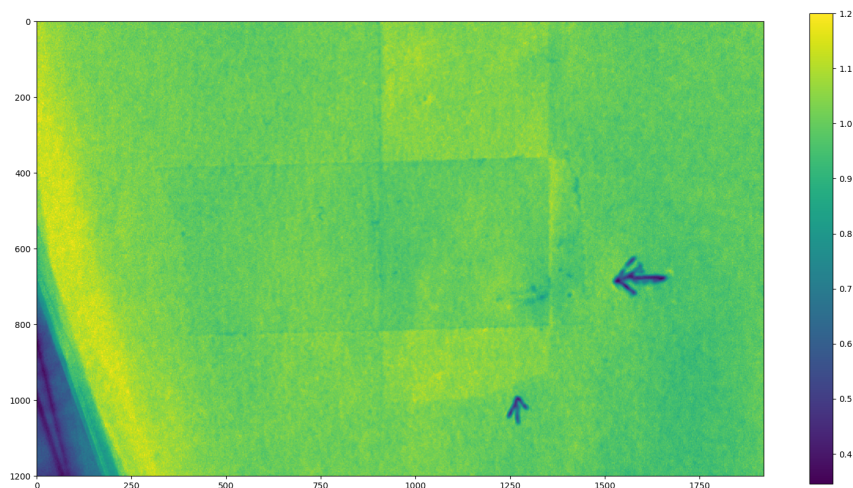
Paksuuskuville näkyy selkeästi vaaka- ja pystysuorat rajat, jotka jakavat teippikerrokset neljään alueeseen. Vasemmassa yläkulmassa olevalla alueella on yksi teippikerros, vasemmassa alakulmassa olevalla alueella kaksi kerrosta, oikeassa yläkulmassa olevalla alueella kaksi ja oikeassa alakulmassa olevalla alueella kolme teippikerrosta. Mallilla 1 generoidusta kuvasta kerrokset erottuvat suhteellisen hyvin toisistaan. Paksuudet jäävät kuitenkin selkeästi alle teipin todellisen paksuuden. Kolmen kerroksen kohdalla laskettu paksuus vaihtelee 0.02 mm:n ja 0.04 mm:n välillä. Todellinen paksuus on kuitenkin 0.18 mm:n luokkaa kolmen teippiker-

Kuvio 17: Paksuuskuva, malli 2



Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm.

Kuvio 18: Reflektanssikuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa

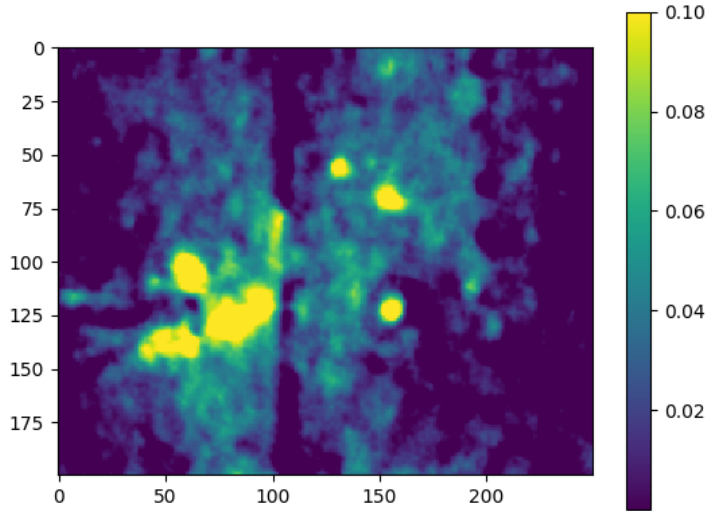


roksen kohdalla. Kuvasta ei erotu kunnolla edes teippikerrosten määrä. Mallilla 2 generoidusta kuvasta teippikerrokset erottuvat vielä paljon huonommin ja teipin paksuudet jäävät noin 10 kertaa mallia 1 pienemmiksi. Syitä mallien epätarkkuuksiin käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.4.

Reflektanssi kuvasta, jossa kahdesta päällekkäisestä teippikerroksesta alempaan oli tehty naarmuja näkyy kuviossa 18. Kuviossa erottuu reflektanssin laskentaan liittyvä ongelma paremmin kuin kuviossa 13. Reflektanssi on selkeästi suurempi kohdassa, jossa on yksi pystysuora kerros teippiä kuin kerroksen ympärillä. Kuvasta lasketut paksuudet alempaan kerrokseen tehdyn naarmun kohdalta ovat mallilla 1 kuviossa 19 ja mallilla 2 kuviossa 20.

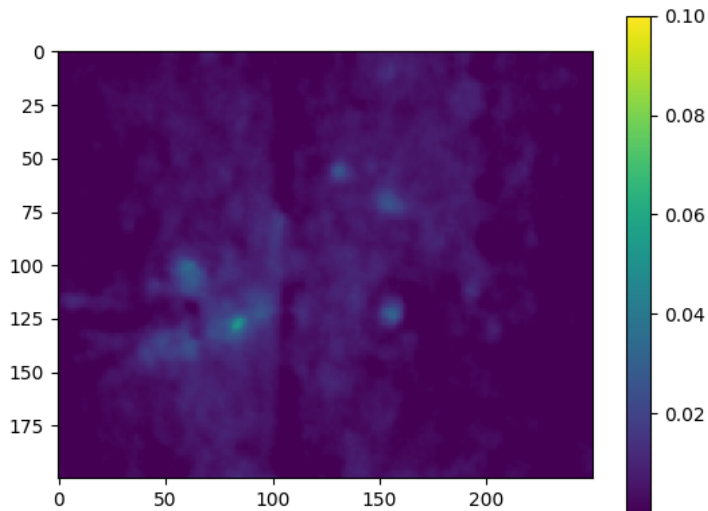
Myös toisessa kuvassa lasketut paksuudet jäävät selvästi teipin todellista paksuutta pienemmiksi. Mallissa 2 virhe on jälleen huomattavasti suurempi kuin mallissa 1. Mallissa 1 vaurio teipissä näkyy selvästi paksuuskuvasssa ympäristöä suurempana paksuutena. Lasketut paksuudet ovat kuitenkin myös mallissa 1 selkeästi todellista pienemmät. Poimitulla alueella teipin paksuus on 0.12 mm, mutta lasketut paksuudet nousevat ainoastaan vaurioiden kohdalla. Valitun alueen reunoilla vaikuttaisi laskelman mukaan olevan pelkästään paperia. Malli 1 vaikuttaa kuvien perusteella paljon mallia 2 tarkemmalta, joten paksuuslaskelmat kolman-

Kuvio 19: Paksuuskuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa (malli 1)



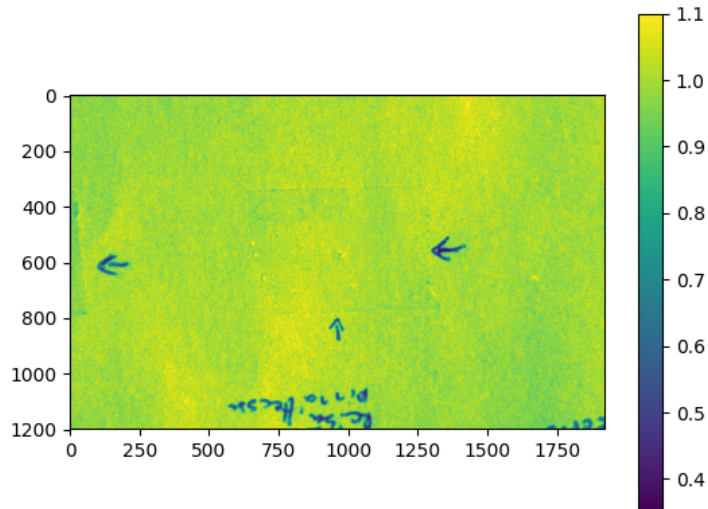
Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm. Koska vaurioitunut kohta ei heijasta valoa yhtä tehokkaasti kuin teippi, näyttävät vaurioituneet kohdat huomattavasti ehjiä kohtia paksummilta.

Kuvio 20: Paksuuskuva, naarmu alemmassa teippikerroksessa (malli 2)



Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm. Vauriotuneet kohdat erottuvat selvästi huonommin kuin kuvassa 19.

Kuvio 21: Reflektanssikuva, reikä teipissä



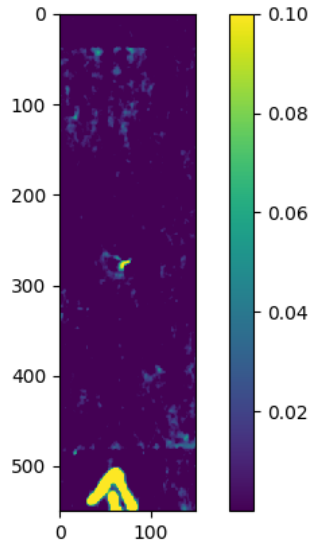
Kuvassa oleva yksittäinen teippikerros hädin tuskin erottuu kuvasta.

nesta ja neljännestä reflektanssikuvasta laskettiin ainoastaan mallilla 1.

Reflektanssi kolmannesta kuvasta, jossa teippikerrokseen on pistetty neulalla reikä, näkyy kuviossa 21. Teippi erottuu kuvasta todella heikosti. Ainoastaan teipin reunat erottuvat paremmin. Kuvasta poimittiin paksuuslaskentaan pystysuora kaistale siten, että kaistaleessa näkyvät sekä teippiin tehty reikä että teipin reunat. Lasketut paksuudet ovat kuviossa 22.

Kolmannen reflektanssikuvan paksuuslaskussa teippi ei juurikaan erotu taustamateriaalista. Kuvion 22 perusteella on vaikea todentaa, että kuvassa olisi yhtään teippikerroksia. Paksuuden arvot ovat kuvassa suurimmaksi osaksi hyvin lähellä nollaa ja nousevat vain siellä täällä hieman korkeammaksi jääden kuitenkin kauas oletusarvosta 0.06 mm. Teippiin pistetty reikä erottuu kuitenkin kuvasta jyrkkänä paksuuden nousuna.

Kuvio 22: Paksuuskuva, reikä teipissä



Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm. Teippi ei juurikaan erotu kuvasta. Teippiin pistetty reikä näkyy kuitenkin huomattavasti kirkkaampana pisteenä kuvasta.

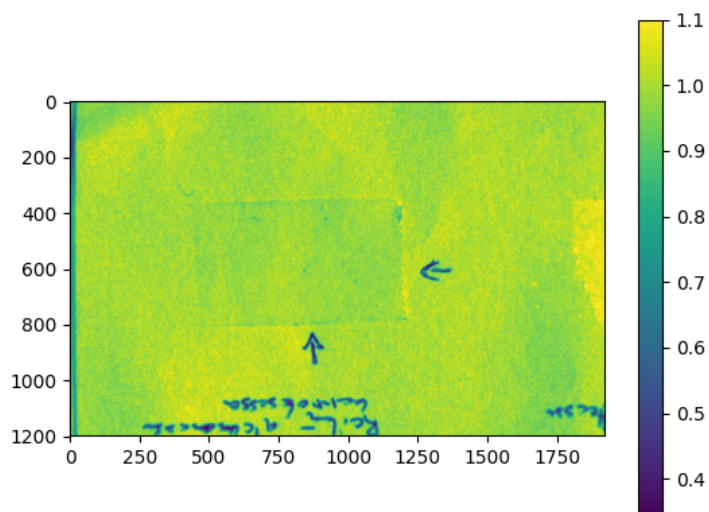
Neljännän kuvan reflektanssi näkyy kuviossa 23. Neljännessä kuvassa on siis kaksi päällekkäistä teippikerrosta, joista alempaan on pistetty neulalla reikä. Teippi erottuu kuvasta hie- man paremmin kuin kolmannessa kuvassa, koska teippikerros on paksumpi. Teipin paksuus laskettiin neliönmuotoiselta alueelta siten, että reikä tulee alueen keskelle. teippiä on kaksi päällekkäistä kerrosta koko valitulta alueelta. Lasketut paksuudet ovat kuviossa 24.

Neljännessä kuvasta lasketut teipin paksuudet jäävät muiden kuvien tavoin selvästi teippi- kerrosten todellista paksuutta pienemmäksi. Kuvassa olevien kahden teippikerroksen pak- suus on todellisuudessa noin 0.12 mm, mutta paksuusarvot ovat vain noin 0.02 mm:n suu- ruisia. Alempaan teippikerrokseen pistetty reikä näkyy kuitenkin selkeästi kuvasta, mikä on odotettavaa.

Teipin lasketut paksuudet jäävät transmissiokuvassa jonkin verran todellisia paksuuksia pie- nemmiksi. Reflektanssikuvissa ero on moninkertainen. Erojen mahdollisia syitä käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.4.

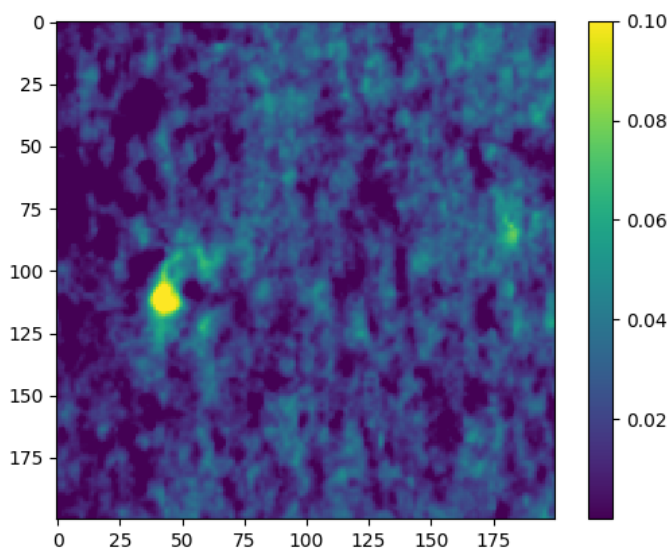


Kuvio 23: Reflektanssikuva, reikä alemmassa teippikerroksessa



Kuvassa kaksi päällekkäistä teippikerrosta, joista alempaan on pistetty reikä.

Kuvio 24: Paksuuskuva, reikä alemmassa teippikerroksessa



Väriasteikko vaihtelee välillä 0 – 0.1 mm. Alemmassa kerroksessa oleva reikä erottuu samalla tavalla kuin kuvassa 22.

### 3.2.4 Mallien epävarmuuksien mittaaminen

Luvun 3.2 perusteella voidaan todeta, että tutkimuksessa käytetyt menetelmät eivät ole lähimainkaan riittävän tarkkoja, jotta niitä voitaisiin hyödyntää ohutpinnoitekalvojen paksuuden mittaamisessa. Paksuusmittauksissa on niin suuri virhe, että käytettäessä menetelmää huomattavasti ohuempien kalvojen kanssa ei luultavasti saataisi edes suuntaa-antavia tuloksia. Todennäköisesti virheet johtuvat kolmesta pääsyystä: sirontakertoimen määrittelystä, Kubelka-Munk -mallista sekä taustamateriaalin reflektanssin määrittelystä.

Luvussa 3.1 teipin paksuutta laskettiin huomattavasti yksinkertaisemmalla kaavalla, jossa tarvitsi ratkaista ainoastaan teipin absorptiokerroin. Tämä saatiin laskettua suoraan transmissiokuvasta, mikä osaltaan johti siihen, että transmissiokuvasta lasketut paksuudet olivat lähellä oikeita arvoja. On otettava huomioon, että teipin todellinen paksuus ei välttämättä ole tarkalleen  $60 \mu\text{m}$ , joten virheen tarkkaa suuruutta ei pystytä tässä tutkielmassa määrittämään. Reflektanssikuvassa hyödynnettiin Kubelka-Munkin mallin tekijänä  $K$  suoraan teipin absorptiokerrointa. Tämän lisäksi jouduttiin määrittämään Kubelka-Munkin tekijä  $S$ , joka kuvaa valon siroamista näytteestä. Sirontakerrointa ei Kubelka-Munkin kaavan monimutkaisuuden takia saatu suoraan ratkaistua kuvasta, vaan  $S$ :ää jouduttiin arvioimaan erillisen matemaattisen kaavan (2.6) avulla. Käytettyä kaavaa optimoitiin vertaamalla generoitua reflektanssispektriä kuvasta mitattuun reflektanssiin. On kuitenkin vaikea arvioida kuinka tarkkaan  $S$  saatiin määritettyä.

Toinen merkittävä virheenaiheuttaja voi olla tutkimuksessa käytetty valon käyttäytymistä kuvaava malli. Kubelka-Munkin mallia on käytetty paljon paperiteollisuudessa pääosin siksi, että se on helppokäyttöinen. Mallille on havaittu selviä rajoituksia ja sitä on yritetty kehittää tarkemmaksi. Malli kuvaa kuitenkin valon kulkua aineen läpi ja sirontaa aineesta hyvin yksinkertaisesti. Mallissa valo on jaettu kahteen osaan: valonlähteestä aineeseen ja sen läpi kulkevaan fluksiin sekä aineesta ja taustamateriaalista takaisin heijastuvaan vastakkaiseen fluksiin. Mallissa ei oteta huomioon sitä, että todellisuudessa sirontaa tapahtuu aineessa joka suuntaan eikä yksittäisen fotonin kulku ole välttämättä niin yksinkertainen. Lisäksi on huomioitava, että yksi mallin oletuksista on se, että aineiden pinnat eivät heijasta valoa. Tutkimuksessa käytetyn teipin pinta on kuitenkin selvästi jonkin verran heijastava. On siis mahdollista, että teipin reflektanssin suuruus on laskuissa huomattavasti liian suuri. On hyvin

luultavaa, että tarkempien tulosten saamiseksi joudutaan valitsemaan jokin toinen, monimutkaisempi malli, etenkin kun halutaan mitata teippikerrosta huomattavasti ohuempia ohutpinnoitekalvoja.

Kolmas merkittävä virheenaiheuttaja on itse koeasetelma. Jotta teipin paksuuden matemaattiset määritelmät olisivat mahdollisimman tarkkoja, on tärkeä tuntea käytetyn mallin muuttujien tarkat arvot. Kubelka-Munkin mallissa tämä tarkoittaa sekä kuvatun alueen reflektanssin suuruutta että taustamateriaalin reflektanssin suuruutta. Jotta nämä saataisiin määritettyä mahdollisimman tarkasti, olisi tunnettava ennen kaikkea näytteeseen kohdistetun valon intensiteetti eri aallonpituuksilla. Transmissiokuvassa valonlähteen intensiteetti pystyttiin mittaamaan, koska kamera osoitti suoraan valonlähteeseen. Reflektanssikuvassa reflektansseja arvioitiin vertaamalla näytteestä heijastuneen valon intensiteettiä pelkästä paperista heijastuneen valon intensiteettiin.

Reflektanssi kuvaa sitä, kuinka suuri osa valosta siroaa valkoisesta pinnasta. Puhtaan valkoisen väri johtuu siitä, että kaikki valo siroaa eli valkoisen reflektanssi on 1. Koska reflektanssikuvassa valonlähteen intensiteettiä ei ollut saatavilla, simuloitiin sitä koeasetelmassa mittaamalla paperista heijastuneen valon intensiteetti. Tämän jälkeen teipin reflektanssi määriteltiin jakamalla näytteestä otetun kuvan valon intensiteetti pelkästä paperista otetun kuvan valon intensiteetillä. Vastaavasti taustapaperin reflektanssi saatiin valitsemalla näytekuvausta alue, jolla teippiä ei ollut ja jakamalla alueen valon intensiteetti paperikuvan vastaavan alueen intensiteetillä. Todellisuudessa tällä menetelmällä ei määritetä teipin eikä paperin reflektanssia vaan kahdesta eri kuvasta mitatun valon intensiteetin keskinäistä suhdetta. Menetelmän aiheuttama virhe on selkeästi havaittavissa jo pelkkää reflektanssihyperkuutiota tarkastelemalla. Laskettu reflektanssi on pelkän paperin kohdalla suurempi kuin 1 ja teipin kohdalla vain hieman pienempi. Tämä tarkoittaisi, että paperissa, teipissä tai molemmissa olisi jokin oma valonlähteensä, joka voimistaa valonlähteen valon intensiteettiä.

Teipin sirontakerrointa  $S$  ei pystytty tarkasti määrittämään ja muita malleja kannattaa testata omassa tutkimuksessaan. Taustamateriaalin reflektanssia pystyttiin kuitenkin skaalaamaan eri suuruiseksi. Taustan reflektanssia skaalattiin sekä jonkin verran ylöspäin että jonkin verran alaspäin. Näillä korjauksilla pyrittiin selvittämään, missä määrin taustamateriaalin reflektanssi vaikuttaa tuloksiin. On kuitenkin huomioitava, että luotettavan menetelmän löytämi-

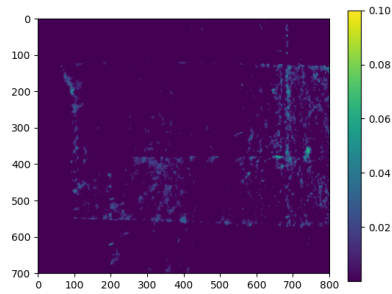
nen vaatii joka tapauksessa lisätutkimuksia. Taustarefleksanssia skaalattiin kasvattamalla sitä kaksi ja neljä prosenttiyksikköä suuremmaksi sekä pienentämällä sitä kaksi ja neljä prosenttiyksikköä. Skaalatun taustamateriaalin reflektanssin avulla laskettiin kuvioon 13 liittyvät paksuuslaskut uudelleen eli muodostettiin kuviota 16 vastaavat kuvat.

Ylöspäin skaalatuilla taustarefleksansseilla muodostetut paksuuskuvat ovat kuvioissa 25a ja 25b. Ylöspäin skaalatulla taustalla teipin paksuuden vaikutus reflektanssiin pienenee. Lopputuloksena on se, että paksuuskuvasssa teippiä on vaikeampi havaita. Teippi katoaa itse asiassa lähes kotonaan 4%:lla skaalatulla taustalla. Skaalaamalla taustan reflektanssia alaspäin (kuvat 25c ja 25d) teippi tulee paksuuskuvasissa paremmin esiin.

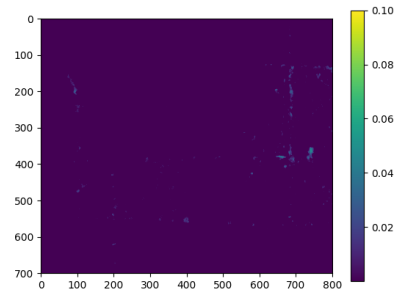
Alaspäin skaalatuilla taustoilla lasketuissa paksuuskuvasissa teipin paksuudet jäävät kuitenkin edelleen alle teipin todellisen paksuuden. Lisäksi laskukaavat antavat virheellisesti paperille paksuuksia eli kuviin tulee selkeää häiriötä. Teippikerrosten paksuudet kasvavat toisaalta lähemmäs todellisia paksuuksia. Koska taustan reflektanssin skaalaus alaspäin kasvatti teipin laskettua paksuutta, kokeiltiin laskea paksuuskuva 10% alaspäin skaalatulla taustarefleksanssilla (kuvio 25e). Saadussa kuvassa lasketut paksuudet olivat jo niin korkeita, että käytetyn väriasteikon ylärajaa piti muuttaa. Kahden teippikerroksen kohdalta lasketut paksuudet menivät jo yli todellisen paksuuden. Samalla pelkän paperin kohdalta malli antaa virheellisesti jo yhden teippikerroksen paksuuksia.

On selvää, ettei skaalatuilla taustarefleksansseilla saatuja paksuuskuvasia voi pitää luotettavina. Skaalaus kuitenkin osoittaa sen, että taustarefleksanssin merkitys malliin on hyvin suuri. Voidaan siis pitää hyvin todennäköisenä, että taustarefleksanssin määrittelyllä on todella suuri vaikutus lopputulokseen.

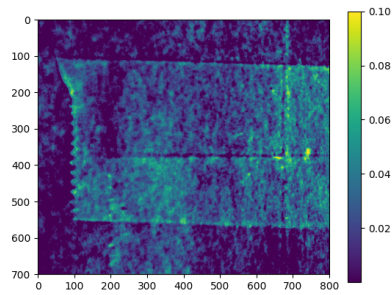
(a) Skaalaus 2% ylöspäin



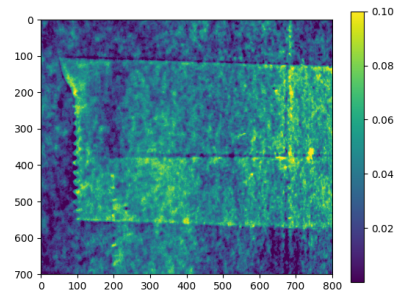
(b) Skaalaus 4% ylöspäin



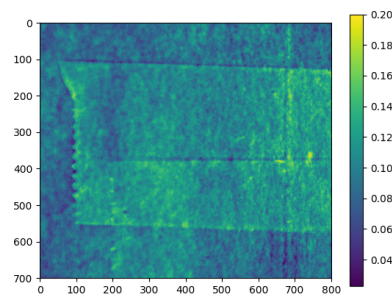
(c) Skaalaus 2% alaspäin



(d) Skaalaus 4% alaspäin



(e) Skaalaus 10% alaspäin. Huomaa isompi väriskaala



Kuvio 25: Laskettuja paksuuksia eri tavoin skaalatuilla taustarefleksseilla  
Kuvien väriskaalat ovat millimetrejä. Asteikko kuvissa a, b, c ja d 0 – 0.1 mm. Kuvassa e jouduttiin  
asteikkoa laajentamaan 0 – 0.20 mm:iin.

## 4 Tulosten analyysi

Transmissiokuvassa teipin lasketut paksuudet jäivät hieman todellista paksuutta pienemmäksi. On kuitenkin huomioitava, että teipin epäpuhtaudet vaikuttivat varmasti tulokseen. Lisäksi valmistajan ilmoittama paksuus teipille on ainoastaan likiarvo, joten teipin todellinen paksuus saattaa olla pienempi tai suurempi kuin valmistajan ilmoittama 0.06 mm.

Luotettavampien tulosten varmistamiseksi olisi teipin tarkka paksuus tullut selvittää erillisellä mittauksella. Lisäksi olisi ollut hyvä käyttää kahta erillistä hyperspektrikuvausta, joista toista olisi käytetty teipin absorptiokerroimen laskemiseen ja toisesta laskettu teipin paksuuksia. Nyt tutkimuksessa laskettiin samasta kuvasta ensin absorptiokerroin tunnetulla paksuudella ja sen jälkeen teipin paksuus laskettua absorptiokerrointa käyttäen. Koska absorptiokerrointa ei selvitetty erikseen, on vaikea arvioida tulosten yleistettävyyttä.

Reflektanssikuvissa lasketut paksuudet jäivät vain murto-osaan todellisista paksuuksista. Koeasetelmassa oli monta erillistä ongelmaa, jotka yhdessä johtivat siihen, että luotettavia tuloksia ei pystytty saamaan. Ensimmäinen ongelma oli itse reflektanssin laskeminen. Transmissiokuvassa oli helppo laskea transmission suuruus, koska pystyttiin kuvaamaan sekä pelkkä valonlähde, että teippikerrokset lasilevyllä. Reflektanssikuvassa valonlähteen spektriä ei kuitenkaan ollut saatavilla, vaan sen suuruutta arvioitiin kuvaamalla tyhjää valkoista paperiarkkia. Valkoinen väri johtuu siitä, että kaikki valo siroaa pinnasta eli valkoisen reflektanssi on 1. Todellisuudessa valkoinen paperi ei ole täydellisen valkoista, joten reflektanssi jää pienemmäksi. Koska valonlähteen intensiteettiä ei ollut suoraan saatavilla, jäivät lasketut reflektanssit likiarvoiksi todellisista arvoista.

Myös reflektanssikuvissa olisi ollut hyvä tietää teipin reflektanssiin vaikuttavat kertoimet tarkasti. Absorptiokerroimenä käytettiin transmissiokuvasta laskettua kerrointa. Sirontakerroin laskettiin suoraan kuvasta optimoimalla Kubelka-Munkin mallilla generoitua reflektanssispektriä vastaamaan vastaavasta kohdasta laskettua reflektanssia. Generoidut reflektanssit jäivät kuitenkin laskettuja reflektansseja pienemmiksi. Lasketut reflektanssit olivat muutenkin paikoin suuremmat kuin yksi, mikä tarkoittaisi sitä, että joko paperissa tai teipissä on oma valonlähteensä, mikä kasvattaa heijastuneen valon intensiteettiä.

On myös täysin mahdollista, ettei Kubelka-Munkin malli sovellu hyvin teipin paksuuden mittaukseen. Kubelka-Munkin malli on saanut laajaa suosiota sen helppouden takia, mutta sen yksinkertaisuus on herättänyt paljon kritiikkiä. Kubelka-Munkin mallin sijasta voisikin olla parempi käyttää jotain yksityiskohtaisempaa mallia. Reflektanssikuvissa hyödynnettiin muutenkin liian paljon arvioita sen sijaan, että oltaisiin tarkkaan selvitetty teipin tarkka paksuus sekä Kubelka-Munkin mallissa esiintyvät termit  $S$  ja  $K$ .

## 5 Yhteenveto

Tutkimuksessa haluttiin selvittää, miten ohutpinnoitekalvojen paksuuksia voitaisiin mitata hyperspektrikuvantamisen avulla. Hyperspektrikuvantaminen on monikäyttöinen tutkimusmenetelmä yhden hyperspektrikuution sisältämän valtavan datamäärän takia. Koska myös ohutpinnoitekalvoja tutkittaessa voidaan hyödyntää hyperspektrikuvantamista, on mielekäs- tä hyödyntää dataa myös kalvojen paksuusmittauksissa.

Tutkimuksessa ei kuitenkaan pystytty löytämään sopivaa menetelmää paksuuksien mittaa- miseen. Tämä johtui osittain puutteista koeasetelmasta mutta varmasti myös tutkimuksessa käytetyistä malleista. Koeasetelmassa olisi pitänyt saada tarkemmin määriteltyä tutkittavan teipin oleelliset ominaisuudet eli tarkka paksuus, absorptiokerroin ja sirontakerroin. Lisäksi reflektanssikuvassa jouduttiin itse reflektanssia arvioimaan, koska ei tiedetty tarkkaan näyt- teeseen kohdistetun valonlähteen intensiteettiä. Transmissiokuvasta saatiin tarkemmat tulok- set, koska tuntemattomia muuttujia oli huomattavasti vähemmän.

Reflektanssikuva analysoitiin Kubelka-Munkin mallilla ennen kaikkea mallin yksinkertai- suuden takia. Mallia on alunperin hyödynnetty paperiteollisuudessa sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Sitä on kuitenkin kritisoitu siitä, että se kuvaa valon käyttäytymisen liian yksinkertai- sesti, mikä johtaa siihen, ettei se välttämättä ole kovin yleiskäyttöinen. Tutkielmassa mallil- la lasketut paksuudet jäivät murto-osaan todellisista paksuuksista. Ohutpinnoitekalvot ovat ohuimmillaan eksponentiaalisesti toimistoteippiä ohuempia. Ohuimmissa kalvoissa mallia ei voitaisi joka tapauksessakaan käyttää, koska valon spektrin muutos johtuu eri ilmiöstä, interferenssistä, jonka käsittely jätettiin tämän tutkielman ulkopuolelle.

Tutkimuksessa saavutettiin ainoastaan suuntaa-antavia tuloksia, mutta konkreettiset saavu- tukset jäivät hyvin pieniksi. Tutkimuksessa oli tarkoitus ohutpinnoitekalvojen paksuuden mittaumenetelmän kehittämisen lisäksi myös selvittää, miten erilaiset vauriot pinnoitteessa vaikuttavat mittauksiin ja miten tämä voitaisiin mittauksissa huomioida. Tämä puoli tutki- muksessa jouduttiin kuitenkin jättämään lähes käsittelemättä, koska itse paksuusmittauksis- sa ei saavutettu hyviä tuloksia. Toisin sanoen havaittiin, että vauriot näkyvät tuloksissa mutta niitä ei sen tarkemmin voitu tarkastella.



On myös huomioitava, että vaikka tutkielmassa käytetty data oli hyperspektrikuvadataa, ei tätä menetelmissä juurikaan hyödynnetty. Mallit olivat sellaisia, että ne periaatteessa toimivat yhdellä ainoalla aallonpituudella mitattuun spektriin. Voisi olla hyödyllistä löytää menetelmä, joka ottaa huomioon myös spatiaalisessa suunnassa tapahtuvan vaihtelun hyperspektrikuvassa. Tässä tutkimuksessa löydettiin lähinnä menetelmä, joka ei näytä toimivan mittauksissa.

## Lähteet

- Amigo, José Manuel, Hamid Babamoradi ja Saioa Elcoroaristizabal. 2015. "Hyperspectral image analysis. A tutorial". *Analytica Chimica Acta* 896:34–51. ISSN: 18734324. doi:10.1016/j.aca.2015.09.030.
- Amigo, José Manuel, Jordi Cruz, Manel Bautista, Santiago Maspoch, Jordi Coello ja Marcelo Blanco. 2008. "Study of pharmaceutical samples by NIR chemical-image and multivariate analysis". *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* 27 (8): 696–713. ISSN: 01659936. doi:10.1016/j.trac.2008.05.010.
- Amigo, José Manuel, Idoia Martí ja Aoife Gowen. 2013. "Hyperspectral Imaging and Chemometrics. A Perfect Combination for the Analysis of Food Structure, Composition and Quality". *Data Handling in Science and Technology* 28 (December): 343–370. ISSN: 09223487. doi:10.1016/B978-0-444-59528-7.00009-0.
- Du, Xin, ja Junhui He. 2012. "Structurally colored surfaces with antireflective, self-cleaning, and antifogging properties". *Journal of Colloid and Interface Science* 381 (1): 189–197. ISSN: 00219797. doi:10.1016/j.jcis.2012.05.037. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2012.05.037>.
- Džimbeg-malčić, Vesna, Željka Barbarić-mikočević ja Katarina Itrić. 2011. "Kubelka-Munk Theory in Describing Optical Properties of Paper (1)". *Technical Gazette* 18 (1): 117–124. ISSN: 1330-3651. doi:10.1017/CBO9781107415324.004. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- Fischer, Stefan, Heiko Steinkemper, Philipp Löper, Martin Hermle ja Jan Christoph Goldschmidt. 2012. "Modeling upconversion of erbium doped microcrystals based on experimentally determined Einstein coefficients". *Journal of Applied Physics* 111 (1): 1–29. ISSN: 00218979. doi:10.1063/1.3674319. arXiv: 1110.2309.
- Fried, M. 2014. "On-line monitoring of solar cell module production by ellipsometry technique". *Thin Solid Films* 571 (P3): 345–355. ISSN: 00406090. doi:10.1016/j.tsf.2014.03.058. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.03.058>.

- Gendrin, C., Y. Roggo ja C. Collet. 2008. "Pharmaceutical applications of vibrational chemical imaging and chemometrics: A review". *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 48 (3): 533–553. ISSN: 07317085. doi:10.1016/j.jpba.2008.08.014.
- Honkavaara, E., T. Hakala, L. Markelin, A. Jaakkola, H. Saari, H. Ojanen, I. Pöyhönen ym. 2014. "Autonomous hyperspectral UAS photogrammetry for environmental monitoring applications". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 40 (1): 155–159. ISSN: 16821750. doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-155-2014.
- Huang, Xianai, Duygu Kocaefe, Yasar Kocaefe, Yaman Boluk ja Andre Pichette. 2012. "Changes in wettability of heat-treated wood due to artificial weathering". *Wood Science and Technology* 46 (6): 1215–1237. ISSN: 00437719. doi:10.1007/s00226-012-0479-6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.02.005>.
- Jacques, Steven L. 2013. *Erratum: Optical properties of biological tissues: A review (Physics in Medicine and Biology (2013) 58)*. doi:10.1088/0031-9155/58/14/5007.
- Kaivosoja, Jere, Liisa Pesonen, Jouko Kleemola, Ilkka Pölönen, Heikki Salo, Eija Honkavaara, Heikki Saari, Jussi Mäkynen ja Ari Rajala. 2013. "A case study of a precision fertilizer application task generation for wheat based on classified hyperspectral data from UAV combined with farm history data". *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV* (October 2013): 88870H. ISSN: 0277786X. doi:10.1117/12.2029165. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2029165>.
- Kirchner, Eric, Ivo van der Lans, Frank Ligterink, Muriel Geldof, Art Ness Proano Gaijbor, Ella Hendriks, Koen Janssens ja John Delaney. 2018. "Digitally reconstructing Van Gogh's Field with Irises near Arles. Part 2: Pigment concentration maps". *Color Research & Application* 43, numero 2 (huhtikuu): 158–176. ISSN: 03612317. doi:10.1002/col.22164. <http://doi.wiley.com/10.1002/col.22164>.
- Kubelka, Paul, ja Franz Munk. 1931. "Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche". *Zeitschrift für technische Physik* 12:593–601. ISSN: 2327-6045. doi:10.4236/msce.2014.28004.

Maheu, B., J. N. Letoulouzan ja G. Gouesbet. 1984. “Four-flux models to solve the scattering transfer equation in terms of Lorenz-Mie parameters”. *Applied Optics* 23 (19): 3353. ISSN: 0003-6935. doi:10.1364/AO.23.003353. <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-23-19-3353>.

Neittaanmäki-Perttu, Noora, Mari Grönroos, Leila Jeskanen, Ilkka Pölönen, Annamari Ranki, Olli Saksela ja Erna Snellman. 2015. “Delineating margins of lentigo maligna using a hyperspectral imaging system”. *Acta Dermato-Venereologica* 95 (5): 549–552. ISSN: 16512057. doi:10.2340/00015555-2010.

Neittaanmäki-Perttu, Noora, Mari Grönroos, Taneli Tani, Ilkka Pölönen, Annamari Ranki, Olli Saksela ja Erna Snellman. 2013. “Detecting field cancerization using a hyperspectral imaging system”. *Lasers in Surgery and Medicine* 45 (7): 410–417. ISSN: 01968092. doi:10.1002/lsm.22160.

Näsi, R., E. Honkavaara, S. Tuominen, H. Saari, I. Pölönen, T. Hakala, N. Viljanen ym. 2016. “Uas based tree species identification using the novel fpi based hyperspectral cameras in visible, nir and swir spectral ranges”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 2016-Janua:1143–1148. ISSN: 16821750. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1143-2016.

Pölönen, Ilkka, Heikki Salo, Heikki Saari, Jere Kaivosoja, Liisa Pesonen ja Eija Honkavaara. 2012. “Biomass estimator for NIR image with a few additional spectral band images taken from light UAS”. *Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety IV* (May 2012): 836905–836905–10. ISSN: 0277786X. doi:10.1117/12.918551. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1353864>.

Reddy, I. Neelakanta, V. Rajagopal Reddy, N. Sridhara, S. Basavaraja, M. Venkatanarayana, V. Sasidhara Rao, A. K. Sharma ja Arjun Dey. 2013. “Development of SiO<sub>2</sub> based thin film on metal foils for space application”. *Ceramics International* 39 (7): 8493–8498. ISSN: 02728842. doi:10.1016/j.ceramint.2013.02.082. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.082>.

Schowengerdt, Robert. 2007. *Remote Sensing, third ed., Models and Methods for Image Processing*. Elsevier. [https://books.google.fi/books?hl=en%7B%5C%7Dlr=%7B%5C%7Did=KQXNaDH0X-IC%7B%5C%7Doi=fnd%7B%5C%7Dpg=PP1%7B%5C%7Ddq=Models+and+Methods+for+Image+Processing%7B%5C%7Dots=smpZFQB8JG%7B%5C%7Dsig=cWhLxU1GdoMZKVVgg9ZXJgweqR8%7B%5C%7Dredir%7B%5C\\_%7Desc=y%7B%5C#%7Dv=onepage%7B%5C%7Dq=Models%20and%20Methods%20for%20Image%20Processing%7B%5C%7Df=false](https://books.google.fi/books?hl=en%7B%5C%7Dlr=%7B%5C%7Did=KQXNaDH0X-IC%7B%5C%7Doi=fnd%7B%5C%7Dpg=PP1%7B%5C%7Ddq=Models+and+Methods+for+Image+Processing%7B%5C%7Dots=smpZFQB8JG%7B%5C%7Dsig=cWhLxU1GdoMZKVVgg9ZXJgweqR8%7B%5C%7Dredir%7B%5C_%7Desc=y%7B%5C#%7Dv=onepage%7B%5C%7Dq=Models%20and%20Methods%20for%20Image%20Processing%7B%5C%7Df=false).

Senthilkumar, M., N. Selvakumar ja R. Shamey. 2011. “The effect of humidity, fabric surface geometry and dye type on the colour of cotton fabrics dyed with a select range of anionic dyes”. *Dyes and Pigments* 90 (3): 225–232. ISSN: 01437208. doi:10.1016/j.dyepig.2010.12.015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dyepig.2010.12.015>.

Swinehart, D. F. 1962. “The Beer-Lambert Law”. *Journal of Chemical Education* 39 (7): 333. ISSN: 0021-9584. doi:10.1021/ed039p333. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed039p333>.

Tuominen, Sakari, Andras Balazs, Heikki Saari, Ilkka Pölönen, Janne Sarkeala ja Risto Viitala. 2015. “Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables”. *Silva Fennica* 49 (5). ISSN: 22424075. doi:10.14214/sf.1348. <http://www.silvafennica.fi/article/1348>.

Vargas, William E., ja Gunnar A. Niklasson. 1997. “Applicability conditions of the Kubelka–Munk theory”. *Applied Optics* 36 (22): 5580. ISSN: 0003-6935. doi:10.1364/AO.36.005580. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-36-22-5580>.

Yang, Hongying, Sukang Zhu ja Ning Pan. 2010. “On the Kubelka—Munk Single-Constant/Two-Constant Theories”. *Textile Research Journal* 80 (3): 263–270. ISSN: 00405175. doi:10.1177/0040517508099914.

Yang, Li, ja Björn Kruse. 2004. "Revised Kubelka–Munk theory I Theory and application". *Journal of the Optical Society of America A* 21 (10): 1933. ISSN: 1084-7529. doi:10.1364/JOSAA.21.001933. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-21-10-1933>.

Yang, Li, Björn Kruse ja Stanley J. Miklavcic. 2004. "Revised Kubelka–Munk theory II Unified framework for homogeneous and inhomogeneous optical media". *Journal of the Optical Society of America A* 21 (10): 1942. ISSN: 1084-7529. doi:10.1364/JOSAA.21.001942. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-21-10-1942>.

Yang, Li, ja Stanley J. Miklavcic. 2005. "Revised Kubelka–Munk theory III A general theory of light propagation in scattering and absorptive media". *Journal of the Optical Society of America A* 22 (9): 1866. ISSN: 1084-7529. doi:10.1364/JOSAA.22.001866. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-22-9-1866>.