



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Marko Maričević

KOLORIMETRIJSKA OPTIMIZACIJA STEREOLITOGRAFSKE ADITIVNE PROIZVODNJE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

Grafički fakultet

Marko Maričević

KOLORIMETRIJSKA OPTIMIZACIJA STEREOLITOGRAFSKE ADITIVNE PROIZVODNJE

DOKTORSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Miroslav Mikota

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

Faculty of Graphic Arts

Marko Maričević

COLORIMETRIC OPTIMIZATION OF STEREOLITOGRAPHIC ADDITIVE PRODUCTION

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
doc. Miroslav Mikota, PhD

Zagreb, 2021.

Biografija mentora

Miroslav Mikota je rođen 4. ožujka 1967. g. u Zagrebu gdje je završio osnovnu školu, Klasičnu gimnaziju i Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu na kojem je diplomirao 1990. g., magistrirao 2005. g. te doktorirao 2007. g. Od 1990. g. radi na Grafičkom fakultetu, danas kao docent na Katedri za grafički dizajn i slikovne informacije, a od akademske godine 2016./2017. i kao prodekan za nastavu. Bio je pokretač i voditelj Katedre za primijenjenu i umjetničku fotografiju. 2011. g. je izabran u znanstveno zvanje znanstvenog suradnika, 2013. g. u naslovno zvanje profesora visoke škole, a 2015. g. u znanstveno-nastavno zvanje docent. Autor je više od 90 znanstvenih i stručnih radova, više od 400 leksikografskih članaka i većeg broja osvrta i komentara fotografskih izložbi. Kao urednik je, recenzent i autor surađivao s Maticom hrvatskom, časopisom Reporter i časopisom Grafička revija. Surađuje s Leksikografskim zavodom Miroslav Krleža kao urednik struke Tiskarstvo na projektu Hrvatske enciklopedije i Tehničkog leksikona te Likovnog leksikona kao urednik struke Fotografija. Sudjelovao je na većem broju stručnih i znanstvenih konferencija. Voditelj je organizacije Međunarodne konferencije tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić te je član Znanstvenih odbora Međunarodnog znanstvenog skupa Tiskarstvo & Dizajn, Međunarodne znanstvene konferencije MATRIB, Međunarodne konferencije tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić, International Conference Management of Technological Changes i International Seminar on Quality Management in Higher Education. Urednik je znanstvenih knjiga i zbornika radova i sažetaka sa znanstvenih skupova te znanstvenog časopisa Acta Graphica. Objavio je knjigu Kreacija fotografijom i dvije skripte. Autor je i izvođač više programa kolegija dodiplomskih, preddiplomskih, diplomskih i doktorskog studija te je recenzent jednog sveučilišnog programa preddiplomskog studija i većeg broja znanstvenih radova. Sudjelovao je u organizaciji i vođenju fotografskih tečajeva, seminara i radionica te je član i predsjednik stručnih žirija i strukovnih udruga. Objavio je preko 1000 fotografija te njima ilustrirao naslovne stranice, knjige, kataloge, kalendare, novine, časopise, razglednice, plakate i web stranice, a fotografije je izlagao na 30 izložbi. Široj je javnosti najpoznatiji po portretima hrvatskih književnika te ličnosti iz kulturnog života te HDR zimskim pejzažima.

Za moju Laru

Zahvaljujem se svojem mentoru i prijatelju Miroslavu Mikoti na svim savjetima, idejama, razmišljanja i sugestijama tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojim dragim profesoricama i profesorima na sugestijama i pomoći. Hvala svima koji te mi pomogli i omogućili ovaj znanstveni put.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na svim lijepim riječima, podršci i i vjerovanju u mene.

Sažetak

Istraživanja materijala tehnologija aditivne proizvodnje uglavnom su fokusirana na istraživanja mehaničkih svojstava. Primjena ovih tehnologija u području gdje su bitna vizualna svojstva zahtijeva dodatna istraživanja definiranja boja 3D otiska. U disertaciji se definira utjecaj UV zračenja i debljine materijala stereolitografske tehnologije na kolorimetrijska svojstva otiska. Fotopolimerne smole će se pomiješati s pet bojila grafičke reprodukcije (cijan, magenta, žuta, bijela, crna) te izmjeriti spektralne vrijednosti, izraditi spektralne krivulje uzoraka i definirati kolorimetrijske vrijednosti u CIE Lab i LCh sustavu. Za pojedine debljine i boje 3D otisaka odredit će se refleksijske i transmisijske kolorimetrijske vrijednosti te razlike i smjer promjene boje tijekom UV zračenja. Temeljem provedenih ispitivanja se definirat će se ovisnost kolorimetrijskih vrijednosti 3D otisaka o vremena UV zračenja i debljin materijala u svrhu optimizacije stereolitografske aditivne proizvodnje.

Ključne riječi: kolorimetrija, stereolitografija, UV sušenje

Extended abstract

Materials research in additive manufacturing is mainly focused on the study of mechanical properties. The application of these technologies in an area where visual properties are essential requires additional research on colors defining of 3D prints. The effect of UV radiation and the thickness of stereolithographic resin on the colorimetric properties of the print is defined in the dissertation. The materials will be mixed with five graphic reproduction dyes (cyan, magenta, yellow, white, black) and spectral values measured, producing samples spectral curves and defining colorimetric values in the CIE Lab and LCh system. For individual thicknesses and colors of 3D prints, the reflection and transmission colorimetric values, the differences and direction of color change during UV radiation will be determined. Based on the performed tests, the dependence of the colorimetric values of 3D prints on the UV radiation time and the material thickness will be defined to optimize stereolithographic additive production.

Methodology

In order to confirm the set hypotheses, 3D sample models will first be created using a CAD computer program. A CAD environment is used to meet the need for strict measurement tolerances of the samples. After creating a computer 3D model, the file is saved in STL format. The measuring samples are designed as a series of tiles from 0.8mm to 5mm thick. The thickness of the measuring samples increases by 0.2 mm, so a total of 22 measuring samples are obtained.

For research purposes, the addition of dyes to the base polymer defines five base colors which are cyan, magenta, yellow, black and white. The test specimens are first washed in a solvent that removes the unpolymerized material, and then additional drying of the 3D prints by UV radiation is required. In order to investigate in detail the influence of drying on the colorimetric properties using a spectrophotometer, the spectral information of each sample is measured while in the green state. Then each sample is dried at time intervals of 15 minutes. Drying of the samples takes place in a UV chamber under controlled measuring conditions. After each interval, the spectral information is measured again in order to determine the effect of drying on the colorimetric properties of the material. Based on the measured spectral and chromatic data, an analysis of the influence of changes in material thickness and time intervals of UV radiation on the colorimetric properties of 3D prints is performed. The color change is displayed as a value of ΔE_{00} , with a description of the direction of change.

Main results

The hypothesis that the change in material thickness in the process of stereolithographic additive production affects the colorimetric properties of a 3D impression has been confirmed. Test specimens have very large color changes when looking at the transmission properties of the specimens. If the reflection properties of the samples are observed, a noticeable change is in thinner materials while thicker samples have a much smaller color change. Each combination of the base photopolymer and dye has different colorimetric characteristics, but in general, we look at the color change values the largest changes occur in thinner samples. The effect of 3D print drying on colorimetric properties was investigated. Drying changes the colorimetric properties, the biggest changes are noticed after the first drying intervals. In general, observing the measurement results, it can be seen that the brightness and chromaticity decrease. The direction of the tone change depends on the dye. Analyzing the transmission and reflection characteristics of the test specimens, the color changes that occur are most noticeable in the thinnest specimens. The total color change is the least in black dye, while the largest changes are seen in transmission and reflection in test dyes with white dye. The direction of color change was determined for each group of dye test specimens. The test samples with black dye have the least total color changes, and the value of ΔE_{2000} does not exceed the value of 0.15, which is a negligible change. A total color change with a ΔE_{2000} value greater than 4 was obtained for white dye samples.

Key words: colorimetry, stereolithography, 3D print, additive manufacturing

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Obrazloženje teme i dosadašnja istraživanja	1
1.2	Cilj i hipoteze istraživanja	4
2	Teorijski dio	5
2.1	Tehnologije aditivne proizvodnje	5
2.2	Proces izrade u tehnologijama aditivne proizvodnje	6
2.2.1	Izrada računalnog 3D modela	6
2.2.2	Prilagodba računalnog 3D modela u zapis pogodan za aditivnu proizvodnju	6
2.2.3	Priprema parametara za aditivnu proizvodnju	7
2.2.4	Izrada fizičkog modela – aditivna proizvodnja	7
2.2.5	Uklanjanje fizičkog objekta i završna obrada	7
2.3	Tehnologije aditivne proizvodnje	8
2.3.1	Otiskivanje veziva na materijale (<i>binder jetting</i> – BJ)	8
2.3.2	Taloženje materijala pod djelovanjem izvora energije (<i>directed energy deposition</i> – DED)	10
2.3.3	Ekstrudiranje materijala (<i>material extrusion</i>)	11
2.3.4	Otiskivanje materijala (<i>material jetting</i>)	16
2.3.5	Spajanje praškastog materijala (e. <i>poweder bed fusion</i>)	18
2.3.6	Laminiranje slojeva materijala (<i>sheet lamination</i>)	22
2.3.7	Polimerizacija materijala u komori (<i>vat photopolymerization</i>)	23
2.4	Standardi i kontrola kvalitete tehnologija aditivne proizvodnje	32
2.5	Kolorimetrija u tehnologijama aditivne proizvodnje	38
3	Eksperimentalni dio	42
3.1	Metodologija i plan istraživanja	42

3.1.1	Izrada računalnog 3D modela	44
3.1.2	Priprema .STL zapisa za aditivnu proizvodnju	46
3.1.3	Priprema materijala i uređaja aditivne proizvodnje	47
3.1.4	Stereolitografska aditivna proizvodnja.....	49
3.1.5	Mjerenje uzoraka.....	50
3.1.6	Analiza rezultata mjerenja.....	52
4	Rezultati	53
4.1	Transmisijska i reflektivna svojstva ispitnih uzoraka stereolitografske aditivne proizvodnje.....	53
4.1.1	Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo	53
4.1.1.1	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 1 mm.....	60
4.1.1.2	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 2 mm.....	61
4.1.1.3	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 3 mm.....	62
4.1.1.4	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 4 mm.....	63
4.1.1.5	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 5 mm.....	64
4.1.1.6	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 1 mm	65
4.1.1.7	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 2 mm	66
4.1.1.8	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 3 mm	67
4.1.1.9	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 4 mm	68
4.1.1.10	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 5 mm	69
4.1.2	Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo	70
4.1.2.1	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 1 mm	76
4.1.2.2	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 2 mm	77
4.1.2.3	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 3 mm	78
4.1.2.4	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 4 mm	79
4.1.2.5	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 5 mm	80
4.1.2.6	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 1 mm	81
4.1.2.7	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 2 mm	82
4.1.2.8	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 3 mm	83
4.1.2.9	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 4 mm	84
4.1.2.10	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 5 mm	85

4.1.3	Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – žutog bojila	86
4.1.3.1	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 1 mm.....	92
4.1.3.2	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 2 mm.....	93
4.1.3.3	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 3 mm.....	94
4.1.3.4	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 4 mm.....	95
4.1.3.5	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 5 mm.....	96
4.1.3.6	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 1 mm	97
4.1.3.7	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 2 mm	98
4.1.3.8	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 3 mm	99
4.1.3.9	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 4 mm	100
4.1.3.10	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 5 mm	101
4.1.4	Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – crnog bojila	102
4.1.4.1	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 1 mm.....	108
4.1.4.2	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 2 mm.....	109
4.1.4.3	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 3 mm.....	110
4.1.4.4	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 4 mm.....	111
4.1.4.5	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 5 mm.....	112
4.1.4.6	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 1 mm.....	113
4.1.4.7	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 2 mm.....	114
4.1.4.8	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 3 mm.....	115
4.1.4.9	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 4 mm.....	116
4.1.4.10	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 5 mm.....	117
4.1.5	Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo.....	118
4.1.5.1	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 1 mm.....	124
4.1.5.2	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 2 mm.....	125
4.1.5.3	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 3 mm.....	126
4.1.5.4	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 4 mm.....	127
4.1.5.5	Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 5 mm.....	128
4.1.5.6	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 1 mm.....	129
4.1.5.7	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 2 mm.....	130
4.1.5.8	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 3 mm.....	131
4.1.5.9	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 4 mm.....	132
4.1.5.10	Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 5 mm.....	133

4.2	Učinak debljine ispitnih uzoraka stereolitografske aditivne proizvodnje na kolorimetrijska svojstva	134
4.2.1	Kolorimetrijska mjerenja transmisijiska ispitnih uzoraka s cijan bojom	134
4.2.1.1	Cijan ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	135
4.2.1.2	Cijan ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	137
4.2.1.3	Cijan ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	139
4.2.1.4	Cijan ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2mm do 0.8 mm	141
4.2.2	Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s magenta bojom.....	143
4.2.2.1	Magenta ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	143
4.2.2.2	Magenta ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	145
4.2.2.3	Magenta ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	147
4.2.2.4	Magenta ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2mm do 0.8 mm.....	149
4.2.3	Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s žutim bojom	151
4.2.3.1	Žuti ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	151
4.2.3.2	Žuti ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	153
4.2.3.3	Žuti ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	155
4.2.3.4	Žuti ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm	157
4.2.4	Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s crnim bojom.....	159
4.2.4.1	Crni ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	159
4.2.4.2	Crni ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	161
4.2.4.3	Crni ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	163
4.2.4.4	Crni ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	165
4.2.5	Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s bijelim bojom.....	167
4.2.5.1	Bijeli ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	167
4.2.5.2	Bijeli ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	169
4.2.5.3	Bijeli ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	171
4.2.5.4	Bijeli ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm.....	173
5	Rasprava	175
6	Zaključak.....	183
7	Literatura	186
8	Prilozi	192

8.1	Popis slika.....	192
8.2	Popis tablica.....	203
9	O autoru.....	205
9.1	Popis objavljenih djela.....	206

1 Uvod

1.1 OBRAZLOŽENJE TEME I DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

Kroz povijest tiskarstva grafičari su razvijali i koristili razne tehnike i tehnologije tiska. Tehnologije aditivne proizvodnje počele su se razvijati početkom 1980-tih godina, ali su tek unazad par godina postale dominantan trend u razvoju te izradi prototipova i gotovih proizvoda. Tehnologije aditivne proizvodnje naziv je za skup različitih procesa izrade 3D objekta nanošenjem materijala u tankim slojevima, sloj po sloj. Prvi koncept aditivne proizvodnje predstavio je japanski znanstvenik Hideo Kodama 1981. godine [1, 2]. U svojim istraživanjima opisao je slojeviti način proizvodnje i postavio temelj za nadolazeće tehnologije aditivne proizvodnje. Prvi tehnološki proces aditivne proizvodnje temelji na polimerizaciji fotopolimera prilikom osvijetljavanja UV svjetlom, a naziva se stereolitografija (e. *stereolithography* – SLA). Francuski znanstvenici Alain Le Méhauté, Olivier de Witte i Jean Claude André, 1984. godine predali su patentnu prijavu za postupak stereolitografije koja je odbijena [3]. Neovisno od istraživanja francuskih znanstvenika, u SAD-u, 1984. godine Charles W. Hull prijavljuje patent za proces stereolitografske aditivne proizvodnje [4]. Uz stereolitografski proces aditivne proizvodnje paralelno se razvijaju i drugi procesi aditivne proizvodnje. Znanstvenik Carl R. Deckard sa svojim suradnicima krajem 1980-tih godina objavljuje patente za proces selektivnog laserskog srašćivanja (e. *selective laser sintering* – SLS) [5]–[7]. Tvrtka Stratsys i njezin osnivač Scott Crump prijavljuju patent za proces ekstrudiranja materijala nazvanu *Fused Deposition Modeling* – FDM [8].

Popularnosti primjene aditivnih tehnologija doprinio je projekt *RepRap*, koji je nastao u Engleskoj 2005. godine kao inicijativa Sveučilišta Bath s ciljem razvoja jeftinog uređaja za aditivnu proizvodnju, odnosno 3D tisak [9]. Naziv 3D tisak se često koristi, a zapravo je sinonim za tehnologije aditivne proizvodnje koje se sastoje od niza različitih procesa izrade. Projektom *RepRap* nastala je zajednica korisnika koji prvenstveno doprinose razvoju tehnologije ekstrudiranja materijala, tehnologiji koja je vrlo povoljna, dostupna i jednostavna

za korištenje. Temeljni princip izrade isti je kod svih tehnologija aditivne proizvodnje. Prvo je potrebno trodimenzionalni računalni model razložiti u niz dvodimenzionalnih slojeva kojima se procesom aditivne proizvodnje, nanošenjem jednog po jednog sloja materijala formira finalni produkt odnosno 3D otisak. Tehnologije aditivne proizvodnje ubrzavaju proces stvaranja proizvoda smanjujuću vrijeme i trošak izrade, pogotovo kod izrade jedinstvenih proizvoda i maloserijske naklade [10, 11]. Primjenom tehnologija aditivne proizvodnje otvaraju se nove mogućnosti i izazovi u području stvaranja jedinstvenih proizvoda, personaliziranih proizvoda i serijske proizvodnje. Sve šira primjena aditivne proizvodnje u raznim granama industrije potaknula je razvoj i proizvodnju novih materijala. Proučavanje dostupne literature, pokazuje da su istraživanja uglavnom usmjerena na analizu mehaničkih svojstava materijala, dok za vizualna svojstva nisu napravljena detaljna istraživanja. Stereolitografski postupak izrade (*stereolithography* – SLA) se smatra jednim od vodećih i najznačajnijih tehnologija aditivne proizvodnje pa je ovaj postupak odabran za izradu ispitnih uzoraka, odnosno 3D otisaka [12]. Ovaj postupak pripada u skupinu tzv. polimerizacija materijala u komori (*vat photopolymerization*) tehnologije aditivne proizvodnje [13]. U ovom postupku tekući fotopolimer se selektivno osvjetljava i pretvara u kruti polimer. Uobičajeno se kao izvor svjetla koristi laser u UV spektru [14]. Nakon osvjetljavanja svakog sloja, platforma se pomiče za debljinu sljedećeg sloja i tako sve dok se ne dobije gotovi 3D otisak. Nakon što je postupak stvaranja gotov, potrebno je poduzeti dodatne postupke u obradi kako bi dobili finalni produkt. Prvo je potrebno 3D otisak isprati u kupki II propilnog alkohola kako bi se uklonio višak ne polimeriziranog materijala. Ispitivanja su pokazala da se korištenjem SLA postupka nastali 3D otisak nalazi u tzv. „*zelenom stanju*“, odnosno da nije došlo do potpune polimerizacije te je potrebno dodatno zračenje UV svjetlom kako bi došlo do potpune polimerizacije materijala. Karakteristike finalnih produkata nastalih stereolitografskim postupkom su visoka kvaliteta površine, visoka razlučivost detalja i visoka točnost izrade [12], [15].

U stereolitografskom postupku aditivne proizvodnje istražena je veza između stupnja polimerizacije i mehaničkih svojstava materijala. Napravljen je matematički model za predviđanje vlačne čvrstoće i tvrdoće s prosječnom točnošću od 88%. Dokazano je da dodatno UV sušenje znatno poboljšava mehanička svojstva u odnosu na „*zeleno stanje*“ gdje proces polimerizacije nije dovršen. Provedenim se ispitivanjima pokazalo da orijentacija

izrade slojeva u aditivnoj proizvodnji utječe na mehanička svojstva, stoga se dobiveni objekti ne mogu smatrati izotropnim. Optimalnom orijentacijom modela, osim dobivanja boljih mehaničkih svojstava, moguće je ubrzati postupak aditivne proizvodnje. Ispitivanja učinka starenja materijala u različitim okruženjima pokazalo je da nema značajnih promjena mehaničkih svojstava prilikom kratkog vremenskog intervala starenja dok kod dužeg vremenskog perioda starenja dolazi do smanjenja mehaničkih svojstava. [16, 17, 18, 19, 20]

Tehnologije aditivne proizvodnje se sve više primjenjuju u područjima gdje su bitna vizualna, odnosno kolorimetrijska svojstva, primjerice u grafičkoj industriji prilikom izrade grafičkog proizvoda ili oblikovanja ambalaže. U istraživanju u kojemu su sudjelovali eksperti iz područja dizajna i razvoja proizvoda pokazalo se da njih 68% smatra da je fizički otisak vrijedniji od digitalnog zapisa, a 81% ispitanika primijetilo je promjene na otisku kroz duži vremenski interval. Također zbog fizičkih oštećenja, degradiranja materijala i boje, 84% ispitanika izjavilo je da bi željeli imati reproducirani primjerak. Tehnologije aditivne proizvodnje su omogućile brzo prototipiranje koje je promijenilo način dizajna i razvoja proizvoda. Prototipovi se vrlo brzo mogu proizvesti kako bi se detaljno analizirali zbog prilagodbe proizvoda ili uklanjanja nedostataka. Vizualna svojstva materijala uslijed degradiranja i promjene boje materijala u aditivnoj proizvodnji važan su faktor prilikom odabira tehnologije reprodukcije te ih je potrebno dodatno istražiti. Definiranje boje 3D otiska kao i vizualna svojstva materijala bili su temeljni poticaj za pisanje ovog doktorskog rada. U stereolitografskom postupku aditivne proizvodnje vremenski interval UV zračenja i debljina materijala utječu na kolorimetrijska svojstva mjernih uzoraka, a povećanim vremenskim intervalom UV zračenja dolazi do promjena u boji. [21, 22, 23, 24, 25]

1.2 CILJ I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Cilj rada je optimizirati stereolitografski postupak aditivne proizvodnje kako bi se postigla željena kolorimetrijska svojstva 3D otiska. Mjerenjem utjecaja sušenja 3D otiska UV zračenjem i određivanjem debljine materijala istražena je povezanost s ukupnom promjenom boje kao i smjerom promjene boje prikazane u CIE Lab i CIE LCH prostoru boja.

Istraživanje ovog rada se temelji na sljedećim hipotezama:

H1: Promjena debljine materijala u postupku stereolitografske aditivne proizvodnje utječe na kolorimetrijska svojstva 3D otiska.

H2: Promjenom trajanja UV zračenja u postupku stereolitografske aditivne proizvodnje mijenjaju se kolorimetrijska svojstva 3D otiska.

H3: Definiranjem optimalnih vrijednosti debljine materijala i intervala UV zračenja 3D otiska u postupku stereolitografske aditivne proizvodnje mogu se postići željena kolorimetrijska i optička svojstva proizvoda.

2 Teorijski dio

2.1 TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE

Tehnologije aditivne proizvodnje (*additive manufacturing* – AM) počinju se razvijati i primjenjivati od 1980-tih godina kao alternativa tradicionalnim proizvodnim procesima. Aditivna proizvodnja naziv je za skup različitih procesa izrade 3D otiska nanošenjem materijala u uzastopnim slojevima. Tehnologije aditivne proizvodnje pretvaraju računalno generirani trodimenzionalni model u stvarni predmet. Temeljni koncept izrade je razlaganje računalnog trodimenzionalnog modela u niz dvodimenzionalnih slojeva koji se nanošenjem uzastopnih slojeva formiraju u finalni proizvod odnosno 3D otisak. Postoji čitav niz različitih tehnologija aditivne proizvodnje, od kojih svaka ima svoje prednosti i ograničenja. Proizvodi mogu imati kompleksni geometrijski oblik bez utjecaja na cijenu proizvoda, dok u tradicionalnoj proizvodnji kompleksniji oblici povećavaju cijenu proizvoda [10], [11]. Također, moguće je proizvesti iteracije proizvoda bez povećanja cijene i vremena izrade. Zbog svojih prednosti tehnologije aditivne proizvodnje postaju trend u razvoju i dizajnu proizvoda kao i maloserijskoj proizvodnji. Među najvećim ograničenjima tehnologija aditivne proizvodnje je nemogućnost izrade dijelova sa svojstvima materijala jednakim kao u tradicionalnim proizvodnim procesima [25]. Zbog toga se razvijaju novi materijali koji su primjenjivi u raznim granama industrije. Primjena aditivnih tehnologija proizvodnje najzastupljenija je u proizvodnji industrijskih dobara, medicini, dentalnoj medicini, zrakoplovstvu, automobilizmu, arhitekturi, potrošačkoj elektronici, edukaciji, itd.. Razvojem tehnologija aditivne proizvodnje svakodnevno se stvaraju nove prilike za njihovu primjenu.

2.2 PROCES IZRADE U TEHNOLOGIJAMA ADITIVNE PROIZVODNJE

Neovisno o tehnologiji aditivne proizvodnje, sam proces izrade se sastoji od niza koraka koji od početnog računalnog 3D modela stvaraju finalni fizički produkt. Ovisno o zahtjevnosti, aditivna se proizvodnja može koristiti za vizualizaciju, prototipiranje ili kroz niz iteracija za razvoj kompleksnog finalnog fizičkog produkta. Na početku razvoja proizvoda, aditivna proizvodnja se primjenjuje za izradu brzih prototipa. Zatim se kroz niz iteracija, promjena dizajna produkta i ostalih parametara dolazi do zadovoljavajućeg rješenje koji nakon aditivne proizvodnje zahtijeva završnu obradu (npr. pjeskarenje, brušenje, poliranje, bojanje, itd.). Prednost tehnologija aditivne proizvodnje je što za promjenu dizajna i geometrijske složenosti nisu potrebni dodatni alati i procesi za izradu te je stoga moguća vrlo brza izrada.

2.2.1 Izrada računalnog 3D modela

Računalni zapis trodimenzionalne geometrije objekta je prvi korak u stvaranju fizičkog produkta pomoću tehnologija aditivne proizvodnje. Takav se zapis najčešće izrađuje pomoću *Computer Aided Design* (CAD) računalnih programa. Postoje i drugi načini dobivanja zapisa koji opisuju površinu trodimenzionalnog objekta koji se uglavnom koriste u povratnom inženjerstvu. Zapis se dobiva 3D skeniranjem (fotogrametrijsko, lasersko, skeniranje strukturiranim svjetlom) [27, 28, 29]. U ovom se procesu pomoću 3D skeniranja rekonstruira površina skeniranog objekta iz kojega nastaje zapis trodimenzionalne geometrije koji je moguće reproducirati pomoću tehnologija aditivne proizvodnje.

2.2.2 Prilagodba računalnog 3D modela u zapis pogodan za aditivnu proizvodnju

Računalni 3D model je potrebno pretvoriti u format zapisa koji je prilagođen uređajima za aditivnu proizvodnju. Format zapisa *Standard Triangle Language* – STL opisuje površinu 3D modela pomoću trokuta (poligona) te pojednostavljuje kompleksnost CAD modela. Ovaj je format zapisa pogodan za proizvodnju u svim procesima aditivne proizvodnje te je postao

standardni zapis [29]. Osim STL formata zapisa, koriste se i drugi kao što su OBJ i 3DP koji osim zapisa geometrije površine sadrže i podatke o teksturi i boji 3D modela. [30].

2.2.3 Priprema parametara za aditivnu proizvodnju

Digitalni zapis .STL učitava se u računalni program namijenjen razlaganju 3D modela u niz dvodimenzionalnih slojeva te ih pohranjuje u format zapisa razumljiv uređaju u kojemu će se proizvesti model. U ovom koraku, ovisno o tehnologiji aditivne proizvodnje, kontrolira se niz parametara uređaja i optimiziraju se postavke kako bi proces izrade bio uspješan. Ukoliko proces aditivne proizvodnje zahtijeva, dodaju se strukturne potpore modelu.

2.2.4 Izrada fizičkog modela – aditivna proizvodnja

Ovisno o tehnologiji aditivne proizvodnje, procesi izrade se razlikuju. Uglavnom su to automatizirani procesi gdje nije potrebna pomoć operatera. Općeniti postupak je nanošenje uzastopnih slojeva materijala na radnu platformu, koji formiraju fizički objekt.

2.2.5 Uklanjanje fizičkog objekta i završna obrada

Kada je proces aditivne proizvodnje završen, fizički je objekt potrebno ukloniti iz radne komore uređaja. Objekt je moguće ukloniti tek kada su ispunjeni svi sigurnosni uvjeti kao što su: da je temperatura radne komore dovoljno niska za rukovanje i da nema više pomičnih dijelova unutar uređaja. Ovisno o tehnologiji aditivne proizvodnje, uklonjenim objektima iz radne komore moguće je odmah rukovati dok neki procesi zahtijevaju dodatnu završnu obradu prije dobivanja finalnog proizvoda. Završna obrada zahtijeva znanje i vještinu operatera, a sama obrada se sastoji od čišćenja fizičkog objekta, uklanjanja ostataka materijala i strukturnih potpora. Kod nekih je postupaka aditivne proizvodnje potrebno dodatno sušenje i očvršćivanje materijala. Nakon završne obrade, dobiva se finalni produkt koji je spreman za korištenje.

2.3 TEHNOLOGIJE ADITIVNE PROIZVODNJE

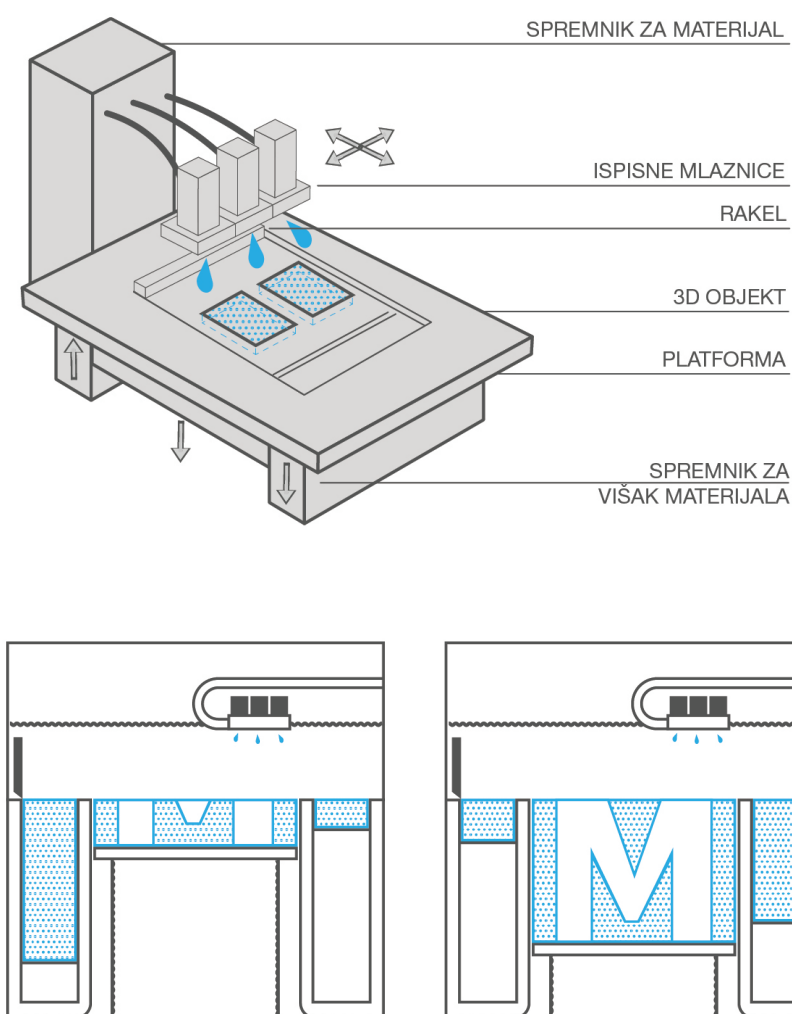
Tehnologije aditivne proizvodnje se razlikuju po vrsti materijala i načinu izrade proizvoda. 3D tisak, 3D print, aditivni procesi, sve su to nazivi za tehnologije aditivne proizvodnje. Kako bi se standardizirali nazivi za sve istoznačnice, međunarodna agencija ASTM International standardizirala je terminologiju za tehnologije aditivne proizvodnje. Standard ISO/ASTM 52900 izrađen je 2015. godine kako bi se standardizirali nazivi i terminologije korištene u procesima aditivne proizvodnje [31], [32]. Sukladno standardu ISO/ASTM 52900, tehnologije aditivne proizvodnje podijeljene su u sedam skupina:

1. otiskivanje veziva na materijale (*binder jetting*),
2. taloženje materijala pod djelovanjem izvora energije (*directed energy deposition*),
3. ekstrudiranje materijala (*material extrusion*),
4. otiskivanje materijala (*material jetting*),
5. spajanje praškastog materijala u slojevima (*poweder bed fusion*),
6. laminiranje slojeva materijala (*sheet lamination*) i
7. polimerizacija materijala u komori (*vat photopolymerization*).

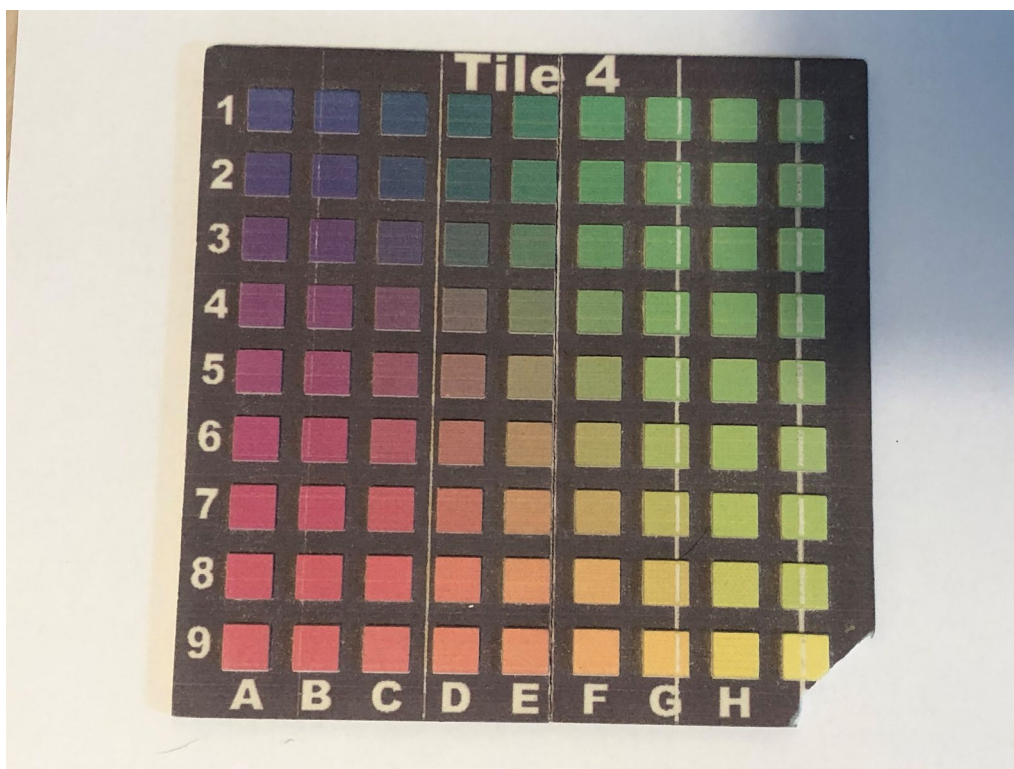
2.3.1 Otiskivanje veziva na materijale (*binder jetting* – BJ)

Postupak aditivne proizvodnje razvijen na Massachusetts Institute of Technology – MIT 1990-tih godina s izvornim nazivom *Three Dimensional Printing* – 3DP. U ovom postupku sredstvo za tekuće vezivanje selektivno se nanosi na sloj praškastog materijala. Kada je sloj otisnut, radna platforma spušta se za visinu sljedećeg sloja, na koju se nanosi novi sloj praškastog materijala po kojem se opet nanosi vezivo [33]. Na slici (Slika 1) je prikazan postupak izrade otiskivanjem materijala. Cijeli proces se ponavlja sve dok se ne izradi cijeli objekt. Potporne strukture nisu potrebne jer se praškasti materijal nanosi u cijelom sloju.

Završna obrada uključuje uklanjanje nevezanog praškastog materijala ispuhivanjem zraka pod visokim tlakom te nanošenje dodatnog veziva na površinu objekta kako bi mu se ojačala struktura. Praškasti materijali koji se koriste u ovom postupku mogu biti na bazi gipsa, pijeska, polimera ili metala. U ovom postupku postoji mogućnost nanošenja boje pomoću ispisnih glava čime se omogućuje izrada vizualno atraktivnih prototipova. Zbog mogućnosti potpunog kolor 3D otiska prikazanog na slici (Slika 2), ovaj postupak se često primjenjuje prilikom vizualizacije i izrade atraktivnih modela.



Slika 1 Proces izrade 3D otiska postupkom otiskivanja veziva na materijale



Slika 2 Kolor 3D otisak izrađen 3DP postupkom

Prednosti ovog postupka su: brzina izrade, preciznost izrade, mala potrošnja energije, mogućnost recikliranja materijala, mogućnost bojanja modela, izrada vrlo tankih stjenki, nisu potrebne potporne strukture.

Nedostaci ovog postupka su: loša mehanička svojstva materijala, potrebna završna obrada, visoka hrapavost.

2.3.2 Taloženje materijala pod djelovanjem izvora energije (*directed energy deposition* – DED)

Postupak taloženja materijala pod djelovanjem izvora energije omogućuje stvaranje objekta topljenjem materijala dok se taloži. U ovom postupku se koriste praškasti polimerni, keramički i metalni materijali. Primjena ovog postupka je najčešće za metalne prahove te se stoga ova tehnologija naziva i tehnologijom taloženja metala. U ovom se postupku energija usmjerava u fokusirano područje gdje se tali materijali u trenutku nanošenja, odnosno

taloženja. Izvor toplinske energije je uobičajeno laser ili elektronski snop. Za izradu objekata kompleksne geometrije se koriste strukturne potpore koje se uklanjaju u završnoj obradi.

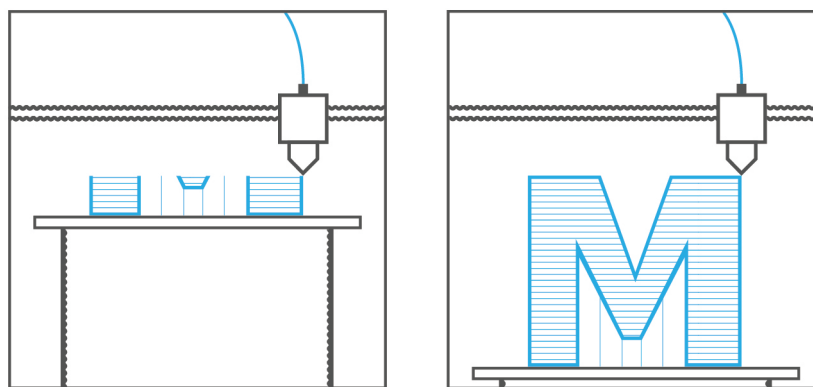
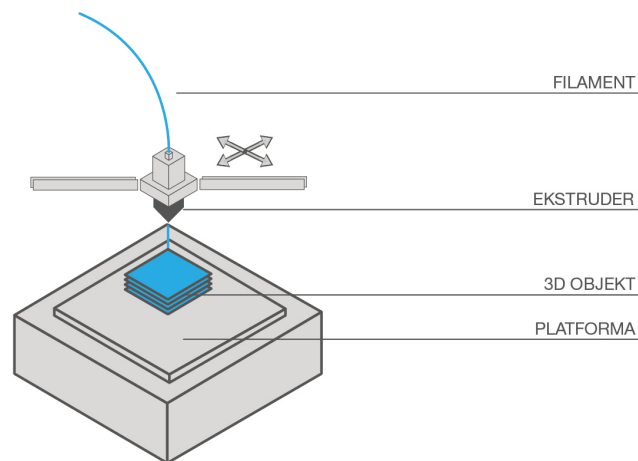
Prednosti postupka su: mogućnost izrade ispunjenih modela s kontroliranim mikrostrukturnim značajkama, korištenje raznih metala i njihovih legura.

Nedostaci postupka su: loša razlučivost, hrapavost površine, mala brzina izrade, potrebna je završna obrada.

2.3.3 Ekstrudiranje materijala (*material extrusion*)

Ekstrudiranje materijala je najdostupnija i najraširenija tehnologija aditivne proizvodnje [34]. Tehnologiju *Fused Deposition Modeling* – FDM je razvila tvrtka Stratasys, a njezin osnivač Scott Crump je patentirao tehnologiju i zaštitio naziv FDM kao zaštitni znak tvrtke Stratasys [8], [35], [36]. Pokretanjem *RepRap* projekta, FDM tehnologija dobiva drugi naziv *Fused Filament Fabrication* – FFF i postaje sve primijenjenija tehnologija u raznim granama industrije [9], [32].

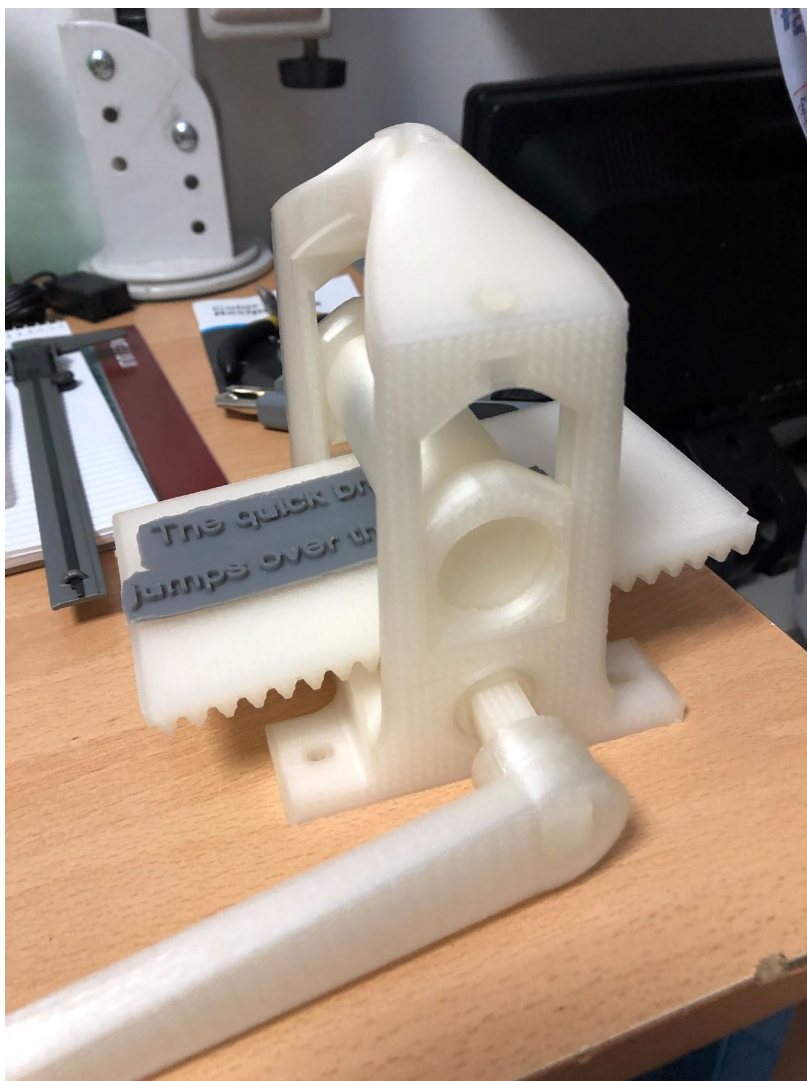
U ovom postupku aditivne proizvodnje, polimerni se materijal u obliku žice uvodi u grijanu komoru gdje se tali i pomoću mlaznice nanosi na radnu platformu. Prilikom istiskivanja materijala iz mlaznice, materijal hlađenjem prelazi u kruto stanje. Princip rada je vrlo sličan radu pištolja na vruće ljepilo. Ljepilo u krutom obliku se pritiskom gura u grijanu komoru gdje se topi, a zatim prolazi kroz mlaznicu i nakon toga se hladi i prelazi u kruto stanje. Nakon nanošenja cijelog sloja, radna platforma ili mlaznica se pomiču za debljinu jednog sloja i nastavljaju nanošenje idućeg sloja. Postupak izrade prikazan je na slici (Slika 3). Dimenzijska točnost izrade se određuje promjerom mlaznice i visinom sloja. Prilikom izrade, u svakom se sloju prvo nanosi materijal za obrub, a nakon njega se radi ispuna objekta. Ispuna objekta ne mora biti gusta kao obrub, nego može biti manje gustoće kako bi se uštedjelo na materijali i ubrzao proces aditivne proizvodnje. Osim gustoće ispune, odabire se i uzorak ispune koji imaju veliki utjecaj na mehanička svojstva finalnog produkta. Princip nanošenja sloja na sloj materijala stvara vidljive linije, a finalni produkt je mehanički oslabljen u jednom smjeru zbog samog postupka izrade.



Slika 3 Proces izrade 3D otiska postupkom ekstrudiranja materijala

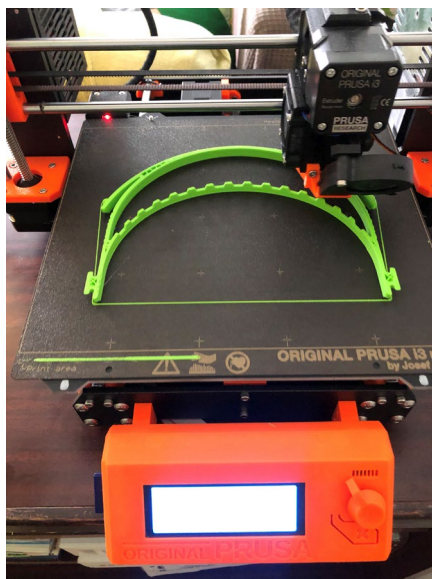
Ekstrudiranje materijala je vrlo skalabilna tehnologija koja omogućuje korištenje više mlaznica za nanošenje materijala. U sustavima s dvije ili više mlaznica, moguće je korištenje više različitih materijala istovremeno. U praksi se jedna mlaznica koristi za nanošenje materijala, dok druga mlaznica služi za izradu potpornih struktura.

Kod izrade objekta kompleksne geometrije se upotrebljava potporna struktura koja se može ukloniti mehanički ili kemijski. Potporna struktura može biti napravljena od istog materijala kao i sam objekt, a u tom se slučaju nakon procesa izrade, mehanički uklanja. Kada se koriste namjenski materijali za potpore, uklanjaju se kemijskim putem pomoću raznih otapala. Na slici (Slika 4) je prikazan funkcionalni prototip tiskarske preše s pokretnim dijelovima izrađen u FFF tehnologiji aditivne proizvodnje.



Slika 4 Funkcionalni prototip tiskarske preše

Zbog covid-19 pandemije i nestašice zaštitnih vizira, aditivne su se tehnologije proizvodnje pokazale kao vrlo praktično rješenje jer imaju mogućnost izrade proizvoda na zahtjev, odnosno potrebno je poslati samo digitalnu pripremu na uređaj i proizvodnja može započeti. Zaštitni vizir izađen PETG materijalom prikazan je na slici (Slika 5).



Slika 5 Izrada zaštitnog vizira na uređaju za aditivnu proizvodnju postupkom ekstrudiranja materijala

Na slici (Slika 6) prikazan je primjer personaliziranog finalnog proizvoda, sjenila za žarulje izrađenog od PETG materijala FFF postupkom izrade.



Slika 6 Sjenila za žarulje izrađena FFF postupkom izrade

Na slici (Slika 7) su prikazani od biorazgradivog materijala PLA, izrađeni modeli mikroorganizama koji se koriste u obrazovanju i edukaciji.



Slika 7 Vizualizacija mikro organizama korištenih u edukaciji

Fotogrametrijskim 3D skeniranjem su napravljene digitalne kopije kipova koje su zatim skalirane i reproducirane aditivnim postupkom proizvodnje (Slika 8).



Slika 8 Replike kipova proizvedene FFF postupkom izrade

Razvoj grafičkog proizvoda, ambalaže za kremu, prikazana je na slici (Slika 9). Proizvod je napravljen od biorazgradivog materijala PLA.



Slika 9 Razvoj ambalaže za promociju proizvoda

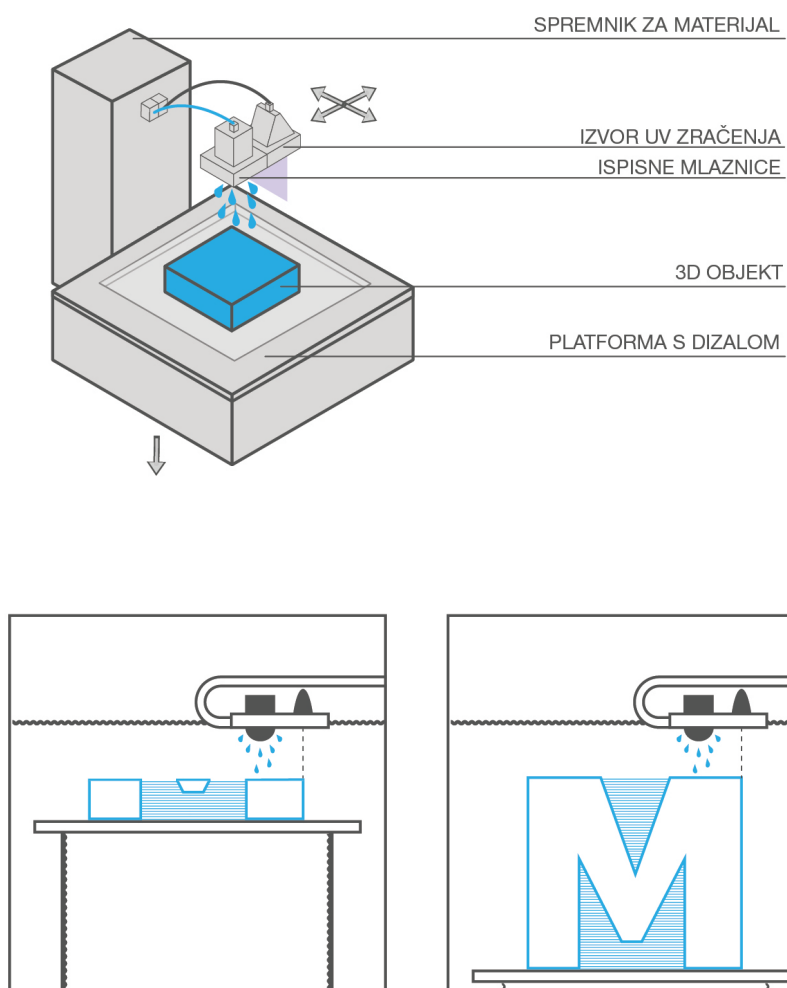
Prednosti postupka: izbor materijala, brzina izrade, kontrola ispune objekta, nije potrebna završna obrada ukoliko nema strukturnih potpora, biorazgradivost materijala, materijal je moguće lagano dodatno obrađivati (brusiti, polirati, pjeskariti, lijepiti, bojati).

Nedostaci postupka: kompleksna geometrija objekta zahtijeva izradu potpornih struktura koje znatno usporavaju brzinu izrade, točnost izrade, anizotropni finalni produkt, vidljivi slojevi izrade, potrebna dodatna obrada za dobivanje glatke površine.

2.3.4 Otiskivanje materijala (*material jetting*)

Otiskivanje materijala je postupak aditivne proizvodnje tehnološki vrlo sličan postupku inkjet tiska gdje se umjesto bojila nanosi niz kapljičnih slojeva materijala koji tvore fizički objekt. Ispisne glave selektivno nanose kapljice fotopolimernog materijala na radnu platformu koje se zatim osvijetljavaju UV svjetlom. Nakon što se sloj nanese i očvrstne, radna se platforma spušta za visinu novog sloja i postupak se ponavlja. Ukoliko je za izradu objekta potrebna

potporna struktura, u ovom se postupku istodobno stvara kad i sami objekt. Potporna struktura izrađuje se od materijala koji se u završnoj obradi uklanja kemijskim putem, odnosno otapanjem. Ovaj postupak aditivne proizvodnje je vrlo precizan zbog rezolucije ispisnih glava, a to se odlikuje vrlo glatkim površinama. Također, ima mogućnost izrade objekta od materijala različitih karakteristika. Materijali mogu biti kruti i elastični, a postepeno se u slojevima mogu mijenjati. Ovaj postupak omogućuje potpuni kolor tisak, u kojemu se u svakom sloju nanosa materijala mogu nanijeti i razna bojila.



Slika 10 Proces izrade 3D otiska postupkom otiskivanja materijala

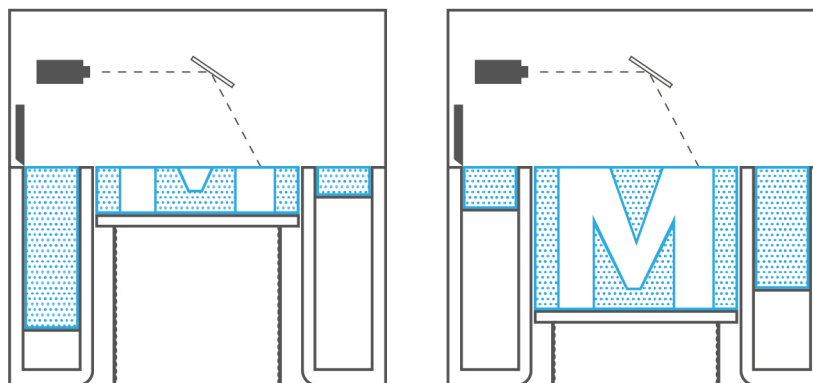
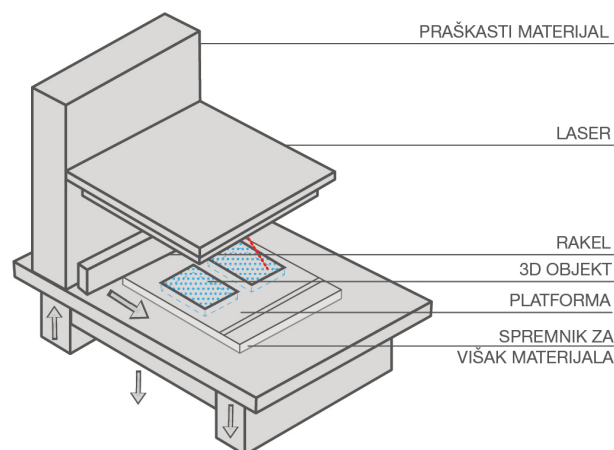
Prednosti postupka: vrlo glatka površina izrađenog objekta, preciznost izrade, mogućnost izrade u boji, jednostavno uklanjanje strukturnih potpora, brzina izrade, izbor mehaničkih karakteristika materijala, izrada objekta od više materijala i boja.

Nedostaci postupka: slaba mehanička svojstva za funkcionalnu primjenu, ograničena preciznost izrade prilikom izrade većih objekata.

2.3.5 Spajanje praškastog materijala (e. *poweder bed fusion*)

Ovo je postupak aditivne proizvodnje u kojemu se koristi toplinska energija za selektivno stapanje praškastog materijala. Selektivno lasersko srašćivanje (e. *selective laser sintering* – SLS) je postupak aditivne proizvodnje koji su razvili i patentirali Joseph J. Beaman, Carl R. Deckard na University of Texas System 1989. godine. Primjena SLS postupka je među prvim postupcima aditivne proizvodnje koja je komercijalno korištena za izradu prototipova, a komercijalizirala ju je tvrtka DTM u SAD-u. Tvrtka DTM je 1992. godine u SAD-u predstavila svoj prvi komercijalni uređaj za SLS postupak aditivne proizvodnje nazvan SLS Sinterstation 2000. 2001. godine tvrtku DTM je kupila tvrtka 3D Systems iz SAD-a, koja još uvijek proizvodi i isporučuje sustave temeljene na SLS postupku aditivne proizvodnje. Novi sustavi imaju niz poboljšanja u preciznosti izrade, ponovljivosti postupka, završnoj obradi i brzini izrade. SLS postupak je izvorno razvijen za rad s polimernim materijalima, ali se postupak nastavio razvijati i prilagodio se za rad s nizom praškastih materijala koji uključuju polimere, metale, staklo, keramiku i kompozite. [5], [32], [37], [38]

Temeljni princip rada ovog postupka uključuje izvor jednog ili više izvora toplinske energije za selektivno stapanje praškastog materijala. Kako je ovaj postupak prvenstveno razvijen za proizvodnju polimernih prototipova, kao izvor topline za stapanje praškastog materijala se koriste laseri. Daljnjim razvojem ovog postupka, proširena je primjena i na druge praškaste materijale kao što su keramika, metali i kompoziti, gdje se koriste dodatni izvori toplinske energije [25], [32].



Slika 11 Proces izrade 3D otiska postupkom spajanja praškastih materijala

Proces izrade odvija se u kontroliranom okruženju. Radna komora se grije na temperaturu neposredno ispod tališta praškastog materijala koji se nanosi u vrlo tankom sloju (0.075 – 0.1 mm) na radnu platformu. Sloj nanesenog praškastog materijala izravnavaju se valjcima ili rakelom za izravnavanje. Zagrijavanjem radne komore i praha sprječava se uvijanje materijala prilikom laserskog skeniranja uslijed toplinskog širenja i stezanja i omogućuje se korištenje lasera manje toplinske energije. Komora se ispunjava internim plinom kako bi se spriječila oksidacija i propadanje praškastog materijala. Kada se nanese sloj praha zagrije, fokusirana zraka CO₂ lasera pomoću galvanometara skenira sloj i selektivno stapa sloj materijala. Okolni prah koji nije selektivno stopljen služi kao potpora za sljedeći sloj, stoga u ovom postupku nije potrebna izrada strukturnih potpora. Nakon završetka sloja, radna se platforma spušta za visinu novog sloja praškastog materijala. Zatim se nanosi novi sloj praškastog materijala koji

se izravnavava i započinje proces laserskog skeniranja i selektivnog stapanja sloja materijala. Ovaj se postupak ponavlja sve dok se ne izradi cjelovit predmet. Na slici (Slika 11) prikazan je proces izrade. Nakon završetka izrade potreban je određeni vremenski period kako bi se izrađeni predmet ohladio na temperaturu pogodnu za daljnje rukovanje. Ukoliko se izrađeni predmet i / ili sloj praha prerano izlože temperaturi okoline, moguća je degradacija sloja zbog prisutnosti kisika ili zbog nagle promjene temperature te se mogu pojaviti neželjena uvijanja. Nakon hlađenja radne komore i uklanjanja gotovih predmeta, potrebno je ukloniti praškasti materijal koji nije selektivno stopljen. Praškasti materijal se uglavnom uklanja puhalicom na komprimirani zrak. Praškasti materijal koji nije selektivno spojen, moguće je reciklirati i ponovno koristiti, a dobiveni proizvod, ako je potrebno, može ići na dodanu završnu obradu. [25], [32], [37], [39]



Slika 12 Uređaj za aditivnu proizvodnju postupkom spajanja praškastog materijala



Slika 13 Replika fosila napravljena od polimernog materijala postupkom spajanja praškastih materijala

Termoplastični materijali su zbog niskih temperatura taljenja i niske toplinske vodljivosti pogodni za obradu u praškastom obliku. Najčešće korišteni materijal je termoplastični polimer, poliamid (PA), kojeg karakterizira dugi životni vijek i visoka kemijska otpornost. Za poboljšanje mehaničkih svojstava produkta, moguće je koristiti kompozitne materijale koji se sastoje od polimera i drugih materijala kao što je aluminij, staklo, ugljik i grafit. [25], [32], [37], [39]

Poliamidni materijal ima dobra mehanička svojstva, veliku otpornost na kemikalije, biokompatibilan, mogućnost dodatne obrade (bojanje, poliranje, sastavljanje iz više dijelova). [40], [41]

Prednosti ovog postupka je mogućnost izrade funkcionalnih dijelova kompleksne geometrije. Brzina izrade je velika jer se nanosi cijeli praškasti sloj u kojemu nestopljeni praškasti sloj služi kao potpora idućem sloju. Druge prednosti su izbor materijala, termoplastika, metala, keramike i kompozita. U ovom postupku je moguće recikliranje materijala, gdje se nestopljeni praškasti sloj može ponovo iskoristiti. [32], [42]

Nedostaci ovog postupka su dugo vrijeme hlađenja, potrebno znanje operatera za završnu obradu i čišćenje, poroznost i gustoća materijala. [32], [42]

Ovaj postupak aditivne proizvodnje zbog velikog izbora materijala, koji uključuju polimere, metale, keramiku i kompozit,) ima sve veću primjenu u izradi finalnih (krajnjih) proizvoda [39].

2.3.6 Laminiranje slojeva materijala (*sheet lamination*)

Laminiranje slojeva materijala je postupak aditivne proizvodnje koji spada među prve komercijalno dostupne tehnologije aditivne proizvodnje. Ovaj postupak gdje se listovi materijala spajaju lijepljenjem, poznat je i pod nazivom *laminated object manufacturing* – LOM. Najčešće se kao materijali koriste listovi papira ili polimera, ali, potencijalno, svaki bi se plosnati materijal mogao koristiti. Princip rada ovog postupka je da se svaki sloj materijala reže u željenu formu laserom ili nožem te se spaja s sljedećim slojem dok se ne dobije završni proizvod. [32], [42]

Podjela unutar ovog postupka aditivne proizvodnje, može se napraviti na temelju redoslijeda povezivanja i rezanja slojeva materijala. U postupku „slijepi – formiraj“ prvo se slojevi materijala međusobno povezuju, a zatim slijedi oblikovanje dok se u postupku „formiraj – slijepi“ prvo svaki sloj oblikuje, a tek onda se slojevi međusobno povezuju. [32]

Postupak metodom „slijepi – formiraj“ se sastoji od tri koraka: postavljanje sloja materijala, lijepljenje sloja na podlogu i oblikovanje u željenu formu. Izvorni su materijali imali lijepljivu podlogu preko kojih je prelazio zagrijani valjak i stvarao pritisak koji je rastopio ljepilo i stvarao vezu između slojeva. Zatim se željena forma sloja oblikuje laserom ili mehaničkim nožem. Ovaj postupak se ponavlja sve dok se ne napravi finalni proizvod. Nakon završetka nanošenja slojeva, potrebna je ručna završna obrada gdje se uklanja višak materijala nastao oblikovanjem slojeva. Novi sustavi kao materijal koriste običan papir, a kao vezivo se između slojeva koristi lijepilo koje se nanosi selektivno po površini sloja tamo gdje je potrebno. Korištenjem *inkjet* ispisnih glava u boji omogućuje se izrada potpunih kolor 3D objekata. [32]

Metodom „formiraj – slijepi“ prvo se svaki sloj oblikuje, a onda se spaja s drugim slojem. Ovaj je pristup zanimljiv u izradi proizvoda od metalnih i keramičkih materijala. Metoda je još u fazi istraživanja i koristi se u znanstvene svrhe [32].

Prednosti ovog postupka su: nema zaostalih naprezanja i izobličenja, malo skupljanje, brza izrada velikih dijelova, mogućnost izrade kolor proizvoda, mogućnost korištenja raznih materijala uključujući papir, polimer, metal i keramiku. [25], [32], [37], [42]

Nedostaci postupka su: potrebna je ručna završna obrada i uklanjanje viška materijala, papir je potrebno dodatno tretirati kako bi se zaštititi od trošenja i upijanja vlage, kontrola točnosti visine slojeva ovisi o sloju materijala koji može oscilirati zbog bubrenja ili greške u proizvodnji, mehanička i toplinska svojstva su nehomogena zbog ljepila između slojeva, nije moguće precizno izraditi male detalje, nemogućnost izrade rupičastih i šupljih proizvoda [25], [32], [37], [42].

Primjena ovog postupka naviše se koristi kod izrade kalupa za lijevanje, topografskih karti i maketa u arhitekturi [32].

2.3.7 Polimerizacija materijala u komori (*vat photopolymerization*)

Prva komercijalno dostupna tehnologija aditivne proizvodnje svrstana je u skupinu polimerizacije materijala u komori. Tijekom 1980 – ih su se godina, neovisna istraživanja širom svijeta, bavila konceptom aditivne proizvodnje, odnosno stvaranju trodimenzionalnih objekata iz niza slojeva [14]. Postupak aditivne proizvodnje temeljen na selektivnom povezivanju površinskog sloja fotopolimera nazvan stereolitografija – SLA razvio je i patentirao osnivač tvrtke 3D Systems, Charles W. Hull, 1984. godine [4].

Prvi komercijalno dostupni uređaj za aditivnu proizvodnju predstavljen je na izložbi AUTOFACT u Detroitu, SAD, 1987. godine. Uređaj nazvan SLA-1 je predstavio osnivač tvrtke 3D Systems, Charles W. Hull (Slika 14). [25], [43]



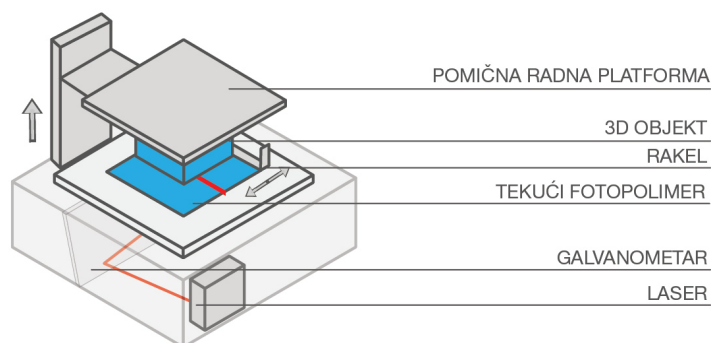
Slika 14 Prvi komercijalni uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju - SLA-1 [38]

U ovom se postupku kao materijal koristi tekući fotopolimer koji se selektivno osvjetljava kako bi se potaknula kemijska reakcija te kako bi materijal prešao iz tekućeg u kruto stanje. Kod fotopolimera koji se koriste u tehnologijama aditivne proizvodnje kemijska reakcija pobuđuje se osvjetljavanjem izvorom svjetla u UV i vidljivom dijelu spektra. Postoje i drugi izvori zračenja fotopolimera, kao što su IR zračenje, gama zrake, rendgenske zrake ali se koriste za druge namjene [32].

Postupak polimerizacije materijala u komori se može razdvojiti u tri skupine uređaja koje se razlikuju po načinu osvjetljavanja fotopolimernih materijala:

- točkasti izvor svjetla u kojemu se uglavnom kao izvor svjetla koristi laser u UV području,
- projekcija maski ili osvjetljavanje cijelog sloja odjednom,
- dvofotonski postupak u kojemu se u jednoj točki presijecaju dvije zrake izvora svjetla, uglavnom lasera.

Shematski prikaz uređaja s točkastim izvorom svjetla je prikazan na slici (Slika 15), gdje su prikazani glavni dijelovi sustava, uključujući izvor svjetla, optiku, pomičnu radnu platformu, ravnalo za poravnanje nanosa sloja i fotopolimer.

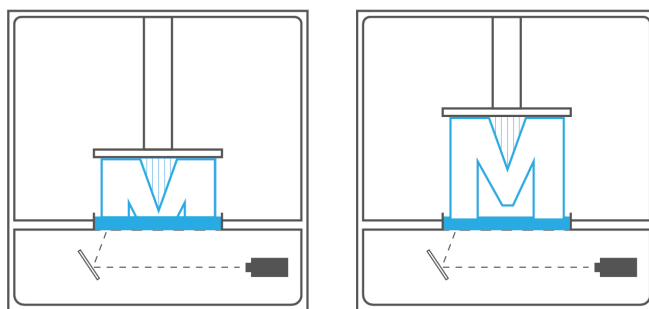


Slika 15 Shematski prikaz stereolitografskog uređaja s točkastim izvorom svjetla [32]

Uređaj za polimerizaciju materijala u komori se sastoji od zasebnih sustava od kojih svaki ima svoju zadaću. Sustav za punjenje je zadužen za punjenje radne komore fotopolimerom i ravnomjernu raspodjelu pomoću ravnala. Sustav za radnu platformu se sastoji od radne platforme i dizala za pomicanje radne platforme. U sustavu komore fotopolimera, pohranjuje se fotopolimer, nadzire njegova količina i po potrebi se grije. Sustav osvjetljavanja generira lasersku zraku koja se kroz optičke leće i galvanometre usmjerava na skeniranje sloja materijala. Jačina lasera je u rasponu od 0.1 do 1 W, što je u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje vrlo mala snaga. Sustav za nadzor i kontrolu upravlja provođenjem operacija i zadaća na ostalim sustavima uređaja. Učitavanjem parametara iz digitalnog zapisa provodi se niz operacija potrebnih za pripremu i izradu trodimenzionalnog objekta. Naredbe se šalju ostalim sustavima koji započinju svoje operacije. Senzori se koriste za provjeru razine fotopolimera, temperature, ispravnosti pomičnih dijelova radne platforme i rakela. Sustav kontrole osvjetljavanja podešava veličinu laserske točke, dubinu fokusa i brzinu skeniranja. Sustav za kontrolu radnog okruženja provjerava temperaturu fotopolimera i radne okoline te prilagođava temperaturu i vlažnost. [14], [32]

Korištenje uređaja za postupak polimerizacije materijala u komori je uglavnom automatski proces. Operator prilikom izrade digitalne odabire lokacije strukturnih potpora na objektu, određuje orijentaciju objekta, visinu sloja i materijal.

Postupci polimerizacije materijala u komori imaju dva načina izrade objekta, ovisno o dizajnu samog uređaja proizvodni proces može objekt graditi odozdo prema gore ili odozgo prema dolje. Proces izrade 3D otiska (odozdo prema gore) je prikazan na slici (Slika 16).

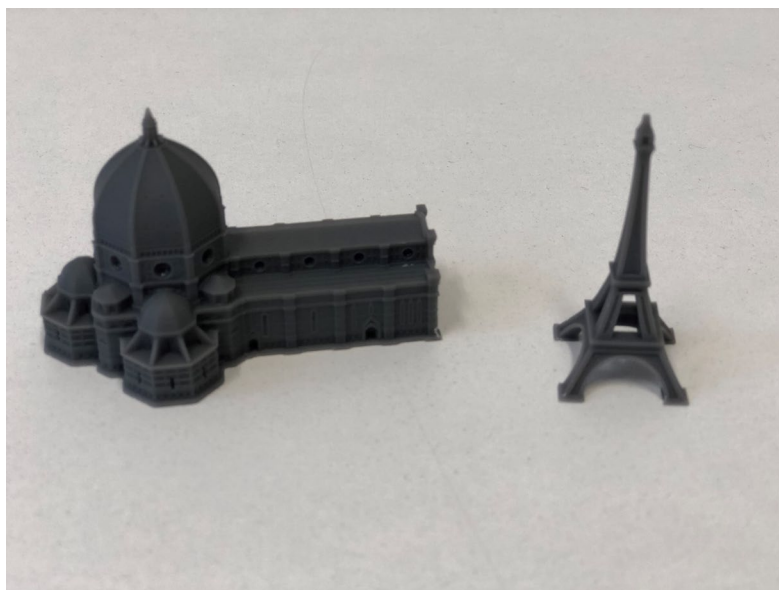


Slika 16 Proces izrade 3D otiska postupkom polimerizacije materijala u komori

Aditivni postupak polimerizacije materijala u komori ima vrlo široku primjenu, na slici (Slika 17), prikazan je primjer 3D otisaka korištenih za proizvodnju nakita. Na slici (Slika 18), prikazan je primjer izrade objekata vrlo detaljne strukture.

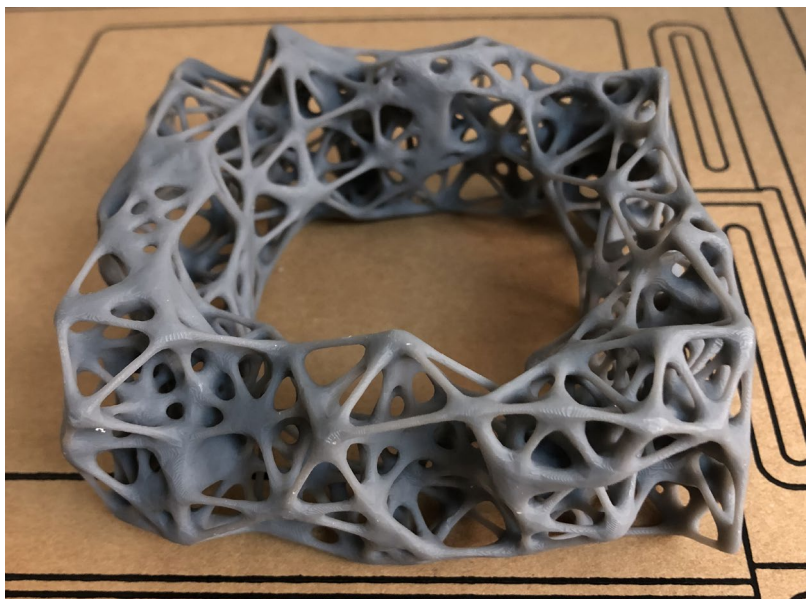


Slika 17 Primjer SLA tehnologije u proizvodnji nakita



Slika 18 Primjer izrade preciznih minijatura pomoću SLA tehnologije aditivne proizvodnje

Generativnim dizajnom napravljena je mrežasta struktura, a 3D otisak je napravljen SLA postupkom aditivne proizvodnje.



Slika 19 Primjer generativnog dizajna mrežastih struktura izrađenih SLA postupkom aditivne proizvodnje

Primjer kako aditivne tehnologije proizvodnje mogu izraditi jedinstvene proizvode, prikazan je na slici (Slika 20) gdje su napravljene personalizirane drške za britvice. Proizvodi su napravljeni na uređaju za SLA postupak aditivne proizvodnje (Slika 21).



Slika 20 Izrada personalizirane drške britvice



Slika 21 Uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju - Formlabs Form 3

Kod uređaja koji koriste postupak odozdo prema gore, izvor se svjetla nalazi ispod komore koja ima prozirno dno. Prilikom početka izrade objekta, visina radne platforme se spušta prema dnu do debljine jednog sloja. Izvor svjetla zatim osvjetljava tanki sloj fotopolimera koji se stvrdnjava i lijepi na radnu platformu. Zatim se radna platforma pomiče prema gore kako bi rakel ravnomjerno rasporedio novi sloj fotopolimera. Radna platforma se opet spušta za debljinu sljedećeg sloja koji se osvjetljava. Postupak se ponavlja sve dok se ne osvjetli i zadnji sloj.

Uređaji koji imaju postupak odozgo prema dolje izvor svjetla se postavlja iznad radne platforme. Radna platforma je uronjena u komoru punu polimera na debljinu jednog sloja. Nakon što se prvi sloj osvjetli, radna se platforma uranja u komoru za debljinu sljedećeg sloja. Zatim, površinom komore prolazi rakel koji osigurava ravnomjernu raspodjelu fotopolimera na radnoj platformi. Osvjetljava se sljedeći sloj i postupak se ponavlja sve dok nije nanesen i osvjetljen zadnji sloj. Nakon završetka postupka izrade, radna platforma je potpuno uronjena u komoru.

Postupak s točkastim izvorom svjetla (stereolitografija) izrade započinje tako da se tekući fotopolimer iz spremnika prelijeva u radnu komoru. Fotopolimeri su vrlo gusti pa se komora grije kako bi se smanjila viskoznost polimera. Zatim se radna platforma pomiče na svoju početnu poziciju, na visinu debljine prvog sloja, i laserska zraka uz pomoć galvanometara skenira i selektivno osvjetljava sloj koji se zatim stvrdnjava. Nakon što se sloj stvrdne, radna platforma se pomiče kako bi rakel za izravnavanje sloja fotopolimera ispunilo nedostatak materijala koji je iskorišten za stvaranje prethodnog sloja. Zatim se radna platforma vraća na položaj za nanošenje sljedećeg sloja. Cijeli postupak se ponavlja do završetka izrade trodimenzionalnog produkta. Nakon dovršetka postupka izrade, potrebna je dodatna obrada objekta kako bi se dobio finalni produkt. Prvo je objekt potrebno isprati kako bi se uklonile strukturne potpore i ostatak polimera koji nije polimeriziran. Zatim je potrebno dodatno sušenje UV svjetlom kako bi objekt prešao iz „zelenog stanja“ u potpuno polimerizirano stanje. [12], [14], [17], [32], [39]

Postupak u kojemu se projiciraju maske ili se osvjetljava cijeli sloj skoro je identičan postupku s točkastim izvorom svjetla. Glavna prednost postupka projiciranja maske je brzina

jer može osvijetliti cijeli sloj odjednom, što je brže od skeniranja laserskom zrakom. Sustave za projiciranje maski u aditivnoj proizvodnji razvija nekoliko grupa širom svijeta. Prilikom razvoja ovog postupka koristili su se LCD zasloni i prostorni modulatori svjetla za stvaranje dinamičnih maski [44]. Moderniji uređaji koriste sustave mikro ogledala koji djeluju kao svjetlosni prekidač (e. *Digital Micromirror Devices* – DMD). Sustav digitalne obrade svjetla (e. *Digital Light Processing* – DLP) u kojemu je spojeni više DMD uređaja razvio je Larry Hornbeck u tvrtki Texas Instruments 1987. godine. Svi sustavi temeljeni na DLP sustavu kao izvor zračenja koriste UV lampe ili lasere s UV spektrom. [14], [32], [44]–[49]

U dvofotonskom postupku, proces zahtijeva da se sudare dvije zrake lasera kako bi se mogao pokrenuti proces polimerizacije. Velika prednost ovog postupka je razlučivost procesa polimerizacije jer presijecanje dvije laserske zrake u sjecištu stvara dovoljno jaku energiju za precizni postupak polimerizacije. Ovim je postupkom postignuta rezolucija manja od 0.2 μm . Dvofotonski postupak je prvi put izumljen 1970-ih godina za izradu trodimenzionalnih dijelova. U ovom su postupku korištena dva lasera koja su osvjetljavala komoru koja je bila ispunjena fotopolimerom. Kada su se fokusirane laserske zrake presijecale, u toj točki se stvarala koncentracija fotona koja je bila dovoljno velika da započne postupak polimerizacije. Daljnjim se istraživačkim radom pokazalo da je za ovaj postupak moguće koristiti standardne fotopolimerne materijale namijenjene SLA i DLP postupcima aditivne proizvodnje. [14], [32], [50]–[52]

Osnovna razlika između postupka s točkastim izvorom svjetla i postupka projiciranja maski je izvor svjetla. Postupak s točkastim izvorom svjetla koristi laser, dok postupak projiciranja maski koristi izvor svjetla temeljen na DMD tehnologiji. Postupak projiciranja maski je zbog osvjetljavanja cijelog sloja istovremeno znatno brži od postupka s točkastim izvorom svjetla koji selektivno skenira površinu pomoću galvanometara. Zbog ograničenja veličine DMD uređaja, postupak projiciranja maski je ograničen rezolucijom i veličinom objekta kojeg može napraviti. Standardni DMD uređaj za maskiranje ima rezoluciju od 1024 x 780, dok debljina laserske zrake kod točkastog izvora svjetla je između 0.13 mm i 0.15 mm. [14], [32], [39]

Postupci polimerizacije materijala u komori imaju niz prednosti u odnosu na druge tehnologije aditivne proizvodnje. Njihova velika prednost je preciznost izrade, dimenzijska

točnost i kvaliteta dobivene površine. Druga velika prednost je fleksibilnost postupka, mogućnost prilagodbe veličine uređaja kao i načina stvaranja objekta. Moguće je koristiti različite izvore svjetla, kao što su laseri, UV lampe i LED ekrani, a za maskiranje, skeniranje i osvjetljavanje sloja moguće je korištenje galvanometra i DMD uređaja. Prije procesa izrade objekta u tekući fotopolimerni materijal, moguće je dodavanje bojila kako bi se dobila željena boja produkta. Nakon što operater izradi digitalnu pripremu, ostatak proizvodnog procesa je automatiziran. [14], [32], [39]

Nedostatak postupka polimerizacije materijala u komori su svojstva fotopolimernih materijala koji se koriste za izradu objekta. Imaju lošija mehaničke svojstva od termoplastika koje se koriste u injekcijskom brizganju. Zbog utjecaja sunčeve energije s vremenom materijal stari te mu se narušavaju vizualna i mehanička svojstva. Za zaštitu je materijala potrebno površinu premazati zaštitnim premazima. Materijal je krhak i ima kraći vijek trajanja od drugih tehnologija aditivne proizvodnje. Potrebna je dodatna završna obrada. Nakon završetka postupka aditivne proizvodnje, objekt je prvo potrebno isprati i zatim dodatno sušiti kako bi se završio postupak polimerizacije. [14], [32], [39]

Zbog glatke površine, preciznosti izrade i vizualnih karakteristika, primjena postupka polimerizacije materijala u komori često se koristi za izradu prototipova koji se kasnije proizvode drugim tehnologijama kao npr. injekcijsko brizganje termo plastika. Prilikom izrade vizualno atraktivnih prototipova, fotopolimernim materijalima je moguće dodavanje bojila kako bi se dobio obojeni završni proizvod. Ovaj se postupak aditivne proizvodnje zbog svoje dimenzijske točnosti izrade često koristi u industrijama gdje je potrebno izraditi vrlo precizan i detaljan objekt, kao npr. prilikom izrade nakita i u stomatologiji. Nedostatci polimernih materijala ograničavaju upotrebu prilikom proizvodnje funkcionalnih dijelova.

Stereolitografska tehnologija aditivne proizvodnje, odnosno tekući fotopolimerni materijali omogućuju operateru interakcije prije samog postupka aditivne proizvodnje. U spremnike je materijala moguće dodati razna bojila, koja zatim u postupku proizvodnje stvaraju proizvode različitih kolorimetrijskih karakteristika. Zbog kvalitete površine proizvoda koja se često uspoređuje s nekim tehnologijama klasične proizvodnje kao što je injekcijsko brizganje plastike i mogućnosti odabira kolorimetrijskih karakteristika, SLA postupak je često korišten

u svrhu razvoja proizvoda. Primjer razvoja prototipova ili gotovih proizvoda, prikazan je na slici (Slika 22).



Slika 22 Primjer kolor prototipova izrađenih SLA postupkom [53]

2.4 STANDARDI I KONTROLA KVALITETE TEHNOLOGIJA ADITIVNE PROIZVODNJE

Aditivna proizvodnja je stekla popularnost zbog mogućnosti izrade geometrijski kompleksnih struktura koje klasičnim metodama proizvodnje nije bilo moguće napraviti. U ranoj su se fazi razvoja komercijalnih uređaja aditivne proizvodnje, kao što su tehnologije SLS, SLA, FDM, koristili polimerni materijali. Sve većom primjenom tehnologija aditivne proizvodnje i širenjem na niz različitih grana industrije raste i potreba za razvojem novih materijala. Današnje tehnologije aditivne proizvodnje omogućuju izradu finalnog proizvoda od niza materijala, a svakim danom se i dalje pojavljuju novi materijali. Materijali se za proizvodnju u tehnologijama aditivne proizvodnje mogu podijeliti u četiri glavne kategorije: plastike, metali, keramika i kompozitni materijali. Različitim postupcima aditivne proizvodnje nudi se široka paleta materijala raznih mehaničkih, toplinskih i vizualnih svojstava. [32], [39], [54]

Istraživanja pokazuju tri ključne prednosti tehnologija aditivne proizvodnje, a to su: kompleksnost izrade objekta, brza iteracija promjene dizajna i masovna personalizacija. Među ispitanicima se pokazalo da su najzastupljenije tehnologije aditivne proizvodnje ekstrudiranje materijala, spajanje praškastog materijala u slojevima i polimerizacija materijala u komori. Najveći izazov prilikom korištenja tehnologija aditivne proizvodnje je kontrola kvalitete. [34], [55]

Osiguranje kvalitete i standardizacija procesa proizvodnje su veliki izazov za tehnologije aditivne proizvodnje. Pokazalo se da mnogi proizvođači i korisnici nemaju sigurnost i povjerenje da će proizvodi napravljeni aditivnim postupcima imati dosljednu kvalitetu i pouzdanost u svijetu zbog različitih uređaja za proizvodnju. Zbog toga se u proizvodnom procesu tehnologija aditivne proizvodnje razvijaju i predlažu procedure i protokoli kako bi mogli osigurati bolju kontrolu kvalitete. Takvim protokolima i procedurama napraviti će se dobar temelj za izradu standardiziranih procesa izrade. [32], [54], [55]

Industrija aditivne proizvodnje je tržište koje se brzo razvija još od predstavljanja prvog komercijalnog stroja aditivne proizvodnje SLA-1. Wohlers Associates su zabilježili rast industrije aditivne proizvodnje od 7.5% u 2020. godini. Zbog pandemije nastale u 2020. godini rast je znatno sporiji u usporedi s prosječnim rastom od 27.4% tijekom prethodnih 10 godina. [56]

Uvođenjem tehnologija aditivne proizvodnje smanjuje se prostor potreban za proizvodnju usporedno s tradicionalnim načinima proizvodnje u kojima je jedan uređaj služio za jedan proces obrade. Proizvode je moguće napraviti na jednom uređaju neovisno o kompleksnosti geometrije. Prednost je i brzina izrade te mogućnost proizvodnje na zahtjev. Međutim, za primjenu u određenim granama industrije proizvode i dijelove je potrebno certificirati kako bi se osigurala kompatibilnost, pouzdanost i sigurnost za korištenje. Potrebno je uvesti standardizaciju kako bi se u procesima aditivne proizvodnje osigurala kvaliteta, pouzdanost i kompatibilnost proizvoda s ostalim proizvodnim procesima. [32], [54]

Tržište visoke tehnologije, poput zrakoplovne, automobilske, vojne i medicinske industrije, zahtijevaju proizvode i dijelove visokih performansi, izdržljivosti i preciznosti izrade.

Dijelovi proizvedeni aditivnim postupcima moraju odgovarati standardima klasičnim načinima izrade. Provedeno je niz ispitivanja materijala za razne postupke aditivne proizvodnje kako bi se dobilo što više informacija o karakteristikama materijalima. Tvrtke su razvile vlastite metode ispitivanja kako bi proizveli materijale koji zadovoljavaju zahtjeve klijenata, ali bez postojanja standarda nije moguće osigurati kvalitetu, svojstva i dimenzijsku točnost. [32], [54]

U aditivnoj proizvodnji industrijske standarde su razvijale i postavljale tvrtke koje sudjeluju u razvojnem procesu samih tehnologija. Na primjer, standardni digitalni zapis trodimenzionalne geometrije je datoteka Stereolithography (.STL) koju je razvila tvrtka 3D Systems prije više od 20 godina. Razvojem tehnologija aditivne proizvodnje i širenjem na nova područja primjene, razvijeni su novi formati zapisa trodimenzionalne geometrije kao što su STEP, IGL, IGES, itd. Ovi formati digitalnog zapisa imaju svoje prednosti, ali najveći nedostatak je manjak podrške uređaja za aditivnu proizvodnju. Kako bi se standardizirao format zapisa i zamijenio zastarjeli format .STL, ISO i ASTM su uspostavili novi standard ISO / ASTM 52915-13. S ciljem unaprjeđenja procesa proizvodnje i razvoja tehnologija aditivne proizvodnje, organizacije ASTM i ISO su osnovale odbore kako bi izradili standarde za kompletnu industriju aditivne proizvodnje. Kako su postupci aditivne proizvodnje relativno nova i brzo razvijajuća tehnologija, prijedlozi standarda za industrijsku upotrebu između organizacija ASTM i ISO još nisu usklađeni. U tablici (Tablica 1), prikazan je popis dogovorenih i prihvaćenih standarda za aditivnu proizvodnju. Navedeni su standardi napravljeni kako bi definirali terminologiju, mogućnosti različitih postupaka aditivne proizvodnje, osigurali kvalitetu krajnjih proizvoda i odredili tolerancije uređaja. Trenutno postojeći standardi u tehnologijama aditivne proizvodnje podijeljeni su u pet cjelina, a to su: primjena, dizajn, materijali i postupci izrade, terminologija i metode testiranja. [38], [57]–[60]

Tablica 1 Standardi u tehnologiji aditivne proizvodnje

Primjena	
ISO / ASTM52942 - 20	<i>Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications</i>
ISO / ASTM52941 - 20	<i>Additive manufacturing — System performance and reliability — Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application</i>

Dizajn	
F3413 - 19	<i>Guide for Additive Manufacturing — Design — Directed Energy Deposition</i>
ISO / ASTM52910 - 18	<i>Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations</i>
ISO / ASTM52911 - 1 - 19	<i>Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals</i>
ISO / ASTM52911 - 2 - 19	<i>Additive manufacturing — Design — Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers</i>
ISO / ASTM52915 - 20	<i>Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2</i>
ISO / ASTM52950 - 21	<i>Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing</i>

Materijali i postupci izrade	
F2924 - 14	<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion</i>
F3001 - 14	<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion</i>
F3049 - 14	<i>Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes</i>
F3055 - 14a	<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion</i>
F3056 - 14e1	<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion</i>
F3091 / F3091M - 14	<i>Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials</i>
F3184 - 16	<i>Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion</i>
F3187 - 16	<i>Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals</i>
F3213 - 17	<i>Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum via Powder Bed Fusion</i>
F3301 - 18a	<i>Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion</i>
F3302 - 18	<i>Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion</i>
F3318 - 18	<i>Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Specification for AlSi10Mg with Powder Bed Fusion – Laser Beam</i>

F3434 - 20	<i>Guide for Additive manufacturing – Installation/Operation and Performance Qualification (IQ/OQ/PQ) of Laser-Beam Powder Bed Fusion Equipment for Production Manufacturing</i>
ISO / ASTM52901 - 16	<i>Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts</i>
ISO / ASTM52904 - 19	<i>Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications</i>
ISO / ASTM52903 - 1 - 20	<i>Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 1: Feedstock materials</i>
ISO / ASTM52903 - 2 - 20	<i>Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 2: Process equipment</i>

Terminologija	
ISO / ASTM52900 - 15	<i>Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology</i>

Metode testiranja	
F2971 - 13	<i>Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing</i>
F3122 - 14	<i>Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes</i>
ISO / ASTM52902 - 19	<i>Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems</i>
ISO / ASTM52921 - 13(2019)	<i>Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies</i>
ISO / ASTM52907 - 19	<i>Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metallic powders</i>

2.5 KOLORIMETRIJA U TEHNOLOGIJAMA ADITIVNE PROIZVODNJE

U prošlom poglavlju opisani su standardi za industriju aditivne proizvodnje. Zbog brzog razvoja industrije aditivne proizvodnje i širenjem na razne primjene, standardnima nisu obuhvaćena sva područja. Primjerice, trenutno ne postoje standardi i smjernice za vizualna, odnosno kolorimetrijska svojstva materijala. Znanstvenici diljem svijeta primijenili su postojeće metode kako bi odredili kolorimetrijska, svojstva materijala. U grafičkoj industriji postoje standardni način definiranja i mjerenja boje.

Istraživanja su pokazala utjecaj starenja na svojstva boje i stabilnost 3D otiska izrađenog aditivnim postupkom, tj. otiskivanje veziva na materijale. Nakon ubrzanog starenja u trajanju od 72 sata, na 3D otisku su izmjerena velika odstupanja boje u svjetlini, zasićenju i tonu. Promjena se razlikovala ovisno o debljini nanosa boje kao i završnoj vrsti obrade 3D otiska. U istom postupku aditivne proizvodnje razvijen je profil boja za reprodukciju boje ljudske kože. [21], [61]

Kako bi se bolje razumjelo što je kolorimetrija i koja je njezina primjena u tehnologijama aditivne proizvodnje, potrebno je prvo objasniti što je boja. Boja je opisana kao optički fenomen, psihofizički osjetilni podražaj koji se pomoću organa vida prenosi u mozak. Osjećaj boje nastaje kao rezultat zračenja svijetlom i refleksijom promatranog objekta. Boja bi se moglo opisati i kao svojstvo objekta, svojstvo svjetla, a sam se osjećaj boje stvara kod promatrača. Potrebna su sva tri faktora da bi se pojavio doživljaj boje. Za doživljaj je boje potreban izvor svjetla, osjet vida promatrača i objekt koji se promatra. [62]–[64]

Opažanje i opisivanje boje uključuje fizičke i fiziološke komponente. Kromatski podražaj kao fizičko svojstvo boje je moguće izmjeriti mjernim uređajima, ali percepciju boje, odnosno kako boju tumači ljudski mozak moguće je samo procijeniti. Razne istraživačke skupine i organizacije pokušale su napraviti modele opisa boja na način kako ljudsko oko percipira boju. Međunarodna komisija za osvjetljenje (*Commission on Illumination* – CIE) je 1931. godine definirala standardnog kolorimetrijskog promatrača. Standardni promatrač predstavlja

promatrača koji ima percepciju boja kao prosječna osoba. Uloga standardnog promatrača je da predstavlja čovjeka prilikom mjerenja kromatskih podražaja. Kromatski je podražaj moguće definirati kao fizičko zračenje koje reflektira promatrano tijelo, dok je podražaj boje rezultat vizualne percepcije u oku promatrača. Trenutni modeli boja nisu potpuno precizni, ali zahvaljujući međunarodnoj komisiji za osvjetljene CIE, trenutni modeli prikaza boja su dovoljno robusni kako bi imali učinkoviti sustav opisivanja boja. [63], [64]

Kolorimetrija je znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem i uspoređivanjem boja te prikazom onako kako ih tipični ljudski vid raspoznaje. Cilj kolorimetrije je izraditi matematički model prikaza i percepcije boja. Da bi matematički model bio točan, tamo gdje standardni promatrač vidi podudaranje između dva uzorka boja, kolorimetrijski model oba uzorka treba prikazati istim numeričkim vrijednostima. U slučaju gdje tipični promatrač vidi razliku između uzoraka, model za prikaz boja bi trebao prikazati različite numeričke vrijednosti kao i ukupnu promjenu boje koju promatrač opaža. [63]

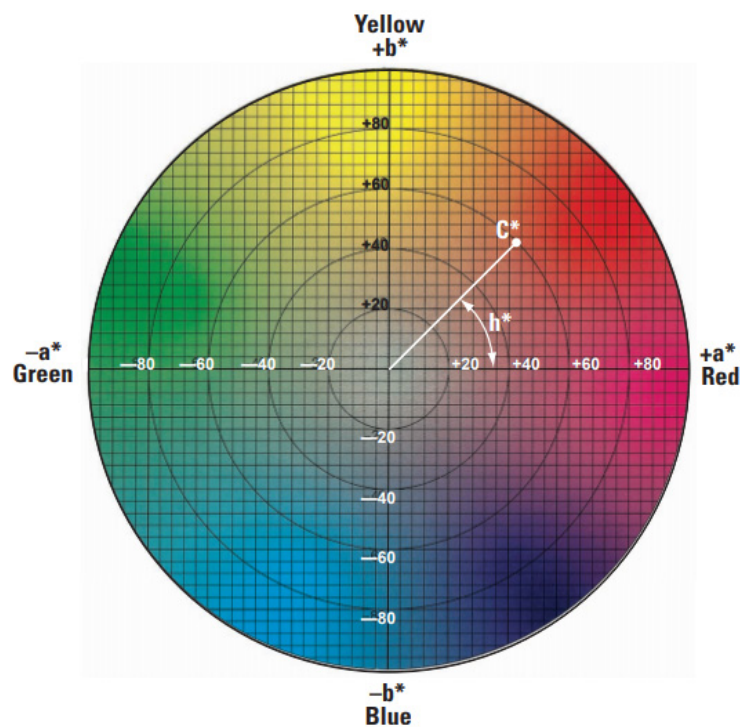
Instrumenti za mjerenje i uspoređivanje boja mogu mjeriti samo kromatski podražaj iz kojeg se dobivaju numeričke vrijednosti u standardnom prostoru boja koje prikazuje percepciju boje koju vidi standardni promatrač. Standardne prostore boja je napravila međunarodna komisija CIE, kao što su: CIEXYZ, CIELUV, CIELAB, CIELCh. [64]

U reprodukcijским tehnologijama, poznavanje osnova kolorimetrije važno je s obzirom da se praćenje kvalitete tiska provodi na temelju kolorimetrijskog mjerenja boje i uvođenja sustava upravljanja bojama. Moderne reprodukcijske tehnologije koriste aditivne i suptraktivne procese miješanja boja. Osjećaj boje se pojavljuje samo u oku promatrača, stoga je percepciju boje moguće jasno opisati samo usporedbama i kontrastima. Na primjer: neutralno sivi ton na različitim bojama podloge stvara drugačiji osjećaj boje. Ovaj je efekt poznat pod nazivom „simultani kontrast“. Simultani kontrast kao i slični perceptivni učinci su utjecajni faktori u tehnologijama reprodukcije gdje ljudsko oko ima značajnu ulogu prilikom određivanja boja. [64]

Standardni prostor temeljen na teoriji komplementarnih boja, CIELAB najvažniji je i vrlo korišteni prostor boja u reprodukcijским tehnologijama. Međunarodna komisija CIE, 1976.

godine definirala je LAB sustav, prvenstveno kao bi standardizirala različite već postojeće modele prikaza boja. Standardni prostor boja CIELAB odgovara ljudskoj percepciji boje, a sami prostor je određen sa tri osi. [64]

Os L^* predstavlja svjetlinu, dok interpretacija vrijednosti a^* i b^* predstavlja ton i zasićenje. Tu se pojavljuje i standardni prostor boja CIELCH koji je interpretacija CIELAB prostora boja. Vrijednosti L^* , a^* , i b^* također je moguće izračunati iz drugog standardnog prostora boja kao što je CIEXYZ (formula 1,2,3). Na slici (Slika 23) je prikazan CIELAB sustav prikaza boja. [64]



Slika 23 CIELAB prostor boja [64]

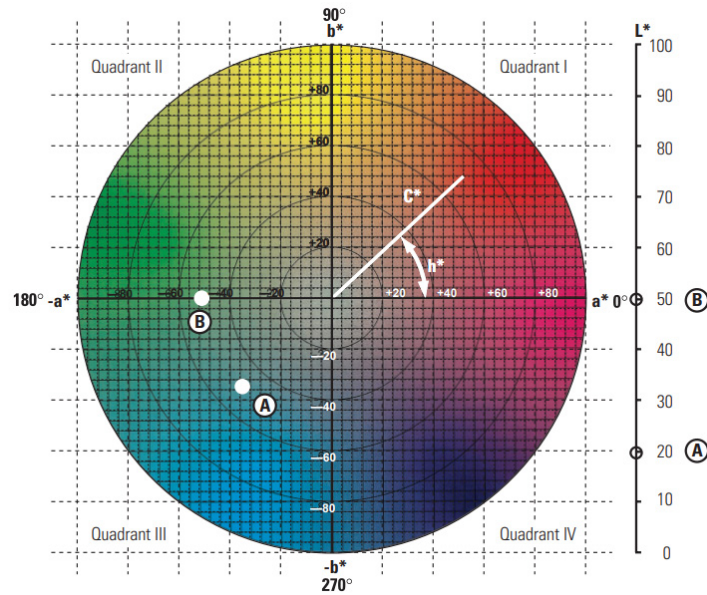
$$L^* = 116 \times \sqrt[3]{(Y \div Y_n)} - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 \times \left[\sqrt[3]{(X \div X_n)} - \left(\sqrt[3]{(Y \div Y_n)} \right) \right] \quad (2)$$

$$b = 200 \times \left[\sqrt[3]{(Y \div Y_n)} - \left(\sqrt[3]{(Z \div Z_n)} \right) \right] \quad (3)$$

Numerička vrijednost *Delta E* (ΔE) predstavlja razliku između numeričkih vrijednosti dvije boje u standardnom prostoru boja. Općenito, što je manja vrijednost ΔE , manja je razlika u promjeni boje. Formula 4 i 5 prikazuju kako se preračunavaju vrijednosti CIELAB u CIELCH vrijednosti za lakšu interpretaciju rezultata. ΔE je izračunata je iz vrijednosti a^* i b^* , a predstavlja međusobnu razliku u boji. Prilikom kontrole reprodukcije, uglavnom se mjereni podaci zapisuju u CIELAB sustavu, dok se daljnje promjene računaju u CIELCH sustavu. [64]

Na slici (Slika 24) prikazan je CIELAB prostor boja s karakterističnim vrijednostima L, a, b, C i h. Izračun kromatičnosti C i tona h, prikazan je formulama 4 i 5. Ukupne promjene boje ΔE_{00} prikazana je formulom 6.



Slika 24 CIELAB prostor boja s prikazom različitih vrijednosti uzoraka A i B [64]

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (4)$$

$$h^* = \arctang \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (5)$$

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H} \right) \right]^{0.5} \quad (6)$$

3 Eksperimentalni dio

3.1 METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

U ovom su radu istražena kolorimetrijska svojstva materijala korištenih u stereolitografskom postupku aditivne proizvodnje, odnosno u postupku polimerizacije materijala u komori. U teoretskom dijelu rada opisani su postupci tehnologija aditivne proizvodnje koji su podijeljeni u sedam skupina. Svaka skupina razlikuje se metodom i materijalima dostupnim za stvaranje 3D otiska.

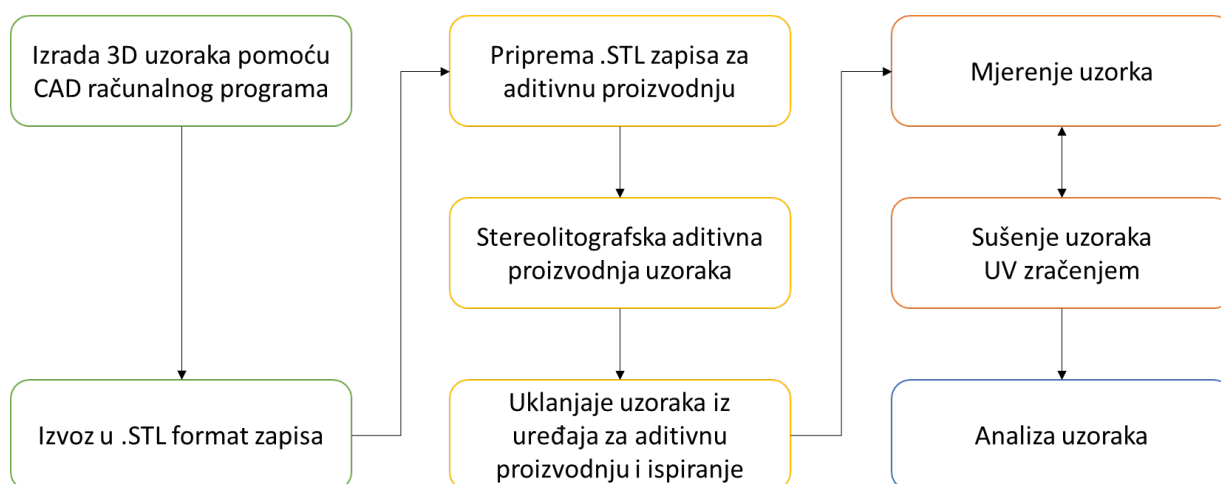
Fotopolimerni se materijal koji se upotrebljava za izradu 3D otiska, prije procesa fotopolimerizacije nalazi u tekućem stanju. Takvo tekuće stanje fotopolimera omogućuje interakciju s bojilima i pigmentima kako bi se moglo napraviti kolor 3D otiske. U postupku stvaranja 3D otiska stereolitografskim aditivnim postupkom nakon samog 3D tiska je potrebna dodatna obrada prije dobivanja finalnog produkta. Model je potrebno isprati otapalom kojim se otklanja sav nopolimerizirani materijal s površine 3D otiska. Zatim je potrebno dodatno sušenje UV zračenjem kako bi se završio proces polimerizacije.

Kako bi se potvrdile postavljene hipoteze, prvo se izrađuju 3D modeli ispitnih uzoraka pomoću CAD računalnog programa. Koristi se CAD okruženje kako bi se zadovoljila potreba za strogim mjernim tolerancijama uzoraka. Nakon izrade računalnog 3D modela, datoteka se pohranjuje u format zapisa .STL koji je namijenjen za korištenje u aditivnim tehnologijama proizvodnje [30]. Mjerni su uzorci dizajnirani kao niz pločica debljine od 0.8mm do 5mm. Debljina mjernih uzoraka se povećava za 0.2mm, što ukupno čini 22 ispitna uzorka. Na slici (Slika 25) prikazani su uzorci preliminarne ispitivanja gdje je uočljivo da debljina ispitnih uzoraka utječe na doživljaj boje. Za potrebe istraživanja, dodavanjem bojila u temeljni polimer definira se pet temeljnih boja koje se koristiti u postupku aditivne proizvodnje.



Slika 25 Ispitni uzorci s cijan, magenta i žutim bojilom, debljine 1mm, 2mm, 3mm

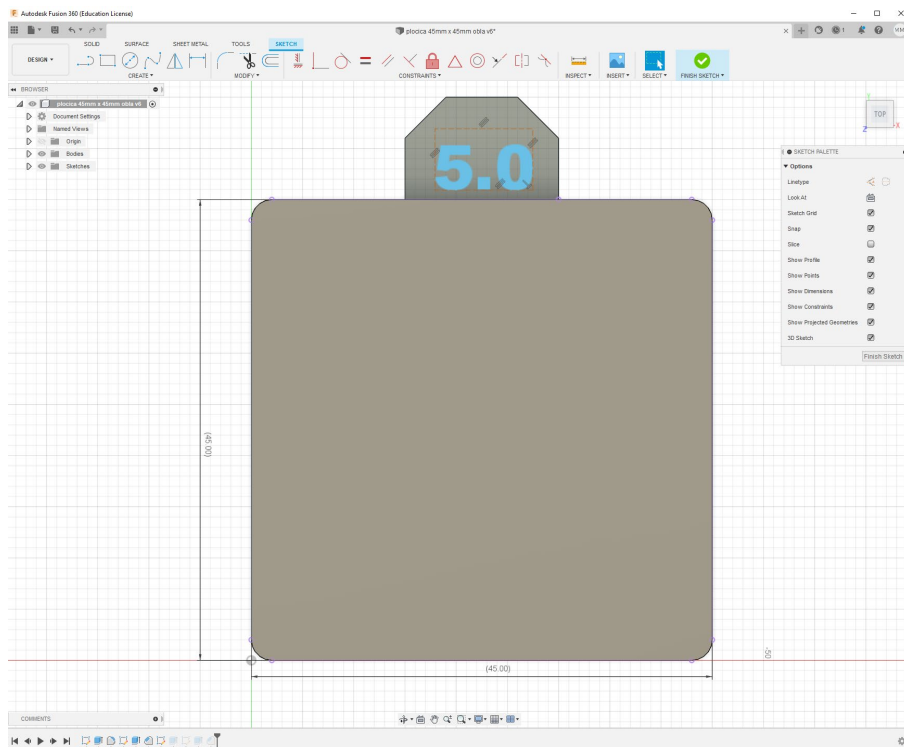
Nakon što su stereolitografskim postupkom napravljeni svi uzorci, potrebna im je dodatna obrada. Ispitni uzorci ispiru se u otapalu kako bi se uklonio nepolimerizirani materijal. Zatim slijedi dodatno sušenje 3D otisaka pomoću UV zračenja. Kako bi se detaljno istražio utjecaj sušenja na kolorimetrijska svojstva, prije samog sušenja, pomoću spektrofotometra se mjere spektralne informacije svakog uzorka dok je još u tzv. „zelenom stanju“. Zatim se svaki uzorak suši u vremenskim intervalima u trajanju od 15 minuta. Sušenje uzoraka se odvija u UV komori u kontroliranim mjernim uvjetima. Nakon svakog intervala ponovo se mjere spektralne informacije kako bi se mogao odrediti utjecaj sušenja na kolorimetrijska svojstva materijala. Na temelju izmjerenih spektralnih i kromatičnih podataka, provodi se analiza utjecaja promjena debljine materijala i vremenskih intervala UV zračenja na kolorimetrijska svojstva 3D otisaka. Promjena boje prikazuje se kao vrijednost ΔE_{00} , uz opis smjera promjene. Shema eksperimentalnog rada prikazana je na slici 27.



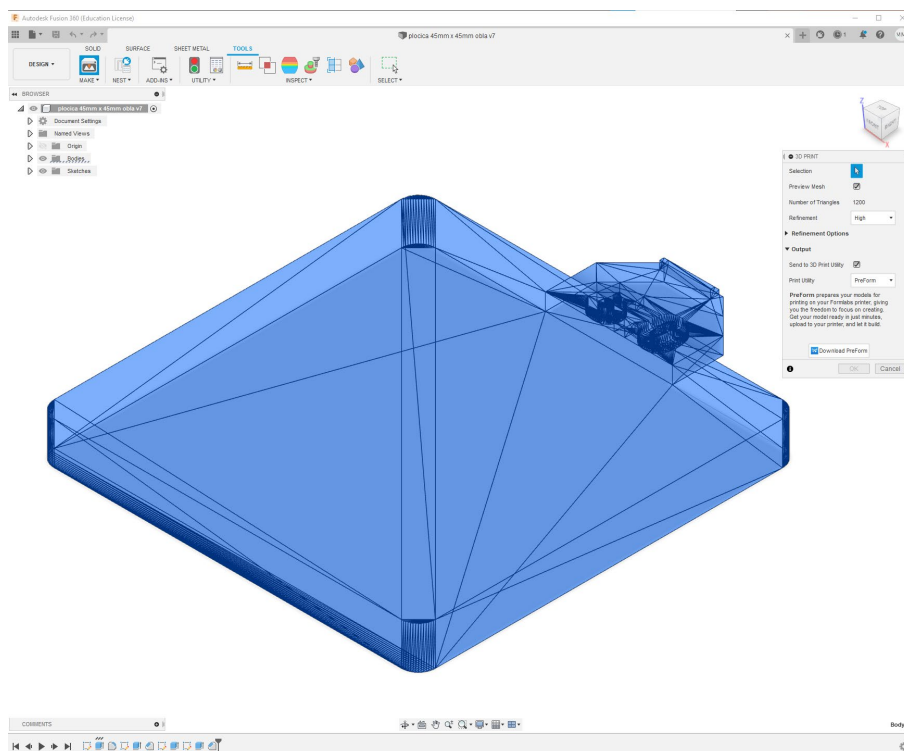
Slika 26 Shema eksperimentalnog rada

3.1.1 Izrada računalnog 3D modela

Najčešći način izrade računalnog modela za primjenu u aditivnoj proizvodnji je korištenje CAD računalnih programa. CAD alati se koriste zbog parametričnog načina rada koji omogućuje dobivanje vrlo detaljne i precizne 3D geometrije. Također, CAD alati sadrže razne simulacije za mehanička ispitivanja kako bi se olakšao razvoj novog proizvoda. Za izradu ispitnih uzoraka koristi se CAD alat Autodesk Fusion 360 [65]. Ispitni su uzorci dizajnirani kao niz pločica dužine 45mm, širine 45mm i debljine od 0.8 mm do 5 mm s povećanjem od 0.2 mm čime se dobiva ukupno 22 mjerna uzorka. Zbog tehničkih ograničenja stereolitografskog procesa aditivne proizvodnje, nije moguće napraviti pločice sa stijenom tanjom od 0.8 mm, dok su dosadašnja preliminarna istraživanja pokazala da pločice debljine veće od 5 mm imaju zanemarive promjene kolorimetrijskih svojstava tijekom dodatnog UV sušenja. Postupak izrade u računalnom programu Autodesk Fusion 360 prikazan je na slici (Slika 27). Nakon što je dizajn pločice gotov, 3D model se izvozi u .STL format zapisa (Slika 28). Računalni 3D model se pretvara u .STL zapis u kojemu se 3D model pretvara u niz poligona kojima se opisuje geometrija ispitne pločice, slika (Slika 28).



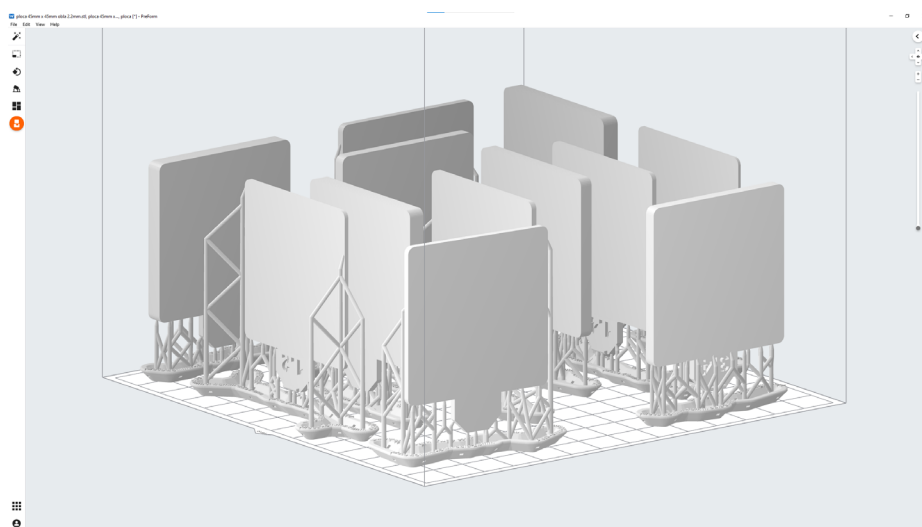
Slika 27 Izrada ispitnih pločica u Autodesk Fusion 360



Slika 28 Izvoz CAD modela u .STL zapis

3.1.2 Priprema .STL zapisa za aditivnu proizvodnju

Formate zapisa trodimenzionalne geometrije koji su namijenjeni za aditivnu proizvodnju, kao što su: .STL ili .OBJ, otvaraju se u računalnom programu koji radi pripremu za aditivnu proizvodnju. Ova vrsta računalnog programa naziva se rezač (e. *slicer*) jer ima ulogu da trodimenzionalni zapis geometrije razreže u niz slojeva koji se zatim izrađuju aditivnim postupkom izrade. Svaki postupak aditivne proizvodnje i skoro svaki proizvođač uređaja ima svoje vlastito rješenje za rezač. U ovom koraku se određuju svi parametri koji su bitni za aditivnu proizvodnju kao što su: visina sloja, vrsta materijala, definiraju se strukturne potpore, ispravno se orijentiraju objekti kako bi se optimalno iskoristila radna platforma. Na slici (Slika 29) prikazano je optimalno popunjena radna platforma s mjernim uzorcima koji su uspravno orijentirani, odnosno po Z osi. Visina svakog sloja ispitnih uzoraka je 0.1 mm. Mjerni uzorci su debljine od 0.8 mm do 5 mm, pa im je zbog toga potrebna strukturna potpora kako se ne bi odlijepili od radne platforme tijekom samog postupka stvaranja. Većina „rezača“ u sebi ima mehanizme koji provjeravaju da li je došlo do preklapanja više modela, preporuku ispravne orijentacije i prikaz svakog sloja pojedinačno koje uređaj za aditivnu proizvodnju ostvaruje. Nakon što je priprema ispravno napravljena, „rezač“ stvara digitalni zapis s nizom instrukcija namijenjenih uređaju za aditivnu proizvodnju.



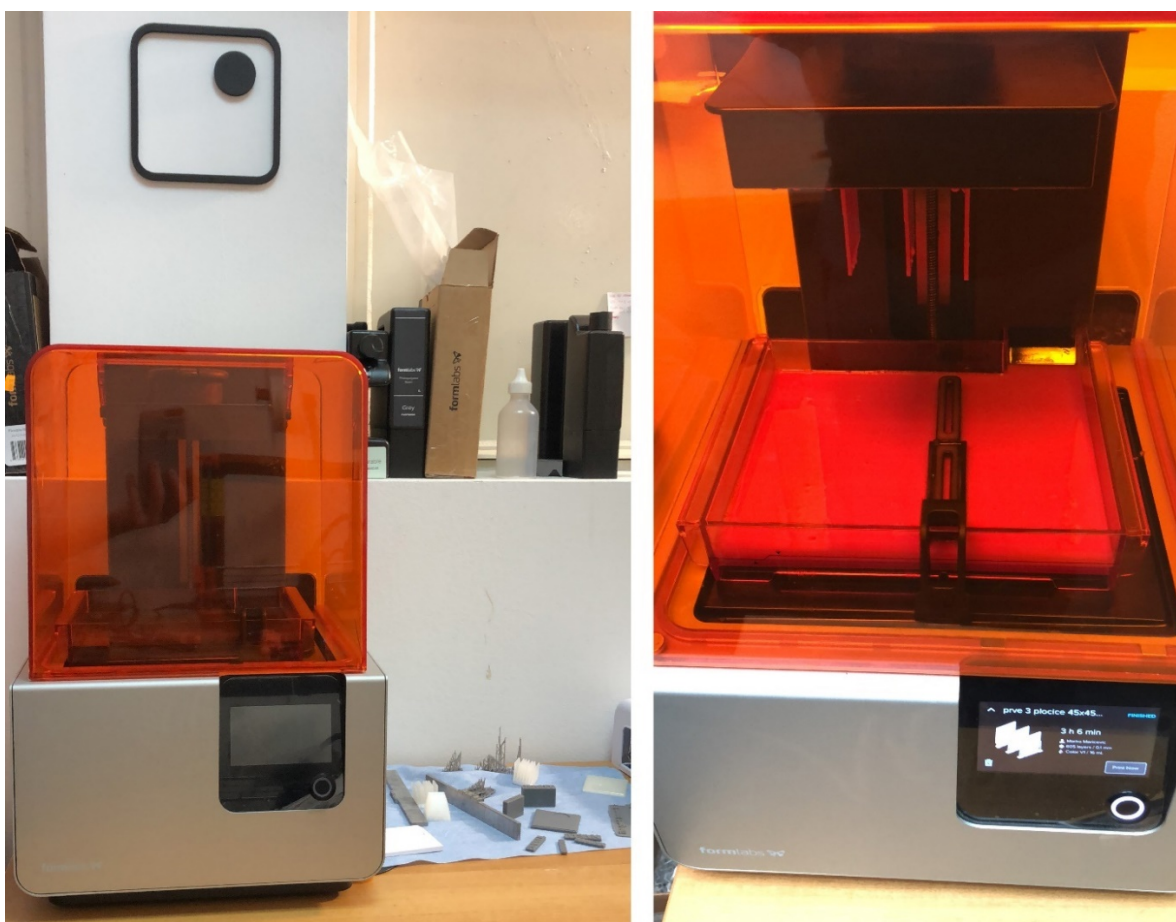
Slika 29 Prikaz mjernih uzoraka raspoređenih na radnu platformu

3.1.3 Priprema materijala i uređaja aditivne proizvodnje

Temeljni materijal u stereolitografskom postupku aditivne proizvodnje je fotopolimer. Za istraživanje se koristi tekući fotopolimer F2-PKG-CR proizvođača Formlabs. U spremnike s fotopolimerom se dodaju bojila: cijan – RS-F2-CRCY-01, magenta – RS-F2-CRMA-01, žuta – RS-F2-CRYL-01, bijela – RS-F2-CRWH-01, crna – RS-F2-CRBK-01. 3D otisci kao ispitni uzorci se izrađuju stereolitografskim uređajem Formlabs Form 2. Formlabs Form 2 (Slika 30) je uređaj s grijanom radnu komoru radnog volumena 145 mm x 145 mm x 175 mm.

Preciznost izrade sloja je od 0.025 mm do 0.1 mm, a promjer laserske zrake je 0.14 mm.

Laserski izvor svjetla ima snagu od 250 mW, a laserska se zraka nalazi u ultraljubičastom spektru te ima valnu duljinu od 405 nm. [53]



Slika 30 Uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju Formlabs Form 2

Finalni produkt je anizotropan, odnosno mehanički oslabljen u jednom smjeru naprezanja zbog postupka izrade u slojevima. Kako se ne bi narušila mehanička svojstva produkta, proizvođač definira omjer volumena fotopolimera i bojila. [16], [17]. Na slici (Slika 31) je prikazano doziranje bojila i dodavanje u spremnik s temeljnim fotopolimerom. Na slici (Slika 32) je prikazan neuspjeli pokušaj aditivne proizvodnje zbog krivog omjera volumena fotopolimera i bojila. Ukupno je napravljeno pet spremnika s pet različitih bojila (cijan, magenta, žuta, crna i bijela).



Slika 31 Doziranje bojila u spremnik



Slika 32 Ispitni uzorci degradiranih mehaničkih svojstava

3.1.4 Stereolitografska aditivna proizvodnja

Stereolitografskom postupkom aditivne proizvodnje napravljena su 22 uzorka za svaku skupinu osnovnog polimera i bojila, što čini ukupno 110 uzoraka za analizu. Za svaku skupinu se koristi zaseban spremnik i radna komora. Nakon završetka postupka aditivne proizvodnje, ovaj proces zahtijeva dodatnu obradu. Prvo se uklanja radna platformu iz radne komore. Zatim se ispitni uzorci skidaju s radne platforme i ispiru kako bi se uklonio ostatak nepolimeriziranog materijala. Za uklanjanje ostatka materijala koristi se II propilni alkohol koji se nalazi u kadici za ispiranje (Slika 33).



Slika 33 Aparatura za čišćenje modela i uklanjanje strukturnih potpora

Nakon izrade mjernih uzoraka, 3D otisci se nalaze u tzv. „zelenom stanju“, odnosno fazi gdje materijal još nije potpuno polimeriziran te je potrebno dodatno UV zračenje kako bi se uzorci osušili. Mjerni uzorci se dodatno suše pomoću UV zračenja u zadanim vremenskim intervalima. U eksperimentalnom se dijelu za sušenje uzoraka koristi Formlabs Form Cure UV komora (Slika 34). UV komora se sastoji od grijane radne komore s LED žaruljama

jačine 39 W koje imaju valnu duljinu 405 nm. Uzorci se suše u jednakim vremenskim intervalima. Između svakog intervala zračenja uzorci se analiziraju pomoću spektrofotometra gdje se dobivaju podaci o spektralnim i kromatičnim svojstvima ispitnih uzoraka.



Slika 34 UV komora za sušenje ispitnih uzoraka Formlabs Cure

3.1.5 Mjerenje uzoraka

Spektrofotometar se temelji na principu da se svaka boja može opisati kao aditivni spoj spektralnih boja. Spektar koji se snima, raščlanjuje se na male intervale u kojima se mjeri intenzitet svjetla u svakom intervalu valne duljine. Spektrofotometri općenito intervale dijele od 10 nm do 20 nm, i daju vrijednosti za svaki interval. Spektrofotometri posebne namjene mogu imati izrazito male intervale od 1 nm do 2 nm.

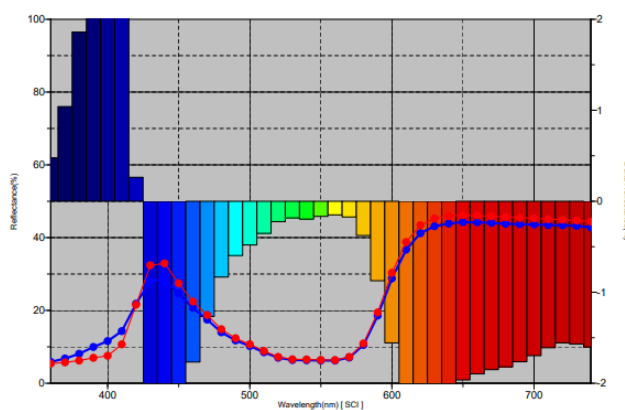
U eksperimentalnom dijelu analize uzoraka koristi se spektrofotometar Konica Minolta CM3600dm (Slika 35). Spektrofotometar zadovoljava propise: CIE no. 15, ISO 7724/1, ASTM E-1164, DIN 5033 Tel7. Pomoću spektrofotometra se mjere spektralne i kromatične informacije svakog ispitnog uzorka između intervala sušenja UV zračenjem. Posebno se mjere reflektivna i transmissijska svojstva uzoraka u spektru od 360 nm do 740 nm s intervalom pomaka od 10 nm. Svaki uzorak se mjeri pet puta pod standardnim izvorom svjetla D50 pod standardnim kutom promatrača.



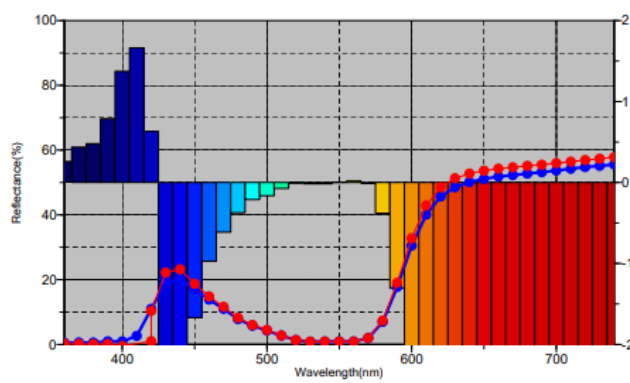
Slika 35 Spektrofotometar Konica Minolta CM3600dm

3.1.6 Analiza rezultata mjerenja

Temeljem dobivenih podataka analizira se utjecaj sušenja UV zračenja na promjenu svjetline, zasićenosti odnosno kromatičnosti i tona uzorka, odnosno prikazuje se ukupna promjena boje izražena kao vrijednost ΔE_{00} uz opis smjera promjene. Kolorimetrijske vrijednosti mjere se u CIELAB prostoru boja dok se analiziraju u CIELCh prostoru boja. Posebno se analizira utjecaj sušenja UV zračenjem na reflektivna svojstva uzoraka, a posebno propusnost odnosno transmisijska svojstva uzoraka. Primjer spektralne krivulje uzorka prilikom analize refleksijskih svojstava prikazan je na slici (Slika 36). Primjer spektralne krivulje uzorka prilikom analize transmisijskih svojstava prikazan je na slici (Slika 37).



Slika 36 Spektralna krivulja refleksijskog svojstva ispitnog uzorka



Slika 37 Spektralna krivulja transmisijskog svojstva ispitnog uzorka

4 Rezultati

4.1 TRANSMISIJSKA I REFLEKTIVNA SVOJSTVA ISPITNIH UZORAKA STEREOLITOGRAFSKE ADITIVNE PROIZVODNJE

Transmisijska i reflektivna svojstva uzoraka određena su na uzorcima dobivenim kroz osam intervala sušenja UV zračenjem. Određuju se ukupne promjene boje za svaki uzorak koji se prikazuje pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Kako bi se dobila uspješna analiza kolorimetrijskih svojstva ispitnih uzoraka, proizvedenih stereolitografskim postupkom aditivne proizvodnje, ispitni uzorci su podijeljeni u dvije grupe mjerenja. Posebno se ispituju transmisijska svojstva propusnosti ispitnih uzoraka, a posebno refleksijska svojstva ispitnih uzoraka kao neprozirnih materijala. Izmjerene kolorimetrijske vrijednosti prikazane su u standardnom prostoru boja CIELAB. Kolorimetrijske vrijednosti svakog ispitnog uzorka prikazane su kroz vrijednost L koja predstavlja svjetlinu, dok interpretacija vrijednosti a i b predstavljaju zasićenje i ton. Zbog laške interpretacije rezultata, kolorimetrijske vrijednosti ispitnih uzoraka su prikazane u standardnom prostoru boja CIELCh. U sustavu CIELCh, vrijednost L predstavlja svjetlinu, vrijednost C predstavlja kromatičnost, a vrijednost h predstavlja ton.

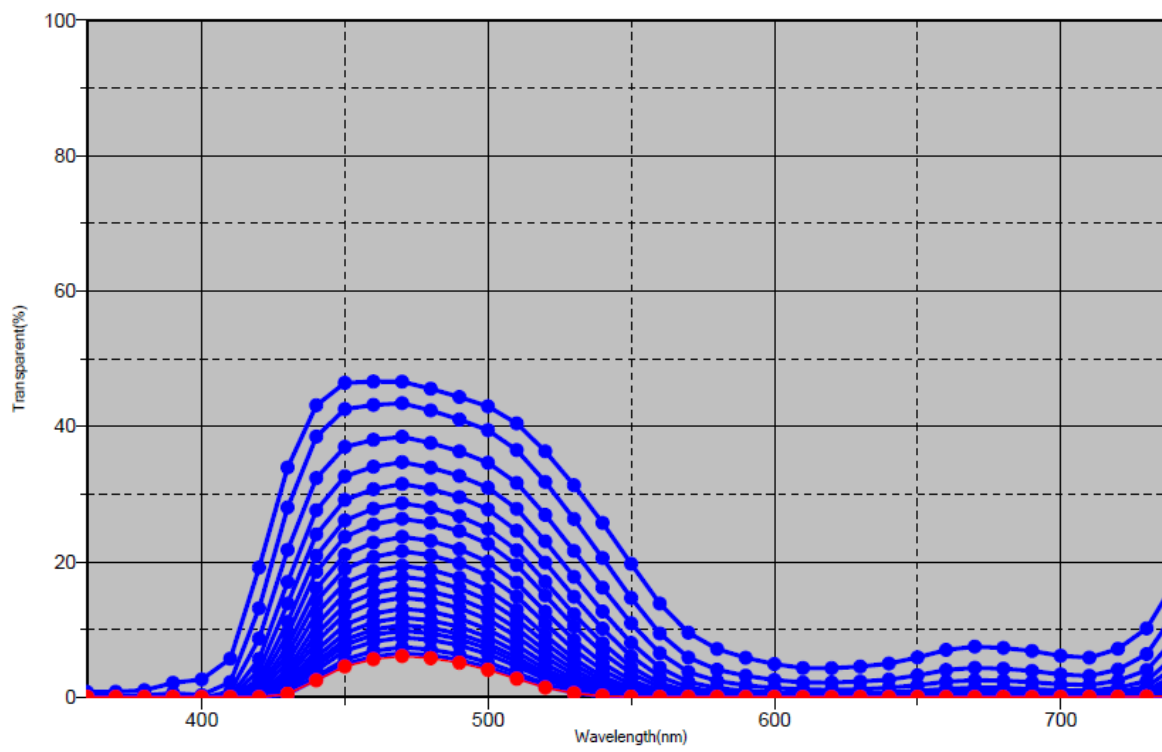
4.1.1 Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo

U tablici (Tablica 2) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.

Tablica 2 Prikaz ukupne promjene boje transmisijskih i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm

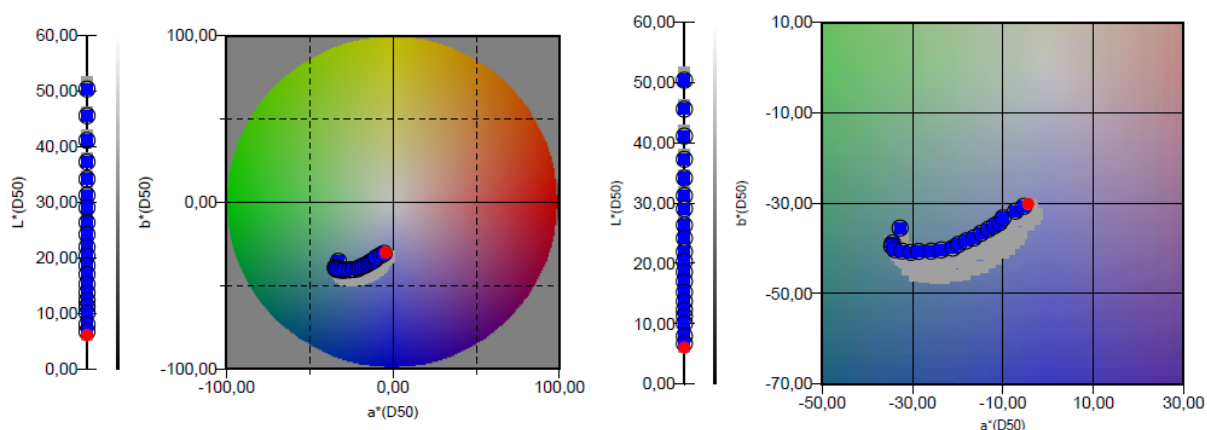
Ispitnih uzoraka sa cijan bojom		
	ΔE_{00}	
mm	transmisija	refleksija
0,8	36,81	2,61
1	33,09	1,98
1,2	29,73	1,88
1,4	26,92	1,57
1,6	24,59	1,46
1,8	22,39	1,16
2	20,73	0,91
2,2	18,57	0,65
2,4	16,83	0,61
2,6	14,96	0,6
2,8	13,73	0,32
3	12,32	0,44
3,2	10,99	0,35
3,4	9,52	0,45
3,6	8,14	0,5
3,8	6,96	0,57
4	5,96	0,29
4,2	5,40	0,47
4,4	5,01	0,45
4,6	2,63	0,29
4,8	0,93	0,28

Slika 38 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



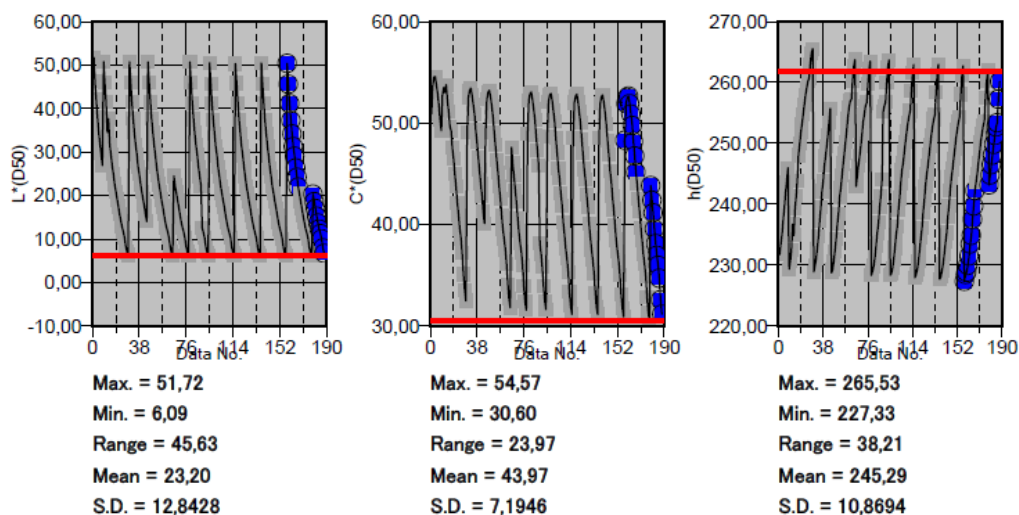
Slika 38 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom

Slika 39 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



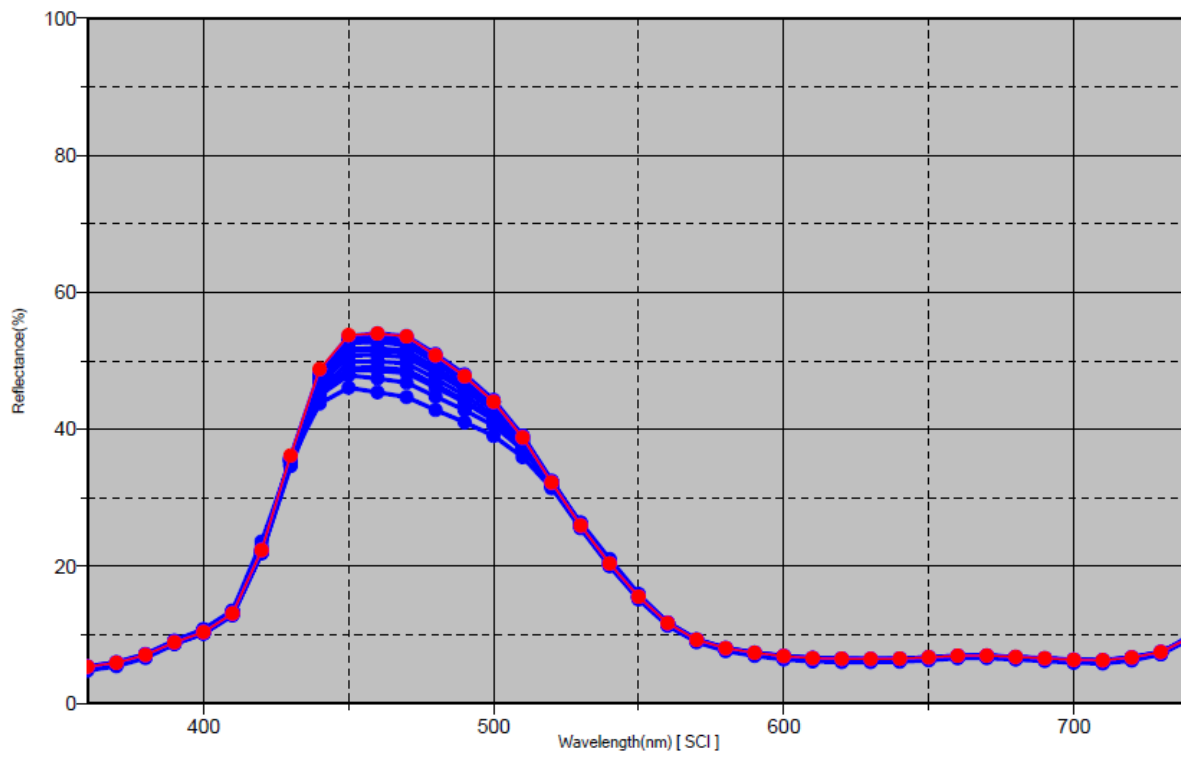
Slika 39 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom

Slika 40 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne ločice debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



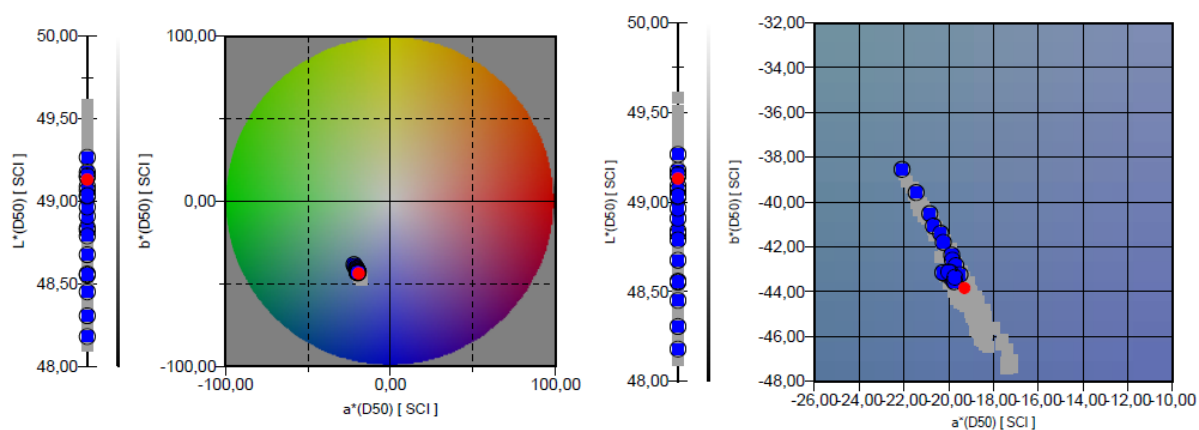
Slika 40 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka s cijan bojom

Slika 41 prikazuje spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



Slika 41 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom

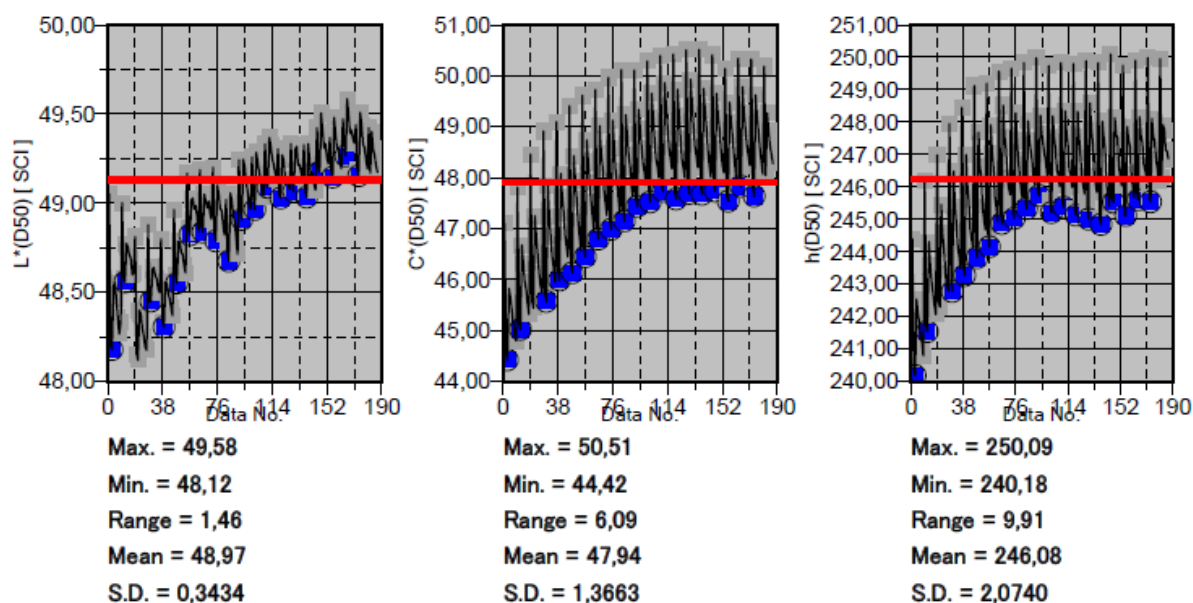
Slika 42 prikazuje reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 42 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom

Slika 43 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojom.

Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za reflektivna svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 43 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa cijan bojom

U tablicama 3 i 4 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s cijan bojom debljine 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,0 mm i 5,0 mm.

Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka u „zelenom stanju“ i intervala sušenja. Mjerenja u tablici 3 su prikazana za transmisijske karakteristike ispitnih pločica, a mjerenja u tablici 4 su prikazana za refleksijske karakteristike ispitnih pločica.

Tablica 3 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (transmisijiska svojstva)

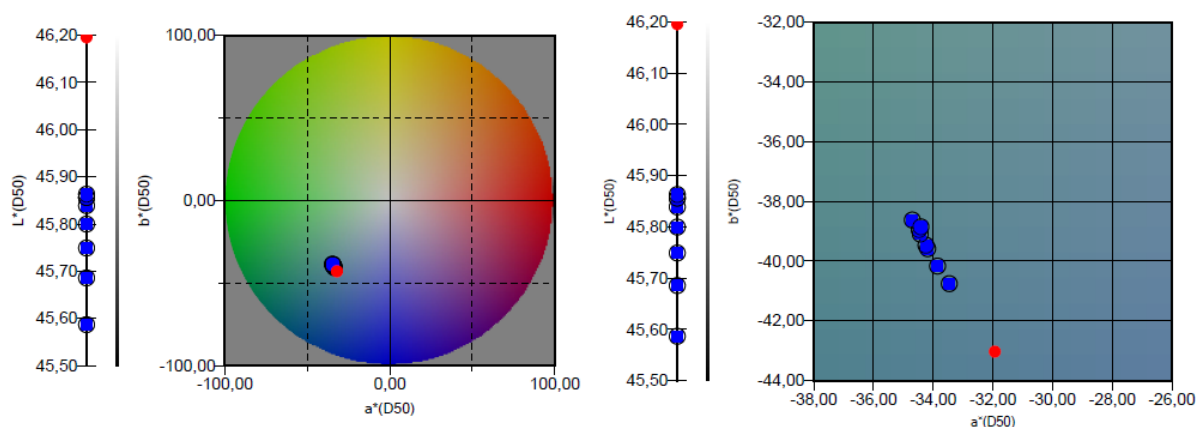
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	1,22	0,99	1,44	1,14	0,57
2	1,51	1,72	1,86	1,4	0,63
3	1,8	2,12	2,05	1,38	0,56
4	1,85	2,72	2,43	1,97	0,78
5	2,05	2,95	2,65	2,16	0,77
6	2,1	3,08	2,83	2,32	0,83
7	2,29	3,4	3,11	2,53	1,06
8	2,16	3,57	3,2	2,59	1,11

Tablica 4 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (refleksijska svojstva)

	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,79	0,54	0,62	0,62	0,66
2	1,08	0,87	0,88	0,88	0,82
3	1,28	1,08	1,03	1,03	0,89
4	1,42	1,42	1,3	1,3	1,14
5	1,59	1,56	1,38	1,38	1,16
6	1,71	1,74	1,51	1,51	1,26
7	1,84	1,9	1,7	1,7	1,49
8	1,93	2,06	1,85	1,85	1,51

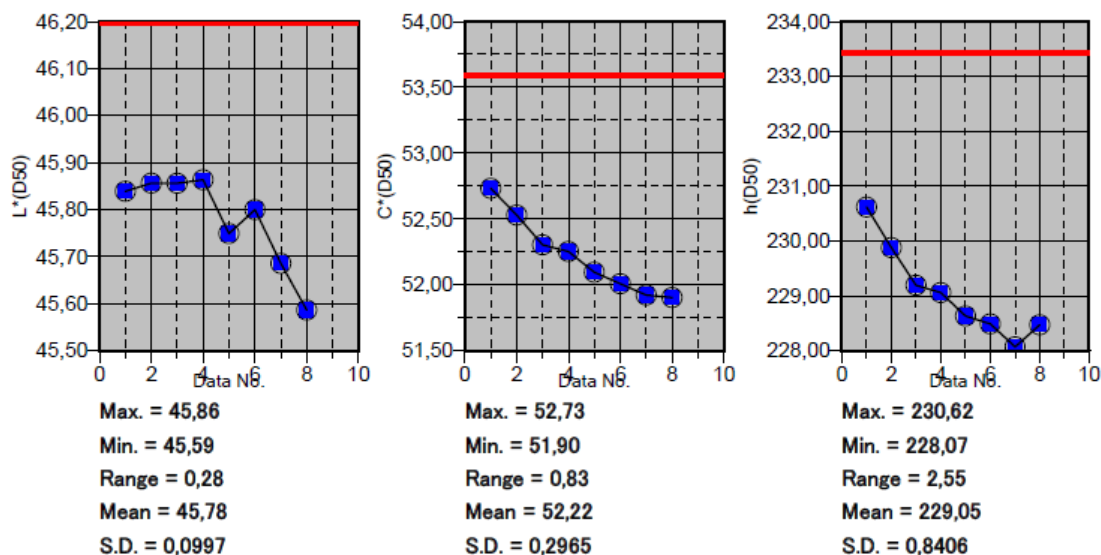
4.1.1.1 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 1 mm

Slika 44 prikazuje transmisijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 44 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

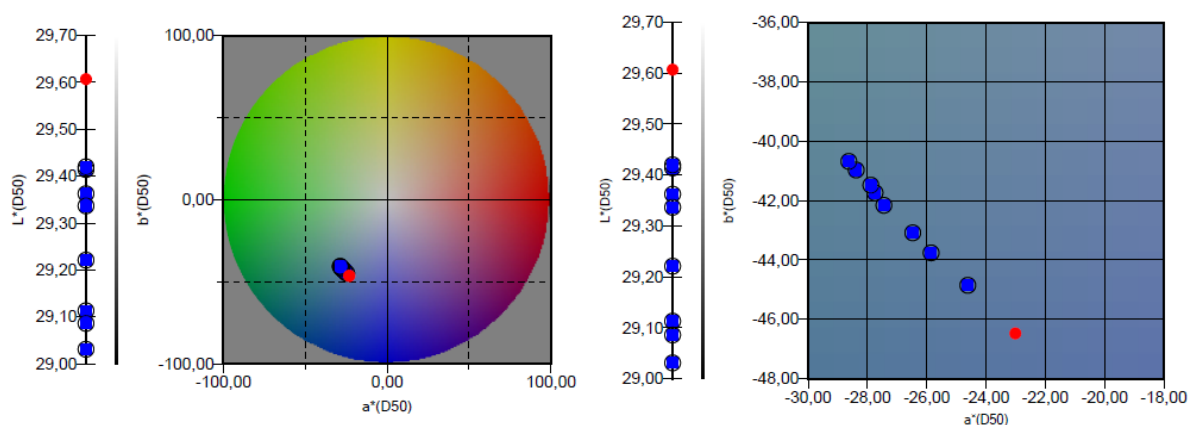
Slika 45 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 45 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

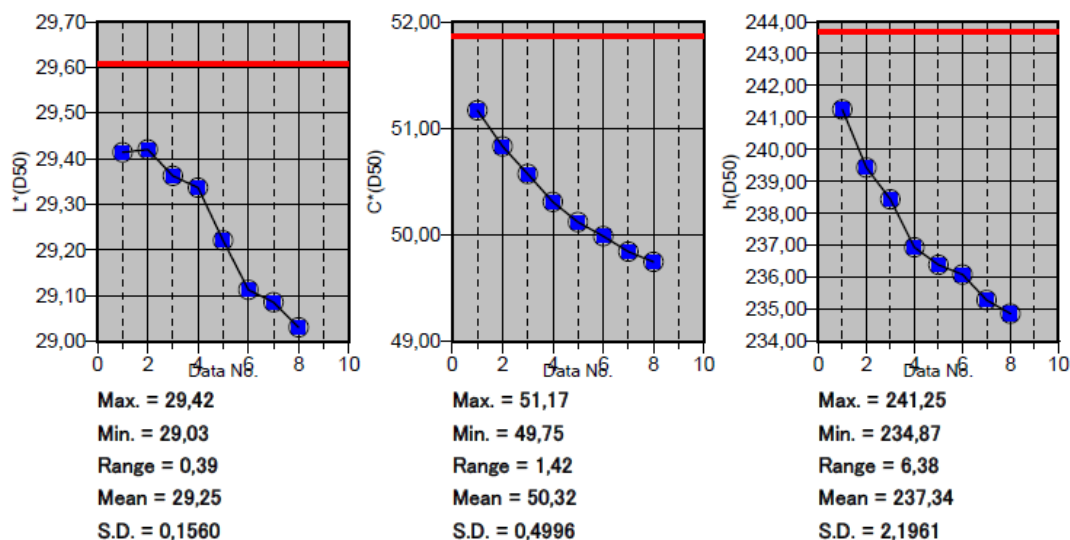
4.1.1.2 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 2 mm

Slika 46 prikazuje transmisijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 46 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

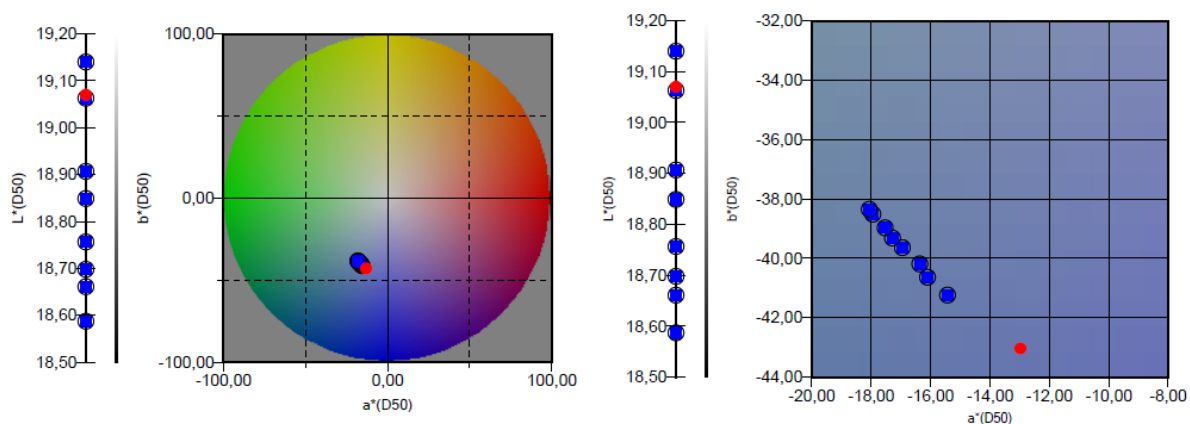
Slika 47 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 47 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

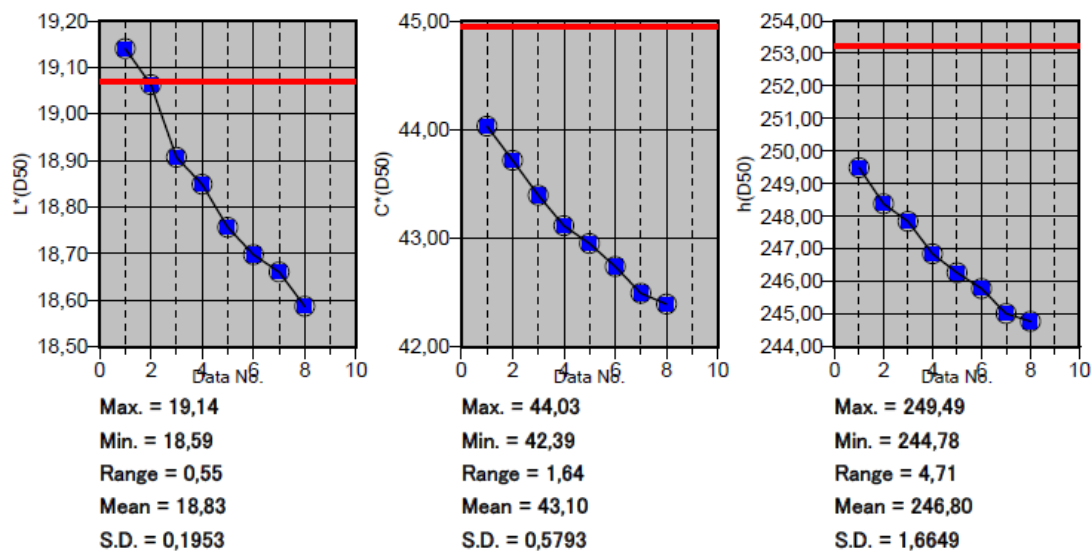
4.1.1.3 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 3 mm

Slika 48 prikazuje transmisijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 48 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

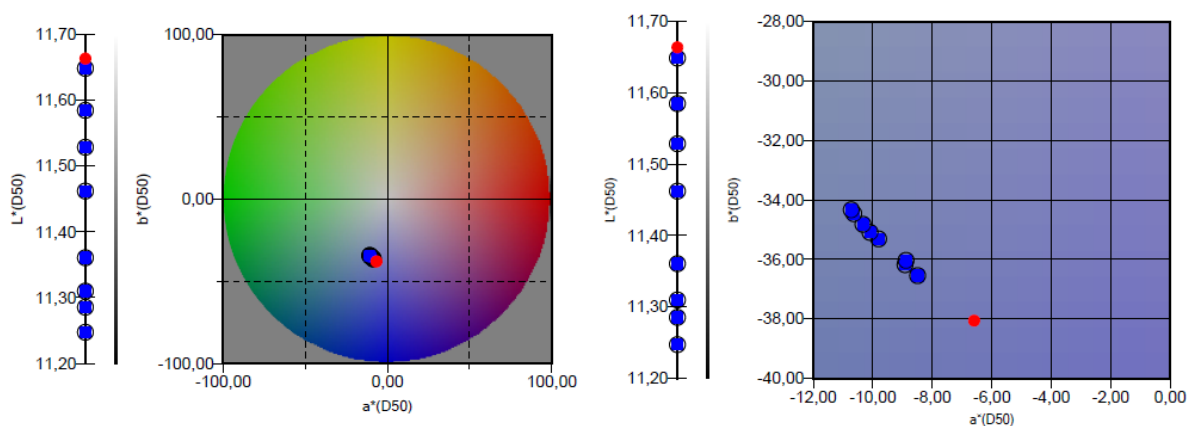
Slika 49 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 49 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

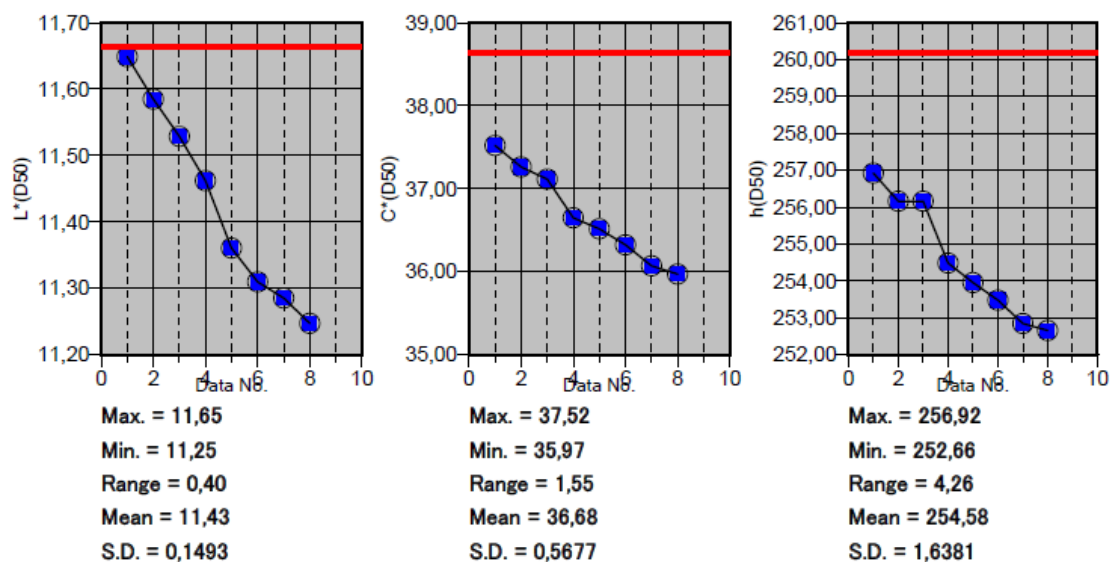
4.1.1.4 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 4 mm

Slika 50 prikazuje transmisijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 50 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

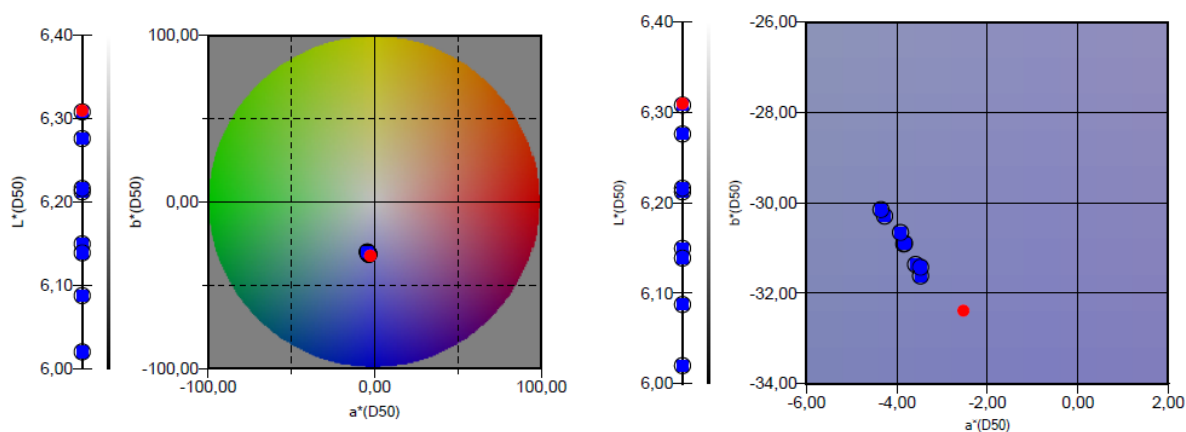
Slika 51 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 51 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

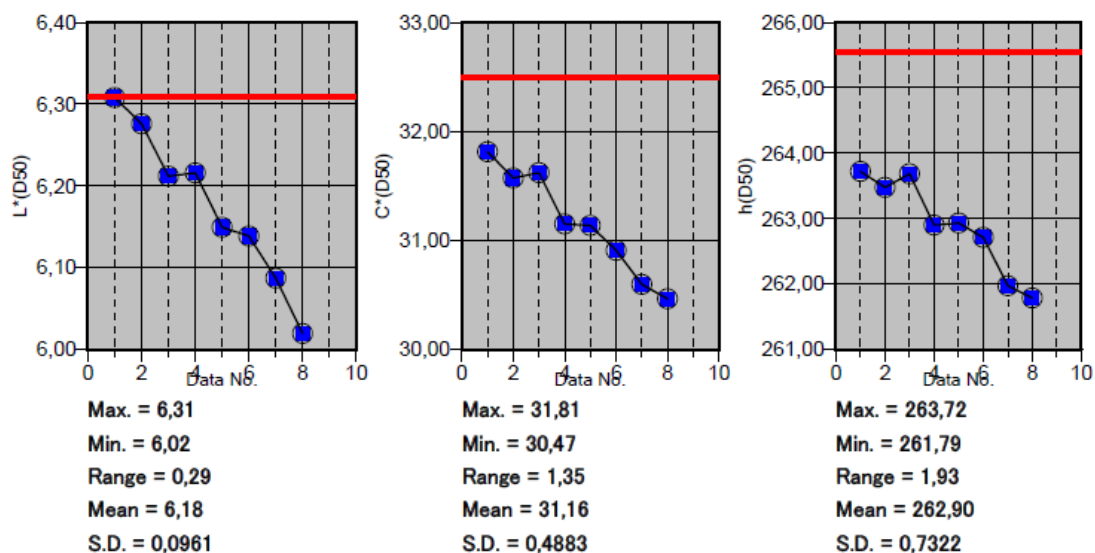
4.1.1.5 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 5 mm

Slika 52 prikazuje transmisijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 52 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 53 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.

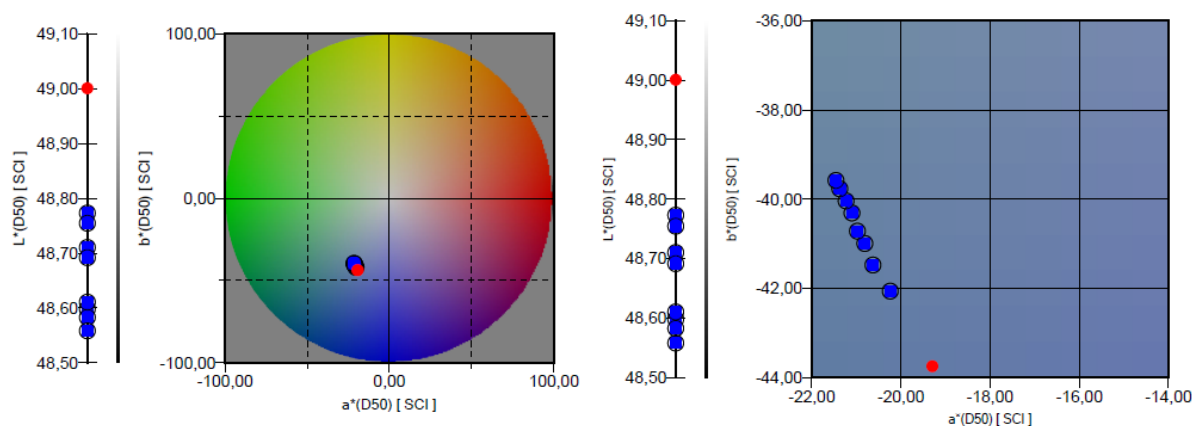


Slika 53 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

4.1.1.6 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 1 mm

Slika 54 prikazuje refleksivna svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja.

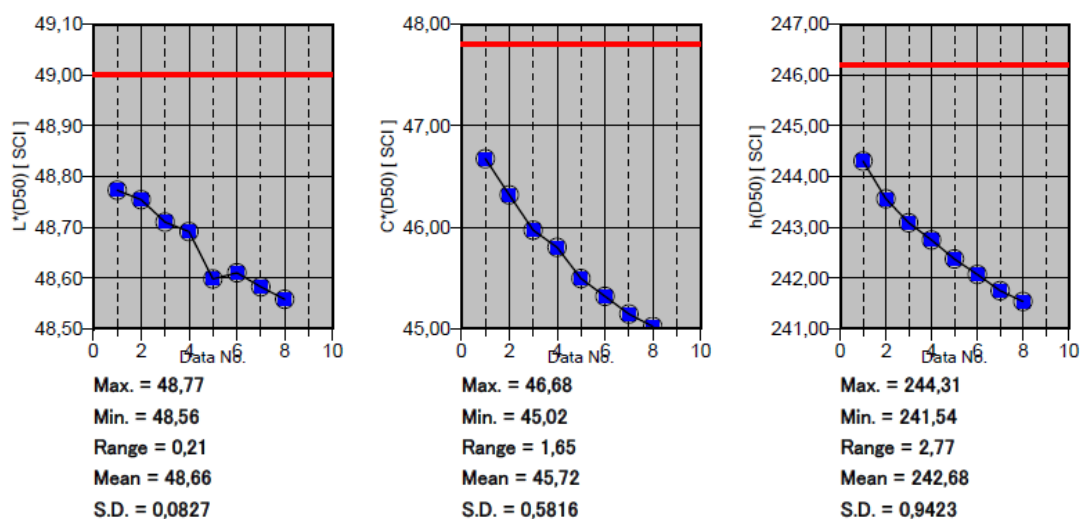
Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 54 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 55 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm.

Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.

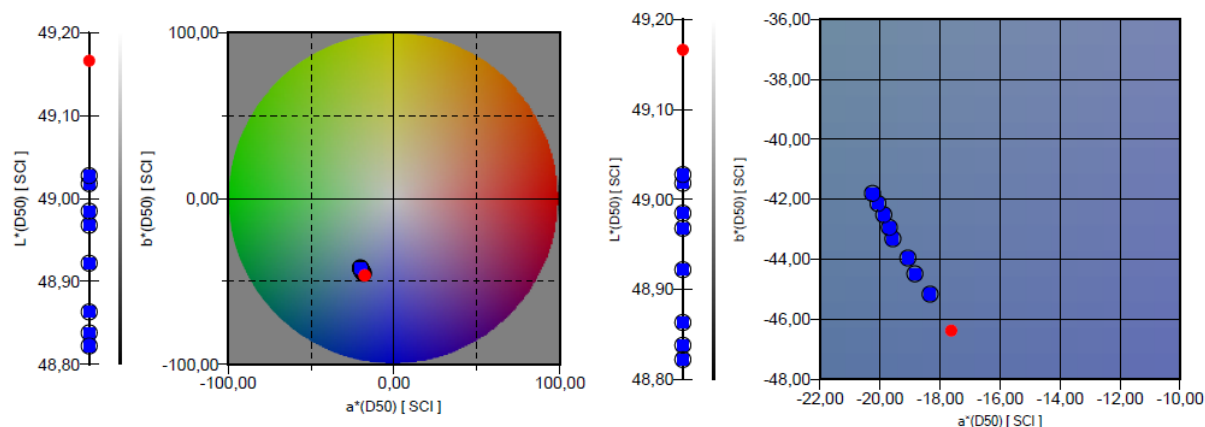


Slika 55 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.1.7 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 2 mm

Slika 56 prikazuje refleksivna svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja.

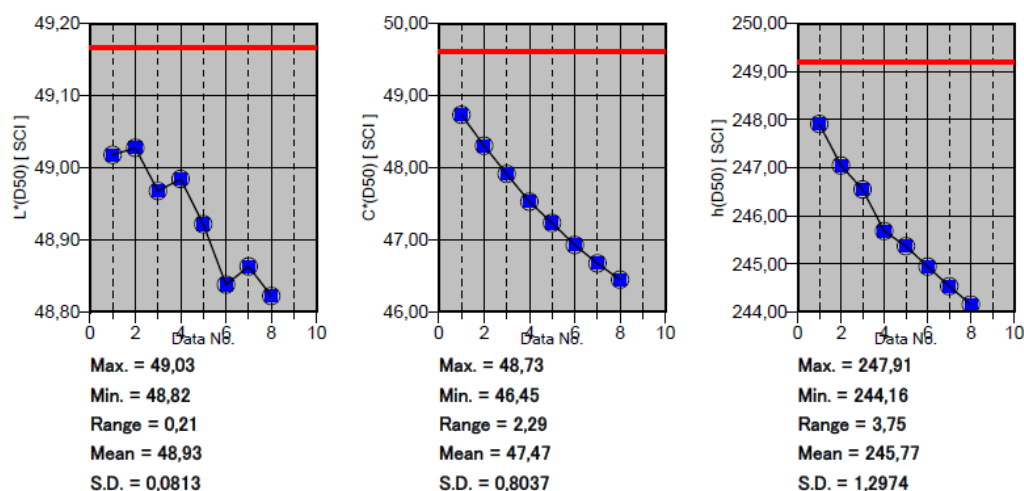
Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 56 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 57 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm.

Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.

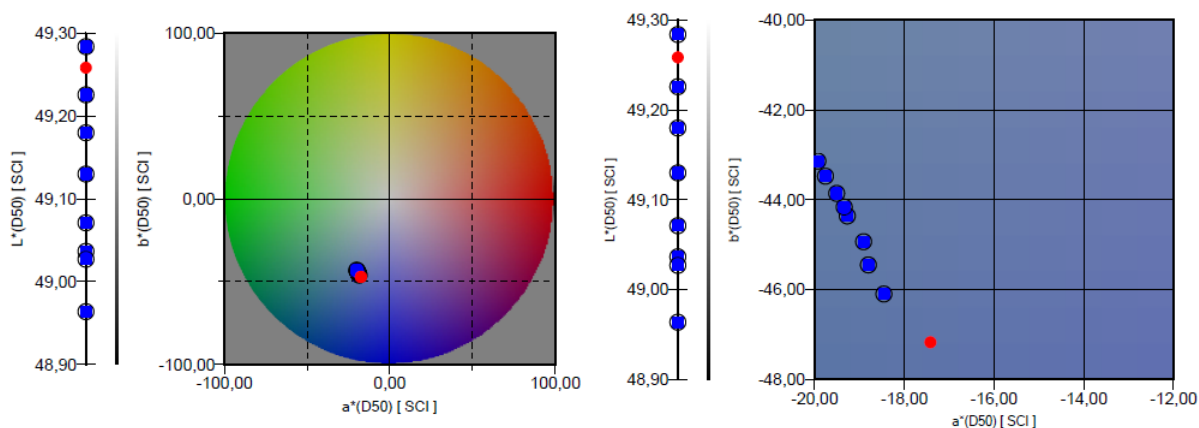


Slika 57 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.1.8 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 3 mm

Slika 58 prikazuje refleksivna svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja.

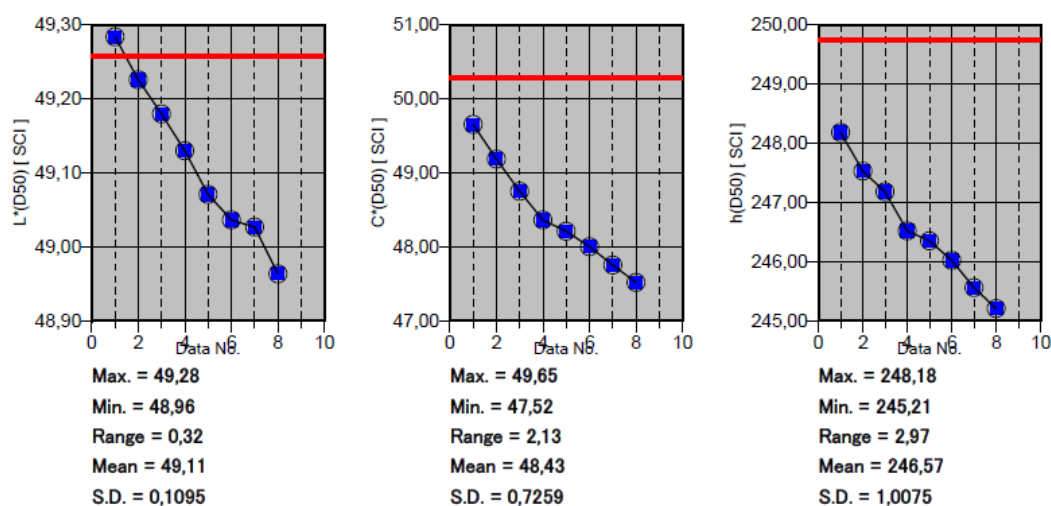
Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 58 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 59 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm.

Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.

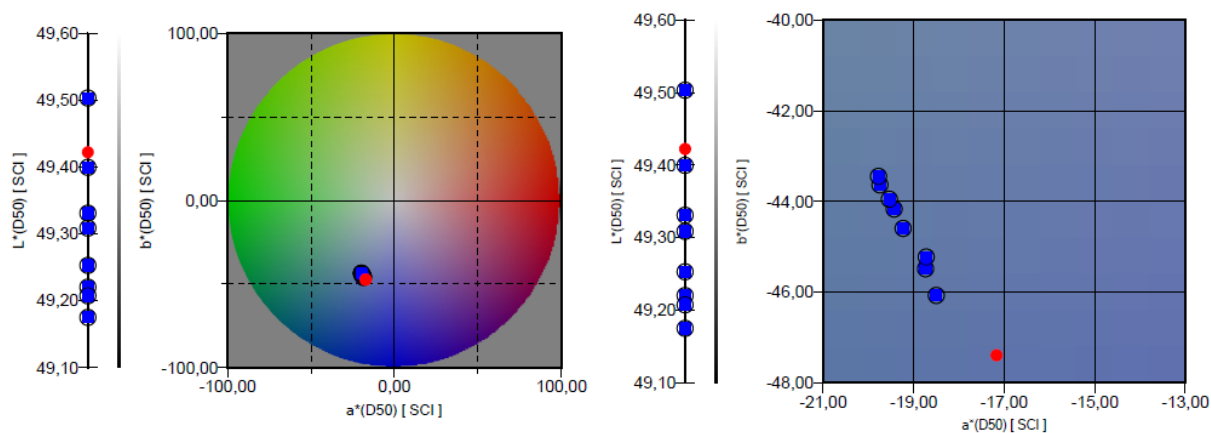


Slika 59 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.1.9 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 4 mm

Slika 60 prikazuje refleksivna svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja.

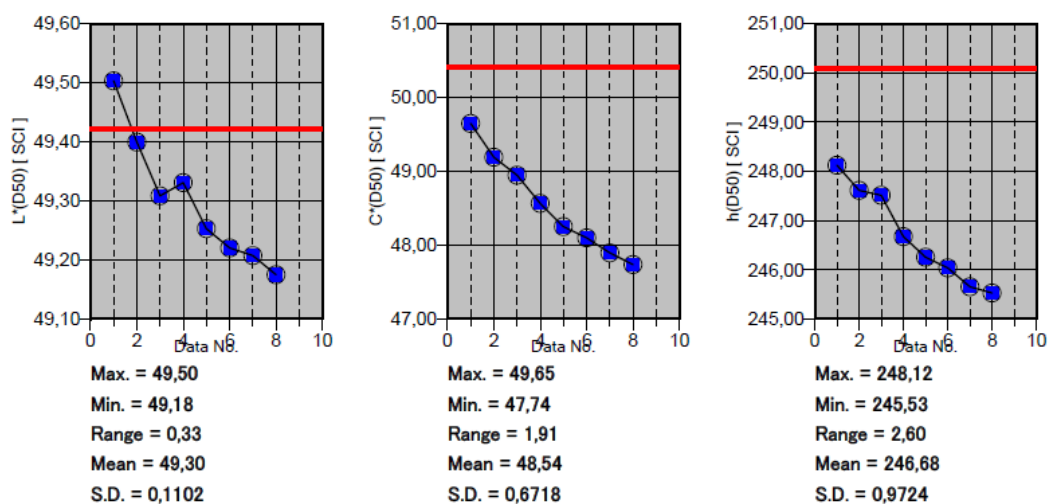
Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 60 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 61 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm.

Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.

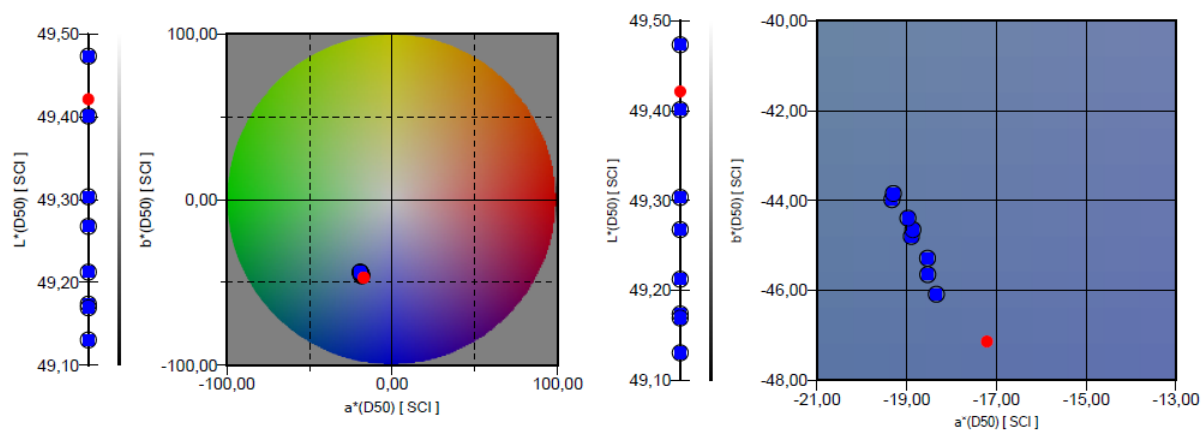


Slika 61 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.1.10 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – cijan bojilo debljine 5 mm

Slika 62 prikazuje refleksivna svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja.

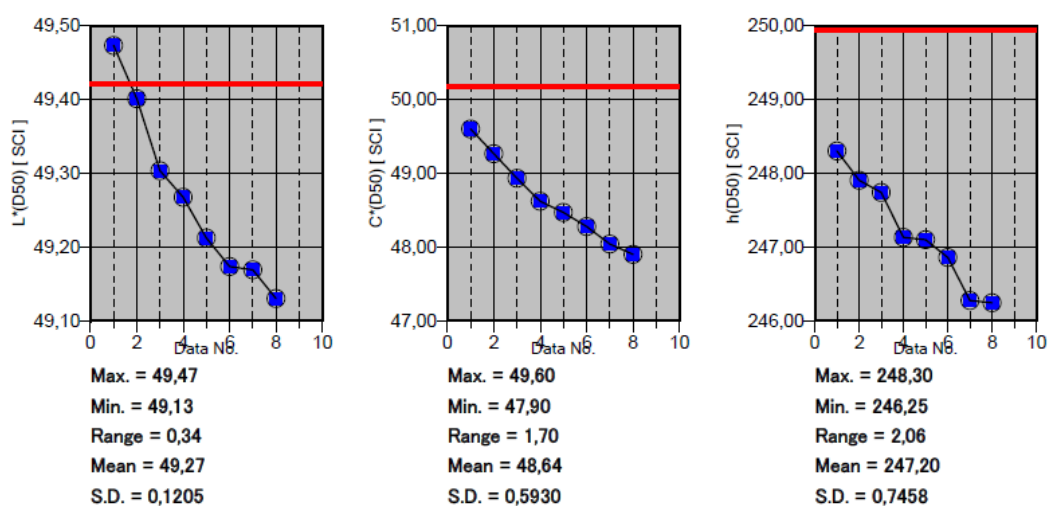
Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 62 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 63 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm.

Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 63 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

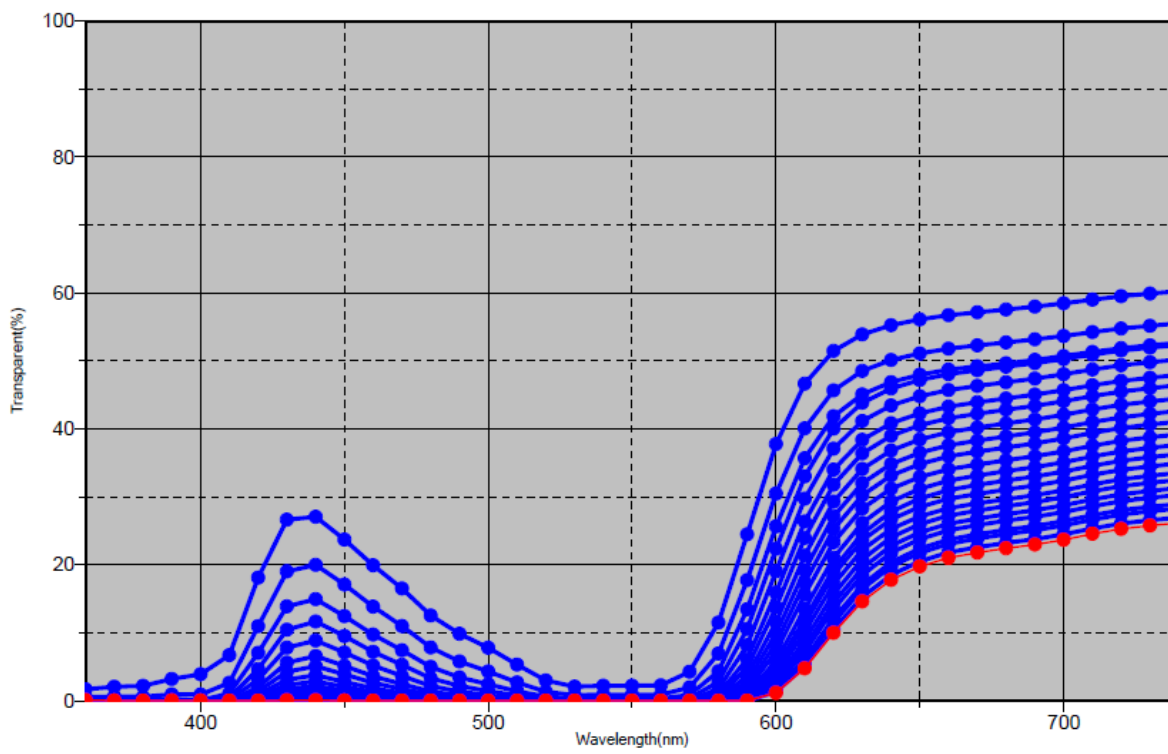
4.1.2 Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo

U tablici (Tablica 4) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.

Tablica 3 Prikaz ukupne promjene boje transmisijskih i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa magenta bojilom u odnosu na uzorak debljine 5 mm

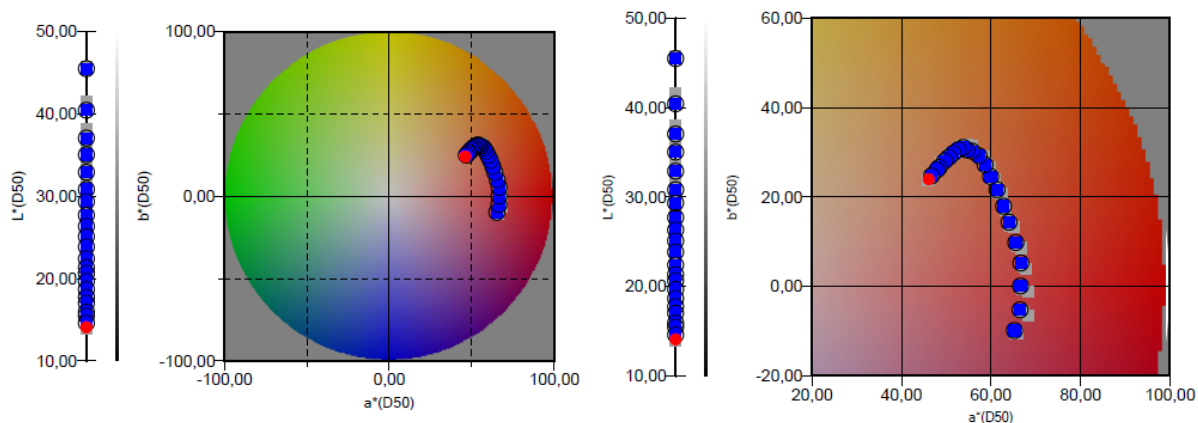
Ispitnih uzorakas magenta bojilom		
	ΔE_{00}	
mm	transmisija	refleksija
0,8	30,39	3,44
1	25,91	3,31
1,2	22,47	2,95
1,4	19,97	2,23
1,6	17,43	1,92
1,8	14,92	1,8
2	13,07	1,49
2,2	11,16	1,29
2,4	9,67	1,16
2,6	8,51	0,94
2,8	7,53	0,99
3	6,53	0,71
3,2	5,82	0,66
3,4	5,47	0,5
3,6	4,79	0,47
3,8	4,02	0,32
4	3,3	0,32
4,2	2,69	0,32
4,4	1,73	0,11
4,6	1,32	0,06
4,8	0,5	0,1

Slika 64 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



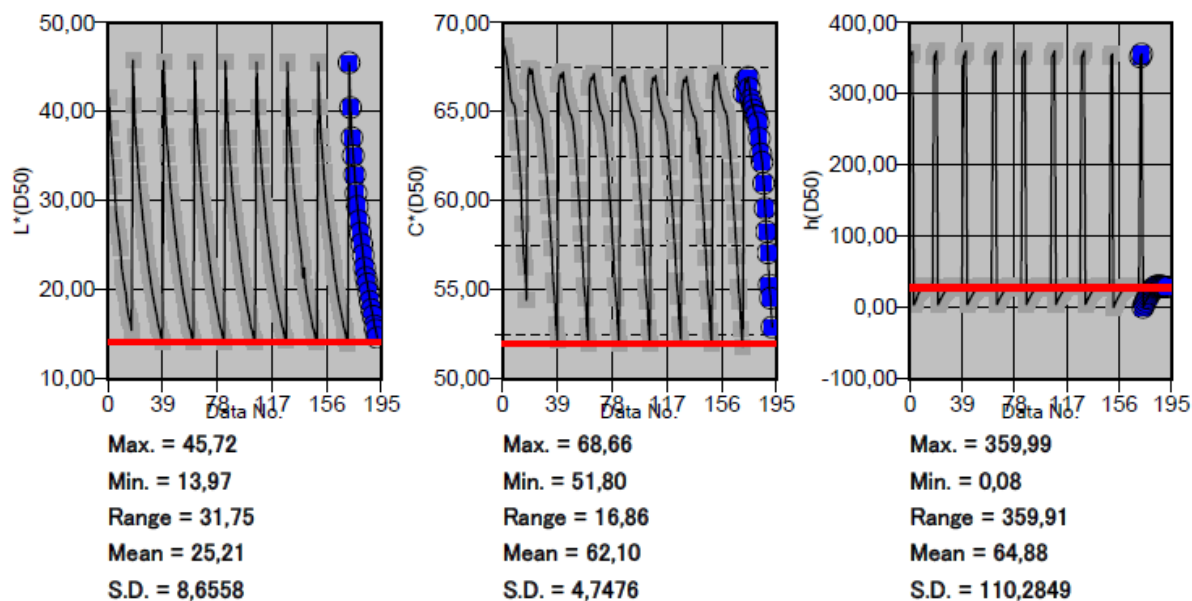
Slika 64 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom

Slika 65 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



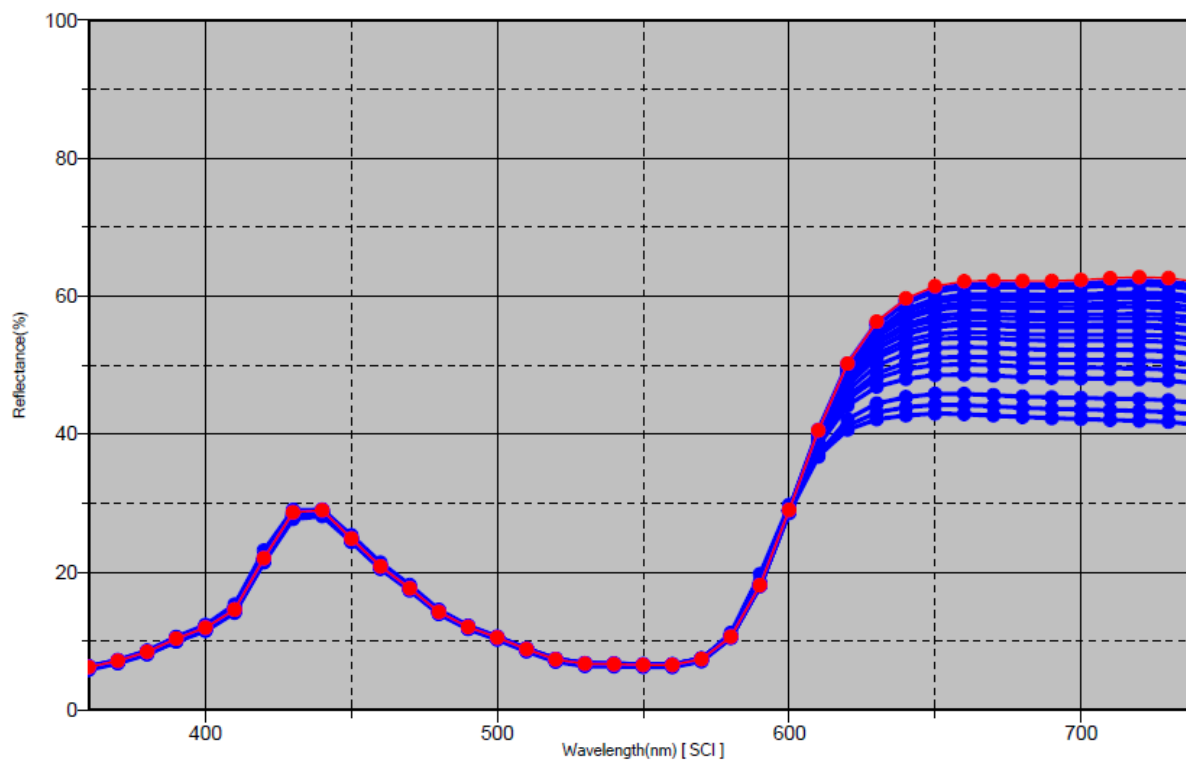
Slika 65 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom

Slika 66 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



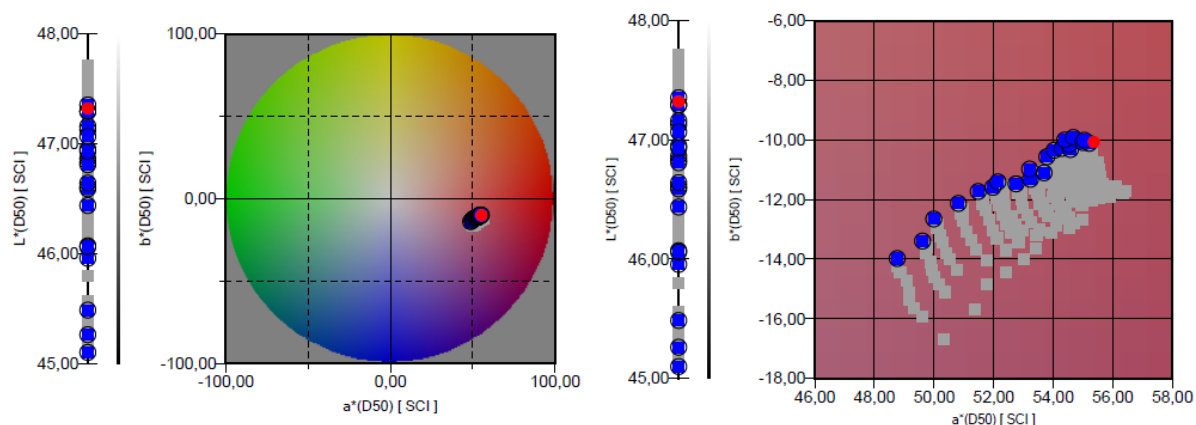
Slika 66 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka s magenta bojom

Slika 67 prikazuje spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



Slika 67 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом

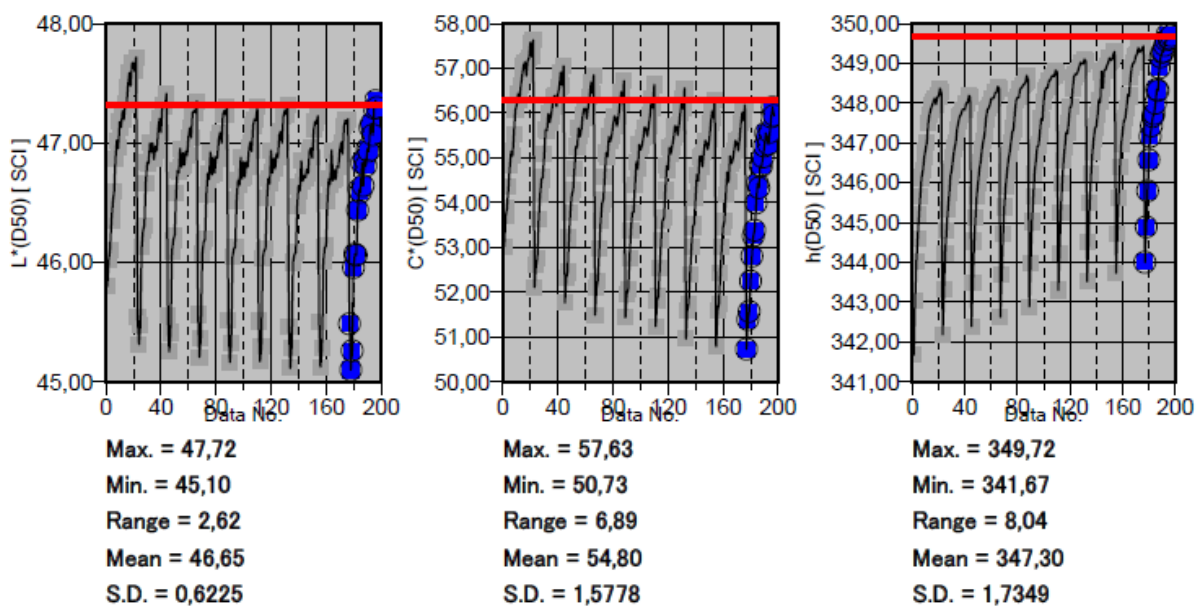
Slika 68 prikazuje reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojiłom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 68 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojilom

Slika 69 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojilom.

Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za reflektivna svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 69 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa magenta bojilom

U tablicama 5 i 6 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s cijan bojom debljine 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,0 mm i 5,0 mm. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka u „zelenom stanju“ i intervala sušenja. Mjerenja u tablici 5 prikazana su za transmisijske karakteristike ispitnih pločica, a mjerenja u tablici 6 prikazana su za refleksijske karakteristike ispitnih pločica.

Tablica 4 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s magenta bojom (transmisijiska svojstva)

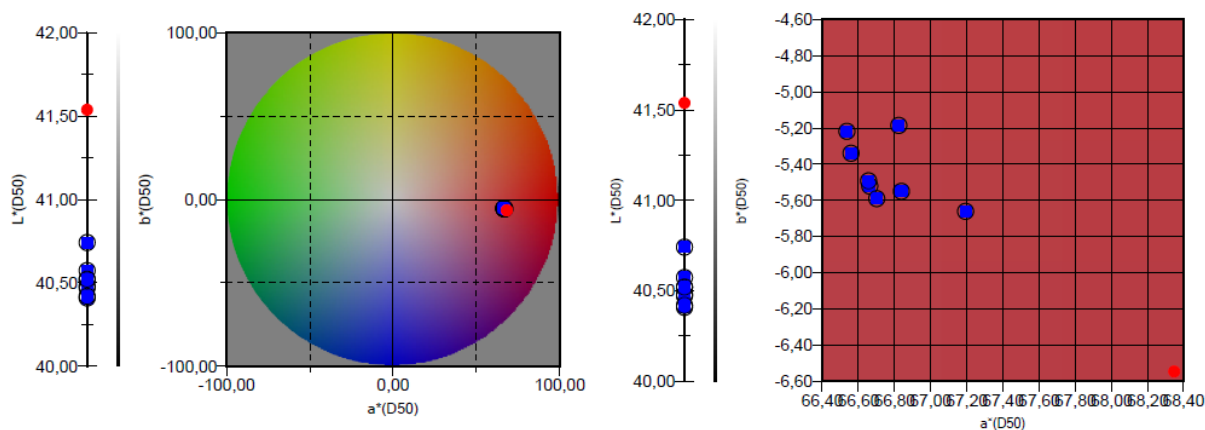
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,84	0,42	0,62	0,84	0,79
2	1,01	0,59	0,59	0,94	0,82
3	1,07	0,64	0,66	0,96	0,82
4	1,09	0,75	0,63	1,07	0,84
5	1,11	0,8	0,58	0,9	0,69
6	1,19	0,85	1,64	1,06	0,86
7	1,11	0,76	0,69	1,01	0,95
8	1,21	0,9	0,79	0,88	0,85

Tablica 5 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s magenta bojom (refleksijska svojstva)

	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,75	0,24	0,31	0,44	0,34
2	0,86	0,37	0,42	0,53	0,42
3	0,95	0,45	0,48	0,6	0,5
4	1,04	0,6	0,58	0,72	0,55
5	1,1	0,71	0,65	0,7	0,61
6	1,24	0,8	0,86	0,87	0,76
7	1,28	0,82	0,81	0,89	0,83
8	1,37	0,92	0,84	0,88	0,84

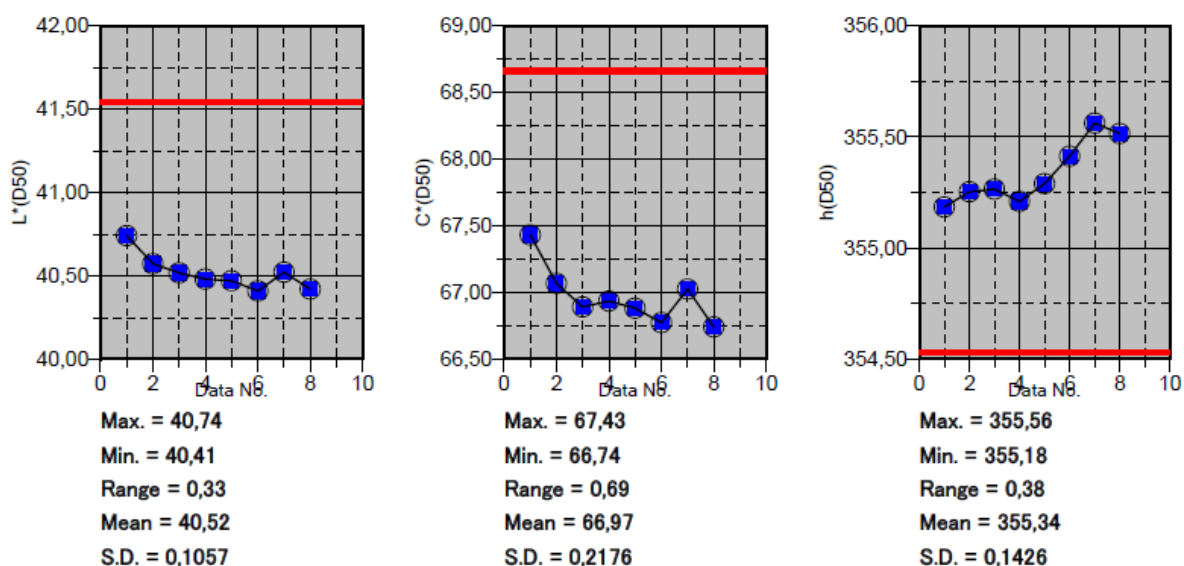
4.1.2.1 Transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 1 mm

Slika 70 prikazuje transmisijiska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja



Slika 70 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

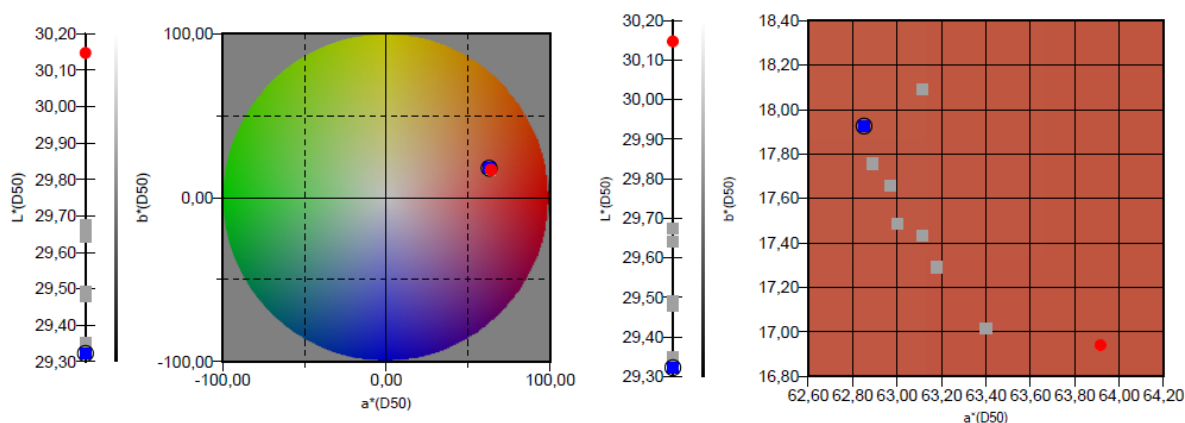
Slika 71 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 71 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

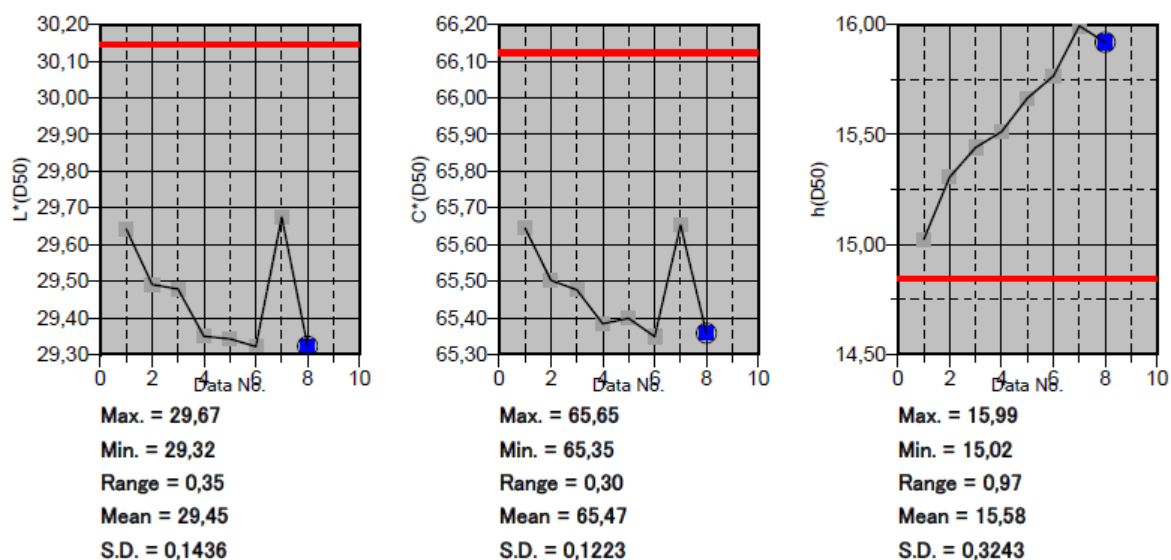
4.1.2.2 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 2 mm

Slika 72 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 72 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

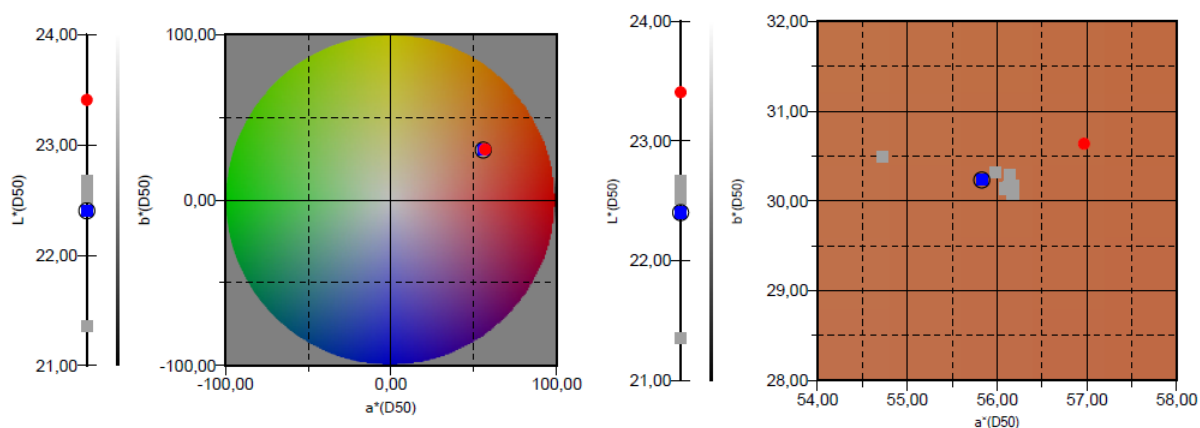
Slika 73 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 73 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

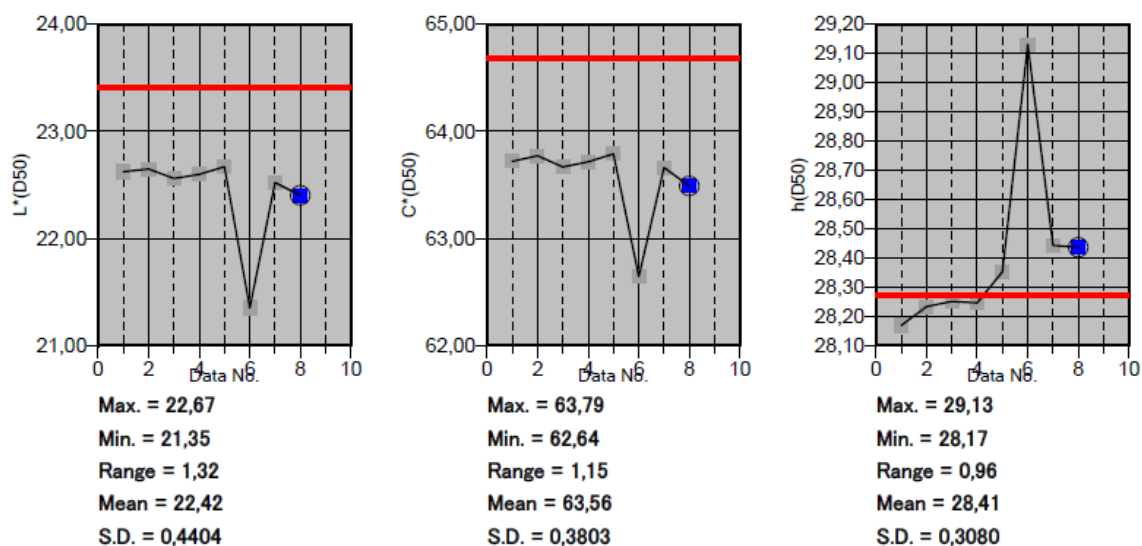
4.1.2.3 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 3 mm

Slika 74 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 74 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

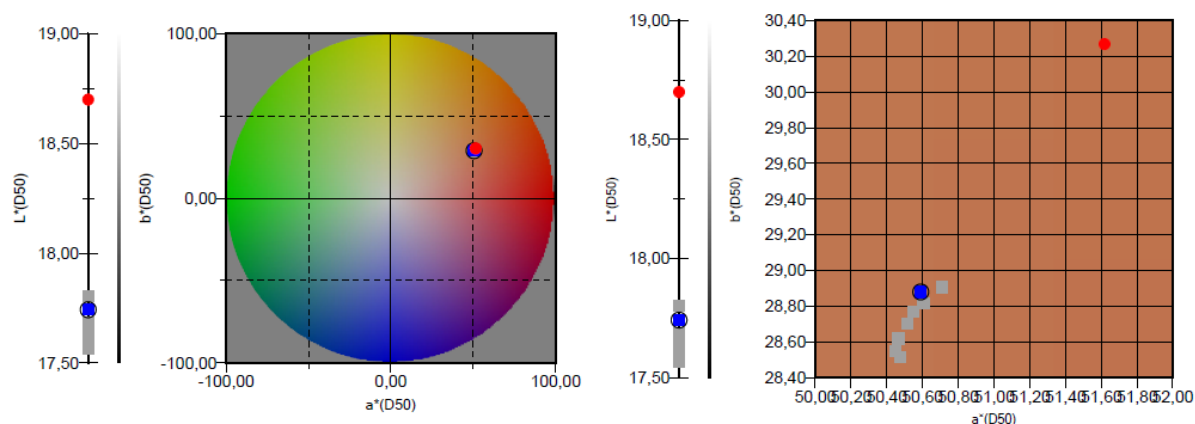
Slika 75 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 75 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

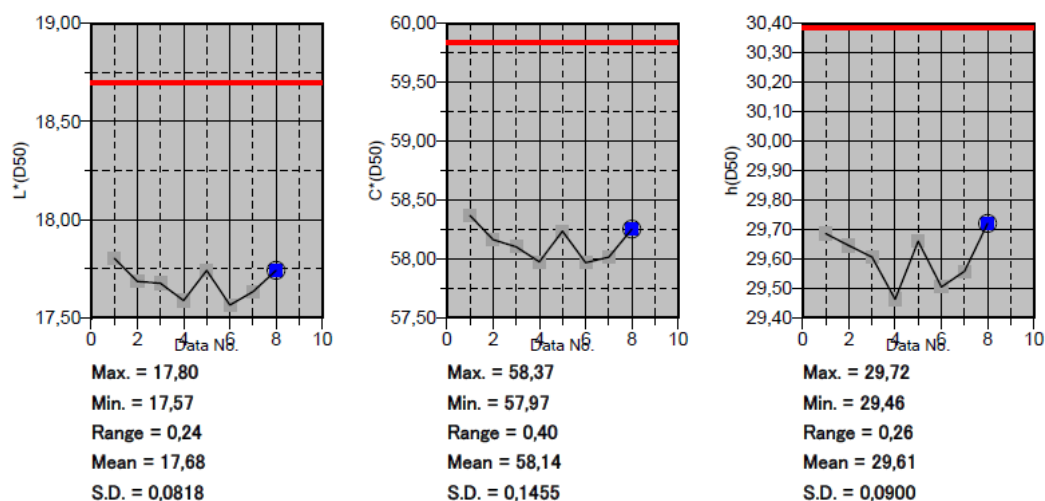
4.1.2.4 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 4 mm

Slika 76 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 76 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

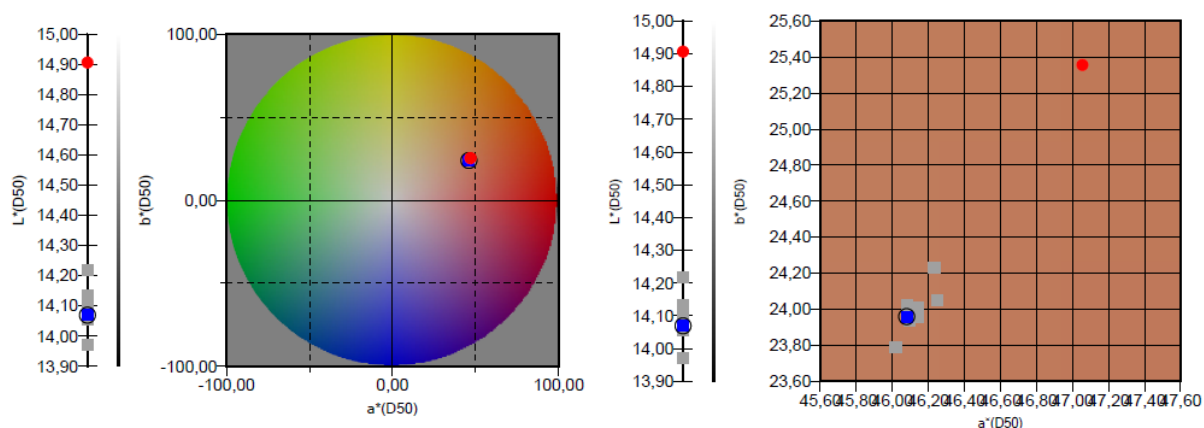
Slika 77 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 77 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

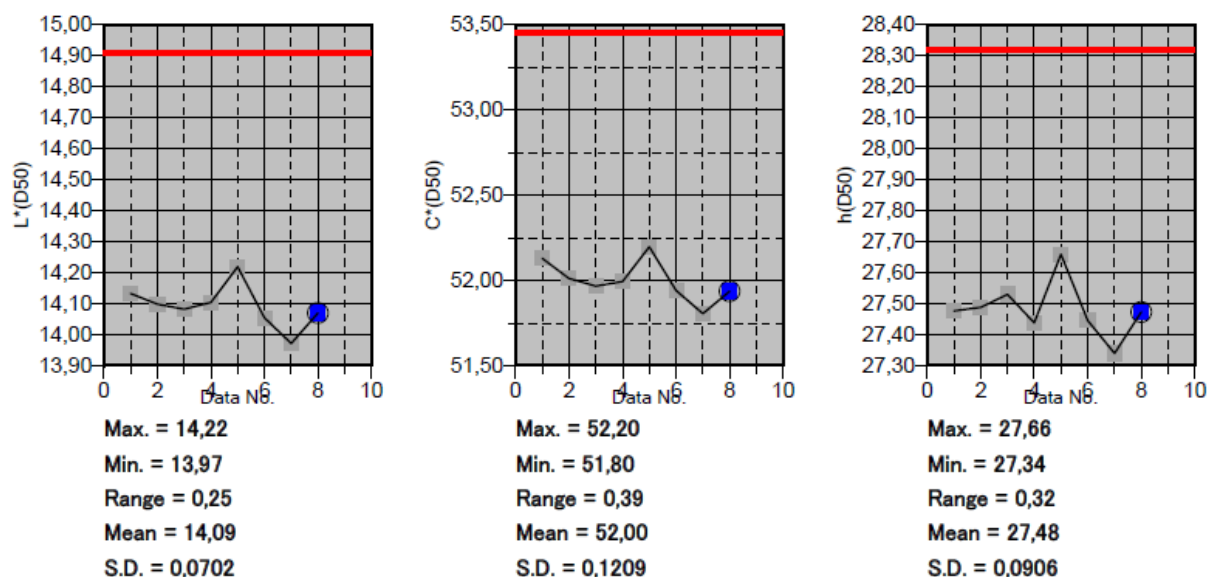
4.1.2.5 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 5 mm

Slika 78 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 78 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

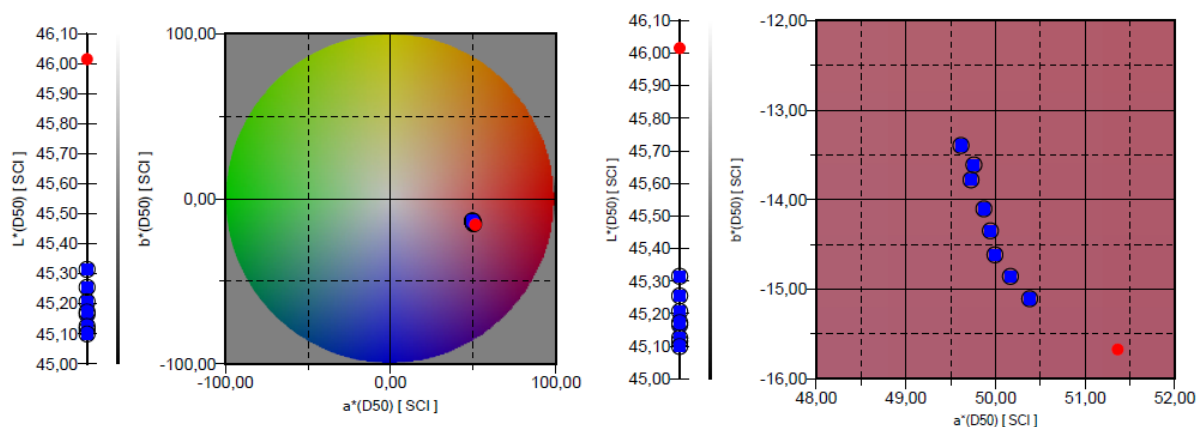
Slika 79 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 79 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

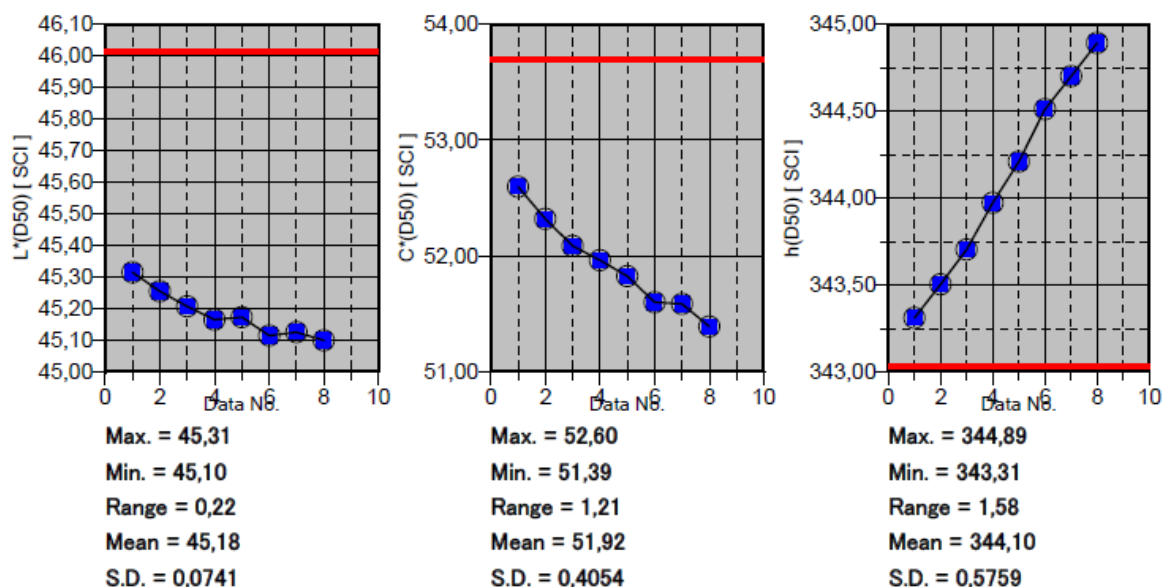
4.1.2.6 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 1 mm

Slika 80 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 80 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

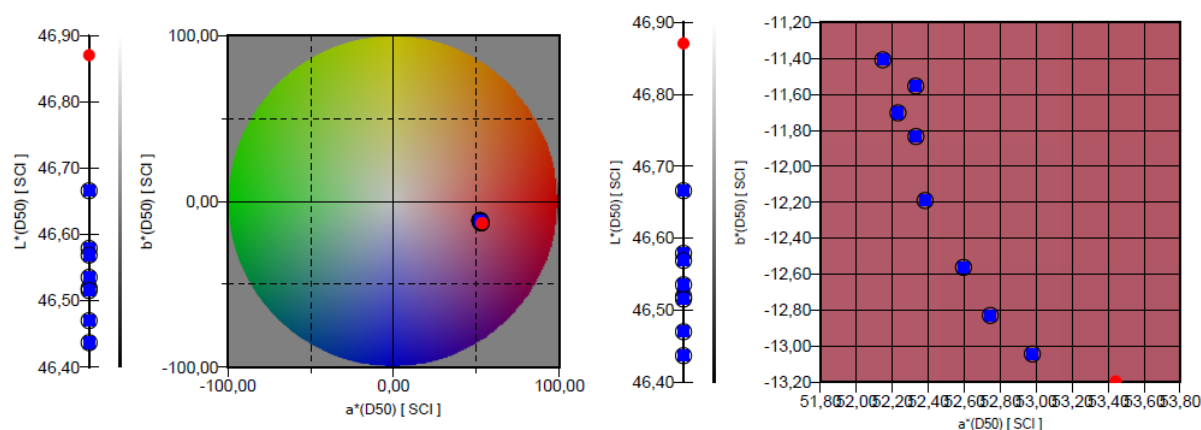
Slika 81 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 81 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

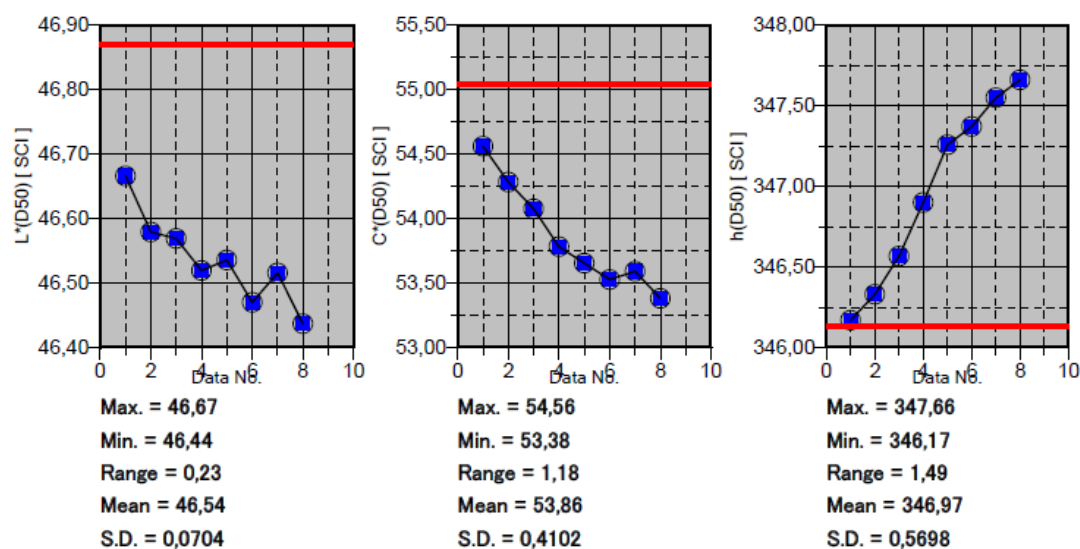
4.1.2.7 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 2 mm

Slika 82 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 82 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

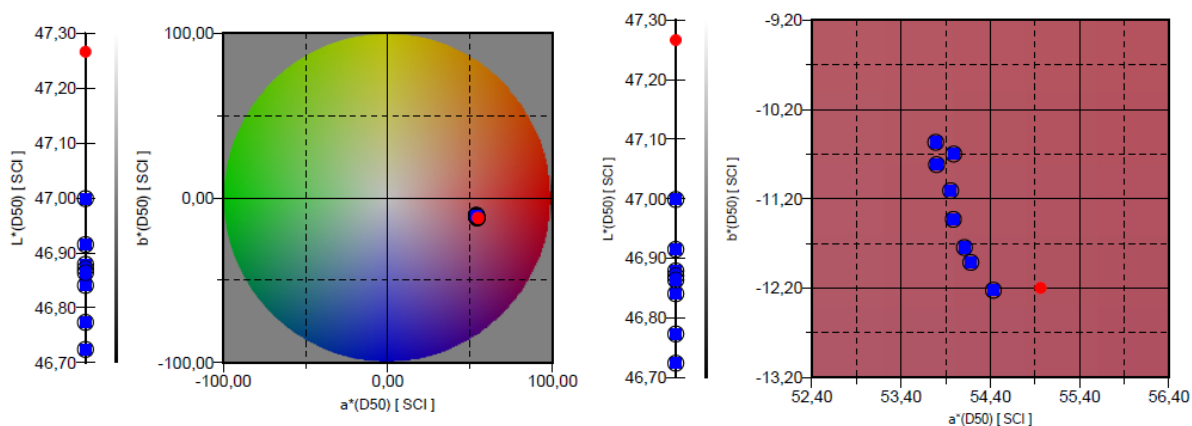
Slika 83 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 83 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

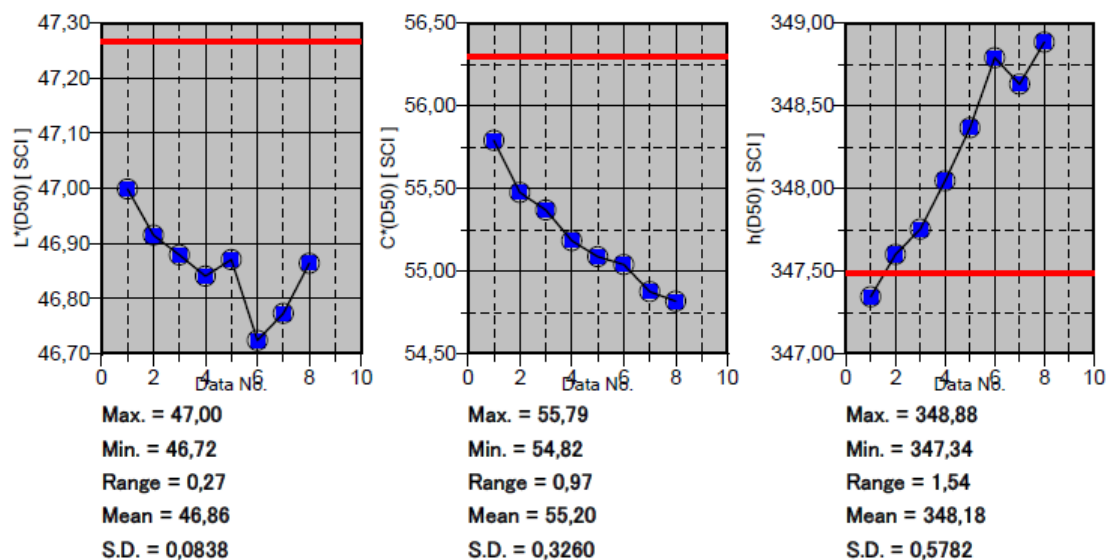
4.1.2.8 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 3 mm

Slika 84 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 84 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

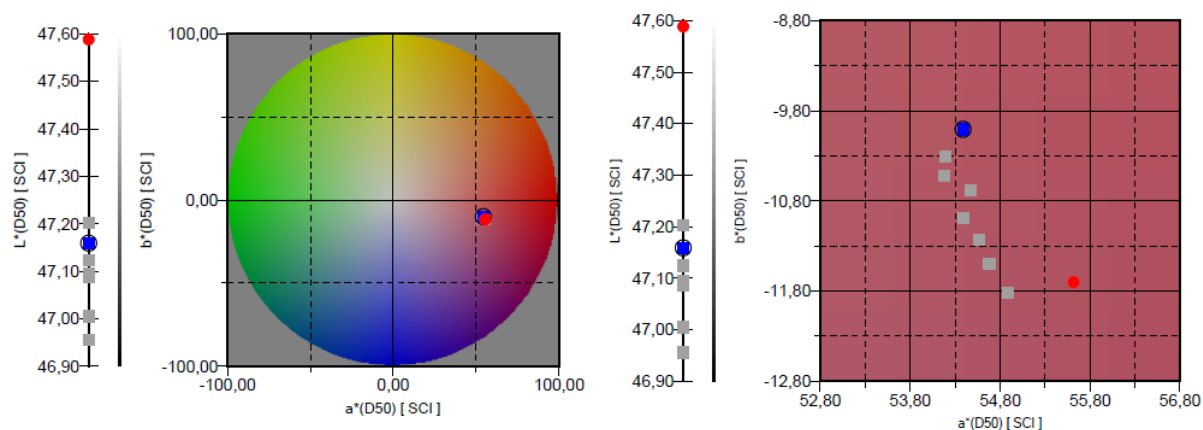
Slika 85 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 85 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

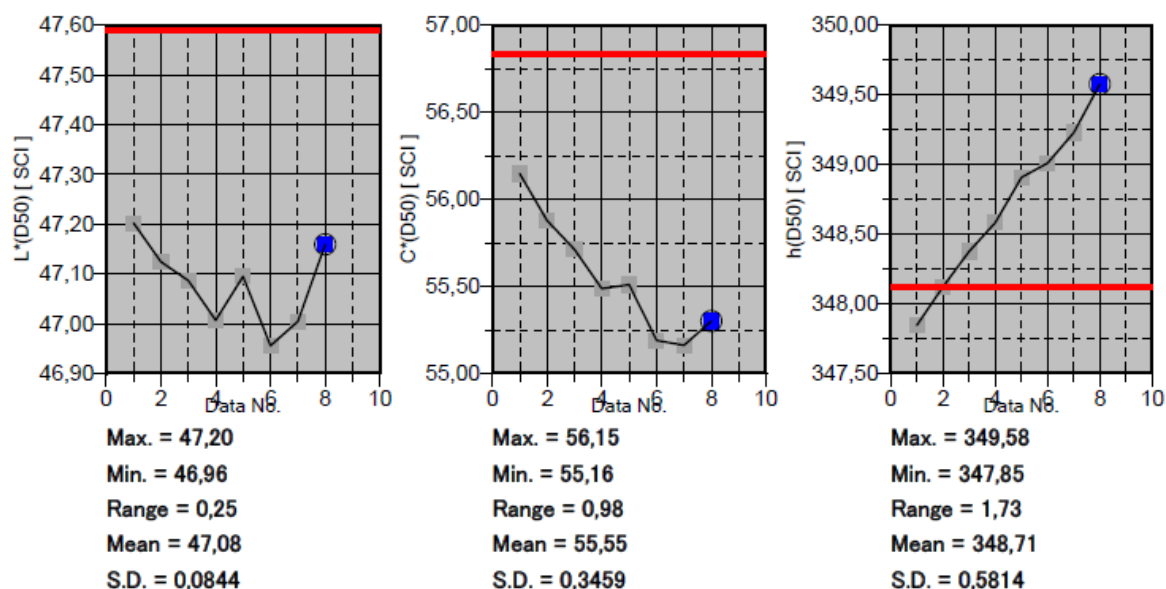
4.1.2.9 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 4 mm

Slika 86 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 86 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

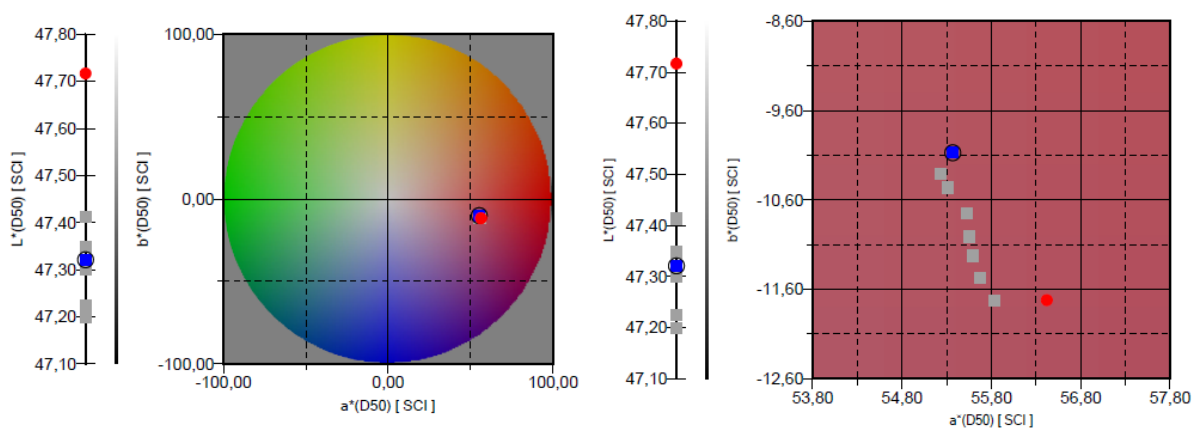
Slika 87 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 87 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

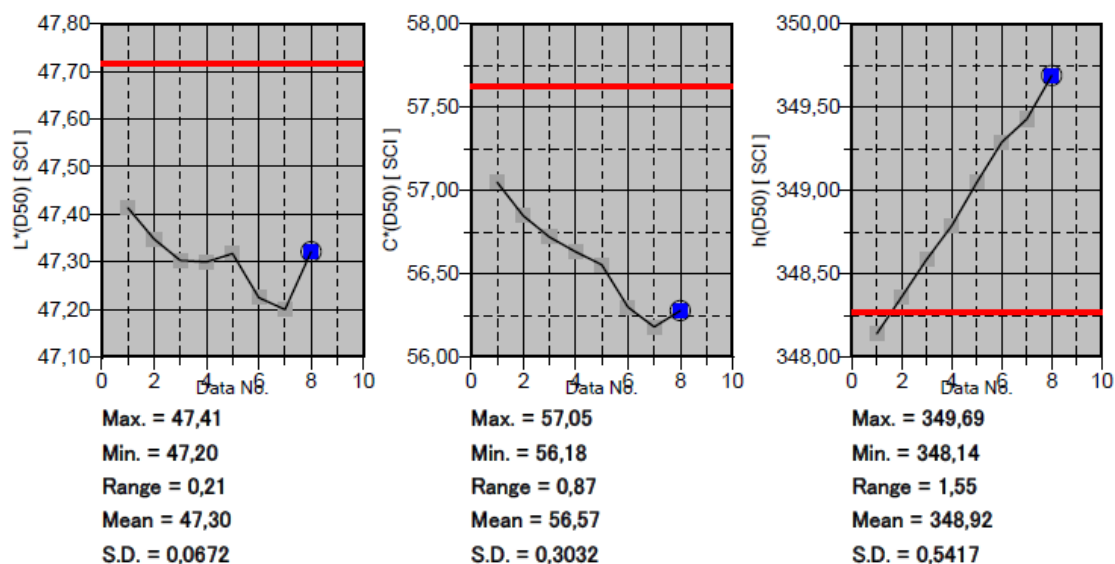
4.1.2.10 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – magenta bojilo debljine 5 mm

Slika 88 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja.



Slika 88 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja

Slika 89 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 89 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

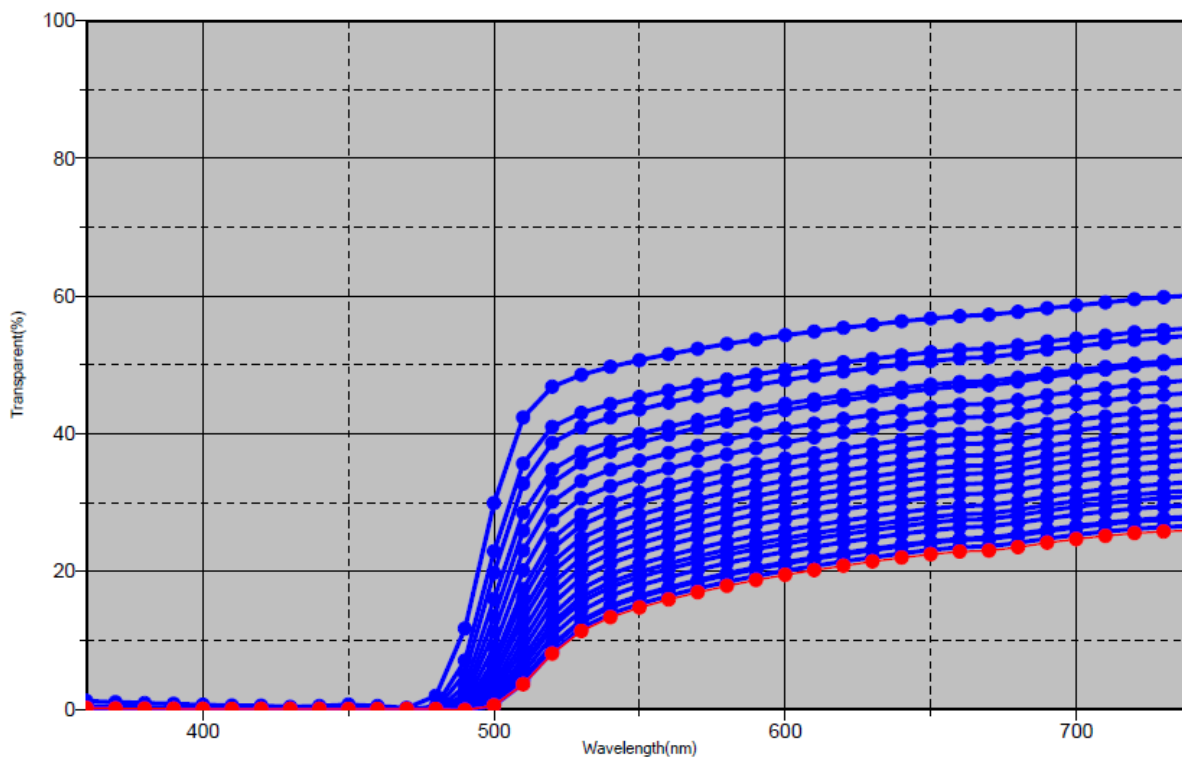
4.1.3 Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – žutog bojila

U tablici (Tablica 7) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.

Tablica 6 Prikaz ukupne promjene boje transmisijskih i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojilom u odnosu na uzorak debljine 5 mm

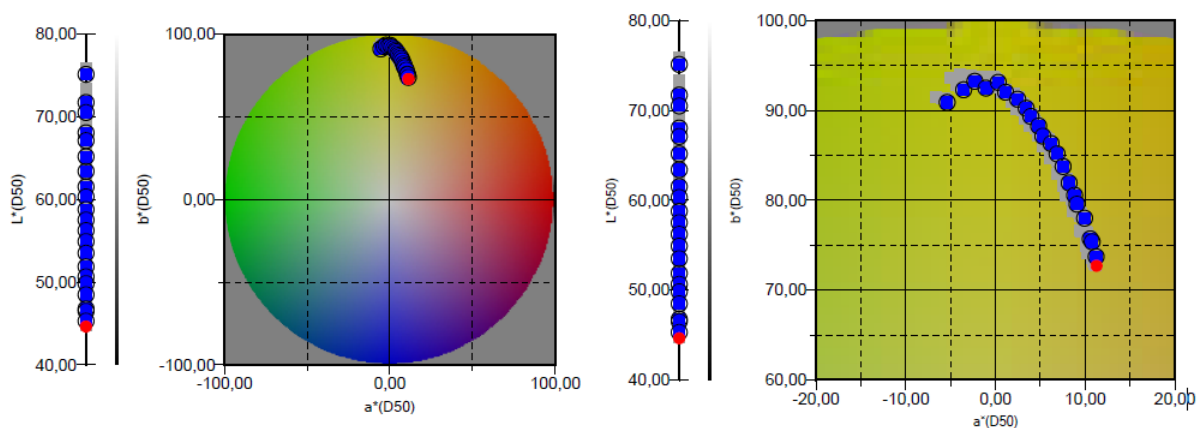
Ispitni uzorci s žutim bojilom		
	ΔE_{00}	
mm	transmisija	refleksija
0,8	28,91	8,85
1	26,39	7,81
1,2	25,39	6,9
1,4	23,44	6,36
1,6	22,58	5,21
1,8	20,98	4,81
2	19,39	4,12
2,2	17,72	3,38
2,4	16,61	3,19
2,6	15,13	2,68
2,8	13,89	2,59
3	12,54	2,01
3,2	11,14	1,66
3,4	9,62	1,43
3,6	7,84	1,01
3,8	6,48	0,79
4	5,61	0,68
4,2	4,1	0,5
4,4	2,26	0,19
4,6	1,96	0,12
4,8	0,69	0,12

Slika 90 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



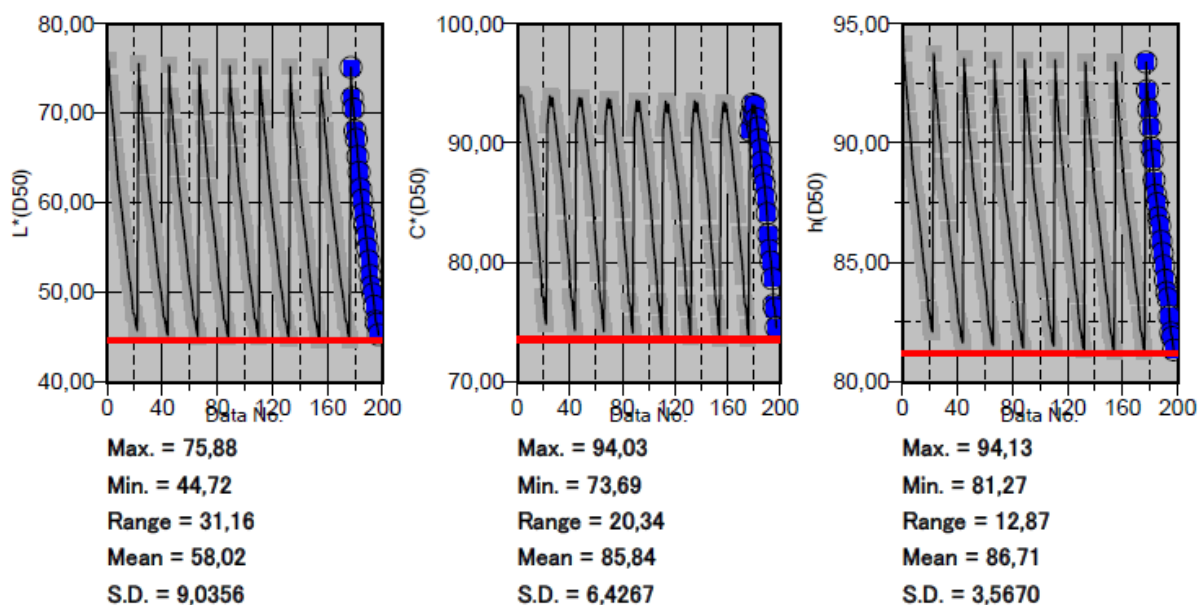
Slika 90 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom

Slika 91 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s žutim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



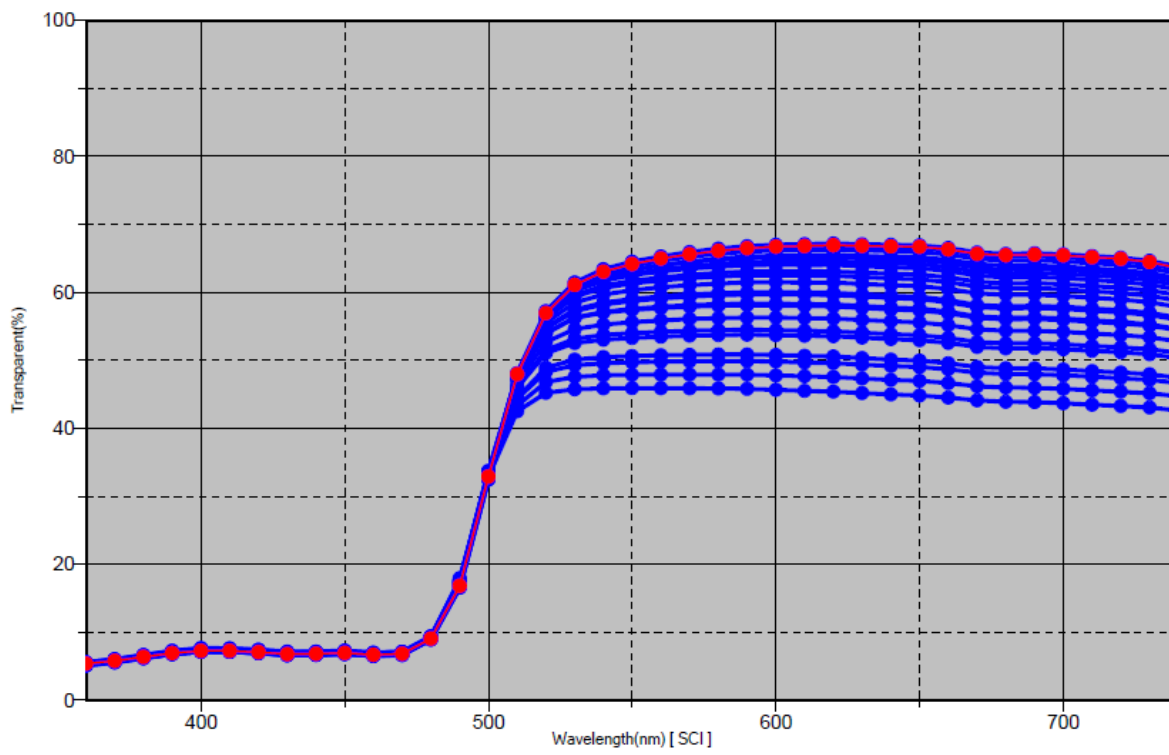
Slika 91 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom

Slika 92 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



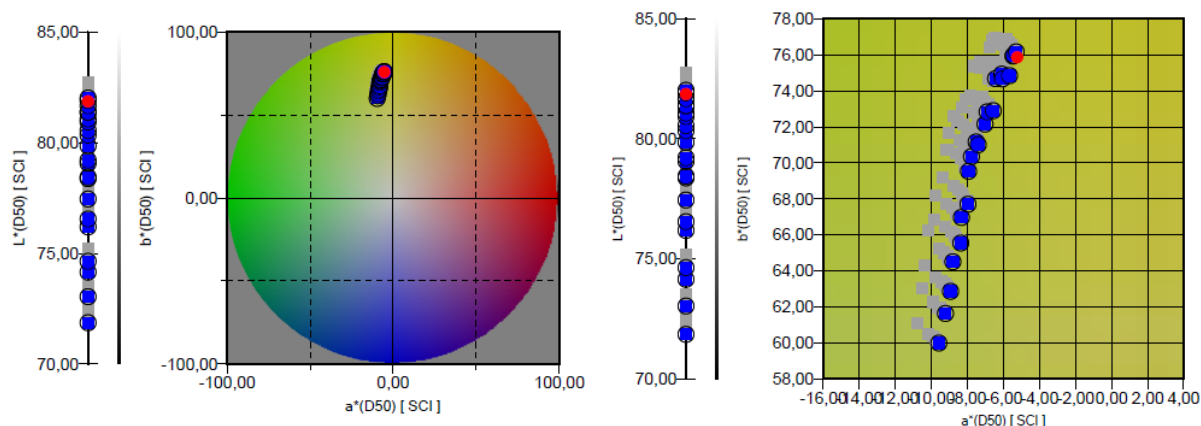
Slika 92 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa žutim bojilom.

Slika 93 prikazuje spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



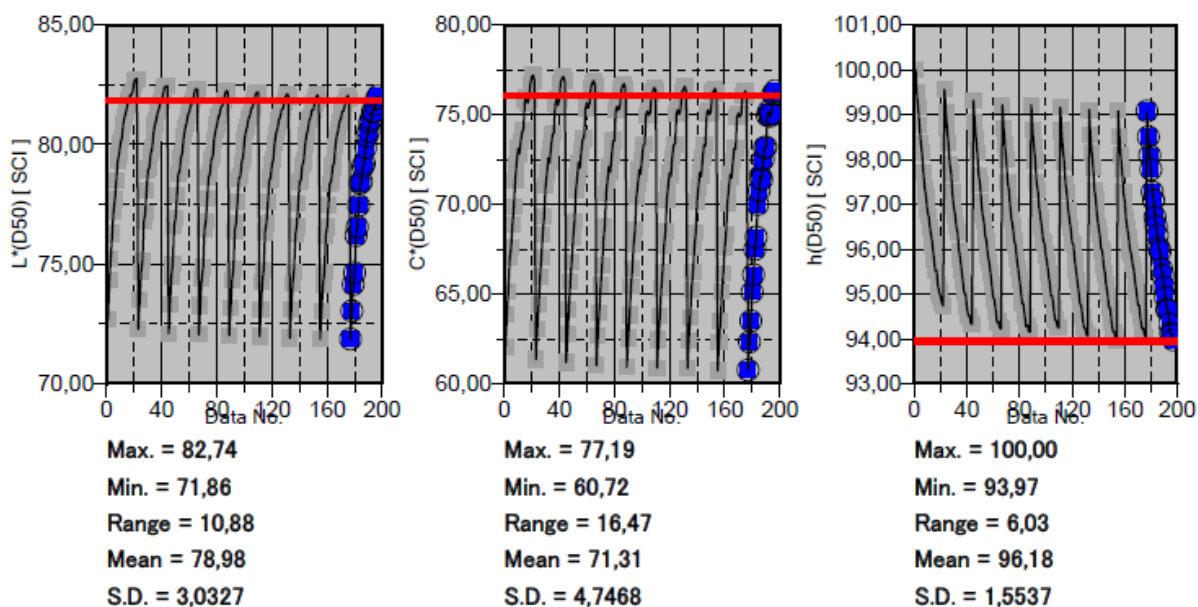
Slika 93 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom

Slika 94 prikazuje reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 94 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom

Slika 95 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za reflektivna svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 95 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa žutim bojilom

U tablicama 8 i 9 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s cijan bojom debljine 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,0 mm i 5,0 mm. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka u „zelenom stanju“ i intervala sušenja. Mjerenja u tablici 8 prikazana su za transmisijske karakteristike ispitnih pločica, a mjerenja u tablici 9 prikazana su za refleksijske karakteristike ispitnih pločica.

Tablica 7 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s žutim bojom (transmisijna svojstva)

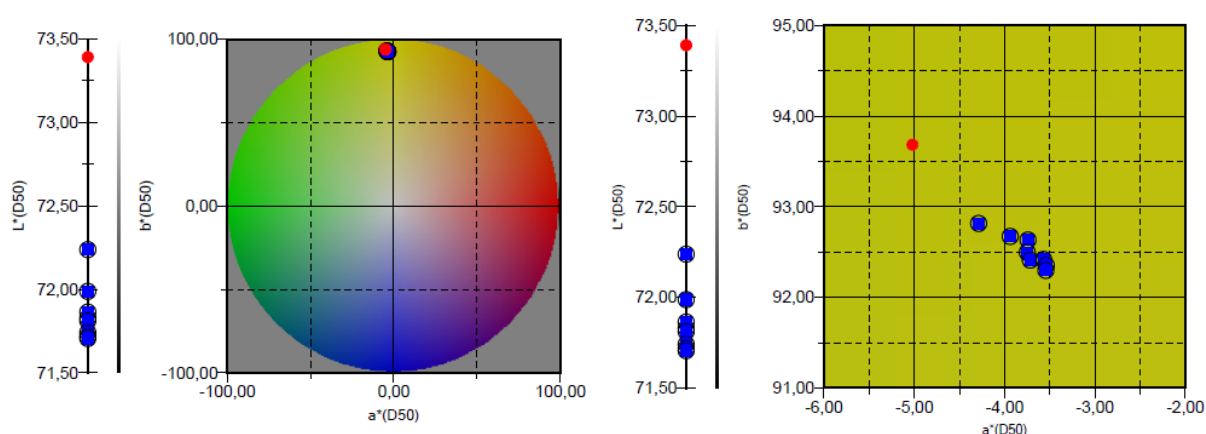
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,95	0,6	0,7	0,76	0,63
2	1,2	0,86	0,84	0,94	0,77
3	1,36	1,01	1,08	1,04	0,91
4	1,33	1,11	0,94	0,89	0,87
5	1,38	1,13	1,17	1,15	1,1
6	1,46	1,28	1,33	1,26	1,21
7	1,49	1,38	1,35	1,24	1,19
8	1,5	1,38	1,42	1,34	1,33

Tablica 8 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s žutim bojom (refleksijska svojstva)

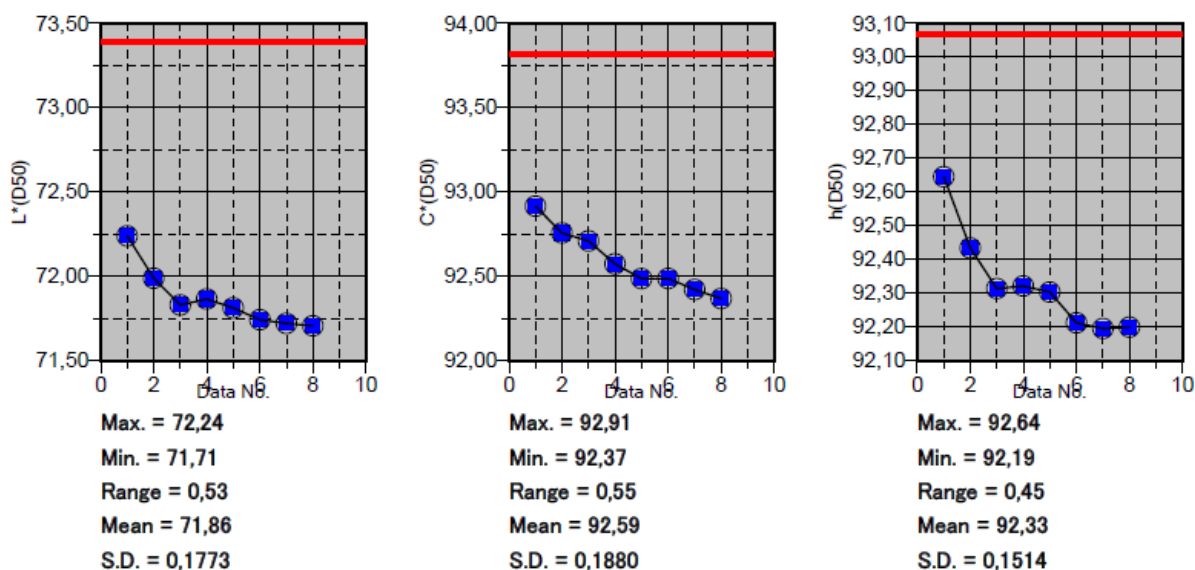
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,71	0,45	0,46	0,45	0,37
2	0,9	0,65	0,59	0,58	0,51
3	0,98	0,78	0,69	0,67	0,58
4	1,05	0,87	0,68	0,59	0,55
5	1,11	0,91	0,77	0,73	0,73
6	1,17	1	0,89	0,78	0,82
7	1,21	1,08	0,91	0,77	0,8
8	1,22	1,08	0,98	0,84	0,87

4.1.3.1 Transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 1 mm

Slika 96 prikazuje transmisijiska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 97 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



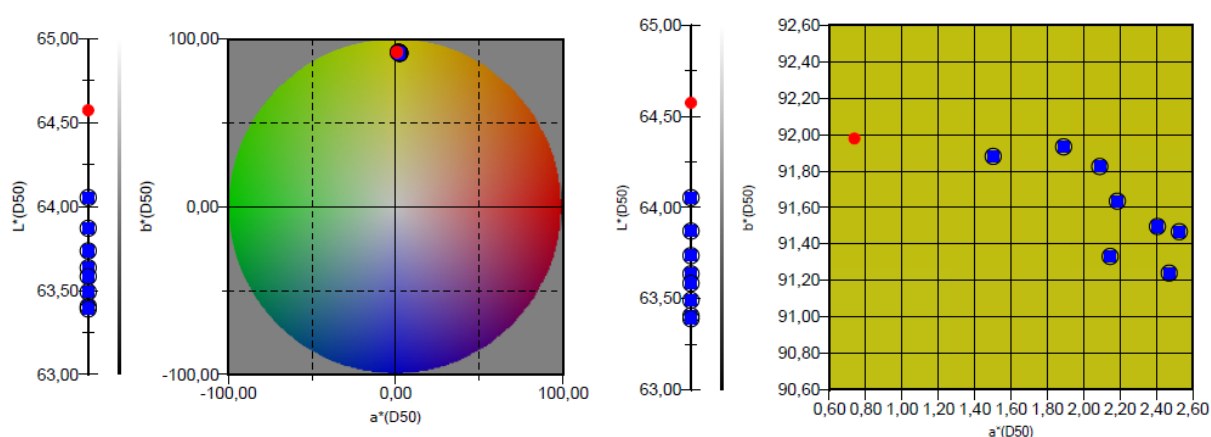
Slika 96 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



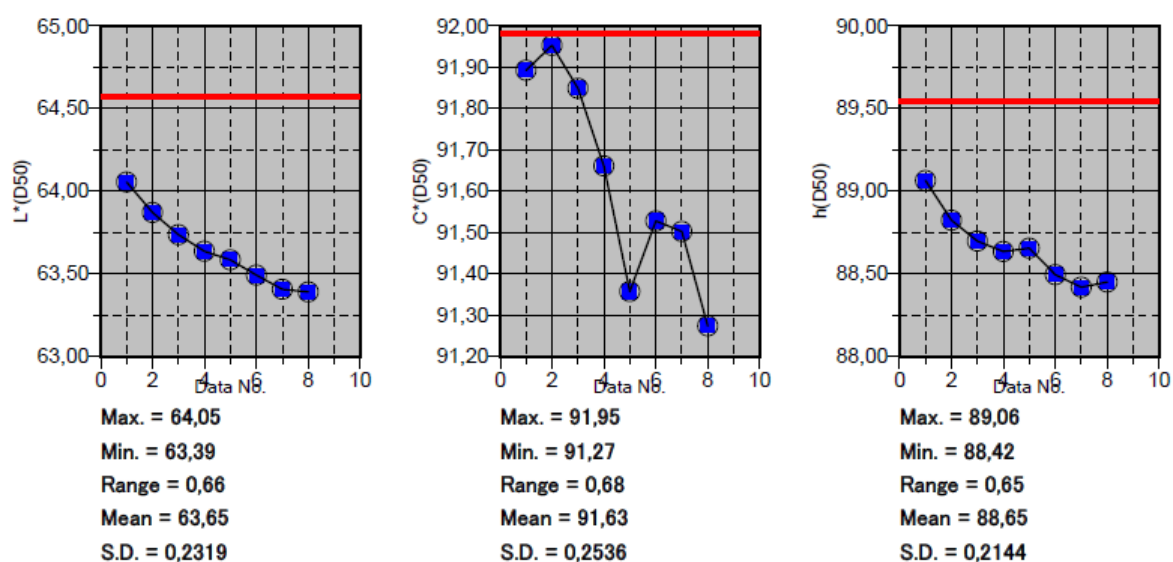
Slika 97 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.3.2 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 2 mm

Slika 98 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 99 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



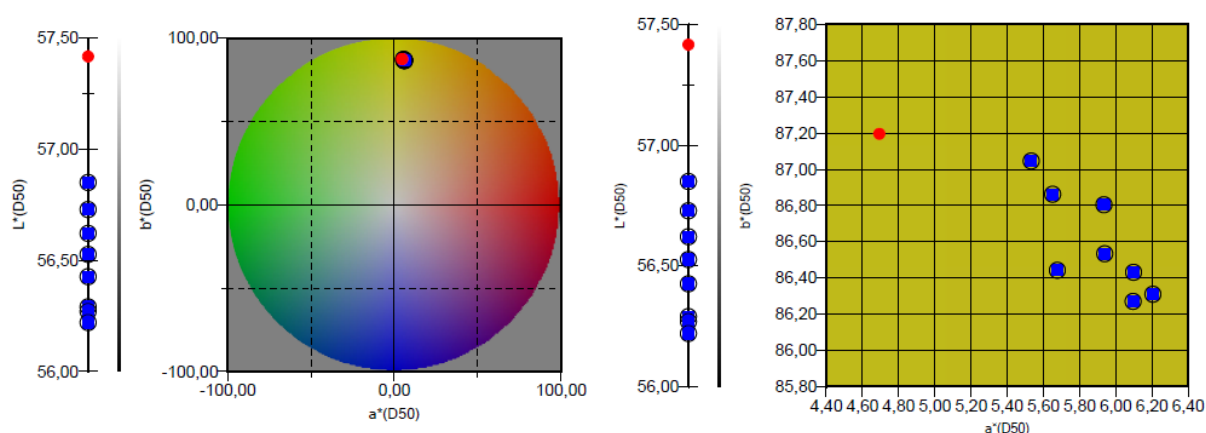
Slika 98 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



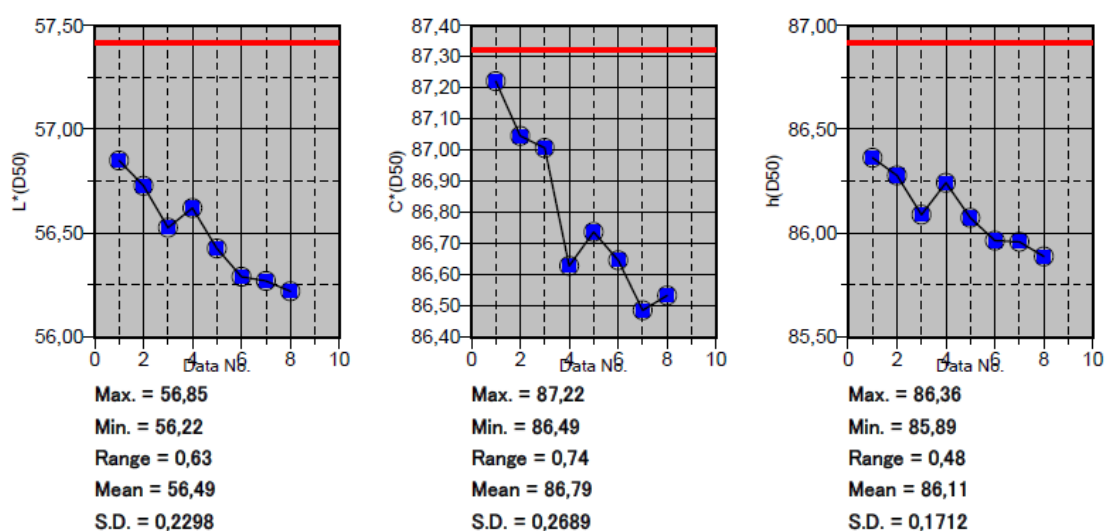
Slika 99 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.3.3 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 3 mm

Slika 100 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 101 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



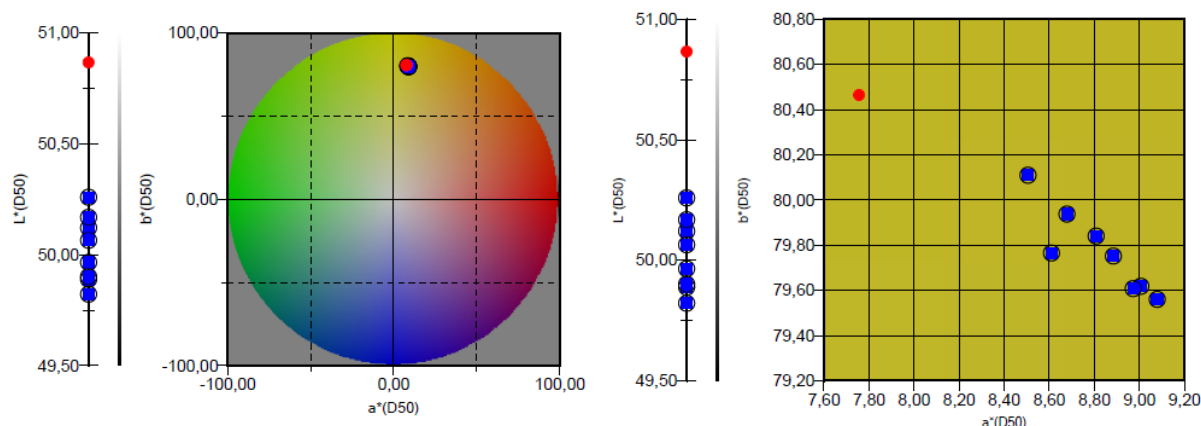
Slika 100 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



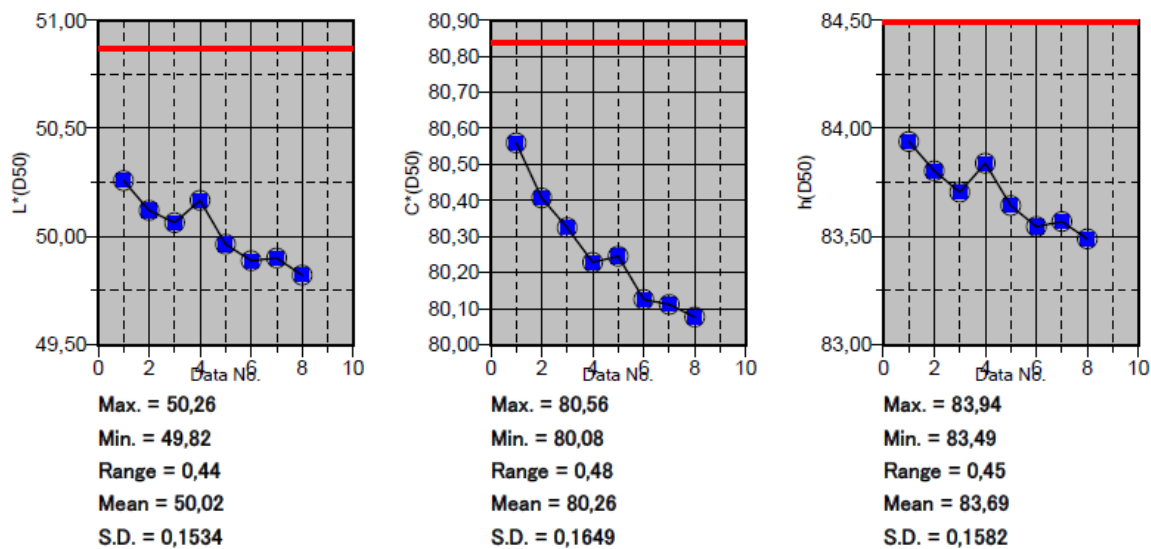
Slika 101 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.3.4 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 4 mm

Slika 102 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 103 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



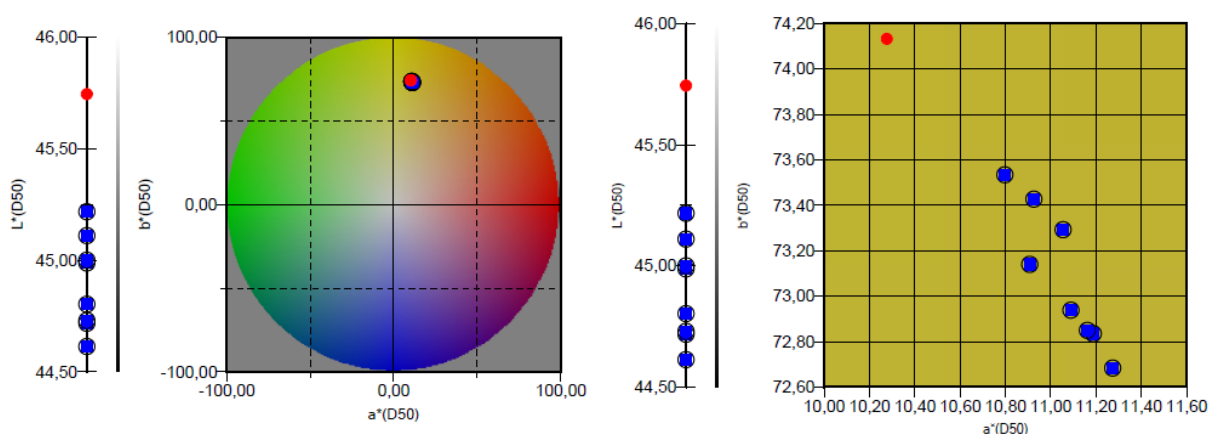
Slika 102 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



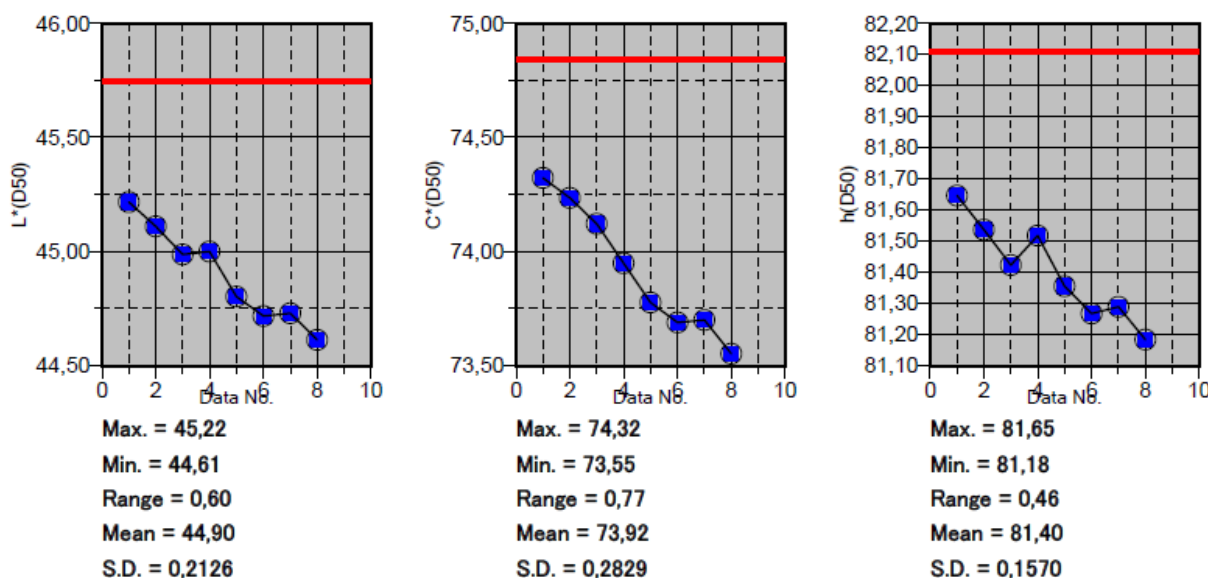
Slika 103 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.3.5 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 5 mm

Slika 104 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 105 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



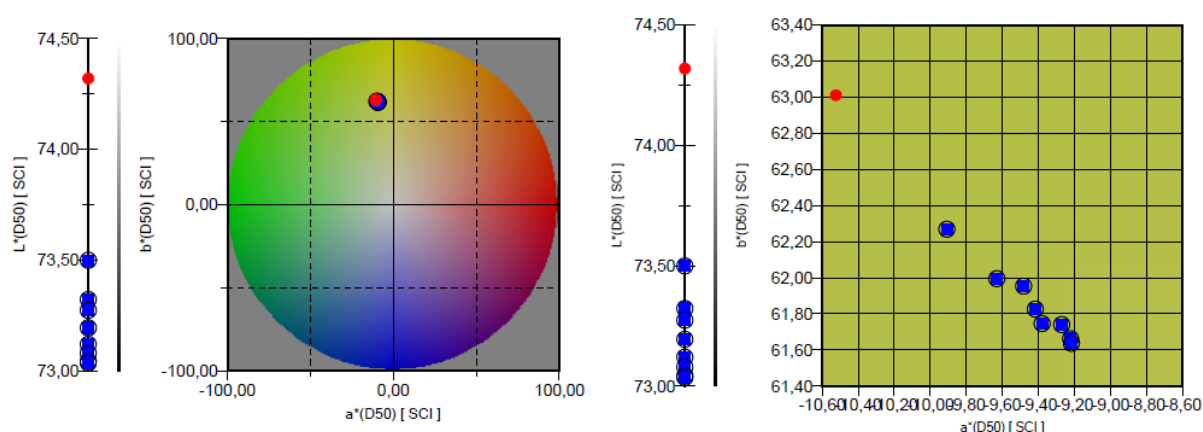
Slika 104 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



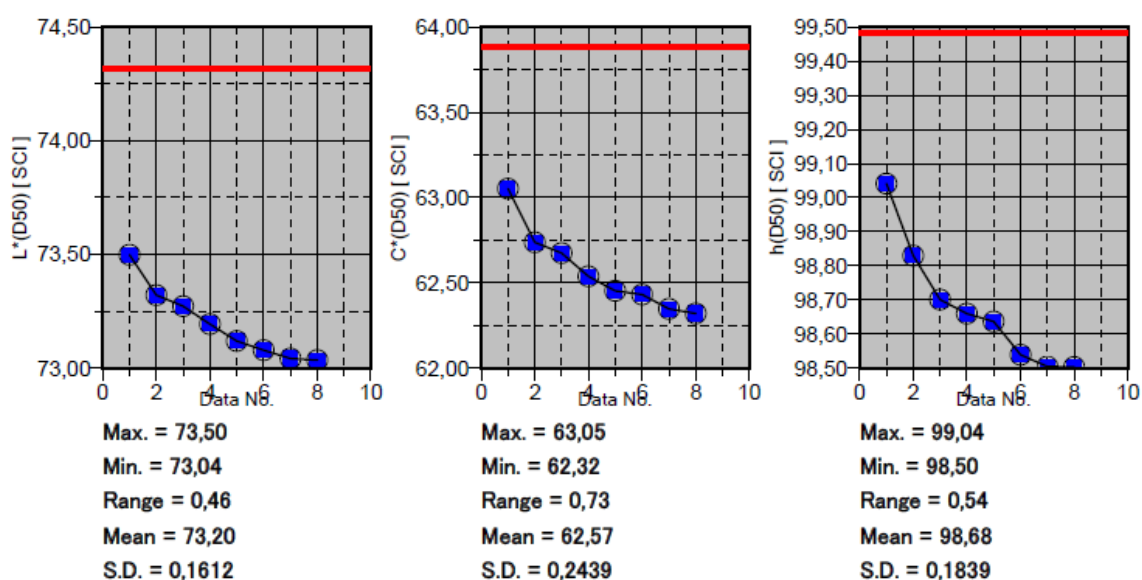
Slika 105 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

4.1.3.6 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 1 mm

Slika 106 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 107 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



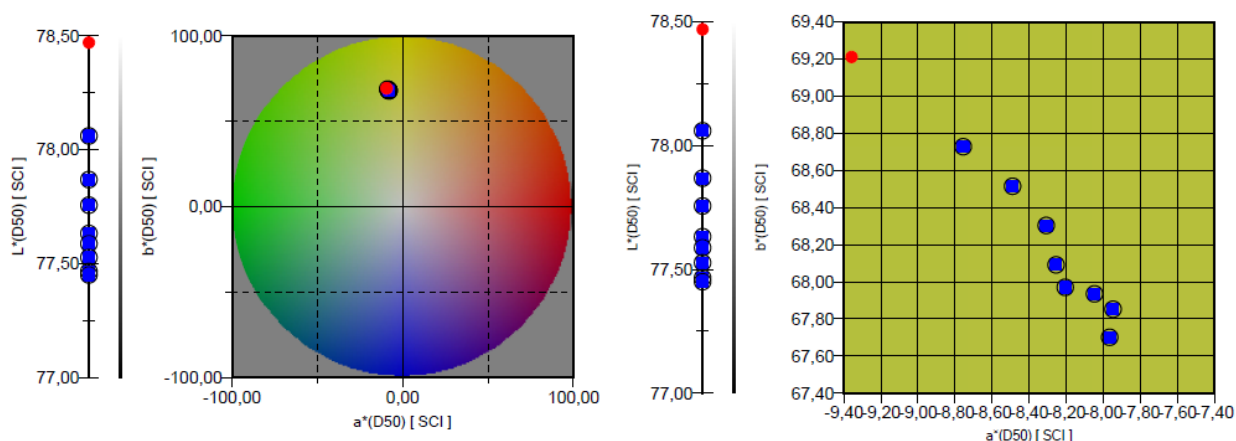
Slika 106 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



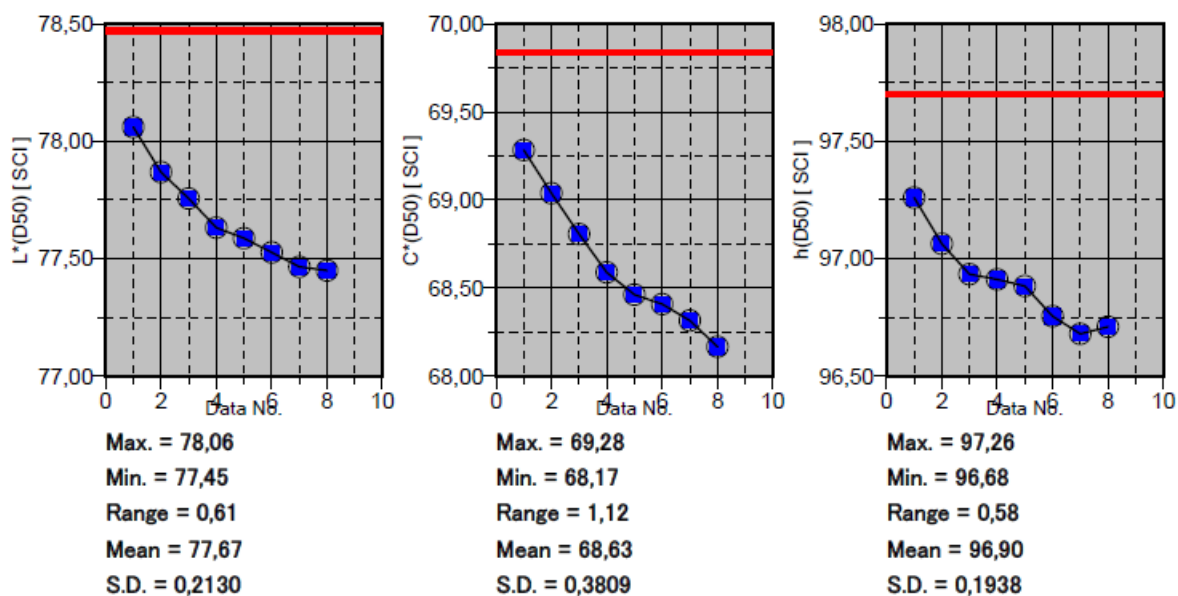
Slika 107 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.3.7 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 2 mm

Slika 108 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 109 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



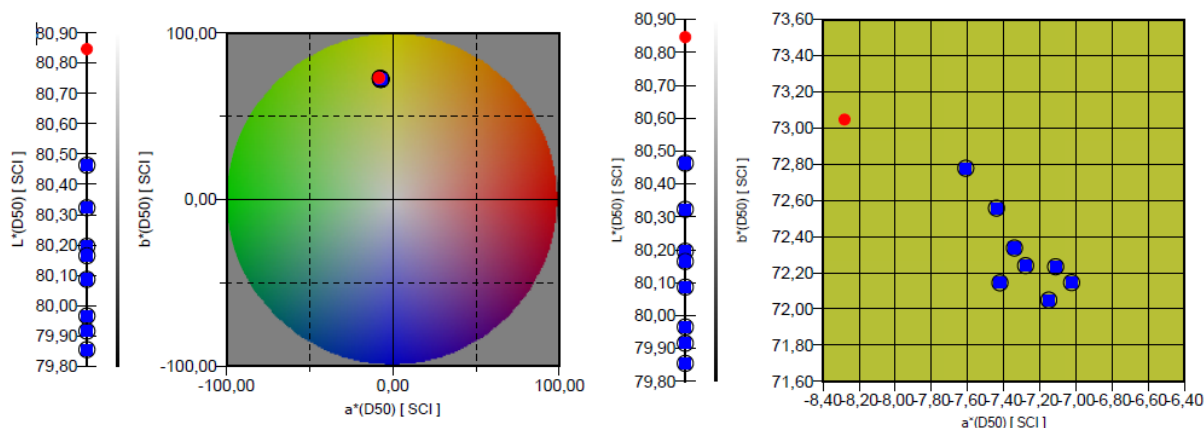
Slika 108 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



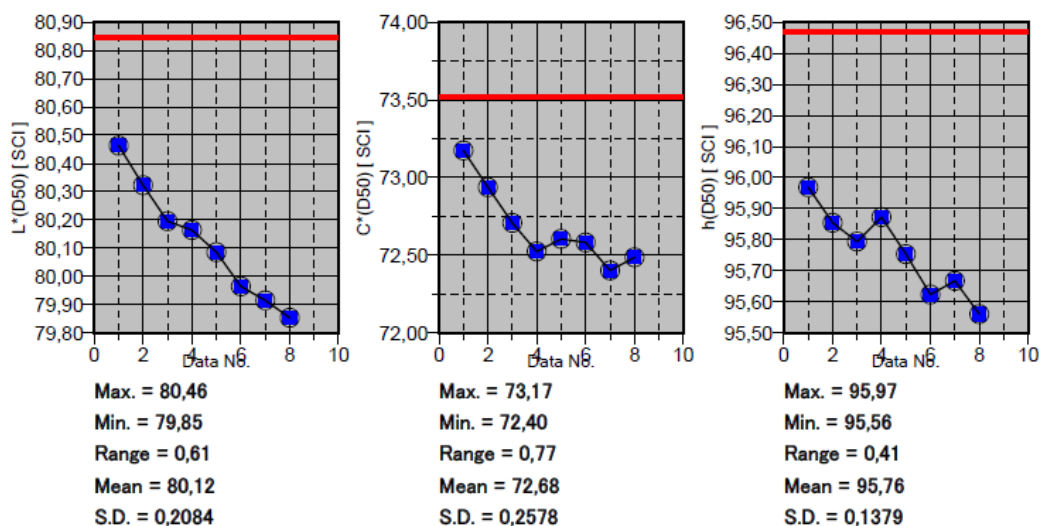
Slika 109 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.3.8 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 3 mm

Slika 110 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 111 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



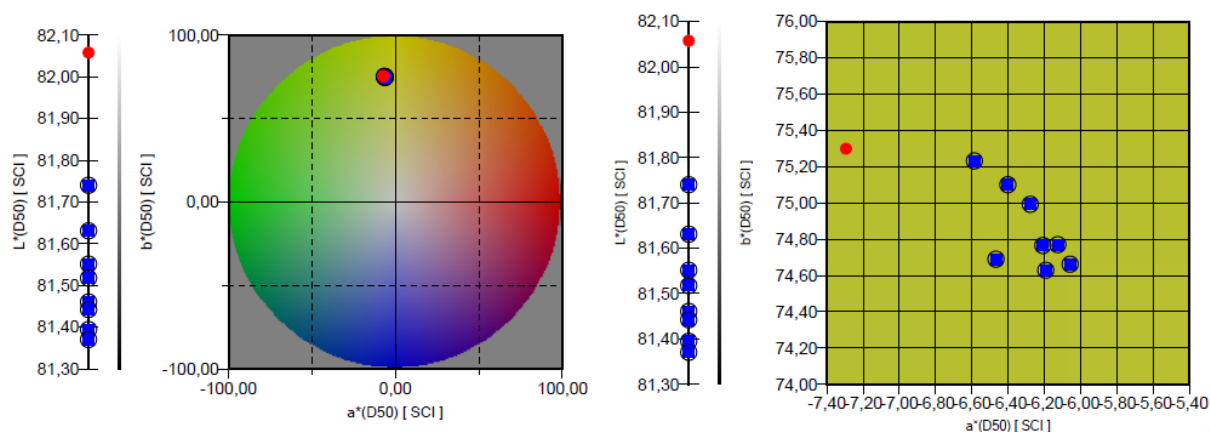
Slika 110 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



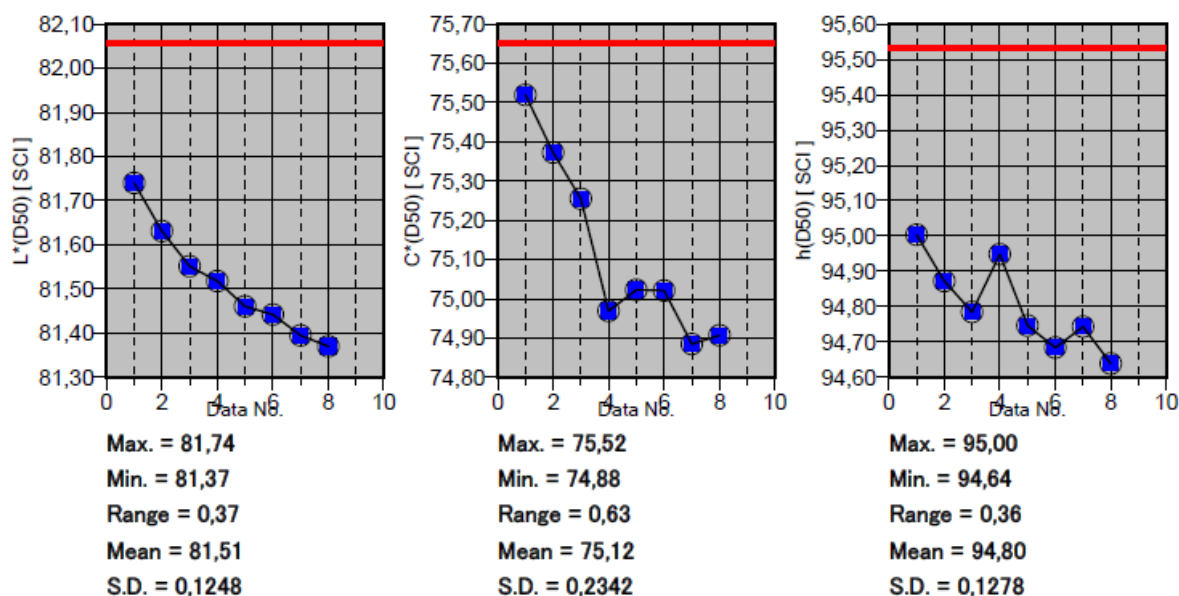
Slika 111 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.3.9 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 4 mm

Slika 112 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 112 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



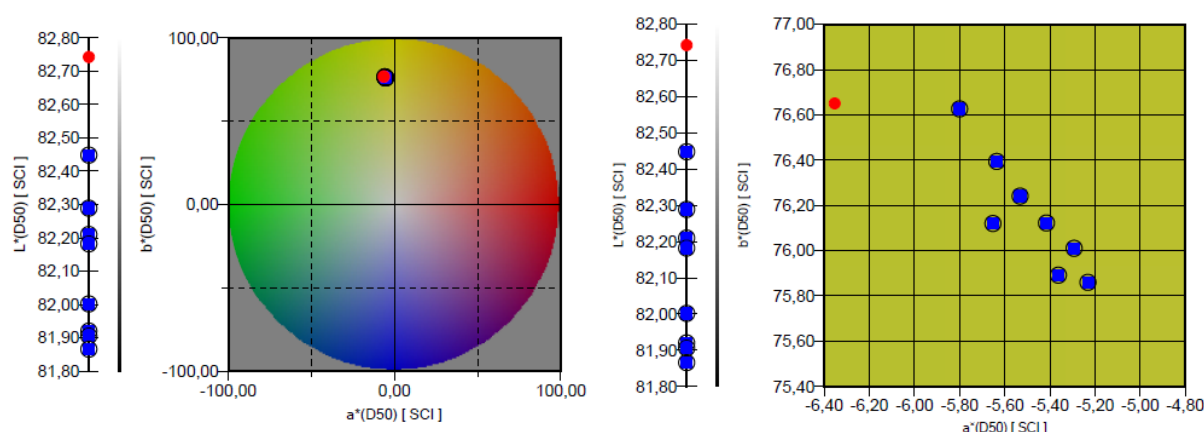
Slika 112 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



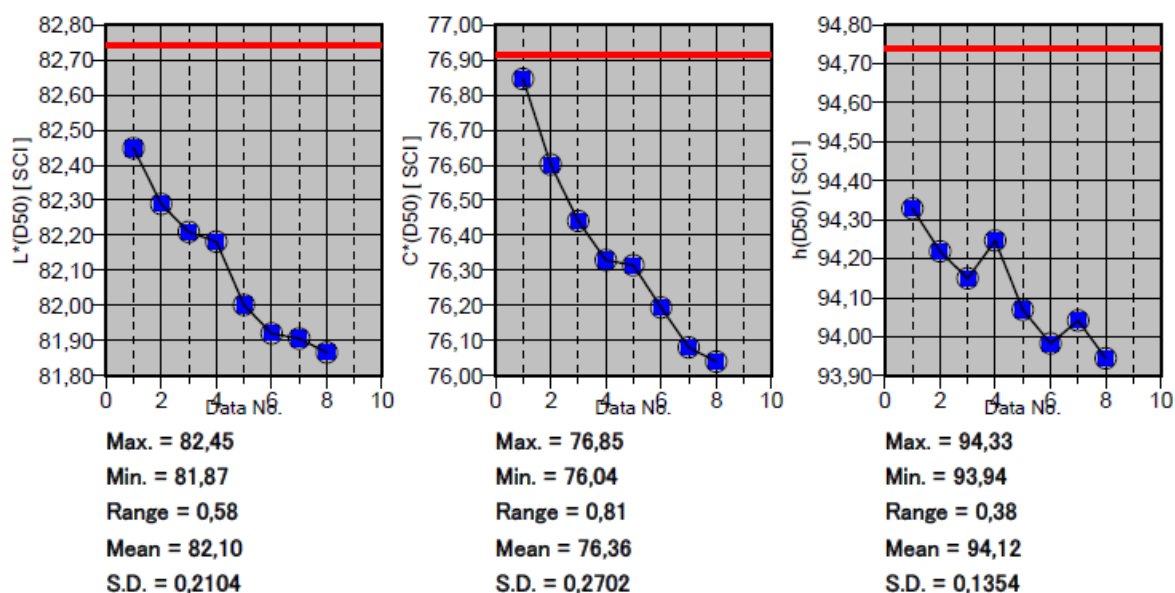
Slika 113 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.3.10 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – žuto bojilo debljine 5 mm

Slika 114 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 115 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 114 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



Slika 115 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

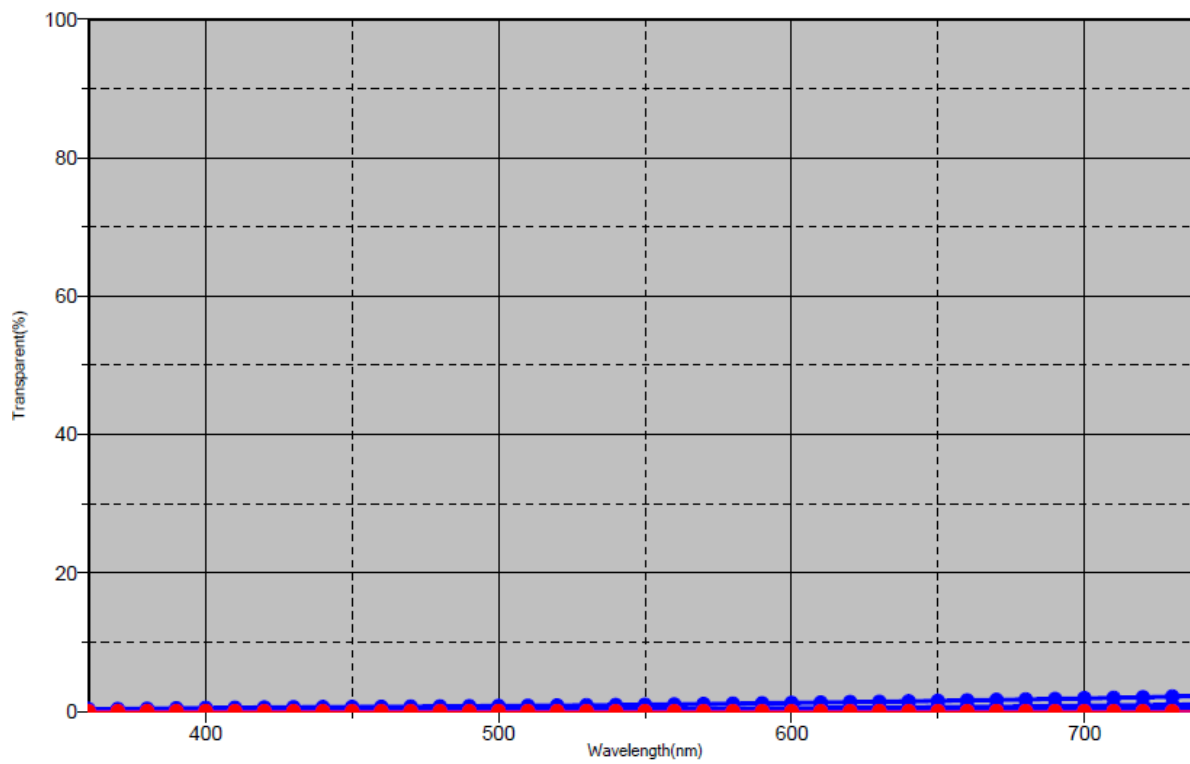
4.1.4 Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – crnog bojila

U tablici (Tablica 10) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.

Tablica 9 Prikaz ukupne promjene boje transmisijskih i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa crnim bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm

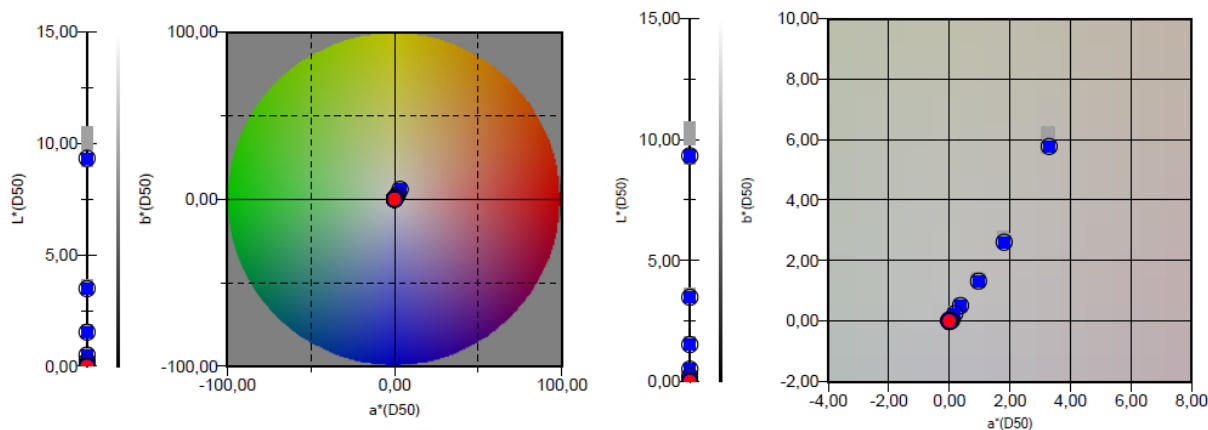
Ispitni uzorci s crnim bojom		
	ΔE_{00}	
mm	transmisija	refleksija
0,8	8,55	0,76
1	4,02	0,23
1,2	2,07	0,21
1,4	0,8	0,14
1,6	0,39	0,1
1,8	0,12	0,1
2	0	0,35
2,2	0,04	0,22
2,4	0	0,04
2,6	0	0,09
2,8	0	0,2
3	0	0,09
3,2	0,06	0,11
3,4	0,02	0,03
3,6	0	0,18
3,8	0,02	0,11
4	0	0,11
4,2	0	0,07
4,4	0,03	0,12

Slika 116 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



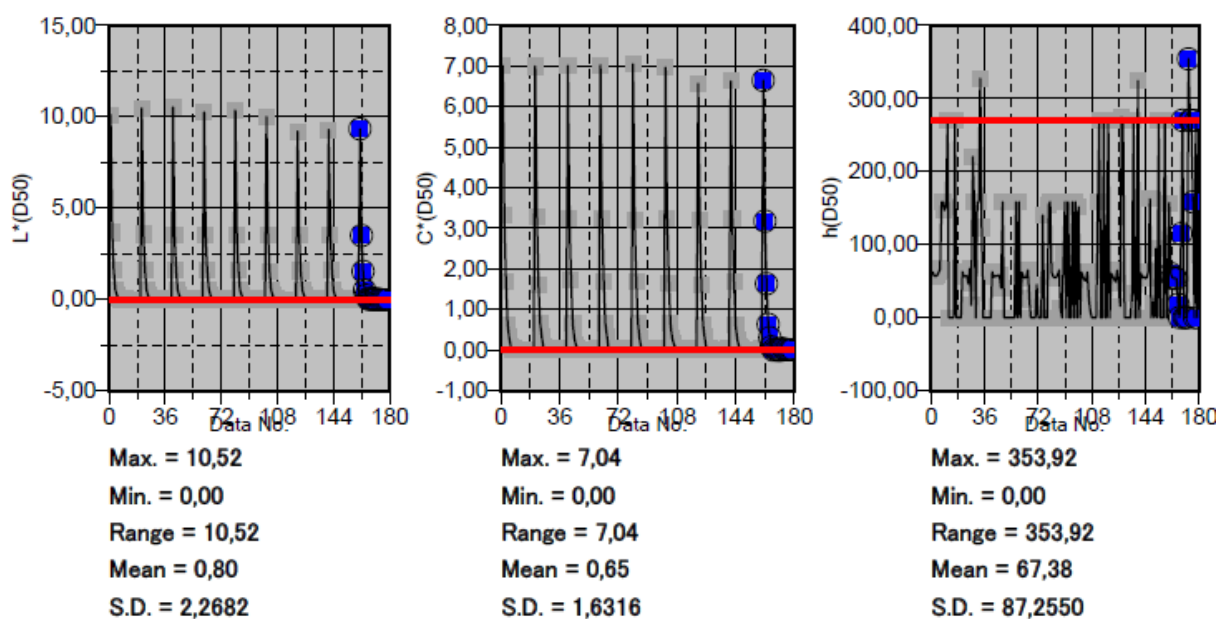
Slika 116 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom

Slika 117 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



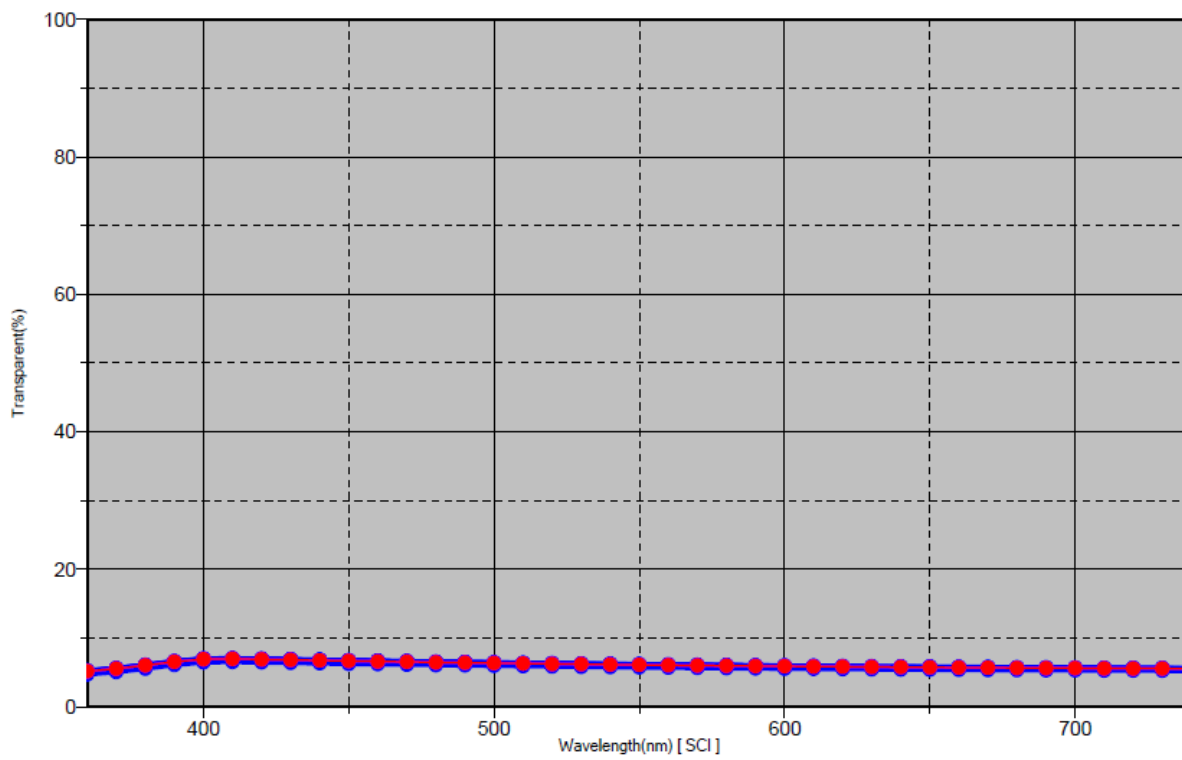
Slika 117 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom

Slika 118 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



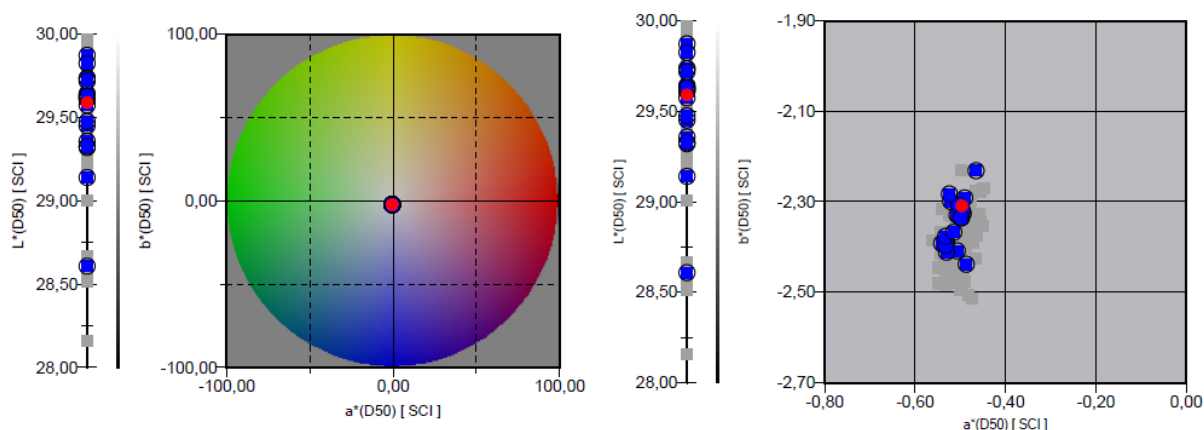
Slika 118 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa crnim bojilom

Slika 119 prikazuje spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



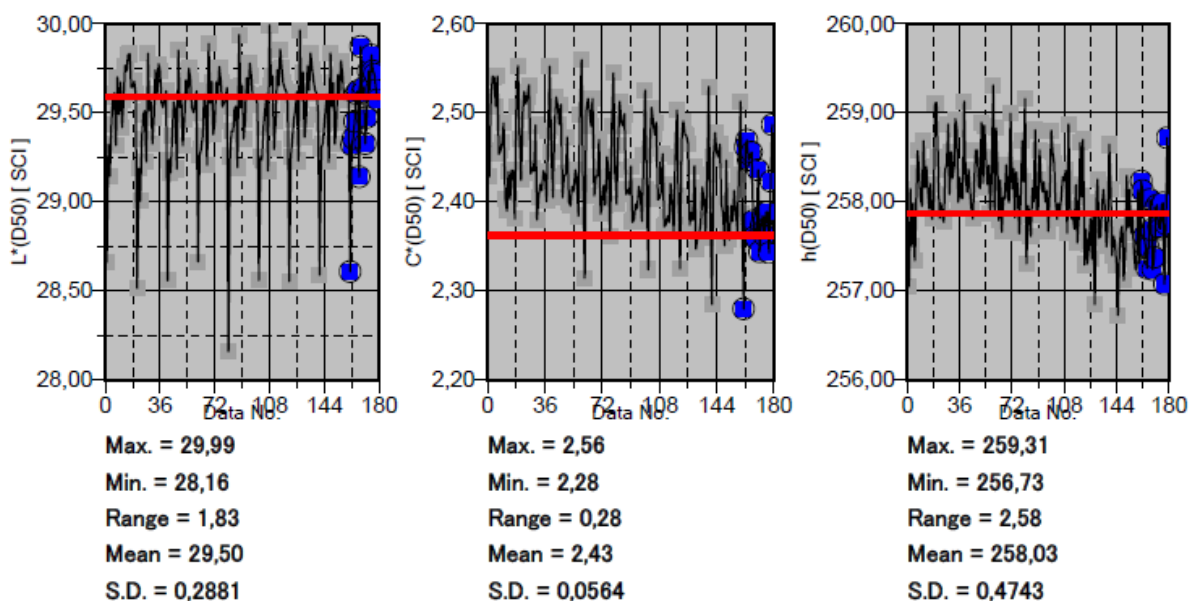
Slika 119 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom

Slika 120 prikazuje reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 120 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom

Slika 121 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za reflektivna svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 121 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa crnog bojilom

U tablicama 11 i 12 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s crnim bojom debljine 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,0 mm i 5,0 mm. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka u „zelenom stanju“ i intervala sušenja. Mjerenja u tablici 3 prikazana su za transmisijske karakteristike ispitnih pločica, a mjerenja u tablici 4 prikazana su za refleksijske karakteristike ispitnih pločica.

Tablica 10 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s crnim bojom (transmisijna svojstva)

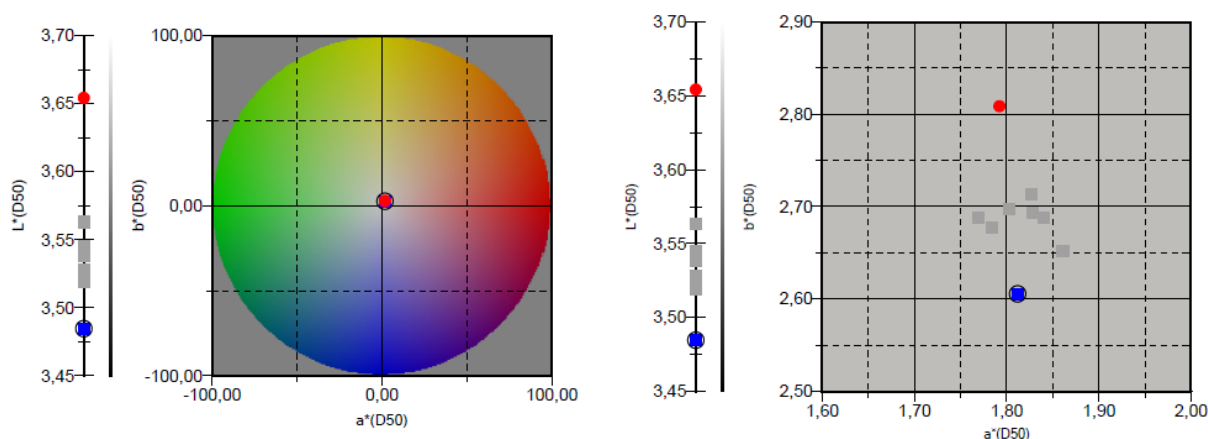
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,12	0,08	0,03	0	0
2	0,15	0,07	0,02	0,03	0
3	0,14	0,04	0,02	0	0,01
4	0,14	0,07	0,09	0	0
5	0,13	0,12	0,03	0	0
6	0,14	0,07	0,02	0	0
7	0,19	0	0,02	0,02	0,05
8	0,21	0,04	0,02	0	0

Tablica 11 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s crnim bojom (refleksijska svojstva)

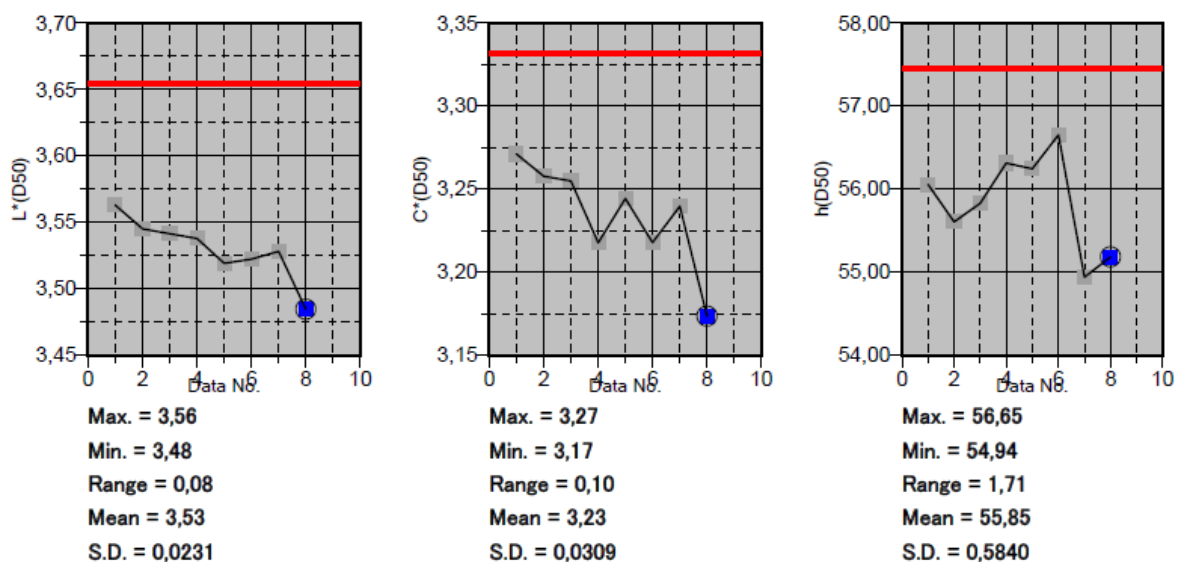
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	0,1	0,07	0,08	0,07	0,05
2	0,07	0,11	0,08	0,09	0,08
3	0,05	0,1	0,09	0,09	0,06
4	0,08	0,11	0,09	0,05	0,07
5	0,07	0,12	0,09	0,02	0,09
6	0,08	0,12	0,09	0,03	0,13
7	0,07	0,1	0,1	0,06	0,12
8	0,05	0,15	0,08	0,08	0,12

4.1.4.1 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 1 mm

Slika 122 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 123 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



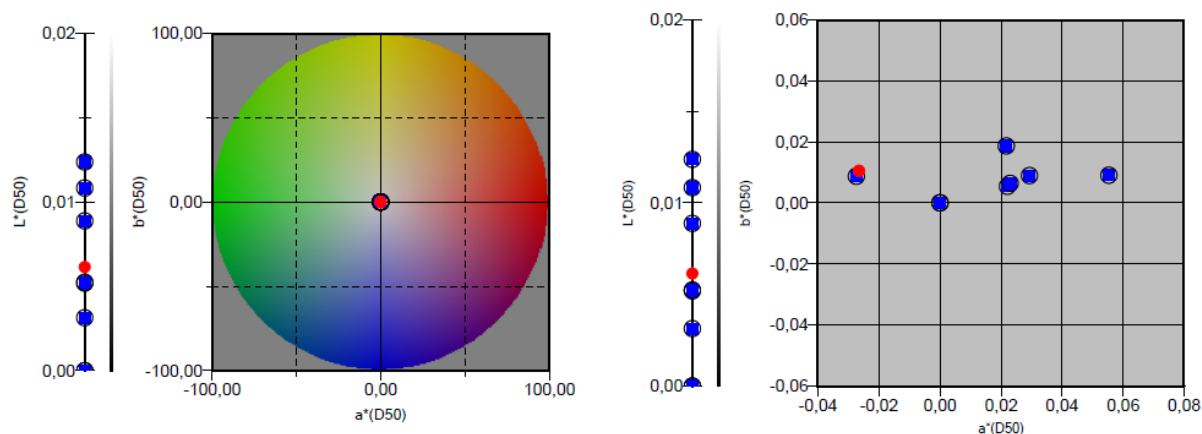
Slika 122 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



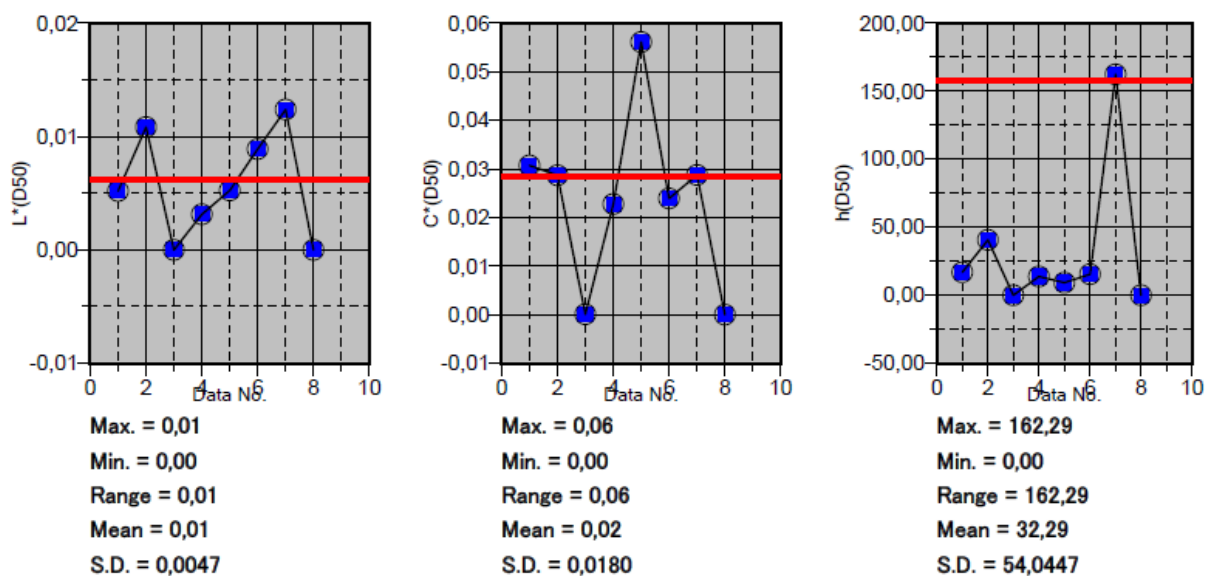
Slika 123 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.4.2 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 2 mm

Slika 124 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 125 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



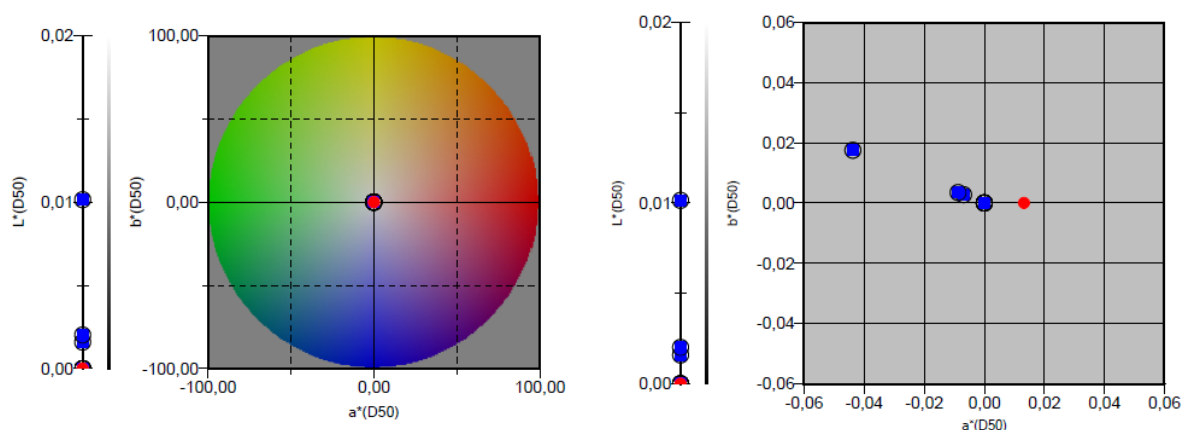
Slika 124 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



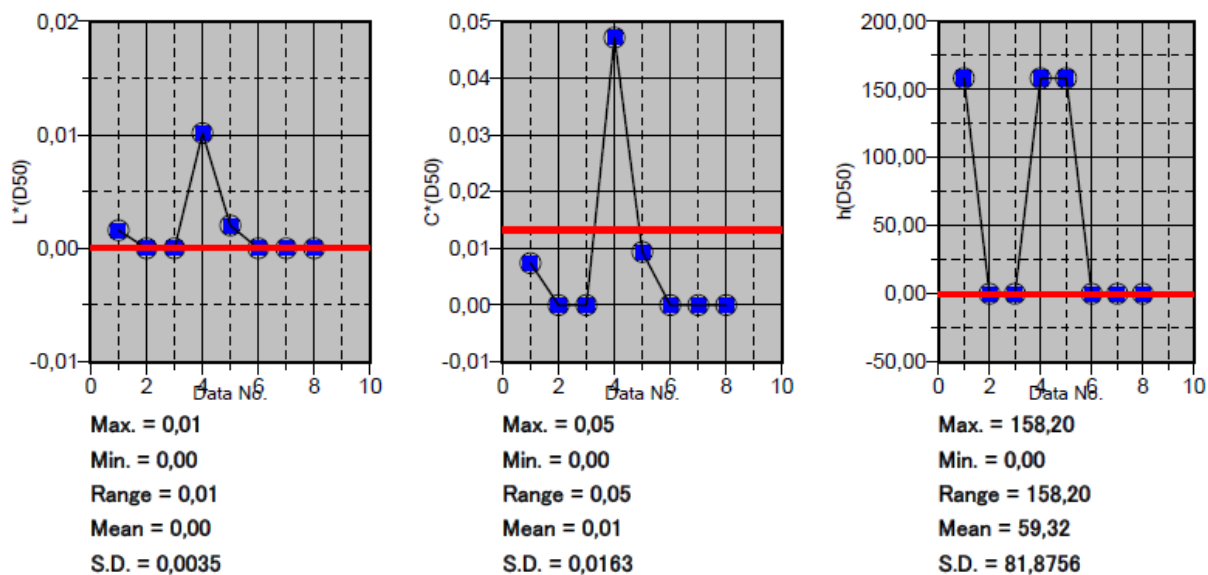
Slika 125 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.4.3 Transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 3 mm

Slika 126 prikazuje transmisijiska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 127 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



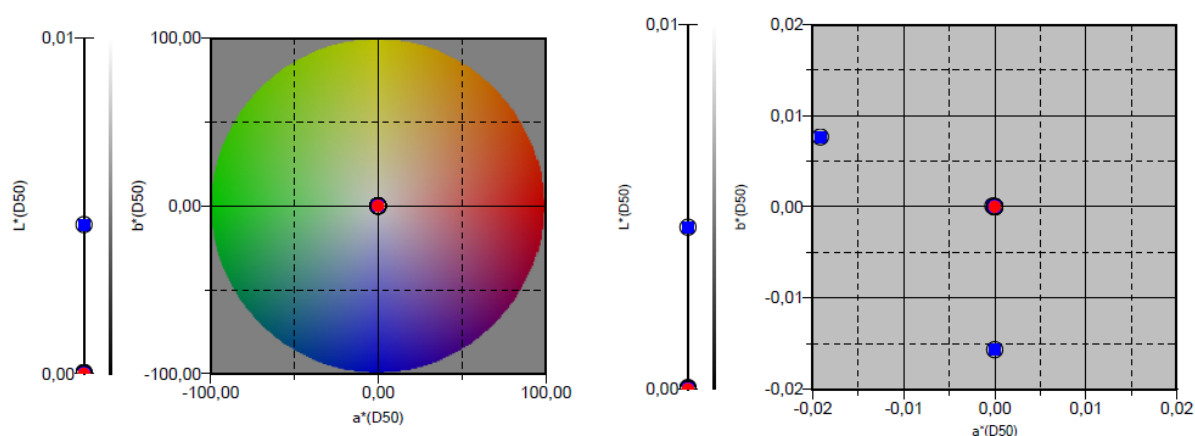
Slika 126 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



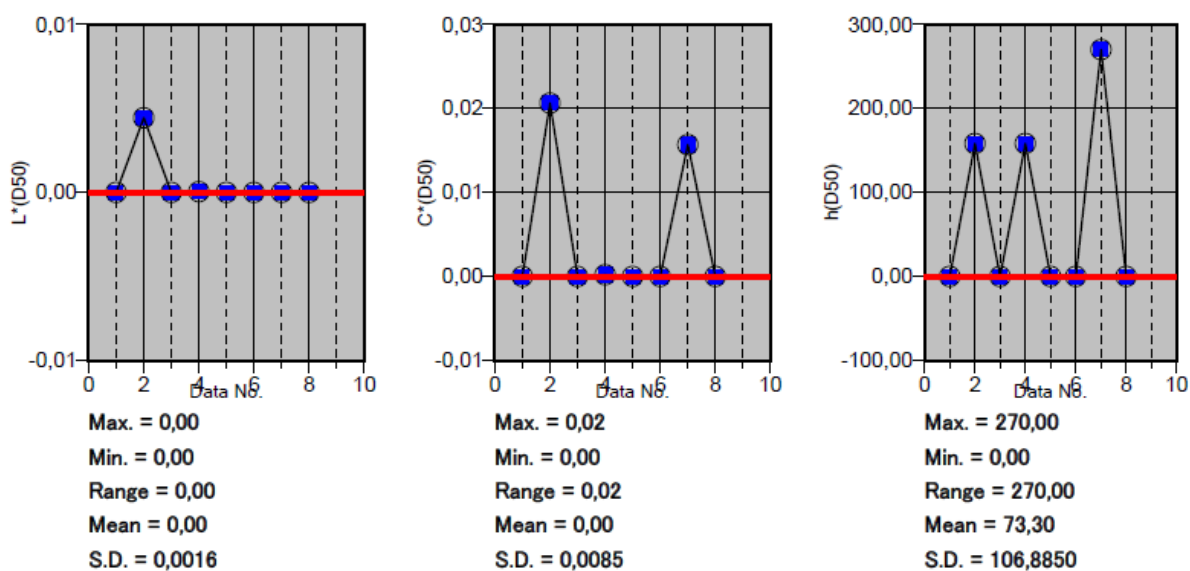
Slika 127 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.4.4 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 4 mm

Slika 128 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 129 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



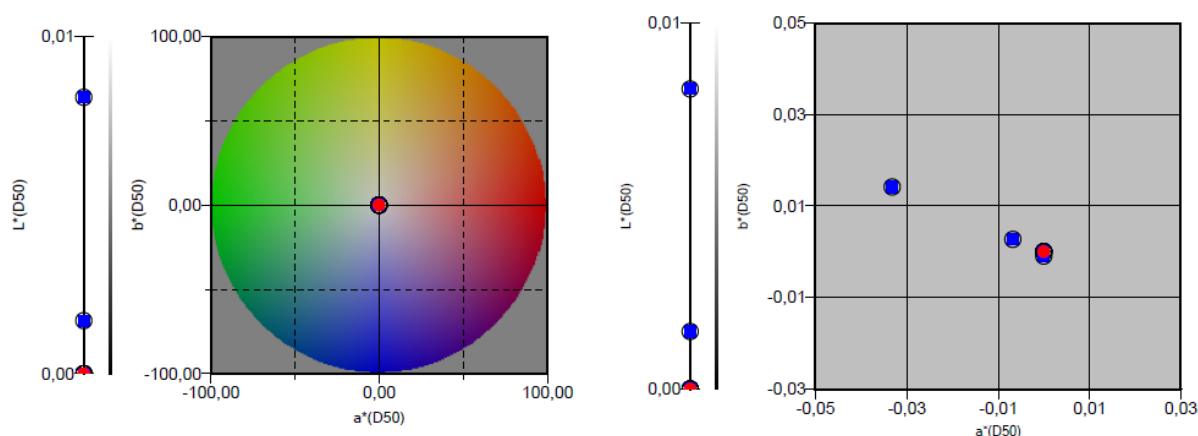
Slika 128 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



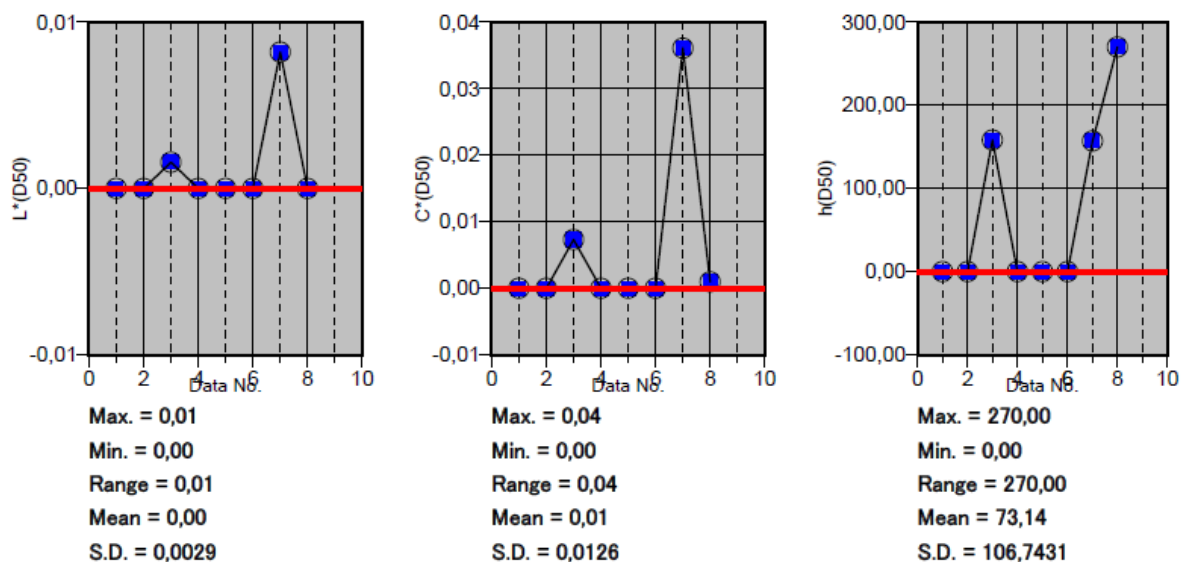
Slika 129 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.4.5 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 5 mm

Slika 130 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 131 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



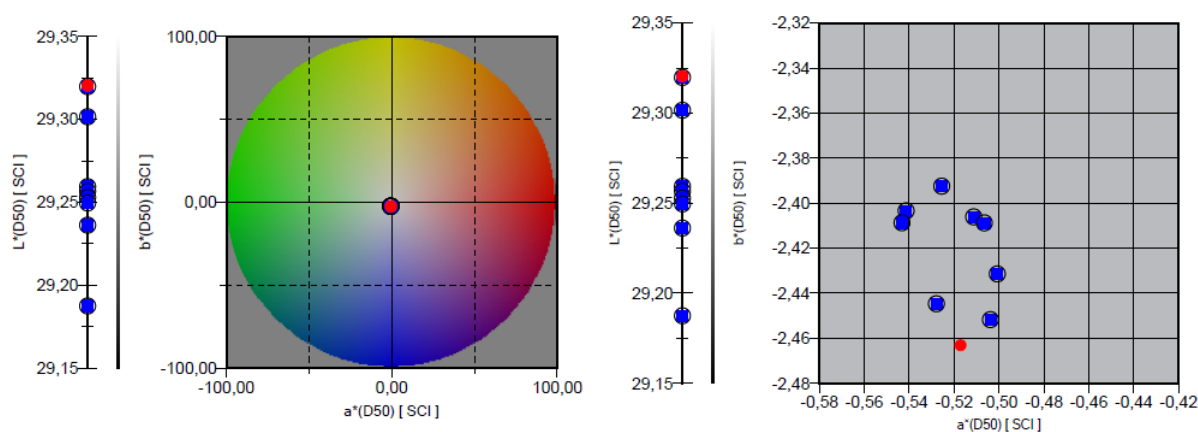
Slika 130 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



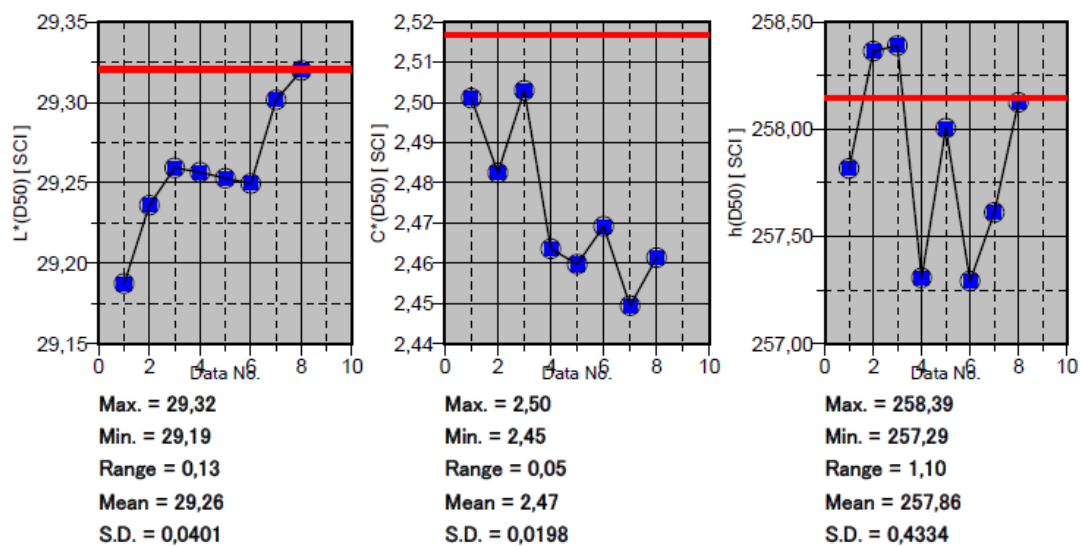
Slika 131 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

4.1.4.6 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 1 mm

Slika 132 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 133 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



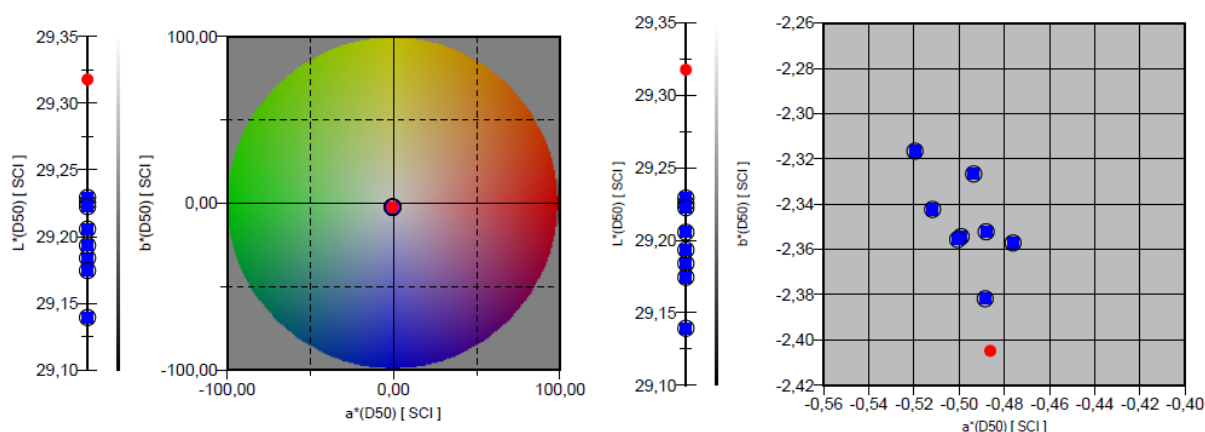
Slika 132 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



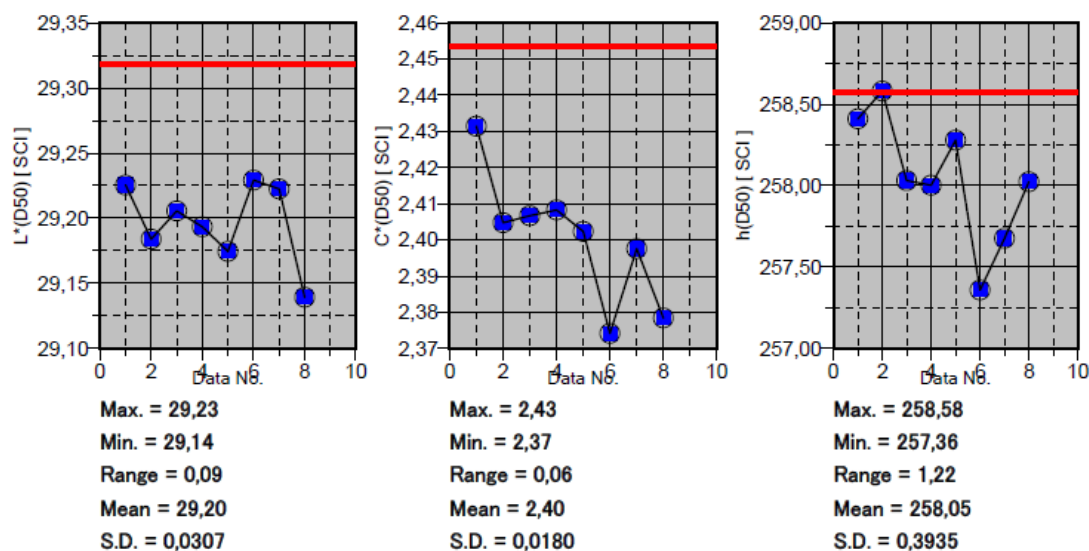
Slika 133 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.4.7 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 2 mm

Slika 134 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 135 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



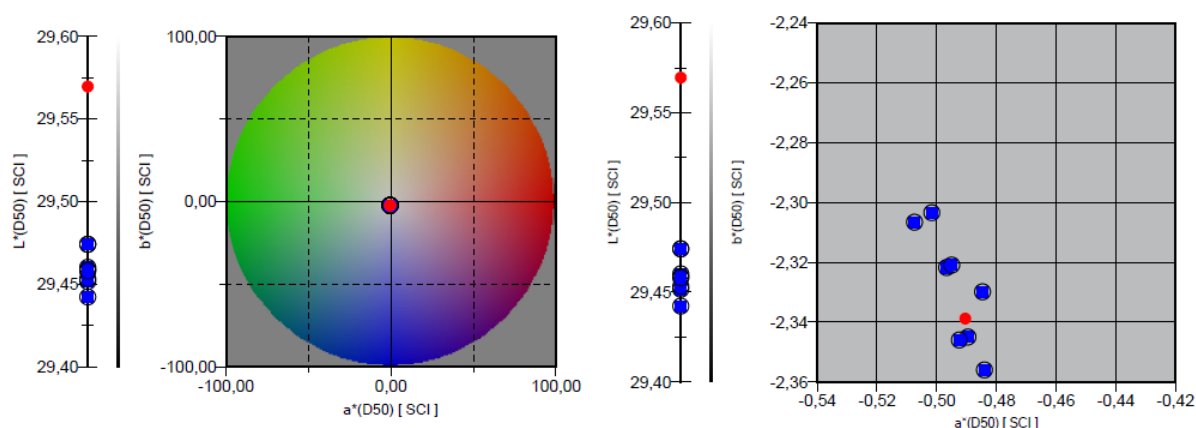
Slika 134 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



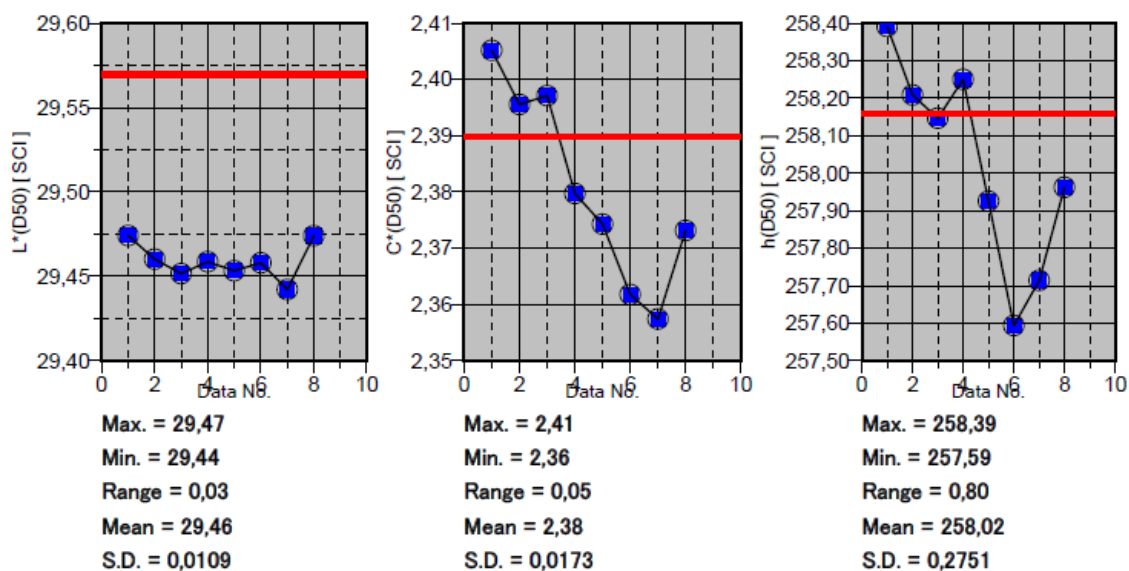
Slika 135 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.4.8 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 3 mm

Slika 136 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 137 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



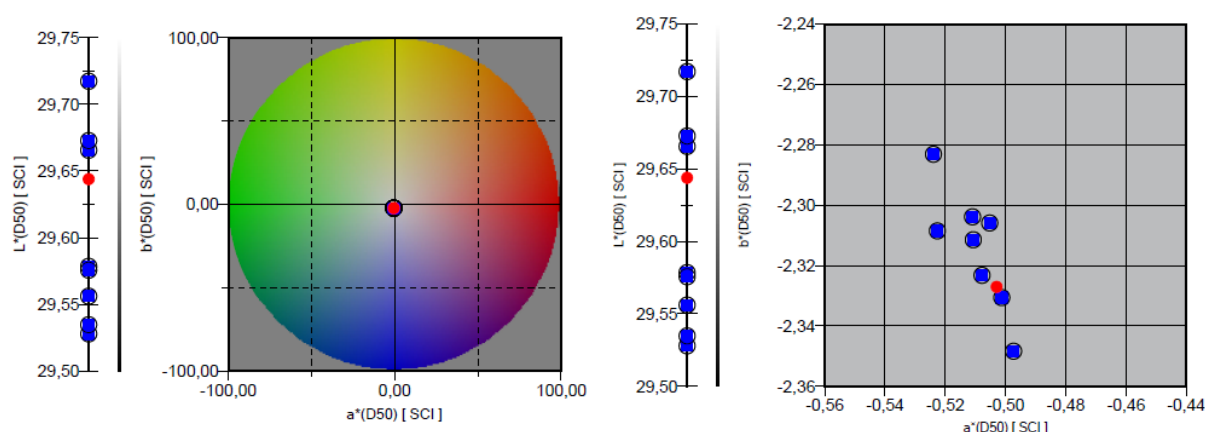
Slika 136 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



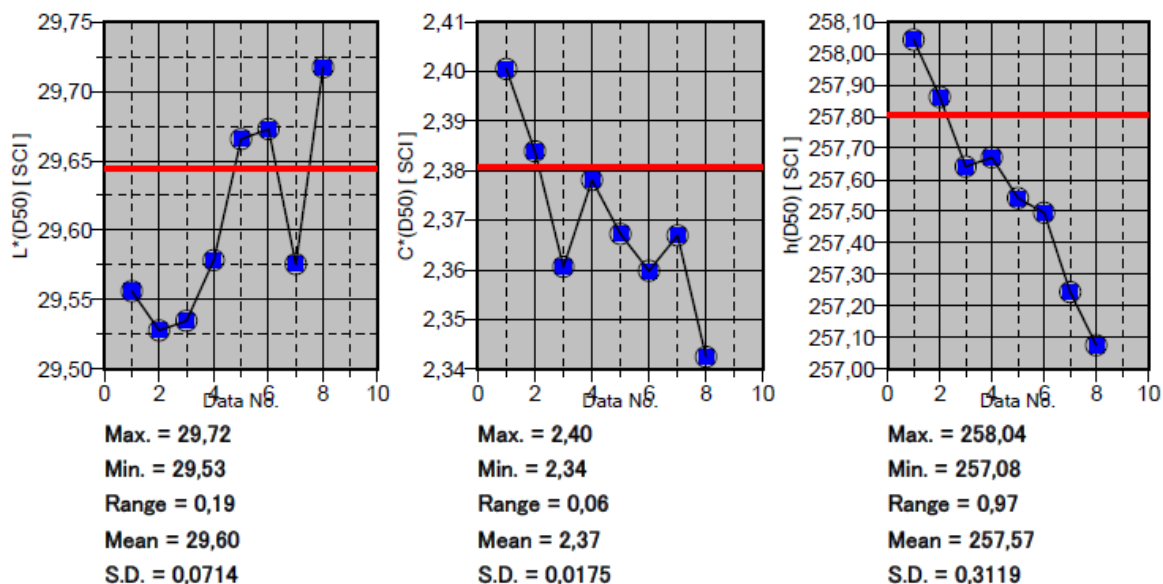
Slika 137 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.4.9 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 4 mm

Slika 138 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 139 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



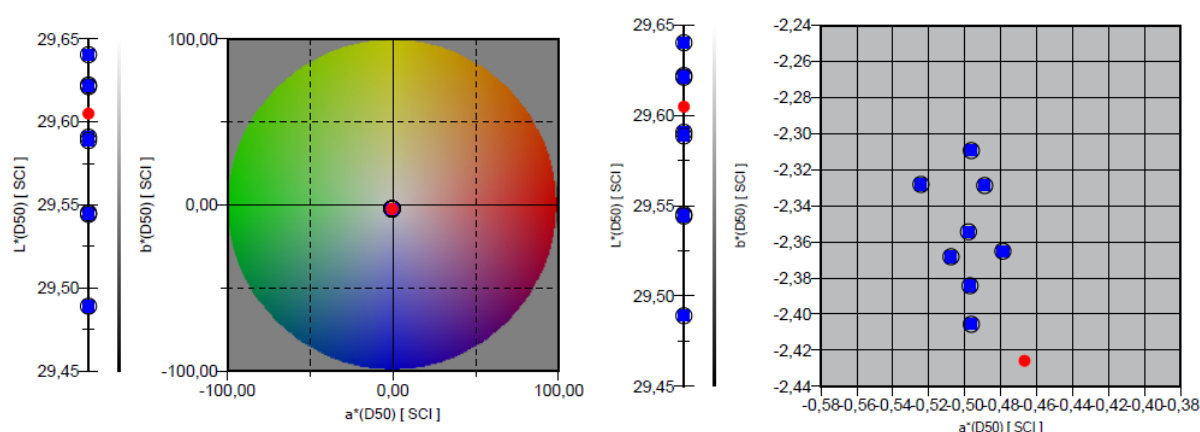
Slika 138 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



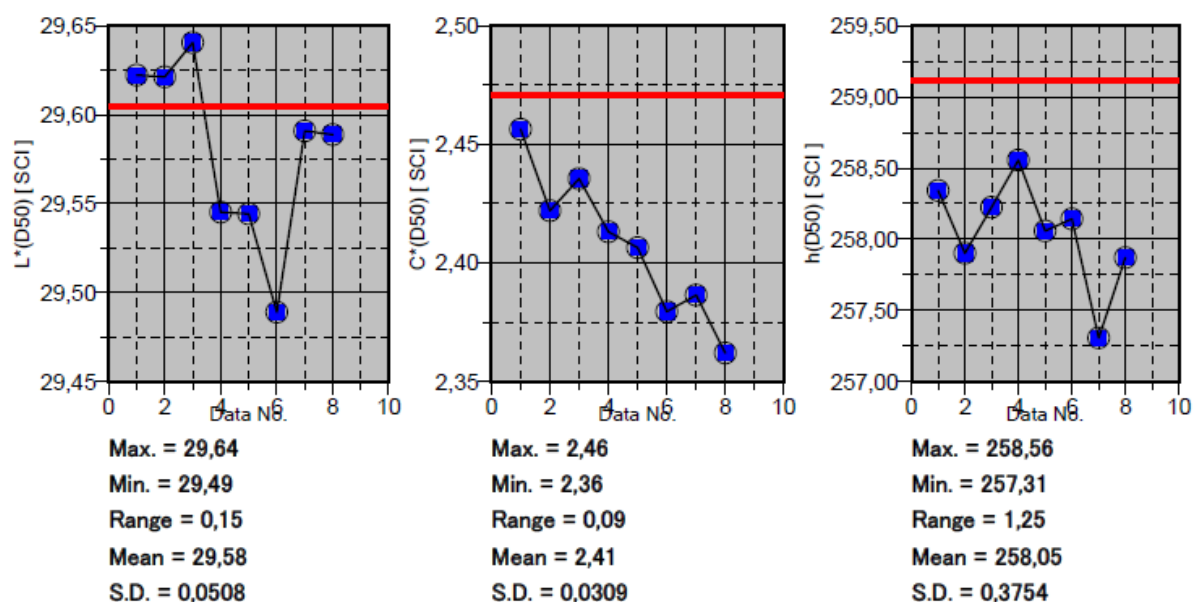
Slika 139 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.4.10 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – crno bojilo debljine 5 mm

Slika 140 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 141 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 140 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



Slika 141 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

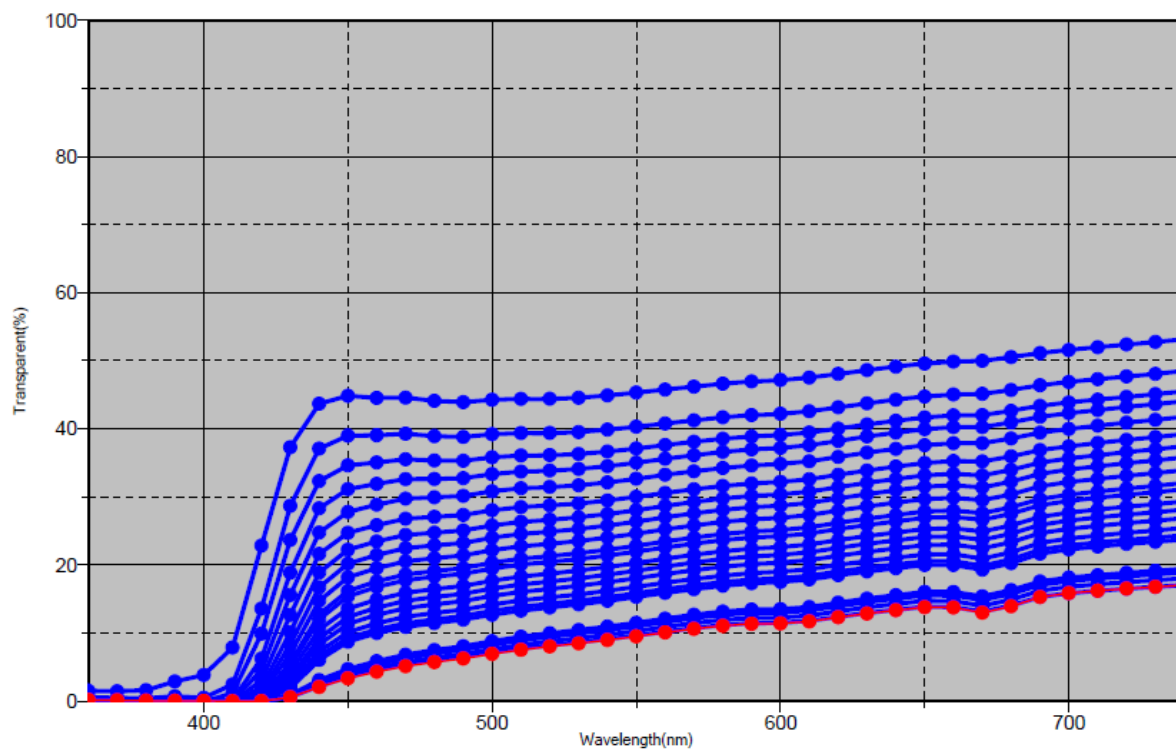
4.1.5 Transmisijska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo

U tablici (Tablica 13) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5 mm.

Tablica 12 Prikaz ukupne promjene boje transmisijskih i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm

Ispitni uzorci s bijelim bojom		
	ΔE_{00}	
mm	transmisija	refleksija
0,8	36,06	9,34
1	33,37	8,5
1,2	31,35	7,63
1,4	29,69	6,12
1,6	27,86	5,37
1,8	25,61	4,96
2	14,93	2,43
2,2	13,53	2,43
2,4	12,18	1,84
2,6	10,56	1,68
2,8	9,35	1,31
3	23,67	1,16
3,2	21,9	4,47
3,4	19,96	3,93
3,6	17,92	3,59
3,8	16,94	3,18
4	8,62	3,12
4,2	3,1	1,16
4,4	2,33	0,48
4,6	1,26	0,46
4,8	0,41	0,41

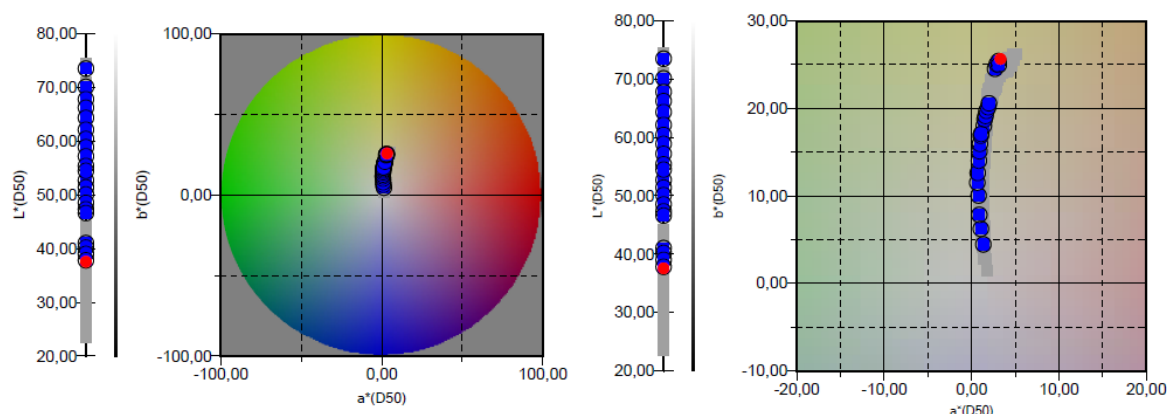
Slika 142 prikazuje spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



Slika 142 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom

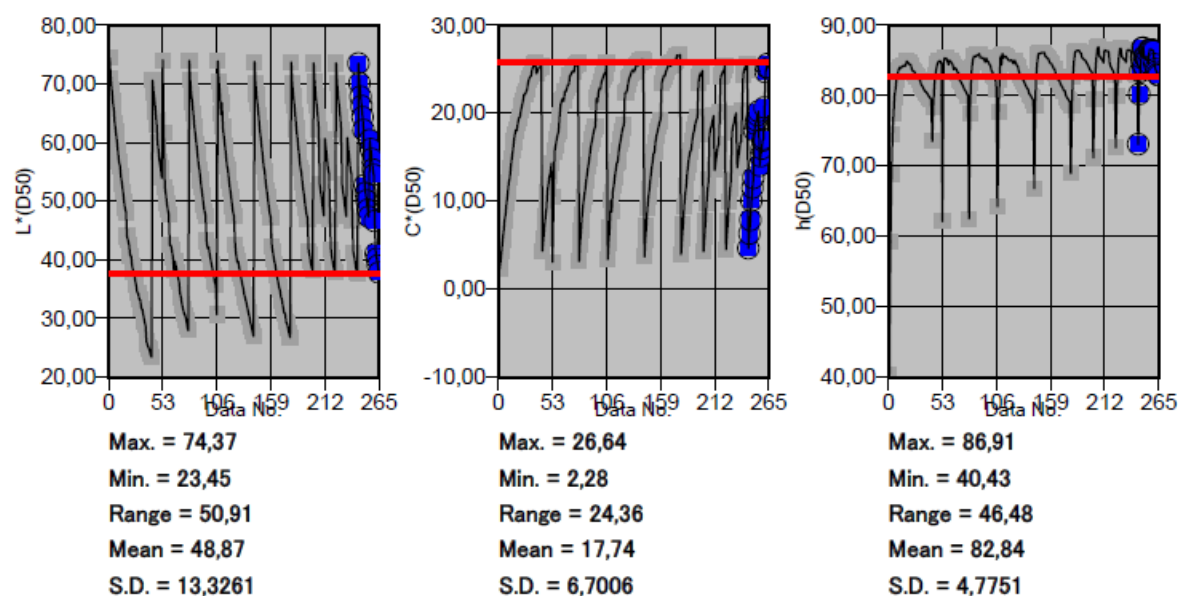
Slika 143 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja

debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



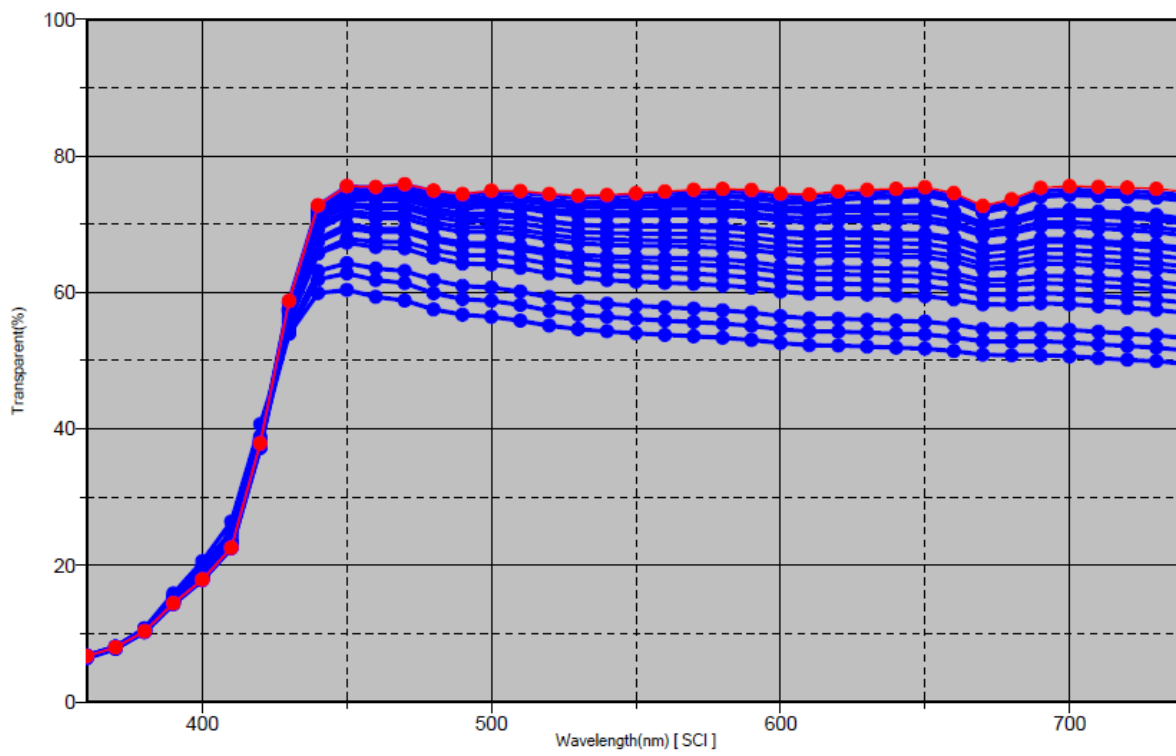
Slika 143 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom

Slika 144 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



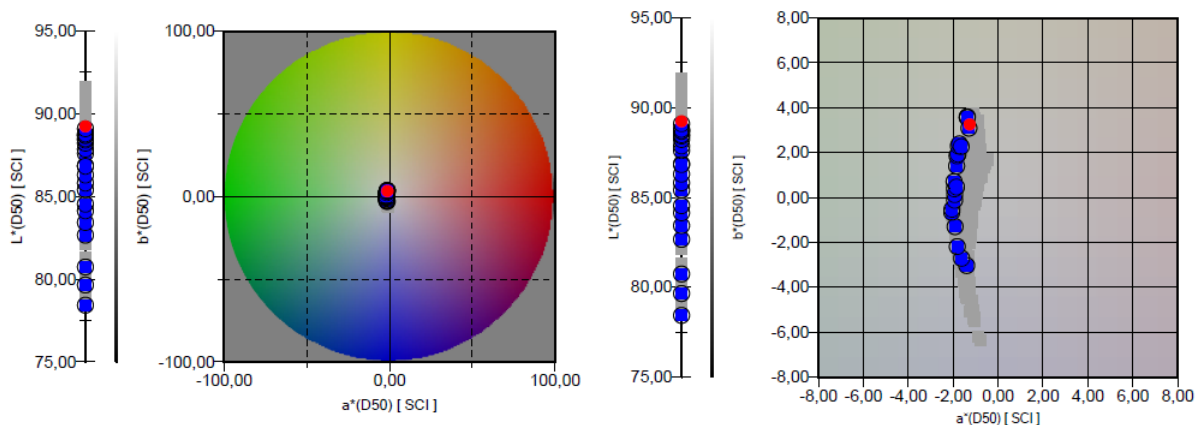
Slika 144 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa bijelim bojom

Slika 145 prikazuje spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom, od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



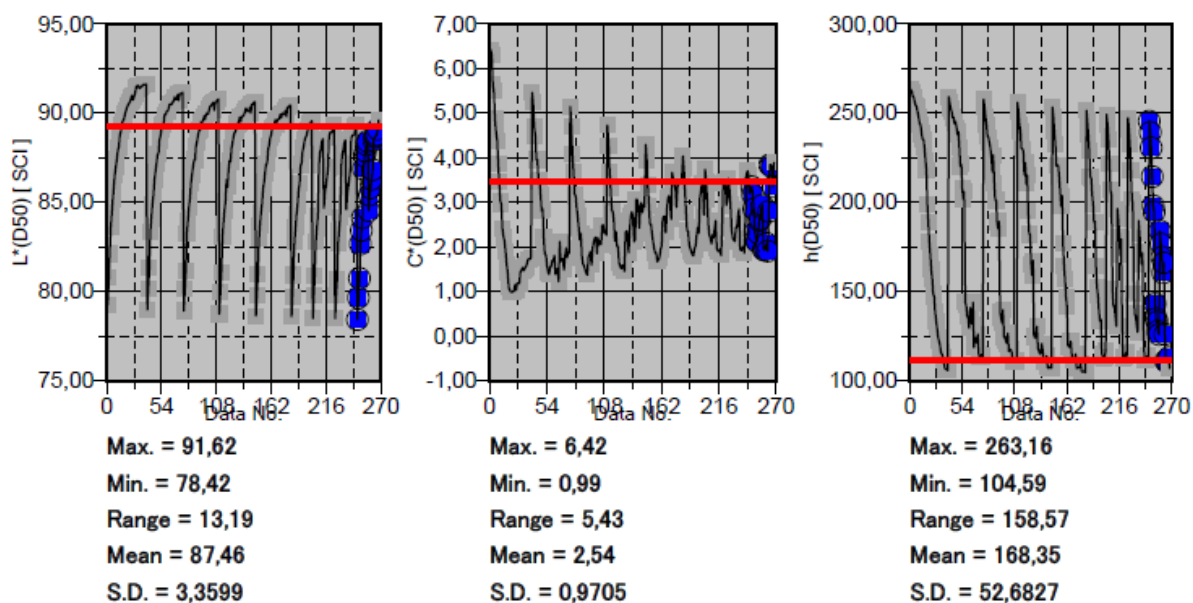
Slika 145 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom

Slika 146 prikazuje reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 0,8 mm do 5,0 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 5 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 146 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом

Slika 147 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 5,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 0,8 mm do 5,00 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za reflektivna svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 147 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa bijelim bojiлом

U tablicama 14 i 15 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s bijelim bojom debljine 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm, 4,0 mm i 5,0 mm. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka u „zelenom stanju“ i intervala sušenja. Mjerenja u tablici 14 prikazana su za transmisijske karakteristike ispitnih pločica, a mjerenja u tablici 15 prikazana su za refleksijske karakteristike ispitnih pločica.

Tablica 13 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (transmisijska svojstva)

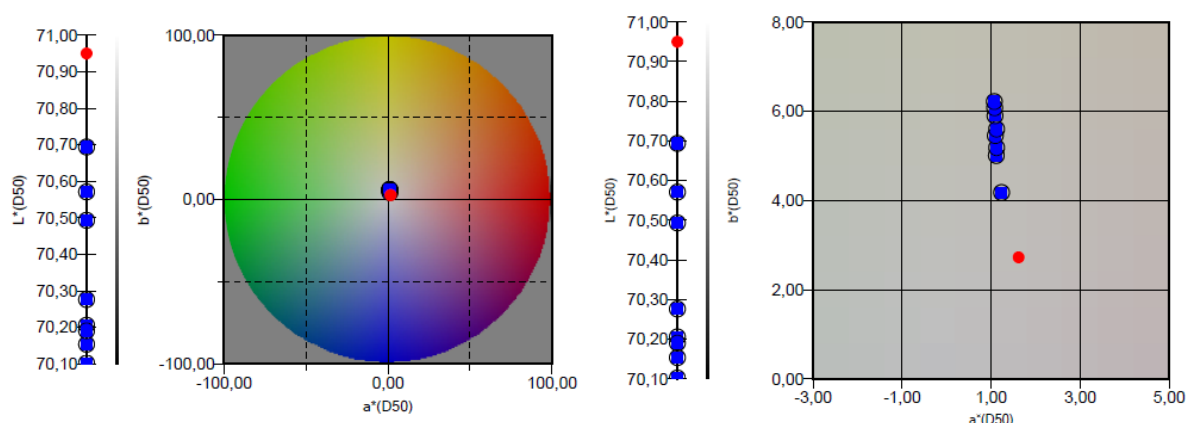
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	1,47	1,54	0,46	0,43	2,27
2	2,18	2,18	1,42	0,66	2,09
3	2,33	2,45	1,45	0,82	2,47
4	2,6	3,04	2,06	1,17	3,02
5	2,7	3,46	2,19	1,36	3,08
6	2,93	3,69	2,57	1,66	3,44
7	3,08	3,82	2,75	1,86	3,66
8	3,2	4,04	2,92	2,05	3,87

Tablica 14 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (refleksijska svojstva)

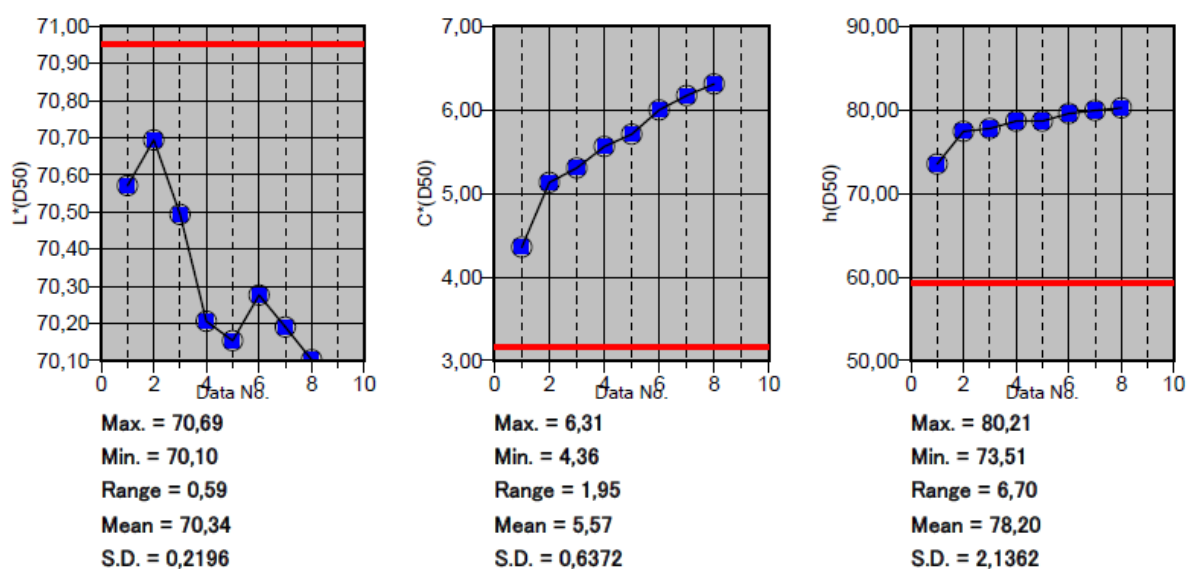
	ΔE_{00}				
interval	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	1,13	1,07	0,43	0,56	1,01
2	1,63	1,86	1,23	0,35	1,33
3	2,03	2,17	1,7	0,79	1,76
4	2,39	2,61	2,21	1,29	2,2
5	2,6	2,98	2,61	2,57	2,04
6	2,88	3,53	3,11	2,77	2,37
7	3,06	3,76	3,21	2,98	2,57
8	3,23	3,96	3,49	3,14	2,78

4.1.5.1 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 1 mm

Slika 148 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 149 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



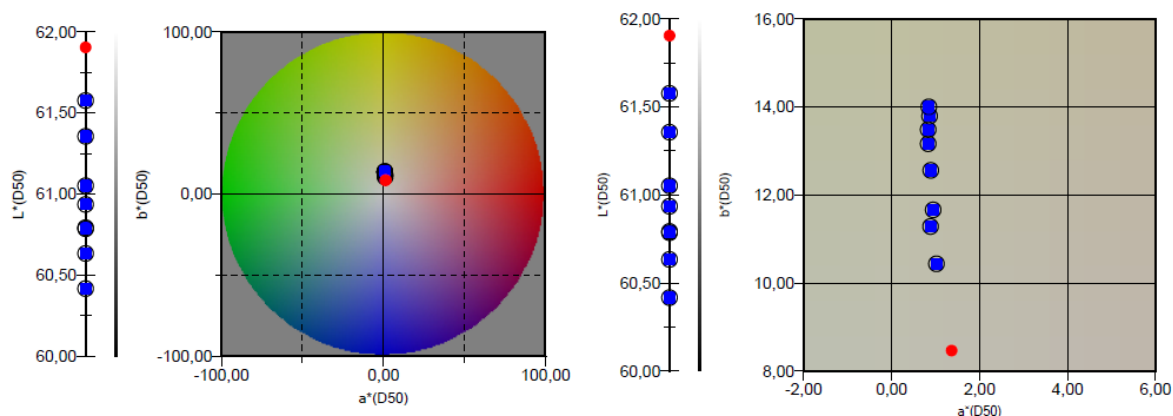
Slika 148 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



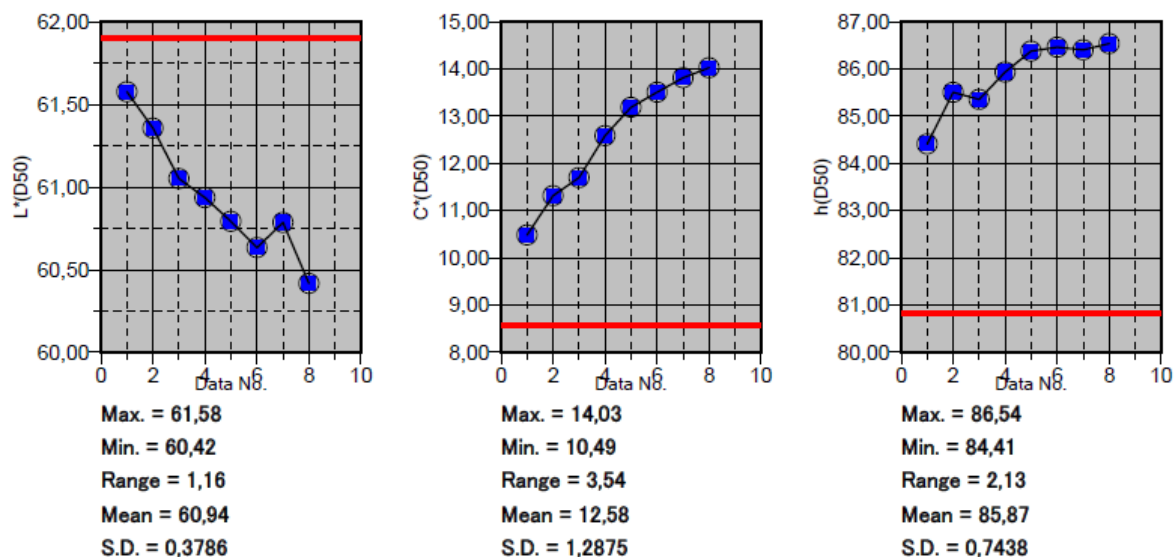
Slika 149 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.5.2 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 2 mm

Slika 150 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 151 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



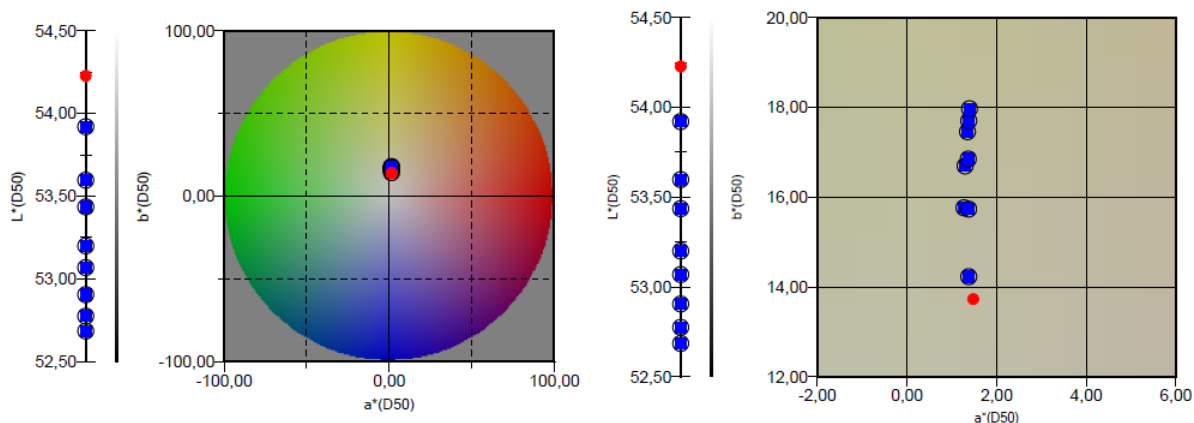
Slika 150 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



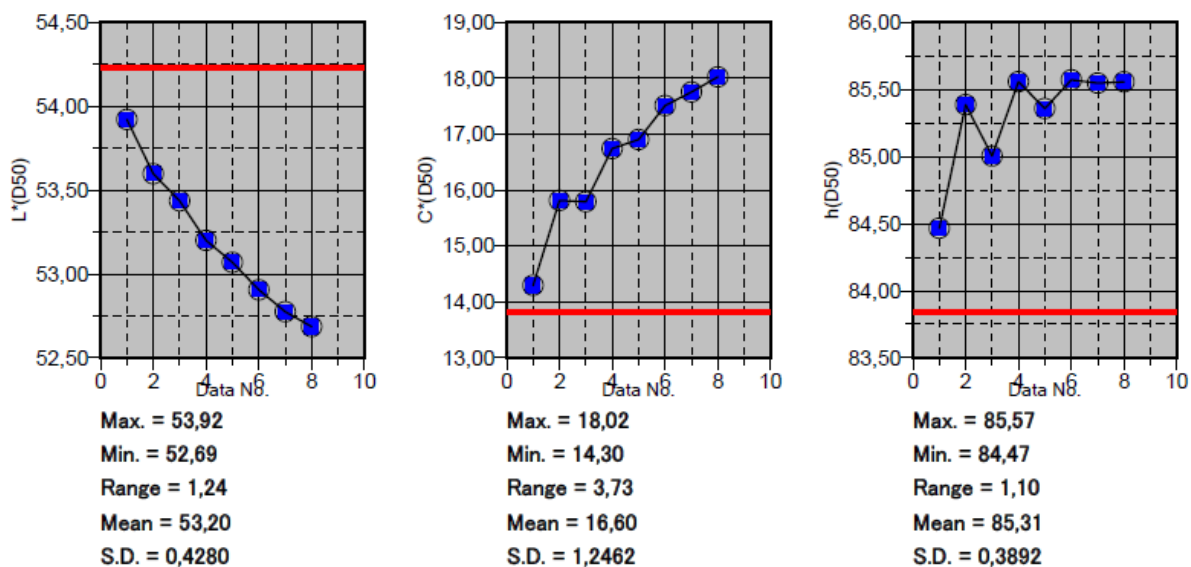
Slika 151 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.5.3 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 3 mm

Slika 152 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 153 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



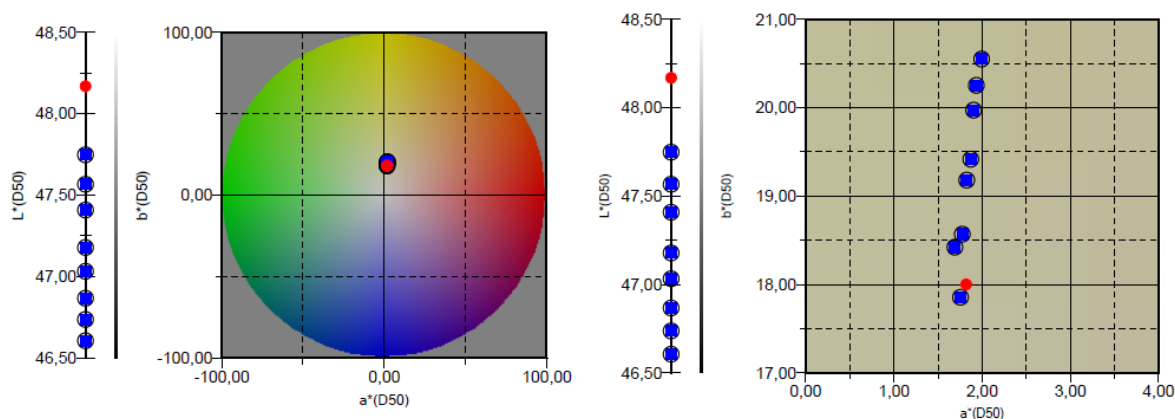
Slika 152 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



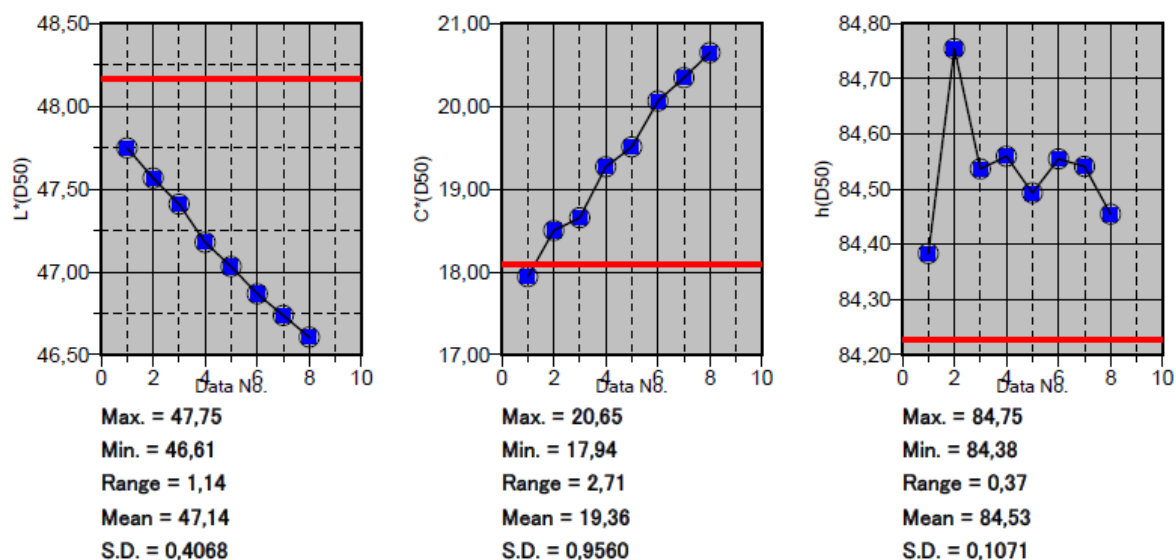
Slika 153 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm

4.1.5.4 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 4 mm

Slika 154 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 155 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



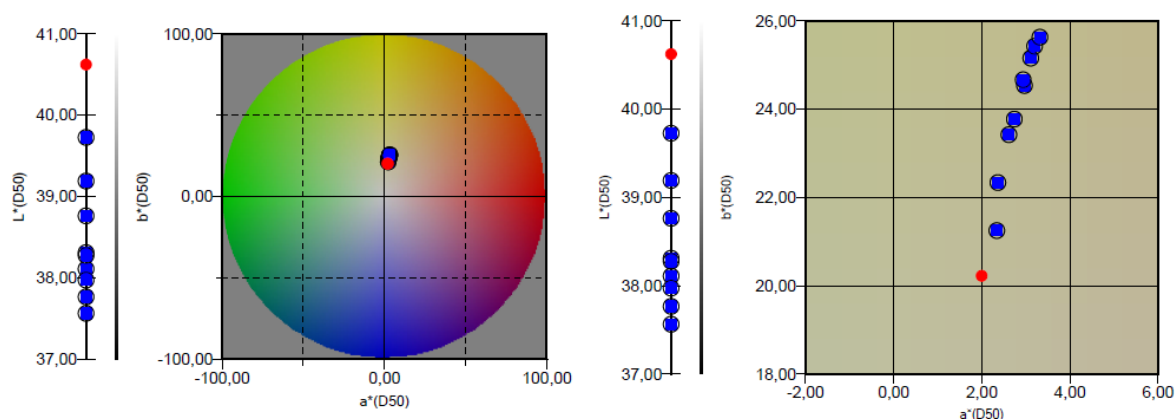
Slika 154 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



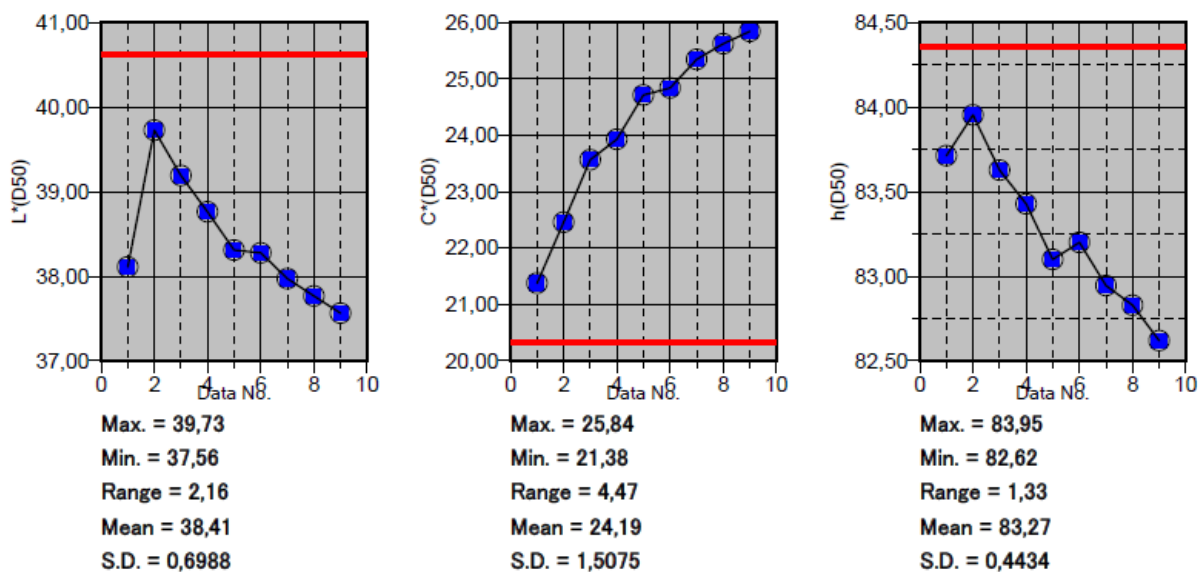
Slika 155 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.5.5 Transmisijska svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 5 mm

Slika 156 prikazuje transmisijska kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 157 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



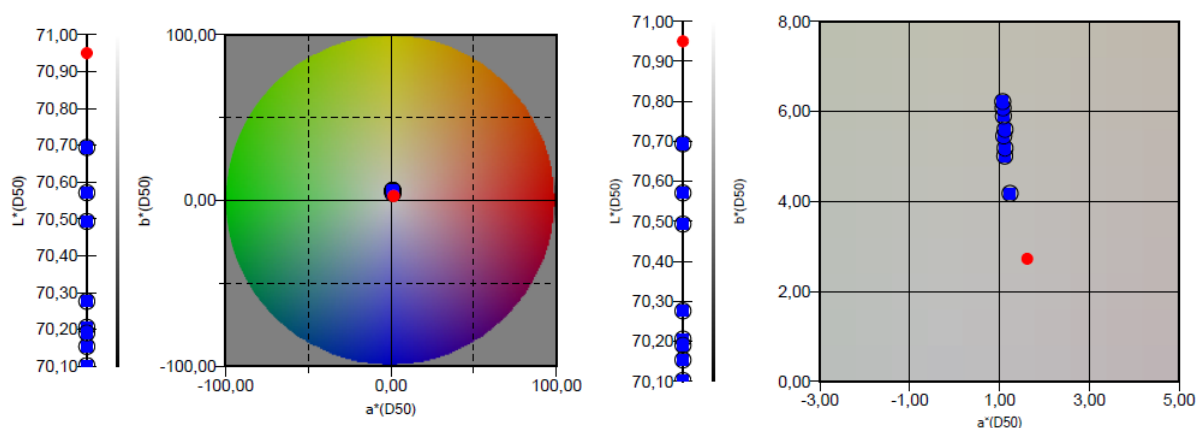
Slika 156 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



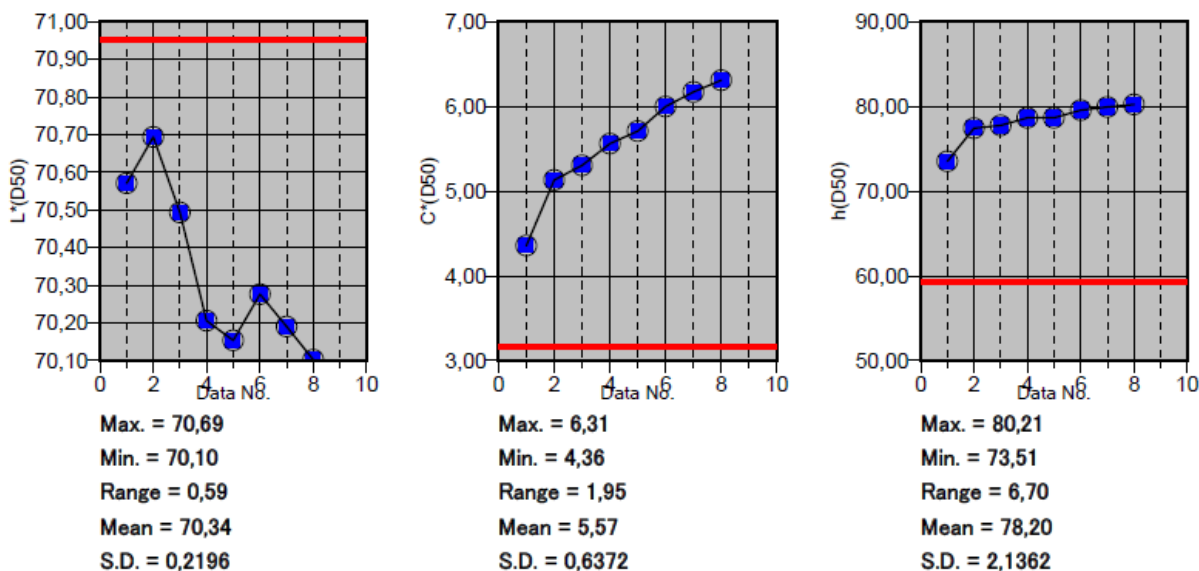
Slika 157 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm

4.1.5.6 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 1 mm

Slika 158 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 159 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 1 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



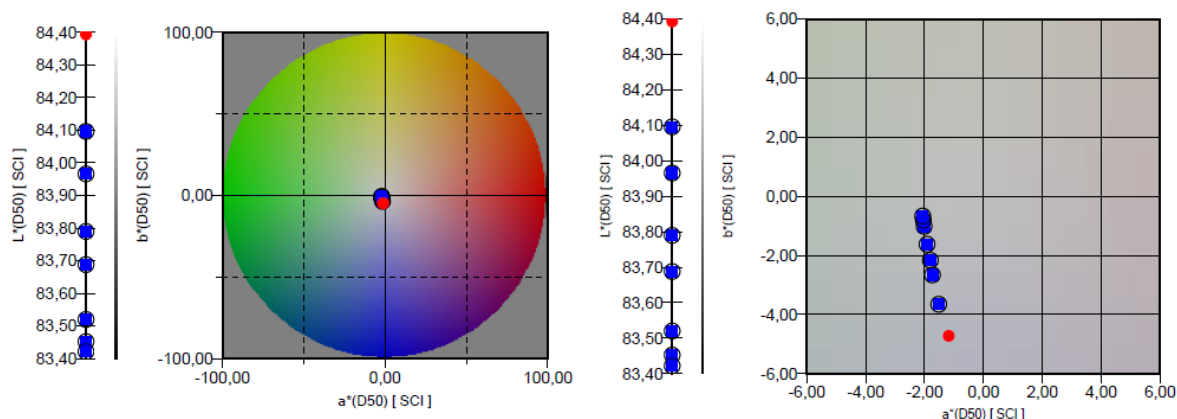
Slika 158 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



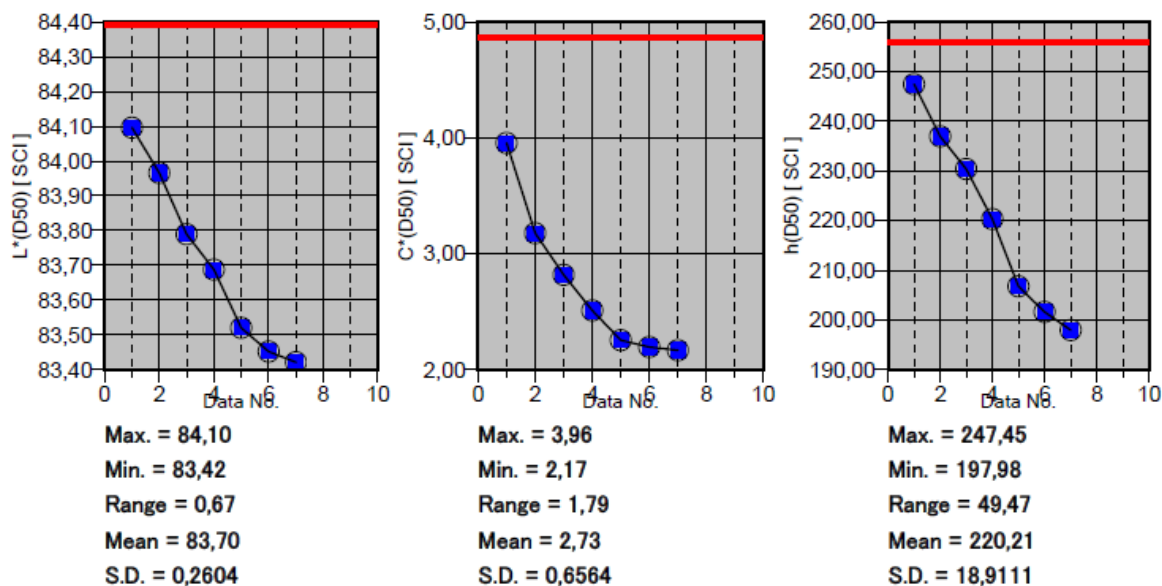
Slika 159 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.5.7 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 2 mm

Slika 160 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 161 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



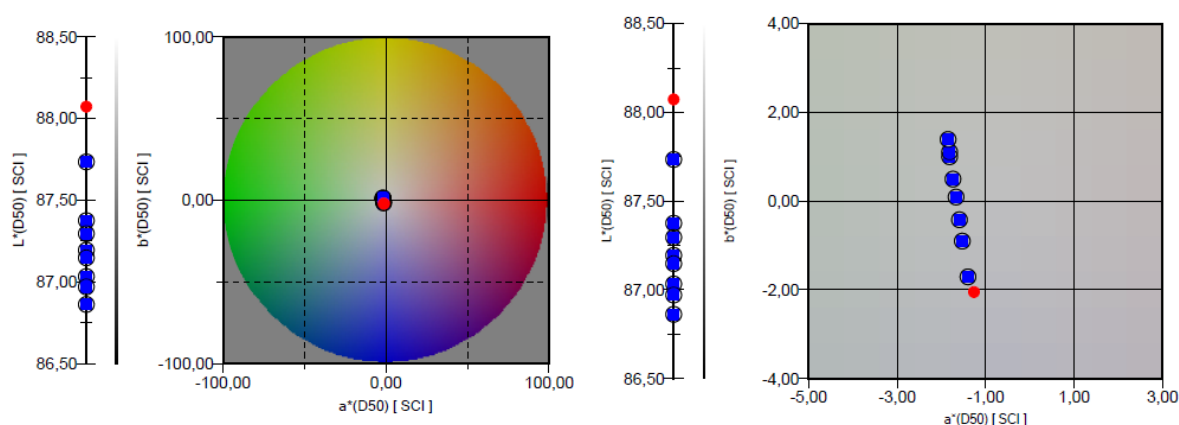
Slika 160 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



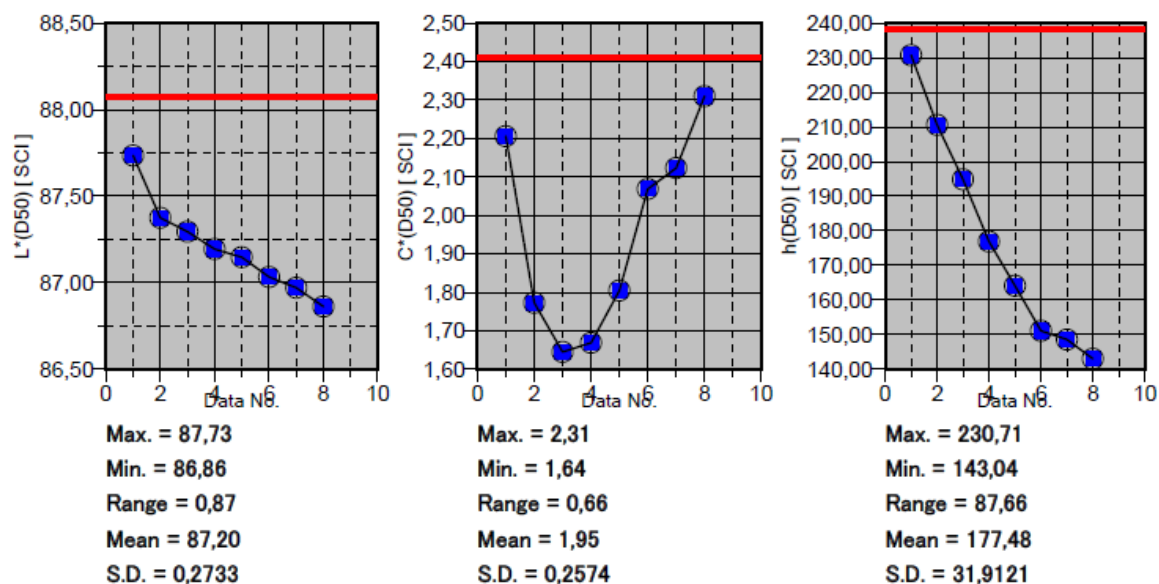
Slika 161 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm

4.1.5.8 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 3 mm

Slika 162 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 163 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 3 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



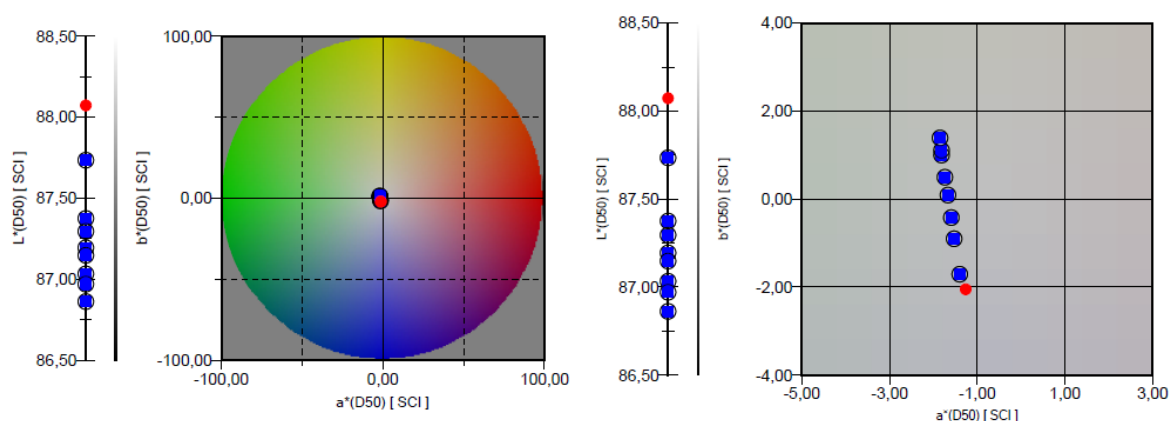
Slika 162 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



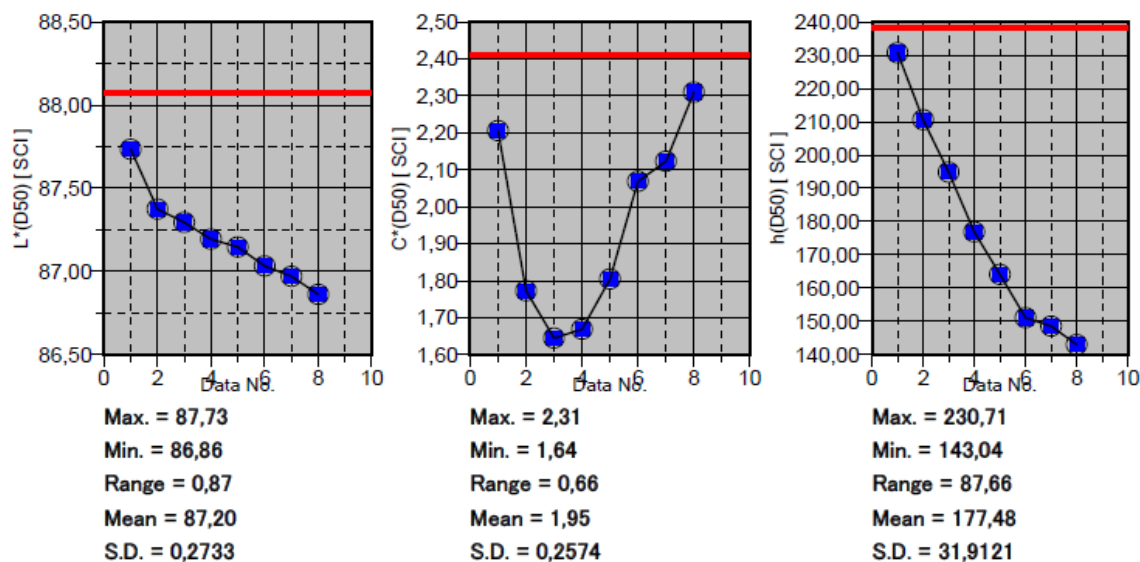
Slika 163 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.1.5.9 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 4 mm

Slika 164 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 165 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 4 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



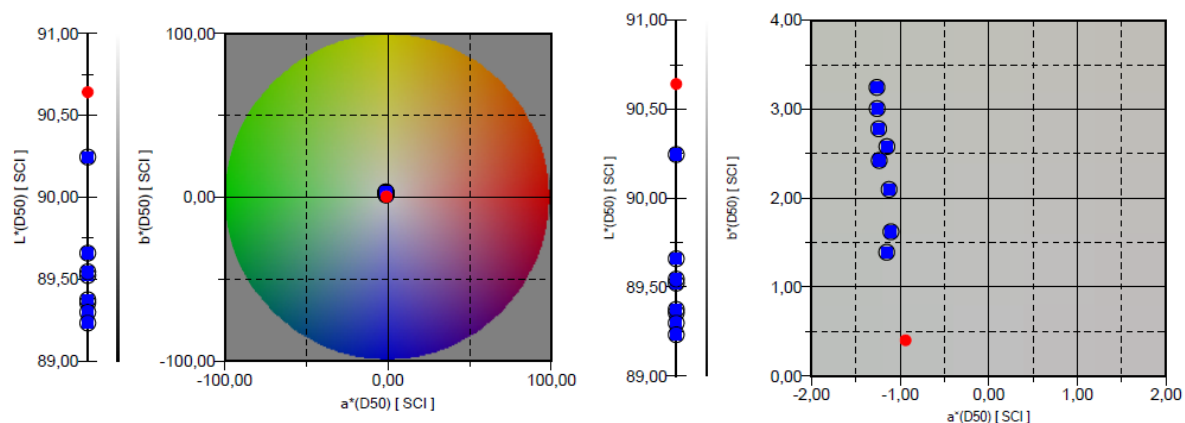
Slika 164 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



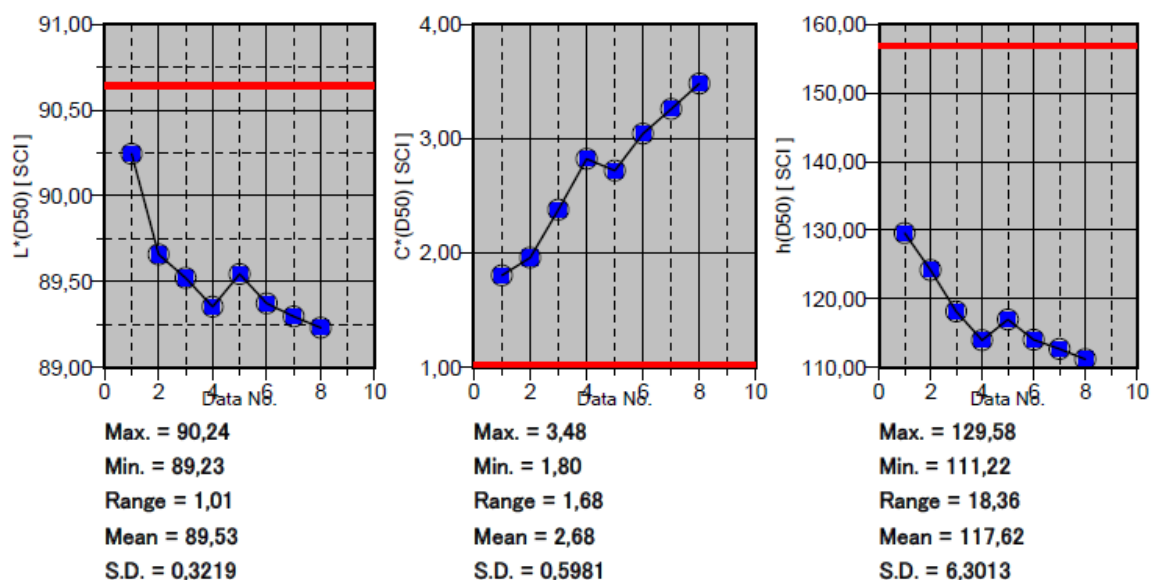
Slika 165 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm

4.1.5.10 Refleksivna svojstva ispitnih uzoraka – bijelo bojilo debljine 5 mm

Slika 166 prikazuje refleksivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 167 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.



Slika 166 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja



Slika 167 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm

4.2 UČINAK DEBLJINE ISPITNIH UZORAKA STEREOLITOGRAFSKE ADITIVNE PROIZVODNJE NA KOLORIMETRIJSKA SVOJSTVA

Eksperiment:

Za analizu učinka debljine uzoraka na njihova kolorimetrijska svojstva određene početne debljine ispitnih uzoraka su debljine od: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm. U ovom eksperimentu analiziraju se samo transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka. Svakom ispitnom uzorku povećati će se debljina za 0.2 mm, 0.4 mm, 0.6 mm i 0.8 mm. Analizira se ukupna promjena boje izražena vrijednosti ΔE_{00} i smjer promjene boje ispitnih uzoraka. Ukupna promjena boje izražene kao ΔE_{00} analizirana je između ispitnih uzoraka u tzv. „zelenom stanju“ i ispitnih uzoraka nakon završetka svih intervala sušenja, odnosno kada je proces polimerizacije potpuno završen.

4.2.1 Kolorimetrijska mjerenja transmisijiska ispitnih uzoraka s cijan bojilom

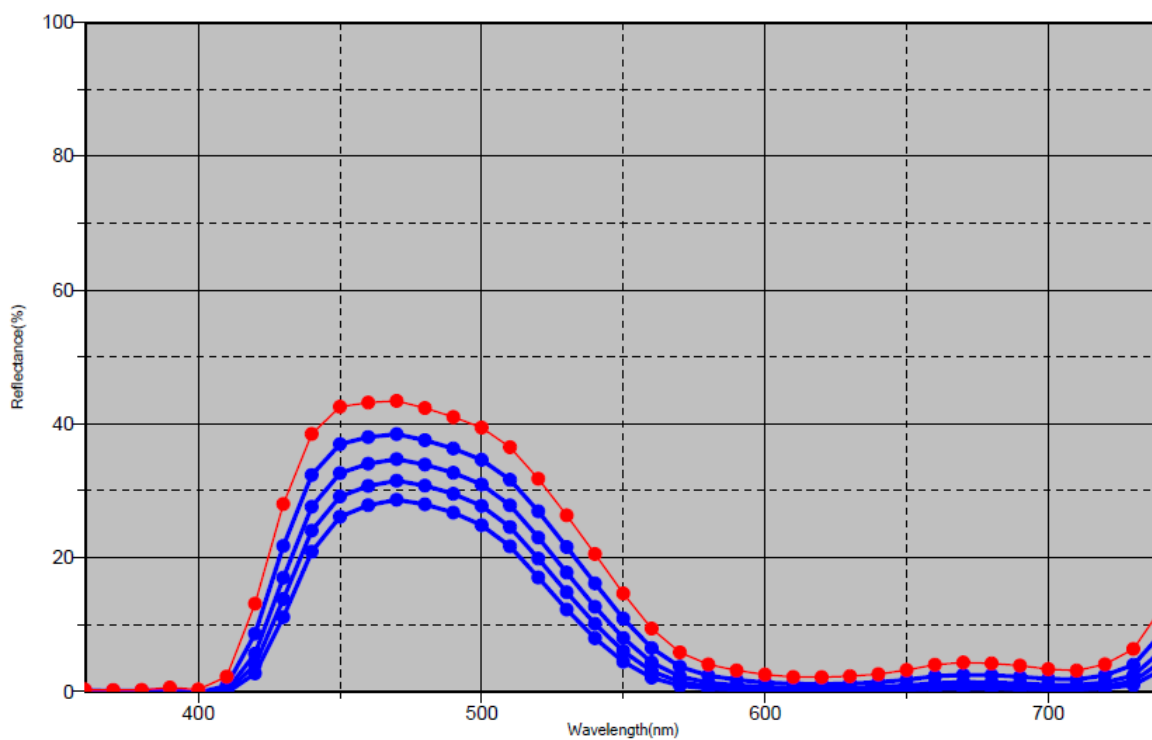
U tablici 16 su prikazane ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s cijan bojilom. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm i 4,0 mm s povećanjem debljine za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm.

Tablica 15 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine za uzorke s cijan bojilom

	ΔE_{00}			
mm	+ 0.2mm	+ 0.4mm	+ 0.6mm	+ 0.8mm
1	4,13	7,49	10,12	12,53
2	2,37	4,24	6,22	7,49
3	1,38	2,89	4,28	5,49
4	1,01	3,36	5,04	5,96

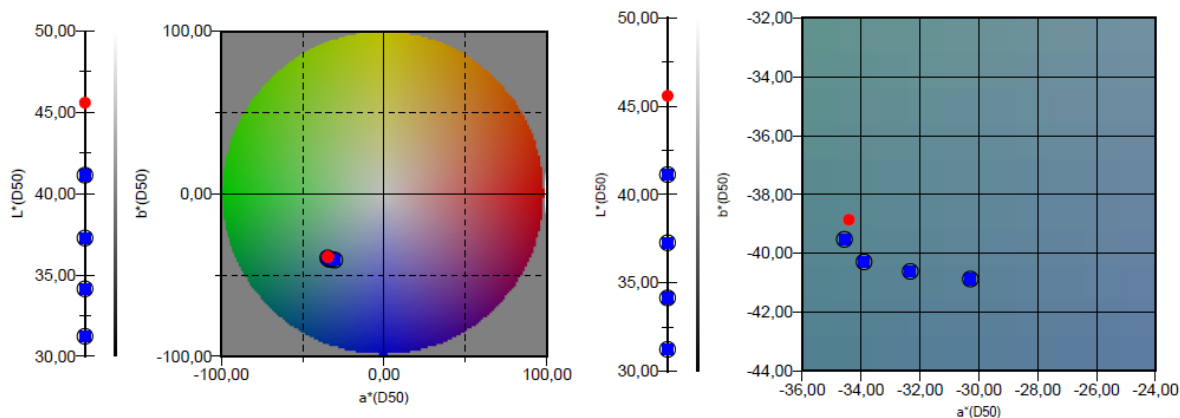
4.2.1.1 Cijan ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 168 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



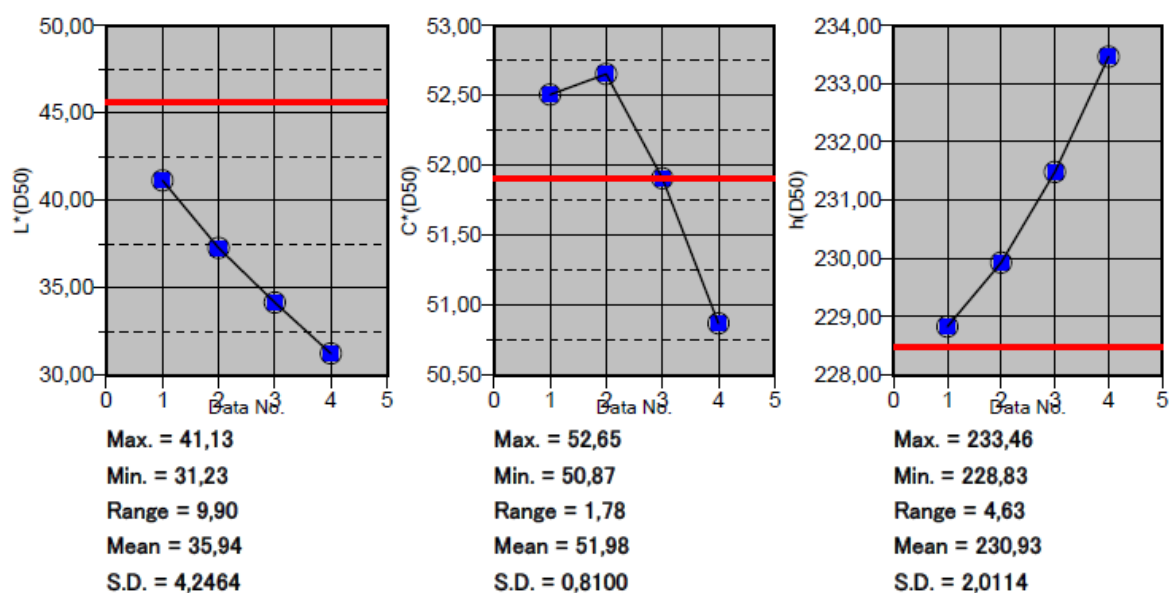
Slika 168 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
1,0 mm - 1,8 mm

Slika 169 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 169 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojilom
1,0 mm – 1,8 mm

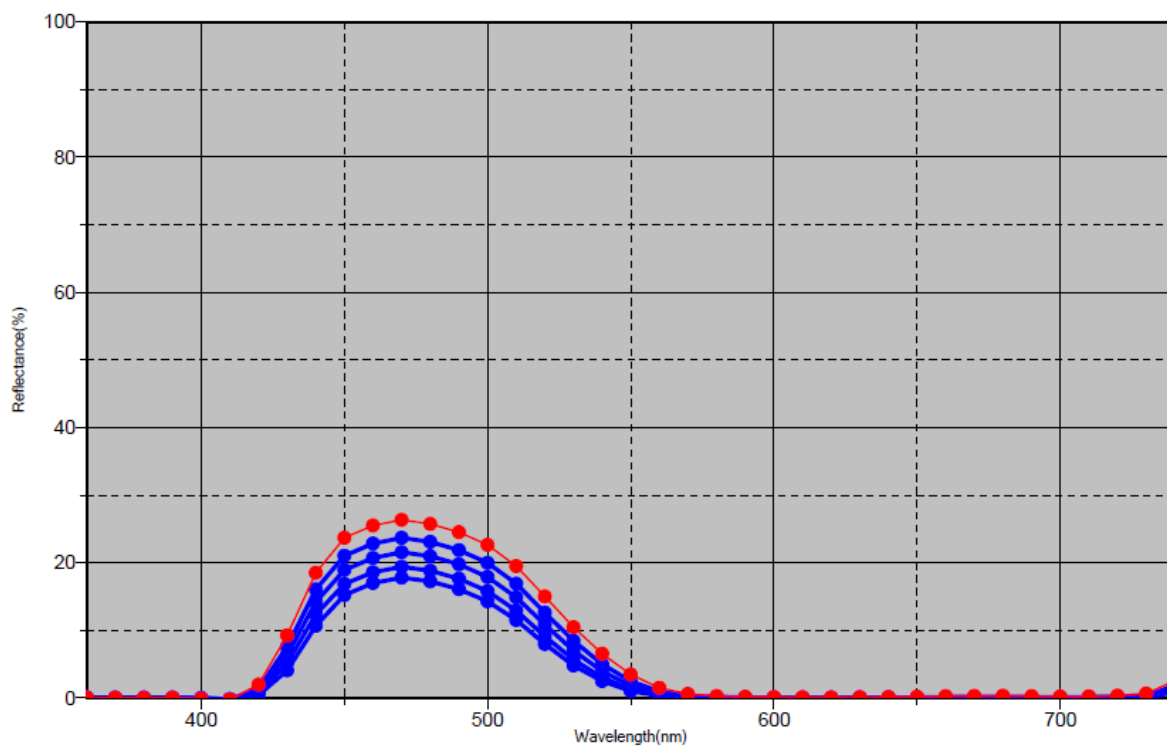
Slika 170 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 1,0 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 170 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm

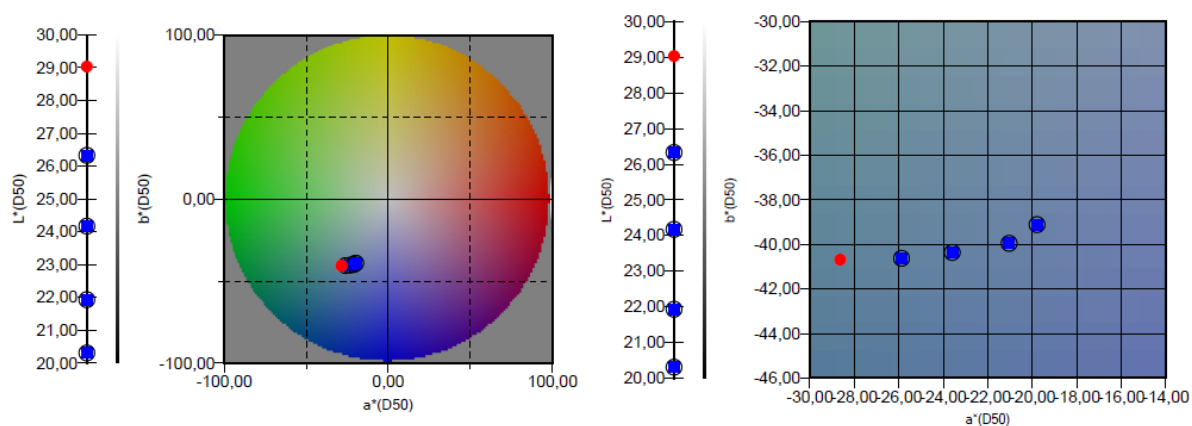
4.2.1.2 Cijan ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 171 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



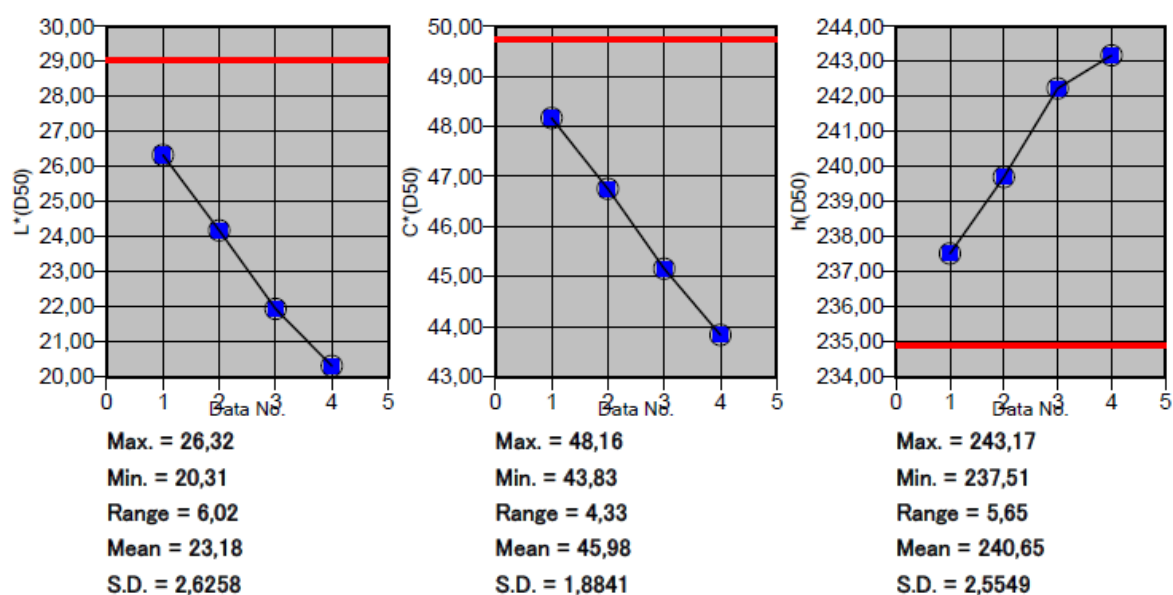
Slika 171 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
2,0 mm - 2,8 mm

Slika 172 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 2,0 mm do 2,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 172 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
2,0 mm – 2,8 mm

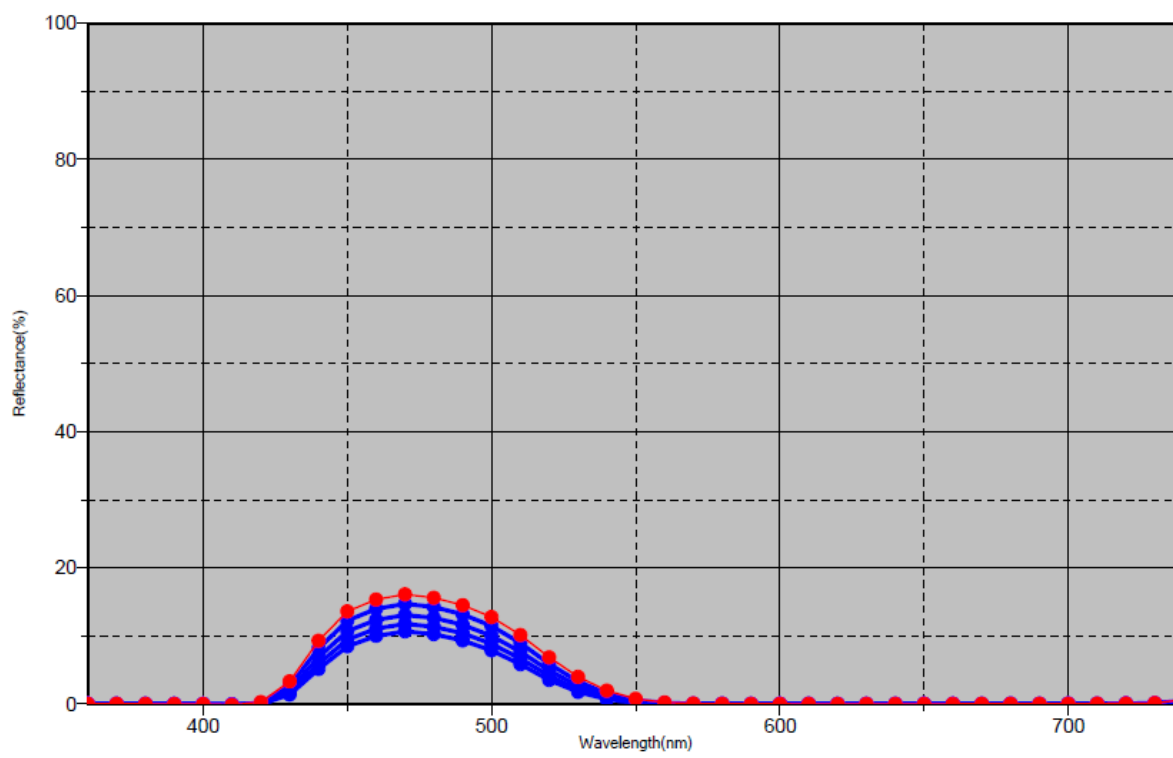
Slika 173 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 2,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 2,0 mm do 2,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 173 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm

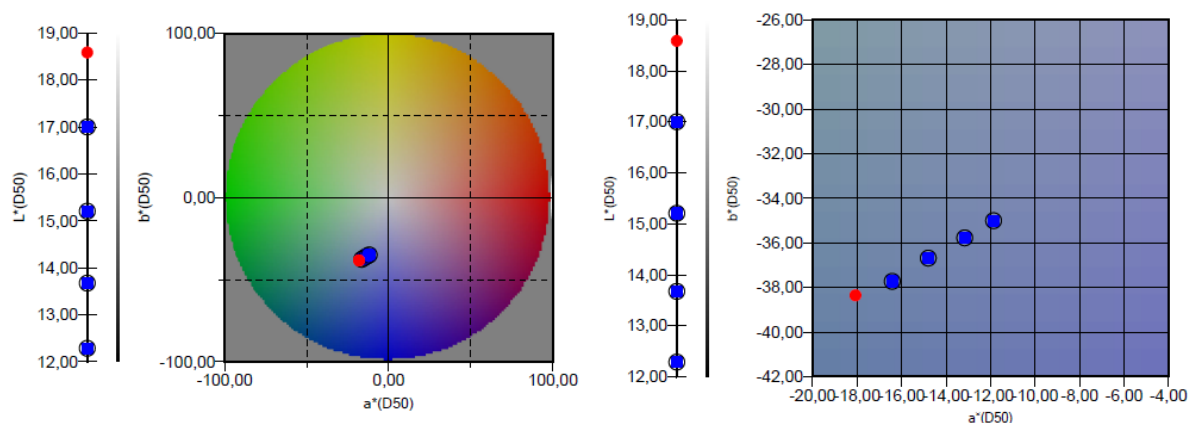
4.2.1.3 Cijan ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 174 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



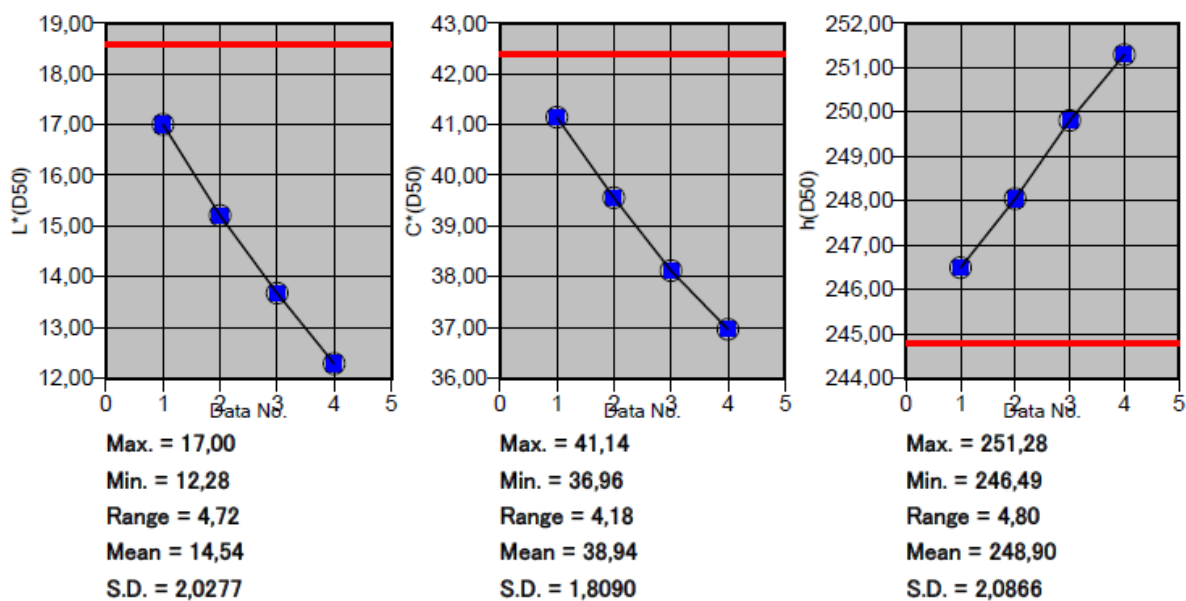
Slika 174 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
3,0 mm - 3,8 mm

Slika 175 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 3,0 mm do 3,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 175 CIELAB prikaz transmisivskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
3,0 mm – 3,8 mm

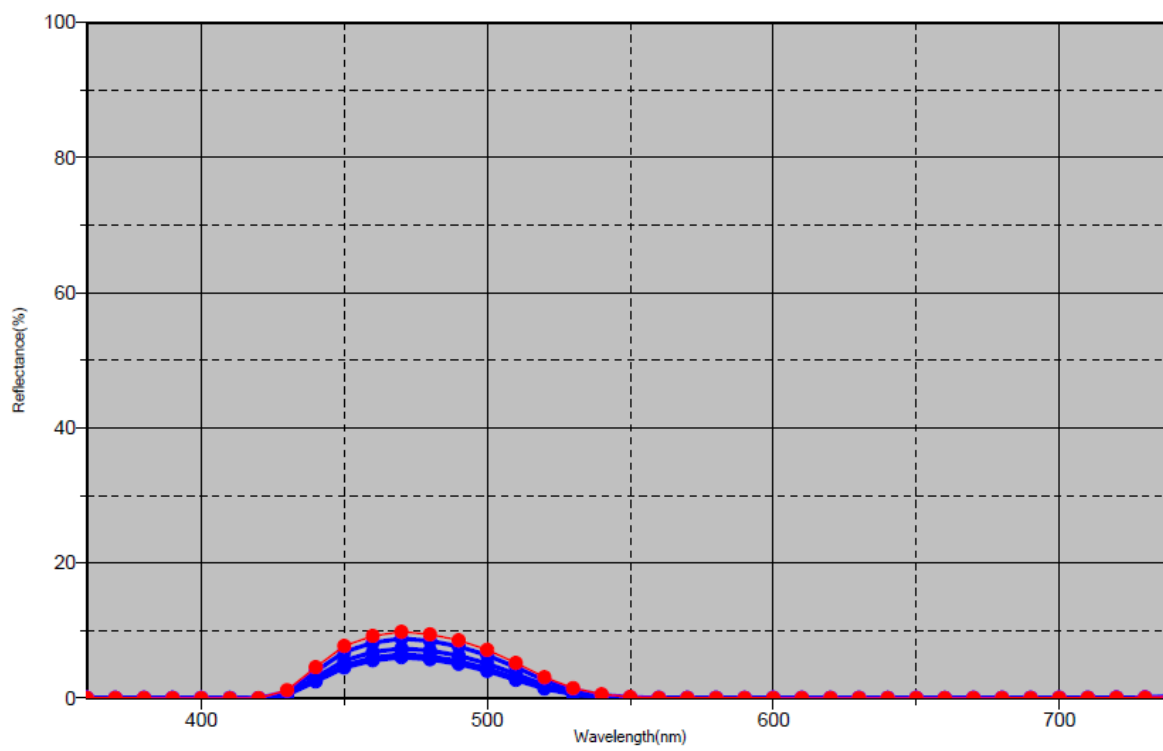
Slika 176 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 3,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 3,0 mm do 3,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisivska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 176 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm

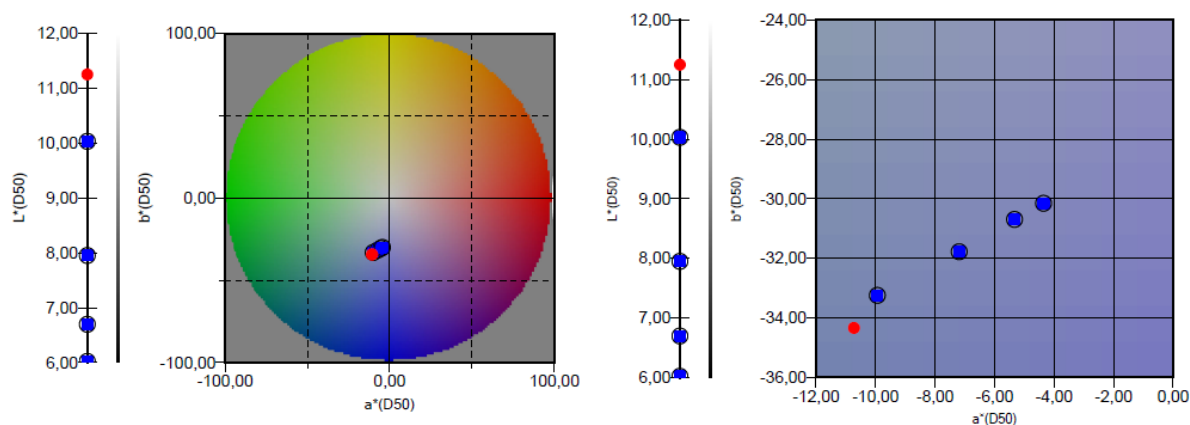
4.2.1.4 Cijan ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2mm do 0.8 mm

Slika 177 prikazuje spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



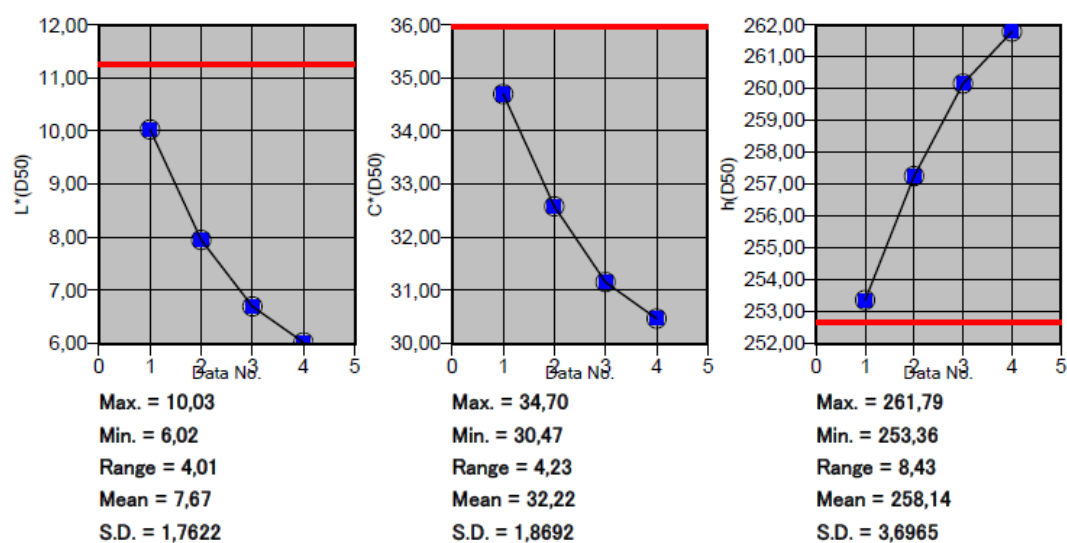
Slika 177 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
4,0 mm - 4,8 mm

Slika 178 prikazuje transmisijска svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 4,0 mm do 4,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 178 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom
4,0 mm – 4,8 mm

Slika 179 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s cijan bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 4,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 4,0 mm do 4,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijска svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 179 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm

4.2.2 Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s magenta bojilom

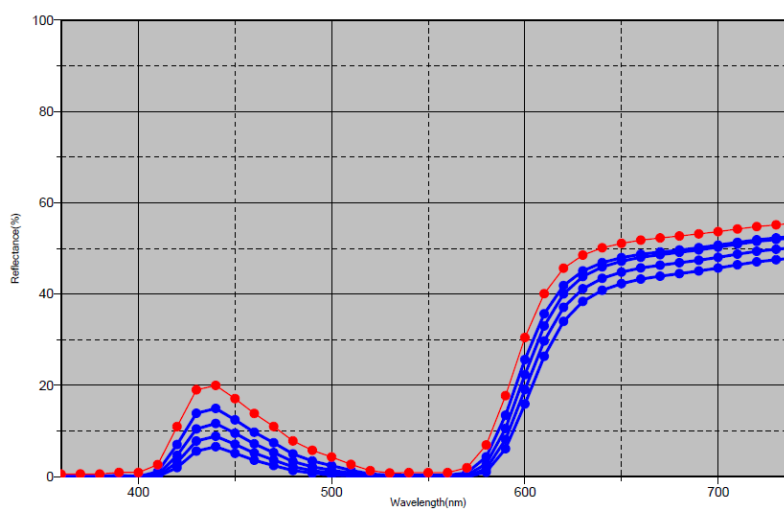
U tablici 17 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s magenta bojilom. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm i 4,0 mm s povećanjem debljine za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm.

Tablica 16 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine

	ΔE_{00}			
mm	+ 0.2mm	+ 0.4mm	+ 0.6mm	+ 0.8mm
1	3,69	6,44	9,14	11,86
2	2,37	4,34	6,15	7,73
3	0,92	1,61	2,28	2,96
4	0,62	1,58	1,99	2,81

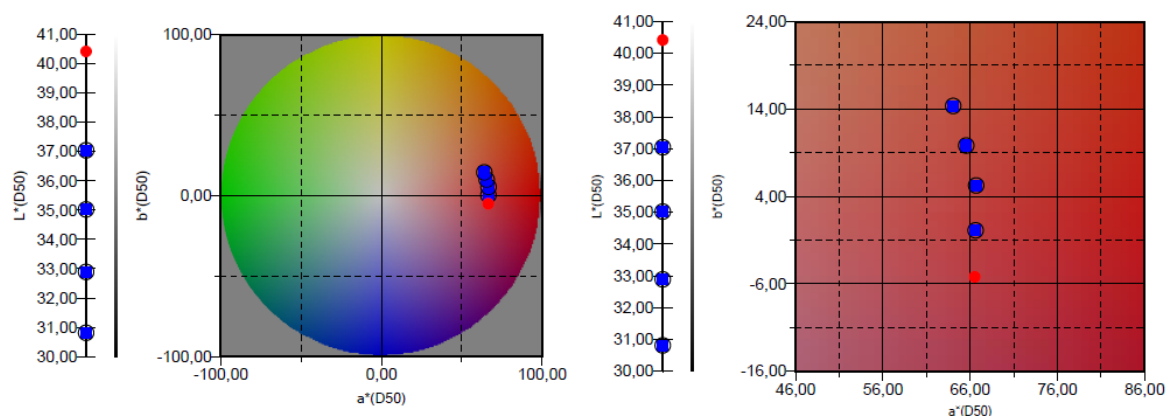
4.2.2.1 Magenta ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 180 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



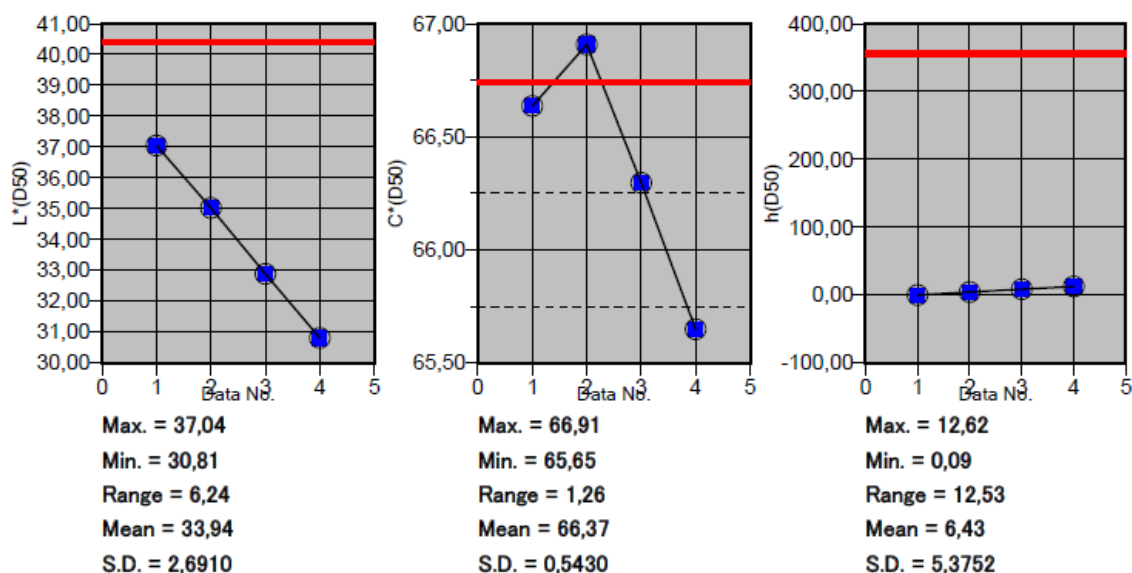
Slika 180 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojilom 1,0 mm - 1,8 mm

Slika 181 prikazuje transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojiлом prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 181 CIELAB prikaz transmisijiskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом 1,0 mm – 1,8 mm

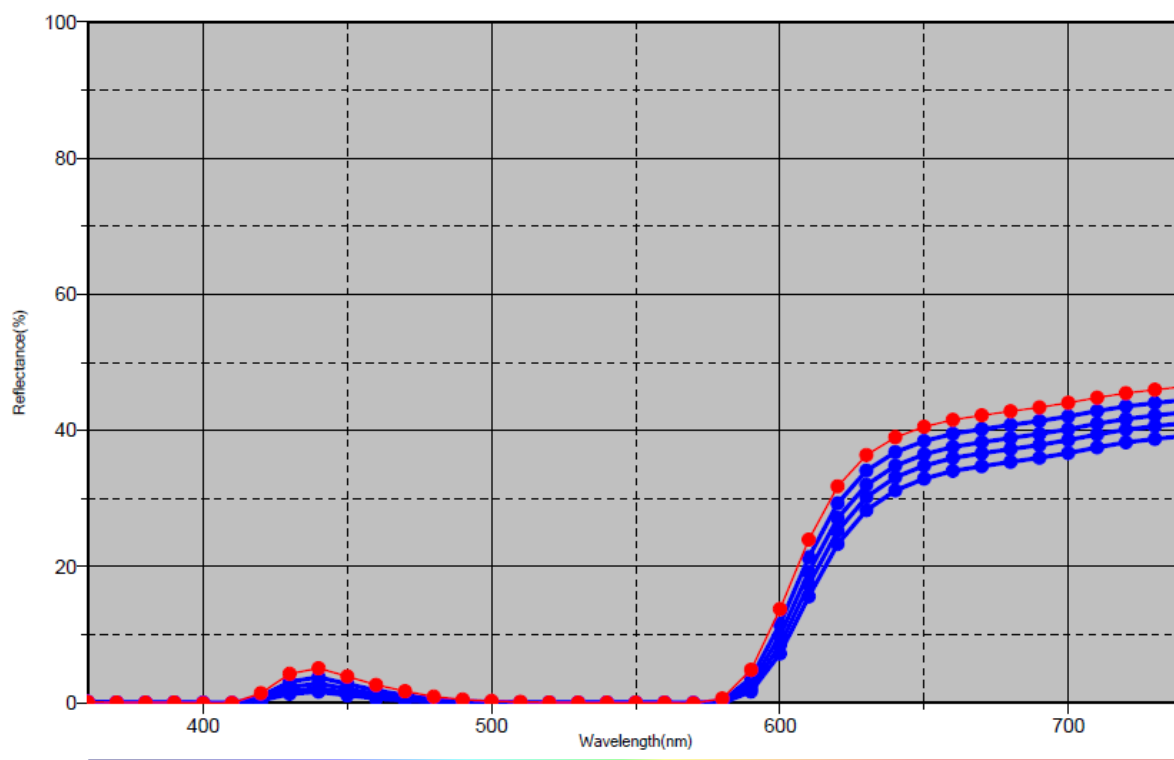
Slika 182 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojiлом. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 182 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm

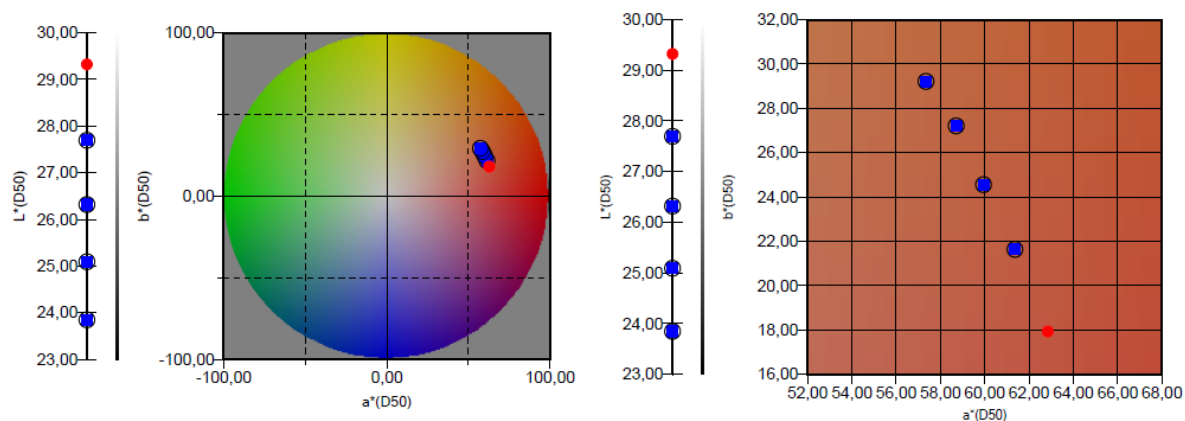
4.2.2.2 Magenta ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 183 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



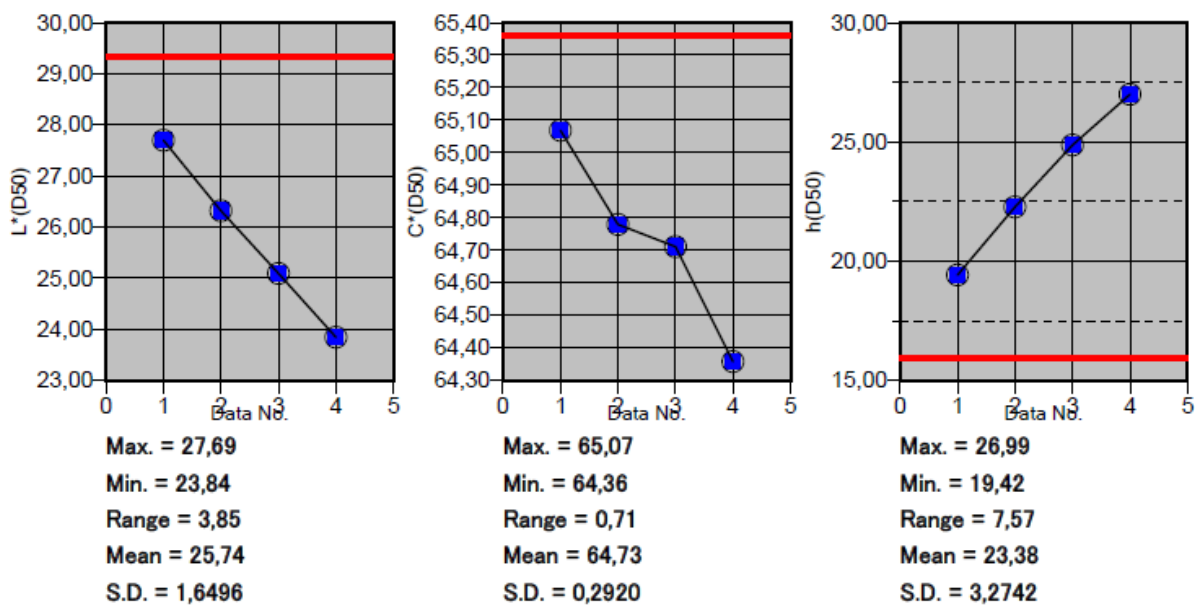
Slika 183 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом
1,0 mm - 1,8 mm

Slika 184 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojiлом prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 2,0 mm do 2,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 184 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom
2,0 mm – 2,8 mm

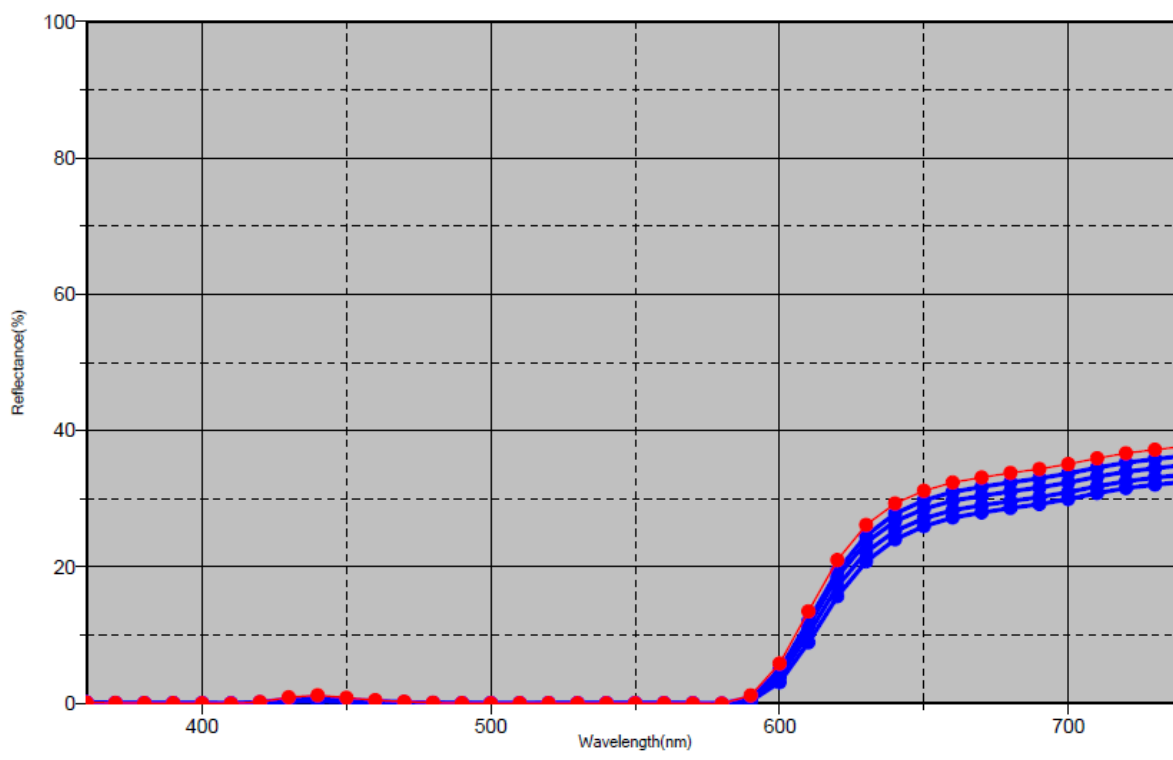
Slika 185 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 2,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 2,0 mm do 2,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 185 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm

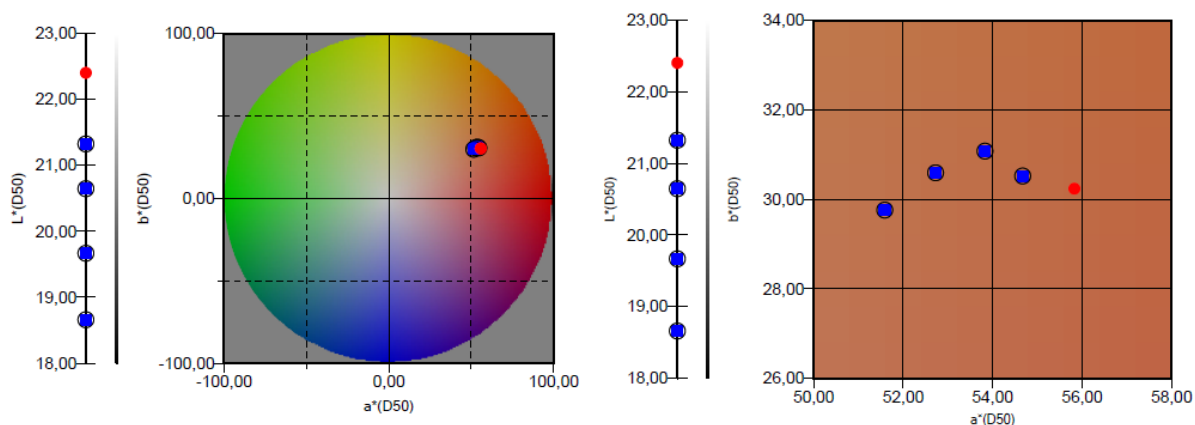
4.2.2.3 Magenta ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 186 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



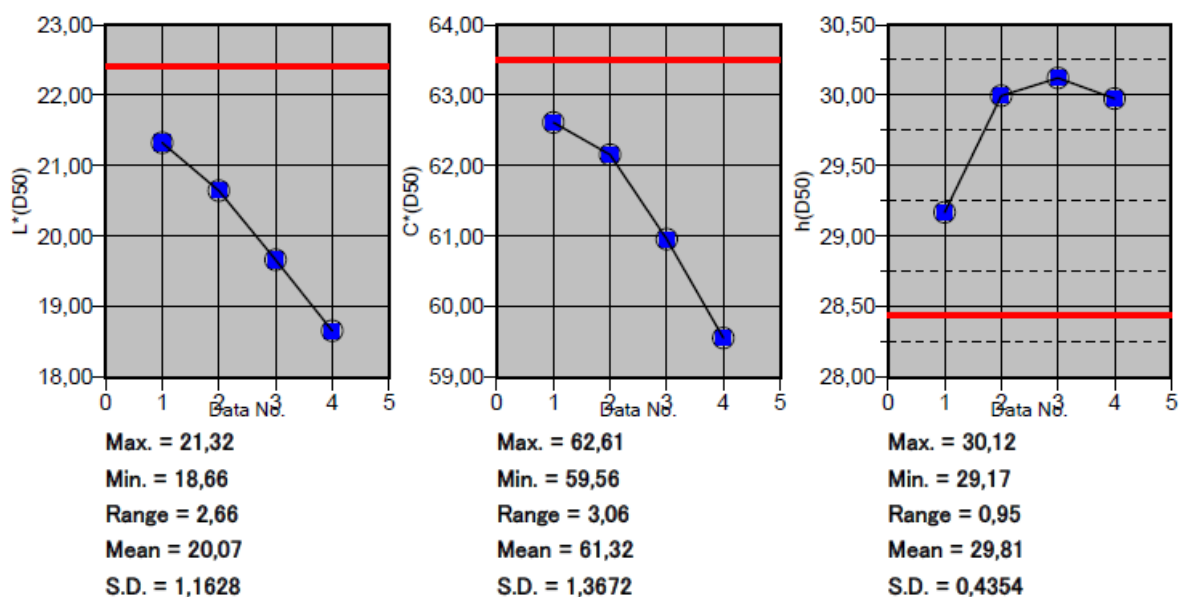
Slika 186 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом
3,0 mm - 3,8 mm

Slika 187 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojiлом prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 187 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojilom
3,0 mm – 3,8 mm

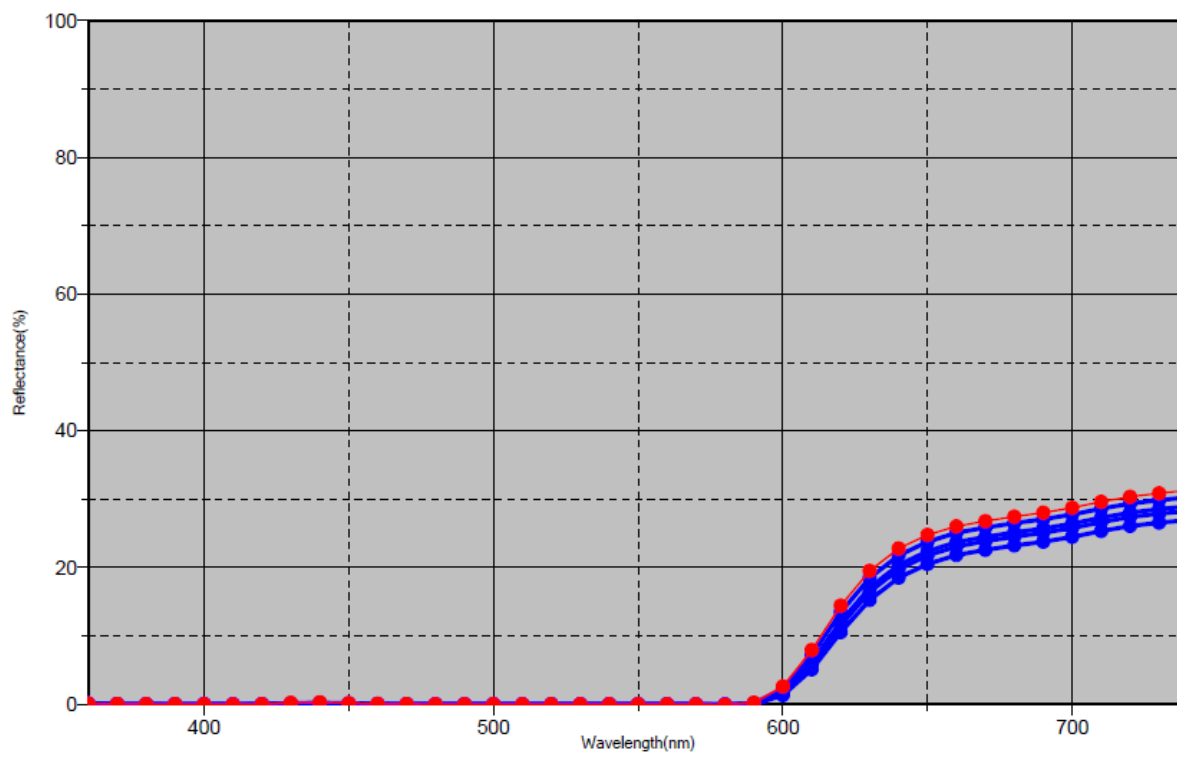
Slika 188 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 3,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 3,2 mm do 3,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijска svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 188 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm

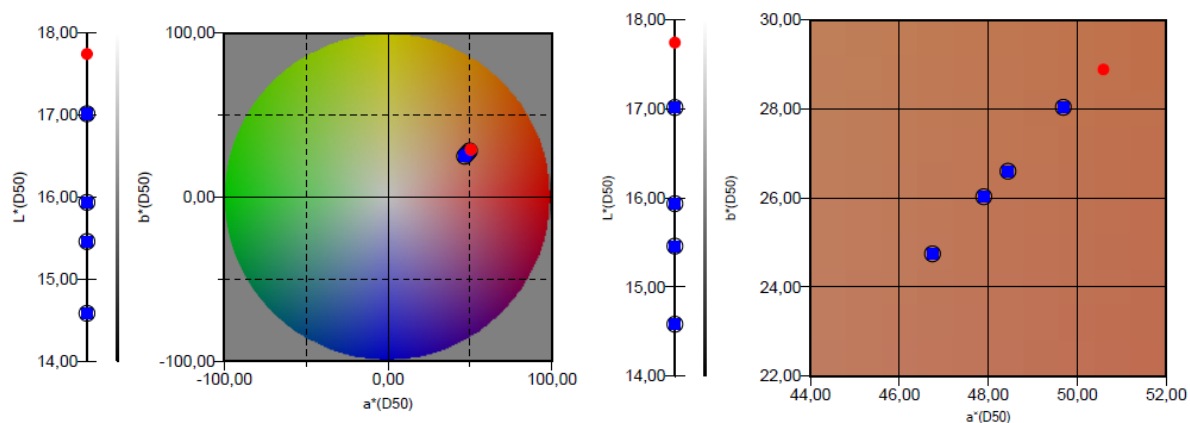
4.2.2.4 Magenta ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2mm do 0.8 mm

Slika 189 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



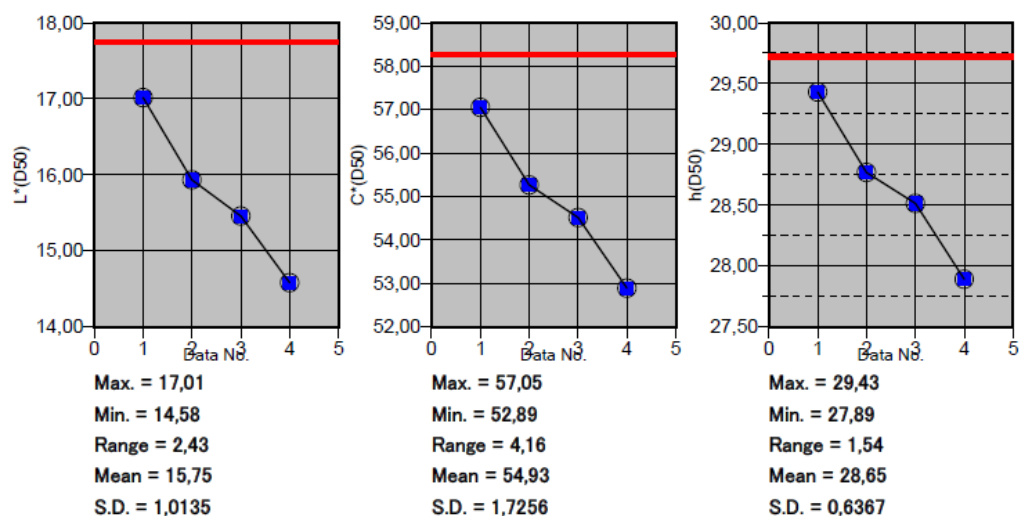
Slika 189 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom
4,0 mm - 4,8 mm

Slika 190 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s magenta bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 4,0 mm do 4,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 190 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojiлом
4,0 mm – 4,8 mm

Slika 191 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojiлом. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 4,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 4,2 mm do 4,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 191 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm

4.2.3 Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s žutim bojilom

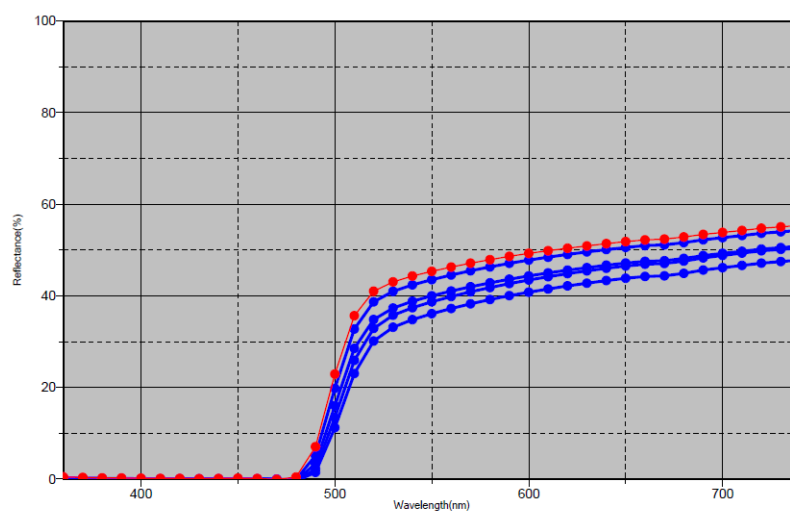
U tablici 18 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s žutim bojilom. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm i 4,0 mm s povećanjem debljine za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm.

Tablica 17 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine

	ΔE_{00}			
mm	+	+	+	+
	0.2mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm
1	1,17	3,14	4,15	5,74
2	1,7	2,8	4,47	5,46
3	1,3	2,78	4,49	5,84
4	1,52	3,35	3,66	4,94

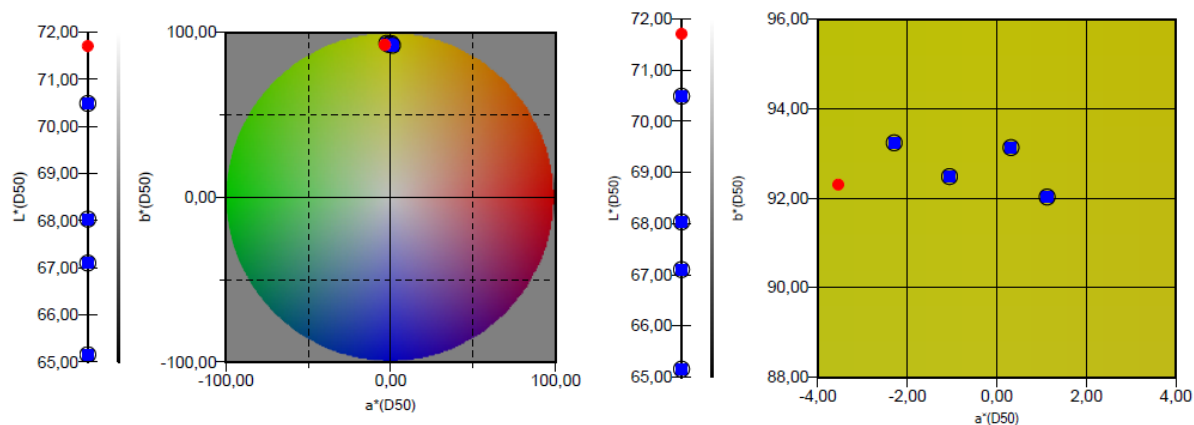
4.2.3.1 Žuti ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 192 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



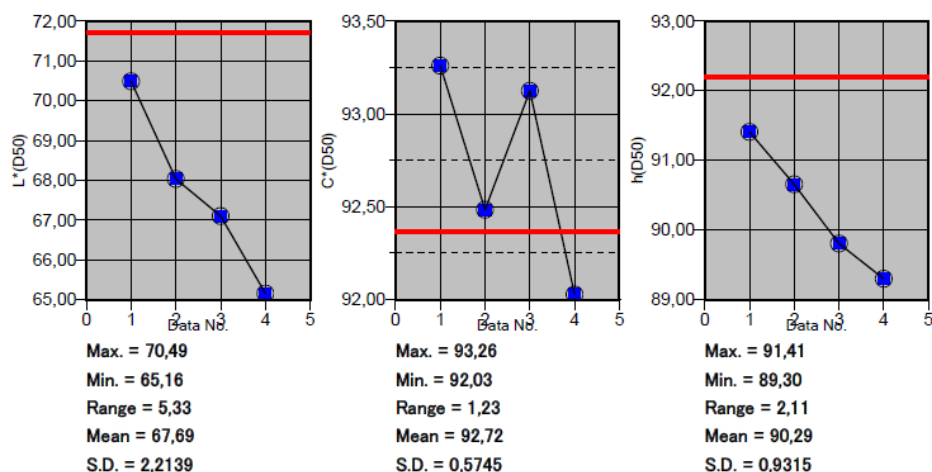
Slika 192 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom 1,0 mm - 1,8 mm

Slika 193 prikazuje transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 193 CIELAB prikaz transmisijiskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom
1,0 mm – 1,8 mm

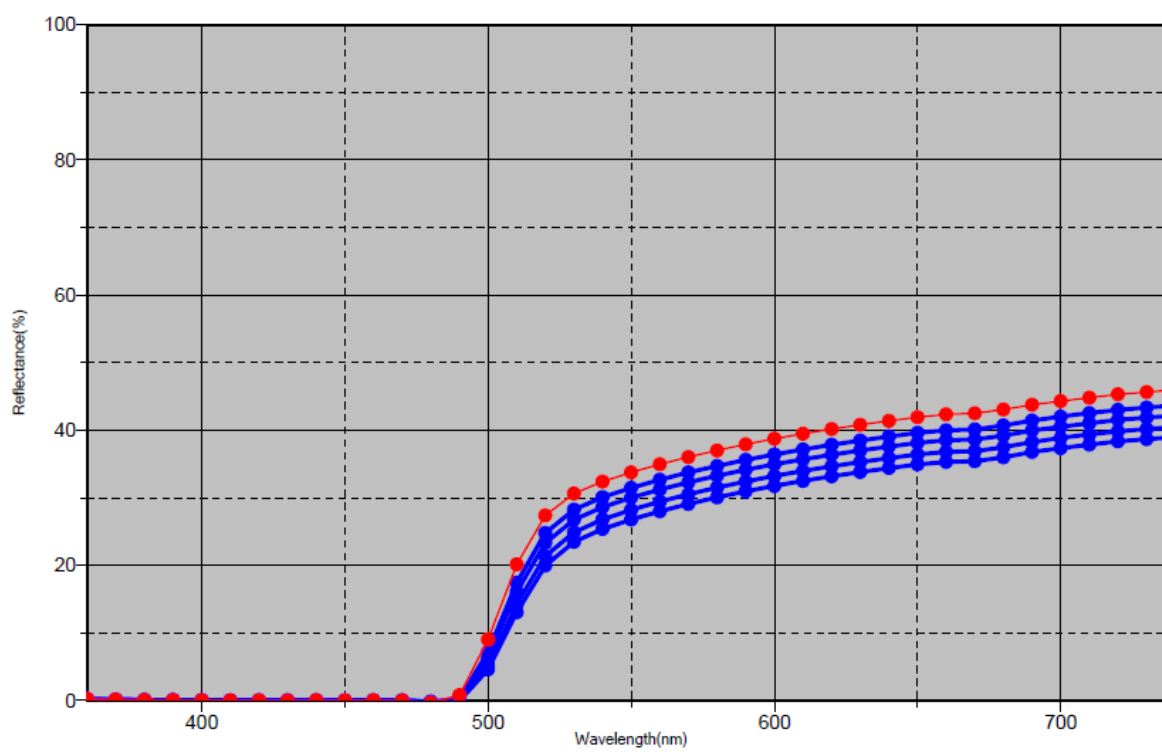
Slika 194 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 1,2 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 194 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm

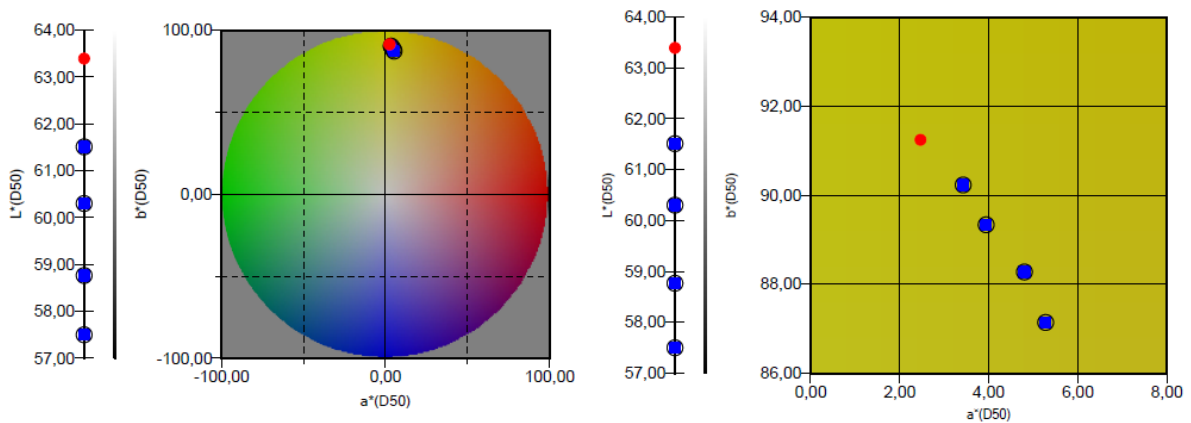
4.2.3.2 Žuti ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 195 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



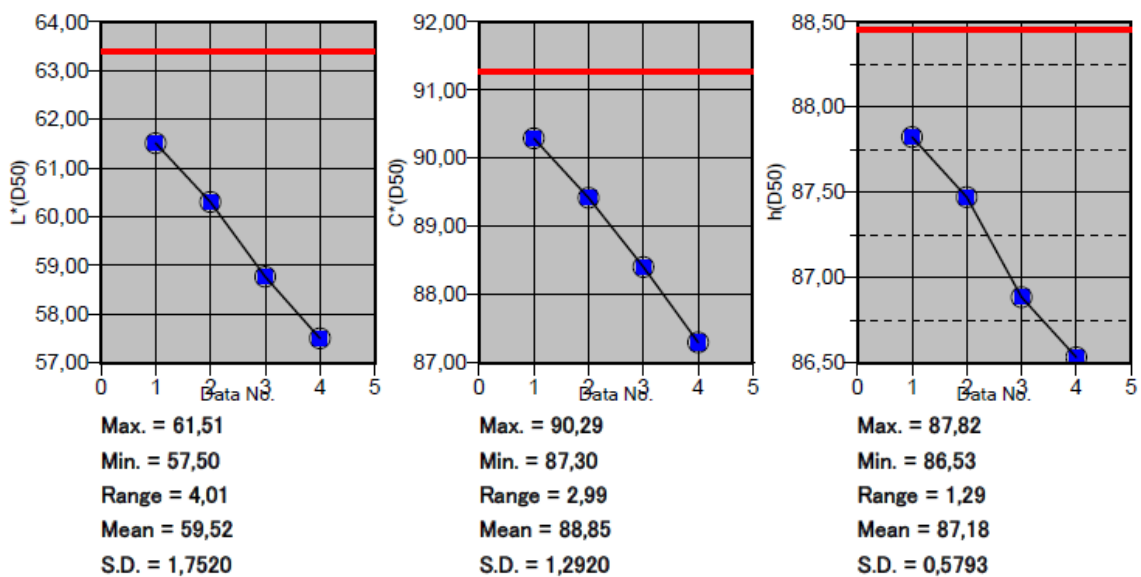
Slika 195 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom
2,0 mm - 2,8 mm

Slika 196 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s žutim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 2,0 mm do 2,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 196 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom
2,0 mm – 2,8 mm

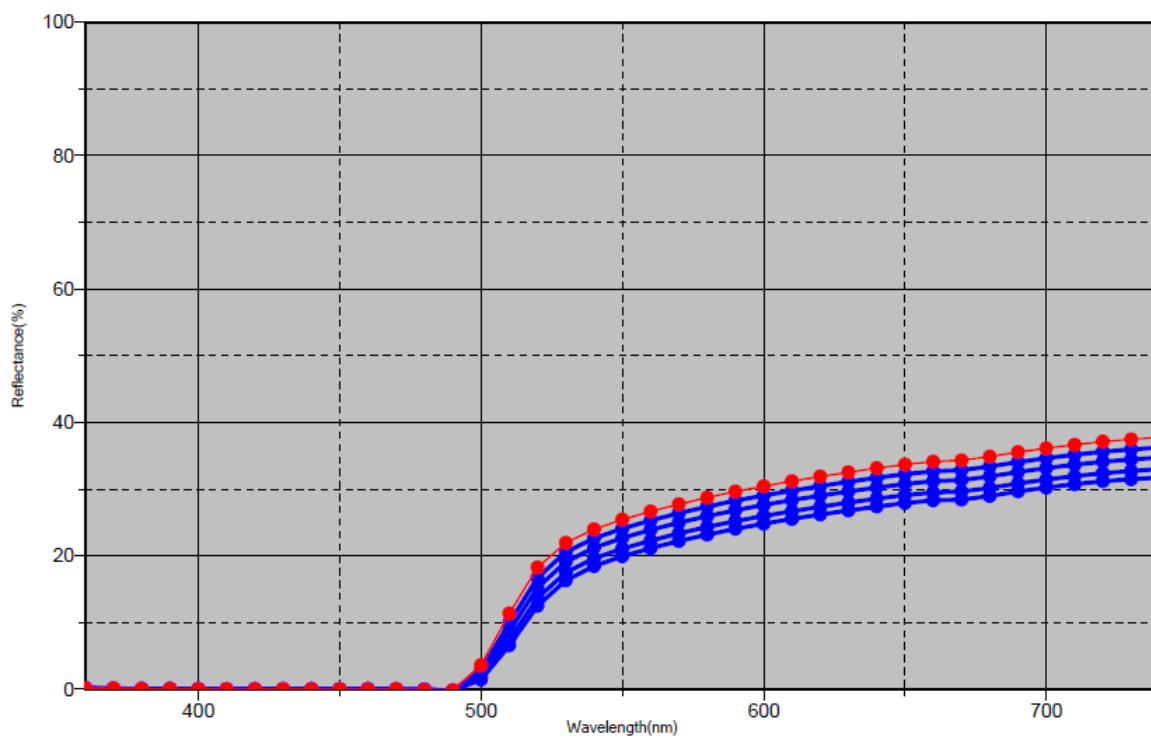
Slika 197 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 2,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 2,2 mm do 2,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 197 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm

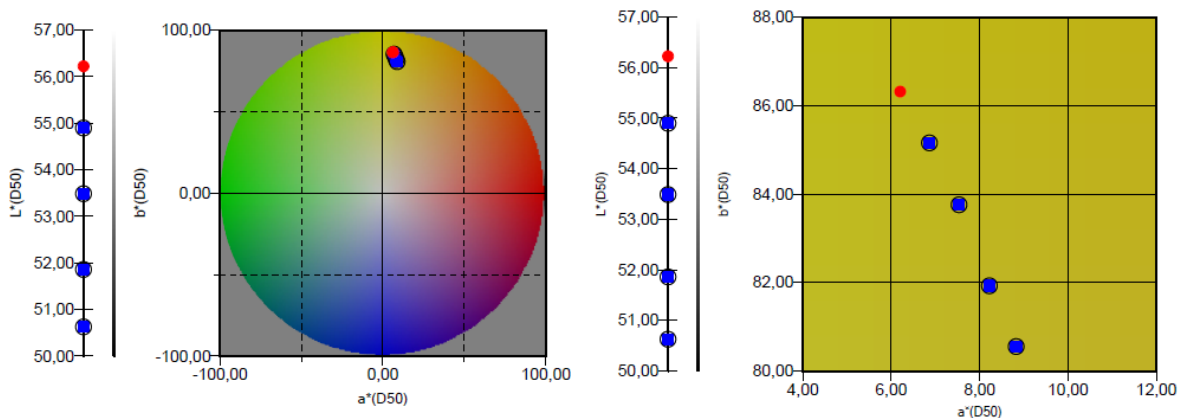
4.2.3.3 Žuti ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 198 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



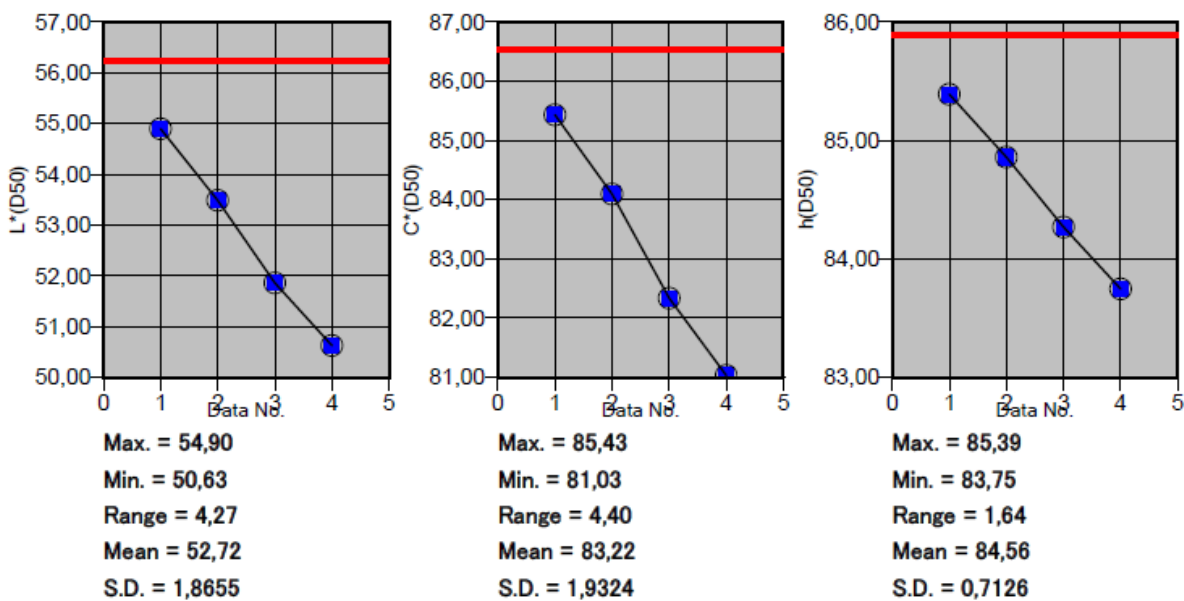
Slika 198 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom
3,0 mm - 3,8 mm

Slika 199 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s žutim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 3,0 mm do 3,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 199 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom
3,0 mm – 3,8 mm

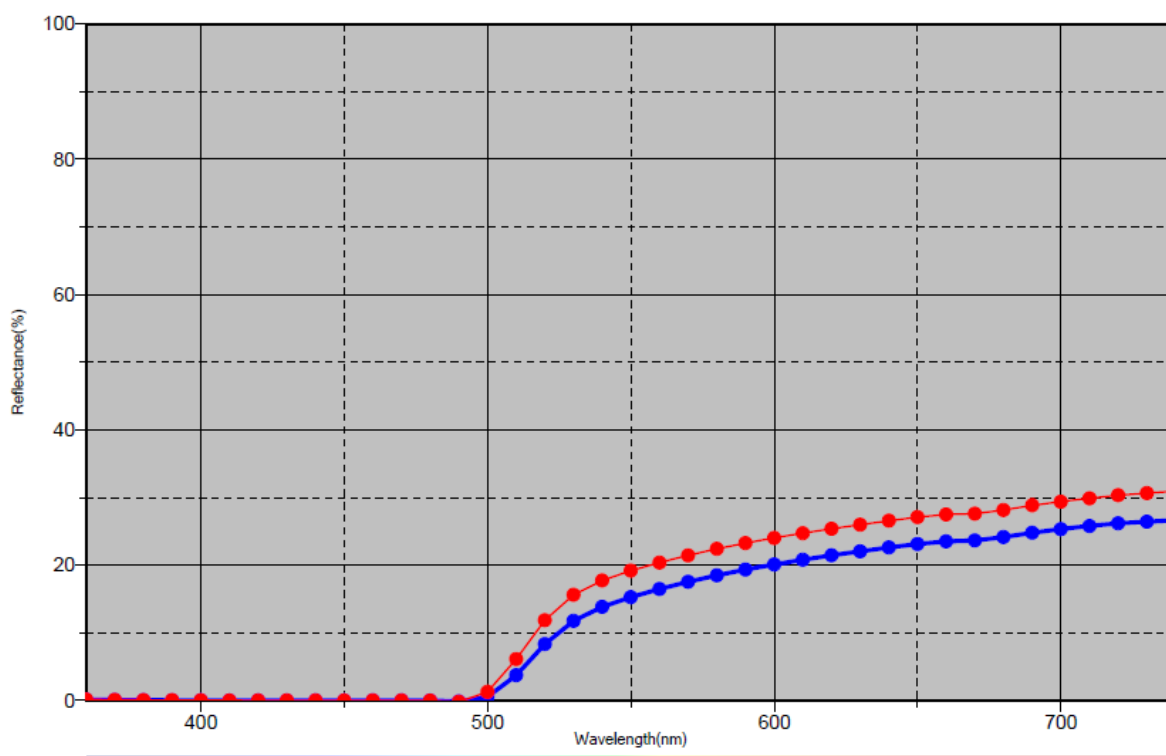
Slika 200 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 3,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 3,2 mm do 3,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 200 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka
3,0 mm - 3,8 mm

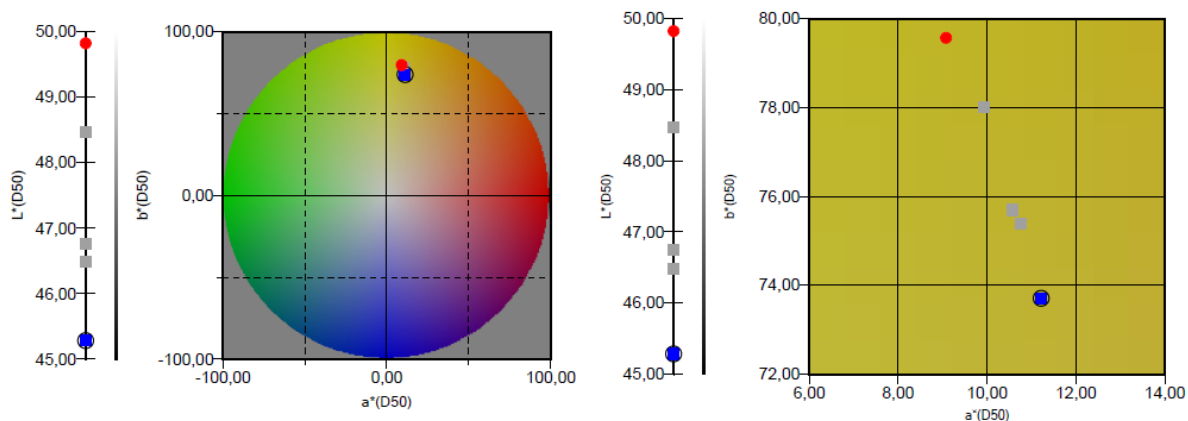
4.2.3.4 Žuti ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 201 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojiлом. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



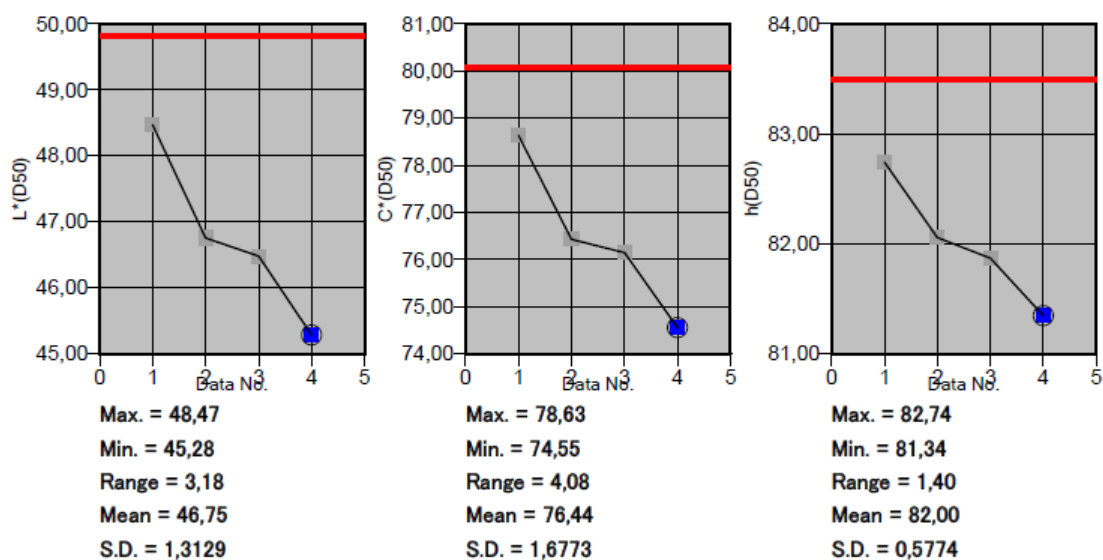
Slika 201 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojiлом
4,0 mm - 4,8 mm

Slika 201 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s žutim bojiлом prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 4,0 mm do 4,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 202 CIELAB prikaz transmisivskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom
4,0 mm – 4,8 mm

Slika 203 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s žutim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 4,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 4,2 mm do 4,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisivska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 203 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm

4.2.4 Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s crnim bojilom

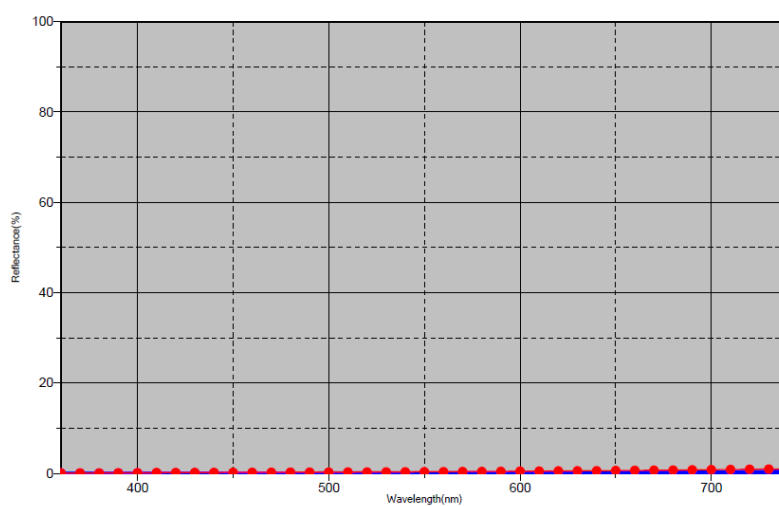
U tablici 19 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s crnim bojilom. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm i 4,0 mm s povećanjem debljine za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm.

Tablica 18 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine

	ΔE_{00}			
mm	⁺ 0.2mm	⁺ 0.4mm	⁺ 0.6mm	⁺ 0.8mm
1	1,97	3,23	3,64	3,92
2	0,04	0,01	0	0
3	0,06	0,02	0,01	0,02
4	0	0,03	0	0

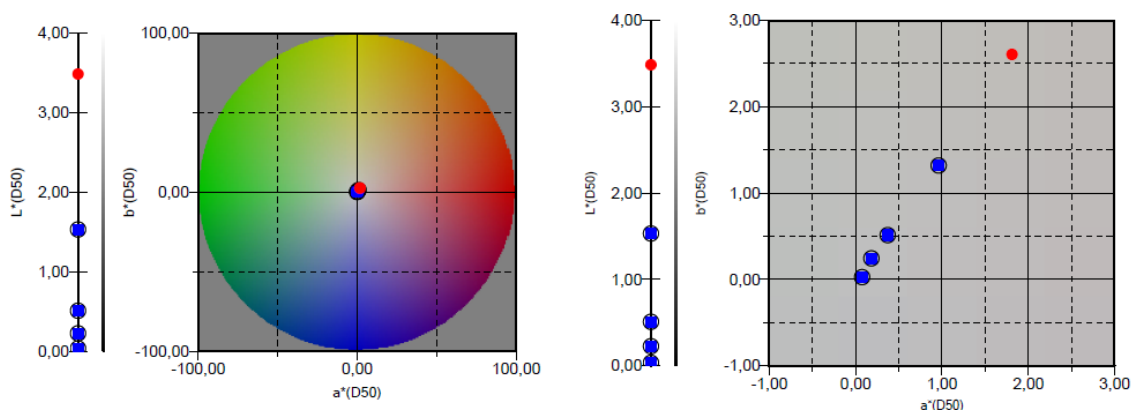
4.2.4.1 Crni ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 204 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



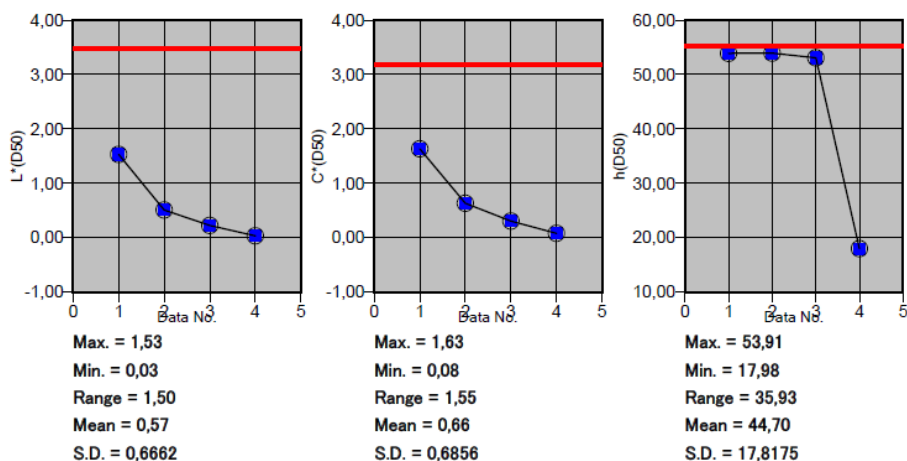
Slika 204 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom
1,0 mm - 1,8 mm

Slika 205 prikazuje transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 205 CIELAB prikaz transmisijiskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom
1,0 mm – 1,8 mm

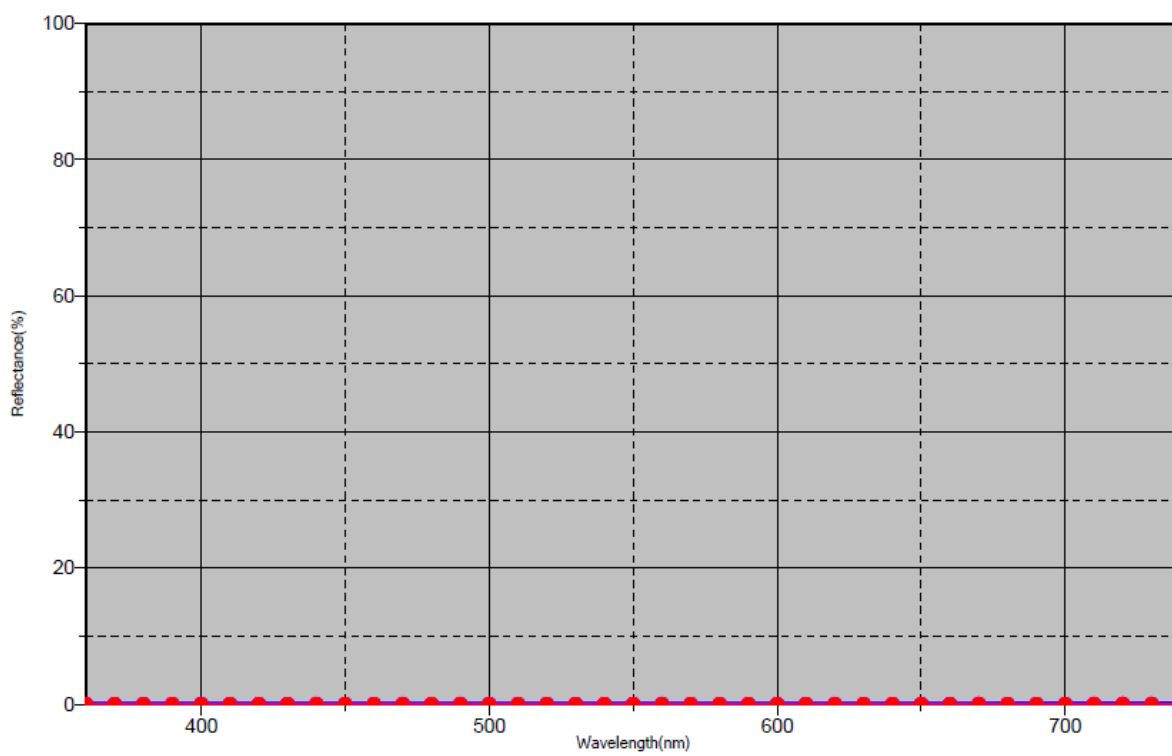
Slika 206 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 1,2 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 206 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm

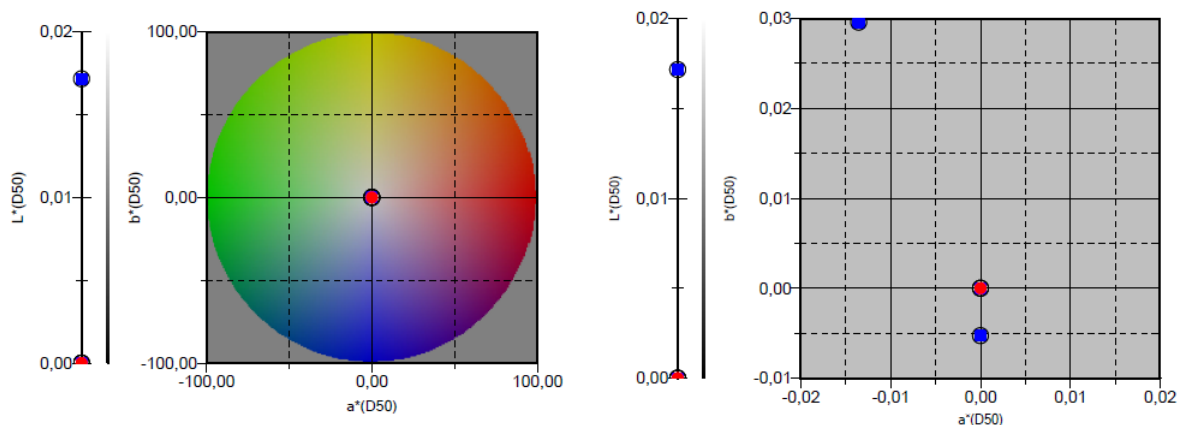
4.2.4.2 Crni ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 207 prikazuje spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



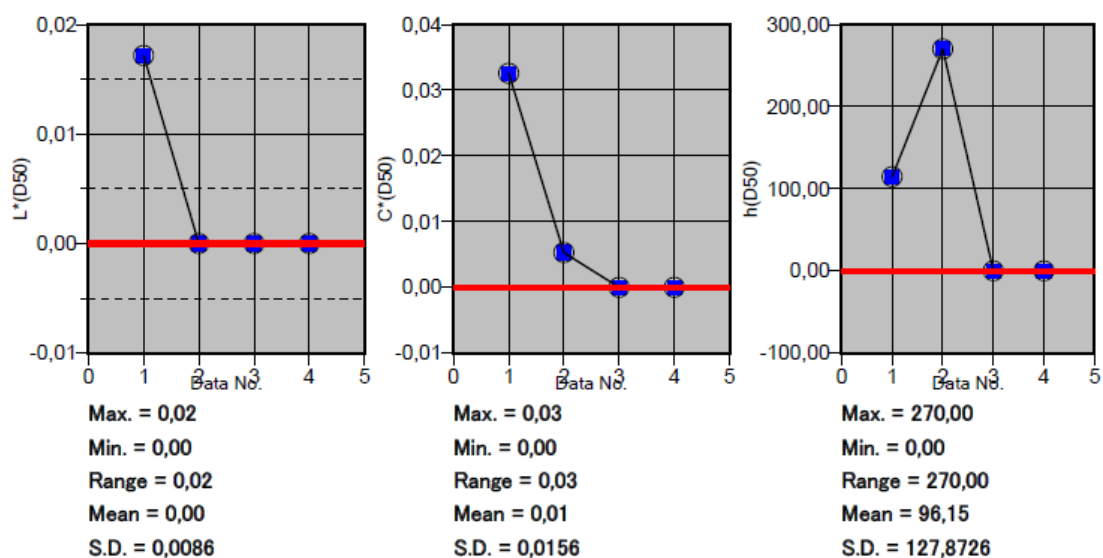
Slika 207 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom
2,0 mm - 2,8 mm

Slika 208 prikazuje transmisijska svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 2,0 mm do 2,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 208 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom
2,0 mm – 2,8 mm

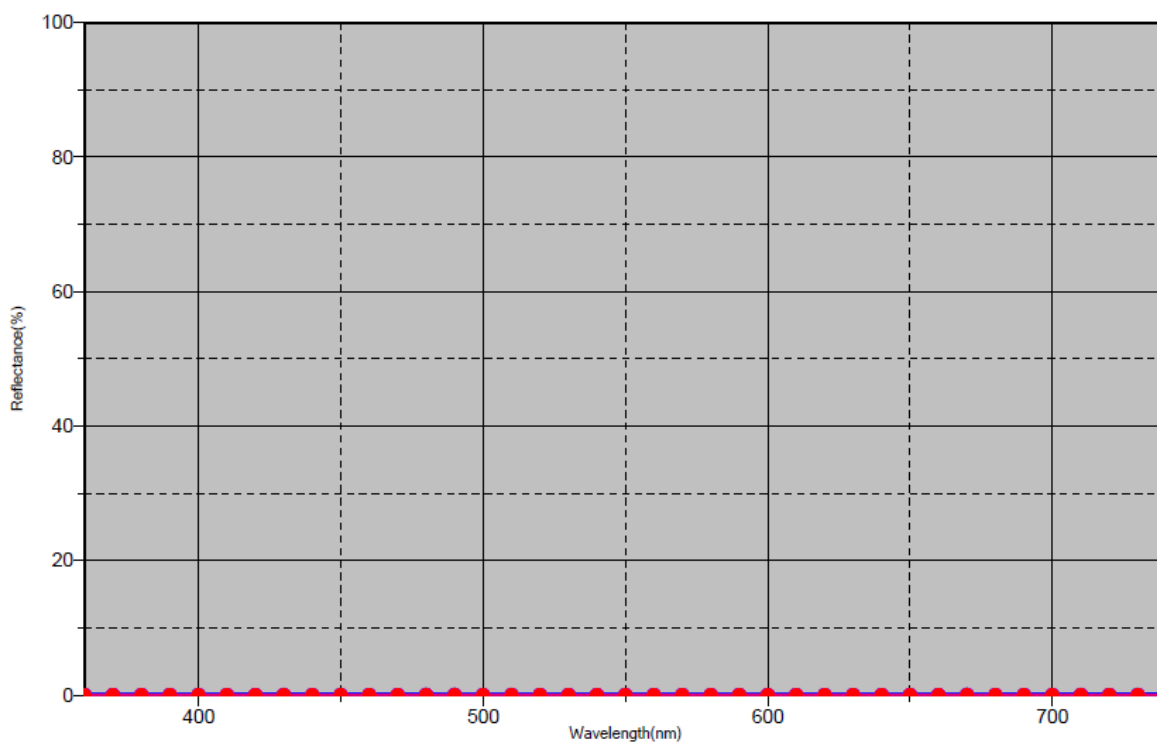
Slika 209 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 2,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 2,2 mm do 2,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 209 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm

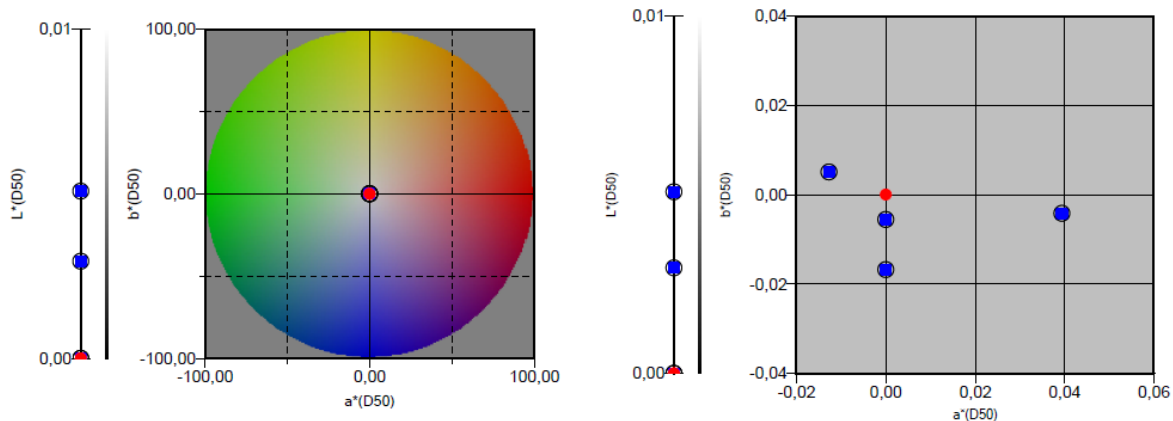
4.2.4.3 Crni ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 210 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



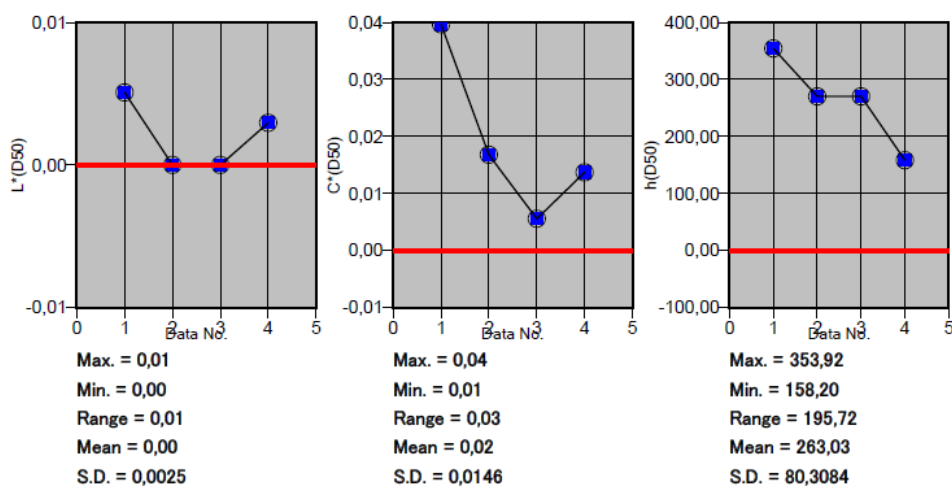
Slika 210 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom
3,0 mm - 3,8 mm

Slika 211 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 3,0 mm do 3,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 211 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom
3,0 mm – 3,8 mm

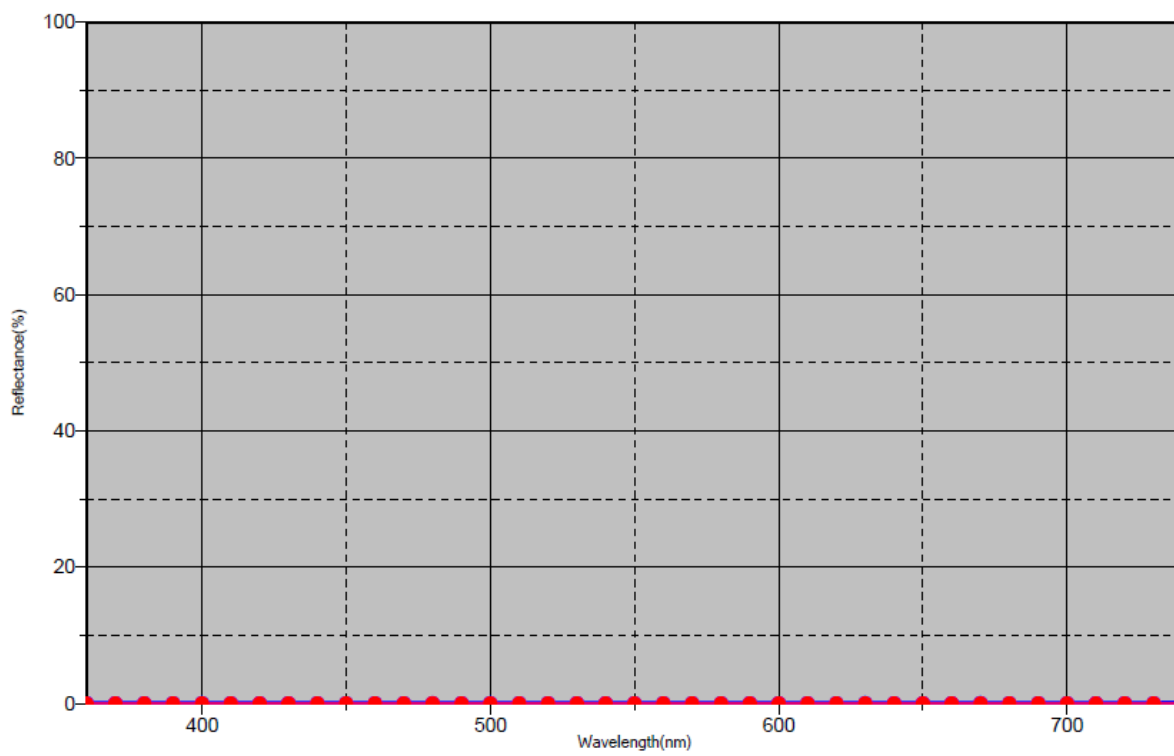
Slika 212 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 3,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 3,2 mm do 3,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijска svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 212 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm

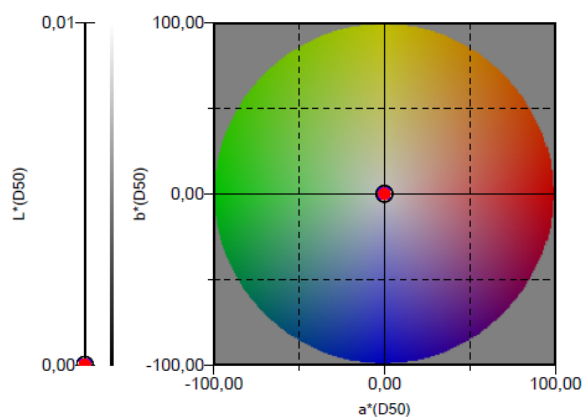
4.2.4.4 Crni ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 213 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



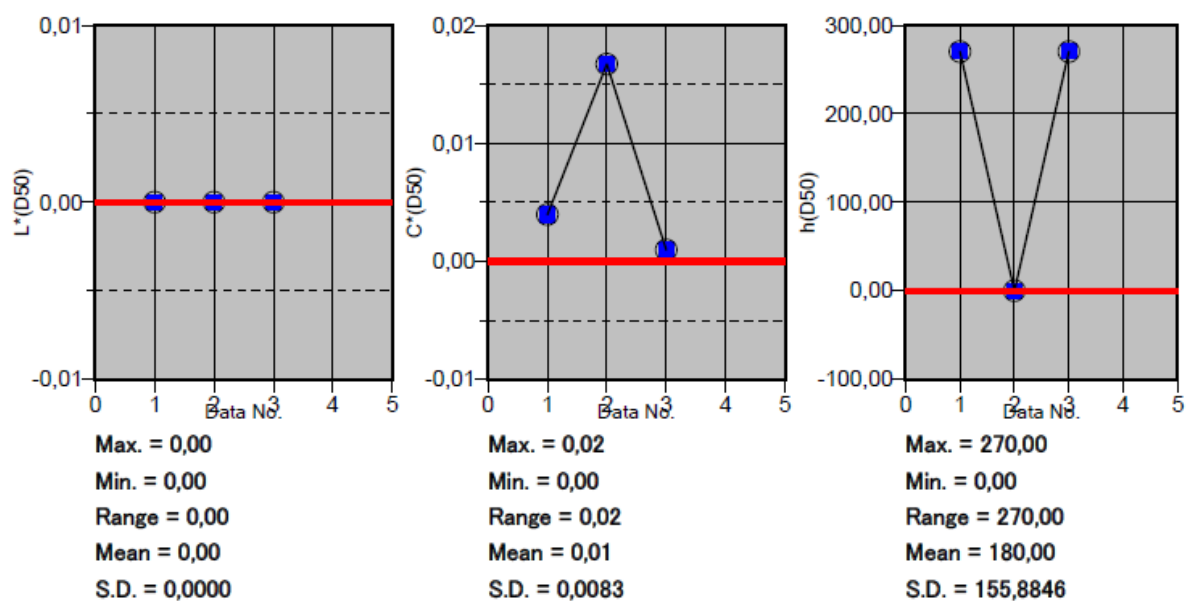
Slika 213 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom
4,0 mm - 4,8 mm

Slika 214 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s crnim bojilom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 4,0 mm do 4,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 214 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojilom
4,0 mm – 4,8 mm

Slika 215 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s crnim bojilom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 4,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 4,2 mm do 4,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 215 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm

4.2.5 Mjerenje propusnosti ispitnih uzoraka s bijelim bojilom

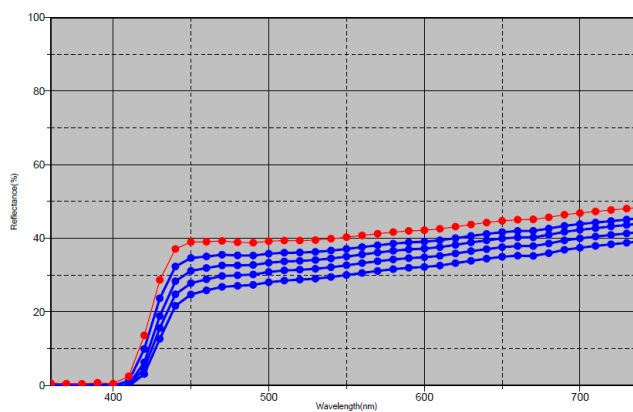
U tablici 19 prikazane su ukupne promjene boje izražene kao vrijednost ΔE_{00} na ispitnim uzorcima s bijelim bojilom. Promjena boje ΔE_{00} prikazuje promjenu između ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm i 4,0 mm s povećanjem debljine za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm.

Tablica 19 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine

	ΔE_{00}			
mm	+ 0.2mm	+ 0.4mm	+ 0.6mm	+ 0.8mm
1	2,21	4,19	6,03	7,93
2	1,51	3,12	4,86	6,69
3	1,33	2,65	4,27	5,5
4	0,76	1,82	2,79	3,09

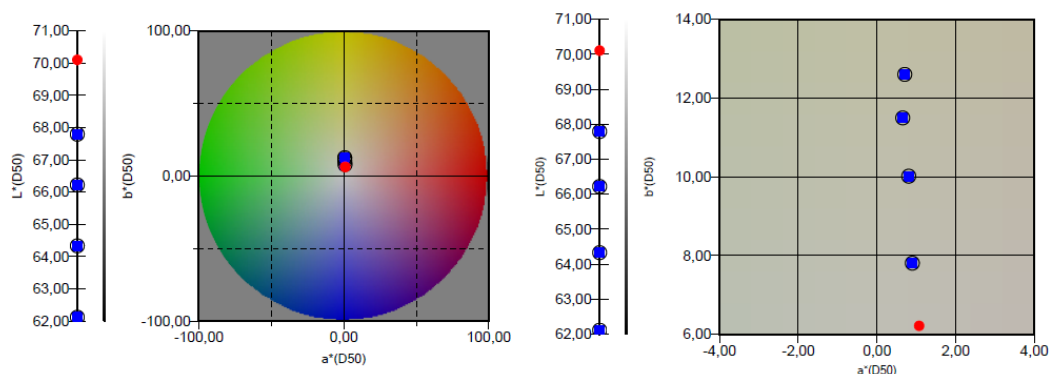
4.2.5.1 Bijeli ispitni uzorak 1 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 216 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojilom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



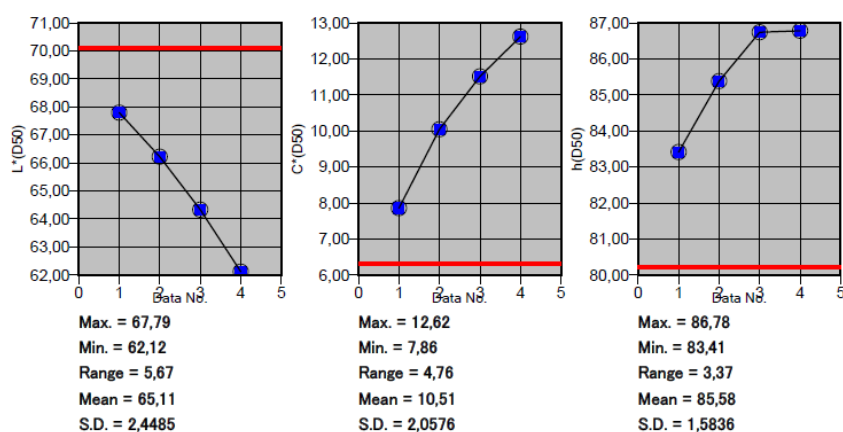
Slika 216 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojilom
1,0 mm - 1,8 mm

Slika 217 prikazuje transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 1,0 mm do 1,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 1 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 217 CIELAB prikaz transmisijiskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом
1,0 mm – 1,8 mm

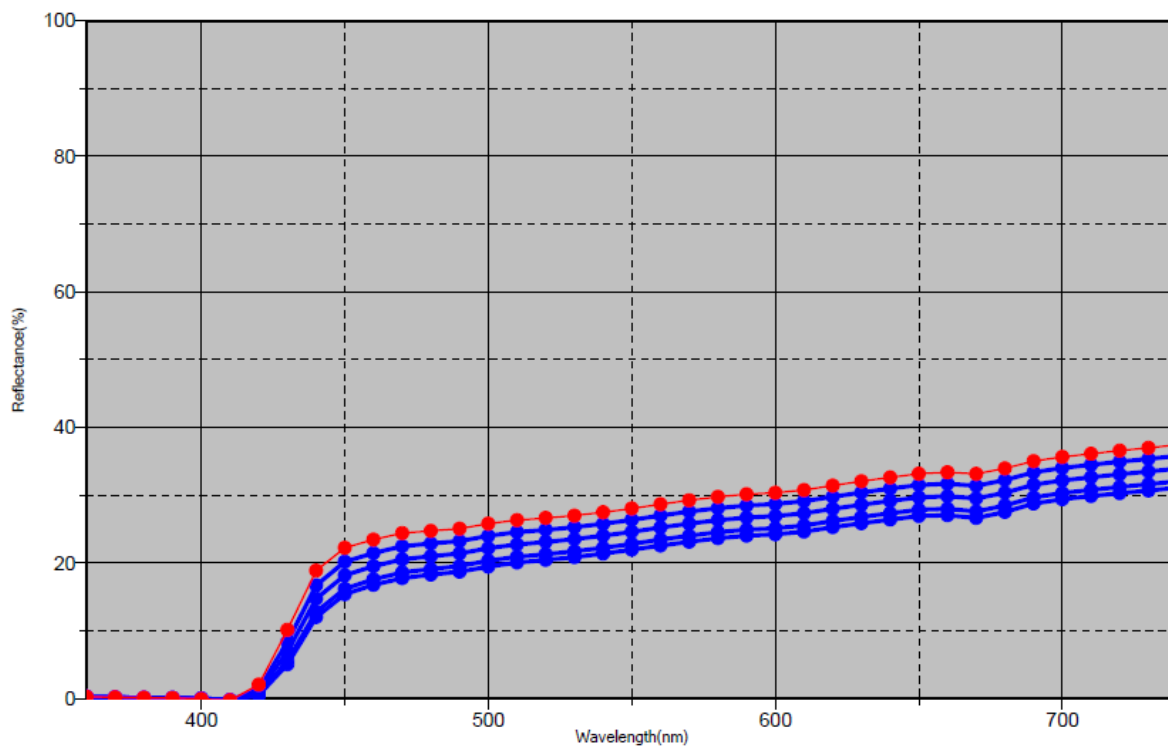
Slika 218 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 1,2 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 218 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka
1,0 mm - 1,8 mm

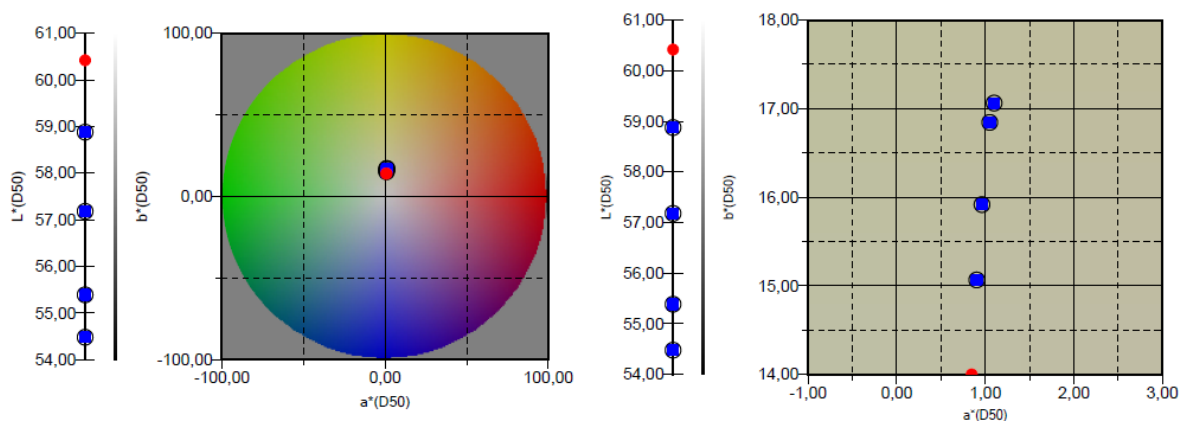
4.2.5.2 Bijeli ispitni uzorak 2 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 219 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



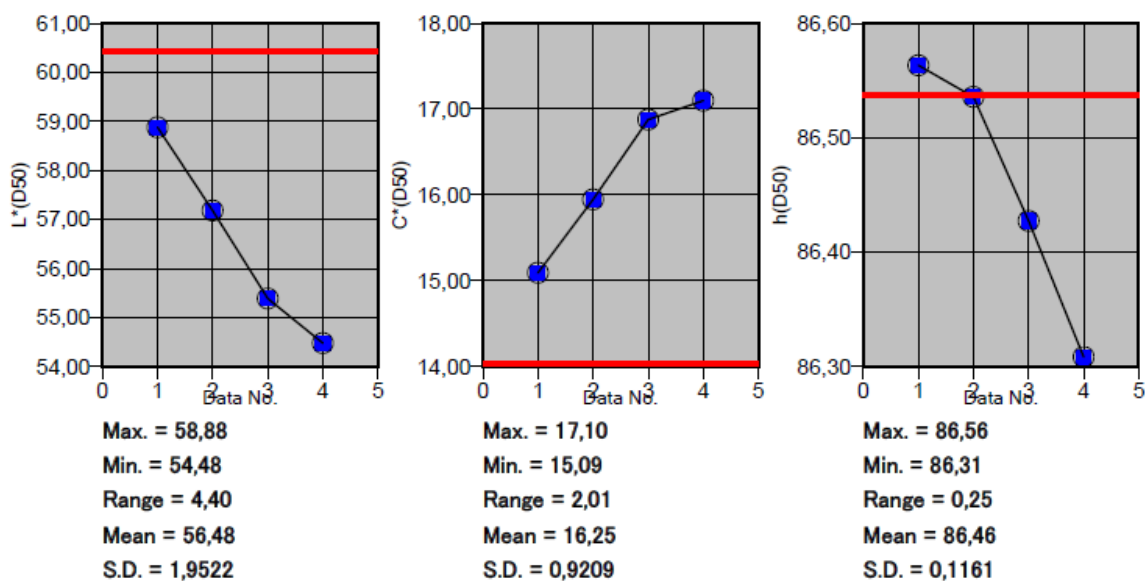
Slika 219 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom
2,0 mm - 2,8 mm

Slika 220 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 2,0 mm do 2,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 2 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 220 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom
2,0 mm – 2,8 mm

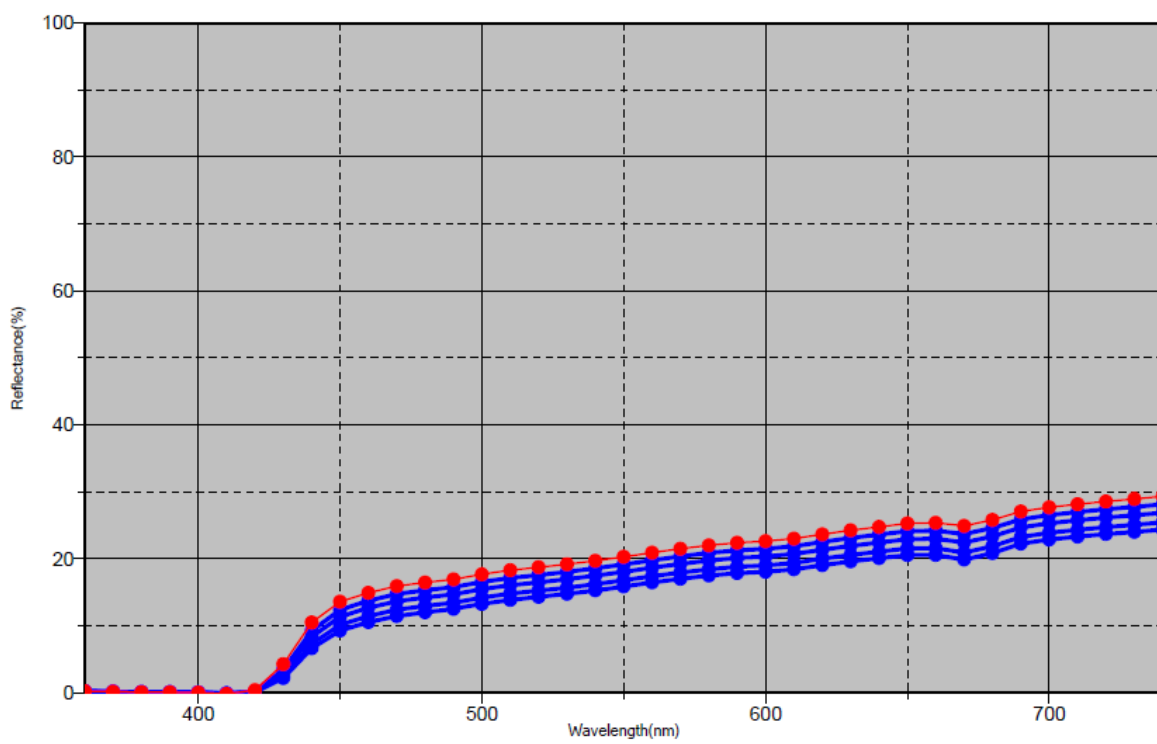
Slika 221 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 2,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 2,2 mm do 2,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijска svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 221 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm

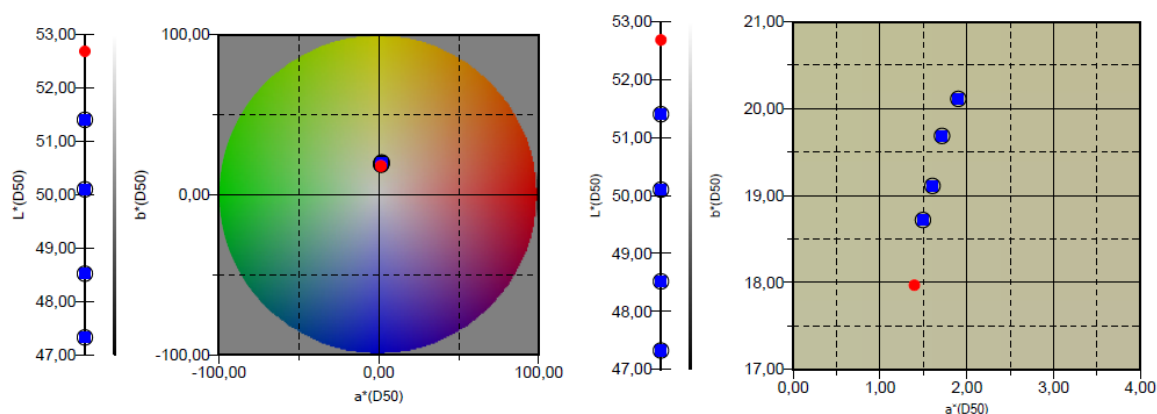
4.2.5.3 Bijeli ispitni uzorak 3 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 222 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



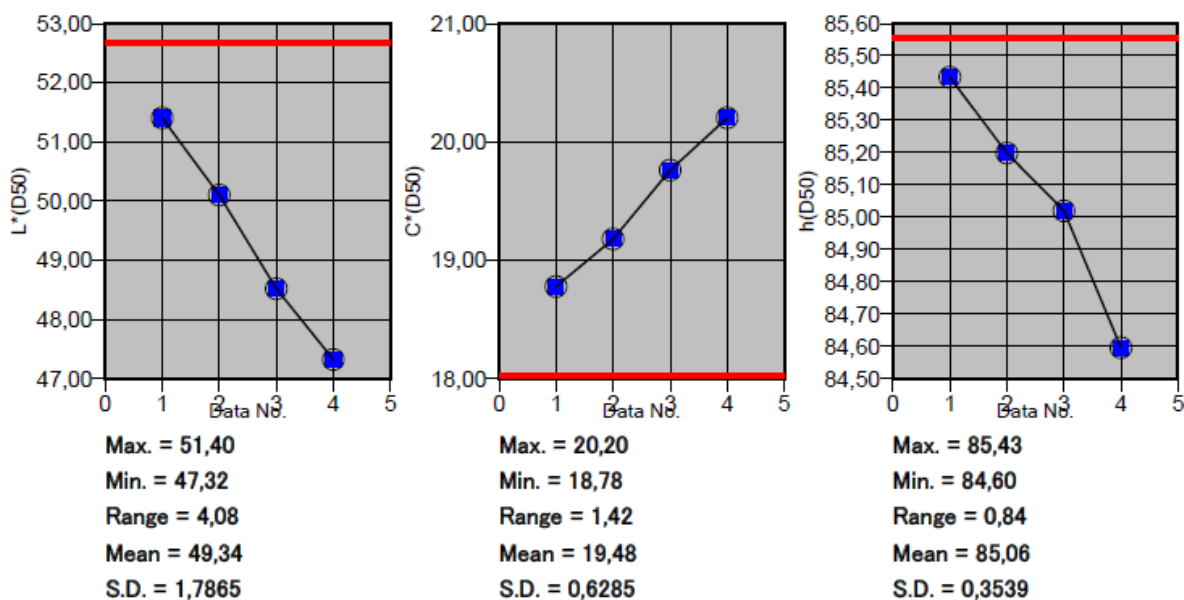
Slika 222 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom
3,0 mm - 3,8 mm

Slika 223 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 3,0 mm do 3,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 3 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 223 CIELAB prikaz transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom
3,0 mm – 3,8 mm

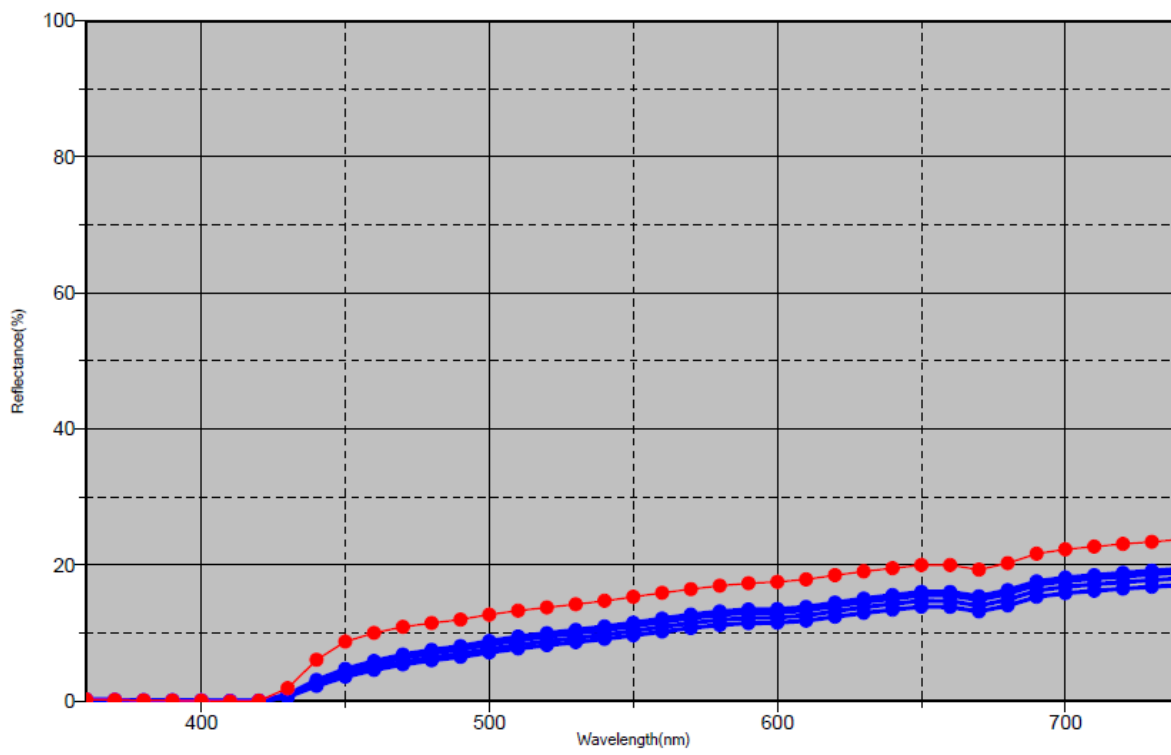
Slika 224 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 3,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 3,2 mm do 3,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmissijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 224 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm

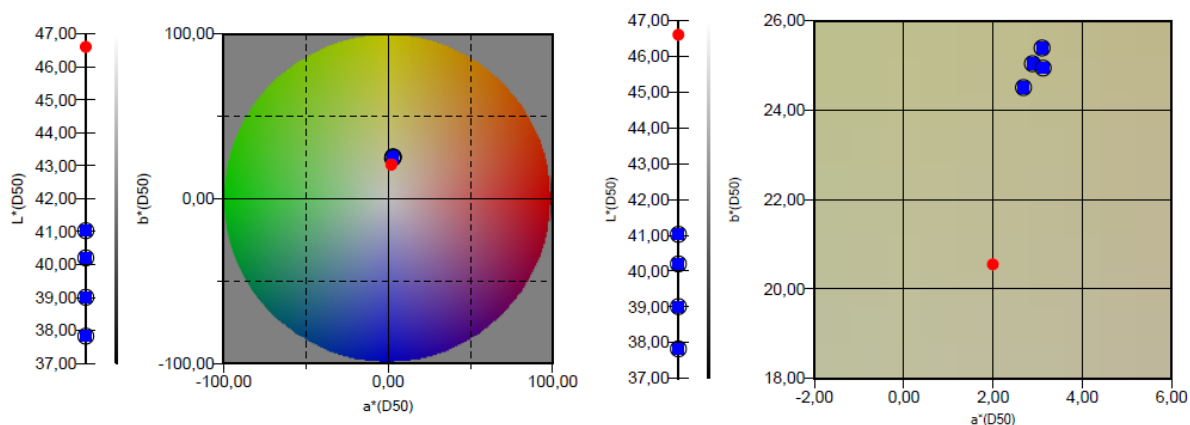
4.2.5.4 Bijeli ispitni uzorak 4 mm s povećanjem od 0.2 mm do 0.8 mm

Slika 225 prikazuje spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom. Crvena krivulja predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave krivulje predstavljaju ostale uzorke.



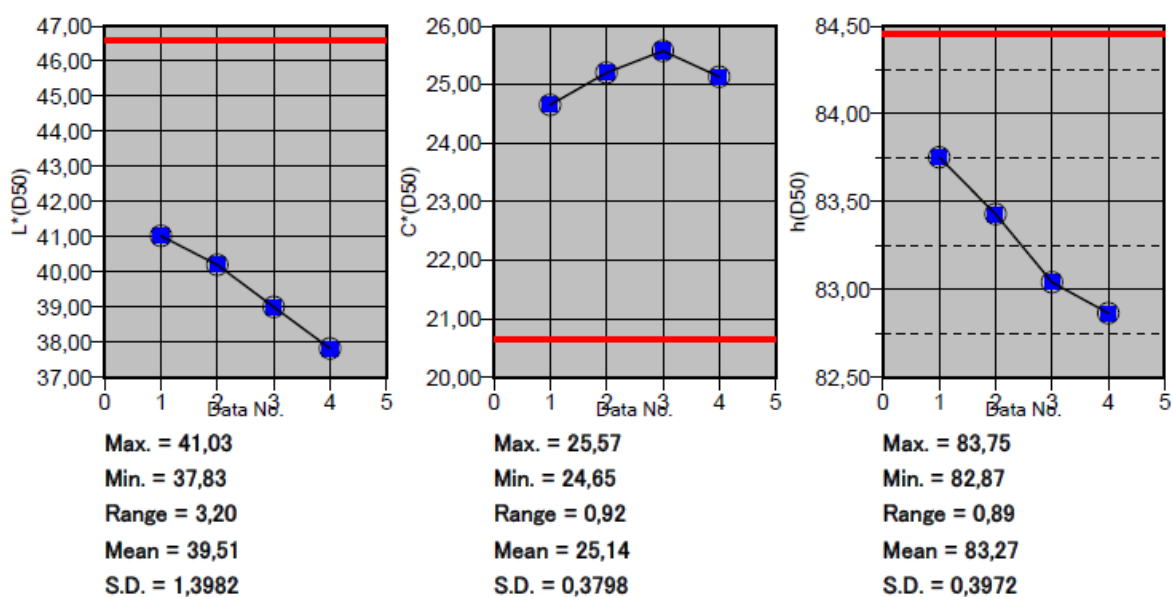
Slika 225 Spektralne krivulje transmissijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom
4,0 mm - 4,8 mm

Slika 226 prikazuje transmissijska svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom prikazanih u CIELAB sustavu boja. Ispitni uzorci su debljine od 4,0 mm do 4,8 mm s korakom povećanja debljine od 0,2 mm. Crvena točka predstavlja uzorak debljine 4 mm, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke ostalih debljina.



Slika 226 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом
4,0 mm – 4,8 mm

Slika 227 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s bijelim bojiлом. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 4,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzorakadebljine od 4,2 mm do 4,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijska svojstva ispitnih uzoraka.



Slika 227 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm

5 Rasprava

Karakteristike ispitnih uzoraka dobivenih stereolitografskim postupkom aditivne proizvodnje su kolorimetrijska svojstva refleksije neprozirnog materijala i propusnosti prozirnih materijala. Posebno su analizirana refleksivna i transmisijiska svojstva svakog ispitnog uzorka. Kolorimetrijske vrijednosti su izmjerene u standardnom prostoru boja CIELAB. Analiza i rezultati su prikazani u standardnom prostoru boja CIELCh radi lakše interpretacije rezultata. Standardni prostor boja CIELCh je interpretacija CIELAB prostora boja. Ukupna promjena boje izražena je kao vrijednost ΔE_{00} . Općenito, što je manja vrijednost ΔE , manja je razlika u ukupnoj promjeni boje. Evaluacija kolorimetrijske razlike odnosno ukupne promjene boje može se podijeliti više različitih segmenata. Ukoliko je $\Delta E_{00} < 1$ tada je odstupanje neprimjetno. Ukoliko je $\Delta E_{00} = 1 - 2$ tada je uočljiva vrlo mala razlika. Ukoliko je $\Delta E_{00} = 2 - 3.5$ uočljiva je srednja razlika. Ukoliko je $\Delta E_{00} = 3.5 - 5$ tada je uočljiva velika razlika. Ukoliko je $\Delta E_{00} > 6$ tada je uočljiva vrlo velika razlika.

CIJAN UZORCI

Na slikama 38 i 41 prikazane su spektralne krivulje ispitnih uzoraka s cijan bojom gdje se vidi da se povećanjem debljine pločice mijenjaju transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka. Slike 39 i 42 prikazuju boju svakog ispitnog uzorka u standardnom sustavu boja CIELAB. Vidljive su promjene svjetline, kromatičnosti i tona u transmisijiskim i refleksijiskim svojstvima ispitnih uzoraka. U transmisijiskim mjerenjima svjetlina, kromatičnost i ton razlikuje se ovisno o debljini ispitnog uzorka, dok je kod refleksijiskog mjerenja ta promjena znatno manja. Svjetlina, kromatičnost i ton svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 40 i 43. Promjene transmisijiskih svojstava puno su izraženije od promjena refleksijiskih svojstava uzoraka što je prikazano u tablici 2 gdje je izražena ukupna promjena boje prikazana pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Ukupna promjena boje ΔE_{00} između najtanjeg i najdebljeg ispitnog uzorka debljine 0,8 mm iznosi 36,81 kod transmisijiskog mjerenja, dok kod refleksijiskog mjerenja ΔE_{00} iznosi 2,61.

Kako bi se detaljnije razumjele promjene boje koje nastaju zbog sušenja uzoraka, izmjerena su transmisijiska i refleksijiska svojstva uzoraka nakon svakog intervala sušenja. U tablici 3

prikazane su vrijednosti ukupne promjene boje za ispitnih uzoraka s cijan bojom za svih osam intervala sušenja. Svakim intervalom sušenja dolazi do promjene boje. Ukupna promjena boje ΔE_{00} nakon završetka svih ciklusa sušenja kod transmisijskih mjerenja kreće se od 1,11 do 2,16. Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod refleksijskog mjerenja kreće se od 1,51 do 1,93.

Na slikama 44 – 63 vidljive su promjene u svjetlini, kromatičnosti i tonu. Svakim intervalom sušenja dolazi do smanjenja svjetline i kromatičnosti te promjene tona. Na slikama je vidljiva razlika između transmisijskih i refleksijskih karakteristika ispitnih uzoraka, a može se primijetiti da do veće promjene boje dolazi kod tanjih uzoraka. Analiziraju transmisijska i reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s cijan bojom može se vidjeti da se sušenjem mijenja svjetlina, uzorci postaju tamniji, smanjuje im se kromatičnost, a smjer promjene tona kreće se prema zelenom području.

MAGENTA UZORCI

Na slikama 64 i 67 prikazane su spektralne krivulje ispitnih uzoraka s magenta bojom gdje je uočljivo da se povećanjem debljine pločice mijenjaju transmisijska svojstva ispitnih uzoraka. Povećanjem debljine ispitnih uzoraka gubi se propusnost vidljivog spektra do 560 nm te ostaje samo crveni dio spektra. U reflektivnom svojstvima uzoraka smanjuje se refleksija u spektru od 620 nm. Slike 65 i 68 prikazuje boju svakog ispitnog uzorka CIELAB sustavu boja. Vidljive su promjene svjetline, kromatičnosti i tona u transmisijskim i refleksijskim mjerenjima ispitnih uzoraka. U transmisijskim mjerenjima svjetlina, kromatičnost i ton razlikuje se ovisno o debljini ispitnog uzorka, dok je kod refleksijskog mjerenja ta promjena znatno manja. Svjetlina, kromatičnost i ton svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 66 i 69. Promjene transmisijskih svojstava puno su izraženije od promjena refleksijskih svojstava uzoraka što je prikazano u tablici 4 gdje je izražena ukupna promjena boje prikazana pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Promjene ΔE_{00} u transmisijskim mjerenjima su u rasponu od 0,5 do 30,39. Promjene ΔE_{00} u refleksijskim mjerenjima se kreću u rasponu od 0,1 do 3,44 te standardnom promatraču nisu vidljive osim kod najtanjih ispitnih uzoraka.

Kako bi se detaljnije razumjele promjene boje koje nastaju zbog sušenja uzoraka, izmjerena su transmisijiska i refleksijska svojstva uzoraka nakon svakog intervala sušenja. U tablici 5 i 6 prikazane su vrijednosti ukupne promjene boje za ispitnih uzoraka s magenta bojilom za svih osam intervala sušenja. Svakim intervalom sušenja dolazi do promjene boje. Najveća promjena boje zabilježena je nakon prvog intervala sušenja, a nakon toga se ujednačeno povećava. Ukupna promjena boje ΔE_{00} nakon završetka svih ciklusa sušenja kod transmisijiskih mjerenja kreće se od 0,85 do 1,21. Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod refleksijskog mjerenja kreće se od 0,84 do 1,37.

Na slikama 70 – 89 vidljive su promjene u svjetlini, kromatičnosti i tonu. Svakim intervalom sušenja dolazi do smanjenja svjetline i kromatičnosti te promjene tona. Na slikama je vidljiva razlika između transmisijiskih i refleksijskih karakteristika ispitnih uzoraka, a može se primijetiti da do veće promjene boje dolazi kod tanjih uzoraka. Analizirajući kolorimetrijske podatke ispitnih uzoraka s magenta bojilom može se zaključiti da se uzorci sušenjem gube svjetlinu odnosno da postaju tamniji, gube kromatičnost, a smjer promjene tona kreće se prema crvenom području.

ŽUTI UZORCI

Na slikama 90 i 93 prikazane su spektralne krivulje ispitnih uzoraka s žutim bojilom gdje je uočljivo da se povećanjem debljine pločice mijenjaju transmisijiska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka. Slike 91 i 94 prikazuje boju svakog ispitnog uzorka CIELAB sustavu boja. Vidljive su promjene svjetline, kromatičnosti i tona u transmisijiskim i refleksijskim mjerenjima ispitnih uzoraka. U transmisijiskim mjerenjima svjetlina, kromatičnost i ton razlikuje se ovisno o debljini ispitnog uzorka, dok je kod refleksijskog mjerenja ta promjena znatno manja. Svjetlina, kromatičnost i ton svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 92 i 95. Promjene transmisijiskih svojstava puno su izraženije od promjena refleksijskih svojstava uzoraka što je prikazano u tablici 7 gdje je izražena ukupna promjena boje prikazana pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Vrijednost ΔE_{00} se kreće u rasponu od 0,69 do 28,91 kod transmisijiskih svojstava, a kod refleksijskih svojstava ΔE_{00} se kreće u rasponu od 0,12 do 8,85. Promjene ΔE_{00} kod transmisijiskim i refleksijskim svojstava su veće nego kod ispitnih uzoraka s cijan i magenta bojilom pa su vidljive promatračima čak i kod debljih uzoraka.

Kako bi se detaljnije razumjele promjene boje koje nastaju zbog sušenja uzoraka, izmjerena su transmisijiska i refleksijska svojstva uzoraka nakon svakog intervala sušenja. U tablici 8 i 9 prikazane su vrijednosti ukupne promjene boje za ispitnih uzoraka s žutim bojilom za svih osam intervala sušenja. Svakim intervalom sušenja dolazi do promjene boje, ali ukupna promjena boje tijekom cijelog ciklusa sušenja nije dovoljno velika da bi ljudsko oko registriralo razliku. Najveća promjena boje zabilježena je nakon prvog intervala sušenja, a nakon toga se umjereno povećava. Ukupna promjena boje ΔE_{00} nakon završetka sušenja kod transmisijiskih mjerenja kreće se od 0,85 do 1,21. Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod refleksijskog mjerenja kreće se od 0,84 do 1,37.

Na slikama 96 –115 vidljive su promjene u svjetlini, kromatičnosti i tonu. Svakim intervalom sušenja dolazi do smanjenja svjetline i kromatičnosti te promjene tona. Na slikama je vidljiva razlika između transmisijiskih i refleksijskih karakteristika ispitnih uzoraka, a može se primijetiti da do promjene boje dolazi kod skoro svih uzoraka. Analizirajući kolorimetrijske podatke ispitnih uzoraka s žutom bojilom može se zaključiti da se uzorci sušenjem gube svjetlinu odnosno da postaju tamniji i gube kromatičnost, a smjer promjene tona kreće se prema narančastom području.

CRNI UZORCI

Na slikama 116 i 119 prikazane su spektralne krivulje ispitnih uzoraka s crnim bojilom gdje je uočljivo da se povećanjem debljine pločice mijenjaju transmisijiska i refleksijska svojstva ispitnih uzoraka. Slike 117 i 120 prikazuje boju svakog ispitnog uzorka CIELAB sustavu boja. Promjene svjetline, kromatičnosti i tona u transmisijiskim i refleksijskim mjerenjima ispitnih uzoraka su vrlo male. Najveća promjena je kod vrlo tankih uzoraka. Svjetlina, kromatičnost i ton svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 118 i 121. Promjene transmisijiskih i refleksijskih svojstava uzoraka su vrlo male, a prikazane su u tablici 10, gdje je izražena ukupna promjena boje prikazana pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Promjene ΔE_{00} kod transmisijiskim i refleksijskim svojstava su znatno manje nego kod uzoraka s dodatkom drugih bojila. Vrijednost ΔE_{00} se kreće od 0,03 do 8,55 kod transmisijiskog mjerenja, dok se ΔE_{00} kreće od 0,12 do 0,76 kod refleksijskog mjerenja.

Kako bi se detaljnije razumjele promjene boje koje nastaju zbog sušenja uzoraka, izmjerena su transmisijiska i refleksijska svojstva uzoraka nakon svakog intervala sušenja. U tablici 11 i 12 prikazane su vrijednosti ukupne promjene boje za ispitnih uzoraka s crnim bojom za svih osam intervala sušenja. Svakim intervalom sušenja dolazi do promjene boje, ali ukupna promjena boje tijekom cijelog ciklusa sušenja je vrlo mala, najmanja u odnosu na ostale ispitnih uzoraka s drugim bojama. Najveća promjena boje zabilježena je nakon prvog intervala sušenja, a nakon toga se vrlo malo povećava. Ukupna promjena boje ΔE_{00} nakon završetka sušenja kod transmisijiskih mjerenja kreće se od 0,0 do 0,21. Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod refleksijskog mjerenja kreće se od 0,05 do 0,12.

Na slikama 122 –141 vidljive su promjene u svjetlini, kromatičnosti i tonu. Svakim intervalom sušenja dolazi do smanjenja svjetline i kromatičnosti te promjene tona. Na slikama je vidljiva razlika između transmisijiskih i refleksijskih karakteristika ispitnih uzoraka, a može se primijetiti da do promjene boje dolazi kod skoro svih uzoraka. Analizirajući kolorimetrijske podatke ispitnih uzoraka s crnim bojom može se zaključiti da se uzorci sušenjem imaju vrlo malo promjenu koja je zanemariva.

BIJELI UZORCI

Na slikama 142 i 145 prikazane su spektralne krivulje ispitnih uzoraka s bijelim bojom gdje se vidi da se povećanjem debljine pločice mijenjaju transmisijiska svojstva ispitnih uzoraka. Slike 143 i 146 prikazuje boju svakog ispitnog uzorka CIELAB sustavu boja. Vidljive su promjene svjetline, kromatičnosti i tona u transmisijiskim i refleksijskim mjerenjima ispitnih uzoraka. Kod transmisijiskim svojstava svjetlina, kromatičnost i ton razlikuje se ovisno o debljini ispitnog uzorka, a refleksijskog svojstva imaju manju promjenu. Svjetlina, kromatičnost i ton svih ispitnih uzoraka prikazana je na slici 144 i 147. Promjene transmisijiskih svojstava izraženije su od promjena refleksijskih svojstava uzoraka što je prikazano u tablici 13 gdje je izražena ukupna promjena boje prikazana pomoću vrijednosti ΔE_{00} . Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod transmisijiskog mjerenja se kreće u rasponu od 0,41 do 36,06, dok se kod refleksijskog mjerenja ΔE_{00} kreće u rasponu od 0,41 do 9,34.

Kako bi se detaljnije razumjele promjene boje koje nastaju zbog sušenja uzoraka, izmjerena su transmisijiska i refleksijska svojstva uzoraka nakon svakog intervala sušenja. U tablici 14 i 15 prikazane su vrijednosti ukupne promjene boje za ispitnih uzoraka s bijelim bojom za svih osam intervala sušenja. Svakim intervalom sušenja dolazi do promjene boje, a uočljive promjene boja pojavljuju se nakon više intervala sušenja. Ispitnih uzoraka s bijelim bojom imaju najizraženiju ukupnu promjenu boje ΔE_{00} , a razlika je standardnom promatraču vidljiva. Ukupna promjena boje ΔE_{00} nakon završetka sušenja kod transmisijiskih mjerenja kreće se od 2,05 do 4,04. Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod refleksijskog mjerenja kreće se od 2,78 do 3,96.

Na slikama 148 – 167 vidljive su promjene u svjetlini, kromatičnosti i tonu. Svakim intervalom sušenja dolazi do smanjenja svjetline i kromatičnosti te promjene tona. Na slikama je vidljiva razlika između transmisijiskih i refleksijskih karakteristika ispitnih uzoraka, a može se primijetiti da do veće promjene boje dolazi kod svih ispitnih uzoraka. Analiziraju transmisijiska i reflektivna svojstva ispitnih uzoraka s bijelim bojom može se vidjeti da se sušenjem mijenja svjetlina, uzorci postaju tamniji, povećava se kromatičnost, a smjer promjene tona kreće se prema žutom području. Ispitni uzorci s bijelim bojom jedini imaju karakteristiku da im se sušenjem povećava kromatičnost, zahvaljujući promjeni smjera tona koji se kreće prema žutom području.

UTJECAJ DEBLJINE NA PROMJENU KOLORIMETRIJSKIH SVOJSTAVA

Nakon što su napravljeni eksperimenti kako sušenje uzoraka utječe na promjenu boje i boljim poznavanjem kolorimetrijskih karakteristika materijala moguće je napraviti i optimizaciju debljina stjenki prilikom aditivne proizvodnje. Usporedivši uzorke sličnih kolorimetrijskih karakteristika i različite debljine moguće je definirati više debljina stjenki i zadržavanjem istih kolorimetrijskih karakteristika.

Kao i kod ispitnih uzoraka s ostalim bojilima, za ispitne uzorke s cijan bojom temeljni ispitni uzorci su debljine 1 mm, 2 mm, 3 mm i 4 mm. Usporedivši njihove kolorimetrijske karakteristike prikazanim na slikama od 168 do 179 s debljim uzorcima za 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm i 0,8 mm dobivaju se vrijednosti ukupne promjene boje prikazanih kao vrijednost

ΔE_{00} u tablici 16. Vrijednost ΔE_{00} kreće se u rasponu od 1,01 do 12,53, a iz čega je vidljivo da je u većini slučajeva promjena boje uočljiva standardnom promatraču. Kod ispitnih uzoraka od 3 mm i 4 mm, nema vidljive promjene boje s uzorcima debljim za 0,2 mm. To znači da se debljina stjenki iznad 3,2 mm može umanjiti za 0,2 mm, a da se zadrže slične kolorimetrijske karakteristike.

Kod ispitnih pločica s magenta bojilom ukupna promjena boje ΔE_{00} prikazana je u tablici 17. Vrijednost ΔE_{00} kreće se u rasponu od 0,62 do 11,86. Iz tablice je vidljivo da su pločice 1 mm i 2 mm osjetljive na promjenu debljine te je već kod prvog povećanja debljine od 0,2 mm vidljiva velika promjena boje. Kod uzoraka debljine 3 mm i 4 mm moguće je postići određeni stupanj optimizacije, odnosno koristiti debljinu stjenki umanjenju za 0,4 mm do 0,6 mm bez vidljivih promjena boje. Na slikama od 180 do 191 prikazane su spektralne krivulje uzoraka te CIELAB i CIELCh vrijednosti ispitnih uzoraka. Iz prostora boja CIELCh je vidljivo da svjetlina, kromatičnost i ton ispitnih pločica najveće promjene nastaju u promjeni tona i svjetline, dok je promjena kromatičnosti vrlo mala.

Vrijednosti ukupne promjene boje ΔE_{00} kod ispitnih uzoraka s žutim bojilom prikazane su u tablici 18. Ukupna promjena boja ΔE_{00} vidljiva je kod svih uzoraka te se kreće u rasponu od 1,17 do 5,84. Specifičnost ispitnih uzoraka s žutim obojenjem je u tome što je na svim ispitnim uzorcima debljine 1 mm, 2 mm, 3 mm i 4 mm moguće smanjiti debljinu stjenki za 0,2 mm dok je kod uzoraka s magenta i cijan obojenjem to bilo moguće samo na debljim uzorcima. Na slikama od 192 do 203 prikazane su spektralne krivulje, CIELAB prikaz i prikaz svjetline, kromatičnosti i tona žutih uzoraka. Kod ispitnih uzoraka debljine 1 mm i 2 mm najveća je promjena svjetline, zatim kromatičnosti tj. zasićenje dok je ton vrlo malo promijenjen. Kod uzoraka debljine 3 mm i 4 mm najveća je promjena kromatičnosti, a zatim svjetline.

Ukupna promjena boje ΔE_{00} kod ispitnih uzoraka s crnim obojenjem prikazana je u tablici 19. Vrijednost ΔE_{00} kreće se u rasponu od 0,0 do 3,92. U tablici je prikazano da promjenom debljine ispitnih uzoraka ne dolazi do vidljive promjene boja osim kod najtanjeg ispitnog uzorka debljine 1 mm. Razlog zbog kojeg je ovo moguće su karakteristike ispitnih pločica da imaju vrlo malu prozirnost materijala. Na slikama 205 do 215 prikazane su spektralne

krivulje, CIELAB prikaz i prikaz svjetline, kromatičnosti i tona. Ispitni uzorci s crnim obojenjem znatno se razlikuju od ispitnih uzoraka s drugim bojilima. Uzorci imaju vrlo mala svojstva propusnosti i promjenu boje bi trebalo promatrati kao refleksiju neprozirnog materijala. Promjene vrijednost svjetline, kromatičnosti i tona su izrazito male. Zbog vrlo niske vrijednosti svjetline i samih promjena boje ispitnih pločica s crnim obojenjem moguće je stanjiti debljinu stjenke, ali zbog svojih kolorimetrijskih karakteristika uzorak nema veliku prozirnost.

Kod ispitnih uzoraka s bijelim bojilom ukupna promjena boje ΔE_{00} prikazana je u tablici 20. Vrijednost ΔE_{00} kreće se u rasponu od 0,76 do 7,93. Iz prikazanih vrijednosti ΔE_{00} vidljivo je da na uzorcima debljim od 2 mm moguće dodati ili smanjiti debljinu za 0,2 mm – 0,4 mm bez da bi došlo do vidljivih promjena boje. Na slikama 216 do 228 prikazane su spektralne krivulje, CIELAB prikaz i prikaz svjetline, kromatičnosti i tona, odnosno njihove promjene. Kod ispitnih pločica od 1 mm i 2mm vidljivo je da najveća promjena nastaje u svjetlini i kromatičnosti. Na uzorcima debljine 3 mm i 4 mm najveća promjena nastaje u svjetlini, a kromatičnost i ton imaju vrlo male promjene. Zbog svojih karakteristika propusnosti materijala, povećanjem ili smanjivanjem debljine veće od 0,2 mm promjene boje su vidljive. Na slikama je vidljiva i promjena tona, povećanjem debljine uzoraka, smjer promjene tona je prema žutoj boji.

6 Zaključak

Aditivne tehnologije proizvodnje su relativno nova tehnologija, a njihova primjena se svakodnevno širi. U grafičkoj industriji kao i u drugim industrijama vrlo je poželjno, a ponekad i neophodno poznavanje karakteristika materijala, pogotovo prilikom novih primjena i aplikacija. Stereolitografska tehnologija aditivne proizvodnje prva je komercijalno dostupna tehnologija ali i danas ima vrlo veliku primjenu. Karakteristike ove tehnologije je poveznica i sličnosti s gotovim proizvodima dobivenim tradicionalnim načinom proizvodnje polimera, kao što je injekcijsko prešanje. Tehnologija se odlikuje mogućnosti izrade sitnih detalja te ima vrlo glatku površinu stvorenog 3D otiska. Dimenzijska točnost je vrlo precizna što omogućuje izradu sitnih detalja. Stereolitografski postupak je primjenjiv u cijelom razvojnem ciklusu proizvoda, od prvih prototipova do završnog gotovog proizvoda. Pri tome, vizualno, osim izgleda i dizajna u stereolitografskom postupku proizvodnje veliki značaj ima i boja.

Kako bi se mogle iskoristiti prednosti 3D tiska u boji, potrebno je poznavati kolorimetrijske karakteristike i njihovu promjenu tijekom životnog vijeka proizvoda. Stereolitografija kao materijal koristi tekući fotopolimer kojemu je moguće pridodati bojilo kako bi se mogla dobiti željena boja. Velika prednost stereolitografskog aditivnog postupka su svojstva materijala: refleksivna svojstva neprozirnih materijala kao i transmisijiska svojstva prozirnog materijala.

Provedenim mjerenjima definirana su kolorimetrijska svojstva ispitnih uzoraka te njihove promjene nastale utjecajem sušenja. Istražen je smjer promjene boje, koji je specifičan za svaku skupinu ispitnih uzoraka i bojila. Također je prikazano koliko debljina utječe na promjenu boje.

Potvrđena je hipoteza da promjena debljine materijala u postupku stereolitografske aditivne proizvodnje utječe na kolorimetrijska svojstva 3D otiska. Ispitni uzorci imaju vrlo velike promjene boje kada se gledaju transmisijiska svojstva uzoraka. Ukoliko se promatraju refleksijiska svojstva uzoraka, uočljiva promjena je kod tanjih materijala dok deblji uzorci imaju puno manju promjenu boje. Svaka kombinacija temeljnog fotopolimera i bojila ima drugačije kolorimetrijske karakteristike, ali općenito gledamo vrijednosti promjene boje

najveće promjene događaju se kod tanjih uzoraka gdje maksimalni $\Delta E_{00} = 36,81$ kod transmisije, te maksimalni $\Delta E_{00} = 9,34$ kod refleksije.

Istražen je učinak sušenja 3D otiska na kolorimetrijska svojstva. Sušenjem se mijenjaju kolorimetrijska svojstva, najveće promjene primjećuju se nakon prvih intervala sušenja. Općenito je promatrajući rezultate mjerenja vidljivo da se smanjuje svjetlina i zasićenje odnosno kromatičnost. Smjer promjene tona ovisi o bojilu. Analizirajući transmisijske i refleksijske karakteristike ispitnih uzoraka, promjene boje koje se događaju najuočljivije su kod najtanjih uzoraka. Uspoređujući ukupnu promjenu boje ispitnih uzoraka s žutim, cijan i magenta bojilom vidljivo je da najveću promjenu imaju uzorci s cijan bojilom (ΔE_{00} transmisija = 3,57, ΔE_{00} refleksija = 2,06), zatim s žutim bojilom (ΔE_{00} transmisija = 1,50, ΔE_{00} refleksija = 1,22), a najmanju promjenu imaju uzorci s magenta bojilom (ΔE_{00} transmisija = 1,21, ΔE_{00} refleksija = 1,37). Analizirajući sve uzorke komparativno, dodatno s crnim i bijelim bojilom, ukupna promjena boje najmanja je kod crnog bojila (ΔE_{00} transmisija = 0,21, ΔE_{00} refleksija = 0,15), dok su najveće promjene gledaju transmisiju i refleksiju kod ispitnih uzoraka s bijelim bojilom (ΔE_{00} transmisija = 4,04, ΔE_{00} refleksija = 3,96). Smjer promjene boje utvrđen je za svaku skupinu ispitnih uzoraka s bojilima. Najmanje ukupne promjene boje imaju ispitni uzorci s crnim bojilom, gdje vrijednost ΔE_{00} ne prelazi vrijednost od 0,15 što je zanemariva promjena. Ukupna promjena boje s vrijednosti ΔE_{00} većom od 4 dobivena je kod uzoraka s bijelim bojilom.

Dobiveni rezultati upućuju na mogućnost optimizacije stereolitografskog postupka aditivne proizvodnje smanjenjem debljine stjenki uz zadržavanje transmisijskih kolorimetrijskih svojstava ispitnih uzoraka. Kod ispitnih uzoraka debljine 3 mm i 4 mm s cijan bojilom moguće je smanjiti debljinu stjenke za 0,2 mm bez vidljivih promjena boje (maksimalni $\Delta E_{00} = 1,38$). Kod ispitnih uzoraka debljine 3 mm i 4 mm s magenta bojilom moguće promijeniti debljinu stjenke za 0,6 mm uz maksimalni $\Delta E_{00} = 1,99$. Kod ispitnih uzoraka debljine 1 mm, 2 mm, 3 mm i 4 mm s dodatkom žutog bojila moguće je promijeniti debljinu stjenke za 0,2 mm uz maksimalni $\Delta E_{00} = 1,52$. Kod ispitnih uzoraka debljine 2 mm, 3 mm i 4 mm s dodatkom crnog bojila moguće je promijeniti debljinu stjenke za 0,8 mm s maksimalnim $\Delta E_{00} = 0,06$. Kod ispitnih uzoraka debljine 2 mm, 3 mm i 4 mm s dodatkom bijelog bojila moguće je promijeniti debljinu stjenke do 0,4 mm uz maksimalni $\Delta E_{00} = 1,82$. Pri tome

smanjenje debljine stjenki moguće je u rasponu od 0,2 mm do 0,8 mm (5% - 40%) zadržavajući transmisijska kolorimetrijska svojstva.

Kroz istraživanje su dokazane hipoteze da promjena debljine materijala u postupku stereolitografske aditivne proizvodnje utječe na kolorimetrijska svojstva 3D tiska, da se promjenom trajanja UV zračenja mijenjaju kolorimetrijska svojstva 3D otiska, te da je moguće postići željena kolorimetrijska i optička svojstva proizvoda definiranjem optimalnih vrijednosti debljine materijala i UV zračenja. Ostvaren je znanstveni doprinos kroz definiranje minimalne debljine materijala za postizanje kolorimetrijskih svojstava 3D otisaka, utvrđivanjem razlike refleksijskih i kolorimetrijskih karakteristika 3D otisaka te utvrđivanjem korelacije vremenskog intervala UV zračenja i smjera promjene tona boja.

Daljnja istraživanja mogu se usmjeriti prema izradi matematičkog modela za predviđanje promjene smjera boje, određivanju vijeka trajanja proizvoda s željenim kolorimetrijskim karakteristikama i analiziranju utjecaja kratkoročnog i dugoročnog starenja na kolorimetrijska svojstva 3D otiska.

7 Literatura

- [1] H. Kodama, “Background of my invention of 3D printer and its spread,” *Pat. Mag. Japan Pat. Atty. Assoc.*, vol. 67, no. 13, pp. 109–118, 2014.
- [2] H. Kodama, “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 52, no. 1170–1173, 1981.
- [3] J.-C. Andre, A. Le Mehaute, and O. De Witte, “Device for producing a model of an industrial part,” 1984.
- [4] C. W. Hull, “Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereo Thography,” *Patent*, no. 19, p. 16, 1984, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4575330>.
- [5] J. J. Beaman and C. R. Deckard, “Selective Laser Sintering With Assisted Powder Handling,” *Google Patents*, no. 19, p. 17, 1990, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4938816A/en%0Ahttps://patentimages.storage.googleapis.com/bf/cb/03/4cbcb828f78e25/US4938816.pdf>.
- [6] D. L. Bourell, H. L. Marcus, J. W. Barlow, J. J. Beaman, and C. R. Deckard, “Multiple material systems for selective beam sintering,” *United States Pat. Trademark Off.*, vol. I, no. II, 1990, [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US4944817>.
- [7] C. Deckard, “SLS Patent,” no. 19, 1986, [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4863538>.
- [8] S. S. Crump, “Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects,” 1989.
- [9] R. Jones *et al.*, “Reprap - The replicating rapid prototyper,” *Robotica*, vol. 29, no. 1 SPEC. ISSUE, pp. 177–191, 2011, doi: 10.1017/S026357471000069X.
- [10] John Hornick, *3D Printing Will Rock the World.* .
- [11] M. Lipson, Hod, Kurman, *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons, 2013.

- [12] P. J. Bártolo, *Stereolithography - Materials, Processes and Applications*. 2011.
- [13] “ASTM Standard F2792-12a. Standard terminology for additive manufacturing technologies ASTM International, West Conshohocken.” .
- [14] P. J. Bartolo and I. Gibson, “History of Stereolithographic Processes,” *Compr. Mater. Process.*, vol. 10, pp. 19–67, 2014, doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3.
- [15] R. Pandey, “Photopolymers in 3D printing applications,” *Arcada*, p. 51, 2014.
- [16] S. Mansour, M. Gilbert, and R. Hague, “A study of the impact of short-term ageing on the mechanical properties of a stereolithography resin,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 447, no. 1–2, pp. 277–284, 2007, doi: 10.1016/j.msea.2006.10.007.
- [17] K. Puebla, K. Arcaute, R. Quintana, and R. B. Wicker, “Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 374–388, 2012, doi: 10.1108/13552541211250373.
- [18] B. Wittbrodt and J. M. Pearce, “The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components,” *Addit. Manuf.*, vol. 8, no. December, pp. 110–116, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.09.006.
- [19] Y. Yang, L. Li, and J. Zhao, “Mechanical property modeling of photosensitive liquid resin in stereolithography additive manufacturing: Bridging degree of cure with tensile strength and hardness,” *Mater. Des.*, vol. 162, pp. 418–428, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.12.009.
- [20] H. Shen, S. Guo, J. Fu, and Z. Lin, “Building Orientation Determination Based on Multi-Objective Optimization for Additive Manufacturing,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 7, no. 4, pp. 186–197, 2020, doi: 10.1089/3dp.2019.0106.
- [21] M. Stanic, B. Lozo, and D. G. Svetec, “Colorimetric properties and stability of 3D prints,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 120–128, 2012, doi: 10.1108/13552541211212104.
- [22] C. Coon, B. Pretzel, T. Lomax, and M. Strlič, “Preserving rapid prototypes: A review,” *Herit. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–16, 2016, doi: 10.1186/s40494-016-0097-y.

- [23] M. Neumüller, A. Reichinger, F. Rist, and C. Kern, “3D Printing for Cultural Heritage: Preservation, Accessibility, Research and Education,” pp. 119–134, 2014, doi: 10.1007/978-3-662-44630-0_9.
- [24] D. T. Pham and R. S. Gault, “A comparison of rapid prototyping technologies,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 38, no. 10–11, pp. 1257–1287, 1998, doi: 10.1016/S0890-6955(97)00137-5.
- [25] A. Pilipović, “Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa,” 2012.
- [26] “Photogrammetry vs. 3D Scanning for 3D Printed Figurines: Pros and Cons
Photogrammetry vs. 3D Scanning for 3D Printed Figurines: Pros and Cons
Photogrammetry vs. 3D Scanning for 3D Printed Figurines: Pros and Cons,” Accessed: Apr. 28, 2017. [Online]. Available: <http://www.thaiber.se/wp-content/uploads/2016/08/Photogrammetry-vs-scanning.pdf>.
- [27] F. B. Ter Haar, P. Cignoni, P. Min, and R. C. Veltkamp, “A COMPARISON OF SYSTEMS AND TOOLS FOR 3D SCANNING,” Accessed: May 08, 2017. [Online]. Available: <http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2005/TCMV05/WSH2005-24240.pdf>.
- [28] A. Hattab, I. Gonsheer, D. Moreno, and G. Taubin, “Differential 3D Scanning,” *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 43–51, 2017, doi: 10.1109/MCG.2017.39.
- [29] M. Szilvási-Nagy and G. Mátyási, “Analysis of STL Files,” *Math. Comput. Model.*, vol. 38, no. 7–9, pp. 945–960, 2003, doi: 10.1016/s0895-7177(03)90079-3.
- [30] J. Nef, M. Maričević, M. Matijević, and K. Hajdek, “ANALYSIS OF .OBJ FILE FORMAT IN ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS,” 2019.
- [31] “ISO/ASTM 52900:2015 Additive manufacturing — General principles — Terminology.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69669.html>.
- [32] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*. 2015.
- [33] E. Sachs, M. Cima, and J. Cornie, “Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 201–204, 1990, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61035-X.

- [34] Sculpteo, “The state of 3D printing 2020,” 2020.
- [35] S. S. Crump, “Modeling apparatus for three-dimensional objects,” no. 19, p. 20, 1994.
- [36] “Stratasys.” <http://www.stratasys.com/>.
- [37] K. G. Cooper, “Rapid Prototyping Technology: Selection and Application 2001” *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application* . Marcel Dekker, 2001. 226 pp., ISBN: 0-8247-0261-1 US\$135.00 hardback ,” *Assem. Autom.*, vol. 21, no. 4, pp. 358–359, 2001, doi: 10.1108/aa.2001.21.4.358.1.
- [38] “3D Systems.” <https://www.3dsystems.com/> (accessed Mar. 12, 2021).
- [39] B. Redwood, F. Schöffner, and B. Garret, “The 3D Printing Handbook,” *3D Hubs*, p. 304, 2017, [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/3d-printing-handbook/>.
- [40] “3D Printing Materials - SLS.” <https://www.sculpteo.com>.
- [41] “3D printing materials.” www.hubs.com.
- [42] F. F. Liou, *Rapid Prototyping and Engineering Applications*. 2019.
- [43] K. Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*. Addison-Wesley, 1999.
- [44] S. Monneret, V. Loubere, and S. Corbel, “Microstereolithography using a dynamic mask generator and a noncoherent visible light source,” *Des. Test, Microfabr. MEMS MOEMS*, vol. 3680, p. 553, 1999, doi: 10.1117/12.341246.
- [45] A. Bertsch, P. Bernhard, C. Vogt, and P. Renaud, “Rapid prototyping of small size objects,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 259–266, 2000, doi: 10.1108/13552540010373362.
- [46] G. Hadipoespito, Y. Yang, and H. Choi, “Digital Micromirror device based microstereolithography for micro structures of transparent photopolymer and nanocomposites,” *Proc. 14th ...*, no. 1c, pp. 13–24, 2003, [Online]. Available: [http://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF 2003 Proceedings/2003 SFF Papers/02-Hadipoespito.pdf](http://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF%202003%20Proceedings/2003%20SFF%20Papers/02-Hadipoespito.pdf) [http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF 2003 Proceedings/2003 SFF Papers/02-Hadipoespito.pdf](http://edge.rit.edu/content/P10551/public/SFF/SFF%202003%20Proceedings/2003%20SFF%20Papers/02-Hadipoespito.pdf).
- [47] A. Limaye and D. Rosen, “Quantifying dimensional accuracy of a Mask Projection

- Micro Stereolithography System,” *Proc. 15th Solid Free. ...*, pp. 481–492, 2004, [Online]. Available: [http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf%5Cnhttp://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF 2004 Proceedings/SFF Papers 2004/48-Limaye.pdf](http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf%5Cnhttp://edge.rit.edu/edge/P10551/public/SFF/SFF%202004%20Proceedings/SFF%20Papers%202004/48-Limaye.pdf).
- [48] C. Sun, N. Fang, D. M. Wu, and X. Zhang, “Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 121, no. 1, pp. 113–120, 2005, doi: 10.1016/j.sna.2004.12.011.
- [49] D. Dudley, W. M. Duncan, and J. Slaughter, “Emerging digital micromirror device (DMD) applications,” *MOEMS Disp. Imaging Syst.*, vol. 4985, p. 14, 2003, doi: 10.1117/12.480761.
- [50] S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, “Finer features for functional microdevices,” *Nature*, vol. 412, no. 6848, pp. 697–698, 2001, doi: 10.1038/35089130.
- [51] M. Miwa, S. Juodkazis, T. Kawakami, S. Matsuo, and H. Misawa, “Femtosecond two-photon stereo-lithography,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 73, no. 5, pp. 561–566, 2001, doi: 10.1007/s003390100934.
- [52] H.-B. Sun *et al.*, “Real three-dimensional microstructures fabricated by photopolymerization of resins through two-photon absorption,” *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 15, p. 1110, 2000, doi: 10.1364/ol.25.001110.
- [53] “Formlabs.” <https://formlabs.com/> (accessed Mar. 15, 2021).
- [54] C. K. Chua, C. H. Wong, and W. Y. Yeong, *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. 2017.
- [55] Sculpteo, “The state of 3D printing 2021,” 2021.
- [56] Wohlers Associates, *Wohlers Annual Report: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. 2021.
- [57] J. Munguía, J. De Ciurana, and C. Riba, “Pursuing successful rapid manufacturing: A users’ best-practices approach,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 173–179, 2008, doi: 10.1108/13552540810878049.

- [58] J. D. Hiller and H. Lipson, "STL 2.0: A proposal for a universal multi-material Additive Manufacturing File format," *20th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. SFF 2009*, no. 1, pp. 266–278, 2009.
- [59] ISO and ASTM, "ISO/ASTM 52921: Standard Terminology for Additive Manufacturing - Coordinate Systems and Test Methodologies," 2011. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/62794.html%0Awww.astm.org>.
- [60] ASTM, "Additive manufacturing technology standards." <https://www.astm.org/Standards/additive-manufacturing-technology-standards.html#:~:text=Additive Manufacturing Technology Standards ASTM%27s Additive Manufacturing Technology,stimulate research and encourage the implementation of technology>.
- [61] K. Xiao, F. Zardawi, R. Van Noort, and J. M. Yates, "Color reproduction for advanced manufacture of soft tissue prostheses," *J. Dent.*, vol. 41, no. SUPPL.5, pp. e15–e23, 2013, doi: 10.1016/j.jdent.2013.04.008.
- [62] Đ. Parac-Osterman, *Osnove o boji i sustavi vrednovanja*, 2nd ed. 2013.
- [63] B. Fraser, C. Murphy, and F. Bunting, *Real world color management*, 2nd Editio. 2005.
- [64] H. Kipphan, *Handbook of Print Media*, vol. 13, no. 6. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [65] "Autodesk Fusion 360." <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/> (accessed Mar. 24, 2021).

8 Prilozi

8.1 POPIS SLIKA

Slika 1 Proces izrade 3D otiska postupkom otiskivanja veziva na materijale	9
Slika 2 Kolor 3D otisak izrađen 3DP postupkom	10
Slika 3 Proces izrade 3D otiska postupkom ekstrudiranja materijala	12
Slika 4 Funkcionalni prototip tiskarske preše	13
Slika 5 Izrada zaštitnog vizira na uređaju za aditivnu proizvodnju postupkom ekstrudiranja materijala.....	14
Slika 6 Sjenila za žarulje izrađena FFF postupkom izrade	14
Slika 7 Vizualizacija mikro organizama korištenih u edukaciji.....	15
Slika 8 Replike kipova proizvedene FFF postupkom izrade.....	15
Slika 9 Razvoj ambalaže za promociju proizvoda	16
Slika 10 Proces izrade 3D otiska postupkom otiskivanja materijala	17
Slika 11 Proces izrade 3D otiska postupkom spajanja praškastih materijala.....	19
Slika 12 Uređaj za aditivnu proizvodnju postupkom spajanja praškastog materijala.....	20
Slika 13 Replika fosila napravljena od polimernog materijala postupkom spajanja praškastih materijala.....	21
Slika 14 Prvi komercijalni uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju - SLA-1 [38]	24
Slika 15 Shematski prikaz stereolitografskog uređaja s točkastim izvorom svjetla [32].....	25
Slika 16 Proces izrade 3D otiska postupkom polimerizacije materijala u komori.....	26
Slika 17 Primjer SLA tehnologije u proizvodnji nakita.....	26
Slika 18 Primjer izrade preciznih minijatura pomoću SLA tehnologije aditivne proizvodnje	27
Slika 19 Primjer generativnog dizajna mrežastih struktura izrađenih SLA postupkom aditivne proizvodnje.....	27
Slika 20 Izrada personalizirane drške britvice	28
Slika 21 Uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju - Formlabs Form 3.....	28
Slika 22 Primjer kolor prototipova izrađenih SLA postupkom [53].....	32
Slika 23 CIELAB prostor boja [64]	40
Slika 24 CIELAB prostor boja s prikazom različitih vrijednosti uzoraka A i B [64]	41
Slika 25 Ispitni uzorci s cijan, magenta i žutim bojiлом, debljine 1mm, 2mm, 3mm	43

Slika 26 Shema eksperimentalnog rada	44
Slika 27 Izrada ispitnih pločica u Autodesk Fusion 360.....	45
Slika 28 Izvoz CAD modela u .STL zapis	45
Slika 29 Prikaz mjernih uzoraka raspoređenih na radnu platformu	46
Slika 30 Uređaj za stereolitografsku aditivnu proizvodnju Formlabs Form 2	47
Slika 31 Doziranje bojila u spremnik.....	48
Slika 32 Ispitni uzorci degradiranih mehaničkih svojstava.....	48
Slika 33 Aparatura za čišćenje modela i uklanjanje strukturnih potpora.....	49
Slika 34 UV komora za sušenje ispitnih uzoraka Formlabs Cure.....	50
Slika 35 Spektrofotometar Konica Minolta CM3600dm	51
Slika 36 Spektralna krivulja refleksijskog svojstva ispitnog uzorka.....	52
Slika 37 Spektralna krivulja transmisijskog svojstva ispitnog uzorka.....	52
Slika 38 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom	55
Slika 39 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom	56
Slika 40 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa cijan bojom.....	56
Slika 41 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom.....	57
Slika 42 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom	58
Slika 43 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa cijan bojom.....	58
Slika 44 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	60
Slika 45 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	60
Slika 46 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	61
Slika 47 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	61
Slika 48 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	62
Slika 49 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	62
Slika 50 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	63
Slika 51 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	63

Slika 52 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	64
Slika 53 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 5 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja. Slika 53 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	64
Slika 54 CIELAB prikaz reflektivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	65
Slika 55 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	65
Slika 56 CIELAB prikaz reflektivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	66
Slika 57 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	66
Slika 58 CIELAB prikaz reflektivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	67
Slika 59 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	67
Slika 60 CIELAB prikaz reflektivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	68
Slika 61 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	68
Slika 62 CIELAB prikaz reflektivnih svojstava ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	69
Slika 63 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	69
Slika 64 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom.....	71
Slika 65 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom.....	72
Slika 66 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa magenta bojom.....	72
Slika 67 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom.....	73
Slika 68 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom	74

Slika 69 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa magenta bojom.....	74
Slika 70 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	76
Slika 71 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	76
Slika 72 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	77
Slika 73 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	77
Slika 74 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	78
Slika 75 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	78
Slika 76 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	79
Slika 77 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	79
Slika 78 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	80
Slika 79 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	80
Slika 80 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	81
Slika 81 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	81
Slika 82 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	82
Slika 83 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	82
Slika 84 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	83
Slika 85 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	83
Slika 86 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	84
Slika 87 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	84
Slika 88 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	85
Slika 89 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	85

Slika 90 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom	87
Slika 91 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom	88
Slika 92 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa žutim bojilom.	88
Slika 93 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom	89
Slika 94 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojilom.....	90
Slika 95 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa žutim bojilom	90
Slika 96 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	92
Slika 97 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	92
Slika 98 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	93
Slika 99 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	93
Slika 100 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	94
Slika 101 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	94
Slika 102 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	95
Slika 103 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	95
Slika 104 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	96
Slika 105 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	96
Slika 106 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	97
Slika 107 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	97
Slika 108 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	98
Slika 109 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	98
Slika 110 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	99
Slika 111 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	99

Slika 112 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	100
Slika 113 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	100
Slika 114 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	101
Slika 115 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	101
Slika 116 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom.....	103
Slika 117 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom.....	104
Slika 118 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa crnim bojom	104
Slika 119 Spektralne krivulje reflektivnih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom	105
Slika 120 CIELAB prikaz refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom.....	106
Slika 121 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa crnog bojom	106
Slika 122 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	108
Slika 123 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	108
Slika 124 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	109
Slika 125 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	109
Slika 126 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	110
Slika 127 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	110
Slika 128 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	111
Slika 129 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	111
Slika 130 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	112
Slika 131 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	112
Slika 132 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	113
Slika 133 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	113

Slika 134 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	114
Slika 135 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	114
Slika 136 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	115
Slika 137 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	115
Slika 138 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	116
Slika 139 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	116
Slika 140 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	117
Slika 141 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	117
Slika 142 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom.....	119
Slika 143 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom.....	120
Slika 144 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa bijelim bojom	120
Slika 145 Spektralne krivulje refleksivnih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom	121
Slika 146 CIELAB prikaz refleksivnih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom.....	122
Slika 147 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnih uzoraka sa bijelim bojom	122
Slika 148 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	124
Slika 149 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	124
Slika 150 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	125
Slika 151 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	125
Slika 152 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	126
Slika 153 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 3 mm.....	126
Slika 154 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	127
Slika 155 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	127
	198

Slika 156 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	128
Slika 157 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 5 mm.....	128
Slika 158 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja.....	129
Slika 159 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	129
Slika 160 prikazuje reflektivna kolorimetrijska svojstva ispitnog uzorka prikazanih u CIELAB sustavu boja. Crvena točka predstavlja uzorak nakon osmog intervala sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon ostalih intervala sušenja. Slika 161 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnog uzorka debljine 2 mm. Crvena crta predstavlja uzorak prije početka sušenja, dok plave točke predstavljaju ispitne uzorke nakon različitih intervala sušenja.Slika 160 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja	130
Slika 161 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 2 mm.....	130
Slika 162 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja Slika 163 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	131
Slika 164 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenjaSlika 165 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 4 mm.....	132
Slika 166 CIELAB prikaz ispitnog uzorka nakon različitih intervala sušenja Slika 167 Prikaz kolorimetrijskih karakteristika (svjetline – L, kromatičnosti – C i tona – h) ispitnog uzorka debljine 1 mm.....	133
Slika 168 Spektralne krivulje transmisivskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojiлом 1,0 mm - 1,8 mm	135
Slika 169 CIELAB prikaz transmisivskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojiлом 1,0 mm – 1,8 mm.....	136
Slika 170 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm	136
Slika 171 Spektralne krivulje transmisivskih svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojiлом 2,0 mm - 2,8 mm	137

Slika 172 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom 2,0 mm – 2,8 mm.....	138
Slika 173 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm	138
Slika 174 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom 3,0 mm - 3,8 mm	139
Slika 175 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom 3,0 mm – 3,8 mm.....	140
Slika 176 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm	140
Slika 177 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom 4,0 mm - 4,8 mm	141
Slika 178 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s cijan bojom 4,0 mm – 4,8 mm.....	142
Slika 179 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm	142
Slika 180 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 1,0 mm - 1,8 mm	143
Slika 181 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 1,0 mm – 1,8 mm	144
Slika 182 prikazuje svjetlinu – L, kromatičnost – C, ton – H ispitnih uzoraka s magenta bojom. Crvena crta predstavlja uzorak debljine 1,0 mm, dok plave točke predstavljaju ispitnih uzoraka debljine od 1,0 mm do 1,8 mm. Vrijednosti LCh prikazane su za transmisijска svojstva ispitnih uzoraka. Slika 182 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm	144
Slika 183 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 1,0 mm - 1,8 mm	145
Slika 184 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 2,0 mm – 2,8 mm	146
Slika 185 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm	146
Slika 186 Spektralne krivulje transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 3,0 mm - 3,8 mm	147
Slika 187 CIELAB prikaz transmisijских svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 3,0 mm – 3,8 mm	148
Slika 188 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm	148

Slika 189 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 4,0 mm - 4,8 mm	149
Slika 190 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s magenta bojom 4,0 mm – 4,8 mm	150
Slika 191 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm	150
Slika 192 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 1,0 mm - 1,8 mm	151
Slika 193 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 1,0 mm – 1,8 mm.....	152
Slika 194 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm	152
Slika 195 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 2,0 mm - 2,8 mm	153
Slika 196 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 2,0 mm – 2,8 mm.....	154
Slika 197 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm	154
Slika 198 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 3,0 mm - 3,8 mm	155
Slika 199 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 3,0 mm – 3,8 mm.....	156
Slika 200 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm	156
Slika 201 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 4,0 mm - 4,8 mm	157
Slika 202 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s žutim bojom 4,0 mm – 4,8 mm.....	158
Slika 203 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm	158
Slika 204 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 1,0 mm - 1,8 mm	159
Slika 205 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 1,0 mm – 1,8 mm.....	160
Slika 206 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm	160
Slika 207 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 2,0 mm - 2,8 mm	161

Slika 208 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 2,0 mm – 2,8 mm.....	162
Slika 209 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm	162
Slika 210 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 3,0 mm - 3,8 mm	163
Slika 211 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 3,0 mm – 3,8 mm.....	164
Slika 212 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm	164
Slika 213 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 4,0 mm - 4,8 mm	165
Slika 214 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s crnim bojom 4,0 mm – 4,8 mm.....	166
Slika 215 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm	166
Slika 216 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 1,0 mm - 1,8 mm	167
Slika 217 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 1,0 mm – 1,8 mm	168
Slika 218 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 1,0 mm - 1,8 mm	168
Slika 219 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 2,0 mm - 2,8 mm	169
Slika 220 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 2,0 mm – 2,8 mm.....	170
Slika 221 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 2,0 mm - 2,8 mm	170
Slika 222 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 3,0 mm - 3,8 mm	171
Slika 223 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 3,0 mm – 3,8 mm.....	172
Slika 224 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 3,0 mm - 3,8 mm	172
Slika 225 Spektralne krivulje transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 4,0 mm - 4,8 mm	173
Slika 226 CIELAB prikaz transmisijskih svojstava ispitnih uzoraka s bijelim bojom 4,0 mm – 4,8 mm.....	174

Slika 227 Prikaz svjetline, kromatičnosti i tona ispitnih uzoraka 4,0 mm - 4,8 mm	174
---	-----

8.2 POPIS TABLICA

Tablica 1 Standardi u tehnologiji aditivne proizvodnje	35
Tablica 2 Prikaz ukupne promjene boje transmisijских i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm	54
U tablici (Tablica 4) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.	
Tablica 3 Prikaz ukupne promjene boje transmisijских i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa magenta bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm.....	70
Tablica 4 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s magenta bojom (transmisijска svojstva).	75
Tablica 5 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s magenta bojom (refleksijska svojstva) ...	75
Tablica 6 Prikaz ukupne promjene boje transmisijских i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm	86
Tablica 7 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s žutim bojom (transmisijска svojstva)	91
Tablica 8 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s žutim bojom (refleksijska svojstva).....	91
Tablica 9 Prikaz ukupne promjene boje transmisijских i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa crnim bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm.....	102
Tablica 10 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (transmisijска svojstva) ..	107
Tablica 11 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (refleksijska svojstva)	107
U tablici (Tablica 13) je vidljiva razlika ukupne promjene boje izraženu kao vrijednost ΔE_{00} . Prikazane su razlike ukupne promjene boje za svaki uzorak usporedno s najdebljim uzorkom od 5mm.	
Tablica 12 Prikaz ukupne promjene boje transmisijских i refleksijskih svojstava ispitnih uzoraka sa cijan bojom u odnosu na uzorak debljine 5 mm	118
Tablica 13 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (transmisijска svojstva) ..	123
Tablica 14 Prikaz promjene boje ispitnih pločica s cijan bojom (refleksijska svojstva)	123
Tablica 15 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine za uzorke s cijan bojom	134
Tablica 16 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine.....	143
Tablica 17 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine.....	151

Tablica 18 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine.....	159
Tablica 19 Prikaz ukupne promjene boje između uzoraka različite debljine.....	167

9 O autoru

Marko Maričević mag. ing. techn. graph. radi kao asistent na Sveučilištu u Zagrebu Grafički fakultet od akademske 2015. / 2016. godine. Rođen je 19.08.1985. godine u Zagrebu. Nakon završene I. tehničke škole Tesla upisuje preddiplomski studij na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu, smjer elektroničko poslovanje, gdje stječe stručno zvanje prvostupnih inženjer tehničke informatike (bacc. ing. techn. inf.) nakon obrane završnog rada s temom „Digitalni certifikati“. Studij nastavlja na Sveučilištu u Zagrebu Grafički fakultet, gdje uspješno brani diplomski rad 2013. godine s temom „Forenzika digitalnog zapisa fotografske slike“ (mentor dr. sc. Miroslav Mikota), te stječe zvanje magistar inženjer (mag. ing. techn. graph.).

Od 2007. godine do 2015. zaposlen je na Institutu Ruđer. Kao vanjski suradnik Centra za informatiku i računarstvo radi sve do završetka studija 2013. godine, a onda se zapošljava kao stručni savjetnik Centra za informatiku.

2014. godine prelazi na Zavod za molekularnu medicinu na FP7 projekt InnoMol na posao web programera gdje i dalje uspješno surađuje s Centrom za informatiku. 2015. zapošljava se na mjesto asistenta na Sveučilištu u Zagrebu Grafički fakultet gdje upisuje i doktorski studij.

Početkom diplomskog studija počinje se baviti istraživanjem i pisanjem znanstvenih radova. Objavio je dva (2) izvorna znanstvena rada A kategorije, osam (8) znanstvenih članaka u zbornicima međunarodnih konferencija.

2018. kao član sudjeluje u na programu *Health Innovation Fellow StarShip Programme* organizacije *European Institute of Innovation and Technology* –, a po završetku programa postaje njihov alumni član.

Računalo mu je osnovni alat za rad, istraživanje i razvoj. Područja interesa su: aditivne tehnologije proizvodnje, računarska grafika, multimedija, forenzika digitalnih zapisa te virtualna i proširena stvarnost.

9.1 POPIS OBJAVLJENIH DJELA

Izvorni znanstveni i pregledni radovi A kategorije

1. Maričević, Marko; Ptiček, Petra; Žganjar, Ivana
Recognition Model of Counterfeiting Digital Records of Biometric Photographic Image // *Tehnički glasnik - Technical journal* (2022) doi:10.31803/tg-20210714171523 (međunarodna recenzija, prihvaćen)

2. Maričević, Marko; Mikota, Miroslav; Hajdek, Krunoslav
UV Curing Effect(s) on Colorimetric Properties of Test Specimens Created via Stereolithography // *Tehnički glasnik - Technical journal* (2022) doi:10.31803/tg-20210723230027 (međunarodna recenzija, prihvaćen)

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1. Jaklin, Mihaela; Hajdek, Krunoslav; Maričević, Marko
Animirani film kao optička iluzija i vizualni fenomen // *23rd International Conference on Printing, Design and Graphic Communications Blaž Baromić 2019* / Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo grafičara, Hrvatska, 2019. str. 9-18 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

2. Nef, Josip; Maričević, Marko; Matijević, Mile; Hajdek, Krunoslav
Analiza .obj formata zapisa u procesu aditivne proizvodnje // *20th International Conference on Materials MATRIB 2019* / Šolić, Sanja ; Schauperl, Zdravko ; Pugar, Danijel (ur.). Zagreb: HDTM, 2019. str. 232-238 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

3. Divjak, Alan; Maričević, Marko
Upotreba virtualne stvarnosti u 3D vizualizaciji // *Proceedings of 20th International conference of printing, design and graphic communication Blaž Baromić / Mikota, Miroslav (ur.)*. Senj, Hrvatska, 2016. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

4. Divjak, Alan; Maričević, Marko; Horvat, Lara; Šarić, Jelena;
Upotreba fotogrametrije za izradu 3D modela // *Proceedings of 20th International conference of printing, design and graphic communication Blaž Baromić / Mikota, Miroslav (ur.)*.
Senj, Hrvatska, 2016. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
5. Maričević, Marko; Divjak, Alan; Matijević, Mile
Primjena računalnih klastera za razvoj 3D sadržaja // *roceedings of 20th International conference of printing, design and graphic communication Blaž Baromić*
Senj, Hrvatska, 2016. (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
6. Matijević, Mile; Maričević, Marko; Divjak, Alan; Čačić, Marko
Primjena termoplastika visokih mehaničkih performansi u potrošačkim FDM 3D printerima // *Proceedings of the 17th International Conference on Materials, Tribology and Recycling, MATRIB 2016 / Žmak, Irena ; Aleksandrov Fabijanić, Tamara ; Ćorić, Danko (ur.)*.
Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2016. str. 218-222 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
7. Maričević, Marko; Žeželj, Teo; Mikota, Miroslav; Žiljak Stanimirović, Ivana
Comparasion of JPEG format output histograms obtained by raw format tone mapping // *Proceedings of the International Conference MATRIB 2016 / Žmak, Irena ; Aleksandrov Fabijanić, Tamara ; Ćorić Danko (ur.)*.
Vela Luka, Hrvatska: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2016. str. 210-217 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
8. Maričević, Marko; Divjak, Alan; Mikota, Miroslav; Mrvac, Nikola
Fotogrametrijsko 3D skeniranje // *Međunarodni znanstveni skup Tiskarstvo & Dizajn*
Zagreb, Hrvatska, 2016. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)