

# Metamerija u trodimenzionalnom tisku

---

Štukar, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:465458>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-16**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

# ZAVRŠNI RAD

Iva Štuka



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: Tehničko - tehnološki

# ZAVRŠNI RAD

## METAMERIJA U TRODIMENZIONALNOM TISKU

Mentor:

prof.dr.sc. Igor Zjakić

Student:

Iva Štucar

Zagreb, 2014.

Rješenje o odobrenju završnog rada

## SAŽETAK

Trodimenzionalni tisak je tehnologija tiska koja kao finalni proizvod daje uporabni predmet. Proces ispisa objekta baziran je ink-jet tehnicu ispisa. Objekt se stvara u slojevima koji su definirani 3D modelom. To je tehnologija budućnosti koja već sada daje obećavajuće rezultate. Tehnologija je primjenu našla u raznim granama industrije, medicini, arhitekturi, dizajnu i dr. U ovom završnom radu pobliže je opisan razvoj trodimenzionalnog tiska, princip rada, te podvrste tehnologije. Spomenuti su sustavi boja, te što je boja uopće. U eksperimentalnom dijelu istraživala se pojava metamerije kod objekata nastalih trodimenzionalnom tehnologijom. Istraživanje je provedeno na šest objekata različitih boja (crvena, plava i zelena), isprintanih trodimenzionalnim pisačem. Vrijednost boje pojedinog objekta određivala se pri simulaciji tri različita osvjetljenja. Na temelju dobivenih mjerenja zaključilo se o pojavi metamerije i njenoj vrijednosti za svaku boju pojedinačno.

**KLJUČNE RIJEČI:** trodimenzionalni tisak, boja, metamerija, osvjetljenje

## ABSTRACT

Three-dimensional printing is a printing technology where utility item is a final product. Process of printing is based on ink-jet printing technique. Object is created in layers defined by three-dimensional model. It is the technology of the future, which already have promising results. Technology has found application in many segments of industry, medicine, architecture, design and others. This final paper is presenting the development of three-dimensional printing, how it works and how many subtechnologies it has. Also, color systems have been mentioned and what color is. In the experimental part it was researched the phenomenon of metamerism on objects created with three-dimensional technology. The study was conducted on six objects in different colors (red, blue and green), printed by three-dimensional printer. The color value of each object was determined during simulation of three different lighting conditions. Based on the measurements it has been concluded about metamerism and its values of each color.

**KEY WORDS:** three-dimensional printing, color, metamerism, lighting

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Izbor problema i cilj završnog rada.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Početak i razvoj 3D tiska.....	2
2.2. Što je tehnologija brze izrade prototipova (Rapid Prototyping)?.....	2
2.3. Rapid Prototyping tehnologije.....	3
2.3.1. Stereolitografija (SLA).....	4
2.3.2. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS, Selective Laser Sintering).....	5
2.3.3. Modeliranje topljenim depozitima (FDM, Fused Deposition Modeling).....	7
2.3.4. Laminirana objektna proizvodnja (LOM, Laminated Object Manufacturing).....	8
2.3.5. 3D tisak (3DP).....	9
2.3.6. 3D-MID tehnologija.....	10
2.4. 3D printeri.....	11
2.5. Princip rada 3D printera.....	12
2.6. Budućnost 3D tiska.....	13
2.7. Boja.....	14
2.7.1. Što je boja?.....	14
2.7.1.1. Psihofizičke karakteristike boja.....	15
2.7.2. Sustavi boja.....	15
2.7.2.1. Munsellov sustav boja.....	16
2.7.2.2. Ostwadow sustav boja.....	16
2.7.2.3. CIE sustavi boja.....	17
2.7.2.3.1. CIE XYZ.....	17
2.7.2.3.2. CIE L* a* b*.....	18
2.8. Metamerija.....	19
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	21
3.1. Vrste osvjjetljenja korištene u istraživanju.....	21
3.1.1. CIE Iluminant D65.....	21

3.1.2. A svjetlost (obična žarulja).....	21
3.1.3. F2 – F11 (Fluorescentne cijevi).....	21
3.2. Testni uzorci.....	21
4. <b>REZULTATI I DISKUZIJA</b> .....	22
4.1. Crveni uzorak.....	22
4.2. Plavi uzorak.....	23
4.3. Zeleni uzorak.....	24
5. <b>ZAKLJUČCI</b> .....	25
6. <b>LITERATURA</b> .....	26
7. <b>PRILOZI</b> .....	28

## 1. Uvod

### 1.1. Izbor problema i cilj završnog rada

Trodimenzionalni tisak je tehnologija koja se sve brže razvija, a u budućnosti se očekuje još brži ravnjak i napredak te zanimljive tehnologije. To je tehnologija koja omogućuje da se od trodimenzionalnog modela nastalog u računalu stvori pravi funkcionalni predmet. Iako je tehnologija već našla primjenu u mnogobrojnim djelatnostima, neprestano se radi na proširenju spektra primjene, posebice zbog činjenice da gotovi svi materijali i boje dolaze u obzir pri izradi trodimenzionalnog objekta. Upravo boje su dio istraživanja ovog završnog rada, odnosno njihovo ponašanje pod utjecajem različitih osvjetljenja. Cilj završnog rada bio je odrediti utjecaj različitog osvjetljenja na promjenu viđenja boje objekata nastalih trodimenzionalnim tiskom. Promjena boje pod utjecajem određenog osvjetljenja poznata je pod nazivom metamerija. Boju drugačije doživljavamo na dnevnom svjetlu, a drugačije na žutom svjetlu obične žarulje. Istraživanje je provedeno na šest uzoraka u tri različite boje (crvena, plava i zelena). Uzorci su izrađeni u obliku kocke i valjka, a za mjerenja pri istraživanju su uzimani nasumično. Vrijednosti boje mjerena su instrumentalnom analizom u CIE  $L^*a^*b^*$  sustavu boja. Matematičkim putem dobivene su srednje vrijednosti za svaku komponentu. Vrijednosti su grafički prikazane kako bi razlika među njima bila jasno vidljiva.



## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Početak i razvoj 3D tiska

Početak 3D tiska može se smjestiti još u 80-te godine prošle godine. 1984. godine Charles Hull (3D Systems) je patentirao prvi stereolitografski pisač (SLA), odnosno proces tiska u kojem se 3D modeli dobivaju iz digitalnih zapisa. Prvi SLA printer bio je neprecizan, ali je pokazivao da se i najzahtjevniji dijelovi mogu izraditi takvim načinom. Tada je cijena ovakvih modela i printera bila visoka i printeri nisu bili dostupnim na širem tržištu. Prvi 3DP (engl. 3D printing) printer izumljen je na Massachusetts Institute of Technology (MIT). 3DP razvio se paralelno sa stereolitografijom, pa su MIT i 3D Systems ostale vodeće tvrtke za proizvodnju 3D printera. Uz njih, značajne su još i Z Corporation, Objet Geometries i Stratasys koje su također na tržište izbacile nove proizvode bazirane na već dostupnoj tehnologiji. Krajem 90-tih godina, 3D tisak pronalazi još jednu primjenu i to u medicini. Upravo tada pacijentu je transplantiran bubreg nastao 3D tiskom. Tehnologiju su razvili znanstvenici na Wake Forest institutu i time su započeli novo poglavlje printanja funkcionalnih organa. Ulaskom u 21. stoljeće 3D tisak zabilježava veću prodaju, čime pada i cijena samih printera. Postaju dostupni na širem tržištu, a danas je moguće kupiti i manje printere za osobne potrebe. Primjena 3D tiska zaista je široka: primjenjuje se u arhitekturi, medicini, industriji, dizajnu, elektronici i dr. [1]

### 2.2. Što je tehnologija brze izrade prototipova (Rapid Prototyping)?

Tehnologija brze izrade prototipova (engl. Rapid Prototyping – RP) jedna je od trenutačno najbrže rastućih tehnologija. U slučajevima kompleksne geometrije, koju nije moguće postići klasičnim načinima obrade, jedini način koji preostaje za izradu prototipa ili alata je RP-tehnologija. Prototip koji se izrađuje nastaje dodavanjem sloja na prethodno kreiran sloj. Ovisno o vrsti korištene tehnologije na raspolaganju nam stoje različiti materijali koji se mogu kombinirati i na taj način povećati čvrstoću modela, poboljšati njegova tehnološka svojstva ili poboljšati učinak modea u svrsi za

koju je namjenjen.[2] Neke od trenutno zastupljenijih tehnika brze izrade prototipa jesu:

- Stereolitography (SL) – stereolitografija,
- Fused deposition modeling (FDM) – modeliranje topljenim depozitima,
- Laminated object manufacturing (LOM) – laminirana objektna proizvodnja,
- Selective laser sintering (SLS) – selektivno lasersko sinteriranje,
- 3D-print (3DP) – trodimenzionalni tisak,
- Polyjet i Polyjet Matrix.
- 3D-MID tehnologija

### 2.3. Rapid Prototyping tehnologije

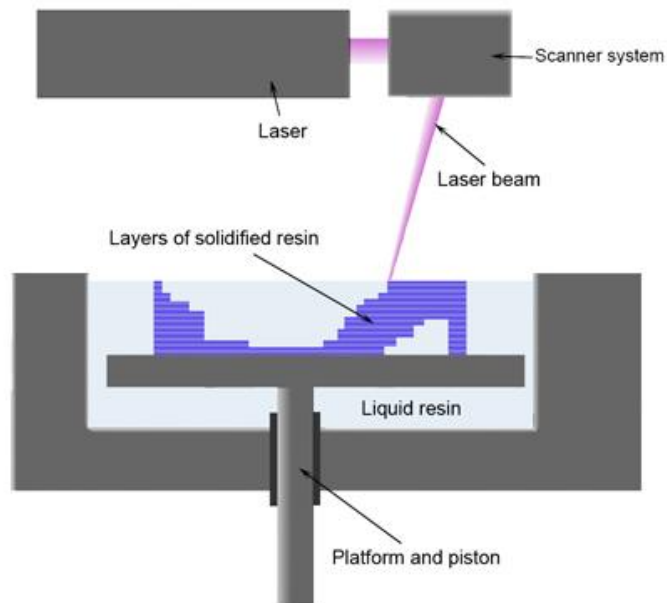
Model se oblikuje pomoću jednog od brojnih CAD softverskih paketa kao što su npr. I-DEAS, Catia, Solidworks, Pro/Engineer. Nakon toga slijedi konvertiranje u STL format. Vrijeme izrade prototipa ovisi o vrsti postupka i najčešće se sastoji od tri dijela: priprema datoteke, stvaranje dijela i naknadna obrada. To znači da vrijeme od narudžbe do gotovog prototipa iznosi nekoliko dana. Isplativost primjene postupaka brze izrade prototipova više se isplati što je njegov oblik složeniji. Time se postiže smanjenje vremena izrade i troškova. Vrijeme i troškovi ovise i o volumenu dijela kao i o njegovim maksimalnim dimenzijama u X, Y ili Z osi. Kako bi se suvremene tehnologije probile u industriju, njihova primjena mora pokazivati određene prednosti i uštede. Neke prednosti brze izrade prototipova i alata: smanjenje vremena potrebnog za razvoj proizvoda, izbjegavanje grešaka koje mogu dovesti do zastoja u proizvodnji, minimiziranje vremena potrebnog za dobivanje prototipa, povećanje učinkovitosti, mogućnost ispunjenja i najoštrijih zadanih rokova, puno brža izrada potrebnih alata, kraće vrijeme potrebno za dobivanje prototipa, puno brža analiza funkcionalnosti, oblika i dimenzija, smanjeni zaostaci u fazi konstruiranja, smanjenje cijene prototipa u slučaju iznimno složenih oblika, smanjenje troškova izrade alata, smanjenje troškova cijelog procesa razvoja proizvoda, eliminiranje nepotrebnih i skupih faza izrade. [2]

### 2.3.1. Stereolitografija (SLA)

SLA tehnologija jedna je od najraširenijih metoda. Princip postupka zasniva se na uporabi lasera i fotopolimerne tekućine. Pri prolazu laserske zrake, tekućina prelazi iz tekućega u čvrsto agregatno stanje formirajući na taj način konturu modela. Uređaji se sastoje od četiri osnovna dijela: računala koje obrađuje podatke i kreira slojeve, kontrolnog računala koje nadzire cijeli proces, prostorije u kojoj se modeliranje obavlja, te laserske jedinice. Računalo za kreiranje slojeva čita 3D model stvoren u računalu i kreira slojeve koje kontrolno računalo pomoću laserske jedinice i hardvera samog printera nanosi na potporni sloj. Nakon što je čitav sloj dovršen, praznine se nadopunjuju potpornim materijalom, čitav sloj spušta se niže po vertikalnoj osi pisača i sljedeći sloj se nanosi na prethodni. Slojevi se odmah spajaju i nakon nekoga vremena formiraju gotov 3D objekt. Prednosti stereolitografije su da ima visoku rezoluciju, moguća izrada dvobojnih prototipova, nema geometrijskih ograničenja oblika, te automatiziranost procesa. Postoji i nekoliko nedostataka od kojih su glavni ti da se samo fotopolimerni materijali mogu koristiti, prototip je slabijih mehaničkih svojstava, prototip je potrebno peći, a fotopolimer je otrovan u tekućem stanju.[3]

Materijali koji se koriste u procesu stereolitografije su:

- WaterShed - polimer na bazi epoksida koji u vlažnim uvjetima zadržava dobra mehanička svojstva, te je izuzetno izdržljiv
- Somos9100 - epoksid na bazi fotopolimera koji je žilav i otporan na vlagu
- Somos8100 - epoksid na bazi fotopolimera, velike fleksibilnosti i izdržljivosti, otporan na vlagu
- ACCURA SI40 - fotopolimer koji oponaša svojstva polamida, otporan na visoke temperature, a dijelovi ostaju kruti i kada su izloženi vlazi
- ACCUDUR - fotopolimer koji je iznimno izdržljiv i fleksibilan, otporan na vlagu



Slika 1.: Shematski prikaz stereolitografije

(preuzeto sa: [http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing))

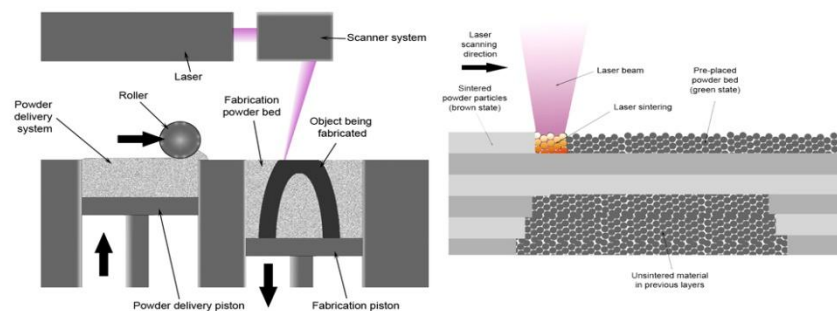
### 2.3.2. Selektivno lasersko sinteriranje (SLS, Selective Laser Sintering)

SLS je proces 3D printanja na bazi tehnologije sinteriranja (postupak spajanja čestica praha reakcijama u čvrsto stanje). Laserska zraka usmjerava se na materijal (koji je u obliku finog praška) koji se uslijed visoke temperature sinterira. Pod visokom temperaturom se između čestica praha povećava adhezija, tako da se prah grupira u veću krutinu točno određenog oblika. Fizikalne karakteristike produkata stvorenih sinteriranjem mogu se lako mijenjati promjenom gustoće, stvaranjem legura ili daljnjim pečenjem, a gotov proizvod može biti i mnogo čvršći nego onaj napravljen konvencionalnim metodama. Sav višak praha služi kao potporna konstrukcija pa nema potrebe za dodatnim potpornim materijalima i strukturama. SLS tehnologijom moguće je napraviti posve funkcionalne finalne proizvode. Većina proizvedenih modela je spremna za uporabu nakon minimalne obrade i čišćenja, bez potrebe za dodatnim "pečenjem". Proces koji uključuje SLS tehnologiju ima vjerojatno najveći raspon

dostupnih materijala, budući da se mnogi metali mogu sinterirati. Prednosti su dijelovi boljih mehaničkih svojstava od onih izrađenih stereolitografijom, SLS dijelovi mogu se koristiti za funkcionalna ispitivanja, postupak SLS brži je od stereolitografije, moguća primjena većeg broja materijala, nije potreban potporanj jer višak praha podupire prototip, neupotrebljeni prah može se koristiti za sljedeći prototip, te bolja obradivost izrađenih dijelova u odnosu na stereolitografske dijelove. Nedostaci su lošija kvaliteta površine u odnosu na stereolitografske dijelove, a pri korištenju nekih materijala potrebna je zaštitna atmosfera radi pojave otrovnih plinova.[3]

Materijali koji se koriste u procesu selektivnog laserskog sinteriranja su:

- LaserForm ST-100,200 - materijal od čestica nehrđajućeg čelika koje su presvučene polimernim vezivom, dijelovi su zavarljivi i imaju dvostruko veću toplinsku vodljivost od čelika
- DuraFormPA - polamid koji se koristi za izradu dijelova sa vrlo glatkom površinom i finim detaljima
- DuraFormGF - polamid punjen staklenim česticama, vrlo visoke krutosti, mehanička svojstva ga čine idealnim za izradu prototipova koji su izloženi ekstremnim uvjetima
- CastFormPS - polistiran koji se koristi za izradu alata za precizno ljevanje



Slika 2.: Shematski prikaz modeliranja selektivnim laserskim sinteriranjem

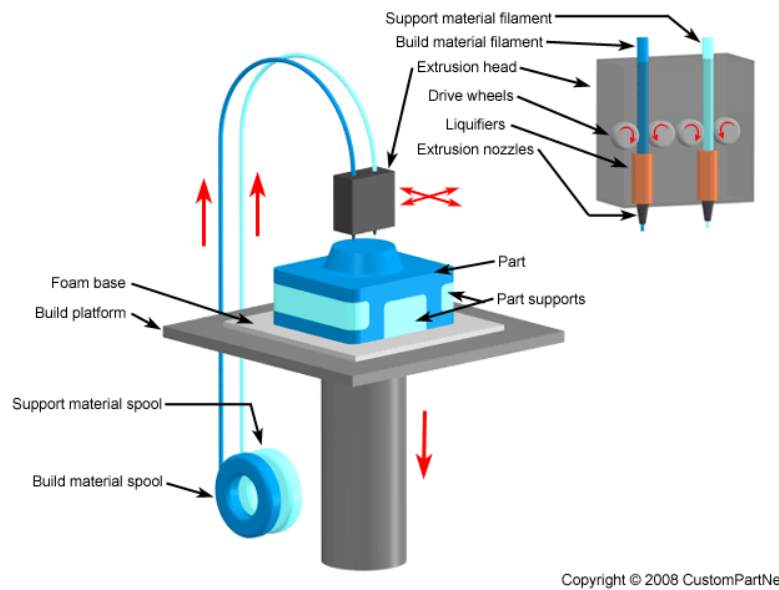
(preuzeto sa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering))

### 2.3.3. Modeliranje topljenim depozitima (FDM, Fused Deposition Modeling)

Ova se tehnologija zasniva na izradi pomoću čvrstih materijala na principu ekstruzije kroz mlaznicu. Plastično vlakno konstantno se dobavlja kroz mlaznicu maloga promjera. Mlaznica je zagrijana te se dobavljeni materijal topi i nanosi u slojevima. Nakon završetka nanošenja jednog sloja, radni stol vrši posmak po Z-osi te započinje nanošenje idućeg sloja. FDM omogućava izradu funkcionalnih dijelova materijalima istog ili približno istog sastava kao što je zadani model. Posebnost FDM tehnologija ogleda se u upotrebi ABS plastike koja omogućava postizanje gotovo jednake karakteristika kao što je zadano gotovim proizvodom. S obzirom na to da se dobava materijala vrši kroz mlaznicu i izravno se nanosi na prethodno očvršćeni sloj, mala je količina neiskorištenog materijala. Glavne prednosti postupka FDM procesa su manja potrošnja energije, ne koristi se laserski snop, nema posebnih zahtjeva za ventilacijom i hlađenjem, jednostavan je za primjenu, potrebna relativno niska investicija u uređaj kao i niski troškovi održavanja, ima mogućnost izrade više prototipova istovremeno i male dimenzije uređaja. Nedostaci su relativno mali broj komercijalno raspoloživih materijala, funkcionalnost prototipova ograničena je izborom materijala, nužna je primjena potpornja te su vidljive linije između slojeva.[5]

Materijali koji se koriste u procesu FDM su:

- ABS(P400) - dolazi u više boja, te ima iznimnu mogućnost završne obrade kao što su bušenje, pjeskaranje i prevlačenje
- ABSi(P500) - posebna vrsta ABS materijala koja je otporna na udarna opterećenja, te na kemijske aktivne medije
- medicinski ABS - ima veliku izdržljivost, nije otrovan i dolazi u više boja
- E20 - elastomer na bazi poliestera
- ICW06 - vosak za precizno ljevanje koji ima malen udio pepela

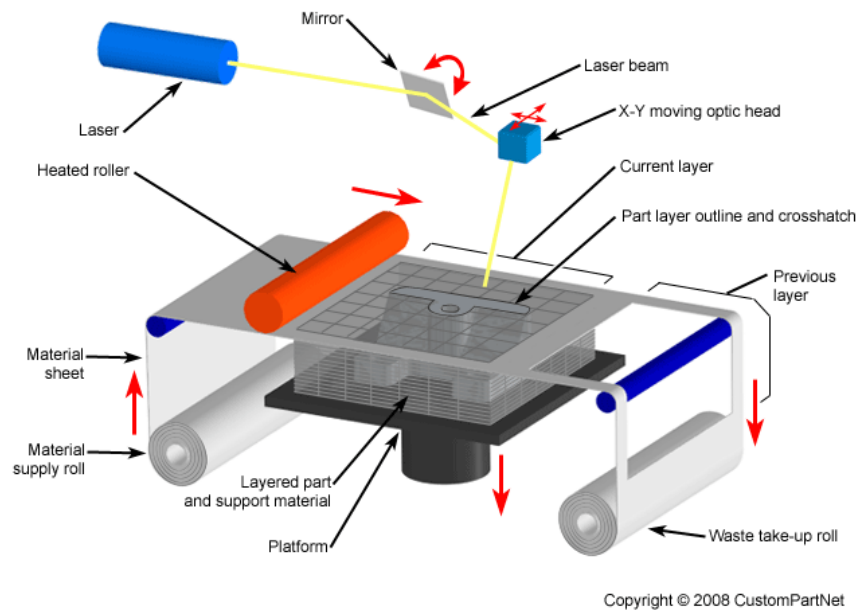


Slika 3.: Shematski prikaz modeliranja topljenim depozitom

(preuzeto sa: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>)

#### 2.3.4. Laminirana objektna proizvodnja (LOM, Laminated Object Manufacturing)

Laminirana objektna proizvodnja koristi se kod izrade objekata većih dimenzija. Preko sustava pomičnih zrcala laserska zraka izrezuje oblik objekta od posebne vrste folije koja je namotana na valjak. Folija s donje strane ima disperzirano vezivno sredstvo koje osigurava čvrsto povezivanje slojeva. Na taj se način aktivira vezivno sredstvo i povezuje izrezani sloj s ostatkom modela. Nakon završetka izrade aplicira se impregnacijsko sredstvo radi zaštite od vlage. Prednosti ovog postupka su niža cijena, mogućnost proizvodnje velikih dijelova, relativno velika brzina postupka i male dimenzije uređaja koji se može instalirati u običnom uredu. Nedostaci su manja točnost i nužno je lakiranje prototipa da bi se izbjeglo upijanje vlage i time promjena dimenzija. Funkcionalnost prototipova ograničena je uskim izborom materijala, traženu višu kvalitetu površine treba postići dodatnom završnom strojnom obradom, te velik udio otpadnog materijala.[6]



Slika 4.: Shematski prikaz laminirane objektne proizvodnje

(preuzeto sa: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>)

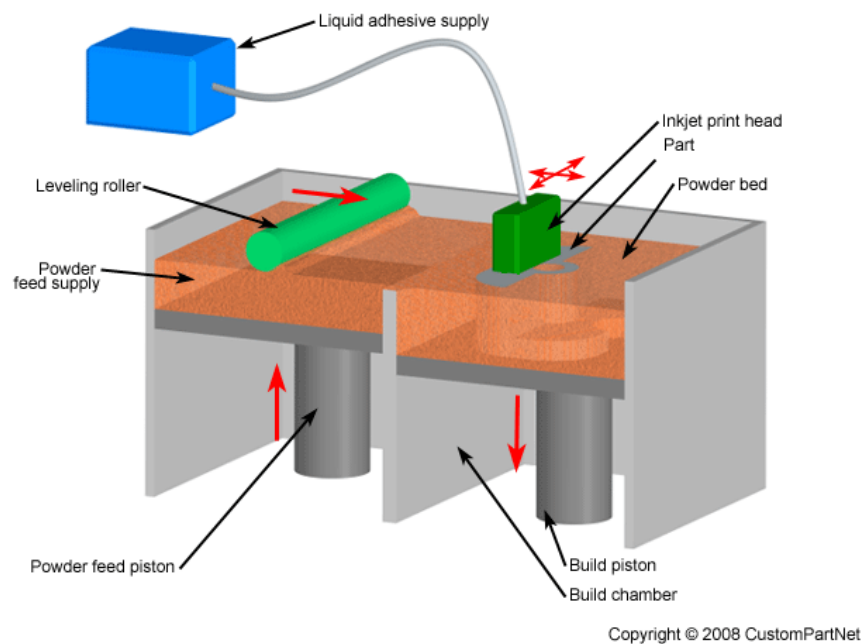
### 2.3.5. 3D tisak (3DP)

Tehnologija 3D-tiskanja predstavlja brz i dostupan način izrade fizičkih prototipa. Kao i kod drugih opisanih metoda, prednost je u izradi probnih 3D-modela neposredno iz računala. Dostupnost brze izrade 3D-modela omogućava bržu i lakšu komunikaciju s partnerima i prodavačima. Program najprije konvertira 3D CAD-nacrt u poprečne presjeke odnosno tanke slojeve. Debljina sloja bira se ovisno o željenoj točnosti. Nakon toga se predmet, odnosno model, izrađuje tako da se u radnom prostoru u programiranim tankim slojevima nanosi specijalni prah i učvršćuje sredstvom za vezivanje, koje se nanosi na prah pomoću uobičajenih komponenti. Nanošenje veziva počinje s donjim slojem i može biti monokromatsko ili u boji. 3D CAD datoteku šaljemo na printer koji je uz pomoć različitih programskih rješenja obrađuje i dijeli na tanke slojeve (*layers*). Pisač zatim u ponavljanom procesu kroz svaki sloj tiska model do krajnje izrade. Brzina ispisa ovisi o traženoj kvaliteti, odnosno debljini sloja, koja se bira. Sličan princip ima i tehnologija *Polyjet* pri kojoj se tekući fotopolimer nanosi kroz glavu, sloj po sloj, gradeći tako traženi model. Trenutno tehnologija *Polyjet* pruža



najbržu i najtočniju izradu, omogućujući odabir materijalnih svojstava izrađenih prototipova.

Prednosti ovog postupka su da mogu jednako uspješno izrađivati prototipovi, funkcionalni dijelovi i alati vrlo složenih oblika, vrlo fleksibilan postupak izrade. Materijali uglavnom nisu otrovni. Imaju visoku preciznost izrade, dobre dimenzijske tolerancije, vrlo glatka površina izrađenih dijelova i alata, mogućnost izrade vrlo tankih slojeva. Glavni nedostatak je da ima ograničene dimenzije izratka, ograničen broj primjenljivih materijala te ograničena brzina izrade.[7]



Slika 5.: Shematski prikaz 3D tiska (3DP)

(preuzeto sa: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>)

### 2.3.6. 3D-MID tehnologija

3D-MID tehnologija izrađuje pravi funkcionalni proizvod. Ova tehnologija ujedinjuje mehaničke i električne funkcije u cjelinu. Prednost 3D-MID tehnologije je ta što je dovoljno precizna i na jako malim površinama čime zadovoljava optimalno iskorištavanja prostora, a težina izrađenih objekata je smanjena. Tehnologija je i ekološki prihvatljiva, omogućava veću slobodu u samom dizajnu, te omogućava velike

uštede.[4] Koristi se za izradu elektroničkih komponenti kako bi se smanjila veličina elektroničkih uređaja, a da pri tome izrađene komponente ne gube svoju funkcionalnost i učinkovitost. Takva tehnologija primjenjuje se u izradi mobitela, automobilske elektronici, te u električnoj i medicinskoj opremi.



Slika 6.: Proizvod izrađen 3D-MID tehnologijom

(preuzeto sa: <http://www.pkt-gmbh.de/en/services/mold-design/>)

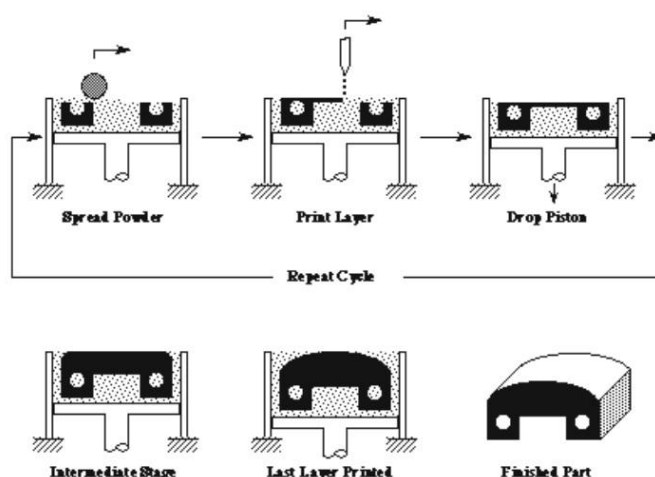
#### 2.4. 3D printeri

Tehnologija 3D printanja razvijena je na MIT-u (Massachusetts Institute of Technology) i relativno je mlada grana brze izrade prototipova. Prvi 3D printer proizveden je 1988. godine, a prvi color 3D printer je proizveden 2000. godine. Krajem 2005. godine predstavljen je High Definition 3D printer (HD3DP), a sredinom 2006. godine isti taj printer je predstavljen i u Zagrebu, Infodata. 3D printeri su vrlo funkcionalni i imaju širok spektar korištenja. 3D printanjem se postiže brza izrada gotovih proizvoda. Pomoću njih moguće je na osnovu nekog dvodimenzionalnog digitalnog zapisa o modelu, stvoriti trodimenzionalnu figuru, fizički izgled, koji je opipljiv i stvaran. Takvi trodimenzionalni zapisi obično se prave u CAD (Computer Aided Design) alatima. Značaj 3D printera je velik, a ogleda se u tome da se pomoću 3D printera izrađuju prototipovi dijelova predmeta u vrlo kratkom periodu, pomoću kojih se vrši testiranje njihovih funkcionalnosti sa drugim dijelovima, oblika, da li proizvod odgovara potrošačima i da li će ispuniti očekivanja. Mnogi stručnjaci smatraju

da će u budućnosti 3D printeri imati veliku ulogu u našim kućanstvima, vršiti će se printanje igračkaka, kućanskih aparata, dijelova za automobile itd. Značaj 3D printera je u tome što njihovom upotrebom smanjujemo troškove na skupim greškama dizajniranja, ostvaruje se bolja i brža komunikacija sa kupcima, izgrađuju se 3D modeli bez otpada što svakako smanjuje troškove proizvodnje te se time utječe na kvalitetu okoliša.

## 2.5. Princip rada 3D printera

3D ink jet printer stvara model nanošenjem slojeva jedan za drugim tako da se na sloj praha nanosi vezivno sredstvo (boja) po poprečnom presjeku objekta, te stvara jedan sloj. Sloj otvrdnjuje kemijskom reakcijom praha i veziva. Postupak se ponavlja do posljednjeg sloja, sve dok pojedini dio nije gotov i spreman za post-procesiranje, čišćenje i postupak očvrćenja. 3D printer pomiče tiskovnu glavu preko podloge od praha na koju printa poprečne presjeke objekta, podatke primljene od softvera. 3D printeri funkcioniraju tako da koriste pokretnu polugu za postavljanje papira te platformu, koja se u malim pomacima podiže za svaki sloj. Valjak širi prah kojega poluga polaže na tiskovnu platformu. Polaže se više materijala po sloju kako bi se osigurao puni sloj gusto zbijenog praha na tiskovnoj platformi. Kad se sloj praha raširi, glava ink jet printera printa poprečni presjek objekta ili donji komad dijela na glatki sloj praha, povezujući ga. Pokretna poluga tada snižava tiskovnu i novi se sloj praha nanosi na vrh. Tiskovna glava printa vezivo na slijedeći poprečni presjek, koji se veže za već isprintane slojeve objekta. Tehnologija ne zahtijeva uporabu čvrstih ili pridodanih potpora tijekom procesa printanja, a sav neiskorišten materijal može se ponovno iskoristiti. Kod 3D printanja točnost modela ovisi o sposobnosti printera da ispušta vezivo na točno određenom mjestu u točno zadano vrijeme.[8]



Slika 7.: Shematski dijagram 3D tiska

(preuzeto

sa:

<http://materijali.grf.unizg.hr/media/TRODIMENZIONALNI%20TISAK.pdf>)

## 2.6. Budućnost 3D tiska

Sigurno je da će 3D tisak promijeniti način na koji se neke stvari proizvode te samim time utjecati na lanac opskrbe. U budućnosti možemo očekivati 3D printere takvih dimenzija da ćemo moći isprintati cijele kuće, a ne samo njene dijelove, u vrlo kratkom vremenskom periodu. Printanje hrane već je isprobano, a planira se usavršavanje je bi to značilo velike pozitivne promjene što se tiče očuvanja okoliša i reduciranja otpada, a negativne što se tiče kvalitete same hrane. Prema nekim procjenama ljudi bi u budućnosti mogli dulje i kvalitetnije živjeti zahvaljujući bio-printerima i isprintanim organima. Uzimajući u obzir da je tehnologija već sada na nivou da printa kožu, organe, pa čak i samo srce, u budućnosti možemo očekivati takav napredak koji će nam omogućiti da živimo i do 30 godina duže. Američki dizajneri usavršavaju 3D isprintani auto, dok NASA testira kako 3D printeri funkcioniraju u svemiru. Uz sve pozitivne strane 3D printanja, nažalost postoje i negativne. 3D tehnologija je svakim danom dostupnija i jednostavnija. Princip samog printanja je jednostavan, pa nije teško nešto

isprintati u svome domu. Ta činjenica može biti odlično iskorištena, ali i zloupotrebljena. Pojedinaac bi mogao isprintati što god, a time i oružje iz kojeg bi se moglo pucati. Tehnologija budućnosti je pred nama, no još se puno mora raditi kako bi se ona usavršila do nivoa kada će ljudi stvarno moći isprintati bilo što, najbolje moguće kvalitete.

## 2.7. Boja

### 2.7.1. Što je boja?

Boja je izražajno, umjetničko i kulturno sredstvo komunikacije. Prisutna je svuda oko nas i nije svojstvo predmeta, već osjetilni doživljaj koji nastaje kada svjetlost određenog spektra pobudi receptore u ljudskom oku. Boju možemo pripisati površini objekta, materijalima, svjetlosnim izvorima i drugim čimbenicima. Boja ima i veliku psihološku moć, pa tako različite boje različito psihološki utječu na promatrača.

Riječ boja općenito podrazumijeva dva pojma:

- Prvi je pojam apstraktne naravi i izražava optički osjećaj koji djeluje na čovjeka, kad vidi neku obojenu tvar.
- Drugi pojam boje je materijalne naravi te označava samu tvar kao nositelja boje, a iskazujemo ga nazivom pojedinih boja: kromovo žutilo, cinober, ultramarin, milory plava i slično. [9]

Doživljaj boje ovisan je o tri faktora:

- spektralnom sastavu svjetla koje pada na promatrani predmet,
- molekularnoj strukturi materijala s kojeg se svjetlo reflektira (ili propušta)
- čovjekovim osjetom boje, putem vidnog sustava i mozga.[7]

Ljudsko oko prihvaća reflektiranu zraku svjetlosti sa obojenog predmeta, svjetlosni signal se pretvara u živčani podražaj, koji se putem živaca prenosi u mozak i doživljava kao osjet boje. Osjet boje u našem mozgu izaziva vidljivi dio spektra, odnosno,

elektromagnetsko zračenje valnih dulja od 380 nm do 750 nm. U mrežnici oka nalaze se dvije vrste receptora, tj. fotosjetljivih stanica koje su živcima povezane sa mozgom. To su:

- Štapići – omogućuju osjet svjetline
- Čunjići – omogućuju osjet boje

Boja je stvar percepcije i razlikuje se od osobe do osobe. Boja je funkcija svjetla. Gdje nema svjetla, neće biti ni boje.[10]

#### 2.7.1.1. Psihofizičke karakteristike boja

Boje imaju tri osnovna svojstva:

- Ton boje – kvaliteta boje određena valnom duljinom svjetlosti, koja u oku izaziva osjet boje. Jednostavnije rečeno, to je svojstvo neke boje kojom se ona razlikuje od sive.
- Stupanj zasićenja – mjera za čistoću boje. Stupanj zasićenosti govori o odsutnosti bijele boje u određenoj boji. Ako je stupanj zasićenja mali, kažemo da je boja blijeda.
- Stupanj tamnoće – sadržaj crne boje u određenoj boji.

#### 2.7.2. Sustavi boja

Postoji osnovna podjela sustava za prikaz boja:

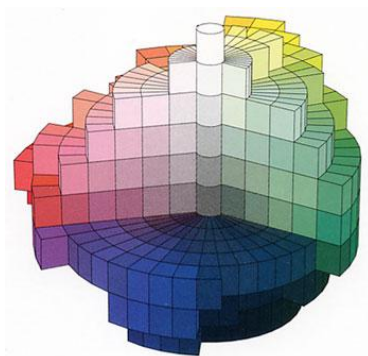
- Sustavi bazirani na psihološkim atributima boje – Munsellov, Natural Color System (NCS)
- Sustavi bazirani na mješanju boje svjetla i pigmenta – Ostwaldov sustav, Pantone
- Objektivni sustavi bazirani na CIE zakonitostima – CIE XYZ, CIE L\* a\* b\*, CIE LUV

### 2.7.2.1. Munsellov sustav boja

Munsellov sustav boja baziran je na trodimenzionalnom modelu opisanog preko Munsellovog stabla boja. Prema Munsellu svaka boja ima osnovne tri karakteristike:

- Nijansa (HUE)
- Vrijednost (VALUE)
- Zasićenje (CHROMA)

Svaka boja u Munsellovom sustavu boja sastoji se od te tri karakteristike. Karakteristike se mogu mijenjati neovisno jedna o drugoj. Neutralne boje smještene su uz vertikalnu liniju koja se zove „neutralna os“, sa crnom na dnu, a bijelom na vrhu osi. Različite nijanse boja smještene su pod različitim kutovima oko neutralne osi.[11]



Slika 8.: Munsellov sustav boja

(preuzeto sa: [http://www.daicolor.co.jp/english/color\\_e/color\\_e01.html](http://www.daicolor.co.jp/english/color_e/color_e01.html))

### 2.7.2.2. Ostwaldov sustav boja

Ostwald je kroz istraživanja prikazao da se kombinacije nekih boja mogu prikazati kao ugodne, tj. skladne, a neke kao neugodne. Sa takvim zaključkom o bojama, Ostwald je postavio temelje svog sustava koji govori da određeni redoslijed boja daje određeni sklad.[12] Iz te teorije nastaje Ostwaldov krug boja, podijeljen na dvadeset i četiri

jednaka dijela nastala od 3 osnovne boje: žute, crvene i plave. Krug započinje žutom bojom za kojom slijede, u smjeru kazaljke na satu, crvena, plava i zelena boja. Boje u krugu koje se nalaze jedna nasuprot drugoj su komplementarne, a skupa pomiješane daju akromatsku boju.



Slika 9.: Ostwaldov krug boja

(preuzeto sa: <http://hr.wikipedia.org/wiki/Boja>)

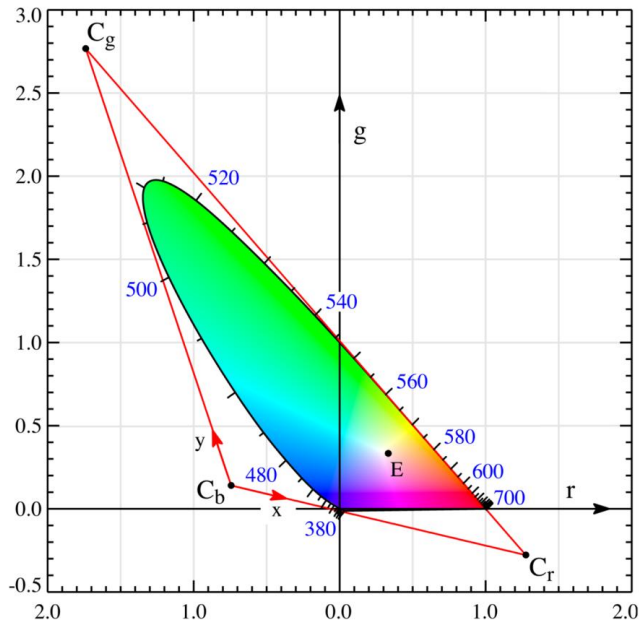
#### 2.7.2.3. CIE sustavi boja

CIE, Internacionalna komisija za osvjetljenje (franc., Commission Internationale de l'Eclairage), je organizacija posvećena razmjeni informacija između zemalja o znanosti i umjetnosti o svjetlu. CIE sustavi opisuju percepciju boja standardnog promatrača.

##### 2.7.2.3.1. CIE XYZ

CIE XYZ je univerzalni sustav boja koji se koristi u znanstvenim istraživanjima i, vrlo često, kako bi se grafički prikazala kromatičnost boja. Ovaj sustav služi kao podloga za definiranje mnogih drugih sustava boja. Izveden je iz CIE RGB sustava koji je formiran putem eksperimentanih istraživanja. Sustav je trodimenzionalan, a na slici je prikazan poprečni presjek cijelog sustava. Točka E predstavlja sredinu sustava u kojoj se nalazi bijela boja.



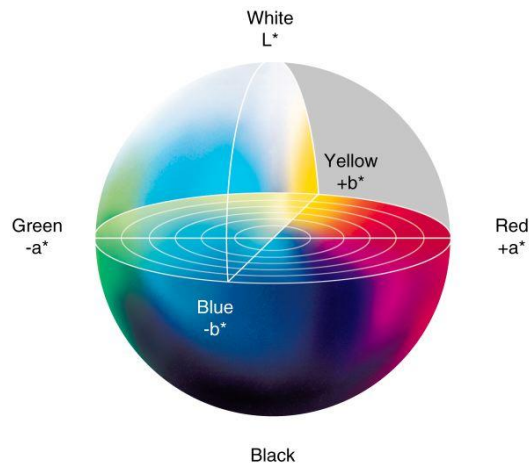


Slika 10.: CIE XYZ sustav boja

(preuzeto sa: [http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space))

#### 2.7.2.3.2. CIE $L^* a^* b^*$

CIE  $L^* a^* b^*$  je sustav boja u kojemu komponenta  $L$  (akromatska os) predstavlja svjetlinu boje, a komponente  $a$  (crveno – zeleno) i  $b$  (žuto-plavo) su kromatske komponente. CIE  $L^* a^* b^*$  sustav sadrži u sebi sve osjete boja, pa njegov gamut prelazi gamute RGB i CMYK sustava boja. Posebnost CIE  $L^* a^* b^*$  sustava je ta da je potpuno neovisan o uređajima na kojima su boje reproducirane.[13]



Slika 11.: CIE L\* a\* b\* sustav boja

(preuzeto sa: <http://disenoypreimpresionmozadr.wordpress.com/2012/03/20/traductor-universal-de-color-espacio-cielab/>)

## 2.8. Metamerija

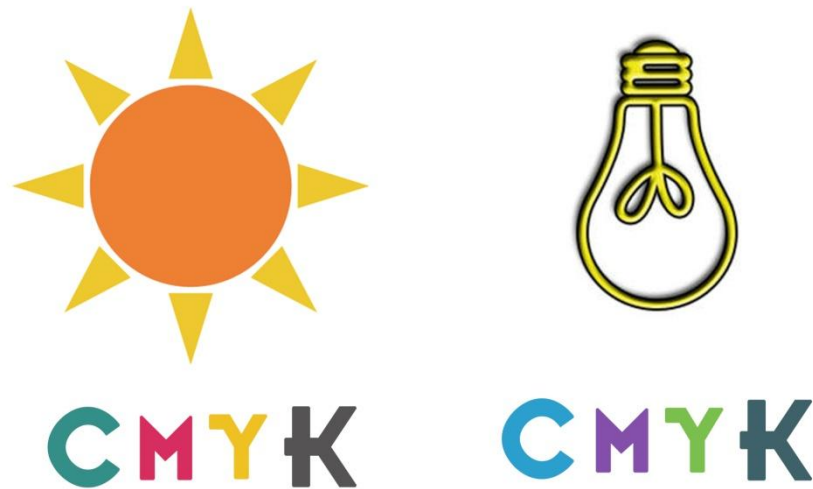
Pri promatranju boja, veliku poteškoću predstavlja osvjetljenje. Uzorak u različitim uvjetima reflektira različitu količinu svjetlosne energije pri određenim valnim duljinama. To znači da jednaku boju pri različitim uvjetima rasvejetete vidimo drugačije. Ta pojava zove se metamerija.

Metamerija se pojavljuje kada dvije boje ostvaruju iste stimulanse pod određenim uvjetima , a različite kod nekih drugih. Poznate su četiri oblika metamerija:

- Metamerija uzrokovana vrstom svjetlosti
- Metamerija uzrokovana promatračem
- Metamerija uzrokovana veličinom uzorka
- Metamerija uzrokovana promjenom geometrije promatranja uzorka

Metamerijske boje su boje koje imaju različite spektrofotometrijske krivulje, a u određenim uvjetima ih vidimo kao iste boje. Pojava metamerizma se koristi pri reprodukciji višebojnih originala, pri miješanju različitih boja rastera uslijed čega nastaje otisak određene boje originala.[14] S druge strane, pojava metamerizma znači da su u

svim uvjetima osvjetljenja jednake samo one boje koje imaju indentičnu spektrofotometrijsku krivulju. Takve boje podudaraju se u svim uvjetima osvjetljenja, dok se boje sa različitim krivuljama mogu podudarati u određenim uvjetima. Metamerija se primjenjuje i u fotografiji, gdje je balans bijele boje (White Balance) upravo primjena metamerije. Recimo da je bijeli papir izložen svjetlošću obične žarulje. U takvim uvjetima papir se čini žutim, no upotrebom opcije White Balance papir ćemo na fotografiji zabilježiti bijele boje. Istraživanja su pokazala da se utjecaj metamerije na boju može izmjeriti u stupnjevima. Ona se može ublažiti ili u potpunosti ukloniti korištenjem standardnih boja, odabirom boja koje ublažavaju metameriju, izbjegavanjem mješanja boja različitih proizvođača i sl.



Slika 12.: Ilustracija metamerije

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

#### 3.1. Vrste osvjetljenja korištene u istraživanju

##### 3.1.1. CIE Iluminant D65

CIE D65 je vrsta osvjetljenja koje imitira vanjsko dnevno svjetlo, a temperatura boje mu je oko 6500 K. Upotrebljava se u kolorimetrijskim istraživanjima kada je potrebno simulirati sunčevu svjetlost. Osim vidljivog dijela spektra, sadrži i nevidljivi UV dio spektra.

##### 3.1.2. A svjetlost (obična žarulja)

U običnim električnim žaruljama važna je upotreba volframove žarne niti. Svjetlost nastaje zagrijavanjem žarne niti pri niskom tlaku ili u potpunom vakumu. Tako dobivena svjetlost je žuto-crvene boje, temperature oko 2700 K. Većina potrošene energije pretvara se u toplinsku energiju, dok se manji dio pretvara u svjetlosnu energiju.

##### 3.1.3. F2 – F11 (Fluorescentne cijevi)

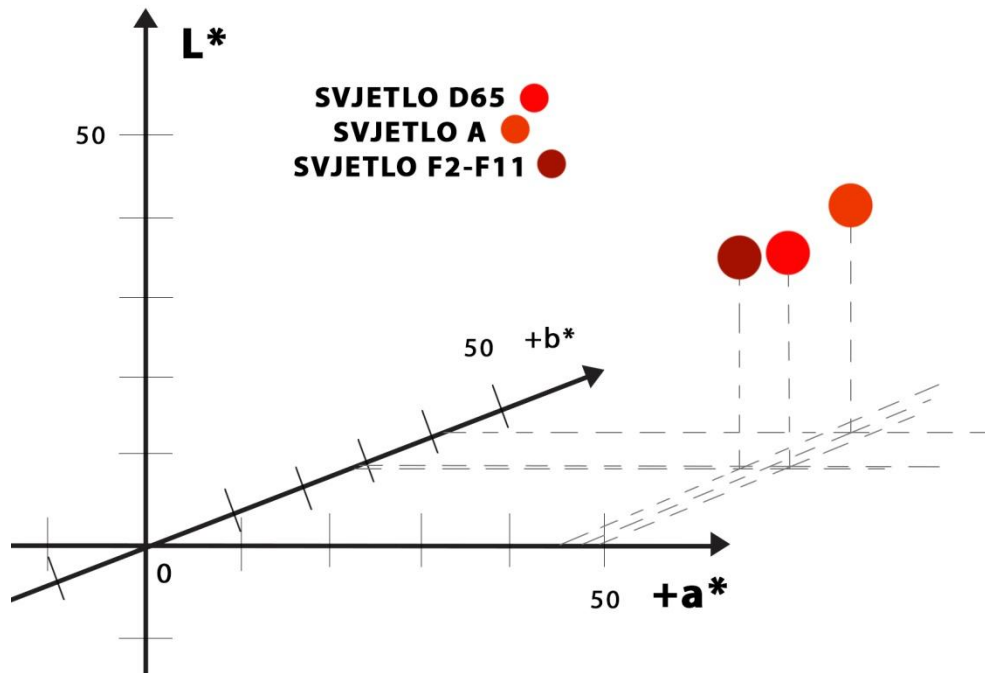
Fluorescentne žarulje svjetlost generiraju izbojem u živinim parama, pri čemu nastaje UV zračenje koje se fosforom zračenjem pretvara u vidljivi spektar. Za razliku od običnih žarulja, većina energije se kod ovakvih žarulja troši na stvaranje svjetlosne energije. Tako nastala svjetlost je toplo bijele boje, temperature oko 3000 K.

#### 3.2. Testni uzorci

Pri testiranju korišteno je šest različitih uzoraka u tri različite boje: crvena, plava i zelena. Uzorci su izrađeni tehnologijom 3D tiska u obliku kvadra i valjka. Prilikom ispitivanja, uzorci jednake boje su nasumično birani i ispitivani.

## 4. REZULTATI I DISKUZIJA

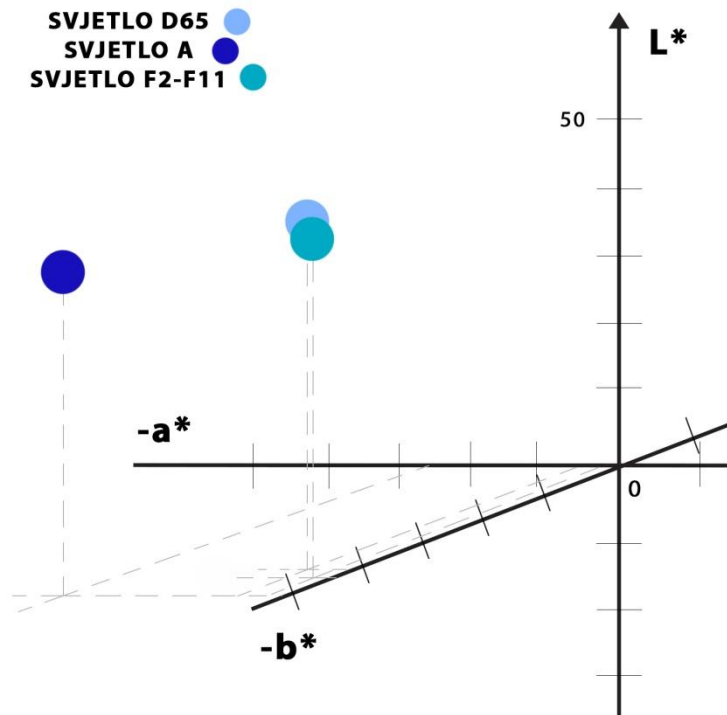
### 4.1. Crveni uzorak



Slika 13.: Prikaz  $L^*a^*b^*$  vrijednosti za crvenu boju

Na temelju dobivenih podataka prilikom ispitivanja na crvenom uzorku, može se zaključiti da su najveća odstupanja u boji ostvarena prilikom simulacije žute svjetlosti obične žarulje. Ako se uzme u obzir da je dnevna svjetost optimano osvjetljenje i ako se ona tretira kao standard, tada su prisutna odstupanja i priikom simulacije svjetlosti flourescentnih cijevi. Iako su odstupanje u tom slučaju manje, prisutno je i jasno vidljivo na grafičkom prikazu.

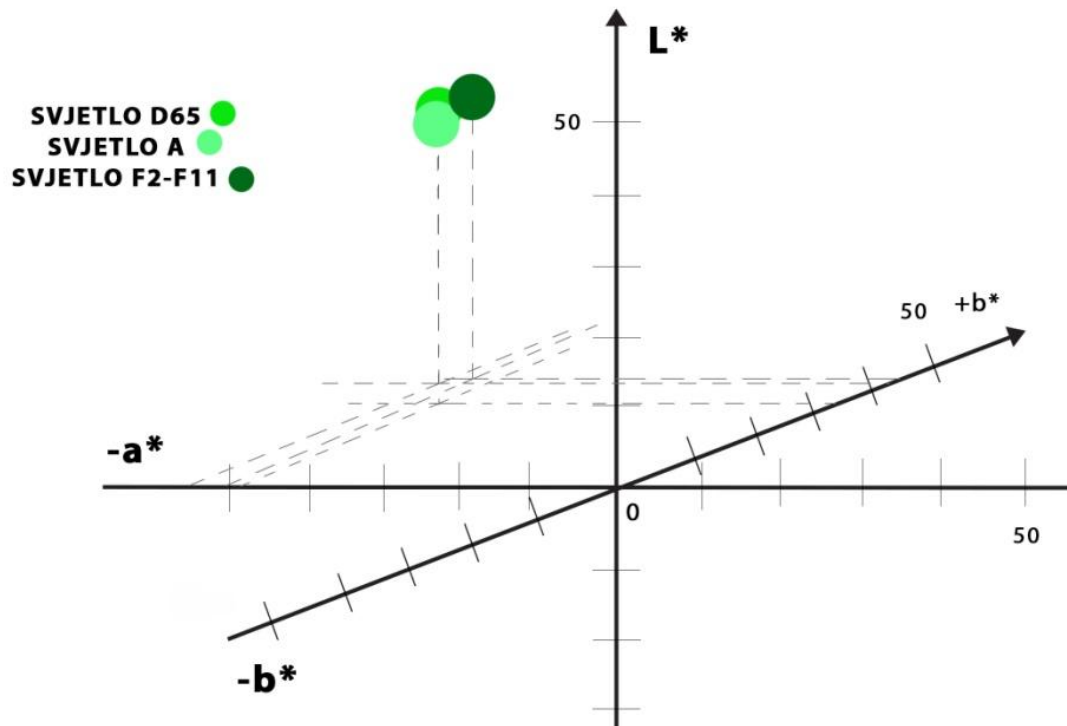
## 4.2. Plavi uzorak



Slika 14.: Prikaz  $L^*a^*b^*$  vrijednosti za plavu boju

Prilikom ispitivanja na plavom uzorku, dobiveni rezultati pokazuju kako je najveća promjena vrijednosti pave boje ostvarena pri simulaciji žute svjetlosti obične žarulje. Slično kao i kod crvene boje, samo što je u ovom sučaju to odstupanje puno veće. Odstupanje vrijednosti boje pri simulaciji svjetlosti fluorescentnih cijevi je manje nego kod crvene boje, ali opet prisutno i jasno vidljivo.

### 4.3. Zeleni uzorak



Slika 15.: Prikaz  $L^*a^*b^*$  vrijednosti za zelenu boju

Ispitivanjem provedenim nad zelenim uzorkom, dobiveni su rezultati koji pokazuju da vrijednosti zelene boje imaju najmanja odstupanja. U sva tri slučaja boja se ponaša približno jednako, a odstupanja su manja nego u prva dva slučaja. Mjerenja su prikazani grafički gdje se vidi koliki je utjecaj metamerije bio na zelenoj boji.

## 5. ZAKLJUČCI

Cilj završnog rada bilo je istraživanje pojave metamerije na objektima nastalim trodimenzionalnom tehnologijom. Iz dobivenih rezultata istraživanja potvrđena je pojava metamerije, odnosno promjene viđenja boje prilikom različitih spektranih sastava svjetlosti. Ta razlika boje bila je najočitija prilikom simulacije žute svjetlosti obične žarulje (svjetlost A). Svi uzorci podvrgnuti ispitivanju dali su jednake rezultate, odnosno, pokazali su najveća odstupanja pri simulaciji žute svjetlosti. Mjerenjima na plavoj boji zabilježeno je najveće odstupanje vrijednosti kod simulacije žute svjetlosti obične žarulje, dok su se pri simulaciji svjetlosti fluorescentnih cijevi vrijednosti manje razikivale od vrijednosti dnevnog svjetla. Mjerenjima na zelenoj boji, zabilježena su najmanja odstupanja od sva tri slučaja. Odstupanja jesu prisutna ali u manjoj količini nego kod plave i crvene boje. Kod crvene boje je zanimljivo to što su odstupanja vrijednosti i za žutu svjetlost i za svjetlost fluorescentnih cijevi približno jednaka. Kod plave i zelene boje, odstupanje svjetlosti fluorescentnih cijevi bilo je puno manje nego odstupanje vrijednosti žute svjetlosti. Kod crvene boje to odstupanje je malo manje. Zaključak istraživanja je taj da se je zelena boja najmanje promjenila prilikom simulacije različitih osvjetljenja, plava boja najviše prilikom simulacije žute svjetlosti, a kod crvene boje odstupanja obje svjetlosti su približno jednaka.



## 6. LITERATURA

- [1.] \*\*\*[http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D\\_Printing\\_Infographic\\_FINAL.pdf](http://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf), *A brief history of 3D printing*, preuzeto 12.08.2014.
- [2.] \*\*\*<http://www.gradimo.hr/clanak/brza-izrada-prototipova/15509>, *Brza izrada prototipova*, preuzeto 01.08.2014.
- [3.] \*\*\*<http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>, *What is Stereolithography?*, preuzeto 01.08.2014.
- [4.] \*\*\*<http://www.3dsystems.com> , preuzeto 12.08.2014.
- [5.] \*\*\*<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>, *Fused Deposition Modeling (FDM)*, preuzeto 03.08.2014.
- [6.] \*\*\*<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>, *Laminated Object Manufacturing (LOM)*, preuzeto 02.08.2014.
- [7.] \*\*\*[http://www.3dhr.net/3dtisak/sto\\_je\\_3d\\_tisak/](http://www.3dhr.net/3dtisak/sto_je_3d_tisak/), *Što je 3D tisak?*, preuzeto 29.07.2014.
- [8.] \*\*\*<http://materijali.grf.unizg.hr/media/TRODIMENZIONALNI%20TISAK.pdf>, *Trodimenzionalni tisak*, preuzeto 29.07.2014.
- [9.] \*\*\*<http://www.studij dizajna.com/tkoscic/boje.pdf>, *Osnovni grafički materijali – grafičke boje*, preuzeto 14.08.2014.
- [10.] Linda Holtzschue (2011.), *Understanding color*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- [11.] \*\*\*<http://munsell.com/about-munsell-color/how-color-notation-works/munsell-color-space-and-solid/>, *Munsell Color Space and Solid*, preuzeto 14.08.2014.
- [12.] \*\*\*<http://www.scribd.com/doc/97662366/teorija-boja>, *Teorija boja*, preuzeto 15.08.2014.

[13.] \*\*\*[http://www.colourphil.co.uk/xyz\\_colour\\_space.shtml](http://www.colourphil.co.uk/xyz_colour_space.shtml), *Introduction to Colour Spaces*, preuzeto 16.08.2014.

[14.] \*\*\*<http://industrial.datacolor.com/support/wp-content/uploads/2013/01/Metamerism.pdf>, *Metamerism*, preuzeto 17.08.2014.

## 7. PRILOZI

Prilog 1.: Tablica za vrijednosti promjene crvene boje pri simulaciji dnevnog svjetla (D65)

	L*	a*	b*
	35,8	49,4	27,97
	35,6	50,2	29,11
	34,9	49,8	28,93
$\Delta$	35,9	49,8	28,67
$\Delta E$	<b>67,4</b>		

Prilog 2.: Tablica za vrijednosti promjene crvene boje pri simulaciji žutog svjetla (svjetlo A)

	L*	a*	b*
	42,27	48,55	40,40
	44,36	48,39	39,62
	41,7	49,33	42,97
$\Delta$	42,77	48,75	40,99
$\Delta E$	<b>76,7</b>		

Prilog 3.: Tablica za vrijednosti promjene crvene boje pri simulaciji svjetlosti fluorescentnih cijevi (svjetlost F2-F11)

	L*	a*	b*
	34,40	47,68	27,17
	35,63	42,29	29,58
	35,08	48,73	28,47
$\Delta$	35,03	46,23	28,40
$\Delta E$	<b>64,58</b>		

Prilog 4.: Tablica za vrijednosti promjene plave boje pri simulaciji dnevnog svjetla (D65)

	L*	a*	b*
	36,16	-2,51	-43,21
	36,97	-2,14	-41,68
	35,59	-2,51	-43,10
$\Delta$	36,24	-2,38	-42,66
$\Delta E$	<b>56,02</b>		

Prilog 5.: Tablica za vrijednosti promjene plave boje pri simulaciji žutog svjetla (svjetlo A)

	L*	a*	b*
	27,83	-24,94	-59,90
	28,52	-24,93	-49,95
	28,68	-24,05	-48,32
$\Delta$	28,34	-24,64	-52,72
$\Delta E$	<b>62,6</b>		

Prilog 6.: Tablica za vrijednosti promjene plave boje pri simulaciji svjetlosti flourescentnih cijevi (svjetlost F2-F11)

	L*	a*	b*
	31,88	-0,06	-44,10
	32,56	-1,92	-41,51
	32,09	-0,02	-43,71
$\Delta$	32,17	-0,66	-43,10
$\Delta E$	<b>53,6</b>		

Prilog 7.: Tablica za vrijednosti promjene zelene boje pri simulaciji dnevnog svjetla (D65)

	L*	a*	b*
	52,56	-53,84	43,25
	53,29	-51,35	40,75
	52,38	-54,36	43,91
$\Delta$	52,7	-53,18	42,63
$\Delta E$	<b>86,15</b>		

Prilog 8.: Tablica za vrijednosti promjene zelene boje pri simulaciji žute svjetlosti (svjetlost A)

	L*	a*	b*
	49,85	-48,63	34,25
	50,00	-48,68	34,25
	50,07	-49,00	34,47
$\Delta$	49,97	-48,77	34,32
$\Delta E$	<b>77,8</b>		

Prilog 9.: Tablica za vrijednosti promjene zelene boje pri simulaciji svjetlosti fluorescentnih cijevi (svjetlost F2-F11)

	L*	a*	b*
	54,08	-49,53	42,16
	53,62	-50,46	42,45
	53,45	-52,78	44,94
$\Delta$	53,71	-50,92	43,18
$\Delta E$	<b>85,6</b>		