

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Matea Janković



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

Smjer: Tehničko – tehnološki

ZAVRŠNI RAD
INTERAKCIJA ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA I
TISKOVNE PODLOGE

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Vesna Džimbeg-Malčić

Student:
Matea Janković

Zagreb, 2015.

SAŽETAK

Svjetlost, kada pada na objekt, s tim objektom i interagira. Dolazi do pojava koje su uvjetovane sastavom i svojstvima svjetlosti i objekta. Interakcije o kojima govorimo su pojave apsorpcije, refleksije i transmisije, a njihovi koeficijenti su svojstva promatranog objekta. Interakcije svjetlosti i materije su jedan od glavnih uzroka obojenja tijela kojeg promatramo, a koji je ovdje predstavljen kao tiskovna podloga i tiskarska boja, odnosno otisak. Kako bismo otiske mogli analizirati u praksi, razvijene su teorije koje uzimaju u obzir utjecaj apsorpcije i / ili raspršenja na tijelo koje se promatra, to jest prikazuju sustav u kojem dolazi samo do apsorpcije (Beer – Lambert sustav) i sustav u kojem su apsorpcija i raspršenje (Kubelka – Munk sustav). Analiza se radi pomoću gustoće slike koja je izvedena iz takvih sustava. Boju, koju vidimo kao rezultat navedenih interakcija, možemo identificirati po krivuljama spektralne refleksije koje prikazuju postotak refleksije na svakoj valnoj duljini spektra vidljivog zračenja.

Ključne riječi:

Svjetlost, materija, apsorpcija, refleksija, transmisija, boja

ABSTRACT

When light touches the object their interaction begins. That leads to phenomenons which depend on structure and properties of light and matter in question. Interactions that we are talking about are those of absorption, reflection and transmission, and their coefficients are properties of the observed object. The light – matter interactions are one of the main causes of color appearance of the objects, which in this case are printing substrates and printing inks. There are two major theories that make possible analyzing them in practice. Those theories take into account absorption and / or scattering of light. In other words, they represent a system in which there is only absorption (Beer – Lambert system) and the one in which we have both absorption and scattering (Kubelka – Munk system). The print analysis is done with picture density, which is derived from equations of these systems. Color, which we see as the result of already mentioned interactions, we can identify by their curves of spectral reflectance. They are showing the relation of reflection percentage on the certain wave lengths of the visible spectrum.

Key words:

Light, matter, absorption, reflection, transmission, color

SADRŽAJ

1. UVOD.....	2
2. RAZRADA TEME.....	3
2.1. Svjetlost	3
2.2. Materija.....	6
2.3. Interakcija svjetlosti i materije i uzroci obojenja	8
2.3.1. Česte tiskovne podloge.....	11
2.3.2. Tiskarske boje	13
2.4. Optički mehanizmi apsorpcije i raspršenja.....	15
2.4.1. Transmitancija i Beer- Lambertov sustav.....	16
2.4.2. Reflektancija i Kubelka – Munk sustav	19
2.5. Obojenje: Refleksijski spektri.....	23
3. ZAKLJUČAK.....	27
4. LITERATURA	28

1. UVOD

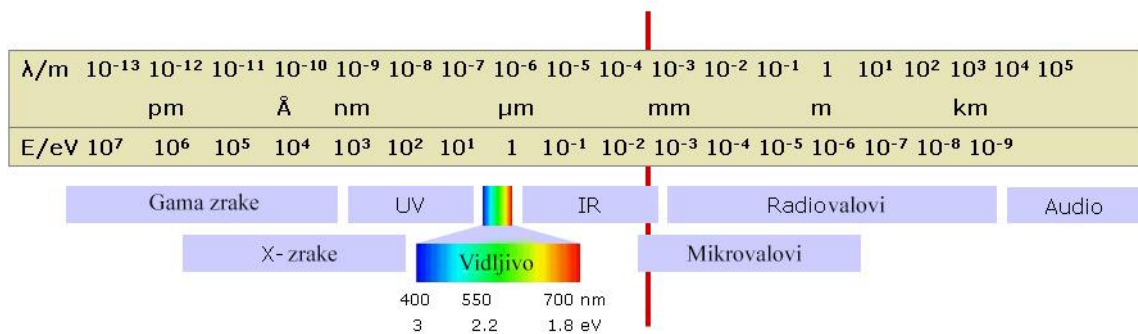
Cilj ovog rada je proučiti i opisati interakciju elektromagnetskog zračenja s tiskovnom podlogom, a time i obojenost predmeta, to jest otiska i same tiskovne podloge.

Boja je psihofizički doživljaj uzrokovan različitim podražajima (stimulusima). Naša percepcija boje ovisi o tri elementa: bijeloj svjetlosti, objektu koji se promatra i o našem vidnom sustavu. U mraku boje ne možemo vidjeti i zato je izvor svjetlosti osnovni preduvjet za viđenje boje. Uzorak možemo promatrati pod različitim izvorima svjetla, koji mogu biti prirodni i umjetni, no ovisno o spektralnom sastavu te svjetlosti, obojenost će se mijenjati. Promatrani objekt također modificira spektralni sastav svjetla svojom bojom i strukturom.

S obzirom na složenost interakcije svjetlosti i tiskovne podloge, da bismo mogli opisati otisak i samu podlogu, potrebni su nam fizikalni modeli. Modeli se odnose na dva sustava: Beer – Lambert i Kubelka – Munk sustav. Beer – Lambert sustav samo apsorbira svjetlost, dok Kubelka – Munk, kao najčešće upotrebljavan model, predstavlja sustav koji i apsorbira i raspršuje svjetlo.

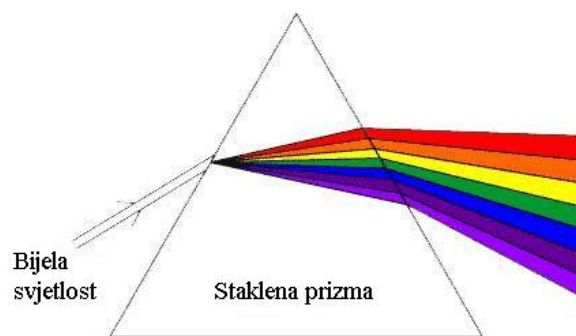
2. RAZRADA TEME

2.1. Svjetlost



Slika 1: Elektromagnetski spektar zračenja [1]

Elektromagnetsko zračenje obuhvaća širok raspon vrijednosti valnih duljina: od gama zračenja (10^{-13} m) do radiovalova (10^5 m) (Slika 1). U ovom radu usredotočit ćemo se na ono zračenje koje je vidljivo prvenstveno našem vidnom sustavu, a zatim i uređajima za pohranu slikovnih informacija. To je bijela svjetlost koja se sastoji od svih boja koje ljudsko oko može percipirati, što se može jasno vidjeti propustimo li snop bijele svjetlosti kroz staklenu prizmu, prilikom čega se svjetlost razlaže upravo na boje vidljivog spektra (Slika 2). Ta pojava naziva se disperzijom svjetlosti.



Slika 2: Disperzija svjetlosti [2]

Raspon valnih duljina vidljive svjetlosti nije strogo definiran jer postoji niz faktora koji na to utječu. Među njima je i ovisnost o intenzitetu stimulansa. Prema CIE (Cambridge International Examinations) specifikacijama taj je raspon u području od 360nm do 830nm. Pri malim valnim duljinama (<400nm) ljudska mrežnica blokira ultraljubičasto zračenje, dok je kod velikih (>700nm) energija fotona preniska da bi ju fotoreceptori u mrežnici percipirali. Da bi te valne duljine postale vidljive, njihovo zračenje mora biti vrlo visoko [3].

Svakoj valnoj duljini pripada odgovarajuća frekvencija, koja je s njom u obrnuto proporcionalnom odnosu.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

λ – valna duljina [nm]

c – brzina svjetlosti $3 \cdot 10^8$ [m/s]

f – frekvencija [Hz]

Tako će plavoljubičasta boja s najmanjom vrijednosti valne duljine imati najveću frekvenciju, a crvenoljubičasta najmanju.

Prema tim specifikacijama, boje, kakve prosječno ljudsko oko vidi na potpuno tamnoj pozadini, definirane su na sljedeći način:

360-430nm	plavoljubičasta
430-480nm	plava
480-490nm	zelenoplava
490-510nm	plavozelena
510-530nm	zelena
530-570nm	žutozelena
570-580nm	žuta
580-600nm	narandžasta
600-720nm	crvena
720-830nm	crvenoljubičasta

Svjetlost je dualne prirode, posjeduje i valna (undulatorna) i čestična (korpuskularna) svojstva. To znači da se prostorom širi kao val, a kada dođe do njenog međudjelovanja s tvarima ponaša se kao roj čestica – fotona. Fotoni su mali paketi energije koje nazivamo kvantima. Energije kvanata svjetlosti proporcionalne su njenoj frekvenciji te se kreću od 1.65 do 3.1 eV.

$$E = h * f \quad (2)$$

h – Planckova konstanta $6.626 * 10^{-34}$ Js

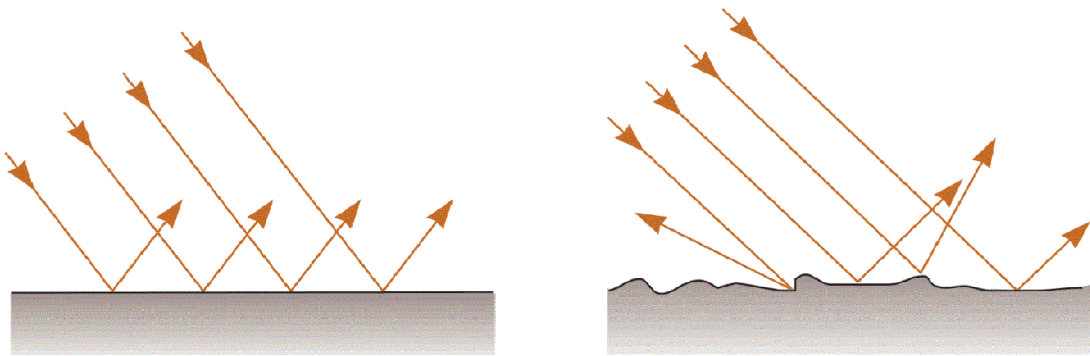
2.2. Materija

Materija, u fizikalnom smislu, jest svaka pojavnost u svemiru koja čini njegove dijelove te se očituje kroz tvar, valove, energiju i informaciju [4]. Tvar, kao organizirani skup čestica, može postojati u obliku slobodnih atoma (npr. He), slobodnih molekula (npr. H₂), kao nakupine atoma ili molekula, kao atomski / ionski / molekularni kristali itd. Većina materijala koji nas okružuju i s kojima se susrećemo u svakodnevnom životu mnogo su kompleksnije strukture od čistih elemenata i spojeva. Dvije su posljedice takve građe:

1. Mjerenje optičkih svojstava objekata svakodnevno osnovnim načelima je nepraktično, ako ne i nemoguće. Svojstva se zato moraju mjeriti direktno ili indirektno [3].
2. Svjetlost reflektirana od većine takvih materijala ne ovisi o kutu gledanja, kao što je to slučaj kod čiste, visoko uređene kristalne krutine [3].

Strukturna i kompozicijska nasumičnost čini optička svojstva tih materijala izotropnima, jer nema uređene interferencije ili difrakcije od svih atoma i molekula. Zbog te neuređenosti sustava, difuzna refleksija je dominantan proces koji se odvija na površini materijala. To znači da u različitim smjerovima materijal pokazuje jednaka svojstva jer nema doprinosa svih atoma i molekula kao kod uređenih kristalnih struktura. Objekti o kojima govorimo ne reflektiraju niti transmitiraju svjetlost izotropno u pravom smislu riječi, odnosno ipak jesu ovisni o slučaju i kutu promatranja. No, njihova nasumičnost prema optičkoj izotropiji pomaže našem vidnom sustavu u vizualnoj percepciji takvog objekta. Iako zračenje reflektirano s površine materijala ne ostaje konstantno dok se mi krećemo i promatramo ga iz različitih kutova, ono se niti ne mijenja drastično. Ovo uvelike doprinosi našoj percepciji i pomaže nam da održimo stalan izgled nekog objekta.

Kada bismo promatrali materijal uređene kristalne strukture, dominirala bi zrcalna refleksija koja zahtjeva zrcalno glatku površinu od koje se svjetlost odbija. Tada se sve zrake odbijaju pod istim kutom (Slika 3).

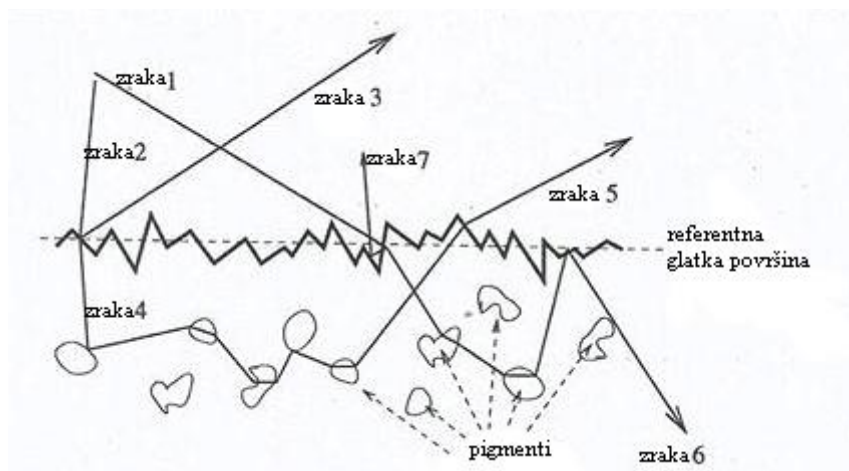


Slika 3: Zrcalna (lijevo) i difuzna (desno) refleksija [5]

2.3. Interakcija svjetlosti i materije i uzroci obojenja

Djelovanje elektromagnetskog zračenja vidljivog dijela spektra na materiju, u ovom slučaju na tiskovnu podlogu i / ili bojila, očituje se na mnogo načina, kao što je prikazano na Slici 4. Doživljaj slike uvjetovan je sastavom svjetlosti i tiskovne podloge.

Svjetlost dolazi do površine tiskovne podloge (upadne zrake 1 i 2) i djeluje na njenu površinu i unutrašnjost.



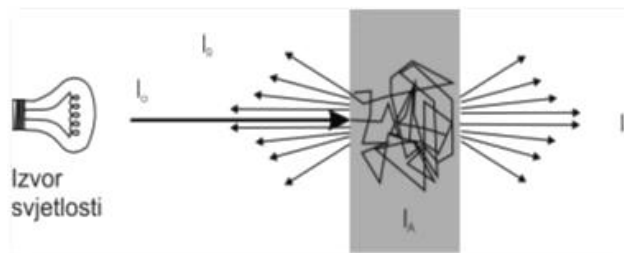
Slika 4: Interakcija svjetlosti i tiskovne podloge [3]

Dolazi do površinske refleksije (zrake 3 i 7), koja može biti i višestruka (zraka 7). Refleksija koja se odvija na glatkim (zrcalnim) površinama naziva se zrcalna refleksija, a difuzna refleksija je ona koja se odvija na hrapavim, teksturiranim površinama. Zrake se odbijaju pod kutom jednakim upadnome uzevši u obzir orijentaciju dijela površine na koju padaju (i okomice na tu površinu). Difuzno reflektirane zrake odbijaju će se u svim smjerovima. Dio zračenja koji je dospio u unutrašnjost podloge (zrake 4, 5, 6) bit će raspršen (zraka 4 i 6) zbog sudara s raznim česticama u podlozi, nakon čega će ili izaći iz sustava – unutrašnja refleksija (zraka 5) ili će se apsorbirati u podlogu (zraka 6). Apsorpcija nastaje transmisijom elektromagnetskog zračenja u tiskovnu podlogu, te se

pretvara u toplinu ili druge oblike energije (zračenja). Određeni dio svjetla nesmetano će proći kroz podlogu, bez promjene valne duljine – transmisija.

Interakciju elektromagnetskog zračenja i materije opisujemo refleksijom, apsorpcijom i transmisijom, a za njih vrijedi zakon očuvanja energije. To znači da ono što je ušlo u sustav iz njega mora i izaći (Slika 5).

$$I_0 = I_R + I_T + I_A \quad (3)$$



Slika 5: Zakon očuvanja energije pri interakciji svjetlosti i materije [6]

Sve pojave interakcije odvijaju se istovremeno, a udio pojedinih pojava ovisi o svojstvu objekta. Definirana su tri omjera, od kojih svaki odgovara jednoj pojavi, kako bismo mogli opisati svojstva objekta.

Faktor refleksije, reflektancija, je omjer upadnog zračenja na neku površinu i zračenja reflektiranog s te površine.

$$R = \frac{I_R}{I_0} \quad (4)$$

Faktor transmisije, transmitancija, je omjer upadnog zračenja na neku površinu i zračenja transmitiranog kroz tu površinu.

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (5)$$

Faktor apsorpcije, apsorptancija, je omjer upadnog zračenja na neku površinu i zračenja apsorbitiranog u tu površinu.

$$A = \frac{I_A}{I_0} \quad (6)$$

Želimo li jednadžbu (3) izraziti preko ovih veličina, sve što moramo napraviti jest podijeliti ju sa snopom upadne svjetlosti, I_0 . Tada dobivamo:

$$1 = R + T + A \quad (7)$$

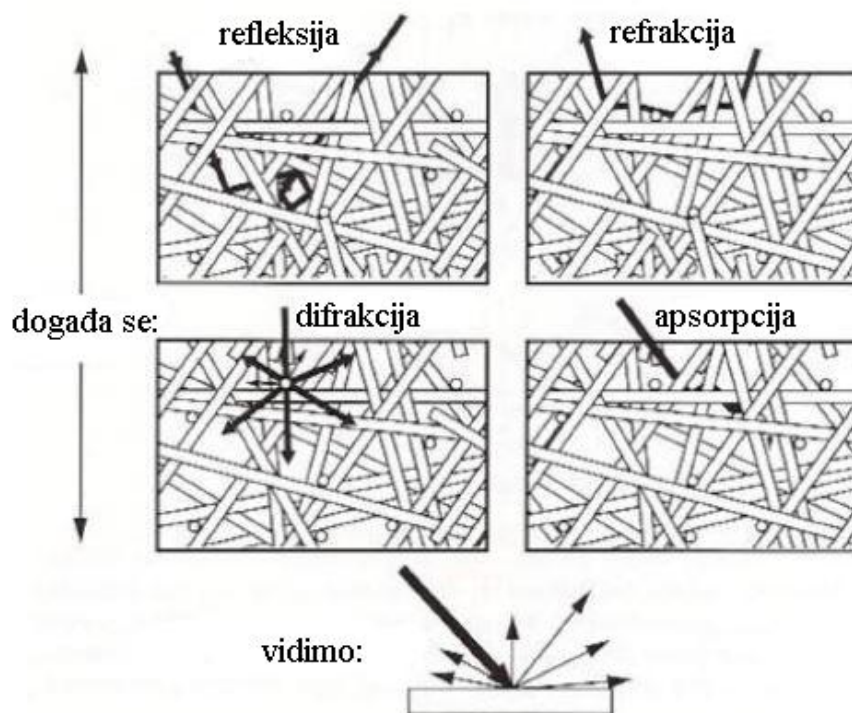
Zbroj reflektancije, transmitancije i apsorbancije uvijek je jednak 1, izraženo u postotcima, iznosi 100%, što se odnosi na svo zračenje koje pada na podlogu.

2.3.1. Tiskovne podloge

Kako bismo bolje razumjeli interakcije: transmisiju, refleksiju i apsorpciju, promotrimo njihove razlike i djelovanje na nekoliko različitih tiskovnih podloga koje se često upotrebljavaju u tisku.

Papir

Papir je porozni materijal izrađen od celuloznih vlaknaca koji se međusobno isprepliću i tvore mrežastu strukturu. Najčešća je podloga za tisak. Papir svjetlosne zrake može apsorbirati, reflektirati i propuštati. Svjetlost koja prodire u papir bit će raspršena u svim smjerovima jer se susreće s kompleksnom strukturom mreže vlaknaca, čestica punila i zraka. Od vlaknaca i čestica punila zrake će se reflektirati ili prodirati u celulozu, gdje se mogu apsorbirati ili lomiti (refrakcija) u drugom smjeru (Slika 6). Nakon niza interakcija, svjetlost stiže na površinu papira i difuzno se reflektira, što mi percipiramo kao bijelu površinu.



Slika 6: Svjetlost u papiru [6]

Različite vrste papira različito reagiraju s elektromagnetskim zračenjem te njihov odabir najviše ovisi o onome što se tiska. Mogu biti napravljeni od mehaničke ili od kemijske pulpe.

Papiri s drvenjačom sadrže i lignin, koji oksidacijom tamni te papir poprima žućkastosmeđu boju. Mehanička pulpa (s udjelom drvenjače) koristi se većinom za izradu kartona i ljepenke, koji, obzirom na svoju debljinu (gramaturu), imaju znatno veći opacitet (neprozirnost) od papira. To je tako zahvaljujući puno manjoj transmisiji svjetlosti kroz materijal, koja je proporcionalna duljini puta koju svjetlost mora preći. Želimo li ukloniti lignin, to činimo kemijskim reakcijama, a za dodatno povećanje svjetline pulpa se izbjeljuje.

Reflektancija na noviskom papiru iznosi oko 60%, dok većina drugih papira za tisak (bijeljeni) imaju reflektanciju 60-70%, a oni najsvjetliji oko čak 90% [3].

Reciklirani papir sadrži znatno više čestica nečistoća i manja vlakanca, što povećava količinu raspršenih i apsorbiranih zraka svjetlosti.

Metali

Metali se sastoje od polikristala. Svaki kristal u njegovoj strukturi ima drugačiju orijentaciju. Većina metala reflektira sve valne duljine vidljivog dijela spektra, bez selekcije, što im daje sivkastu boju. Postoje iznimke, kao što su bakar sa svojom crvenkastožutom bojom i zlato sa žutom, koji selektivno apsorbiraju dijelove vidljivog spektra zračenja.

Polimeri

Najpoznatiji polimeri su plastika i sintetička vlakna kod kojih je površinska refleksija većinskim dijelom neselektivna, a unutrašnja refleksija uvjetovana je pigmentima koji su korišteni pri bojanju plastike/vlakana.

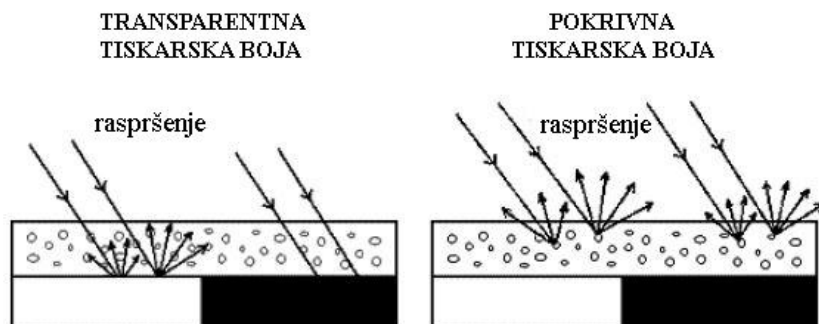
2.3.2. Tiskarske boje

Tiskarske boje su disperzni sustavi koji se sastoje od koloranta, punila, veziva, sušila i aditiva [7]. Koloranti mogu biti pigmenti i / ili bojila. Pigmenti su netopivi u vodi i vezivima u kojima se dispergiraju, a nasuprot njima stoje topiva bojila.

Pigmenti daju obojenje boji zbog selektivne apsorpcije i refleksije. Bijeli pigmenti reflektiraju gotovo cijeli vidljivi spektar, crni ga apsorbiraju, a obojeni jedan dio apsorbiraju dok drugi reflektiraju. Bijeli pigment je najčešće titan dioksid, TiO_2 , a žuti i crveni su oksidi željeza.

Dobra tiskarska boja mora imati dobro svojstvo apsorpcije, a slabije izraženo svojstvo raspršenja. Svjetlost koja na nju pada djelomično se apsorbira u molekulama bojila / pigmenta, a dio prolazi kroz sloj boje do papira, gdje se zatim većina svjetla reflektira natrag u sloj boje. Tako ostvaruje dvostruki prolaz kroz boju te povećava apsorpciju svjetla u molekulama bojila. Tada ponovno dolazi do površine otiska odakle se reflektira – i tek to je onda reflektirana svjetlost koju mi vidimo (I_R).

Ovisno o tiskovnoj podlozi na koju tiskamo, i o raspršenju svjetlosti na promatranom uzorku, razlikujemo transparentne i pokrivne boje. Pokrivnost (= opacitet, neprozirnost) je svojstvo pigmenta, to jest njegova sposobnost da pokrije neku tiskovnu podlogu nakon što se dispergira u vezivu i jednoliko nanese na podlogu. Većina tiskarskih boja ima dovoljnu moć apsorpcije i raspršenja tako da je potreban tanak nanos boje koji će u potpunosti prekriti boju podloge. Potpuna pokrivnost je slučaj do kojeg dolazi kada se od otiska reflektira ista količina svjetla koja je i ušla u sustav, bez obzira na reflektanciju papira (podloge). Opacitetom se postiže željeni kontrast na otisku. Razlika u interakciji svjetla s transparentnom i s pokrivnom bojom prikazana je na Slici 7.



Slika 7: Raspršenje kod transparentne i kod pokrivne boje [8]

Transparentne, procesne boje su cijan, magenta, žuta i crna (CMYK). One sadrže male, transparentne čestice pigmenata i koriste se za tisak na bijele podloge. Svjetlost prolazi kroz nekoliko tankih slojeva (1-3 μm) otiska i dolazi do podloge od koje se reflektira. Kod ovakvih boja, raspršenje svjetla od čestica pigmenata je nepoželjno te se ono odvija na podlozi.

Pokrivne, spotne boje jesu one koje nisu CMYK. Koriste se za tisak na podloge koje nisu nužno bijele boje jer njihova boja ne utječe na izgled otiska. Svjetlost dolazi samo do površine otiska, odakle se reflektira. Raspršenje se odvija na česticama pigmenata. Neprozirnost (opacitet) je vrlo bitna karakteristika ovakvih boja. Za postizanje opaciteta, dodaju se neprozirni pigmenti kao što je titan dioksid.

2.4. Optički mehanizmi apsorpcije i raspršenja

Komercijalizacijom grafičke industrije pojavljuje se potreba za analizom slike te se razvijaju fizikalni modeli za praktičnu upotrebu. Oni uzimaju u obzir apsorpciju svjetla u kolorantima i raspršenje u tiskanicama. Beer-Lambert teorija predstavlja sustav koji samo apsorbira, a ne raspršuje svjetlost. Uz nju postoji još jedna teorija koja uzima u obzir i raspršenje svjetla, zbog čega je ona najčešće i upotrebljavana – naziva se Kubelka-Munk teorijom. Ovim teorijama omogućeno je i računanje optičke gustoće slike, odnosno refleksije i transmisije.

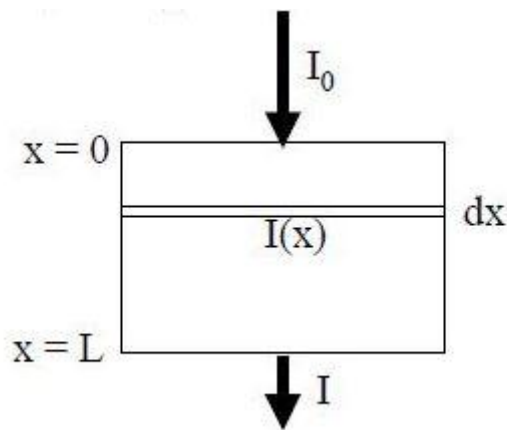
2.4.1. Transmitancija i Beer- Lambert sustav

Tijekom transmisije svjetla kroz objekt dolazi do raspršenja i apsorpcije svjetla. Prolaskom svjetlosti kroz materijal, ono nailazi na čestice s kojima se sudara te promjeni svoj smjer – rasprši se. Tada ono može doći do druge strane objekta i izaći iz njega, što je posebno karakteristično za transparentne materijale, no događa se i u velikoj većini drugih slučajeva, samo u manjoj količini. Raspršenjem se svjetlost može i vratiti na površinu materijala kao reflektirana zraka, čime će se povećati reflektancija, a time i smanjiti transmitancija.

Ukoliko se zrake ne raspršuju, apsorbiraju se. Čestice upijaju svjetlost i sprječavaju njen prolazak kroz objekt i tako smanjuju transmitanciju. Apsorpcija se odvija u molekulama ili dijelovima molekule koji apsorbiraju svjetlo – kromoforima – i koji se nalaze u / na tiskovnoj podlozi.

Kromofor je nezasićena atomska skupina koja uzrokuje obojenost organskih spojeva. Njenim uvođenjem u molekulu spoja (većinom akromatskoga) apsorpcija elektromagnetskog zračenja pomiče se iz ultraljubičastog u vidljivi dio spektra, što spoju daje obojenost. Takav spoj naziva se kromogen. Uporabna svojstva u smislu bojila dobiva tek dodatkom aoksokromne skupine koja omogućava njegovo vezanje za materijal te utječe na promjenu područja apsorpcije i produbljivanje boje [9].

Mogućnost apsorpcije raste porastom broja molekula boje u jediničnom volumenu, tj. porastom koncentracije. Koncentracija se označava malim slovom c i izražava se u molima po litri, gramima po centimetru kubnom i dr. Količina transmitirane svjetlosti, I_T , opada povećanjem debljine materijala, L , kroz koje svjetlost prolazi. Rješavanjem ove diferencijalne jednadžbe (8) prvog reda dobijemo mnogo poznatiji izraz Beer-Lambertovog zakona, koji je prikazan na Slici 8.



Slika 8: Beer - Lambertov sustav [11]

$$-dI/dx = KI \quad (8)$$

$$-dI/I = Kdx \rightarrow -\ln(I/I_0) = KL \rightarrow I/I_0 = e^{-KL} \quad (9)$$

Uveden je koeficijent apsorpcije, K , kao konstanta vjerojatnosti da će foton biti apsorbiran u molekulu bojila. Koeficijent K je karakteristika materijala koji interagira sa svjetlošću i ovisi o koncentraciji, c , i ekstinkciji, ϵ (njihovom umnošku). Izražava se mjernom jedinicom [cm^{-1}] (jednadžba (10)).

$$K = \epsilon * c \quad (10)$$

Beer-Lambertov zakon vrijedi samo za sustave u kojima nema raspršenja. Može se izraziti preko prirodnog logaritma, kao u jednadžbi (9) ili pomoću jednadžbe (11) s logaritmom baze 10:

$$I = I_0 * 10^{-\epsilon c L} = [cd]$$

ili
$$T = 10^{-\epsilon c L} \quad (11)$$

gdje je vrijednost, ϵ , temeljno svojstvo kromofora – koeficijent ekstinkcije.

Ove jednadžbe mogu biti izražene i u obliku logaritma transmitancije (jednadžba (12)).

$$\log (T) = -\epsilon cL \quad (12)$$

Pomoću jednadžbe (12) možemo izraziti optičku gustoću (gustoća transmisije / zacrnjenja), tj. apsoranciju materijala, A:

$$-\log (T) = \epsilon cL = D_T = A \quad (13)$$

Takav oblik jednadžbe korisniji je kao mjera zacrnjenja nego što je transmitancija (T) jer naše oko odgovara na svjetlo na način sličan logaritamskom.

Beer-Lambertov zakon je, dakle, relacija ovisnosti apsorpcije svjetla o svojstvima sredstva kroz koje svjetlost prolazi.

2.4.2. Reflektancija i Kubelka – Munk sustav

Promatramo li objekt koji i apsorbira i raspršuje svjetlost, on će imati karakterističnu reflektanciju, definiranu količinom kromofora, debljinom objekta i količinom raspršenja u objektu. Za primjer se može uzeti papir reflektancije R_g . Boja tada ima reflektanciju R ($R = I_R / I_0$), koja je povezana s reflektancijom papira i s transmitancijom, T , preko jednadžbe (14).

$$R = T^2 R_g \quad (14)$$

Kao što kod Beer – Lambert sustava imamo gustoću transmisije, u ovakvom sustavu javlja se gustoća refleksije i definirana je jednadžbom (15). Korisna je kod opisivanja svijetlih i tamnih dijelova otiska.

$$D_R = -\log(R) \quad (15)$$

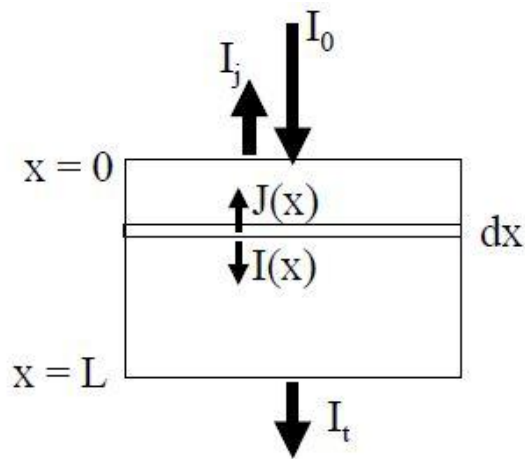
Izuzmemo li iz jednadžbe logaritam, dobivamo temeljnu jednadžbu rasterske reprodukcije (16), kako slijedi:

$$\begin{aligned} D_R = -\log(R) &\rightarrow D_R = -\log(T^2 R_g) \rightarrow D_R = -\log(T)^2 - \log(R_g) \rightarrow \\ D_R = -2\log(T) - \log(R_g) &\rightarrow D_R = 2D_T + D_g \rightarrow \\ D_R = 2\epsilon cL + D_g &\quad (16) \end{aligned}$$

Ovdje je D_g gustoća refleksije tiskovne podloge (papira), a c količina koloranata u otisku. Povećanjem koncentracije, c , povećava se i gustoća refleksije D_R , a slika postaje zasićenija.

Ovakav sustav, koji objedinjuje apsorpciju i raspršenje prikazan je Kubelka – Munk teorijom, koju vidimo na Slici 9. Originalno je bila namijenjena analizi filmova boje, no sasvim dobro funkcionira i za papire. Međutim ne daje dobre rezultate za bilo kakav papir: nije pogodna za obojene, niti za pretamne, nebijeljene papire, kada je količina apsorpcije prevelika. U idealnom slučaju, teorija se koristi za promatranje difuzne refleksije papira osvijetljenog difuznim monokromatskim svjetlom.

Najbolje je primjenjivati ju za materijale kod kojih se više od 50% svjetlosti reflektira a manje od 20% transmitira [10].



Slika 9: Kubelka - Munk sustav [11]

U Kubelka - Munk sustavu, osim koeficijenta apsorpcije, K , uveden je i koeficijent raspršenja, S . Oba koeficijenta imaju istu mjernu jedinicu, inverznu dužinu (npr. $[\text{cm}^{-1}]$).

Uzmimo za primjer materijal zanemarivog sjaja, koji apsorbira i raspršuje svjetlo, a čija je debljina L i reflektancija R . Upadom svjetlosti na taj materijal, zbog raspršenja su definirani smjerovi snopa svjetlosti, prema gore (J) i prema dolje (I). Snop zračenja I ima pozitivnu vrijednost kada se kreće prema dolje a snop J je pozitivan kada se kreće prema gore. Horizontalan smjer raspršenog zračenja je zanemaren jer je pretpostavljeno da su lateralne dimenzije materijala, mnogo veće od puta koji treba snop preći prije nego se sudari s nekom česticom u materijalu ($1/K$ i $1/S$) kako bi se apsorbirao ili raspršio u materijalu. S obzirom na tu pretpostavku, svjetlost ne izlazi iz rubova materijala zbog horizontalnog raspršenja jer dok dođe do rubova, već je cijela ili apsorbirana ili raspršena u drugom smjeru.

Kubelka i Munk su predložili pojavu raspršenja kao proces prvoga reda, kao što je slučaj kod sustava apsorpcije. Razlika je u tome što je sada, uz koeficijent apsorpcije uključen i koeficijent raspršenja te smjer snopa zračenja: gore i dolje. Sada diferencijalna jednačba koja opisuje promjenu količine zračenja izgleda ovako:

$$dI = -KIdx - SIdx + SJdx \quad (17)$$

U ovoj jednadžbi (17), član +SJdx pokazuje nam da je snop koji se kreće prema gore raspršen i on se zbraja sa snopom smjera prema dolje (-SIdx). Kako bismo opisali stopu promjene u snopu prema gore, dodajemo još jednu diferencijalnu jednadžbu (18).

$$dJ = -KJdx - SJdx + SIdx \quad (18)$$

U izrazu za snop prema dolje, uzmemo li da je I na dnu materijala jednak I_T , možemo definirati transmitanciju T.

$$T = \frac{I_T}{I_0} \quad (19)$$

Isto to možemo napraviti i sa snopom prema gore te tako definirati reflektanciju.

$$R = \frac{J_R}{I_0} \quad (20)$$

Kubelka i Munk proslavili su se jer su uspjeli riješiti diferencijalne jednadžbe (17) i (18) uz očuvanje izraza za transmitanciju (19) i reflektanciju (20).

Zapamtimo da su funkcije za R i T funkcije od samo četiri parametra u sustavu:

S – koeficijent raspršenja

K – koeficijent apsorpcije

L – debljina sloja

Rg – reflektancija materijala iza sloja (ako postoji)

$$R = f_1(S, K, L, Rg) \quad (21)$$

$$i \quad T = f_2(S, K, L, Rg) \quad (22).$$

Oblik funkcija f_1 i f_2 ovisi o graničnim vrijednostima sustava.

Opći oblik rješenja jednadžbi može biti prikazan na sljedeći način:

$$R = \frac{1 - Rg [a - b \operatorname{ctgh}(bSL)]}{a - Rg + b \operatorname{ctgh}(bSL)} \quad (23)$$

$$T = \frac{b}{a \sinh(bSL) + b \cosh(bSL)} \quad (24)$$

uz

$$a = \frac{S+K}{s} \quad (25)$$

$$b = \sqrt{a^2 - 1} \quad (26)$$

Sinh(x), cosh(x), tanh(x) i coth(x) su trigonometrijske funkcije hiperbole i izračunavaju se preko izraza koji slijede ((27)-(30)).

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (27)$$

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (28)$$

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} \quad (29)$$

$$\operatorname{ctgh}(x) = \frac{\cosh(x)}{\sinh(x)} \quad (30)$$

Kao što je prije spomenuto, gustoća slika može se definirati preko negativnog logaritma od T i R, za gustoću transmisije (jednadžba (31)) i gustoću refleksije (jednadžba (32)). To su empirijske definicije promatrane svjetline / zacrnjenja materijala.

$$D_T = -\log(T) \quad (31)$$

$$i \quad D_R = -\log(R) \quad (32)$$

S izrazom za gustoću transmisije smo se već susreli u Beer-Lambertovom sustavu, no sada ona nije jednaka apsorbanciji, $A = \epsilon c L$, jer ona u takvom obliku vrijedi samo kod sustava u kojem nema raspršenja.

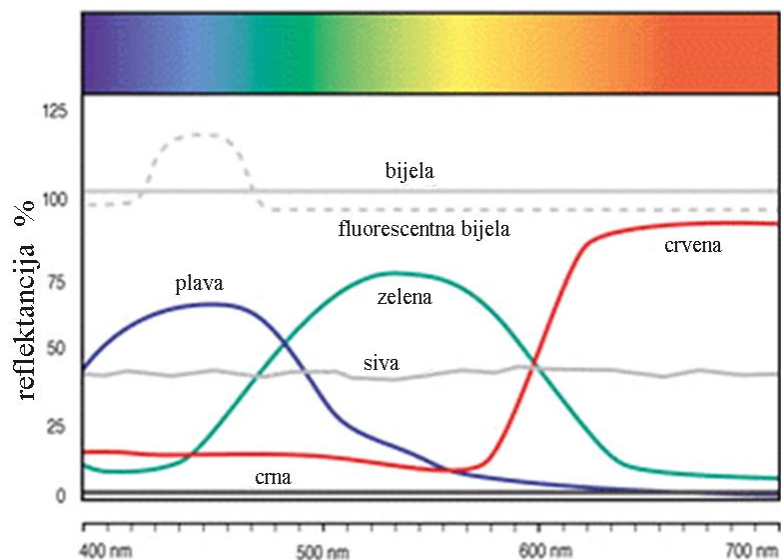
2.5. Obojenje: Refleksijski spektri

Priroda raspršene svjetlosti uvelike utječe na boju i stupanj obojenosti predmeta. Ono je veza između optičke gustoće, D , i koncentracije koloranata u sustavu, c . Uzmimo za primjer Beer – Lambertov transmissijski sustav objašnjen jednačbom (8). U njemu je gustoća, D , definirana kao $-\log(T)$ i proporcionalna je umnošku ekstinkcije $-\epsilon$, koncentracije c , i debljine promatranog sloja L . Ovdje je pokrivenost jednaka umnošku koncentracije i debljine sloja i izražava se u gramima po metru kvadratnom. Udvostručimo li pokrivenost, udvostručit ćemo gustoću slike.

Boja je psihofizički doživljaj, pa kako je onda točno i na znanstven način identificirati? Odgovor na to pitanje daju refleksijski spektri, odnosno spektralne krivulje, svaka od kojih je karakteristična za određenu boju.

Refleksijske krivulje su kao otisci prstiju. Svaka kemijska različitost pigmenta ili bojila ima specifičan spektrofotometrijski otisak prsta [12].

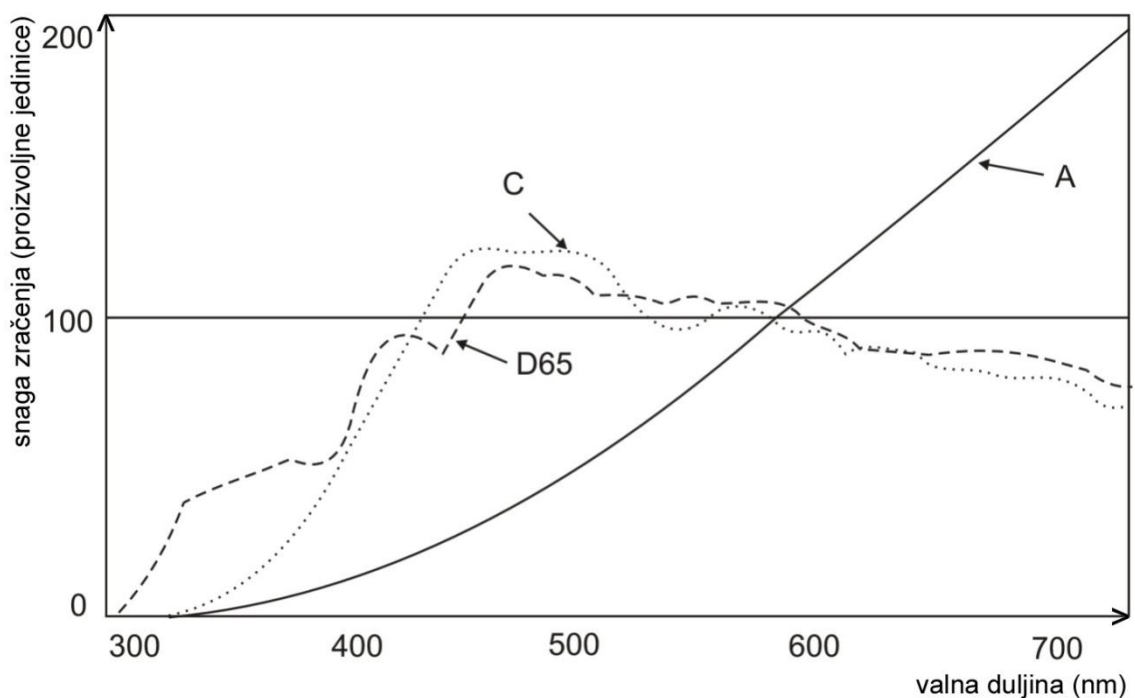
Na osi ordinata spektralne krivulje nalazi se postotak refleksije, odnosno reflektancija neke boje, a na osi apscisa su valne duljine vidljivog dijela spektra (Slika 10).



Slika 10: Krivulje spektralne refleksije [12]

Pigmenti u tiskarskoj boji selektivno apsorbiraju samo određene valne duljine, dok ostale reflektiraju. Tako, na primjer, idealna bijela boja reflektira sve valne duljine svjetlosti koja na nju pada, dakle, njena reflektancija je stopostotna ili je vrlo blizu tome. Njena suprotna, crna boja, u idealnom slučaju apsorbira sve valne duljine, pa je njena apsorptancija jednaka 100%, dok je reflektancija na 0%. Isto vrijedi i za kromatske boje. Svaka od njih reflektira / apsorbira određene valne duljine koje ih definiraju i određuju njen izgled. Ovdje su apsorptancija, reflektancija i transmitancija funkcije valne duljine u vidljivom dijelu spektra elektromagnetskog zračenja, što znači da u tom području mijenjaju svoju vrijednost (Slika 10). Imamo li neobojeću, transparentnu podlogu, oba koeficijenta, i apsorptancija i reflektancija, bila bi nula, i svjetlost bi nesmetano prolazila kroz tijelo ($T=100\%=1$).

Već je spomenuto da izvor svjetla svojim spektralnim sastavom modificira boju koju vidimo. Na Slici 11 prikazani su standardni izvori svjetla pod kojima se obavlja mjerenje refleksijskih krivulja.

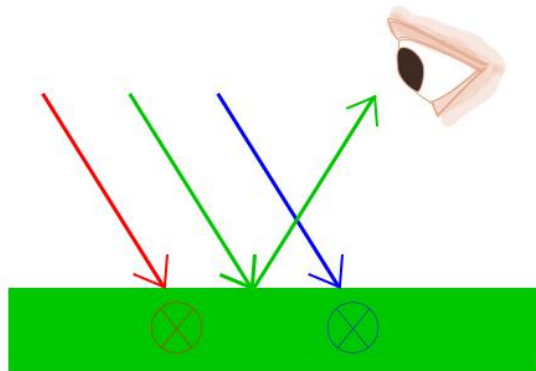


Slika 11: Izvori zračenja [6]

Oznake sa slike predstavljaju:

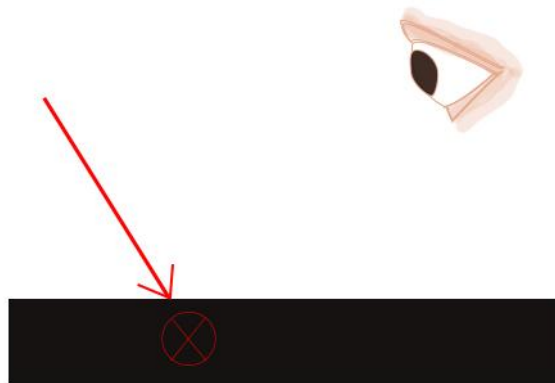
- A – volframova lampa
- C – dnevno svjetlo
- D65 – dnevno svjetlo s dodatkom UV komponente

Na Slici 12 prikazano je tijelo zelene boje na koje pada bijela svjetlost, odnosno tijelo je promatrano pod nekim od navedenih izvora bijele svjetlosti.



Slika 12: Bijela svjetlost pada na obojani predmet

Ukoliko je izvor svjetlosti kojim je isti taj predmet osvjetljen monokromatske (emitira jednu valnu duljinu) ili polikromatske (emitira više valnih duljina, ali ne cijelog vidljivog spektra) prirode, boja predmeta bit će drugačija.



Slika 13: Crvena monokromatska svjetlost pada na predmet obojen zelenim pigmentom

Predmet koji je pod bijelom svjetlošću bio zelene boje, sada osvjetljavamo monokromatskim crvenim svjetlom. Ako izvor emitira samo jednu valnu duljinu crvene boje, ta boja će se i apsorbirati u predmet, a ništa se neće reflektirati. Sada predmet sa zelenim pigmentom percipiramo kao crni jer izvor svjetlosti ne sadrži boju koja bi se pod bijelim svjetlom reflektirala od predmeta (Slika 13).

3. ZAKLJUČAK

Boja se pojavljuje uslijed mnogobrojnih interakcija koje se odvijaju istovremeno, a čiji su protagonisti svjetlost i materija. Tim interakcijama vlada temeljni zakon prirode – Zakon očuvanja energije. Nimalo energije ne gubi se u sustavu - količina energije koja je ušla u sustav na početku interakcije jednaka je količini koja će postojati i po njenom završetku. Upadom snopa svjetlosti na tiskovnu podlogu dio će se reflektirati, dio transmitirati i dio apsorbirati i to u ovisnosti o sastavu svjetla i svojstvima tiskovne podloge i / ili otiska. Kod nekih objekata veći će se dio reflektirati / transmitirati / apsorbirati u odnosu na drugi objekt. Osnovni preduvjet za viđenje boja je bijela svjetlost. Ukoliko izvoru svjetla pod kojim promatramo objekt nedostaje neka od primarnih boja koja se reflektira / transmitira, obojenost objekta se mijenja.

Na primjeru otisaka otisnutih tiskarskom bojom primarna interakcija koja daje obojenje je apsorpcija, za koju su u najvećoj mjeri zaslužni pigmenti i bojila iz tiskarskih boja koji selektivno apsorbiraju svjetlost. Kod tiskovnih podloga, raspršenje je pojava koja diktira kako ćemo percipirati podlogu na kojoj tiskamo. Najčešće korištena podloga je papir. Svjetlost u papiru nailazi na razne prepreke kao što su mreža vlaknaca i čestice punila te se raspršuje u svim smjerovima.

4. LITERATURA

1. ***https://en.wikibooks.org/wiki/Nanotechnology/Seeing_Nano
2. ***<http://www.gemstones.net.au/en-au/physical/dispersion.aspx>
3. Hsien – Che Lee, (2009.), Introduction to Color Imaging Science, Cambridge University Press
4. ***<https://hr.wikipedia.org/wiki/Materija>
5. ***<http://neilatkin.com/2014/04/10/10-cool-ideas-for-teaching-reflection-of-light/>
6. N. Pauler, (2001.), Paper Optics, AB Lorentzen & Wettre, Sweden
7. ***http://materijali.grf.unizg.hr/media/TB_koloranti_2014_15.pdf
8. ***https://www.hdm-stuttgart.de/projekte/printing-inks/p_compo0.htm
9. ***<http://www.enciklopedija.hr/>
10. ***<http://web.eng.fiu.edu/~godavart/bme-optics/kubelka-munk-theory.pdf>
11. Chapter 3: The Reflection, Transmission, and Absorption of Light by Commonly Encountered Materials : Beer-Lambert and Kubelka-Munk Theory
12. ***www.sabic-ip.com