

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET**

MATEJA PUHALO

**MOGUĆNOST PRIMJENE INKJETA PRI
OTISKIVANJU METALNE AMBALAŽE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2014.



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

MATEJA PUHALO

**MOGUĆNOST PRIMJENE INKJETA PRI
OTISKIVANJU METALNE AMBALAŽE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Doc. dr. sc. Igor Majnarić

Studentica:
Mateja Puhalo

Zagreb, 2014.

Rješenje o odobrenju teme diplomskog rada

ZAHVALE

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Igoru Majnariću na iskazanoj pomoći i stručnim savjetima te strpljivom vođenju kroz proces stvaranja diplomskog rada i poticaju za nastavak znanstvenog istraživanja.

Posebno zahvaljujem roditeljima i Kruni na razumijevanju i potpori koju su uvijek nesebično pružali, a Ani na kontinuiranoj podršci te nebrojenim razgovorima i savjetima tijekom cijelog studija.

SAŽETAK

Od svih grafičkih proizvoda najbolju perspektivu zasigurno ima otiskivanje ambalaže, budući da je ona neophodna za dobar plasman proizvoda na tržištu. Tradicionalno, kartonska je ambalaža dominantna, no za neke proizvode (mesne prerađevine, pića, tekućine, kemikalije...) nije dovoljna, te se kod njihovog pakiranja primjenjuju metali i plastika. Tehnike Inkjet digitalnog tiska koje suše UV zračenjem imaju mogućnost otiskivanja na svim mogućim medijima pa samim time omogućuju i generiranje limene i plastične ambalaže. U ovom će se radu analizirati mogućnost otiskivanja na čelične limene ploče koje se standardno otiskuju u tehnici limotiska. Cilj rada utvrđivanje je uspješnosti kolornog otiskivanja u tehnici Inkjet tiska te mogućnost primjene ove tehnologije za probno otiskivanje na metalnu, plastičnu i kartonsku ambalažu. U radu će se odrediti uspješnost reprodukcije i nanašanja UV LED Inkjet bojila na metale. Pritom će se primijeniti kolorimetrijska i slikovna analiza, kako bi se odredili svi relevantni tiskarski parametri (gamut, CIE L*a*b* vrijednosti, ΔE , ΔL , ΔC , ΔH), ali i kvaliteta reprodukcije najmanjih rasterskih elemenata (slikovna analiza). Od mjerne opreme korišteni su spektrofotometri i kolorimetari X-Rite DTP20 Pulse i X-Rite eXact. Rezultati su pokazali mogućnost primjene Inkjeta pri otiskivanju metalne ambalaže. Posebice se dobro reproduciraju tamnije nijanse te puni tonovi. Svjetliji se tonovi i male rastertonske vrijednosti lošije reproduciraju, zbog čega se preporučuje njihovo izbjegavanje ili provođenje odgovarajućih korekcija.

KLJUČNE RIJEČI

- Metalna ambalaža
- UV LED Inkjet tisak
- Probno otiskivanje

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1. Metalna ambalaža.....	3
2.1.1. Materijali za izradu i oblici metalne ambalaže	4
2.1.2. Premazi za metalnu ambalažu.....	5
2.2. Tisak na metale	6
2.2.1. Bojila za tisak na metale	6
2.2.2. Konvencionalne tehnike otiskivanja na metale	7
2.3. Inkjet tisak.....	8
2.3.1. Kontinuirani Inkjet.....	9
2.3.2. Drop on demand Inkjet	11
2.3.2.1. Termalni Inkjet	11
2.3.2.2. Elektrostatski Inkjet.....	12
2.3.2.3. Tonejet.....	12
2.3.2.4. Piezo Inkjet.....	14
2.3.3. Bojila za Inkjet.....	15
2.4. UV tehnologija u grafičkoj industriji	16
2.4.1. UV sušuća bojila	17
2.4.2. Živine elektrolučne lampe	19
2.4.3. UV LED svjetlosni izvori	20
2.4.4. UV Inkjet	23
3. EKSPERIMENTALNI DIO	24
3.1. Metodologija rada	24

3.2.	Korišteni materijali, tiskarski stroj i mjerni uređaji	26
3.2.1.	Digitalne tiskovne forme	26
3.2.2.	Tiskarski stroj	28
3.2.3.	Tiskarsko bojilo	28
3.2.4.	Tiskovne podloge.....	29
3.2.4.1.	Metalna tiskovna podloga (bijeli lim)	29
3.2.4.2.	Papirna tiskovna podloga	29
3.2.4.3.	Plastična tiskovna podloga	29
3.2.5.	Spektrofotometri i denzitometri.....	29
3.2.5.1.	X-Rite DTP20 „Pulse“	29
3.2.5.2.	X-Rite eXact.....	30
3.2.6.	Korišteni mikroskopski uređaji.....	30
4.	REZULTATI I RASPRAVA.....	31
4.1.	Gamut.....	31
4.2.	Kolorimetrijska analiza	33
4.2.1.	Razlike u obojenju ΔE_{00}	33
4.2.2.	Trodimenzionalni prikaz CIE L*a*b* vrijednosti ispitivanih uzoraka	35
4.2.3.	Razlike u svjetlini ΔL_{00}	38
4.2.4.	Razlike u kromatičnosti ΔC_{00}	39
4.3.	Slikovna analiza	41
4.3.1.	Površina rasterskih elemenata.....	42
4.3.2.	Dijametar rasterskih elemenata.....	44
4.4.	Reprodukcija Pantone 3005 i Pantone 485 procesnim bojama.....	46
5.	ZAKLJUČCI.....	49
6.	LITERATURA	51
7.	PRILOZI	53

1. UVOD

U grafičkoj je industriji tisak na neupojne podloge općenit problem. Da bi se on ostvario, upotrebljavaju se specijalna bojila koje moraju trenutačno sušiti. Prije su se koristila bojila koja suše isparavanjem, dok se danas primjenjuju bojila koja suše zračenjem (UV, EB i UV LED). Takva bojila i njihovo ponašanje na različitim tiskovnim podlogama nisu još potpuno istraženi. Zbog toga je potrebno izvršiti dodatna ispitivanja kako bi se ostvarila što je moguće bolja reprodukcija.

Postavlja se pitanje da li neupojne podloge tiskane u Inkjetu daju bolju ili lošiju reprodukciju u odnosu na upojne i da li će tisak na metal (metalna ambalaža) biti bolje realiziran od tiska na kartonsku ambalažu. Također, važno je odrediti da li se na drugim tipovima podloga (plastika) postižu bolje reprodukcije od onih na metalnih podlogama. Samim time, potrebno je odrediti njihove razlike i potencijalne metode korekcije.

Kvaliteta tehnike otiskivanja temelji se na mogućnosti što kvalitetnije reprodukcije tonova. Cilj ovog rada utvrditi je kako se osnovne procesne boje realiziraju na metalnoj podlozi te ustanoviti njihova odstupanja u odnosu na referentnu tiskovnu podlogu (papir). Osim toga, utvrdit će se i mogućnost ostvarivanja što ujednačenijih prijelaza od svijetlih do najtamnijih tonova. Samim time, želi se utvrditi mogućnost otiskivanja metalne ambalaže u tehnici Inkjeta, odnosno mogućnost što vjerodostojnije realizacije metalne ambalaže.

Probni otisci kod razvoja metalne ambalaže često se izrađuju na neadekvatnim podlogama, poput kartona ili papira. Samim time, dobiveni otisci i rezultati ne mogu biti relevantni. U ovom će se radu istražiti mogućnost primjene Inkjeta za potrebe probnog tiska metalne ambalaže, budući da su Inkjet strojevi pristupačni, kompaktni te namijenjeni manjim nakladama, a s druge strane omogućuju tisak na gotovo sve tiskovne podloge.

Također, sve je češća upotreba plastičnih materijala koji se mogu oblikovati u različite oblike ambalaže. Takva se ambalaža također tiska, pri čemu se kao tehnologija otiskivanja primjenjuju Inkjet strojevi.

Tisak na metale jedan je od najsloženijih procesa otiskivanja jer je riječ o potpuno neupojnoj podlozi koja uopće ne apsorbira tekuće bojilo. Zbog toga se za otiskivanje upotrebljavaju specijalna bojila koja moraju sušiti trenutno. U posljednjih nekoliko godina primjenjuju se UV bojila koja se nakon tiska izlažu UV elektromagnetskom zračenju koje će trenutno osušiti bojilo. Standardne živine lampe zbog svoje se velike energetske potrošnje pokušavaju zamijeniti ekonomičnijim LED svjetlosnim izvorima. Sam proces tiska na metale popraćen je mnogim problemima (odstupanje tonova, nedovoljno osušena unutrašnjost sloja bojila, ekološki neprihvatljivi fotoinicijatori itd.).

2. TEORIJSKI DIO

Ambalaža postoji otkad je i ljudske civilizacije, te se zajedno s njom razvijala i postajala kompleksnija. Rani načini zaštite hrane od nametnika mogu se smatrati prečicom ambalaže, te su u tom slučaju obični listovi i slama poprimali ulogu ambalaže (pružali su zaštitu „proizvoda“). Kako su ljudi razvijali tehnologiju, tako su bili u mogućnosti pružiti sve bolju zaštitu svojoj hrani, pa svjedočimo nastajanju različitih oblika posuda, boca, kutija. Pojavom tržišta i ideje o prodaji hrane i proizvoda javlja se i potreba za multifunkcionalnom ambalažom, onom koja će štititi proizvod kod transporta i skladištenja, ali koja će ujedno imati i prodajnu te uporabnu funkciju. „Osnovne funkcije ambalaže mogu se svrstati u četiri skupine: zaštitna, skladišno-transportna, prodajna i uporabna.“ [1]

S obzirom na funkciju, ambalažu možemo podijeliti u tri skupine:

- a. *primarna ambalaža* – ima prodajnu ulogu, u kontaktu je s proizvodom, čuva ga i omogućuje njegovo korištenje ili konzumaciju;
- b. *sekundarna ambalaža* – njena je uloga pakiranje i objedinjavanje više jedinica primarne ambalaže te ima funkciju prodaje, promocije i zaštite;
- c. *tercijarna ambalaža* – to je zapravo transportna ambalaža čija je funkcija zaštita proizvoda za vrijeme skladištenja i transportiranja. [2]

2.1. Metalna ambalaža

Metalna se ambalaža, koja je tema ovog rada, može naći u sve tri funkcionalne skupine ambalaže. U slučaju transportne ambalaže govorimo o kontejnerima, bačvama i kantama. Takva ambalaža ima isključivo transportnu i zaštitnu funkciju i ne zahtijeva tisak direktno na metal. Metalne sekundarne ambalaže ima vrlo malo te u tim slučajevima ona ima prodajnu i estetsku funkciju, a najčešće dolazi u obliku različitih kutija i može zahtijevati tisak direktno na metal. No, najzanimljivija je svakako primarna ambalaža. Ona ispunjava zaštitnu ulogu, u direktnom je doticaju s proizvodom i omogućava njegovo korištenje. Činjenica da ima i prodajnu te estetsku ulogu znači da zahtijeva i kvalitetan tisak na metal.

Iako sami počeci korištenja metalnih materijala u svrhu ambalaže sežu daleko u povijest, pojavu suvremene metalne ambalaže vežemo uz 1809. godinu, kada je Nicholas Appert iz Francuske izumio prvu limenku, namijenjenu čuvanju hrane za vojnike Napoleonove vojske. [3] Limenu je konzervu godinu dana kasnije u Engleskoj patentirao Peter Durand, a 1813. godine počinje proizvodnja limenki za potrebe britanske vojske. Materijal za proizvodnju takvih limenki bio je čelični lim presvučen kositrom. [2] Sredinom 19. stoljeća počinju se upotrebljavati metalne tube, a stotinjak godina kasnije kao ambalažni se materijal počinje koristiti i aluminijska folija. Potreba za tiskom na metalnu ambalažu javlja se paralelno s njenim probojem na tržište.

„Osnovna prednost limene ambalaže pred ostalim materijalima je, naravno, u njezinoj čvrstoći, neprobojnosti i dugotrajnosti, odnosno u mogućnosti pouzdane zaštite. Najveći nedostatak je skupoća materijala.“ [4] Metali su i ekološki povoljni, budući da se u potpunosti mogu reciklirati, a da pritom ne izgube na sirovinskoj kvaliteti. [5] Dobro podnose visoke temperature, kao i pritisak plinova unutar limenke koji se dodaju kod pakiranja prehrambenih proizvoda.

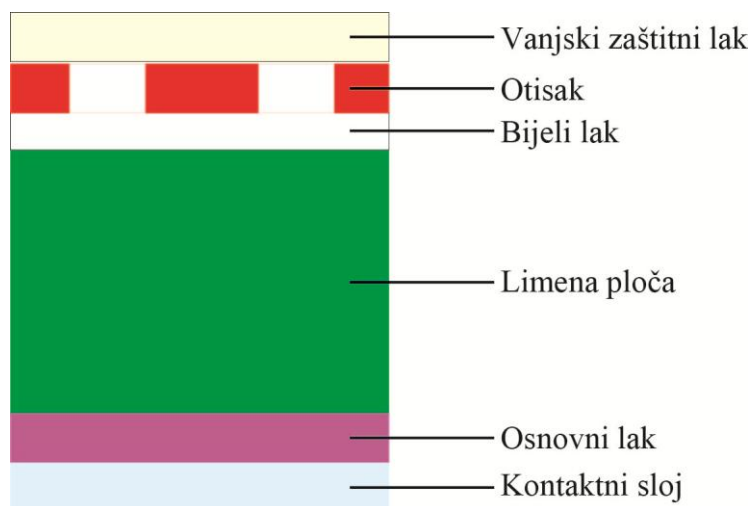
2.1.1. Materijali za izradu i oblici metalne ambalaže

Osnovni materijali za izradu metalne ambalaže su *bijeli lim* (čelični lim presvučen slojem kositra debljine 0,00025 mm, kako bi se spriječila korozija), *aluminijski lim*, *elektrokromirani čelični lim (ECCS)* i *pocinčani čelični lim*. Upotreba bijelog lima opada dok raste upotreba aluminijskog. Pod bijelim limom često se podrazumijeva i lim presvučen niklom, kromom ili cinkom. U posljednje se vrijeme metalni materijali laminiraju plastičnim masama, koje pružaju bolju zaštitu, a pogodnije su i kao tiskovne podloge. Laminatima se debljina metala svela na minimum te iznosi oko 0,1 mm. [2] Kako bi mogle ući u tiskarsku jedinicu, metalne ploče moraju se izrezati u odgovarajuće dimenzije koje nisu veće od 1200 mm po širini i 1000 mm po dužini. [5] Klasičan presjek metala za izradu ambalaže prikazan je na Slika 1.

Prema tehnologiji izrade razlikujemo dvodijelne i trodijelne limenke. Trodijelne limenke sastoje se od plašta, dna i poklopca, dok se dvodijelne limenke sastoje od tijela s dnom i poklopca. Tijelo s dnom oblikuje se u posudu postupkom dubokog izvlačenja. Kod trodijelnih limenki tisak se provodi na ravnu metalnu ploču, dok kod dvodijelnih

tiskamo na već oblikovanu limenku (pomoću alata koji hvata limenku iznutra kako bi ona postala „cilindar“).

Posebni oblik metalne ambalaže su tube, koje se sastoje od tri dijela: „tijela“ tube, poklopca s otvorom u sredini i poklopca koji omogućava višestruko zatvaranje i otvaranje tube (najčešće se izrađuje od plastike). Ostali oblici ambalaže poput boca za sprejeve ili limenki za piće ne razlikuju se mnogo u tehnologiji izrade od limenki. [2]



Slika 1: Formirani slojevi tijekom proizvodnje ploča za metalnu ambalažu

2.1.2. Premazi za metalnu ambalažu

Metali namijenjeni proizvodnji prehrambene ambalaže moraju se posebno tretirati, kako bi se eliminirala mogućnost doticaja materijala s proizvodom. Zbog toga se limovi za prehrambenu ambalažu prije tiska lakiraju s unutarnje i vanjske strane. Lakiranje se provodi fleksotiskarskom jedinicom. Nakon tiska provodi se još jedno lakiranje koje otisku daje sjaj, ali ga i štiti od mehaničkih oštećenja. „Premaz bi trebao biti jednolik na cijeloj površini, kako bi se spriječili naknadni kvalitativni problemi s proizvodom. Nakon nanošenja premaza, metalne ploče odlaze u pećnicu gdje se suše zrakom na 200°C. Sušenje obično traje dvanaest minuta.“ [5]

Lakove i premaze kojima se oslojavaju limovi možemo razvrstati na osnovne lakove (grund), bijele lakove, ljepljive lakove (haft), vanjske zaštitne lakove (srebrni ili prozirni) i unutarnje zaštitne lakove (sivi alu-pigmentirani lak, zlatni lak). [2] Zbog specifičnosti potreba svakog pojedinog proizvoda najveći problem kod tiska ambalaže upravo je izbor odgovarajućih premaza, odnosno lakova. Zbog toga je razvijen cijeli niz

različitih premaza. Najvažnije su skupine kemijskih spojeva kod premaza za limenu ambalažu poliesterske smole, poliuretanske smole, epoksi-fenolne smole i poliakrilatne smole. Njihovom kombinacijom s ostalim kemijskim spojevima generiraju se premazi i lakovi, koji posjeduju specifična svojstva. *Epoksi-aminijski lakovi* otporni su na mehaničke i kemijske utjecaje, te su bezbojni i pod utjecajem topline ili svjetla ne mijenjaju ton. Ove ih karakteristike čine povoljnima za vanjske i unutarnje osnovne antikorozivne lakove. *Epoksi – ester premazi* pogodni su da ambalažu koja se proizvodi dubokim izvlačenjem, budući da su elastični. Njihova visoka otpornost na visoke temperature i sterilizaciju čini ih podobnima za vanjske premaze prehrambene ambalaže. *Premazi na bazi epoksi i fenolnih smola* elastični su, kemijski stabilni i bezbojni, dok se *premazi na bazi poliestera i epoksi-esterskih smola* odlikuju velikom elastičnošću te služe na konačno lakiranje. Kao zadnji premaz koriste se i lakovi na bazi malih lanaca PVC-a (jako su elastični, no ne podnose visoke temperature jer uslijed njihovu izlaganju postaju porozni). Za brtvljenje limenih poklopaca koriste se *premazi na osnovi visokomolekularnih vinilnih smola* disperziranih u vezivu. [2]

2.2. Tisak na metale

Osnovne posebnosti tiska na metale izrazita su neupojnost podloge, robusnost i neelastičnost materijala. Upravo zbog toga bojila i sami tiskarski strojevi moraju biti prilagođeni tisku na metalne podloge.

2.2.1. Bojila za tisak na metale

Kada govorimo o bojilu, temeljni problem metalnih podloga jest njihova loša prihvatljivost. Zbog toga bojila za tisak na metal trebaju biti prilagođena takvim uvjetima. Kada govorimo o tehnici limotiska (ofsetni tisak na lim), bojila koja se koriste slična su ofsetnim bojilima, no prilagođena neupojnim podlogama. Takva bojila suše ili vrućim zrakom od 190°C ili UV zračenjem (u tom se slučaju radi o UV bojilima). Također, treba voditi računa o tome da se pigmenti i veziva kolorimetrijski ne mijenjaju pod utjecajem visoke temperature (budući da limenke često moraju proći kroz postupak sterilizacije). [2] „Osobito važan zahtjev prema limotiskarskim bojama i lakovima je sposobnost visoke elastičnosti, jer se tiskane limene ploče u naknadnim fazama obrade i pri mehaničkom oblikovanju izlažu raznim manjim ili većim naprezanjima pri kojima boje i lakovi ne smiju pucati.“ [4]

Bojila koja suše vrućim zrakom sadrže organska otapala koja prilikom sušenja isparavaju i zagađuju okoliš. S druge strane, UV bojila ne isparavaju, pa niti ne zagađuju zrak HOS (VOC)¹ i drugim onečišćivačima. Također, sušenje UV zračenjem izrazito ubrzava sam proces sušenja koji je trenutni. No, kod UV sušenja živinim lampama dolazi do oslobađanja ozona koji treba biti uklonjen iz prostora (oslobađanje ozona eliminirano je korištenjem UV LED svjetlosnih izvora), otapala za pranje strojeva koji koriste UV bojila su agresivna, UV bojila mogu imati neugodan miris i nakon tiska ne smiju doći u izravan dodir s hranom. Iako pružaju kvalitetnije otiske, troše više energije te su sama UV sredstva skuplja od konvencionalnih.

Što se samih karakteristika otisaka tiče, bojila na bazi otapala mogu davati različite rezultate, ovisno o tome suše li pomoću temperature (polimerizacija) ili zraka (isparavanje otapala). Kod bojila koja suše isparavanjem ne dolazi do kemijskih reakcija uslijed sušenja te zbog toga ona pokazuju lošu kemijsku i mehaničku otpornost. S druge strane, imaju visoku elastičnost te pružaju dobru izdržljivost kod vanjske upotrebe. Bojila na bazi otapala koje suše pod utjecajem temperature generiraju čvršći i stabilniji otisak koji ima veću otpornost na mehanička i kemijska oštećenja, ali i manju elastičnost. Pogodna su za korištenje kod ambalaže koja prolazi kroz termičku obradu. UV bojila odlikuje visoka otpornost na mehanička i kemijska oštećenja, te dobra otpornost na vanjske uvjete, no imaju nešto manju elastičnost. [6]

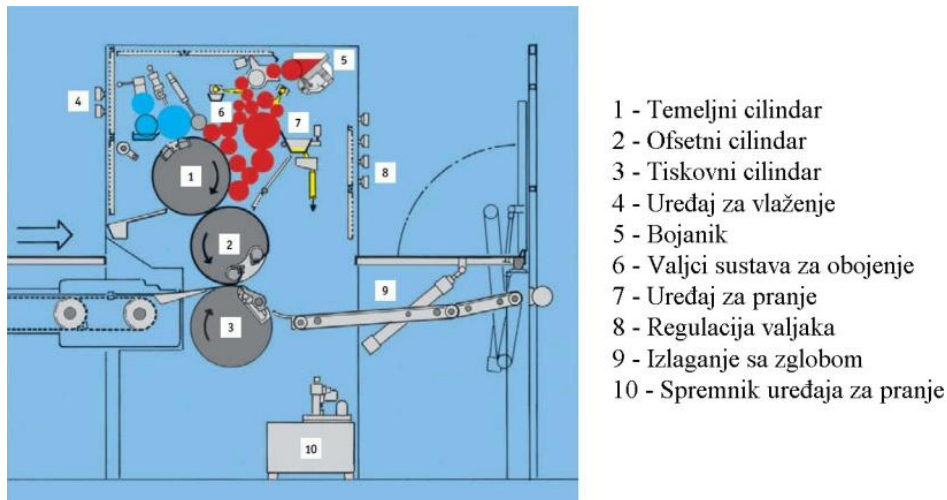
2.2.2. Konvencionalne tehnike otiskivanja na metale

Konvencionalne tehnike tiska najzastupljenije su kod otiskivanja na metalne podloge. Vodeća je svakako tehnika limotiska (verzija litografskog ofseta), a slijede ga sitotisak, fleksotisak i letterset.

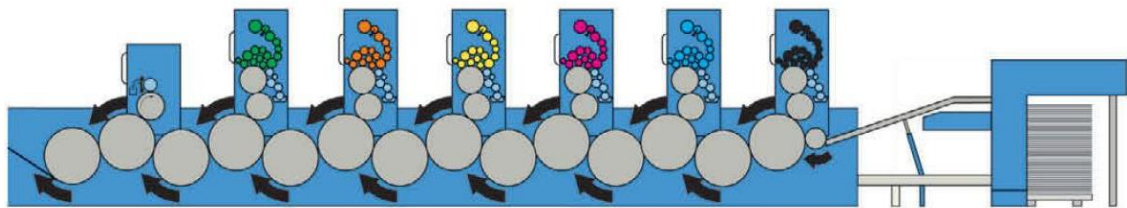
Limotisak je zapravo tisak ofsetnom tehnikom na limene podloge. No, zbog specifičnosti tiskovne podloge, strojevi za limotisak izrađuju se drugačije od strojeva za ofset. Iako je sam princip rada isti, strojevi za limotisak mnogo su robusniji. To je najizraženije kod dijelova stroja (uređaja) koji limenu ploču prenose kroz stroj. [2] Na priloženim slikama, koje prikazuju princip rada tiskovne jedinice stroja za limotisak (KBA Mailänder 222) (Slika 2) i shemu cijelog stroja za limotisak (KBA MetalStar PR)

¹ HOS (hlapljivi organski spojevi); eng. *Volatile organic compounds (VOC)*

(Slika 3), vidljiva su i dva različita rješenja transporta metalnih araka – u prvom slučaju imamo sustav s hvataljkama, dok se u drugom slučaju radi o prijenosnim bubnjevima.



Slika 2: Princip rada tiskovne jedinice stroja za limotisak (KBA Mailänder 222)
(izvor: <http://www.kba-metalprint.com>)



Slika 3: Shema stroja za limotisak – uređaj za ulaganje, šest tiskovnih jedinica i jedinica za lakiranje
(KBA MetalStar PR)
(izvor: <http://www.kba-metalprint.com>)

Sitotisak se kod tiska na metale koristi za posebne vizualne izvedbe, budući da omogućuje nanošenje debelog sloja bojila. No, upravo se iz tog razloga javljaju problemi sa sušenjem otiska, posebice ako se radi o velikim nakladama. [2]

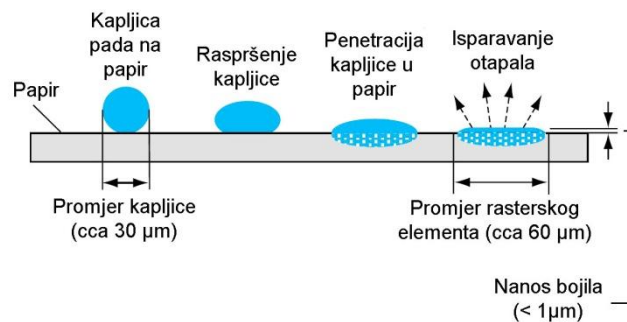
Letterset ili indirektni knjigotisak tehnika je koja omogućuje vrlo visoku kvalitetu otiska, zahvaljujući formama od sintetskog materijala koje omogućuju veće linijature rastera i kolorni tisak s četiri do osam boja. Zbog toga se *letterset* koristi kod ambalaže koja zahtjeva visoku kvalitetu tiska, dok se *fleksotisak* koristi za tisak jednostavnijih otisaka. [2]

2.3. Inkjet tisak

Inkjet tehnika tiska podrazumijeva sve sustave otiskivanja kod kojih se boja u obliku kapljice pomoću mlaznica izbacuje na tiskovnu podlogu tvoreći tiskovne elemente. [7]

Inkjet tehnike otiskivanja dijelimo na dvije osnovne kategorije – kontinuirani Inkjet i diskontinuirani ili *DOD* (eng. *Drop on Demand* – kapljica na zahtjev) Inkjet. Kod kontinuiranog Inkjeta razlikujemo sustave binarnog i višestrukog skretanja kapljica, dok kod *DOD* Inkjeta postoje tri različita načina formiranja kapljica – piezo Inkjet, termalni Inkjet ili Bubblejet te elektrostatski Inkjet.

Budući da u odnosu na konvencionalne tehnike tiska do prijenosa bojila na podlogu ne dolazi direktnim kontaktom, već se kapljica mlaznicama izbacuje na površinu, dolazi do povećanja rasterskih elemenata (u odnosu na promjer kapljice, sam rasterski element dvostruko se poveća kada je otisak gotov). Do raspršenja dolazi kod samog udara kapljice (tekuća faza) u tiskovnu podlogu (kruta faza). Dodatno proširenje kapljice uzrokuje penetracija bojila u papir te u konačnici isparavanje otapala iz bojila odnosno njeno sušenje. (Slika 4)



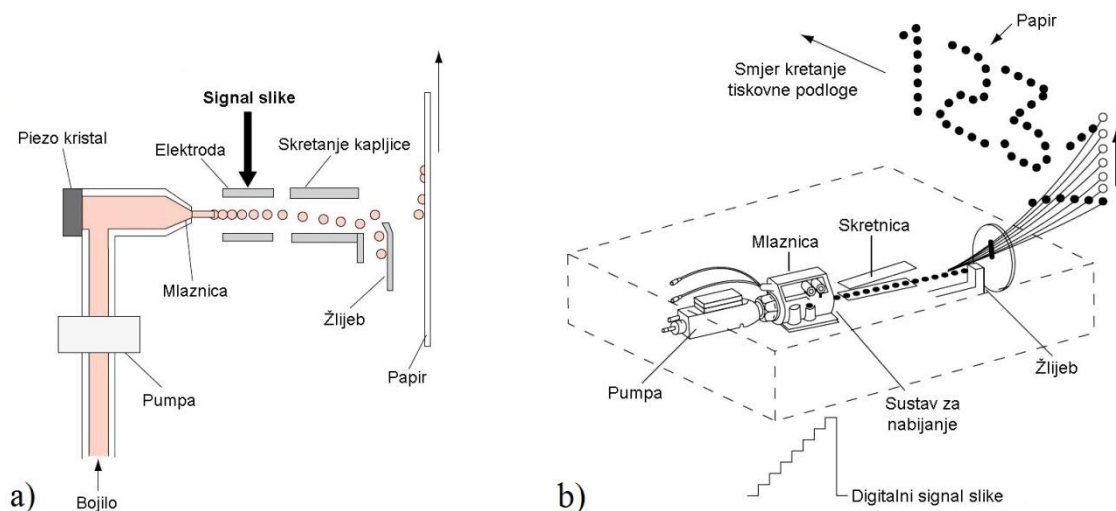
Slika 4: Raspršenje kapljice bojila kod tehnike Inkjeta
(izvor: H. Kipphan, *Handbook of print media*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.)

2.3.1. Kontinuirani Inkjet

Kontinuirani Inkjet koristi princip kontinuiranog protoka bojila kroz printer. Mlaznice su spojene sa spremnikom bojila koje bojilo pumpa i distribuira u mlaznice. Pomoću piezoelektričnog kristala koji se nalazi nasuprot otvora mlaznice generira se kontinuirani mlaz bojila. Mlaz bojila nestabilan je te se diskontinuirava i formira u kapljice (prirodnim razdvajanjem mlaza uslijed djelovanja hidrodinamičkih zakona ili iniciranim brzim kretanjem vibracijskog elementa). Niz kapljica potom prolazi kroz dvije elektrode koje selektivno nabijaju kapljice na temelju ulaznih digitalnih signala slike. Nabijene kapljice tada odlaze do pozitivno nabijenog žlijeba koji ih odvodi, dok nenabijene kapljice nastavljaju put i završavaju na tiskovnoj podlozi. (Slika 5a) Ovdje

govorimo o *binarnom sustavu skretanja kapljica* kontinuiranog Inkjeta, budući da kapljice imaju dva moguća stanja – nabijeno i nenabijeno. [8]

Sistem višestrukog skretanja koristi pozitivni princip nabijanja slike (Slika 5b). Razlika od binarnog sustava je u tome što se nabijaju one kapljice koje će završiti na tiskovnoj podlozi, dok se u žlijeb preusmjeravaju nenabijene kapljice. Prednost sustava višestrukog skretanja leži u mogućnosti nabijanja kapljice s različitim naponima. Ovisno o intenzitetu napona kapljice, dolazi do njenog većeg ili manjeg otklona. Na taj se način utječe na samu putanju kapljice i omogućuje otiskivanje veće površine. [8]



Slika 5: Princip rada kontinuiranog Inkjeta:
 a) Binarno skretanje kapljica; b) Sustav višestrukog skretanja kapljica
 (izvor: H. Kipphan, *Handbook of print media*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.)

Bojilo kod kontinuiranog Inkjeta zapravo konstantno cirkulira sustavom. Kapljice koje ne završe na tiskovnoj podlozi, odnosno koje su skrenute u žlijeb, vraćaju se u spremnik s bojilom te ponovo prolaze cijeli proces. Dakako, u slučaju takve „reciklacije“ bojila potrebni su dodatni uređaji koji će boju pročistiti prije negoli se vrati u spremnik. [7]

Visoka frekvencija titranja piezo kristala (između 50 kHz i 175 kHz, kod posebnih uređaja i do 1 MHz) omogućuje i visoke brzine tiska kontinuiranog Inkjeta. Dodatnu prednost kontinuiranog Inkjeta predstavlja velika brzina kapljice (do 40 m/s), čime je omogućena relativno velika udaljenost glave pisača i tiskovne podloge (uspoređeno s ostalim tehnikama Inkjeta). Moguće je korištenje bojila na bazi hlapljivih otapala, što omogućuje brzo sušenje bojila i poboljšavanje adhezije na mnogim materijalima. No, upravo takva vrsta bojila predstavlja i nedostatak kontinuiranog Inkjeta, budući da su

zbog isparavanja otapala ekološki neprihvatljiva. Kontinuirani Inkjet daje nisku rezoluciju otiskivanja te zahtijeva vrlo velike troškove održavanja. Cijena bojila također je veća, jer bojila moraju imati mogućnost električnog nabijanja. Kontinuirani Inkjet se, shodno navedenim karakteristikama najčešće koristi za otiskivanje datuma i barkodova na ambalaži (posebice limenkama), za probno otiskivanje ili za velike naklade koje ne zahtijevaju visoku kvalitetu otiska. [9]

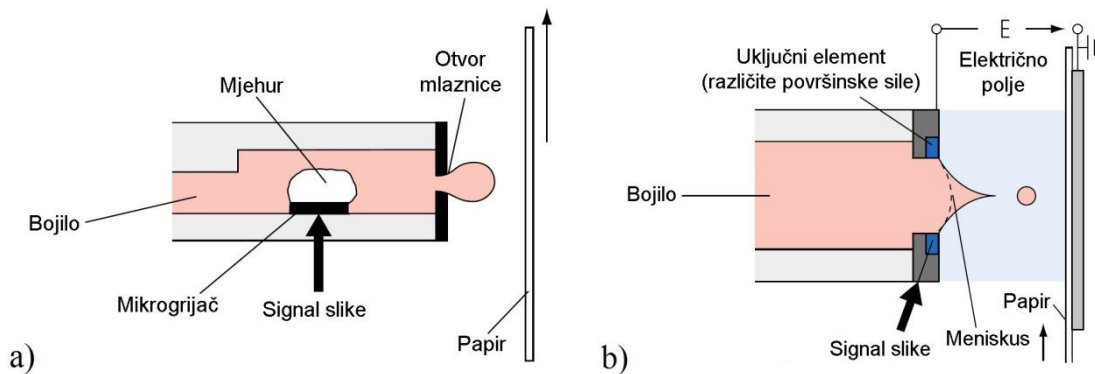
2.3.2. *Drop on demand Inkjet*

Za razliku od kontinuiranog Inkjeta (kod kojeg bojilo kontinuirano cirkulira sustavom), kod DOD Inkjeta kapljica bojila formira se samo onda kada je potrebna. Ovakvi su sustavi binarni – kapljica se ili generira ili ne. Na taj se način eliminira potreba za zbrinjavanjem viška bojila. Generiranje kapljice bojila u svim je sustavima DOD Inkjeta inicirano digitalnim impulsom slike. [7]

2.3.2.1. *Termalni Inkjet*

Termalni Inkjet (*Bubble jet*) za formiranje kapljice bojila koristi mikrogrijač. Mikrogrijač je smješten unutar komore mlaznice koja je u potpunosti ispunjena bojom. Impuls slike koji dolazi do mikrogrijača uzrokuje njegovo zagrijavanje i do 300°C, čime se zagrijava i samo bojilo unutar komore. Visoka temperatura uzrokuje isparavanje bojila, uslijed kojeg dolazi do stvaranja mjehura plina. Plin istiskuje višak bojila kroz otvor mlaznice, stvarajući meniskus bojila koji volumenom odgovara budućoj kapljici. Nakon toga temperatura mikrogrijača opada, principom kapilarnosti komora se puni novim bojom, a meniskus se odvaja od otvora mlaznice i tvoreći kapljicu bojila odlazi na tiskovnu podlogu (Slika 6a). [8]

Glavne prednosti termalnog Inkjeta jesu mogućnost generiranja vrlo sitnih kapljica boje i zgusnuta konstrukcija mlaznice, što uređaje čini kompaktnima te smanjuje cijenu glava pisača. Nedostaci termalnog Inkjeta uglavnom su povezani s limitiranošću bojila koja se mogu koristiti. Naime, bojila moraju imati mogućnost isparavanja (obično se radi o bojilima na bazi vode), ali ujedno moraju biti otporna na izrazito visoke temperature pod utjecajem kojih ne smiju mijenjati svojstva. [9]



Slika 6: Princip rada a) Termalnog Inkjeta; b) Elektrostatskog Inkjeta
(izvor: H. Kipphan, *Handbook of print media*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.)

2.3.2.2. Elektrostatski Inkjet

Elektrostatski Inkjet radi na principu generiranja električnog polja između printera i tiskovne podloge. To omogućuje formiranje kapljice varijabilne veličine i volumena, što ovisi o jačini električnog polja koja se primjenjuje kod njene generacije. [8] Zbog malog pritiska unutar komore, bojilo na otvoru mlaznice tvori mali meniskus. Električni naboj ispred otvora mlaznice svladava površinske sile bojila te se ono odvaja od mlaznice tvoreći kapljicu. Ispod tiskovne podloge nalazi se glavna elektroda koja električnim nabojem privlači kapljicu bojila prema tiskovnoj podlozi. (Slika 6b)

Bojilo za elektrostatski Inkjet mora biti provodljivo, budući da se njegova tehnologija bazira na privlačenju slobodnih naboja. Upravo zbog specifičnosti tehnike, elektrostatski Inkjet prevladava nedostatke drugih Inkjet tehnologija. Rezolucija otiska nije ograničena dijametrom otvora mlaznice, zbog varijabilnosti veličine kapljice. Osim potrebe specifičnog bojila, glavni je nedostatak elektrostatskog Inkjeta visoka cijena implementacije. [9] No, budući da je ova tehnika još uvijek u razvoju, očekuje se pad cijena povećanjem broja implementacija. Najpoznatija je tehnika Inkjeta koja koristi elektrostatski princip generiranja kapljice bojila *Tonejet*.

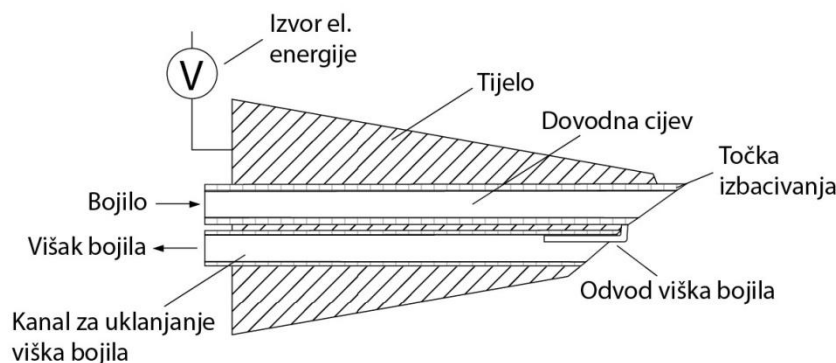
2.3.2.3. Tonejet

Tonejet tehnologija omogućuje vrlo uspješno otiskivanje na neupojne tiskovne podloge poput metala na koji je usmjerila razvoj svoje tehnologije. *Tonejet* se na tržište tiska probio upravo tiskom na limenke za pića, u suradnji s njemačkom tvrtkom za proizvodnju limenki, Ball Packaging Europe. Upravo je ta mogućnost primjene

Tonejeta za velike naklade, odnosno industrijski tisak glavna razlika u odnosu na druge tehnike Inkjeta. Boje za Tonejet u tisku zadovoljavaju FDA (*Food and Drug Administration*) i EuPIA (*European Printing Ink Association*) standarde za indirektan doticaj boje s prehrambenim proizvodima. Budući da je Tonejet tehnika digitalnog tiska, njegova najveća prednost u odnosu na konvencionalne tehnike jest nepostojanje tiskovne forme, odnosno mogućnost generiranja personaliziranih i različitih otisaka. Budući da konvencionalne tehnike tiska otiskuju velike naklade identičnih otisaka, digitalne tehnike na tom području pružaju mogućnost inovacije. Omogućuju tisak različitih motiva na istoj ambalaži, istodobno zadržavajući vizualni identitet i prepoznatljivost proizvoda, čime plijene pozornost kupaca.

Tonejet omogućuje tisak na neupojne podloge (zahvaljujući manjoj površinskoj energiji bojila u odnosu na metalnu podlogu) bez UV sušenja. Tonejet je baziran na elektrostatskom principu gdje se nabijene čestice (organski pigmenti) disperzirane u Isopar otopini izbacuju prema tiskovnoj podlozi ne mlaznicama, već posebnim „*ejectorima*“. Na mikroskopskoj razini, niz izbacivača izgleda poput igličaste nazubljene četke. Zamjena mlaznica riješila je problem njihova začepjenja uslijed stajanja ili nailaska prevelike čestice (čest problem kod piezo Inkjeta). Omogućeno je generiranje kapljica boje različite veličine, odnosno volumena od 0.4 do 2 pL, koje se iz sustava izbacuju dolaskom električnog signala. Tisak se odvija u rezoluciji od 600x600 dpi, pri brzini od 120 limenki u minuti. Nakon tiska, limenke prolaze kroz uređaj za sušenje na bazi vrućeg zraka, nakon čega slijedi njihovo lakiranje i sušenje (u peći koje suše lak). Naklade mogu biti male, od nekoliko tisuća limenki, ali mogu doseći i brojke od 250,000 limenki. [10]

Slika 7 prikazuje shemu i osnovni princip rada *ejectora*. *Ejector* se sastoji od električki vodljivog tijela kroz koji prolazi dovodna cijev bojila (također električki vodljiva). Završetak dovodne cijevi zašiljen je pod kutom od 30° u odnosu na duljinu, čime se na njenom vrhu tvori lagano zaobljenje koje predstavlja točku izbacivanja bojila iz sustava. S druge strane dovodne cijevi nalazi se sustav da dovodnju bojila koji je pod stalnim pritiskom. Ispod same točke izbacivanja nalazi se usmjerivač toka bojila, koji sav višak bojila s točke izbacivanja usmjerava u kanal za odvodnju viška bojila. Višak bojila kanalom odlazi u vanjski sustav za pročišćavanje. [11]



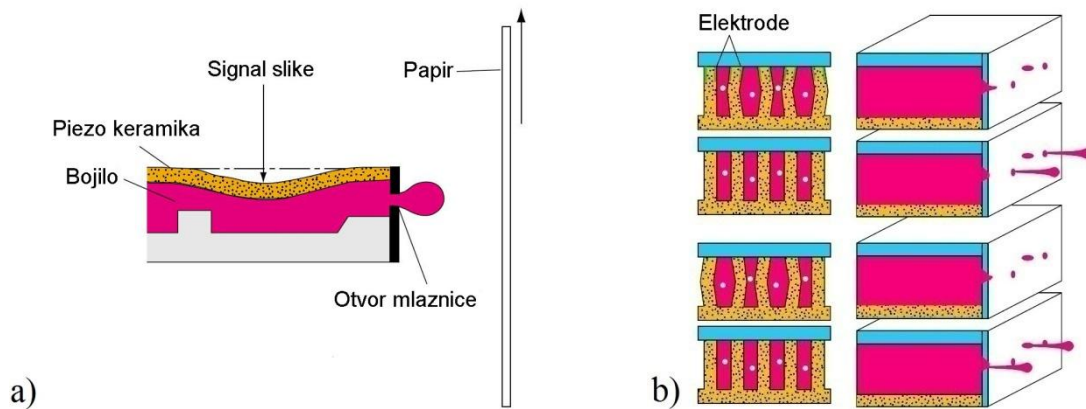
Slika 7: Shema „ejectora“ Tonejet sustava otiskivanja

Debljina nanosa bojila vrlo je mala, te iznosi između 350 i 500 nm. To je postignuto na sljedeći način. Bojilo sadrži oko 12% pigmenta, dok ostatak čini mineralno ulje. Dovođenjem električnog impulsa u ispisnu glavu dolazi do električnog nabijanja bojila, pri čemu se nabijaju se samo čestice pigmenta, dok vezivo ostaje nenabijeno. Zbog toga se na putu do tiskovne podloge gubi dio veziva i boja koja dolazi do podloge sadrži do 25% pigmenta. Time se generira vrlo tanak nanos bojila velike koncentracije pigmenta, koji je podobniji za kasniju obradu limenki (one se izlažu mehaničkim opterećenjima pod kojima dolazi do pucanja debljih nanosa bojila). [12]

2.3.2.4. Piezo Inkjet

Kod piezo Inkjeta za generiranje kapljice bojila koristi se princip varijacije volumena komore u mlaznici, čime se bojilo u određenom trenutku istiskuje iz same mlaznice. To se postiže pomoću piezo-keramičkog materijala koji se mehanički deformira pod utjecajem električnog naboja (Slika 8a). [8] Smanjivanjem volumena komore na otvoru mlaznice stvara se meniskus bojila, koji se otpušta nakon što se piezo keramika vrati u prvobitan položaj. Pritom će se i novo bojilo dovesti u komoru. Konstrukcija glave piezo Inkjet pisača može biti na principu rada parnih i neparnih mlaznica (Slika 8b). U toj konstrukciji dvije susjedne komore dijele piezo-keramički element. Deformacijom piezo keramike u parnim komorama dolazi do smanjivanja volumena i istiskivanja bojila, dok se u neparnima istovremeno dovodi novo bojilo i obrnuto.

Prednosti piezo Inkjeta očituju se u velikoj slobodi nastajanja kapljice bojila, te dugovječnim glavama pisača. Nedostaci su visoka cijena glava pisača i ostalog *hardwarea* te neisplativost kod proizvoda niske kvalitete. [9]



Slika 8: Piezo Inkjet: a) Princip rada; b) Konstrukcija glave na temelju par-nepar rada (izvor: H. Kipphan, *Handbook of print media*. Berlin: Springer-Verlag, 2001.)

2.3.3. Bojila za Inkjet

„Osnovni zahtjev koje Inkjet bojilo mora ispuniti jest da ono unutar kapilarnog kanala i otvora mlaznice mora ostati tekuće i neosušeno. Zatim se bojilo mora brzo osušiti na tiskovnoj podlozi i mora omogućiti visoku rezoluciju ispisa na što većem broju tiskovnih podloga.“ [2]

S obzirom na osnovu bojila, bojila za Inkjet možemo podijeliti u četiri najzastupljenije skupine: bojila s promjenom faze (*hot melt* bojila), bojila na bazi vode, bojila na bazi otapala i UV sušeća bojila. [9] Također, bojila možemo razlikovati s obzirom na podrijetlo njihova obojenja – ona mogu biti izvorno obojene tekućine (*dyes*) ili disperzije pigmenta u vezivu.

Bojila s promjenom faze isporučuju se u krutom stanju te se tope prije ulaska u Inkjet ispisnu glavu. Prednosti ovakvih bojila leže u njihovom brzom sušenju, ekološkoj prihvatljivosti i dobrom opacitetu (neprozirnosti). Kvaliteta otiska ovim se bojilima relativno lako kontrolira, budući da uslijed njihovog brzog hlađenja ne dolazi do raspršenja na tiskovnoj podlozi. Mane ovih bojila očituju se u nedostatku izdržljivosti i u neotpornosti na mehanička oštećenja. [9]

Bojila na bazi otapala pružaju veliku kvalitetu i izdržljivost otiska te su pogodne za tisak na mnogim tiskovnim podlogama. To omogućuje dobra adhezija na različite podloge te brzo sušenje, koje je često potpomognuto djelovanjem izvora topline. Iako same boje imaju nisku cijenu, zahtijevaju investicije kod održavanja sustava, budući da

uslijed brzog sušenja mogu uzrokovati začepljenje mlaznica. Uslijed sušenja dolazi do isparavanja otapala iz bojila, što je ekološki problem. [9]

Bojila na bazi vode imaju nisku cijenu i ekološki su prihvatljiva, no slabo penetriraju u tiskovnu podlogu. Zbog toga zahtijevaju poroznu tiskovnu podlogu ili posebno tretirane ili laminirane podloge koje omogućavaju prihvaćanje ovih bojila. [9] Zbog niske cijene koriste se prvenstveno u kontinuiranom Inkjetu, gdje je potrošnja bojila vrlo velika. [2]

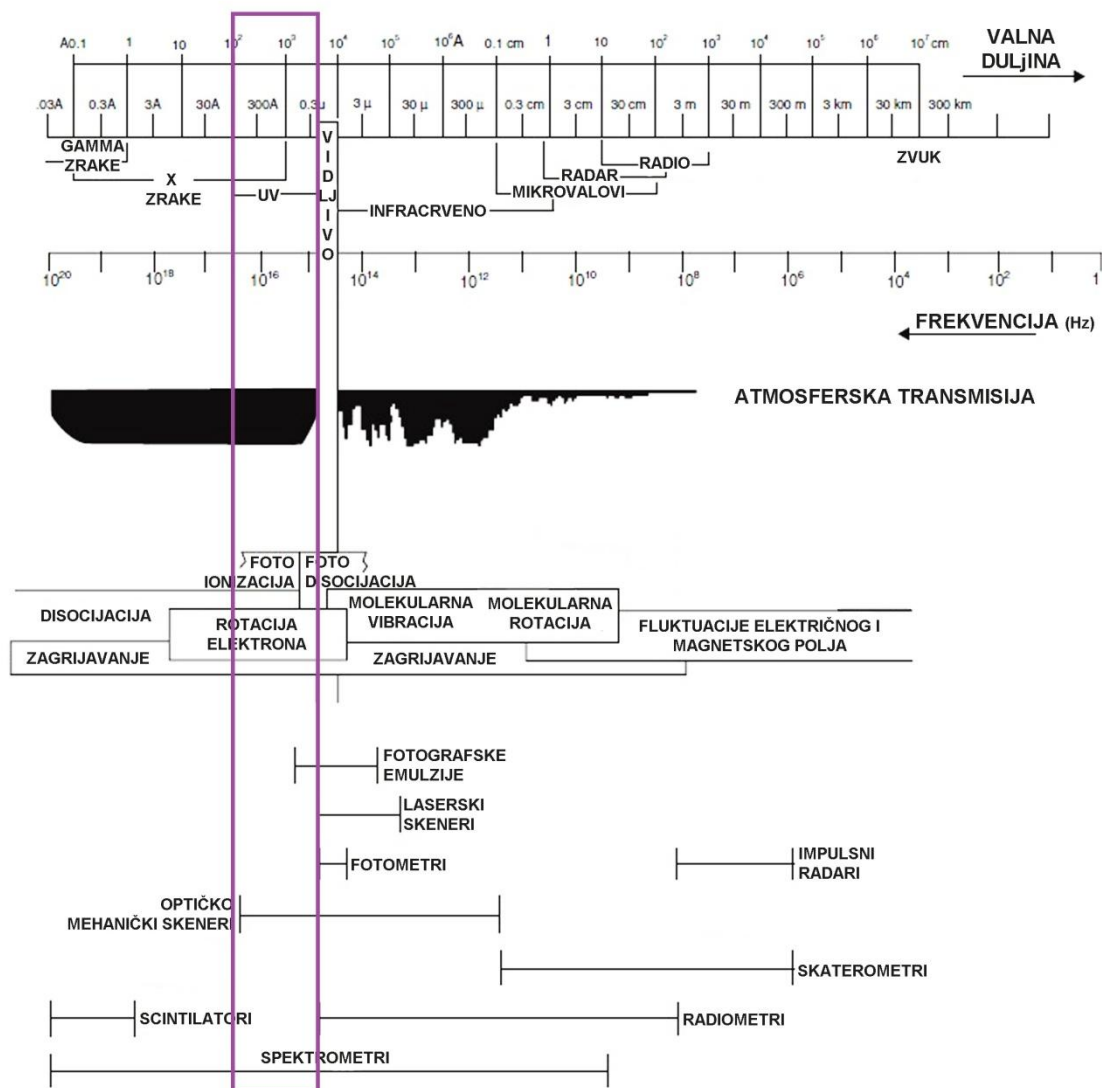
UV sušuća bojila suše momentalno uslijed djelovanja UV zračenja. Budući da se proces polimerizacije aktivira isključivo UV zračenjem, ne dolazi do zasušivanja bojila na mlaznicama. Ovisno o korištenim UV izvorima zračenja, primjena UV bojila može i ne mora nositi ekološka onečišćenja. Korištenjem UV bojila „ostvaruje se dobra adhezija između bojila i tiskovne podloge, a otisak je sjajan, s velikom otpornošću na svjetlost i toplinu.“ [2]

2.4. UV tehnologija u grafičkoj industriji

Posljednjih dvadesetak godina bilježi se porast korištenja UV tehnologije u grafičkoj industriji. To omogućava konstantan napredak i povećanje broja UV uređaja i procesa koji su bazirani na oslobađanju UV svjetlosti.

UV dio elektromagnetskog spektra zračenja leži na valnim duljinama od 200 do 380 nm, što znači da se radi o kratkovalnom zračenju. Sam UV dio spektra podijeljen je na tri područja: UVA, UVB i UVC. UVA područje sačinjavaju valne duljine od 315 do 380 nm te je najbliže vidljivom dijelu spektra. Ovaj tip UV zračenja može prodrijeti u duboke slojeve bojila te može osušiti debele nanose lakova i premaza. UVB područje proteže se od 280 do 315 nm te može sušiti deblje nanose bojila i lakova, dok UVA područje, koje iznosi od 200 do 280 nm, ima veliku energiju dovoljnu za momentalno sušenje UV boja i premaza te se koristi za površinska sušenja. [13] Slika 9 prikazuje spektar elektromagnetskog zračenja te mogućnosti njihove primjene.

Ultraljubičasto zračenje su „valovi što ih zrače atomi i molekule. Energije kvanta ultraljubičastog zračenja sežu od 3 eV do $2 \cdot 10^3$ eV, a to su upravo energije važne u kemijskim reakcijama. Ultraljubičasto zračenje izaziva ionizaciju i disocijaciju molekula, pa se na tome osnivaju njegove primjene u tehnici.“ [14]



Slika 9: Elektromagnetski spektar zračenja i mogućnost njihova mjerenja
(izvor: Focal Encyclopedia of photography, ur. Michael R. Peres, Elsevier, 2007.)

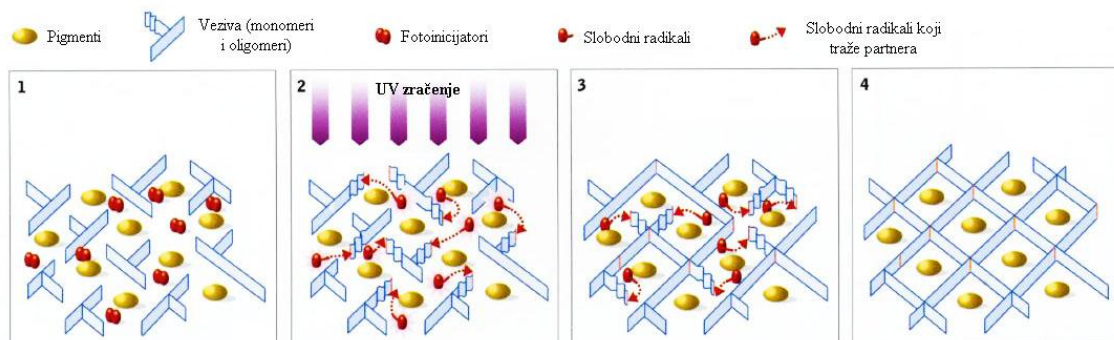
2.4.1. UV sušuća bojila

Sušenje otiska pomoću UV zračenja fotokemijski je proces kod kojeg UV zračenje visokog intenziteta trenutačno suši boju i premaze polimerizacijom. Glavna razlika u odnosu na konvencionalne metode sušenja jest izostanak isparavanja otapala iz bojila. Isparavanje otapala onečišćuje okolinu te smanjuje volumen otiska zajedno s debljinom nanosa bojila. Budući da se UV sušenjem količina nanosenog bojila zadržava, ono daje kvalitetnije i postojanije otiske.

UV sušenje zahtijeva korištenje UV bojila, lakova ili ljepila, koja reagiraju na točno određeno UV zračenje, pri čemu dolazi do aktivacije fotoreceptora i polimerizacije bojila. Sastav UV bojila razlikuje se s obzirom na tiskovnu podlogu, korištenu tehniku tiska i namjenu otiska. Međutim, u osnovi su bojila mješavina tekućih monomera i oligomera (koji imaju ulogu veziva), pigmenta, aditiva i fotoinicijatora. [13]

Postoje dva različita mehanizma UV sušenja: sušenje slobodnim radikalima i kationski proces sušenja. Polimerizacija slobodnim radikalima mnogo je češće zastupljena u proizvodnji bojila. Pritom će se sušenje bojila izvršiti u četiri faze: iniciranje formuliranja slobodnih radikala, iniciranje sušenja, propagacija (širenje polimerizacije) te terminalna faza u kojoj je proces sušenja završen. [9], [15]

UV bojila sadrže fotoinicijatore koji se kao aktivni dio bojila aktiviraju nakon izlaganja UV svjetlosti i pretvaraju u slobodne radikale (molekule koje imaju slobodan elektron). Slobodni radikali traže vezu koju predstavljaju tekući monomeri i oligomeri. Na taj se način slobodni polimeri i oligomeri međusobno povezuju u dugačke lance fiksirajući pigmente bojila između sebe. (Slika 10) Kada je proces sušenja (polimerizacije) završen, osušeno UV bojilo tvori jednoliku i glatku površinsku strukturu.



Slika 10: Proces sušenja (polimerizacije) UV bojila – 1. Bojilo u tekućem stanju; 2. UV zračenje aktivira fotoinicijatore (boja je još uvijek tekuća); 3. Fotoinicijatori se povezuju tvoreći makromolekule (bojilo se počinje stvrdnjavati); 4. Dovršen proces polimerizacije (izvor: J. Kokot, Ur., UV technology - A Practical Guide for all Printing Processes. Berufsgenossenschaft Druck und Papierverarbeitung, 2007.)

Većina monomera i oligomera korištenih kod formulacije UV sušućih bojila akrilati su različitih funkcionalnih skupina, iako se ponekad koriste i nezasićene poliesterske smole. Odabir monomera utječe na sposobnost adhezije bojila na tiskovnu podlogu (a od UV bojila se očekuje dobra adhezija na bilo koju podlogu), brzinu sušenja bojila,

viskoznost i izdržljivost površinskog sloja. Svojstva bojila mogu se dodatno poboljšati dodatkom aditiva, koji modificiraju svojstva adhezije, viskoznosti i površinske napetosti, produžuju životni vijek bojila (koji bi trebao iznositi između 9 i 12 mjeseci) i poboljšavaju otpornost na vremenske uvjete. [9]

Fotoinicijatori se, koji pokreću sam proces polimerizacije bojila, mogu pronaći u dvije vrste – tip I i tip II. Mnogo su češće u upotrebi fotoinicijatori tipa I, kod kojih pod utjecajem UV zračenja dolazi do cijepanja veza unutar molekula, čime nastaju slobodni radikali. Fotoinicijatori tipa II kod pobuđenog stanja reagiraju s drugom molekulom (koinicijatorom) kako bi generirali slobodne radikale. [9]

Iako se pigmenti mnogo češće koriste, koloranti u UV sušećim bojilima mogu biti i *dye*-ovi. Poteškoće koje se pritom javljaju odnose se na potrebu za vrlo malim česticama pigmenta ($< 1 \mu\text{m}$), kako bi nesmetano mogli prolaziti kroz otvore na mlaznicama glave pisača (njihova širina najčešće iznosi $30\text{-}50 \mu\text{m}$). [9]

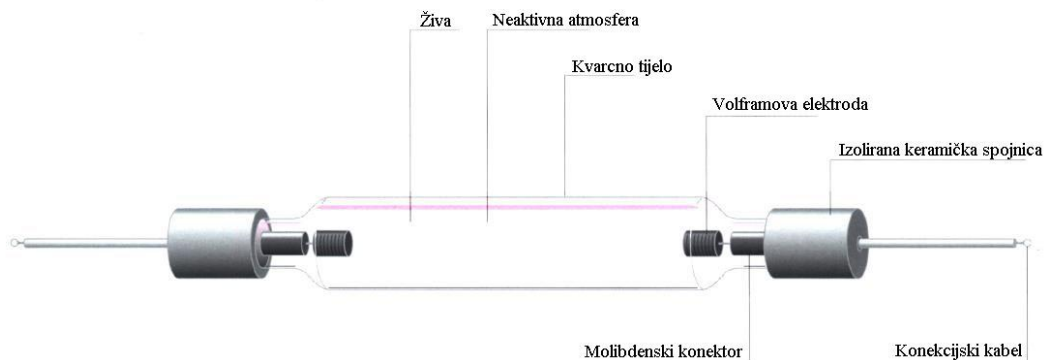
Iako se koriste mnogo rjeđe od sušenja sa slobodnim radikalima, UV sušeća bojila mogu sušiti i na principu *kationskog sušenja*. Kationsko sušenje ima niz prednosti, poput izvrsne adhezije na metale, staklo i polimere (poliolefine), manje izraženog mirisa otiska i manje toksičnosti otiska. No, ovaj je način sušenja vrlo podložan neučinkovitosti uslijed visoke vlage, budući da voda također može pokrenuti proces sušenja. [9]

2.4.2. Živine elektrolučne lampe

Još 1960. godine, kada je po prvi puta predstavljena tehnologija UV sušenja, kao svojevrsni standard svjetlosnog izvora postale su živine elektrolučne lampe. Takve lampe zrače u UV području, ali zrače i dio vidljivog spektra. Živa se nalazi u cijevi od kvarcnog stakla (Slika 11) koje propušta više od 90% UV zračenja i otporno je na temperature koje unutar cijevi dosegnu i do 1100°C . Na obje strane cijevi nalaze se elektrode koje su obično od volframa, a prostor među njima ispunjen je inertnim plinom (najčešće argonom). Plin se elektronima iz katode ionizira te se stvara električni luk i plin postaje provodljiv. Kinetičkom energijom elektrona unutrašnjost cijevi se zagrijava i živa počinje isparavati emitirajući svjetlost u UV području. Živa se u UV

elektrolučnim lampama najčešće koristi jer emitira široki spektar UV valnih duljina, što je čini pogodnom za sušenje različitih tipova boja i premaza. [13]

Iako širok spektar UV zračenja znači mogućnost sušenja širokog asortimana UV boja i lakova, ono zapravo znači i veliku potrošnju energije. Zračenje koje nije iskorišteno za iniciranje polimerizacije u otisku izgubljeno je. Upravo zbog širine spektra zračenje, živine lampe zrače i u UVC dijelu spektra, koje je opasno za ljudsko zdravlje. Također, prekomjernim zagrijavanjem i zračenjem dolazi do emisije topline i zagrijavanja cijelog sustava, koje onda zahtijeva hlađenje, što predstavlja dodatne energetske troškove. Također, korištenje živinih lampi uzrokuje stvaranje ozona kojeg je nužno odvoditi iz prostora tiskare, što zahtijeva dodatne investicije u odgovarajuće uređaje. Energetska neučinkovitost živinih lampi očituje se i u potrebi predgrijavanja. Životni vijek živinih lampi iznosi od 1000 do 5000 sati, što je malo u usporedbi sa životnim vijekom UV LED svjetlosnih izvora (>10.000 h). No, s druge strane, upotreba živinih lampi podrazumijeva njihovo lako održavanje i nisku početnu investiciju. [16]

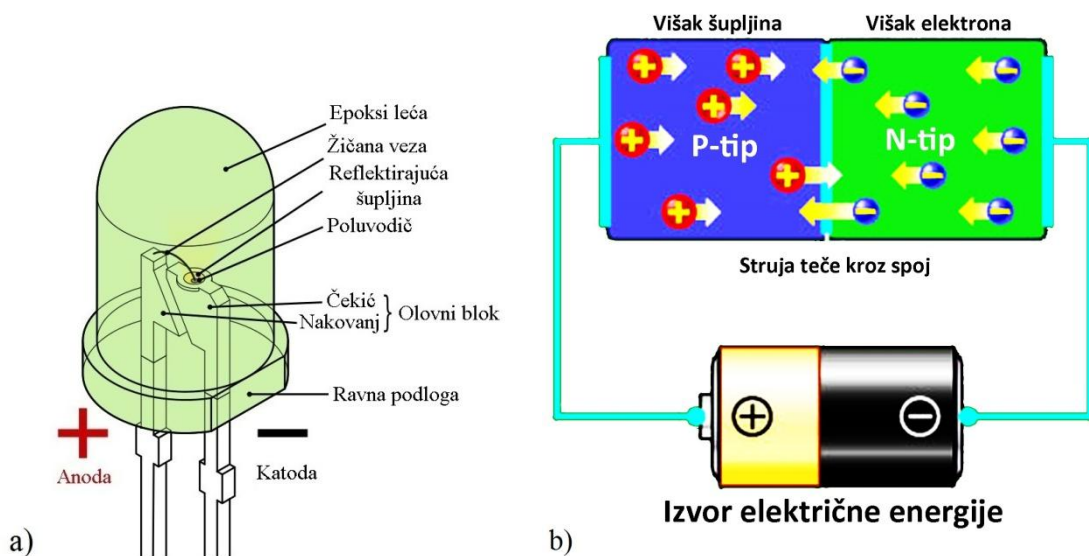


Slika 11: Shema živine elektrolučne lampe
(izvor: J. Kokot, Ur., *UV technology - A Practical Guide for all Printing Processes*. Berufsgenossenschaft Druck und Papierverarbeitung, 2007.)

2.4.3. UV LED svjetlosni izvori

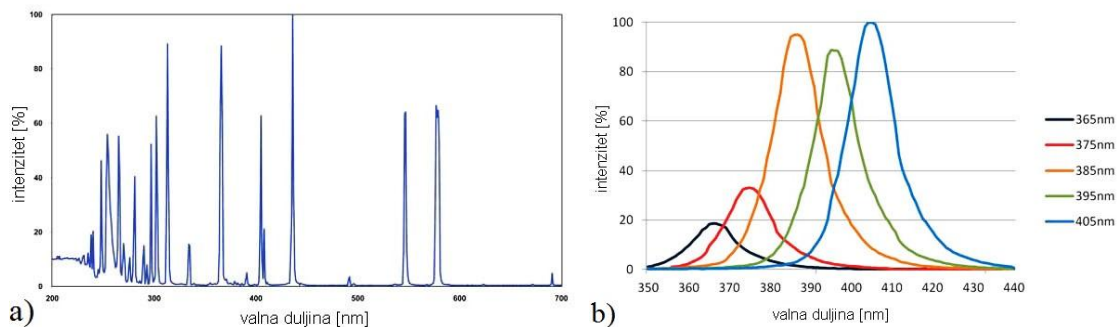
Svjetleće diode (eng. *LED – Light Emitting Diode*) vrsta su poluvodičkih dioda koje emitiraju svjetlo čije se funkcioniranje bazira na *pn-spoju* (spoj poluvodiča p-tipa i n-tipa) i elektrodama priključenima na svaku stranu diode. „Osnovni nosioci naboja kod p-poluvodiča su šupljine (višak slobodnih šupljina), a kod n-poluvodiča elektroni (višak slobodnih elektrona). ... Priključimo li p-n poluvodič na izvor električne struje, i to tako da pozitivan pol priključimo na p-stranu, a negativan pol na n-stranu poluvodiča, kroz

p-n spoj će proteći struja, koja je sastavljena od pomaka i difuzije elektrona i šupljina.“ [17] Do protoka struje dolazi jer slobodne elektrone u n-poluvodiču odbija negativna elektroda spojena na njega, te se oni kreću prema pozitivnoj elektrodi, odnosno p-poluvodiču. Šupljine p-poluvodiča kreću se u suprotnom smjeru, prema n-poluvodiču. Kao posljedica njihova kretanja, dolazi do emisije fotona, odnosno do emitiranja svjetlosti. Ovisno o materijalima koji se koriste kao poluvodiči, emitirat će se svjetlost različitih valnih duljina. Ukoliko elektrode priključimo obrnuto (pozitivnu na n-poluvodič, a negativnu na p-poluvodič), neće doći do protoka struje, budući da elektroni iz šupljine neće morati prelaziti u suprotan poluvodič kako bi došli do elektrode koja ih privlači. Kao posljedica toga, između poluvodiča će se stvoriti zona osiromašenja, područje u kojem nema viška ni slobodnih elektrona, ni šupljina. [18] (Slika 12)



Slika 12: Svyetleća dioda (LED) – a) Presjek; b) princip rada
(Izvor: T. Harris and W. Fenlon, “How Light Emitting Diodes Work,” How Stuff Works.)

Za razliku od živinih UV lampi, UV LED lampe nemaju raspršen spektar zračenja. Emitiraju područje jedne valne duljine, u područjima od 365-405 nm (Slika 13), zbog čega troše jako malo energije. Također, budući da zbog odsustva zračenja u infracrvenom području ne zrače toplinu, izrazito su pogodne za na tisk (ne uzrokuju dodatno zagrijavanje tiskarskog sustava i podloge). Ekološki su također mnogo prihvatljivije, budući da ne sadrže teške metale poput žive, te ne dolazi do produciranja ozona ili štetnog UVC zračenja. Jeftinije su i životni vijek im je mnogo duži. Također, njihovo zračenje je mnogo usmjerenije, čime je isključeno sušenje boje na mlaznicama.



Slika 13: Spektar zračenja: a) žive elektrofluorne svjetiljke b) UV LED svjetlosnog izvora (izvor: Höhle Group, "UV-LED vs. conventional UV Technology." München, 2013. http://www.hoehle.de/fileadmin/hoehle/_html/presse/Fachartikel_en/UV_vs_LED_e.pdf)

Problem s UV LED tehnologijom leži u njihovom vrlo uskom području zračenja. UV boje i lakovi stoga trebaju biti točno prilagođeni takvom izvoru zračenja. Upravo zbog tih razloga, UV LED tehnologija najsvjetliju budućnost ima na području Inkjeta, jer su za Inkjet strojeve boje obično prilagođene dotičnom stroju, a nerijetko ih proizvode i sami proizvođači strojeva.

Tijekom nekoliko desetljeća korištenja UV tehnologije sušenja, razvio se širok spektar odgovarajućih bojila i lakova. S druge strane, budući da je UV LED tehnologija u grafičkoj industriji još uvijek relativno nova, postoji samo nekoliko optimiziranih sustava za uspješnu upotrebu UV LED-a. Jedan od razloga tome je i manjak odgovarajućih fotoinicijatora (odgovaraju samo fotoinicijatori osjetljivi na velike UV valne duljine, jer je većina spektralnog zračenja UV LED-a u UVA području). Korištenjem neodgovarajućih fotoinicijatora, odnosno neodgovarajućeg bojila, otisak neće biti dovoljno osušen. Svojevrsno rješenje jest povećanje koncentracije fotoinicijatora u bojilima za UV LED sustave, no ono ima niz nedostataka – žućenje otiska, intenzivan neugodan miris i smanjenje brzine sušenja, odnosno tiska. Dodatan problem stvara i visoka cijena formulacija za UV LED sustave. Vidljivo je da se na ovome području očekuje velik razvoj i prilagodba novoj tehnologiji. Ipak, u nekim se područjima UV LED već udomaćio. Radi se o apliciranju ljepila. Budući da se reaktivnost fotoinicijatora u ljepilima uvijek nalazila u UVA ili UV vidljivom području, oni nisu trebali prolaziti posebnu prilagodbu.

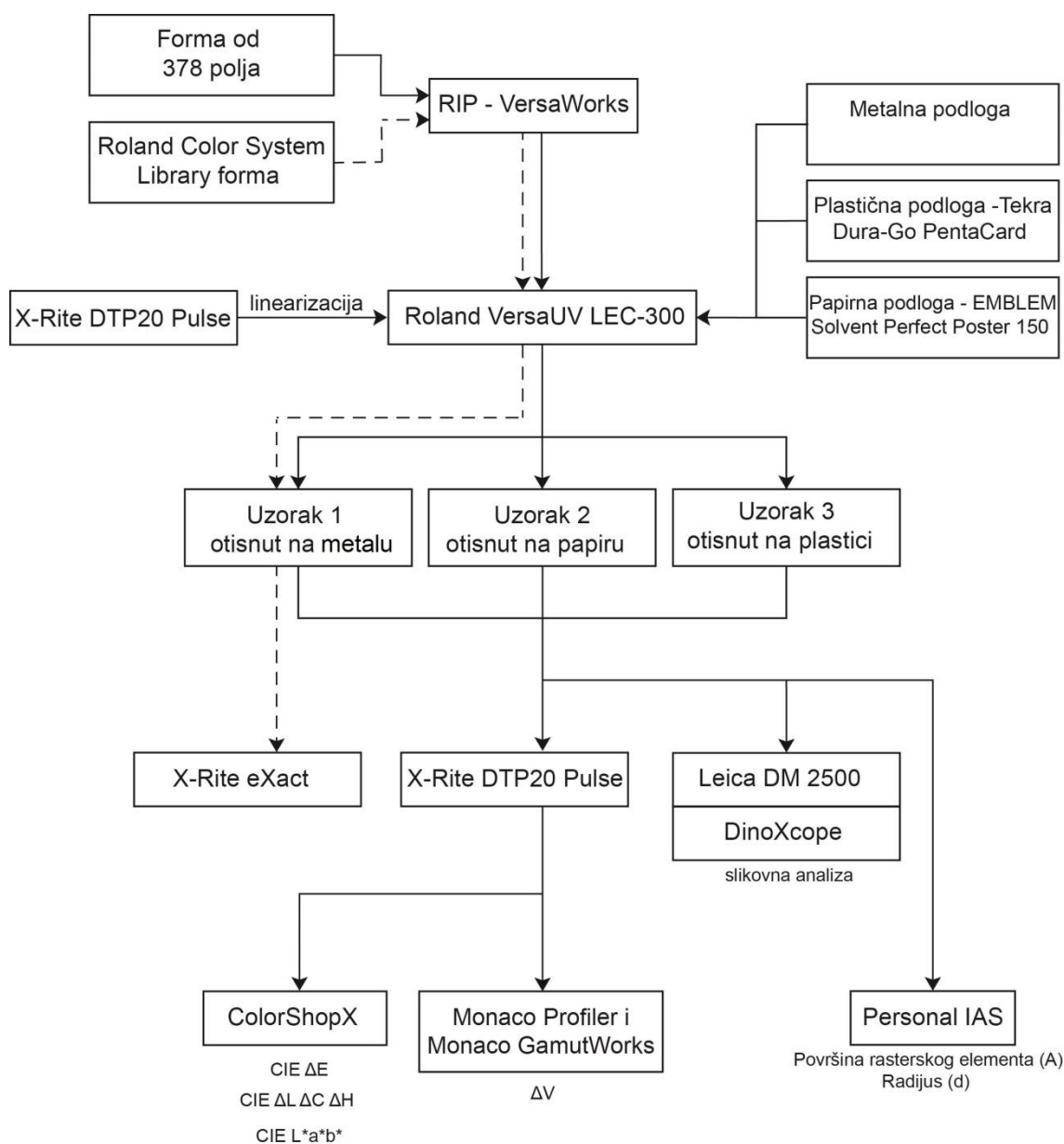
2.4.4. UV Inkjet

Iako svako bojilo i svaka tehnika tiska ima svoje prednosti i nedostatke, jedna se kombinacija zadnjih godina istaknula po svojem razvoju. Riječ je UV bojama primijenjenima u piezo tehnici Inkjeta. [9], [19] Što se tiče nedostataka UV piezoelektričnih DOD pisaćih glava, postoji nekoliko ograničenja karakteristika samog bojila (kako bi ono bilo prilagođeno tehnici otiskivanja). Viskoznost bojila mora biti relativno mala, te iznositi između 8 i 12 cP (0.008 – 0.012 Pa·s) kod temperature otiskivanja (ona obično iznosi oko 70°C). Površinska napetost bojila također je veoma važna, no ona se razlikuje s obzirom na tip pisaće glave koji se koristi. [9]

Debljina nanosa bojila otisnutog Inkjet tehnologijom može iznositi i do 15 μm , što znači da se UV sušenje mora provoditi vrlo visokim energijama, kako bi ova debljina nanosa mogla brzo osušiti. Razlog velikog nanosa boje leži u minimalnoj količini boje koja sadrži dovoljan broj fotoinicijatori koji će pokrenuti proces sušenja. S druge strane, veća količina bojila znači potrebu za većim energijama UV zračenja, čime dolazi do zagrijavanja tiskovne podloge. Kod višebojnog UV tiska nanos bojila može iznositi i do 20 μm . Za sušenje UV bojila najčešće se koristi kombinacija sva tri područja UV spektra – UVA, UVB i UVC (prvi sušač čine lampe dugovalnog UV zračenja, koje osiguravaju dobru adheziju bojila na podlogu; lampe drugog sušača emitiraju UV zračenje kratkih valnih duljina koje suše površinski sloj bojila). Brzina tiska ovisi o frekvenciji izbacivanja kapljica bojila prema podlozi. Ona obično iznosi između 5 i 40 kHz. Budući da govorimo o relativno maloj frekvenciji i sama je brzina tiska mala, te iznosi do 0,5 m/s. [13]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Metodologija rada



Slika 14: Shema izvršenog eksperimenta

Za otiskivanje na tri tiskovne podloge – bijeli lim, plastiku (*Tekrina Dura-Go/Pentacard* rigidna vinilna ploča debljine 600 μm s obostranim mat premazom) i papir (*EMBLEM Solvent Perfect Poster 150*, bijeli premazani papir gramature 150 g/m^2) korišten je piezo Inkjet stroj *Roland VersaUV LEC-300*. Prije samog otiskivanja provedena je linearizacija, odnosno korekcija krivulje reprodukcije, pomoću

spektrofotometra *X-Rite DTP20 Pulse* i RIP softvera *VersaWorks*. U tu svrhu otisnut je klin (RTV vrijednosti od 10 – 100% za četiri procesne boje – cijan, magentu, žutu i crnu) prema standardnim postavka stroja za papirnu tiskovnu podlogu (upotrijebljenima kasnije u eksperimentu i za druge tiskovne podloge). Kolorimetrijske vrijednosti klina izmjerene su pomoću spektrofotometra *X-Rite DTP20 Pulse*, čime su unutar RIP softvera generirane reprodukcijske krivulje za svaku pojedinu boju. Dobivene reprodukcijske krivulje ispravljene su u linearni oblik (kut od 45°). Postavke RIP-a pri otiskivanju bile su identične za sve tri tiskovne podloge: *Print quality: high; CMYK; Halftone: dihter; Direction: uni-direction*.

Na sve tri podloge otisnuta je forma od 378 definiranih polja, dok se na lim dodatno otisnula *Roland Color System Library* forma. Kolorimetrijske vrijednosti uzoraka s formom od 378 polja izmjerene su spektrofotometrom *X-Rite DTP20 Pulse* za sve tri tiskovne podloge. Izmjereni podaci bile su L*a*b* vrijednosti, koje su se prikazivale u softveru *ColorShopX* (spremljene su u tekstualnu datoteku (.txt)). Potom su se generirali ICC profili za svaku tiskovnu podlogu pomoću softvera *MonacoProfiler* (importiranjem tekstualne datoteke). Stvorene .icc datoteke (za lim, plastiku i papir) otvorene su u softveru *Monaco Gamut Works*, koji je omogućio generiranje vizualnog oblika gamuta. Matematički izračun gamuta pritom nije poznat.

Tekstualna datoteka izvršenih mjerenja otvorena je i u *Microsoft Office Excel*-u, gdje su primijenjene L*a*b* vrijednosti sa 25, 50, 70 i 100% RTV) i crnu (33, 66 i 100% RTV). Dobivenim vrijednostima izračunata je razlika u obojenju (ΔE), svjetlini (ΔL) i kromatičnosti (ΔC) između različitih tiskovnih podloga. Pritom je korištena matematička formula ΔE_{2000} koja je definirana izrazom:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)} \quad (1),$$

pri čemu je ΔE_{00} razlika u obojenju, $\Delta L'$ razlika u svjetlini, $\Delta C'_{ab}$ razlika u kromatičnosti, $\Delta H'_{ab}$ razlika u tonu, S_H , S_L i S_C korekcijske funkcije tona, svjetline i kromatičnosti. k_H , k_L i k_C parametarski faktori tona, svjetline i kromatičnosti i R_T funkcija koja korigira kromatske razlike u plavom području. [20] Izračunate su vrijednosti pomoću softvera

OriginPro 8.5 grafički prikazane u dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim grafovima priloženima u radu.

Polja na formi *Roland Color System Library*, otisnutoj samo na metalnoj podlozi, izmjerena su spektrofotometrom *X-Rite eXact*. Mjerenje je izvršeno uz podešene opcije: filter M1, rasvjeta D50 i kut promatranja 2°. Spektrofotometar prethodno je kalibriran, nakon čega je izmjerena podloga. Potom je svako polje izmjereno pet puta, pri čemu spektrofotometar automatski izračunava srednju vrijednost mjerenja koju simultano prikazuje u *Microsoft Office Excelu* (L*a*b* vrijednosti). Dobivene vrijednosti uspoređivane su s bazom podataka koja sadrži L*a*b* vrijednosti *Pantone* boja.

Za detaljnu analizu rasterske reprodukcije, uzorci su slikani pomoću kamere *DinoLite* i mikroskopa *Leica DM2500* (povećanje od 50x). Pomoću uređaja *Personal IAS* određena je površina rasterskog elementa, njegova cirkularnost i dijametar na poljima. Pritom su analizirana područja od 5% RTV za cijan, magentu, žutu i crnu boju (lagano prepoznavanje rasterskih elemenata).

3.2. Korišteni materijali, tiskarski stroj i mjerni uređaji

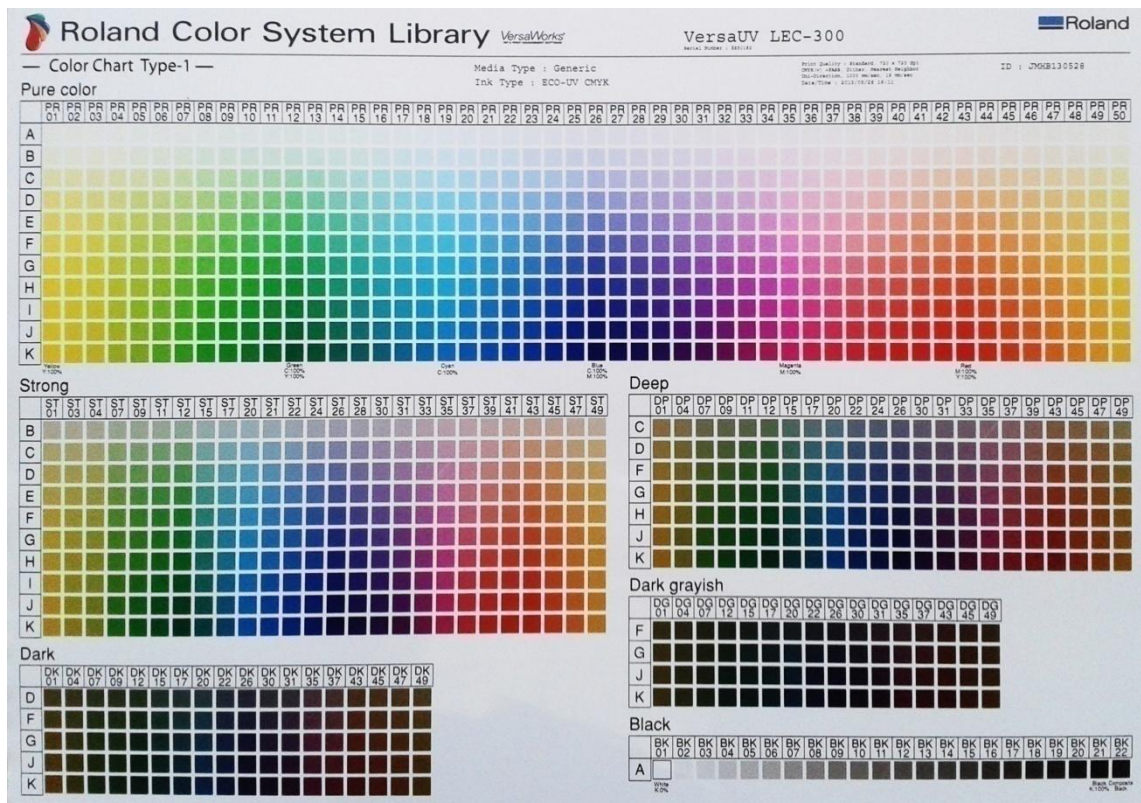
3.2.1. Digitalne tiskovne forme

Na tri različite tiskovne podloge (papir, bijeli lim i plastiku) otisnuli smo tiskovnu formu definiranu softverom *MonacoProfiler*. (Slika 15) Digitalna tiskovna forma sastojala se od niza elemenata za kontrolu kvalitete otiska, od kojih su se za potrebe ovog eksperimenta koristili stepenasti klinovi CMYK boja (za provedbu slikovne analize) te područje od 378 pomiješanih polja (za određivanje gamuta i analizu kolorimetrijskih promjena). Tiskovna forma dimenzija je 32x34 cm, što je ujedno minimum za kontrolu kvalitete reprodukcije.

Kako bi se utvrdila mogućnost generiranja *Pantone* boja na metalnoj podlozi pomoću Inkjet tehnike otiska, na lim je otisnuta tiskovna forma *Roland Color System Library* (Slika 16). To je originalna Rolandova forma namijenjena otiskivanju kataloga boja za Rolandov printer i njegove ECO-UV boje.



Slika 15: Digitalna tiskovna forma otisnuta na tri različita medija



Slika 16: Roland Color System Library digitalna tiskovna forma

3.2.2. Tiskarski stroj

Za otiskivanje uzoraka korišten je tiskarski stroj *Roland VersaUV LEC-300*, koji radi na principu piezo Inkjeta. Osim tiska, stroj ima i mogućnost izrezivanja. Za tisak se koriste ECO-UV bojila, dostupna kao CMYK bojila, bijelo bojilo i lak. Za potrebe eksperimenta korištena su samo CMYK bojila. Bojilo suši na principu UV zračenja, za što se koriste dvije UV LED lampe. Stroj može otiskivati na medije širine od 182 do 762 mm, te debljine od 0.4 do 1 mm. [21] Konekcija DTP računala i tiskarskog stroja *Roland VersaUV LEC-300* ostvarena je pomoću RIP softvera *VersaWorks*. Softver dolazi zajedno sa strojem, te mu je prilagođen, a omogućuje pretvaranje slike u rasterski oblik pomoću *Postscript 3* tehnologije.

3.2.3. Tiskarsko bojilo

Kod otiskivanja se koristi Rolandovo bojilo ECO-UV, namijenjeno tiskarskim strojevima serije *VersaUV*. Bojilo se nalazi u spremnicima zapremine 200 ml. Komponente bojila izražene u težinskih postocima su: akrilni esteri 30-45%, pigment 1-5%, heksametilen diakrilat 5-30% (različiti udijeli u bojilima), akrilni amin sinergist 10-20%, derivati fosfin oksida 5-15%, ostali inicijatori polimerizacije 1-5%, ostali fotoosjetljivi monomeri 15-30% i sintetičke smole 0,5-5%. Pigmenti se razlikuju s obzirom na obojenje (za crnu se bojilo koristi čađa, za žutu boju žuti pigment 150 (kompleksan organski spoj na bazi nikla), za cijan bakrov (II) ftalocijanin te za magentu crveni pigment (točan kemijska formulacija poslovna je tajna, te nije dostupna u specifikacijama bojila). [22]

ECO-UV bojilo tekućina je specifičnog mirisa i viskoznosti od 6 do 8 mPa·s (pri temperaturi od 25°C). Hlapište je na temperaturi od 67-70°C. Bojilo je nestabilno pod utjecajem topline i/ili svjetla, budući da u uvjetima visoke temperature i UV svjetla ubrzano polimerizira. Bojilo je nestabilno u doticaju s kiselinama, aminima, slobodnim radikalima i oksidacijskim sredstvima. [22]

3.2.4. Tiskovne podloge

3.2.4.1. Metalna tiskovna podloga (bijeli lim)

Metalna podloga bila je limena podloga, obostrano premazana, debljine 0,27 μm . S vanjske je strane premazana bijelim lakom na koji se vršio tisak. Kolorimetrijske vrijednosti bijele površine iznosile su: $L^*=85,46$; $a^*=-0,38$; $b^*=-4,08$.

3.2.4.2. Papirna tiskovna podloga

Za papirnu se podlogu koristio papir *EMBLEM Solvent Perfect Poster 150*, premazani papir namijenjen digitalnom Inkjet tisku. Podloga je prilagođena tisku UV i lateks bojama te bojama na bazi otapala. Premaz je polu-mat, opacitet papira iznosi 99,5% (ISO 2471), a gramatura 150 g/m^2 . [23]

3.2.4.3. Plastična tiskovna podloga

Kao plastična tiskovna podloga korištena je Tekrina *Dura-GO/Pentacard* bijela vinilna rigidna ploča debljine 600 μm . Ploča je premazana obje strane mat premazom prilagođenim za tisak u Indigo tehnici. [24] Kolorimetrijske vrijednosti bijele površine iznosile su: $L^*=93,94$; $a^*=-2,57$; $b^*=-3,27$.

3.2.5. Spektrofotometri i denzitometri

3.2.5.1. X-Rite DTP20 „Pulse“

Za kolorimetrijsko mjerenje otisnutih uzoraka korišten je spektrofotometar *X-Rite DTP20 „Pulse“*. Njime je izmjereno 378 polja ($L^*a^*b^*$ vrijednosti) potrebnih za generiranje gamuta za sve tri tiskovne podloge i utvrđivanje kolorimetrijskih razlika među njima. Uređaj je prije mjerenja kalibriran na standardnoj bijeloj podlozi. Spektrofotometar mjeri refleksiju obojenog uzorka, a koristi spektralni senzor LIST tehnologije i mjernu geometriju $0^\circ/45^\circ$ ANSI/ISO 5-4. Promjer mjernog zaslona iznosi 3.2 mm, temperatura izvora svjetla 2850 K, a spektralni raspon 400 – 700 nm. Raspon refleksije je 0 – 160% R, ponovljivost mjerenja na bijelom je $0.2 \Delta E_{94} \text{ max}$; $\pm 0.01 D \text{ max}$, dok je interno instrumentsko slaganje u prosjeku manje od $0.3 \Delta E_{94}$, a maksimum manji od $0.6 \Delta E_{94}$. Same dimenzije uređaja su 6.1 cm x 6.1 cm x 13.2 cm, a težina iznosi 258 g. [26]

3.2.5.2. *X-Rite eXact*

Spektrofotometar i denzitometar *X-Rite eXact* korišten je za mjerenje $L^*a^*b^*$ vrijednosti polja *Roland Color System Library* tiskovne forme, otisnute na metalnoj tiskovnoj podlozi. Za kalibraciju spektrofotometra ne postoji fizički standard, već je standard integriran unutar uređaja te je kalibracija automatska. Spektralni senzor radi na principu DRS tehnologije, a spektralni raspon iznosi 400 – 700 nm. Mjerna geometrija je 45°/0° ISO 5-4:2009(E), dok promjer mjernog zaslona može iznositi 1.5, 2, 4 ili 6 mm. Postoje dva izvora svjetlosti – izvor tipa A (temperatura svjetlosti 2850 K) i UV LED izvor. Moguća su četiri uvjeta mjerenja – M0 (nepolarizirano, bez filtera, UV uključen); M1 (D50); M2 (filter koji isključuje UV) i M3 (polarizirajući filter). Za potrebe eksperimenta korišten je M1 uvjet mjerenja (svjetlosni izvor D50). Interno instrumentsko slaganje iznosi prosječno 0.25 ΔE_{ab} (maksimalno je 0.45 ΔE_{ab}), a ponovljivost na bijelom 0.05 ΔE_{ab} . Same dimenzije uređaja su 7.6 cm x 7.8 cm x 18 cm, a težina iznosi 700 g. [27]

3.2.6. *Korišteni mikroskopski uređaji*

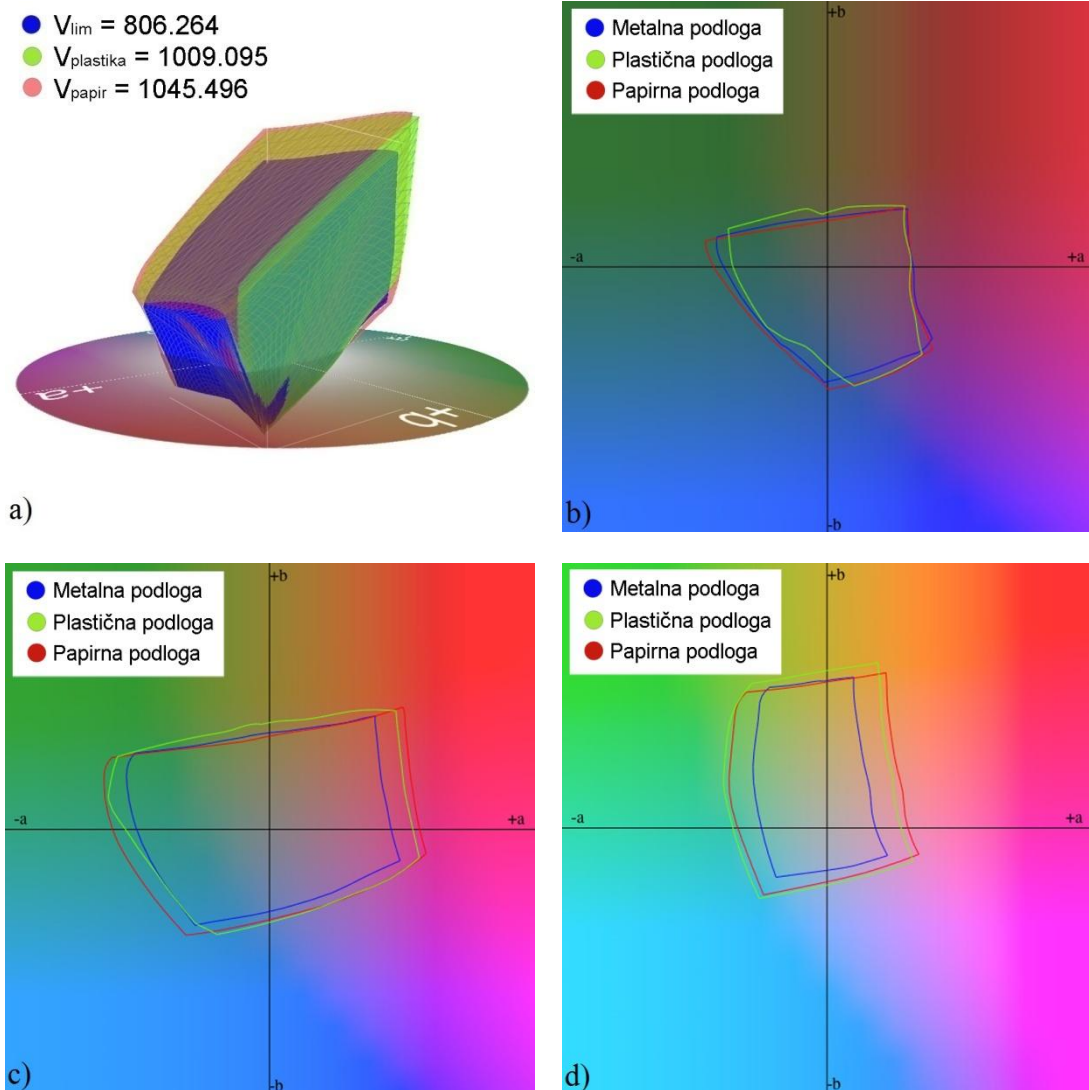
Personal IAS (Image Analysis System) je prijenosni digitalni mikroskop koji služi za slikovnu analizu kvalitete otiska. Uređaj koristi mjernu geometriju $\geq 45^\circ/0^\circ$ i CCD senzor u boji. Rezolucija uređaja je 5 μm po pikselu, a promjer mjernog zaslona iznosi 2.4 mm. Rezultati mjerenja prikazuju se na LCD ekranu rezolucije 320 x 240. Teži 850 g, a dimenzije su mu 23.1 cm x 9.4 cm x 5.3 cm. Uređaj omogućuje analizu kvalitete otiska prema vrijednostima rasterskog elementa (radijus, promjer, površina, cirkularnost), utvrđivanju rastertonske vrijednosti, kuta rastriranja, detektiranju grešaka u tisku, kvaliteti reprodukcije teksta i linija i drugom. [28] Uređaj *Personal IAS* u ovom je radu korišten za utvrđivanje srednje vrijednosti površine, cirkularnosti i radijusa rasterskih elemenata za cijan, magentu, žutu i crnu boju.

Za vizualnu kontrolu otisaka korišteni su mikroskop Leica DM2500 i kamera DinoLite, pomoću kojih su dobivene slike povećanja 50x.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Gamut

Kolorni gamut reproduciranih tonova definiran je kao volumen trodimenzionalnog CIE $L^*a^*b^*$ prostora te prikazuje raspon reproduciranih tonova. Slika 17 prikazuje kolorne gamute, pri čemu se uspoređuju tri različita tipa tiskovnih podloga otisnuta uz konstantne postavke u tisku (Roland VersaUV LEC-300, isto UV bojilo, jednaki parametri RIP-a, jednak otisnut sadržaj). Time je omogućena analiza utjecaja istraživanih podloga na raspon kolorne reprodukcije.



Slika 17: Usporedba kolornih gamuta za tri tiskovne podloge – lim (plava boja), plastika (zelena boja) i papir (crvena boja).

a) 3D prikaz b) presjek $L=30$ c) presjek $L=50$ d) presjek $L=70$.

Slika 17a prikazuje odnos gamuta u CIE $L^*a^*b^*$ prostoru, te volumne vrijednosti gamuta. Razlike između volumena gamuta različitih tiskovnih podloga iznose: $\Delta V_{\text{lim-papir}}=239,232$, $\Delta V_{\text{lim-plastika}}=202,831$ i $\Delta V_{\text{plastika-papir}}=36,401$ volumnih jedinica. Evidentno najmanji volumen gamuta ima lim, kod kojeg se ne reproduciraju svijetli tonovi, što je vidljivo i na preostalim presjecima gamuta ($L=30$, $L=50$ i $L=70$). S druge strane, tamni su tonovi dobro reproducirani (Slika 17b, presjek na $L=30$) te kod njih lim ne pokazuje značajna odstupanja u odnosu na papir, dok u odnosu na plastiku ima i bolji raspon tonova, posebice u $-a^*$ koordinatnom smjeru (zeleno-plavi tonovi).

Na srednjim tonskim područjima (Slika 17c, presjek na $L=50$) lim pokazuje vidljivo smanjenje gamuta u odnosu na papir, i to u oba smjera a^* osi (zeleno i crveno). Plastika i papir imaju slične raspone reprodukcije tonova, međutim papir bolje reproducira crvene i zelene tonove (najveće je odstupanje vidljivo u smjeru cijana, gdje plastika ima znatno manji raspon reprodukcije), dok plastika ima nešto bolju reprodukciju žutih tonova.

Kod svijetlih tonova (Slika 17d, presjek na $L=70$) lim ima izraženo manji gamut od papira i plastike. Odstupanje je posebice vidljivo u crvenim i zelenim tonovima te u manjoj mjeri u plavim tonovima. U $+b^*$ koordinatnom smjeru (žuti tonovi) lim ima čak bolju reprodukciju od papira. Papir i plastika imaju sličan raspon reprodukcije tonova, s tim da je gamut plastike pomaknut u zeleno-žutom pravcu u odnosu na papir.

Uzrok lošoj reprodukciji svijetlih tonova na metalnoj limenoj podlozi možemo objasniti $L^*a^*b^*$ vrijednostima same tiskovne podloge (Tabela 1).

Tabela 1: $L^*a^*b^*$ vrijednosti korištenih tiskovnih podloga

	L^*	a^*	b^*
Papir	94,49	0,72	-2,36
Lim	85,46	-0,38	-4,08
Plastika	93,94	-2,57	-3,27

Metalna površina ima znatno manju svjetlinu od plastike i papira ($\Delta L^*_{\text{lim-papir}}=9,03$; $\Delta L^*_{\text{lim-plastika}}=8,48$). Zbog toga su svi otisnuti tonovi tamniji, što rezultira dobro reprodukcijom tamnih tonova i gubitkom svijetlih tonova. Između papira i plastike

razlika u svjetlini jako je mala ($\Delta L^*_{\text{papir-plastika}}=0,55$). Posljedica toga je podjednak raspon reprodukcije tonova papira i plastike.

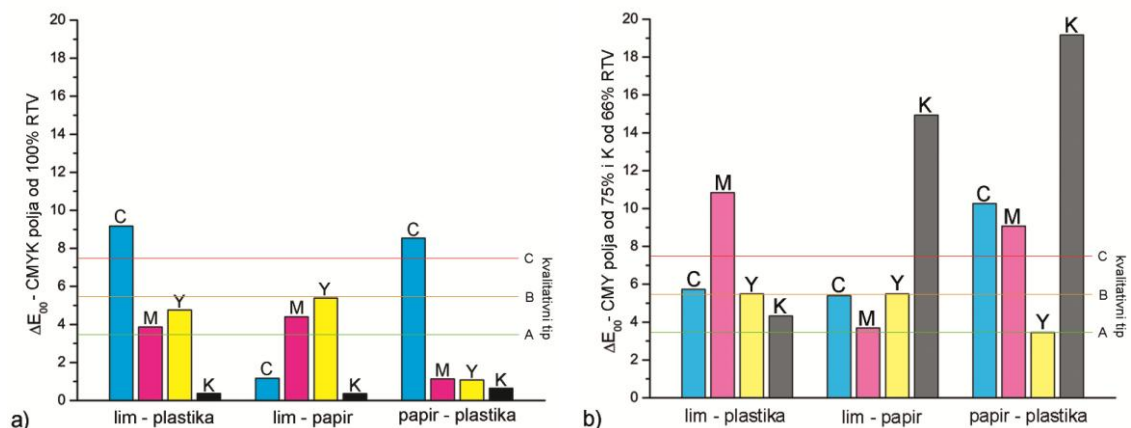
4.2. Kolorimetrijska analiza

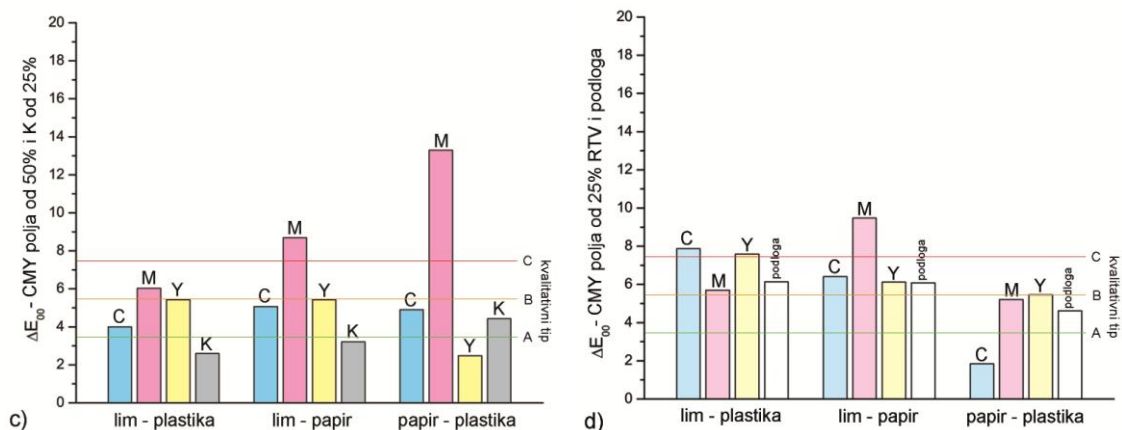
4.2.1. Razlike u obojenju ΔE_{00}

Za bolje razumijevanje analize razlika u obojenju otisaka, važno je znati optimalne vrijednosti i tolerancije ΔE propisane grafičkim standardima. Najaktualniji standard za digitalni tisak je *PSD – ProcessStandard Digital*, koji je temelj standarda ISO 15311 (trenutno u proceduri donošenja). Prema njemu, uvedene su tri kategorije (A, B i C) kvalitete otiska. S obzirom na kategoriju otiska, razlike u obojenju ne smiju prelaziti sljedeće vrijednosti:

- kvalitativni tip A: $\Delta E^*_{ab} \leq 2,5$ za podlogu,
 $\Delta E^*_{ab} \leq 3,5$ za 100% CMYKRGB i 50% CMYK
- kvalitativni tip B: $\Delta E^*_{ab} \leq 3,5$ za podlogu
 $\Delta E^*_{ab} \leq 5,5$ za 100% CMYKRGB i 50% CMYK
- kvalitativni tip C: $\Delta E^*_{ab} \leq 4,5$ za podlogu,
 $\Delta E^*_{ab} \leq 7,5$ za 100% CMYKRGB i 50% CMYK [29]

Slika 18 prikazuje razlike u obojenju (ΔE_{00}) CMYK boja u odnosu na različite tiskovne podloge. Slika sadrži četiri dijagrama, od kojih svaki prikazuje pojedine oscilacije punog tona i tri karakteristične rastertonske vrijednosti (75%, 50% i 25% RTV za CMY i 66% i 33% RTV za K).





Slika 18: Razlika u obojenju, ΔE_{00} , u odnosu na različite tiskovne podloge:
a) 100% RTV za CMYK; b) 75% RTV za CMY i 66% RTV za crnu; c) 50% RTV za CMY i 33% RTV za crnu; d) 25% RTV za CMY i podloga

Zanimljivo je da različite boje pokazuju različita odstupanja u obojenju za pojedine rastertonske vrijednosti. Na punom tonu najveće odstupanje pokazuje cijan ($\Delta E_{C100\%;lim-plastika}=9,18$), a kod srednjih tonova crna boja ($\Delta E_{K66\%;papier-plastika}=19,17$) i magenta ($\Delta E_{M50\%;papier-plastika}=13,30$). Odstupanje cijana najuočljivije je između razlika u obojenju *lim-plastika* i *papir-plastika*, što sugerira na problematičan cijan otisak na plastičnoj podlozi. Razlika između maksimalne i minimalne razlike u obojenju cijana iznosi $\Delta E_{C100\%;max-min}=8,01$.

Crna boja pokazuje velika odstupanja u obojenju na poljima od 66% RTV. To je odstupanje najveće između papirne i plastične podloge ($\Delta E_{K66\%;papier-plastika}=19,17$; $\Delta E_{K66\%;lim-papir}=14,94$), dok je razlika obojenja između metalne i plastične podloge minimalna ($\Delta E_{K66\%;lim-plastika}=4,33$). To znači da razlika između minimalne i maksimalne razlike u obojenju između tiskovnih podloga iznosi $\Delta E_{K66\%;max-min}=14,84$. Kod kromatskih srednjih tonova (50% RTV) najveća odstupanja ima magenta ($\Delta E_{M50\%;max-min}=7,27$).

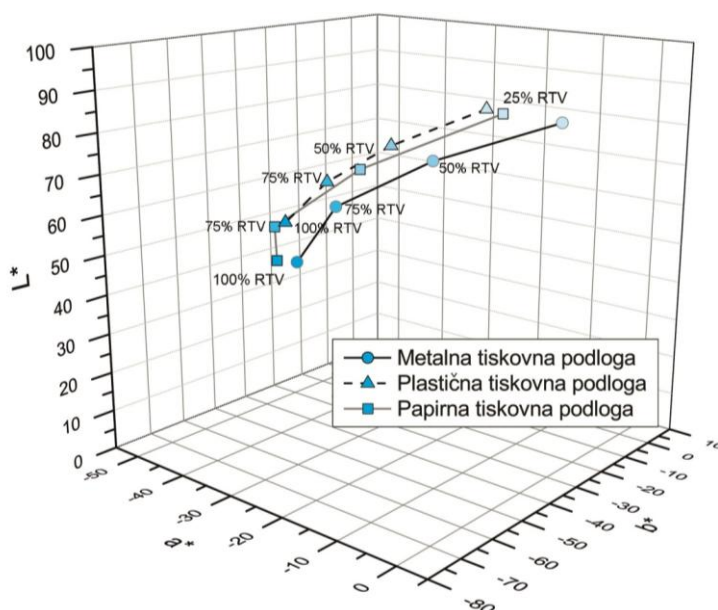
Slika 18d prikazuje ΔE_{00} vrijednosti za 25% RTV za cijan, magentu i žutu boju te podlogu. Primjetan je utjecaj podloge na razlike u obojenju između različitih tiskovnih podloga. Najslabije podloge prema kolorimetrijskim vrijednostima su papir i plastika ($\Delta E_{papier-plastika}=4,62$). Razlika u obojenju između lima i plastike, odnosno papira je podjednaka, za što je najviše zaslužna manja svjetlina (L^*) lima ($\Delta E_{lim-plastika}=6,13$; $\Delta E_{lim-papir}=6,08$).

4.2.2. Trodimenzionalni prikaz CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti ispitivanih uzoraka

Da bi odgonetnuli gdje su nastale kolorne promjene potrebno je konstruirati CIE $L^*a^*b^*$ 3D kolorne dijagrame. Slike 19, 20, 21 i 22 prikazuju CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti za tri korištene tiskovne podloge (izmjerene vrijednosti priložene su u Prilozima 1, 2, 3 i 4). Dijagrami su prikazani u međusobno ujednačenim mjerilima, kako bi se lakše provela usporedba kolorimetrijskih promjena među različitim bojama.

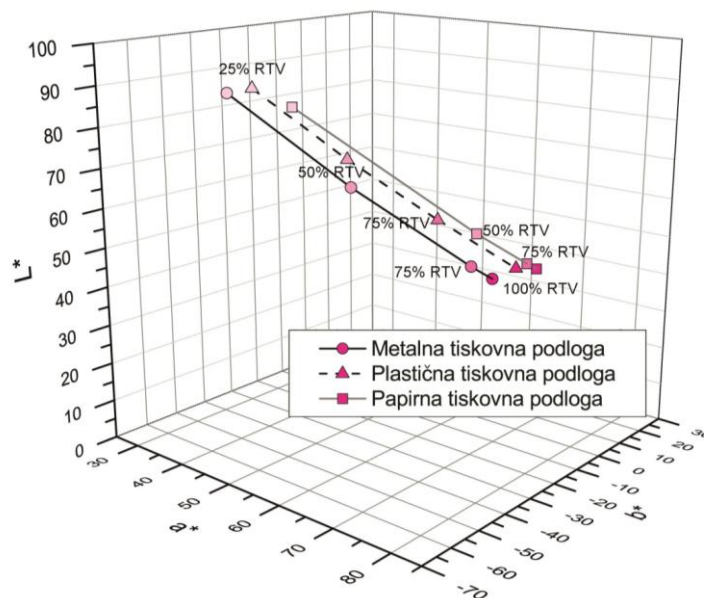
Zajednička karakteristika svih boja jest ujednačenost promjena s obzirom na tiskovnu podlogu. Svaka boja ima karakterističnu krivulju promjene čiji je oblik konzistentan, bez obzira na korištenu tiskovnu podlogu. Kod svih je boja krivulja metalne tiskovne podloge pomaknuta u negativnom smjeru svjetline ($-L^*$) u odnosu na papirnu i plastičnu tiskovnu podlogu (najveće odstupanje vidljivo je kod žute boje). Razlog tome jest manja svjetlina metalne podloge (Tabela 1) u odnosu na plastičnu i papirnu podlogu.

Usporedbom dijagrama zapaža se i tendencija različitog smjera kolorimetrijske promjene ovisno o promatranoj boji. Očekivano, crna se boja kromatički gotovo uopće ne mijenja (njena promjena izražena u smjeru svjetline (L^*)). Žuta boja pokazuje vrlo malu promjenu u svjetlini te je njena promjena u kromatičnosti. Cijan i magenta imaju podjednak smjer promjene te se mijenjaju i u kromatičnom smjeru i u smjeru svjetline. Sve tri kromatske boje pokazuju promjenu prema akromatskom središtu CIE $L^*a^*b^*$ sustava, odnosno manjem zasićenju.



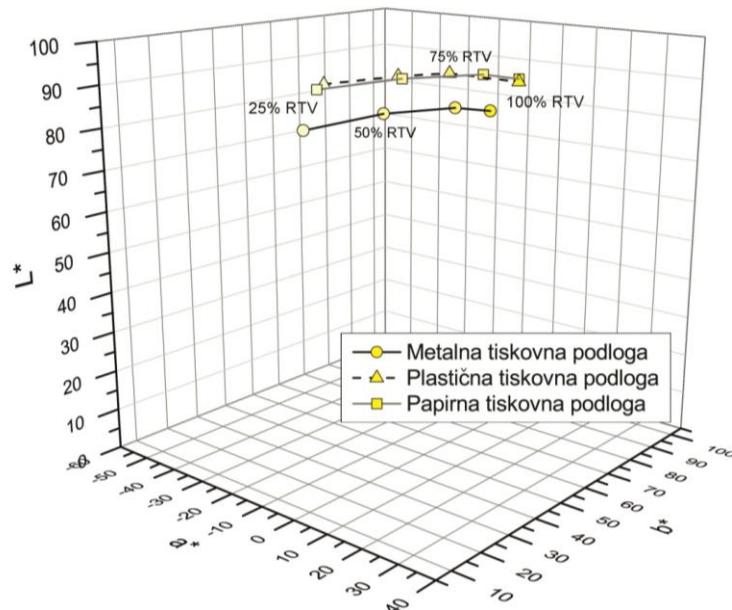
Slika 19: CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti u odnosu na različite tiskovne podloge za cijan otisak

Analizom dijagrama CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti za cijan primjećuje se karakterističan oblik krivulje jednak za sve tri tiskovne podloge. Među tiskovnim podlogama vidljive su tri bitne razlike. Prva je pomaknutost krivulje metalne podloge u negativnom smjeru L^* osi, uzrokovana manjom svjetlinom same podloge. Druga se razlika očituje u polju od 100% RTV otisnutom na plastičnoj podlozi. Ono odskaje od 100% RTV vrijednosti na plastičnoj i papirnoj podlozi u pozitivnom smjeru L^* osi ($L^*_{\text{plastika,C100\%}} = 55,91$; $L^*_{\text{papir,C100\%}} = 47,43$; $L^*_{\text{lim,C100\%}} = 46,77$). Treća razlika odnosi se na odstupanje tonova većih rastertonskih vrijednosti otisnutih na papirnoj tiskovnoj podlozi u $-a^*$ i $-b^*$ smjeru (udaljavanje od akromatskog centra), što ujedno znači i njihovu veću zasićenost. Ona može biti objašnjena upojnošću papirne tiskovne podloge koja je mogla uzrokovati veće koncentracije pigmeta.



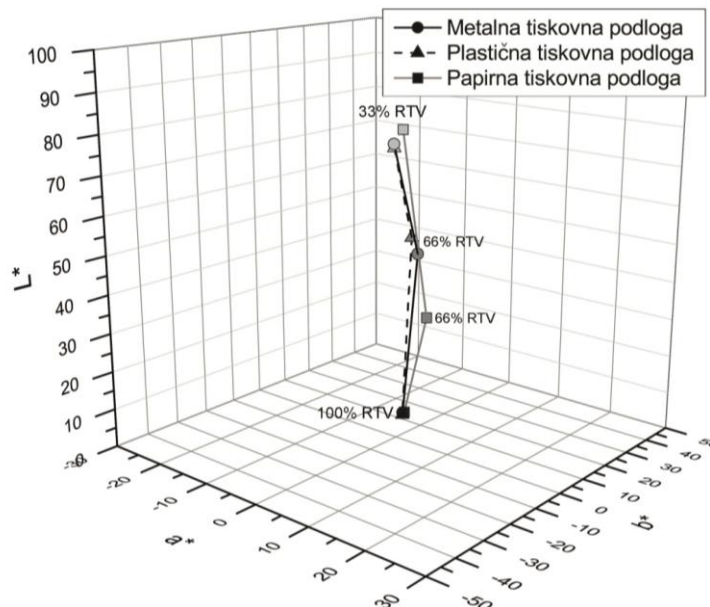
Slika 20: CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti u odnosu na različite tiskovne podloge za magenta otisak

Kod magente je odstupanje vrijednosti metalne podloge manje nego kod cijana. Ono što je uočljivije jest neujednačenost promjene zasićenja s obzirom na promjenu rastertonskih vrijednosti kod metalne i papirne podloge. Neujednačenost je mnogo izraženija kod papirne podloge gdje je u svjetlijim tonovima devijacija veća te se smanjuje s povećanjem broja tiskovnih elemenata ($\Delta a^*_{M50-25\%, \text{ papir}} = 38,75$; $\Delta a^*_{M75-50\%, \text{ papir}} = 7,38$; $\Delta a^*_{M100-75\%, \text{ papir}} = 1,16$). To sugerira na veći prirast kod tamnijih tonova. Upojnost papira uzrokovala je spajanje rasterskih elemenata i veću koncentraciju pigmenta.



Slika 21: CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti u odnosu na različite tiskovne podloge za žuti otisak

Bijeli premaz na limu najviše dolazi do izražaja kod reprodukcije žute boje ($L^*_{Y100\%,\text{papir}}=86,95$; $L^*_{Y25\%,\text{papir}}=93,21$). Time se može objasniti i vrlo mala promjena žutih tonova po svjetlini u odnosu na različite rastertonske vrijednosti. Na svjetlije tonove tamna podloga više utječe, te se njihova svjetlina ne razlikuje mnogo u odnosu na zasićenije žute tonove. Kolorna promjena je ujednačena te se odvija po b^* osi, u smjeru akromatskog središta CIE $L^*a^*b^*$ sustava.

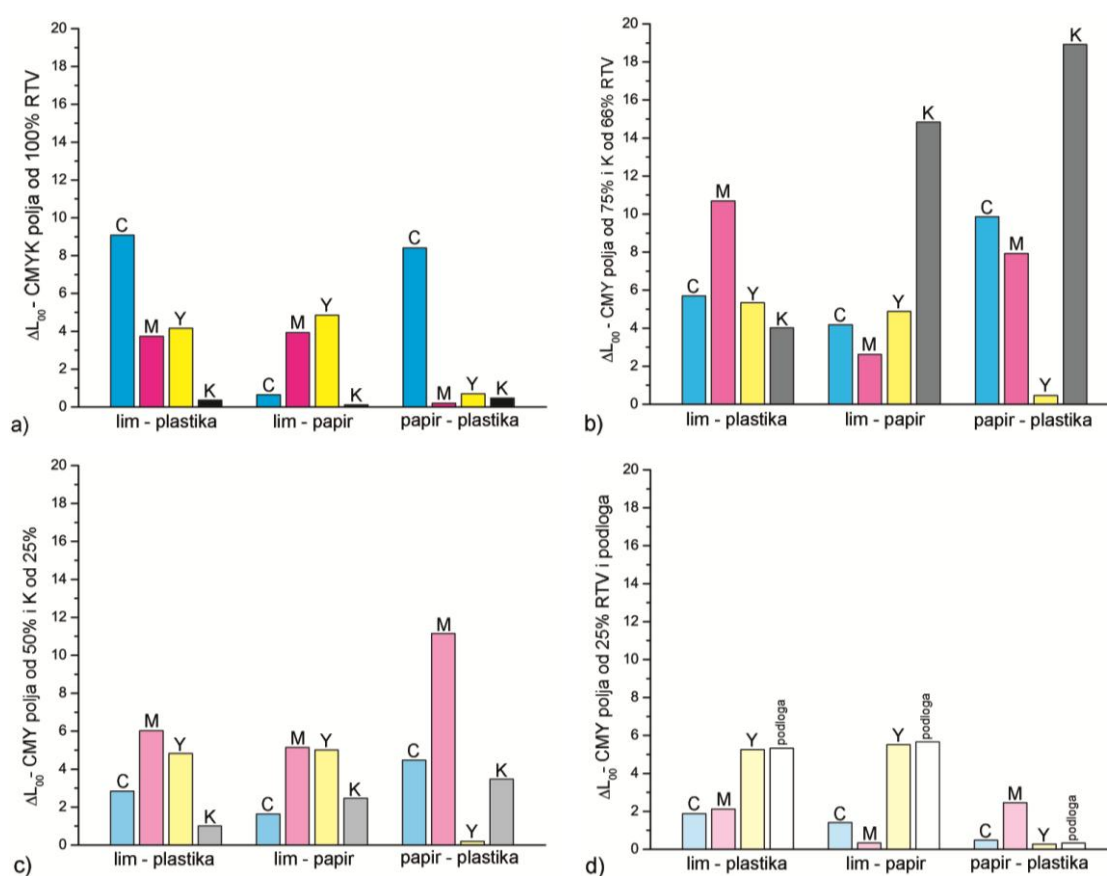


Slika 22: CIE $L^*a^*b^*$ vrijednosti u odnosu na različite tiskovne podloge za crni otisak

Crna boja pokazuje najujednačenije reprodukcijske krivulje s obzirom na korištenu tiskovnu podlogu. Budući da je na odstupanja metalne podloge kod ostalih boja utjecala manja svjetlina same podloge, ona kod crne boje ne dolazi do izražaja. Crna boja ima vrlo pravilnu promjenu u po L^* osi (tonovi veće RTV su tamniji, dok su kromatične promjene vidljive samo na poljima od 66% RTV).

4.2.3. Razlike u svjetlini ΔL_{00}

Slika 23 prikazuje razlike u obojenju (ΔL_{00}) CMYK boja u odnosu na različite tiskovne podloge. Slika sadrži četiri dijagrama, od kojih svaki prikazuje pojedine rastertonske vrijednosti.



Slika 23: Razlika u svjetlini, ΔL_{00} , u odnosu na različite tiskovne podloge:

- a) 100% RTV za CMYK; b) 75% RTV za CMY i 66% RTV za crnu; c) 50% RTV za CMY i 33% RTV za crnu; d) 25% RTV za CMY i podloga

Reprodukcija rastera utjecaj će na razlike u svjetlini otisaka ovisno o tiskovnoj podlozi te će pritom tamniji tonovi imati veća odstupanja od svjetlijih. To ne vrijedi za puni ton. Na dijagramu 23a koji prikazuje polja od 100% RTV vidljiva je neovisnost crne boje u odnosu na tiskovnu podlogu. Cijan pokazuje velike razlike u svjetlini na plastičnoj tiskovnoj podlozi i odnosu na papir i lim ($\Delta L_{C\ 100\%:\max-\min}=8,45$).

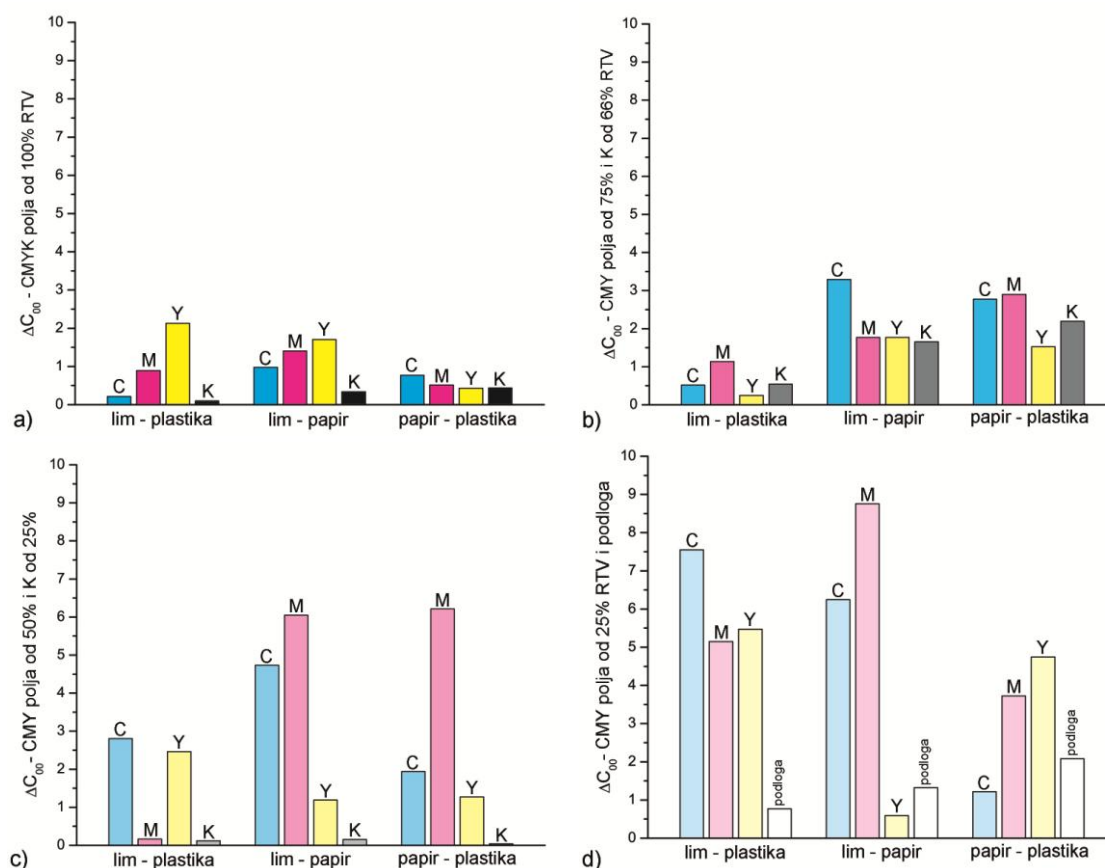
Dijagram 23b pokazuje velike oscilacije srednjih tonova (66% RTV) crne boje na papirnoj tiskovnoj podlozi ($\Delta L_{K 66\%;\max-\min}=14,84$). Kod 50% RTV magenta je najlošije reproducirana ($\Delta L_{M 50\%;\text{papir-plastika}}=11,14$).

Žuta boja ima specifičnu promjenu bez obzira na rastertonsku vrijednost. Najlošije je reproducirana na limu, a razlike u obojenju u odnosu na papir povećavaju smanjivanjem RTV ($\Delta L_{Y25\%;\text{lim-papir}}=5,52$).

Dijagram 23d potvrđuje razliku u svjetlini između tiskovnih podloga – plastika i papir imaju neprimjetnu razliku ($\Delta L_{\text{papir-plastika}}=0,33$), za razliku od lima ($\Delta L_{\text{lim-papir}}=5,66$; $\Delta L_{\text{lim-plastika}}=5,33$).

4.2.4. Razlike u kromatičnosti ΔC_{00}

Analogno svjetlini, i devijacije u kromatičnosti reproduciranih tonova mijenjat će se promjenom tiskovne podloge (Slika 24).



Slika 24: Razlika u kromatičnosti, ΔC_{00} , u odnosu na različite tiskovne podloge:

- a) 100% RTV za CMYK; b) 75% RTV za CMY i 66% RTV za crnu; c) 50% RTV za CMY i 33% RTV za crnu; d) 25% RTV za CMY i podloga

Razlike u kromatičnosti (ΔC_{00}) evidentno su manje od razlika u obojenju (ΔE_{00}) i razlika u svjetlini (ΔL_{00}), što sugerira da je na razlike u obojenju utjecala prvenstveno razlika u svjetlini, dok je razlika u kromatičnosti imala manji udio.

Do većih razlika u kromatičnosti (ΔC_{00}) dolazi smanjenjem rastertonskih vrijednosti ispitivanih polja. Kod punih tonova razlike u kromatičnosti su neznatne ($\Delta C < 2$). Kod 75% RTV (za CMY) i 66% RTV za crnu boju, razlike u kromatičnosti se udvostručuju i to zahvaljujući odstupanjima kolorimetrijskih vrijednosti otisaka na papiru.

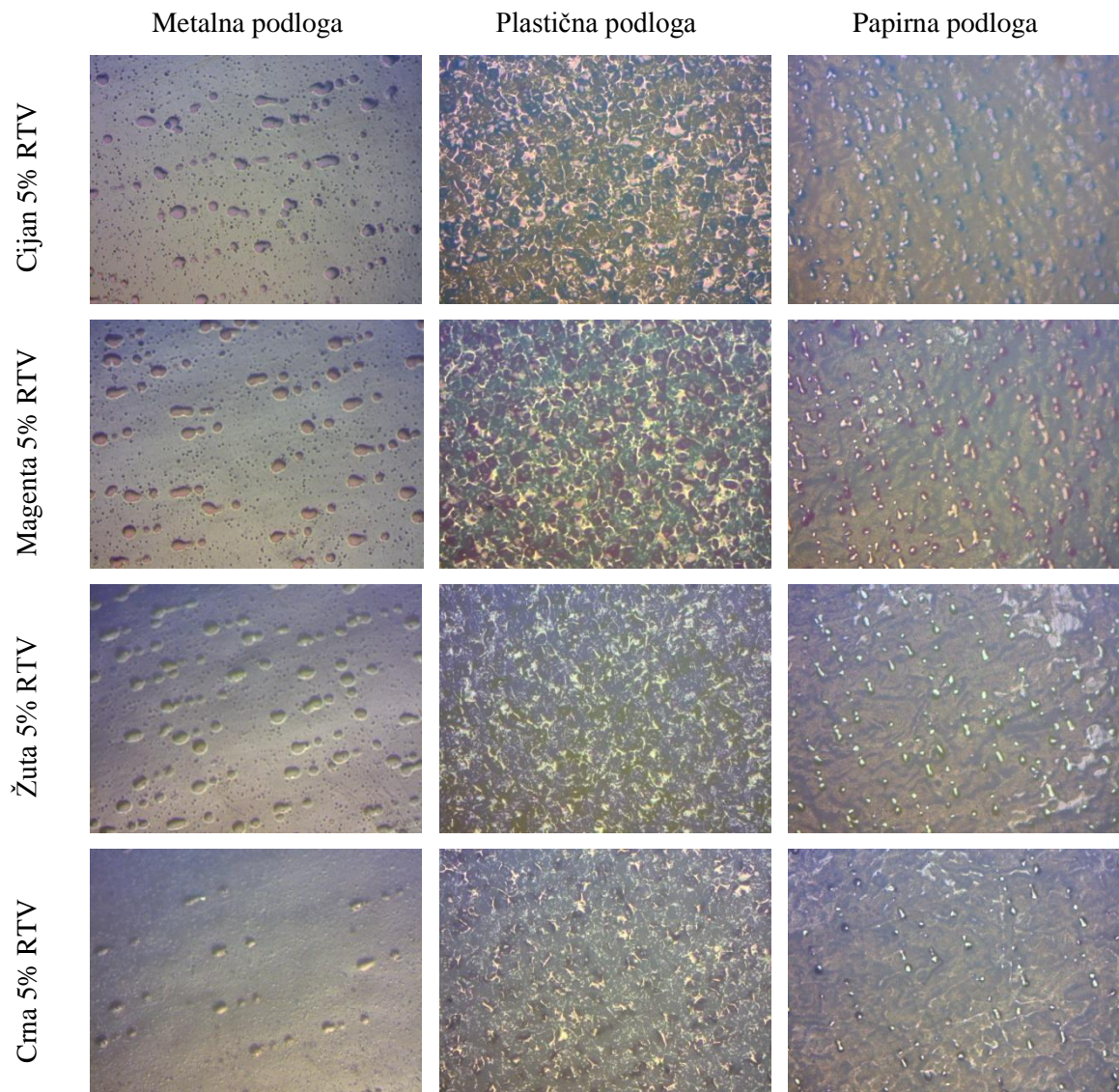
Na dijagramu 24c crna boja (33% RTV) ne pokazuje nikakve razlike u kromatičnosti u odnosu na tiskovnu podlogu. Zanimljiva je razlika u kromatičnosti kod 50% RTV polja magente, gdje papir pokazuje velika odstupanja, dok razlika između lim i plastike gotovo i ne postoji. Razlika između minimalne (lim-plastika) i maksimalne (papir-plastika) razlike kromatičnosti magente iznosi $\Delta C_{M50\%;\max-\min}=6,05$.

Na dijagramu 24d, gdje su prikazana polja CMY od 25% RTV, evidentne su najveće razlike u kromatičnosti kod sve tri tiskovne podloge. Razlike između minimalne (papir-plastika) i maksimalne (lim-plastika) vrijednosti razlike kromatičnosti cijana iznosi $\Delta C_{C25\%;\max-\min}=6,33$.

Zanimljivo je vidjeti i razliku u kromatičnosti samih podloga. Za razliku od svjetline gdje lim pokazuje velika odstupanja od papira i plastike, po kromatičnosti su upravo papir i plastika najrazličitiji (iako ta razlika iznosi samo $\Delta C_{\text{plastika-papir}}=2,8$). Najsličnije tiskovne podloge po kromatičnosti su lim i plastika ($\Delta C_{\text{plastika-lim}}=0,77$).

4.3. Slikovna analiza

Kako bi se ustanovio razlog većih devijacija svjetlih tonova, potrebno je analizirati reprodukcije rasterskih elemenata na najsvjetlijoj površini (zbog dobre uočljivosti rasterskih elemenata, odabrano je polje od 5% RTV). Pritom se koristi mikroskop Leica DM 2500 uz objektiv za povećanje od 50 puta.



Slika 25: Mikroskopske slike otisaka na cijana (5% RTV), magnete (5% RTV), žute (5% RTV) i crne (5% RTV) boje pod povećanjem od 50x na metalnoj, plastičnoj i papirnoj podlozi

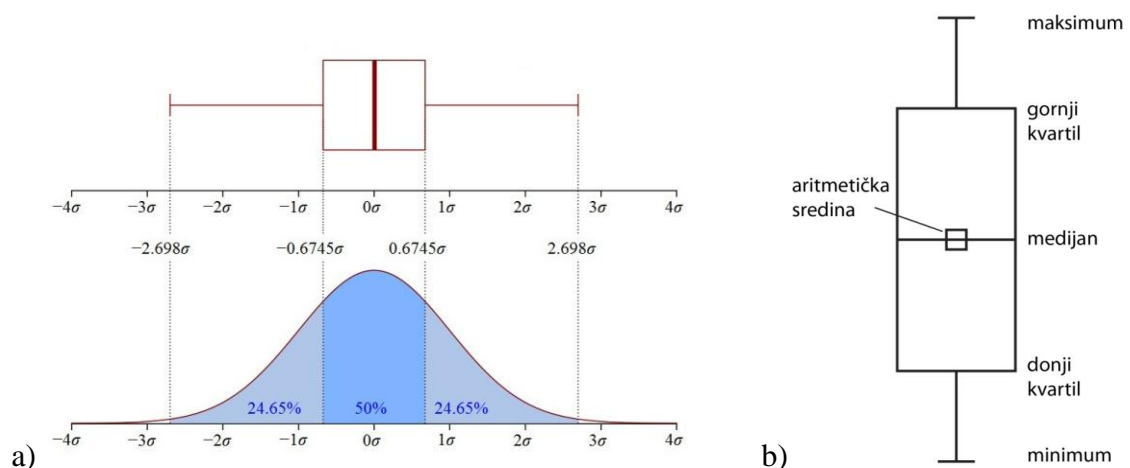
Vizualnom procjenom mikroskopskih uzoraka primjećuje se očita razlika u strukturi površine različitih tiskovnih podloga. Najčistiću sliku rasterskih elemenata daje metalna tiskovna podloga, čija je glatkoća očita u usporedbi s papirnom i plastičnom tiskovnom podlogom. Na metalnoj tiskovnoj podlozi može se primijetiti pravilna formacija

rasterskih elemenata (vodeći računa o tome da se ovdje radi o frekventnom rastriranju, pa pravilna raspodjela tiskovnih elemenata ni nije moguća). Odstupanje je primjetno samo kod crnog bojila te bi se njegova distribucija trebala povećati (kako bi se zadovoljila tražena rastertonska vrijednost tog polja).

U usporedbi s papirnom tiskovnom podlogom, rasterski elementi na metalnoj podlozi nešto su veće površine (zbog neupojnosti i glatkoće podloge), ali je njihov broj manji. Usporedba s plastičnom tiskovnom podlogom gotovo je nemoguća, budući da se uslijed karakterističnosti plastične podloge teško razabiru rasterski elementi. Razlog tome trebao bi ležati u maloj površinskoj napetosti PVC-a, što se želi istražiti u narednim istraživanjima.

4.3.1. Površina rasterskih elemenata

Površina i dijametar rasterskih elemenata dodatno su mjereni uređajem *Personal IAS* (rasterska polja od 5% RTV i veličina selekcije od 2,54x2,54 cm). Uređaj na mjerenom području detektira zasebne rasterske elemente te mjeri njihovu površinu i dijametar. Dobivene vrijednosti površine i dijametra statistički su obrađene prikazom raspodjele rezultata.



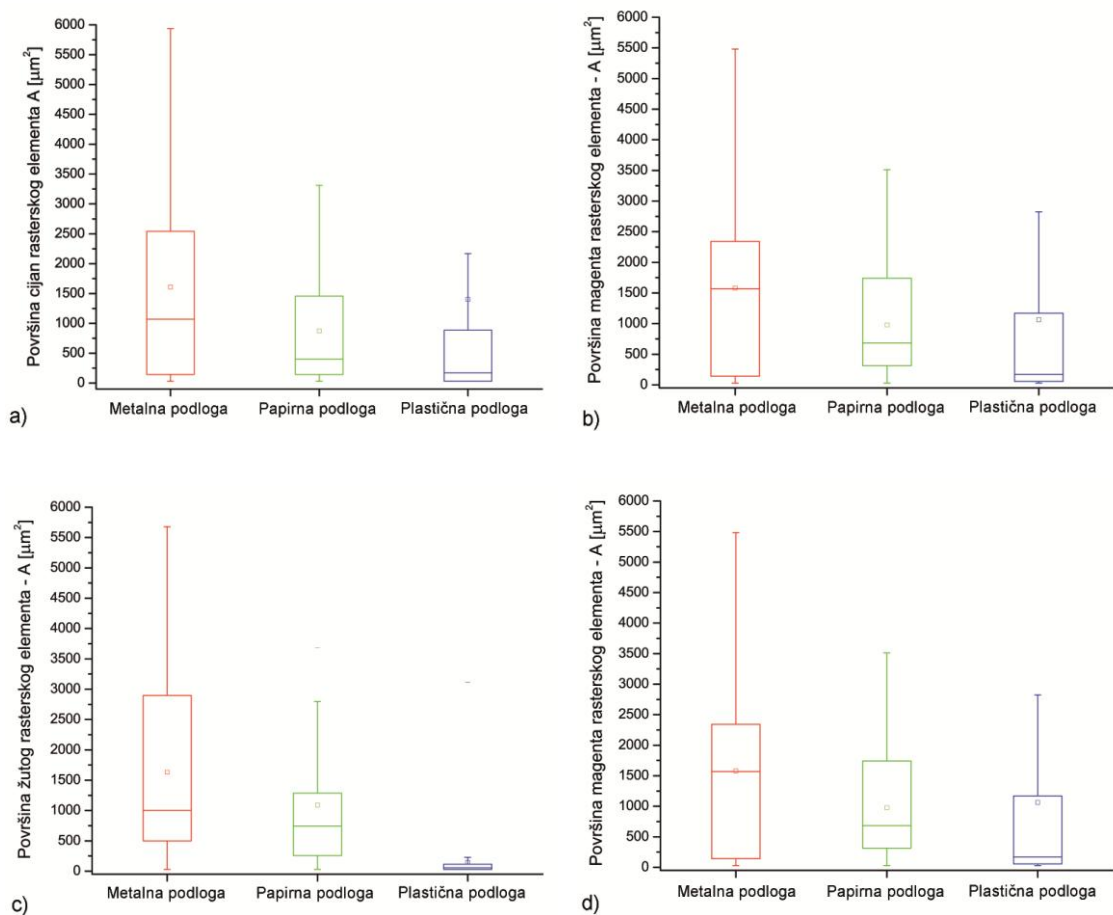
Slika 26: a) Poveznica normalne raspodjele i grafičkog prikaza pomoću pravokutnog dijagrama;
b) Objašnjenje sastavnih dijelova pravokutnog dijagrama

Grafički se raspodjela rezultata može prikazati pomoću takozvanih pravokutnih dijagrama koji se povezuju s normalnom raspodjelom, odnosno Gaussovom krivuljom. Slika 26 prikazuje dijagram podataka „karakteristične petorke“ – medijan, gornji i donji kvartil i maksimalnu i minimalnu vrijednost (isključujući pritom vrijednosti koje odskaku). Sam dijagram sastoji se od pravokutnika čije su gornja i donja granica

određene gornjim, odnosno donjim kvartilom (50% dobivenih podataka nalazi se u području pravokutnika). Linija unutar pravokutnika označava vrijednost medijana. Vertikalne crte (*whiskers*) s gornje i donje strane pravokutnika označavaju rasip vrijednosti, a ograničene su minimalnom i maksimalnom vrijednošću (pri čemu se izostavljaju vrijednosti koje odskaku - *outliers*).

Osim medijana, na dijagramima je prikazana i aritmetička sredina. Kod svih se rezultata ovog rada primjećuje odstupanje aritmetičke sredine i medijana. Za razliku od medijana, na aritmetičku sredinu utjecaj imaju vrijednosti koje odskaku, te su one razlog različitih vrijednosti medijana i srednje vrijednosti rezultata.

U tehnici Inkejta veličina i pozicija rasterskih elemenata ovisi o veličinama formiranih kapljica, odnosno površinskoj napetosti tekućeg bojila. Slika 27 prikazuje raspodjelu površina rasterskih elemenata cijana, magente, žute i crne boje na tri korištene tiskovne podloge za 5% RTV.



Slika 27: Površina rasterskog elementa na korištenim tiskovnim podlogama
a) za cijan; b) za magentu; c) za žutu, d) za crnu

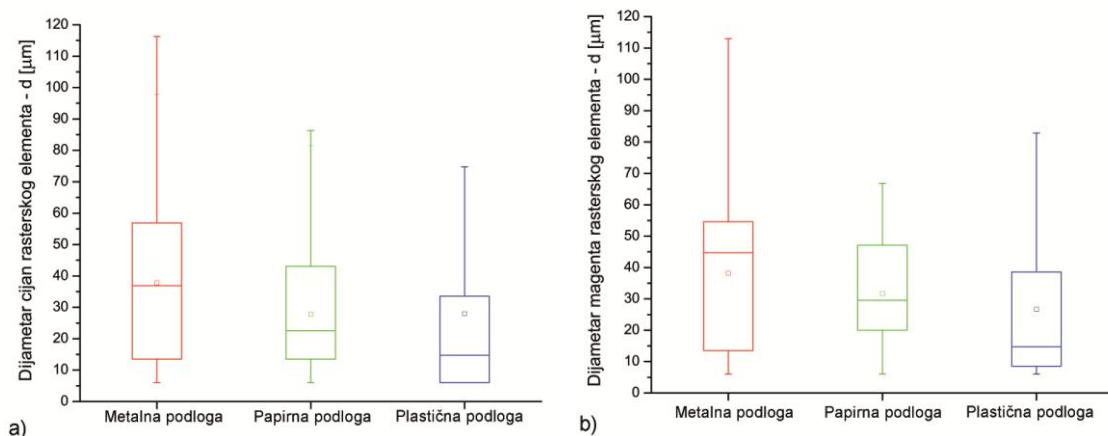
Iz grafova se može vidjeti srednja vrijednost te raspodjela vrijednosti površina rasterskih elemenata. Primjetno je da kod svih boja (osim crne) rasterski elementi otisnuti na metalnoj podlozi imaju najveće raspršenje vrijednosti površina (A). S druge strane, plastika pokazuje najmanje devijacije površine rasterskog elementa, što sugerira da su na plastici površine rasterskih elemenata najujednačenije, odnosno da su one najslabijih veličina.

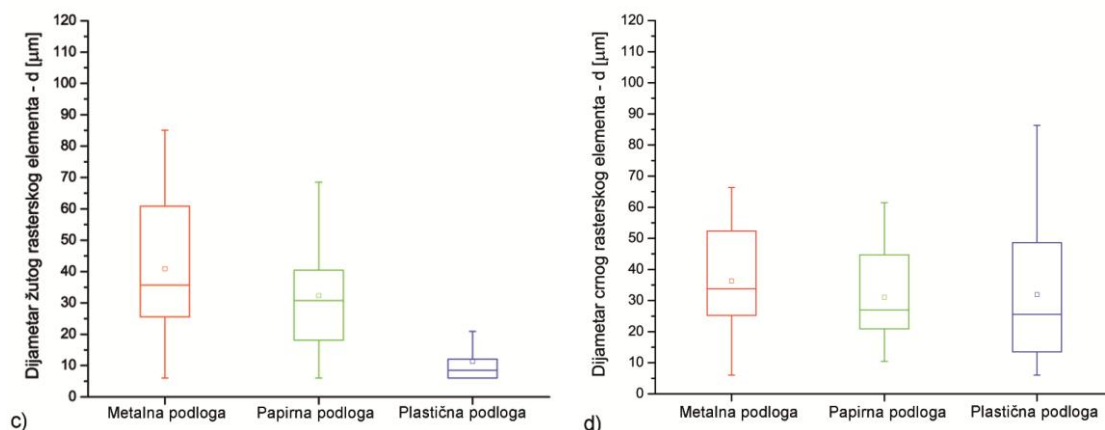
Veliko se odstupanje uočava kod žutih rasterskih elemenata otisnutih na plastici. To prvenstveno možemo pripisati grešci uređaja, odnosno lošoj prepoznatljivosti rasterskih elemenata u odnosu na samu tiskovnu podlogu.

Srednje vrijednosti površina rasterskih elemenata (priložene u Prilogu 9) ujednačene su i s obzirom na boje i s obzirom na tiskovne podloge te kod njih (osim kod spomenute žute boje otisnute na plastici) nema većih odstupanja. Prema izračunatim srednjim vrijednostima površina rasterskih elemenata, na papiru se kod svih boja generiraju najsitniji rasterski elementi, a na metalu najveći ($\Delta A_{C \text{ lim-papir}}=734,15 \mu\text{m}^2$). To možemo pripisati neupojnoj i glatkoj površini metala koja je uzrokovala razlijevanje bojila te povećanje rasterskog elementa prije nego se boja osušila. To vrijedi i za plastiku, čija je srednja vrijednost površine rasterskih elemenata u svim slučajevima između metala i papira (površina plastike je neupojna, ali i hrapavija od metala, zbog čega dolazi do manjeg razlijevanja bojila).

4.3.2. Dijametar rasterskih elemenata

Slika 28 prikazuje raspodjelu vrijednosti dijametara rasterskih elemenata cijana, magente, žute i crne boje na tri korištene tiskovne podloge.





Slika 28: Dijametar rasterskog elementa na korištenim tiskovnim podlogama
 a) za cijan; b) za magentu; c) za žutu, d) za crnu

Visoko kvalitetni otisci postižu se samo onda kada se u svijetlim tonovima reproduciraju rasterski elementi. Pritom njihova dimenzija mora biti što manja. Može se očekivati da vrijednosti dijametara rasterskih elemenata odgovaraju rezultatima njihove površine, budući da su ta dva parametra u korelaciji. Ta se pretpostavka pokazala istinitom, jer i u slučaju dijametara rasterskih elemenata metalna podloga pokazuje najveće raspršenje vrijednosti i općenito najveće srednje vrijednosti promatranog parametra ($d_{Y \text{ lim}}=40,91 \mu\text{m}$).

Srednje vrijednosti dijametara rasterskih elemenata su relativno ujednačene, s izuzetkom žute boja koja po vrijednostima i ovom slučaju odskake, pogotovo na plastici kao tiskovnoj podlozi ($d_{Y \text{ plastika}}=11,28 \mu\text{m}$).

4.4. Reprodukcijska Pantone 3005 i Pantone 485 procesnim bojama

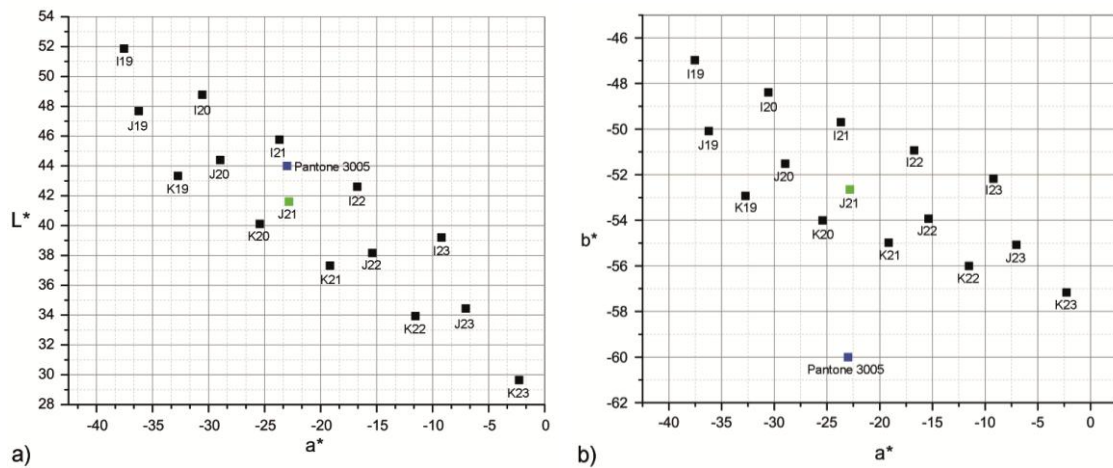
Za provjeru mogućnosti primjene Inkjet procesnih boja izvela se probna reprodukcija Pantone nijansi, odnosno dva tona, plava Pantone 3005 i crvena Pantone 485. Usporedbom poznatih $L^*a^*b^*$ vrijednosti promatranih Pantone boja i izmjerenih $L^*a^*b^*$ vrijednosti boja s *Roland Color System Library* forme (Tabela 2), utvrdila se vrlo dobra mogućnost reprodukcije tražene plave boje. Polje *Pure colors-J21* Rolandove forme pokazuje najmanja kolorna odstupanja u odnosu na Pantone 3005 ($\Delta E_{00}=2,86$). U odnosu na PSD standard, takva bi reprodukcija pripadala u kvalitativnu kategoriju A.

Tabela 2: Razlika tonova između Rolandovog *Color System Library* atlasa boja i Pantone 3005

		L*	a*	b*	ΔE_{00}
Pantone 3005		44	-23	-60	/
Pure colors	I19	51,87	-37,55	-46,98	10,96
	I20	48,78	-30,56	-48,39	6,81
	I21	45,77	-23,68	-49,7	3,20
	I22	42,61	-16,73	-50,93	3,84
	I23	39,2	-9,22	-52,18	8,58
	J19	47,68	-36,23	-50,09	7,49
	J20	44,4	-28,97	-51,52	3,74
	J21	41,61	-22,83	-52,65	2,86
	J22	38,17	-15,38	-53,93	6,50
	J23	34,45	-7,04	-55,07	11,82
	K19	43,33	-32,74	-52,93	4,86
	K20	40,12	-25,43	-54,01	4,03
	K21	37,32	-19,16	-54,98	6,28
	K22	33,94	-11,54	-56	10,45
	K23	29,65	-2,28	-57,16	16,38

Vrijednosti iz tabele prikazane su i grafički (Slika 29). Promatramo li samo ostvarene promjene po svjetlini ili po kromatičnosti, postoji više polja bližih traženoj Pantone boji. Polja K20 i K21 kromatski su bliža Pantone 3005 od J21, ali ne i po svjetlini. Isto tako, polje I21 bliže je Pantone nijansi po svjetlini, ali ne i po kromatičnosti. No,

gledajući oba parametra, polje J21 ima najmanje kolorne razlike u odnosu na Pantone 3005 te ga slijedi polje I21 ($\Delta E_{00,I21}=3,20$).



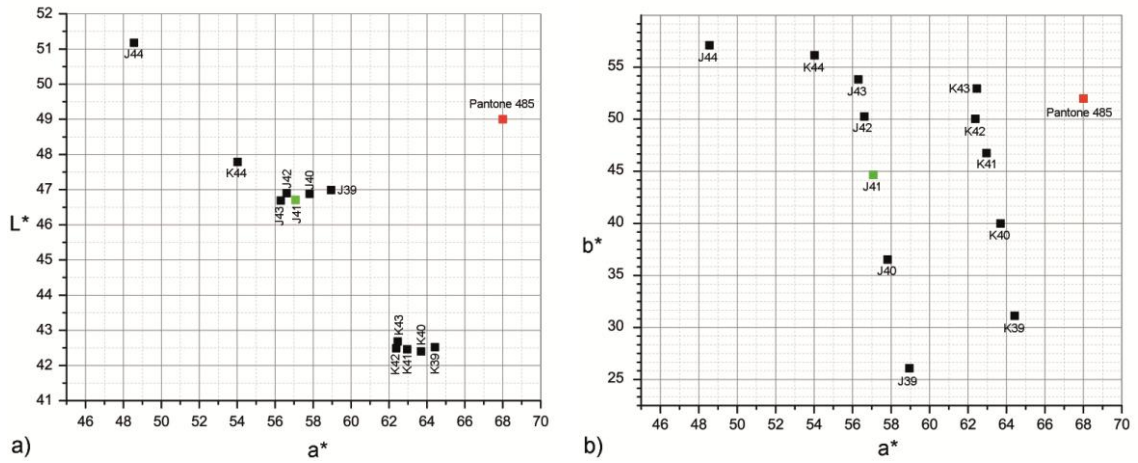
Slika 29: Grafički prikaz $L^*a^*b^*$ vrijednosti Pantone 3005 boje i vizualno sličnih boja iz Roland Color System Library. a) L^*-a^* dijagram; b) a^*-b^* dijagram

Na identičan su način obrađeni podaci i za Pantone crvenu 485 boju. Analizom dobivenih kolorimetrijskih vrijednosti (Tabela 3) utvrđeno je da se crvena Pantone 485 lošije reproducira od plave Pantone 3005. U ovom je slučaju najveću sličnost pokazalo polje *Pure colors* – J41, gdje razlika u obojenju iznosi $\Delta E_{00,J41}=3,69$. U odnosu na PSD standard, takva bi reprodukcija pripadala u kvalitativnu kategoriju B.

Tabela 3: Razlika tonova između Rolandovog Color System Library atlasa boja i Pantone 485

		L*	a*	b*	ΔE_{00}
	Pantone 485	49	68	52	/
<i>Pure colors</i>	J39	46,99	58,95	26,08	10,59
	J40	46,88	57,82	36,53	5,71
	J41	46,71	57,07	44,66	3,69
	J42	46,9	56,61	50,27	4,35
	J43	46,69	56,3	53,83	5,58
	J44	51,18	48,55	57,11	9,86
	K39	42,52	64,43	31,12	10,75
	K40	42,4	63,69	40	7,74
	K41	42,46	62,96	46,74	6,48
	K42	42,49	62,38	50,04	6,43
K43	42,68	62,46	52,96	6,50	
K44	47,79	54,02	56,15	6,98	

Na grafičkom prikazu kolorimetrijskih vrijednosti (Slika 30) vidljivo je da, kao i kod plave boje, postoje polja koja su ili svjetlinom ili kromom bliža Pantone 485 od polja J41. Drugo po redu polje najbližije Pantone 485 je J42 ($\Delta E_{00}=4,35$). Kod svih ostalih polja razlika u obojenju prevelika je i vidljiva golim okom ($\Delta E_{00}>5$).



Slika 30: Grafički prikaz $L^*a^*b^*$ vrijednosti Pantone 485 boje i vizualno sličnih boja iz Roland Color System Library. a) L^*-a^* dijagram; b) a^*-b^* dijagram

5. ZAKLJUČCI

Najbolju reprodukciju tonova daje papirna tiskovna podloga, budući da ostvaruje i najveći volumen gamuta. Plastična podloga za njom ne zaostaje mnogo, dok lim pruža najlošiju reprodukciju tonova ($\Delta V_{\text{lim-papir}}=239,232$ volumnih jedinica).

Lim pokazuje dobru reprodukciju tamnih tonova, dok su svijetla područja loše reproducirana. Raspon reprodukcije tonova gubi se od tamnih prema svjetlijim tonovima te se gube tonovi rubnih dijelova gamuta (zasićene svijetle boje). Razlog tome je mala svjetlina same limene podloge koja u odnosu na papir iznosi $\Delta L^*=9,03$. Za bolju reprodukciju svijetlih tonova predlaže se korištenje bazne bijele boje, na koju će se vršiti otiskivanje svijetlih nijansi ili korekcija svijetlih tonova (veći nanosi bojila).

Na metalnoj tiskovnoj podlozi vidljivo je da krivulja reprodukcije za sve četiri boje odstupa u smjeru tamnijih tonova (to je odstupanje, očekivano, najvidljivije kod žute boje). Kod reprodukcije punih tonova razlike u obojenju (ΔE_{00}) kod cijana i crne boje između lima i papira gotovo i ne postoje ($\Delta E_{C100\%;\text{lim-papir}}=1,17$; $\Delta E_{K100\%;\text{lim-papir}}=0,36$). Samim time tonovi spadaju u kvalitativnu kategoriju A. Kod žute i magente razlike između lima i papira su veće ($\Delta E_{Y100\%;\text{lim-papir}}=5,3$; $\Delta E_{M100\%;\text{lim-papir}}=4,40$) te spadaju u kvalitativni tip B kategorije.

Kod tamnih tonova najproblematičnija je reprodukcija 66% crne boje ($\Delta E_{K66\%;\text{lim-papir}}=14,49$), koja ne zadovoljava ni jedan prag kvalitativne kategorije. Razlog tome su promjene nastale u svjetlini ($\Delta L_{K66\%;\text{lim-papir}}=14,84$). Kod papira i plastike razlika je još veća ($\Delta E_{K66\%;\text{plastika-papir}}=19,17$). Do promjena ne dolazi zbog kolorimetrijskih razlike podloge, već zbog neupojnosti tiskovne podloge (razlijevanje i spajanje rasterskih elemenata). Najveće razlike u tamnijim srednjim tonovima (75% RTV) pokazuju žuta boja ($\Delta E_{Y75\%;\text{lim-papir}}=5,49$) i cijan ($\Delta E_{C75\%;\text{lim-papir}}=5,39$), čime zadovoljavaju uvjete B kategorije kvalitete.

Svjetliji srednji tonovi (50% RTV za CMY) imaju zamjetne razlike u obojenju između limene i papirne podloge za sve tri boje. Ta se razlika još povećava na svijetlim poljima od 25% RTV gdje iznosi: $\Delta E_{M25\%;\text{lim-papir}}=9,48$; $\Delta E_{C25\%;\text{lim-papir}}=6,40$; $\Delta E_{Y25\%;\text{lim-papir}}=6,13$. Crna se boja na svijetlim tonova ustabiljuje te je njena razlika u obojenju

gotovo unutar granica tolerancije ($\Delta E_{K33\%;lim-papir}=3,21$). Otisci svijetlih tonova žute i cijana pripadaju u C kvalitativnu kategoriju, dok svijetli tonovi magente imaju prevelike razlike da bi zadovoljili tolerancije razlika u obojenju.

Prosječne vrijednosti CMYK razlika u obojenju između metalne i papirne podloge sugeriraju da su najbolje reprodukcije cijana ($\Delta E_{C;lim-papir;sr.vrij.}=4,50$) i crne ($\Delta E_{K;lim-papir;sr.vrij.}=4,63$) koje pripadaju kvalitativnoj kategoriji B. Magenta i žuta lošije se reproduciraju i pripadaju kvalitativnoj kategoriji C ($\Delta E_{M;lim-papir;sr.vrij.}=6,57$; $\Delta E_{M;lim-papir;sr.vrij.}=5,61$).

Slikovnom je analizom utvrđena je pravilna formulacija rasterskih elemenata na metalnoj površini. U odnosu na papir, broj rasterskih elemenata na metalnoj podlozi je manji, ali je njihova površina veća ($\Delta A_{C\ lim-papir}=734,15\ \mu m^2$). Razlog tome je glatkoća i neupojnost površine metala, koja uzrokuje razlijevanje bojila i povećanje rasterskih elemenata.

Mogućnost reprodukcije Pantone spotnih boja procesnim bojama moguća je. Za Pantone 3005 ($\Delta E_{00}=2,86$) reprodukcija spada u kvalitativnu A kategoriju, a za Pantone 485 u B kategoriju ($\Delta E_{00}=3,69$).

Primjena Inkjeta za tisak metalne ambalaže moguća je uz kolorne korekcije u tamnijim tonovima i punim površinama. Problematično je otiskivanje svjetlijih tonova, pri čemu se treba usredotočiti na bolji tisak bijele podložne boje.

6. LITERATURA

- [1] Galić K., Ciković N., Berković K. (2000). *Analiza ambalažnog materijala*, Hinus, Zagreb
- [2] Bolanča S. (2013). *Tisak ambalaže*, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb
- [3] Natarajan S., Govindarajan M., Kumar B. (2009). *Fundamentals Of Packaging Technology*, Fundamentals Of Packaging Technology, New Delhi
- [4] Horvatić S. (2003). *Limotisak*, Zbornik radova 7. znanstveno stručnog simpozija hrvatskih grafičara "Blaž Baromić", Bolanča Z. (Ur.), 953-96020-1-7, Senj, lipanj 2003., Grafički fakultet, Zagreb
- [5] *** <http://www.kba-metalprint.com/en/news/detail/article/metal-a-special-kind-of-substrate/page/1/back/719/> – *Metal – a special kind of substrate*, 4.3.2014.
- [6] Blanco F. J., Maybaum L. (2006). *Ink Selection For Screen Printing On Metal*, Screen Printing Magazine, (veljača 2006.), str. 46–50
- [7] Luft Cameron N. (2005). *Ink-Jet Printing*, Coatings Technology Handbook, treće izdanje, Tracton A. A. (Ur.), CRC Press
- [8] Kipphan H. (2001). *Handbook of print media*, Springer-Verlag, Berlin
- [9] The Hebrew University of Jerusalem. (2010). *The Chemistry of Inkjet inks*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore
- [10] Leahey B. (2012). *Tonejet Today: An Update*, InfoTrends, dostupno na: http://www.tonejet.com/wp-content/uploads/2013/01/Tonejet_Update_InfoTrends_Jan2012.pdf, 10.3.2014.
- [11] Lima-Marques L. *Method and apparatus for the production of discrete agglomerations of particulate matter*, US 6,260,954 B1, 17.7.2001.
- [12] *** <http://www.paperandprint.com/digital-printer/features/dp-2013/september-2013/20-19-13-tonejet.aspx#.U53ZmygpfeM> – *Tonejet: decorating with digital*, 11.3.2014.
- [13] Kokot J. (Ur.), *UV technology - A Practical Guide for all Printing Processes*, Berufsgenossenschaft Druck und Papierverarbeitung, Wiesbaden
- [14] Kulišić P., Lopac V. (1991). *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*, Školska knjiga, Zagreb
- [15] Bruice P. (1995). *Chain growth polymers*, Organic Chemistry, str. 1013–1019., Prentice Hall, New Jersey

- [16] Hönle Group. (2013). *UV-LED vs. conventional UV Technology*, dostupno na: http://www.hoenle.de/fileadmin/hoenle/_html/presse/Fachartikel_en/UV_vs_LED_e.pdf, 5.3.2014.
- [17] Marinović N. (1996). *Opća elektrotehnika i elektronika 1*, Školska knjiga, Zagreb
- [18] *** <http://electronics.howstuffworks.com/led1.htm> – *How Light Emitting Diodes Work*, 10.3.2014.
- [19] Page A. (2006). *Developments in Radiation Curing Inks*, Pira International Ltd., Velika Britanija
- [20] Luo M. R., Cui G., Rigg B. (2001). *The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE200*, *Color Res. Appl.*, vol. 26, str. 340–350
- [21] *** http://www.manualsprinter.com/manuals/roland/Roland_VersaUV_LEC-330.pdf – *Roland VersaUV LEC-300*, 5.4.2014.
- [22] *** http://www.rolanddg.co.za/SupportPage/LEC-540/MSDS/075E_EUV-XX%20091030.pdf – *Material Safety Data Sheet*, 5.4.2014.
- [23] ***
http://www.dataplot.de/out/media/338f52b404d91b54cf01eddf03c4022b_Datash eet_SOPEP150.pdf – *EMBLEM Solvent Perfect Poster 150*, 6.4.2014.
- [24] *** <http://www.tekra.com/sites/default/files/dgtl/i24224KJ.pdf> – *Tekra Corporation & Hanita Coatings, Dura-GO*, 6.4.2014.
- [25] *** http://www.xrite.com/documents/literature/en/L11-044_DTP41_en.pdf – *DTP41SeriesII AutoScan Spectrophotometer*, 10.4.2014.
- [26] *** http://www.xritephoto.com/documents/literature/en/L11-146_Pulse_en.pdf – *Pulse ColorElite System*, 10.4.2014.
- [27] *** http://www.xrite.com/documents/literature/en/L7-526_eXact_Comparison_EN.pdf – *X-Rite eXact*, 10.4.2014.
- [28] ***
<http://www.qea.com/upload/files/products/PersonalIAS%20Spec%20Sheet%201004092.pdf> – *Personal IAS*, 11.4.2014.
- [29] Kraushaar A. (2012). *ProcessStandard Digital - Handbook 2012*, Fogra Graphic Technology Research Association

7. PRILOZI

		L*	a*	b*
Lim	100%	46,77	-36,26	-49,56
	75%	58,52	-35,62	-37,8
	50%	70,29	-24,58	-23,75
	25%	80,82	-8,35	-9,48
Plastika	100%	55,91	-39,25	-48,51
	75%	65,17	-36,26	-39,58
	50%	74,05	-29,48	-29,57
	25%	83,6	-18,06	-17,5
Papir	100%	47,43	-38,22	-52,78
	75%	54,02	-41,69	-48,2
	50%	68,19	-32,71	-34,54
	25%	82,89	-15,22	-17,21

Prilog 1: $L^*a^*b^*$ vrijednosti za 100, 75, 50 i 25% RTV cijana na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		L*	a*	b*
Lim	100%	43,83	70,2	-12,46
	75%	46,51	67,3	-14,66
	50%	60,8	44,81	-16,51
	25%	78,63	12,54	-9,01
Plastika	100%	47,73	74,14	-12,09
	75%	57,32	62,06	-16,99
	50%	68,07	44,17	-16,76
	25%	81,69	20,55	-12,05
Papir	100%	47,93	76,76	-9,85
	75%	49,17	75,6	-11,19
	50%	55,12	68,22	-14,8
	25%	78,15	29,47	-11,56

Prilog 2: $L^*a^*b^*$ vrijednosti za 100, 75, 50 i 25% RTV magente na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		L*	a*	b*
Lim	100%	79,7	-6,92	83,87
	75%	81,5	-10,1	73,66
	50%	83,51	-10,6	47,43
	25%	84,5	-6,36	16,54
Plastika	100%	85,88	-5,99	94,68
	75%	89,67	-12,46	74,38
	50%	91,01	-12,95	55,41
	25%	92,77	-10,15	26,95
Papir	100%	86,95	-4,53	92,52
	75%	88,94	-7,85	81,97
	50%	91,32	-8,74	51,77
	25%	93,21	-4,38	18,8

Prilog 3: $L^*a^*b^*$ vrijednosti za 100, 75, 50 i 25% RTV žute na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		L*	a*	b*
Lim	100%	6,87	0,9	0,86
	66%	48,47	1,63	4,99
	33%	76,95	0,09	-1,33
Plastika	100%	6,28	0,82	0,85
	66%	52,49	0,49	4,83
	33%	75,55	-0,87	0,66
Papir	100%	7,05	1,09	1,09
	75%	31,61	2,62	6,63
	33%	80,46	0,98	0,3

Prilog 4: $L^*a^*b^*$ vrijednosti za 100, 66 i 33% RTV crne na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		Lim - plastika	Lim - papir	Papir - plastika
ΔE_{00}	100%	9,18	1,17	8,54
	75%	5,73	5,39	10,26
	50%	4,00	5,06	4,90
	25%	7,87	6,40	1,84
ΔL_{00}	100%	9,09	0,64	8,41
	75%	5,70	4,18	9,86
	50%	2,84	1,64	4,47
	25%	1,88	1,41	0,48
ΔC_{00}	100%	0,21	0,98	0,77
	75%	0,52	3,29	2,77
	50%	2,80	4,73	1,94
	25%	7,55	6,25	1,22

Prilog 5: Razlike u obojenju, svjetlini i kromatičnosti za 100, 75, 50 i 25% RTV cijana na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		Lim - plastika	Lim - papir	Papir - plastika
ΔE_{00}	100%	3,86	4,40	1,13
	75%	10,84	3,70	9,07
	50%	6,03	8,69	13,30
	25%	5,70	9,48	5,20
ΔL_{00}	100%	3,74	3,94	0,20
	75%	10,69	2,62	7,92
	50%	6,02	5,14	11,14
	25%	2,11	0,34	2,45
ΔC_{00}	100%	0,89	1,40	0,51
	75%	1,13	1,77	2,90
	50%	0,16	6,05	6,21
	25%	5,15	8,76	3,72

Prilog 6: Razlike u obojenju, svjetlini i kromatičnosti za 100, 75, 50 i 25% RTV magente na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		Lim - plastika	Lim - papir	Papir - plastika
ΔE_{00}	100%	4,76	5,38	1,08
	75%	5,49	5,49	3,45
	50%	5,42	5,43	2,48
	25%	7,58	6,13	5,46
<hr/>				
ΔL_{00}	100%	4,16	4,85	0,69
	75%	5,34	4,88	0,46
	50%	4,82	5,02	0,19
	25%	5,25	5,52	0,27
<hr/>				
ΔC_{00}	100%	2,13	1,70	0,43
	75%	0,24	1,77	1,52
	50%	2,46	1,19	1,27
	25%	5,47	0,59	4,74

Prilog 7: Razlike u obojenju, svjetlini i kromatičnosti za 100, 75, 50 i 25% RTV žute na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		Lim - plastika	Lim - papir	Papir - plastika
ΔE_{00}	100%	0,38	0,36	0,64
	66%	4,33	14,94	19,17
	33%	2,59	3,21	4,44
<hr/>				
ΔL_{00}	100%	0,36	0,11	0,47
	66%	4,02	14,84	18,91
	33%	1,01	2,46	3,47
<hr/>				
ΔC_{00}	100%	0,10	0,34	0,44
	75%	0,54	1,65	2,20
	33%	0,12	0,15	0,04

Prilog 8: Razlike u obojenju, svjetlini i kromatičnosti za 100, 66 i 33% RTV crne na metalnoj, papirnoj i plastičnoj podlozi

		C	M	Y	K
Površina [μm^2]	Lim	1607,58	1579,26	1669,86	1214
	Papir	873,43	976,85	1090,02	910,42
	Plastika	1403,41	1064,1	167,18	1168,4
Dijametar [μm]	Lim	37,84	38,15	40,91	36,29
	Papir	27,78	31,69	32,33	31,08
	Plastika	27,99	26,68	11,28	31,94

Prilog 9: Srednje vrijednosti površine i dijametara rasterskih elemenata cijana, magente, žute i crne boje s obzirom na tiskovnu podlogu (mjereno na poljima od 5% RTV površine 6,45cm²)