

# Mogućnosti reprodukcije i primjene električki vodljivih materijala

---

**Mahović, Sandra**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:567092>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Sandra Mahović



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

Smjer: tehničko – tehnološki

# ZAVRŠNI RAD

MOGUĆNOSTI REPRODUKCIJE I PRIMJENE  
ELEKTRIČKI VODLJIVIH MATERIJALA

Mentor:  
Prof.dr.sc., Lidija Mandić

Student:  
Sandra Mahović

Zagreb, 2020

Rješenje o odobrenju teme završnog rada

## Sažetak

Područje tiskane elektronike bilježi značajan porast u istraživanjima i industriji u posljednjih desetak godina. S aspekta grafičke tehnologije, tiskana elektronika je zanimljiva jer koristi konvencionalne i digitalne tehnike otiskivanja, utječe na razvoj novih materijala za reprodukciju te unaprjeđuje, osim elektroničke, i grafičku industriju.

U ovom završnom radu pojašnjen je pojam tiskane elektronike i primjena iste. Dolaskom vodljivih materijala na tržište, javila se i potreba za razvojem vodljivih boja, kao i novih tehnologija otiskivanja koje su također, ovim završnim radom, navedene i opisane. Konvencionalne tehnike tiska nisu u potpunosti zadovoljavale potrebe otiskivanja vodljivih otisaka pa se u nekim slučajevima koriste i digitalne tehnike tiska. Pitanje kojim se baviti tematika ovog završnog rada je na koji način prilagoditi i uskladiti tiskovnu podlogu i tiskarsku boju sa tehnikom otiskivanja kako bi nastao funkcionalan vodljivi proizvod. U teorijskom dijelu rada objašnjava se pojam tiskane elektronike, kao i njezinu primjenu. Navedeni su vodljivi materijali kao komponente koje su neophodne za stvaranje vodljivog otiska i objašnjeni njihov sastav i ulogu.

Na temelju eksperimentalnih podataka provedenih na vodljivim otiscima, obrađena je problematika izdržljivosti i trajnosti tiskane elektronike u svrhu ostvarenja masovne primjene.

Tiskana elektronika, u budućnosti, neće zamijeniti konvencionalnu elektroniku, ali ima veliku prednost zbog svoje jednostavne i jeftine izrade pri čemu omogućuje neograničeno područje primjene.

Ključne riječi: tiskana elektronika, tiskovne podloge, vodljive tiskarske boje, tehnike tiska

Sadržaj:

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Tiskana elektronika .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Materijali .....</b>	<b>3</b>
2.2.1 Vodljive tiskovne podloge .....	3
2.2.1.1 Pametni tekstil .....	5
2.2.2 Vodljive tiskarske boje .....	7
2.2.2.1 Tiskarske boje na bazi srebra i nano čestica srebra....	8
2.2.2.2 Tiskarske boje na bazi bakra i nano čestica bakra .....	9
2.2.2.3 Tiskarske boje na bazi zlata i nano čestica zlata.....	10
2.2.2.4 Tiskarske boje na bazi aluminija.....	10
2.2.2.5 Tiskarske boje na bazi ugljika.....	11
2.2.2.6 Tiskarske boje na bazi grafena.....	11
2.2.2.7 Tiskarske boje na bazi organskih materijala.....	12
<b>2.3 Tehnike tiska .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Sitotisak .....	16
2.3.2 Fleksotisak.....	19
2.3.3 Ofsetna litografija.....	21
2.3.4 Bakrotisak .....	23
2.3.5 <i>Inkjet</i> tisak.....	25
2.3.5.1 Kontinuirani inkjet .....	26
2.3.5.2 Inkjet tisak na zahtjev .....	27
2.3.5.3 Primjena inkjet tehnologije.....	29
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO.....</b>	<b>30</b>
<b>4. PRIMJENA TISKANE ELEKTRONIKE.....</b>	<b>37</b>

<b>4.1 Dinamične novine, časopisi i natpis .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Pametna ambalaža.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Pametne naljepnice .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4 Pametne kartice .....</b>	<b>38</b>
<b>4.5 Dijagnostički uređaji u zdravstvu.....</b>	<b>38</b>
<b>4.6 Uređaji za prikupljanje i skladištenje energije .....</b>	<b>38</b>
<b>4.7 Aktivna/pametna odjeća.....</b>	<b>39</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>41</b>

# 1. UVOD

Izumom tiskarskog stroja oko 1440. godine, Johannes Gutenberg pokrenuo je revoluciju u prijenosu znanja i informacija. Njegov je izum omogućio da se pojedina slova i interpunkcijski znakovi mogu uvijek iznova koristiti za ispis riječi i rečenica na svakoj stranici knjige, što je omogućilo izradu velikog broja primjeraka jednog djela u relativno kratkom vremenu.

Do kraja petnaestog stoljeća, velik broj knjiga proizveden je svake godine na drvenim prešama sličnima onoj koju je konstruirao Gutenberg. Ovo brzo širenje znanja, koje je omogućila Gutenbergova tiskara, uvelike je utjecalo na razvoj renesanse, protestantske reformacije i znanstvene revolucije.

Sukladno Gutenberg - ovoj ostavštini, tiskana elektronika namjerava ponovo uvesti revoluciju u proizvodnju digitalnih uređaja kombinirajući postignuća tiskarske industrije i dostignuća elektroničkog svijeta.

Tiskana elektronika vrlo je perspektivno područje, zbog prvenstveno jeftine izrade elektroničkih sustava, koje u konačnici mogu sniziti troškove proizvodnje na vrijednosti koje konvencionalna proizvodnja silicija ne može doseći.

Potencijal za uštedu troškova proizlazi iz činjenice da se ona temelji na korištenju aditivnih metoda obrade, za razliku od subtraktivnih metoda temeljenih na fotolitografiji koja se trenutno koriste u industriji poluvodiča. Ne samo da se materijal polaže samo tamo gdje je potrebno, već je i ukupna složenost proizvodnog postupka uvelike pojednostavljena. Potrebna su samo dva koraka od prazne podloge do radnog funkcionalnog sloja na podlozi: postupak tiska i postupak stvrdnjavanja vodljive tiskarske boje.

Ako uzmemo u obzir da je u metodama oduzimanja potrebno više koraka, materijala i opreme za izradu jednog funkcionalnog sloja na praznoj podlozi, osim što se troše materijali koji ne završe na konačnom uređaju, ušteda troškova može biti relativno velika, posebno kada uređaj nema veliku površinsku pokrivenost na podlozi.



Ukratko, tiskana elektronika ima potencijal pojednostaviti tijekom procesa izrade elektroničkih sustava, povećati iskoristivost materijala, smanjiti troškove alata te samim time, u konačnici, smanjiti cijenu gotovih proizvoda. [1]

U tablici 1. uspoređen je odnos tiskane elektronike i tradicionalne, obzirom na produktivnost, cijenu izrade, brzinu realizacije, podlogu te životni vijek proizvoda.

Tablica 1. Usporedba tiskane elektronike i konvencionalne elektronike. [1]

	<b>Tiskana elektronika</b>	<b>Konvencionalna elektronika</b>
<i>Produktivnost</i>	niska	visoka
<i>Cijena izrade</i>	mala	velika
<i>Brzina realizacije</i>	visoka	niska
<i>Podloga</i>	fleksibilna	kruta
<i>Životni vijek proizvoda</i>	kratak	dug

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1 Tiskana elektronika

Pojam tiskana elektronika odnosi se na upotrebu tehnologija tiska za proizvodnju elektroničkih sklopova, komponenata i uređaja u širokom spektru tiskarskih podloga, poput papira, plastike ili tekstila. U tu se svrhu koriste elektrooptičke vodljive tiskarske boje koje se izravno talože na podlozi stvarajući različite aktivne i pasivne uređaje (na primjer tranzistore, otpornike, kondenzatore, antene i slično). [1]

Za potrebe takvog otiskivanja koriste se gotovo sve tehnike tiska koje su u mogućnosti zadovoljiti zahtjevima većine korisnika, industrije i proizvođača. Tehnike tiska koje otiskivanjem daje funkcionalan vodljivi otisak su sitotisak, fleksotisak, bakrotisak, ofsetna litografija i *inkjet*.

### 2.2 Materijali

#### 2.2.1 Vodljive tiskovne podloge

Razvoj nove elektronike omogućio je primjenu različitih tradicionalnih, a i novih materijala u koje ili na koje su integrirani elektronički uređaji sa ciljem da postanu pametni. [2]

Imajući u vidu cjelokupni proces proizvodnje, tendencija je okrenuti se ka onim materijalima koji osiguravaju financijsku isplativost pri čemu se svakako moraju moći zbrinjavati na ekološki prihvatljiv način sa što manjim utjecajem na okoliš. Materijal koji zadovoljava oba kriterija je papir.

Usprkos metalnim, karbonskim i polimernim podlogama (poliamid, polianilina, polietilen, poliimid i polipirola) [3] koje još uvijek čine većinu podloga u tehnologijama tiskane elektronike, upotreba papira i keramike, kao alternativne podloge, sve je češća.

Papir, kao podloga, trenutno nije prikladan za proizvode koji su namijenjeni za dulji rok trajanja zbog svojih fizikalnih svojstava, ali niska cijena i mogućnost reciklaže otvaraju vrata prema široj mogućnosti primjene.

Posljednja istraživanja ukazala su na mogućnost primjene papira kao prihvatljive podloge za tisak vodljivih otisaka no prethodno ga je potrebo oslojavati polimernim materijalima. U svrhu zaštite i poboljšanja površinskih svojstava, papir oslojavanjem postaje pogodan za reprodukciju pametne ambalaže. [4]

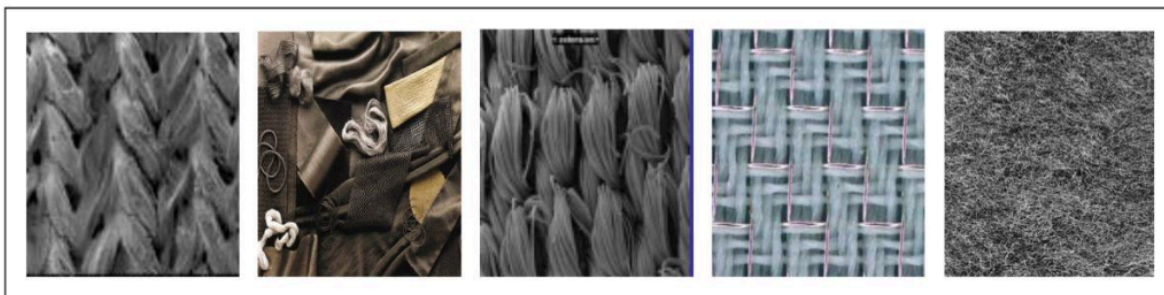
Karbonske podloge, zbog svojih jedinstvenih elektroničkih svojstava, smatraju se idealnima za različite komponente u tiskanoj elektronici. Također se koriste i kombinirane polimerno- karbonske podloge poput vodljivih polimernih filmova. Te podloge su troškovno prihvatljivije za masovnu industrijsku proizvodnju elektroničkih proizvoda. [5]

Danas se izrazi poput *Smart Textiles*, *Intelligent Textiles* i *Wearable Electronics* često koriste u svakom tekstilnom okruženju. Ovi se izrazi odnose na tekstil koji je u stanju osjetiti podražaje iz okoline i reagirati i/ ili se prilagoditi tim podražajima. [6] Takav materijal može se postići korištenjem vodljivih vlakana, niti, premaza ili polimera.

Postoji nekoliko tehnika koje integriraju provodljivost u tekstilnu strukturu poput pletenja, tkanja, vezenja, šivanja i filcanja iglama, a na slici 1. prikazane su uvećane slike vlakana i niti izrađenih takvim postupcima.

Vodljivi tekstil može se dobiti i obradom površine tradicionalnog tekstila. To je moguće postići prevlačenjem vodljivim slojem polimera na površinu tekstilnih podloga. [3]

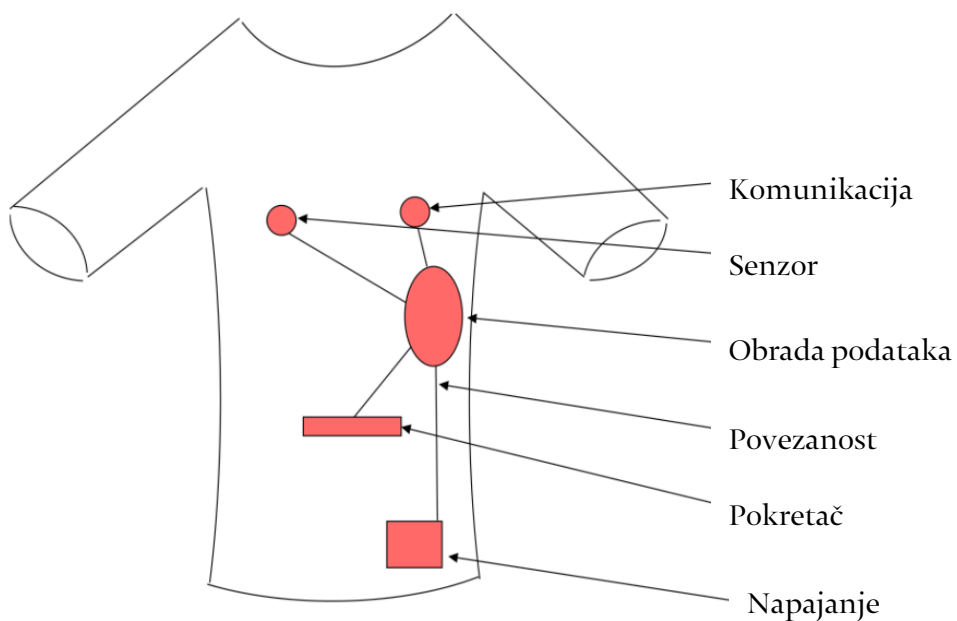
Ponajviše pažnje pridodaje se tradicionalnoj tkanini – traper, koja se pokazala kao pogodna tiskovna podloga tiskane elektronike.



Slika 1. Vodljivi tekstil: isprepleten, premaza, istkan i filcan  
 (Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials)

### 2.2.1.1 Pametni tekstil

Pametni tekstil je sistem sastavljen od različitih materijala i komponenti kao što su senzori, procesori, pogoni, napajanja i komunikacija. Takav sistem moguće je vidjeti na slici 2.



Slika 2. Pametan tekstil sa svojim komponentama  
 (Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials)

Senzori mogu mjeriti podatke na, na primjer, ljudskom tijelu ili sakupljati podatke iz okoline kao što su temperatura tijela, otkucaji srca, vlažnost zraka ili pH. Informacija osigurana uz pomoć senzora u obliku je elektroničkog signala.

Danas senzori mogu biti napravljeni od tekstila.

Procesori se koriste kada je potrebna aktivna obrada kako bi se obradili svi podaci prikupljeni senzorom. Aktivna obrada provodi se elektroničkim uređajima jer tekstilni procesor još ne postoji.

Pokretači su sposobni reagirati na signale koji dolaze iz senzora ili procesora. Oni mogu reagirati u obliku pokreta, u obliku auditivnog ili vizualnog alarma ili pak u obliku oslobađanja supstance kako bi upozorili korisnika ukoliko dođe do nekih odstupanje.

Da bi sustav funkcionirao, potrebno je napajanje pametnog tekstila. Napajanje bi trebalo kombinirati sa skladištenjem energije kako bi moglo funkcionirati kao samostalna jedinica. Jedan od primjera je baterija. Danas se baterije za pametne tekstilne otiske mogu naći u tiskanoj verziji, vrlo tanke, fleksibilne i punjive.

Komunikacija za pametni tekstil može biti između nositelja i tekstila, od tekstila do okoline. Za komunikaciju na veće udaljenosti mogu se koristiti bežične mreže. Komunikacija na principu bežičnih mreža dostupna je preko tekstilnih antena koje se lako mogu integrirati u odjeću.

Međusobne veze koriste se za spajanje različitih komponenata unutar pametnog tekstila. To mogu biti elektrovodljive niti koje su tkane, pletene, ušivene ili vezene u/na odjeći. Drugi način postizanja povezivanja komponenata je otiskivanje vodljivim bojama na tekstilnu površinu. Unutar odjevnog predmeta komunikacija se može ostvariti optičkim vlaknima ili vodljivim nitima. [3]

### 2.2.2 Vodljive tiskarske boje

Tiskarske boje sastoje se od četiri osnovne komponente. Prva je bojilo, obično pigment ili boja, a ono je odgovorno za davanje obojenja boji. Druga komponenta tiskarske boje je vezivo čija je glavna uloga da poveže sve dijelove boje u jednoliku masu spremnu za tisak. Otapalo je također jedna od osnovnih komponenti tiskarske boje. Ono ima ulogu da otopi vezivo i da postigne određenu konzistenciju boje kako bi boja bila dovoljno tečna da dođe do temeljnog cilindra. Posljednja osnovna sastavnica tiskarske boje su dodaci uz pomoć kojih definiramo fizička svojstva tiskarske boje.

Na sličan način nastaju i vodljive tiskarske boje. Glavna je razlika klasične tiskarske boje od one vodljive, u tome što vodljiva kao element obojenja koristi tvar koja provodi električnu energiju. Pravilni sastav vodljive boje ima ulogu održati sustav komponenata u potpunoj ravnoteži.

Jedan od glavnih izazova leži zapravo u odabiru odgovarajućih aditiva za poboljšanje otiskivanja i obradivosti boje bez ometanja električnih karakteristika boje, a time i ključne funkcionalnosti ispisanog predmeta.

Viskoznost, površinska napetost i vlažnost glavne su karakteristike u nastanku vodljivih boja.

Izbor odgovarajuće podloge također može uvelike utjecati na svojstva vodljive tiskarske boje.

Općenito, ove boje imaju tendenciju da izgube dio provodljivosti na poroznim i neravnim materijalima.

Za tiskanu elektroniku već je razvijena široka paleta različitih vodljivih formulacija boje od kojih je svaka različitih karakteristika i različitog spektra primjene.

Zaključimo, vodljive boje sastoje se ili od metalnih čestica raspršenih u vezivima, vezanih vodljivih polimera ili organsko-metalnih smjesa.

Srebro, bakar i ugljik, trenutno su najčešće korišteni elementi u sastavu vodljivih boja. [1]

Sa vodljivim bojama koje u sebi imaju čestice bakra vrlo je teško otiskivati zbog njegove termičke nestabilnosti u atmosferskim uvjetima čime nerijetko dolazi do oksidacije.

Zbog visoke cijene tiskarskih boja na bazi zlata, najbolji izbor za tisak vodljivih otisaka jesu boje na bazi srebra.

Vodljive boje različite su primjene. Upotrebljavaju se na tiskanim pločama, čine hibridne sklopove na keramičkim podlogama, ožičene ploče, antene, dalekovode, električne krugove.

#### 2.2.2.1 Tiskarske boje na bazi srebra i nano čestica srebra

Tiskarske boje na bazi srebra izuzetno su vodljive i iz tog razloga imaju široku primjenu. Vodljivost im iznosi  $6,28 \times 10^{+7}$  S / m i otporom  $1,59 \times 10^{-8}$   $\Omega \cdot m$  na 20 °C. Osim visoke vodljivosti, srebro se također ponaša bolje od većine metala u oksidacijskim uvjetima jer oksidni sloj koji nastaje nakon postupka otiskivanja i obrade povišenom temperaturom je vodljiv. Isto tako, boje na bazi srebra imaju dobro mehaničko prijanjanje na različite tiskovne podloge, tako da se koriste u širokom rasponu elektroničkih proizvoda, poput senzora, fleksibilnih zaslona, fotonaponskih ćelija i RFID antena.

Tiskarske boje na bazi srebra uglavnom se prodaju u obliku srebrnih čestica različitih oblika i veličina. Kod primjene u digitalnom tisku (*inkjet*) koriste se čestice nano veličina zbog uskih mlaznica kroz koje se protiskuje boja za vrijeme tiska. Tiskarske boje koje se koriste za konvencionalne tehnike tiska većinom su veličina od 0,5 do 8  $\mu m$ , a tiskarske boje s nanočesticama imaju promjer čestica najčešće u rasponu od 2 do 50 nm. [7]

Neovisno o veličini čestica, nakon procesa tiska, otisak se izlaže povišenoj temperaturi kako bi se čestice rastalile i povezale u koherentnu, čvrstu strukturu. Uobičajene temperature obrade otisaka iznose od 100 do 300 °C, a potrebne su za sagorijevanje organskih aditiva prisutnih u bojama kako bi se postigao gušće nabijeni sloj srebra i formirao vodljivi film niskog otpora na površini tiskovne podloge. Vrijeme izlaganja povišenoj temperaturi ovisi o nizu

parametara, poput, sastav tiskarske boje i svojstva tiskovne podloge. Najčešće iznosi oko 10 minuta, ali trajanje izlaganja prvenstveno ovisi o izboru tiskovne podloge.

Najveći nedostatak kod primjene tiskarskih boja na bazi srebra je njena visoka cijena. Samo srebro ima izuzetno visoku cijenu, što ga čini skupim za mnoge primjene. Unatoč tome, za sada je srebro najčešći plemeniti metal koji se koristi u razvoju vodljivih boja za tiskanu elektroniku, jer postoji široka mogućnost i raspon formulacija boje kompatibilnih s različitim postupcima otiskivanja. Takve prednosti ga čine ga isplativim materijalom koji nije lako zamijeniti.

#### 2.2.2.2 Tiskarske boje na bazi bakra i nano čestica bakra

Tiskarske boje na bazi bakra omogućuju dobivanje otisaka vodljivosti slične kao otiscima na bazi srebra, ali po pristupačnijoj cijeni. Nadalje, poput tiskarske boje na bazi srebra, boje na bazi bakra imaju snažnu adheziju na široku paletu tiskovnih podloga što ih čini pogodnim za dobivanje vodljivih otisaka za široki spektar elektroničkih proizvoda. Nedostatak tiskarske boje na bazi bakra je što bakar lako oksidira, a za razliku od srebrnog oksida, bakreni oksid je izolacijski. Kao rezultat, bakar postaje manje vodljiv i dobiveni otisak s vremenom gubi svojstvo vodljivosti. Iz tog razloga se često koriste dodatna zaštitna sredstva kao premazi na sloju bakra koja osiguravaju usporavanje procesa oksidacije. Nakon procesa otiskivanja vodljivi otisci dobiveni otiskivanjem tiskarskom bojom na bazi bakra izlažu se povišenoj temperaturi kako bi postali vodljivi. U ovom slučaju, kao i kod tiskarskih boja na bazi srebra, povišena temperatura (od oko 250 do 350 °C) [8] značajno poboljšava vodljivost boje jer ubrzava postupak sušenja i sprječava početni razvoj sloja bakrenog oksida.

Tiskarske boje na bazi bakra mogu se koristiti i u tisku na plastične, polimerne podloge, ali je u tom slučaju, potrebno uskladiti sve parametre koji mogu narušiti funkcionalnost dobivenog otiska.



### 2.2.2.3 Tiskarske boje na bazi zlata i nano čestica zlata

Zlato posjeduje visoku vodljivost ( $4,26 \times 10^7$  S/m na  $20^\circ \text{C}$ ), nešto manju od srebra i bakra ali zbog svoje stabilnosti pogodno je za primjenu u vodljivim bojama. Kako je zlato jedan od najneaktivnijih metala nastali otisci su vrlo konzistentni i otporni na djelovanje topline i vlage. Zlato je općenito otporno na oksidaciju i koroziju te nikad ne reagira s kisikom. Iz tog razloga, izuzetan je metal koji se danas koristi u području elektronike.

Jedini i najveći nedostatak zlata je njegova visoka cijena ali zbog pogodnih svojstava tiskarske boje na bazi zlata pronalaze danas svoju primjenu u razvoju senzora za primjenu u okolišu i medicini. [9]

### 2.2.2.4 Tiskarske boje na bazi aluminija

Aluminij ima vodljivost  $3,77 \times 10^7$  S/m i zajedno sa srebrom, bakrom i zlatom je jedan od najboljih dostupnih vodiča. Aluminij je najzastupljeniji metal na zemlji i ima izvrsnu otpornost na koroziju. Međutim, ta otpornost proizlazi iz tankog površinskog sloja aluminijevog oksida koji se brzo stvara kada je metal izložen kisiku, što stvara fizičku prepreku koroziji u daljnjoj oksidaciji. Problem je u tome što je sloj aluminijevog oksida nevodljiv pa time uvelike narušava vodljivost tiskarske boje na bazi aluminija. Iz tog razloga primjena tiskarske boje na bazi aluminija, jednako poput tiskarske boje na bazi bakra, zahtijeva nanošenje dodatnog zaštitnog sloja nakon procesa otiskivanja. Pozitivna strana je što je aluminij jeftiniji od bakra.

Aluminij je široko korišten u obliku tankih folija u proizvodnji RFID antena. Međutim, u kontekstu tiskane elektronike, tiskarske boje na bazi aluminija su u manjoj primjeni od boja na bazi srebra i bakra. Niska cijena boja na bazi aluminija ne opravdava njihovu upotrebu s obzirom na manju njihovu funkcionalnost. Danas se tiskarske boje na bazi aluminija najčešće koriste za organske fotonaponske i OLED komponente zaslona, organske tranzistore (OFET), RFID antene i za različite senzorske aplikacije. [10]

#### 2.2.2.5 Tiskarske boje na bazi ugljika

Tiskarske boje na bazi ugljika su izuzetno vodljive ali imaju i visoku vrijednost otpora. Iz tog razloga otisci dobiveni korištenjem boje na bazi ugljika često nisu dovoljno vodljivi za većinu aplikacija tiskane elektronike. Isto tako, tiskarske boje na bazi ugljika imaju tendenciju da slabo prijanjaju na tiskovnu podlogu te imaju slabiju koheziju unutar samog sloja tiskarske boje, što rezultira lošom fleksibilnošću i otpornošću na trenje. Vodljivost boje na bazi ugljika može se povećati ako se nanosi u više slojeva i obično im treba samo 10 do 15 minuta sušenja na sobnoj temperature kako bi se postigla maksimalna vodljivost. Svoju primjenu tiskarske boje na bazi ugljika nalaze u izradi otpornika i, u slučaju kada se koriste zajedno s drugim vodljivim bojama (npr. bojama na bazi srebra) omogućuju izradu krugova vodiča i otpornika koji se mogu otiskivati na različite tiskovne podloge. Njihova niska cijena također ih čini idealnima za tisak različitih visokoosjetljivih biosenzora. [11,12]

#### 2.2.2.6 Tiskarske boje na bazi grafena

Grafenska se struktura sastoji od jednog sloja atoma ugljika, debljine jednog atoma, poredanih u pravilnom šesterokutnom uzorku.

Grafen je najtanji i najčvršći materijal poznat do danas. Također je najprovodljiviji oblik ugljika, s velikom pokretljivošću elektrona na sobnoj temperaturi. Štoviše, ima visoku optičku prozirnost i kada oksidira ne stvara izolacijski oksidni film. Ova jedinstvena svojstva, u kombinaciji s grafenskom lakoćom pripreme, čine ga prikladnim za širok broj primjena u raznim tehnološkim poljima, od kondenzatora i tranzistora, do senzora i prozirnih vodljivih filmova. Grafen predstavlja potencijalni proboj na polju tiskane elektronike omogućavajući proizvodnju vodljivih tiskarskih boja s velikom vodljivošću i fleksibilnošću po cijeni daleko nižoj od ostalih vodljivih boja. Tiskarske boje na bazi grafena mogu se koristiti u različitim tehnikama otiskivanja i kod primjene različitih tiskovnih podloga. Dobiveni otisci su izuzetno stabilni, fleksibilni te ne gube na vodljivosti djelovanjem različitih faktora iz okoline. [1]

#### 2.2.2.7 Tiskarske boje na bazi organskih materijala

Vodljivi polimerni materijali posebna su vrsta materijala je ih karakterizira elektronička svojstva metala i poluvodiča u kombinaciji s mehaničkim svojstvima polimera. Lakši su, fleksibilniji i jeftiniji od anorganskih vodiča. Štoviše, njihova se svojstva mogu selektivno fino podešavati dodavanjem odgovarajućih aditiva.

Imajući u vidu da je većina vodljivih polimera netopivo njihova je primjena za izradu tiskarskih boja izuzetno ograničena. Od vodljivih polimernih materijala su primjeni su polianilini (PANi), polipiroli (PPy) i poliofeni, i posebno poli (3,4-etilendioksiofeno) (PEDOT) a primjenjuju se za, na primjer, organske uređaje koji emitiraju svjetlost, organske solarne stanice, organske tranzistori i biosenzore.

[1]

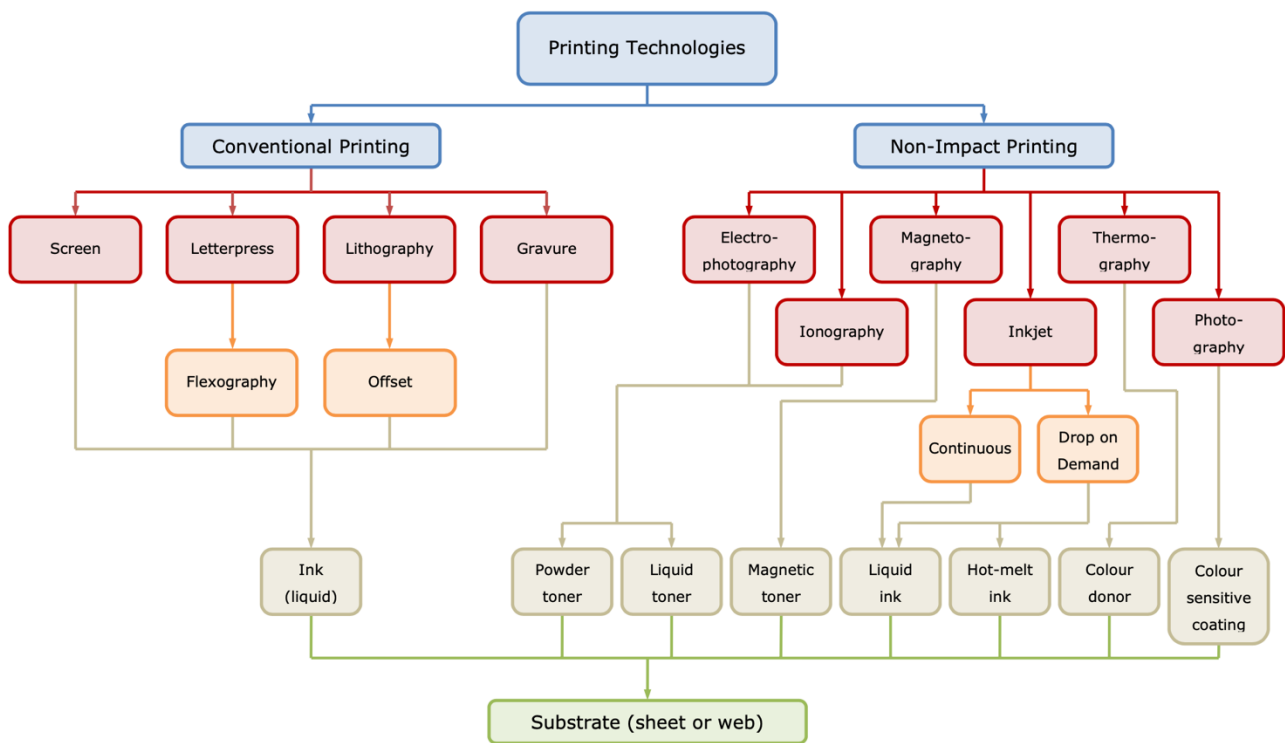
## 2.3 Tehnike tiska

Grana tiskane elektronike danas je vrlo široko područje koje omogućuje reprodukciju tradicionalnih elektroničkih proizvoda primjenom različitih tehnika tiska. Ovisno o tome da li je tiskovna forma materijalna ili virtualna, u svrhu prijenosa tiskarske boje na tiskovnu podlogu, tiskarske tehnike podijeljene su na konvencionalne i digitalne tehnike tiska, često zvane i beskontaktno. [13]

U konvencionalnom tisku, tiskovna forma odgovorna je za prijenos informacija za vrijeme procesa tiskanja. Kao rezultat, direktnim kontaktom i djelomičnim nanosom tiskarske boje, dobiven je otisak na tiskovnoj podlozi identičan onome na tiskovnoj formi.

Suprotno tome, tekst i slika otisnuti digitalnim tehnikama nastaju bez fizičkog kontakta mehanizma za ispis i tiskovne podloge. Zbog upotrebe virtualne tiskovne forme, na svakoj se stranici tiskovne podloge moraju ponovo ispisivati informacije koje se reproduciraju. Postupak ispisa temelji se na digitalnim informacijama. Ovisno o primijenjenoj tehnici, slika se može prenijeti preko glavnog bubnja (na primjer elektrofotografski ispis), ili se prenosi izravno bez posrednika (na primjer *inkjet* tisak).

Na slici 3. prikazane su tehnike tiska podijeljene u dvije osnovne skupine. Radi se o konvencionalnim tehnikama temeljenim na kontaktnom prijenosu informacija i takozvanom *Non – Impact Printing*, temeljene na beskontaktnom prijenosu.



Slika 3. Pregled tehnologije tiska

(Kipphan H (2001). Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods)

Najčešće korištene tehnike tiska u reprodukciji tiskane elektronike su sitotisak, fleksotisak, ofsetna litografija, bakrotisak i *inkjet*. Svaka od tehnika ima svoje prednosti, a samim time i ograničenja prilikom proizvodnje. Odabir jedne tehnike nasuprot druge ovisi o vrsti tiskarske boje koja se primjenjuje, o svojstvima tiskovne podloge te u konačnici namjeni aplikacije. Zbog toga, svaka tehnika nastoji biti idealna metoda proizvodnje različitih proizvoda ili pak metoda koja će reproducirati najkvalitetniji otisak na odabranoj tiskovnoj podlozi. Kako bi se u potpunosti iskoristile proizvodne mogućnosti konvencionalnog tiska, njihova primjena u tiskanoj elektronici trebala bi biti usmjerena na *roll-to-roll* princip rada stroja. Takva konstrukcija stroja sastoji od prilagodbe tehnologija tiska kako bi se omogućilo rotacijsko otiskivanje. Postupak obično uključuje nekoliko rotirajućih cilindara oko kojih se tiskovna podloga rotira za vrijeme tiska, što rezultira neprestanim kretanjem tiskovne podloge. Otisak se dobiva kontinuiranim otiskivanjem pri velikim brzinama, omogućavajući pritom

tisak velikih površina, veliku brzinu realizacije i u konačnici povećavajući isplativost cjelokupnog proizvodnog postupka. [1]

Usporedba tehnika tiska koje su pogodne za proizvodnju vodljivih otisaka prikazana je u tablici 2.

Tablica 2. Usporedba tiskarskih tehnika upotrebljivanih za ispis tiskane elektronike [1]

	Screen Printing	Flexography Printing	Offset Printing	Gravure Printing	Inkjet Printing
Printing Form	Stencil	Relief	Flat	Engraved	Digital
Image Transfer	Direct, wrong reading	Direct, wrong reading	Indirect, right reading	Direct, wrong reading	Direct, non-impact
Resolution (lines/cm)	50	60	100 to 200	100	60 to 250
Line Width ( $\mu\text{m}$ )	50 to 150	20 to 50	10 to 15	10 to 50	1 to 20
Ink Viscosity (Pa·s)	> 1 to 50	0.05 to 0.5	40 to 100	0.05 to 0.2	0.001 to 0.03
Film Thickness ( $\mu\text{m}$ )	up to 12	1 to 2.5	0.5 to 1.5	<0.1 to 5	0.5 to 15
Printing Speed (m/min)	10 to 15	100 to 500	200 to 800	100 to 1000	15 to 500

### 2.3.1 Sitotisak

Sitotisak je jedna od uspješnijih tehnika tiska za proizvodnju tiskane elektronike. U posljednjem desetljeću primjena mu postaje sve rasprostranjenija i raznovrsnija. Uz pomoć sitotiskarske tehnike proizvode se tiskane pločice upotrebom, na primjer, srebrnih pasti ili tiskarskih boja kojima se izrađuju otpornici i kondenzatori. Sitotisak je prilično jeftin i vrlo fleksibilan postupak za proizvodnju elektronike.

Tradicionalni sitotisak sastoji se od tiskovne forme građene od okvira i mrežice (sito) kroz čije očiće prolazi tiskarska boja kako bi se motiv prenio na tiskovnu podlogu. Motiv nanesen na sito ima ulogu prijenosa informacija. Motiv za ispis definiran je otvorima na situ nakon nanosa fotoosjetljivog sloja. Na mjestima gdje su očiće sita ispunjene fotoosjetljivim slojem određene su slobodne površine, dok na mjestima gdje tiskarska boja prolazi kroz sito pod pritiskom rakela, definiraju se tiskovni elementi.

Mreža sita može biti izrađena od fine tkanine kao što je svila, od polimera ili metalnih niti. Polimerna i metalna sita danas se češće koriste.

Promjer niti, broj mrežica i viskozitet tiskarske boje određuju količinu boje koja prolazi kroz mrežu.

Ista slika može se reproducirati više puta koristeći isti mrežasti zaslon, odnosno isti motiv.

Upravo iz ovih navedenih svojstava, ova tehnika pruža širok spektar otiskivanja jer omogućava primjenu različitih tiskovnih formi (mrežica), tiskarskih boja i tiskovnih podloga.

U usporedbi s ostalim tehnologijama tiska, sitotisak pruža najširi spektar primjene s obzirom na izbor podloga. Osim papira i kartona, druge moguće podloge su plastika, staklo, metal, tekstil, keramika i slično. Tiskovna podloga ne mora nužno biti ravna što rezultira upotrebom različitih oblika istih.

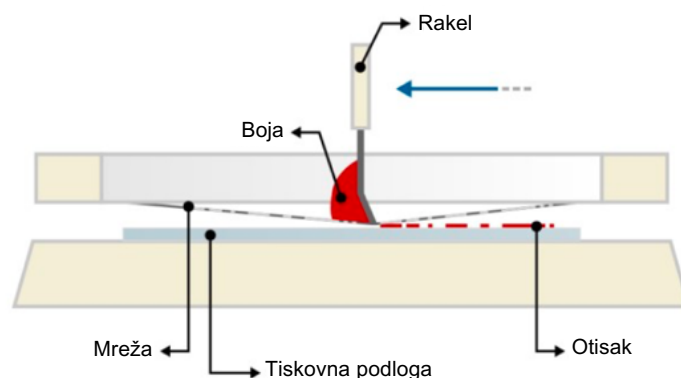
Raspon korištenih boja za tisak sitotiska je također velik, međutim, vrlo važno je važno da sitotiskarska boja bude nalik na pastu. Sitotisak zahtijeva prilično visoku viskoznost boje. Boje s manjom viskoznošću prolaze kroz mrežu i uzrokuju prekomjerno širenje što rezultira nekvalitetnim otiskom.

Ipak, mora se naglasiti da upotreba tiskarske boje visoke viskoznosti izaziva male poteškoće na polju proizvodnje tiskane elektronike. Boje visoke viskoznosti obično se proizvode dodavanjem polimernih veziva u tiskarsku boju, a ta veziva mogu uništiti funkcionalnost poluvodiča, doprinijeti prekomjernom propuštanju i smanjiti vodljivost vodiča. [1]

Sljedeća karakteristika sitotiska je da se na podlogu može nanijeti veća debljina nanosa tiskarske boje nego što je to moguće kod bilo koje druge tehnike tiska. Mogućnost velikog nanosa boje na otisak uzrokuje vrlo debeli nanos suhih filmova, što može biti izuzetno korisno za tiskane elektrode gdje je potrebna visoka vodljivost.

Upotreba sitotiskarskih proizvoda tiskane elektronike prisutna je proizvodnji polimernih fotonaponskih ćelija za ispis i prednje i stražnje elektrode, kao i kompletnih ćelijskih modula. Ostali primjeri primjene uključuju proizvodnju zaslona iz kromovih zaslona na zaslone organskih svjetlećih dioda. Primjena im je također u proizvodnji RFID antena kao i raznih vrsta senzora.

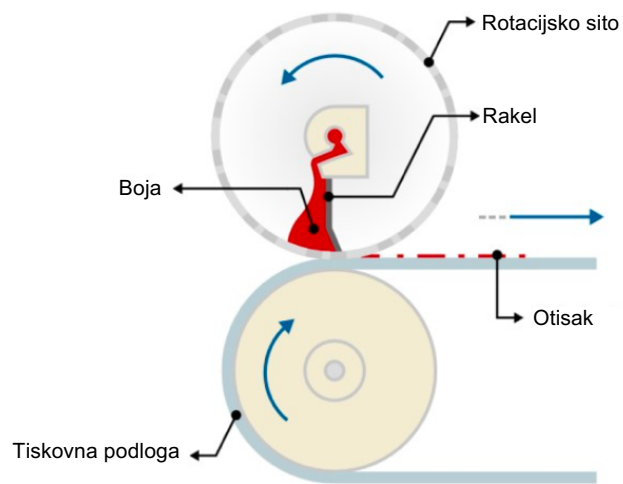
Slika 4. prikazuje tradicionalnu konstrukciju sitotiska, a slikom 5. objašnjen je princip rada kontinuiranog rotacijskog sitotiska tiskane elektronike.



Slika 4. Konstrukcija konvencionalnog sitotiska

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)





Slika 5. Konstrukcija rotacijskog sitotiska

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

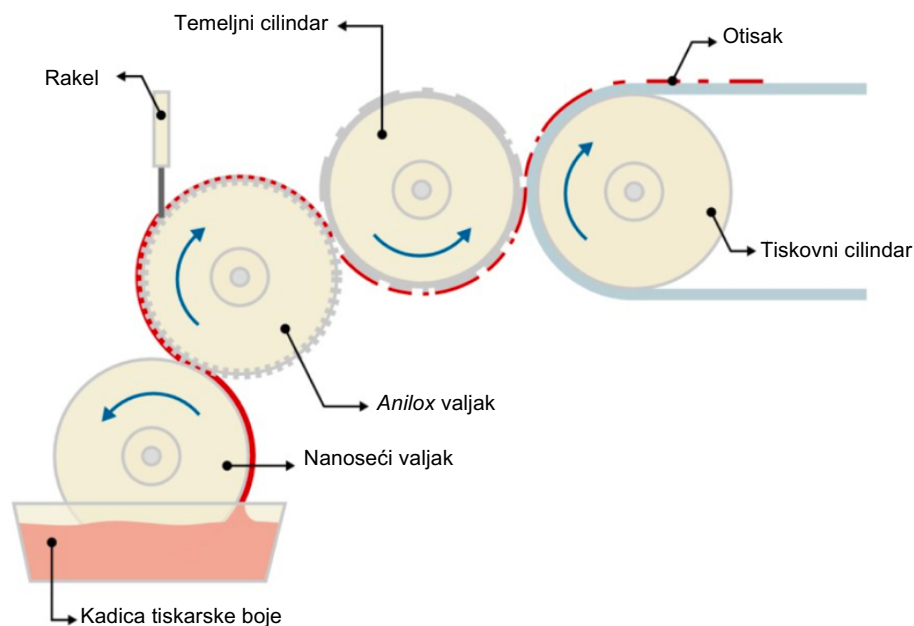
### 2.3.2 Fleksotisak

Fleksotisak u najjednostavnijoj konstrukciji ove tiskarske tehnike sastoji se od četiri elemenata: tiskovni cilindar, temeljni, *anilox* valjak i nanoseći valjak. Otisak na tiskovnoj podlozi reproducira se sa cilindrične tiskovne forme najčešće napravljene od gume ili polimernog materijala. Tiskovna forma ima uzdignute tiskovne elemente, a može se izraditi različitim postupcima, ovisno o primjeni. Direktnim kontaktom temeljnog i tiskovnog cilindra, motiv sa tiskovne forme reproduciran je na tiskovnu podlogu.

Keramički *anilox* valjak, s posebno dizajniranom vanjskom teksturom koju čine ugravirane mikrošupljine, kontrolira količinu tinte koja se prenosi na temeljni cilindar.

*Anilox* valjak kontinuirano se opskrbljuje bojom uz pomoć nanosećeg valjka koji je dijelom uronjen u kadicu sa tiskarskom bojom. Sav višak boje u mikrošupljinama *anilox* valjka uklanja se rakelom. Debljina otisnutog filma definirana je volumenom mikrošupljina u *anilox* valjku, kao i brzinama prijenosa tiskarske boje sa temeljnog cilindra na tiskovni.

Konvencionalna konstrukcija fleksotiska prikazana je na slici 6.



Slika 6. Fleksotiskarski proces otiskivanja  
 (Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

Glavna prednost fleksotiska je sposobnost otiskivanja na različite materijale, što omogućuje odabir podloga za tisak na temelju njihove funkcionalnosti, a ne karakteristika tiska. Na primjer, fleksibilnost tiskarske forme omogućuje otiskivanje na neravnim površinama poput kartona i valovitog kartona, kao i na metaliziranim filmovima ili bilo kojoj drugoj vrsti folija.

Staklo i tekstil također se mogu upotrijebiti kao tiskovne podloge.

Tiskarske boje pogodne za otiskivanje su na bazi ulja ili vode čime se zaključuje da su tiskarske boje karakteristične za ovu tehniku tiska niskog viskoziteta te nerijetko brzosušeće.

Navedena svojstva ove tiskarske tehnike vrlo su pogodna za tisak ambalaža te baš zbog toga otiskivanje ambalažne potražnje najveća je primjena fleksotiska.

Potencijal fleksotiskarske tehnike ispisa kao brzog postupka ispisa za tiskanu elektroniku do sada je pokazan samo u malom broju aplikacija. Koristi se za ispis vodljivih komponenti i tranzistora, te za pripremu elektroda u polimernim solarnim ćelijama. Zanimljiva je primjena bila njegova upotreba za ispis piezoelektričnih zvučnika velikih površina na papiru. [1]

### 2.3.3 Ofsetna litografija

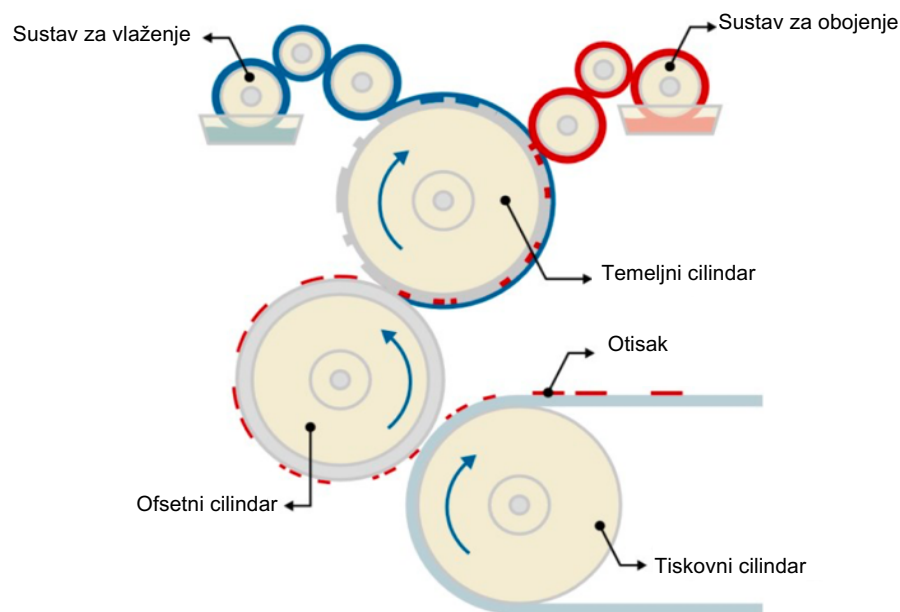
Tehnologija ofseta trenutno je tehnika tiska koja se danas često primjenjuje prilikom otiskivanja tiskane elektronike. Široke je primjene pošto se ponajviše koristi za proizvodnju velikih količina visokokvalitetnih grafika - novina, časopisa, brošura i knjiga.

To je indirektna tehnika tiska, što znači da se motiv prenosi putem tiskovne forme i ofsetnog cilindra na tiskovnu podlogu.

Tiskovna forma se danas može izraditi različitim digitalnim postupcima, a razvoj materijala za izradu tiskovne forme (fotoosjetljivog sloja) omogućio je i primjenu različitih vrsta tiskarskih boja. Takav razvoj je omogućio i primjenu različitih vodljivih tiskarskih boja.

Tijekom procesa tiska, na tiskovnu formu se nanosi otopina za vlaženje, a zatim tiskarska boja. Tiskarska boja se apsorbira na oleofilno područje, a otopina za vlaženje se adsorbira na hidrofilno područje.

Princip rada ofsetne litografije prikazan je na slici 7.



**Slika 7. Ofsetni tisak**

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

Ova tehnika smatra se indirektnom tehnikom zbog posrednog, ofsetnog cilindra koji je svojim djelovanjem produljio vijek tiskovne forme. U usporedbi sa drugim tehnikama tiska gdje je tiskovna forma u direktnom doticaju sa tiskovnom podlogom, istrošenost tiskovnih formi znatno je veća no kod ofseta.

Tiskarske boje koje se koriste u ofsetu moraju imati visoku viskoznost, poput paste te u dodacima moraju postojati sredstva koja sprječavaju sušenje zbog vrlo tanko nanosa boje na tiskovnoj podlozi.

Najveći nedostatak ofseta povezan je s troškovima pripreme, koji su prilično visoki, iako je stvarni postupak tiskanja relativno jeftin.

Ofsetna litografija primjenjuje se u tiskanoj elektronici za otiskivanje elektroprovodljivih filmova na širok raspon fleksibilnih materijala. Također se koristi u proizvodnji kompozitne strukture koje sadrže vodljive, otporne, dielektrične i feromagnetske slojeve. [1]

#### 2.3.4 Bakrotisak

Bakrotisak je tehnika tiska koja ima jednu od najjednostavnijih konstrukcija tiskovne jedinice. Sastoji se od temeljnog i tiskovnog cilindra.

Temeljni cilindar obično je izrađen od čelika sa slojem bakra u koji su ugravirani tiskovni elementi, dok su područja slobodnih površina u razini početne debljine cilindra.

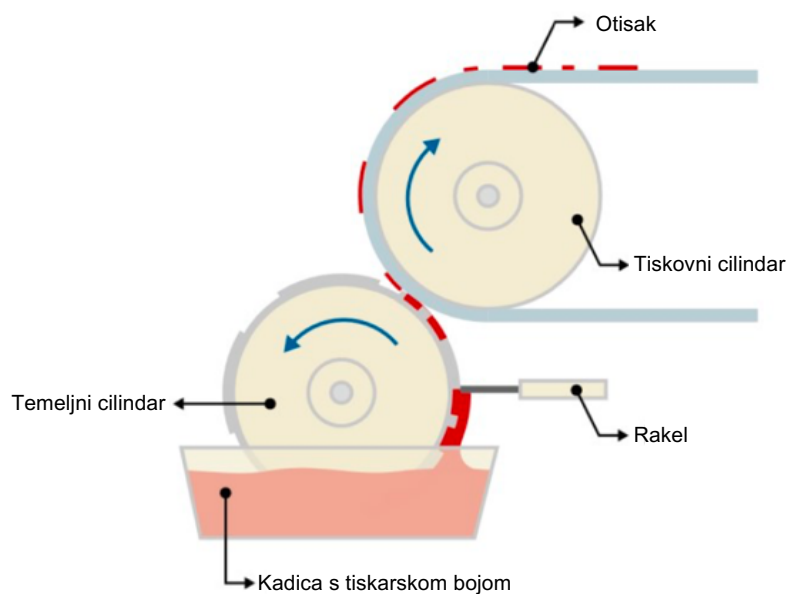
Graviranjem tiskovne forme, na površini temeljnog cilindra stvaraju se čašice u koje dolazi tiskarska boja prilikom reprodukcije. Svaka čašica može imati različitu dubine čime se regulira volumen tiskarske boje na podlozi. Dublje čašice će stvarati intenzivnije tonove, dok će manje duboke stvarati tonove manjeg intenziteta.

Za vrijeme otiskivanja, temeljni cilindar djelomično je uronjen u kadnicu s tiskarskom bojom, pri čemu se čašice konstantno pune novom bojom. Višak tiskarske boje sa slobodnih površina uklanja se uz pomoć rakel.

Novija metoda nanosa tiskarske boje postiže se komornim rakelom koji je izvrsno rješenje za otiskivanje tiskarskih boja koje u svom sastavu imaju lako hlapljive komponente. Komorni rakel pod visokim tlakom prenosi tiskarsku boju na tiskovnu podlogu zbog prisustva adhezijskih sila između dva cilindra.

Adhezijske sile zadržavaju se između podloge i temeljnog cilindra samo kada između njih postoji kontinuirani kontakt. Takav se kontakt osigurava upotrebom mekanog tiskovnog cilindra.

Slika 8. objašnjava princip rada bakrotiska.



Slika 8. Bakrotisak

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

Reprodukcije nastale bakrotiskom dugotrajnog su vijeka. Primjena im je najviše u izradi vrijednosnica, poštarskih markica, posebne ambalaže, jednogodišnjih časopisa i slično. Zbog kompleksne izrade tiskovne forme, kao i zbog sastava iste, ova tehnika vrlo je skupa te isplativa samo u velikim nakladama.

Tiskarske boje za bakrotisak moraju biti vrlo malog viskoziteta, gotovo u tekućem stanju, kako bi velikom brzinom popunile čašice tiskovne forme. Takve boje jednostavnog su sastava i postupka izrade.

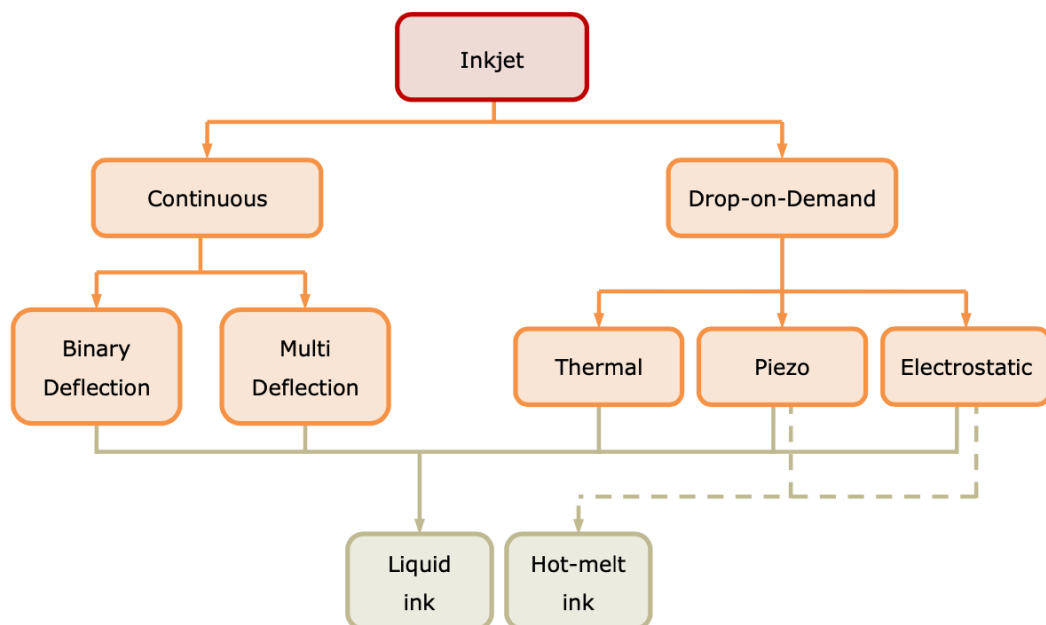
Široki spektar primjene bakrotiskarskih otisaka zabilježen je i na području tiskane elektronike. Tehnikom bakrotiska moguće je otisnuti vrlo kvalitetne vodljive tragove koje je moguće upotrijebiti u proizvodnji OLED osvjetljenja i zaslona organskih fotonaponskih modula kao i u raznim senzorima. [1]

### 2.3.5 Inkjet tisak

*Inkjet* tisak beskontaktna je tehnologija u kojoj se kapljice tiskarske boje uz pomoć mlaznica raspršuju na tiskovnu podlogu stvarajući otisak. Tiskovnim sustavom izravno upravlja procesor u skladu sa specifikacijama dokumenta koji se nalazi u digitalnom formatu.

Budući da je postupak u potpunosti digitalno i elektronički kontroliran, na svaki se list mogu ispisati različiti informativni sadržaji. Ova, u potpunosti digitalizirana tehnika tiska, stvorila je nove i zanimljive načine proizvodnje tiskanih medija poput *print – on – demand* otiskivanja, personalizacije i kućnog printanja.

Bez obzira na razne izvedbe, *inkjet* tisak možemo podijeliti na dvije osnovne konstrukcije: kontinuirani *inkjet* i *inkjet* na zahtjev. Shematsku podjelu *inkjet* tehnologije moguće je vidjeti na slici 9. [1]



Slika 9. Podjela *inkjet* tehnologije

(Kipphan H (2001). Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods)

Jedan od najvažnijih elemenata *inkjet* tehnologije je mlaznica za ispis. Svaki *inkjet* sustav sastoji se od tisuća mlaznica visoke preciznosti, promjera obično

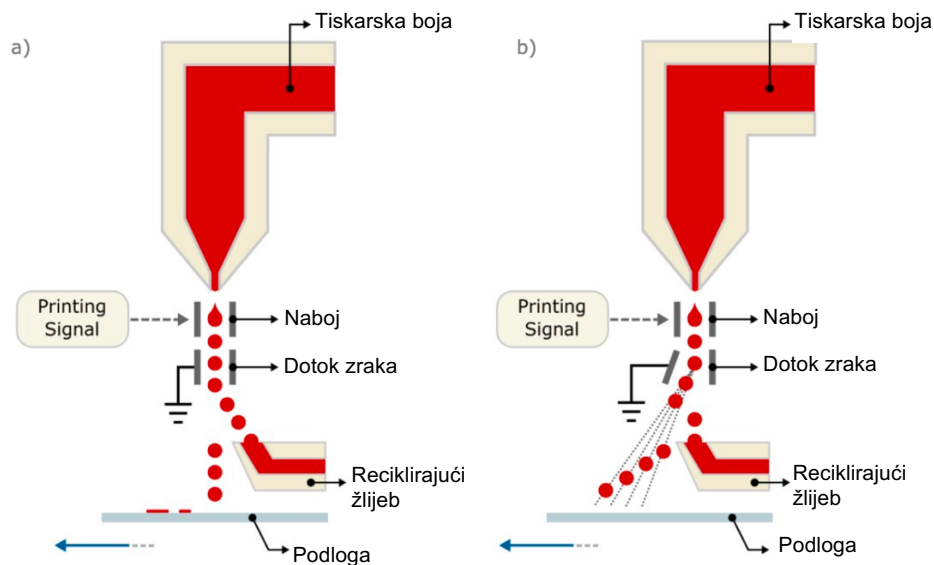


oko 10 mikrometara. Karakteristike kapljica boje poput volumena, brzine i kuta putanje, izravno utječu na geometriju mlaznice. Čak i najmanje preinake u proizvodnom procesu mlaznice uvelike mogu utjecati na kvalitetu ispisa. Kako bi se izbjegle nepravilnosti u konstrukciji mlaznica, a time i postigle ujednačene kapi boje, svaka mlaznica izrađuje se submikrometarskom točnošću. Za ispis visokih kvalitetnih otisaka, potreban je mali volumen kapljice boje i mali promjer glave za ispis. [14,15]

#### 2.3.5.1 Kontinuirani *inkjet*

Kao što i samo ime ove tehnike govori, kontinuirani *inkjet* tisak bez prestanka kapa tiskarsku boju u obliku kapljica. Kapljice padaju na tiskovnu podlogu stvarajući otisak prethodno računalno definiran. Kapljice koje ne završe na tiskovnoj podlozi, sakupljaju se u žlijebu kako bi se ponovno mogle iskoristiti. Ovisno o metodi pada, kontinuirani sustav mlaznica može biti izveden ili kao binarni sustav skretanja (prikazan na slici 10 a) ili kao sustav višestrukog skretanja (prikazan na slici 10 b).

U binarnom sustavu pomaka, kapljice imaju jedno od dva stanja naboja. Napunjene su ili nenapunjene. Napunjene kapi usmjeravaju se na tiskovnu podlogu, dok se nenapunjene kapi preusmjeravaju u žlijeb za recirkuliranje. Suprotno tome, u sustavu višestrukog zakreta, kapi dobivaju različite naboje tako da mogu skrenuti u različite smjerove i nanijeti na različite položaje na podlozi. Nenapunjene kapi se, također, kao i binarnim sustav skretanja, preusmjeravaju u žlijeb za ponovno cirkuliranje.



Slika 10. Princip rada kontinuiranog *inkjet* tiska

- a) Binarni sustav pomaka
- b) Sustav višestrukog zakreta

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

### 2.3.5.2 *Inkjet* tisak na zahtjev

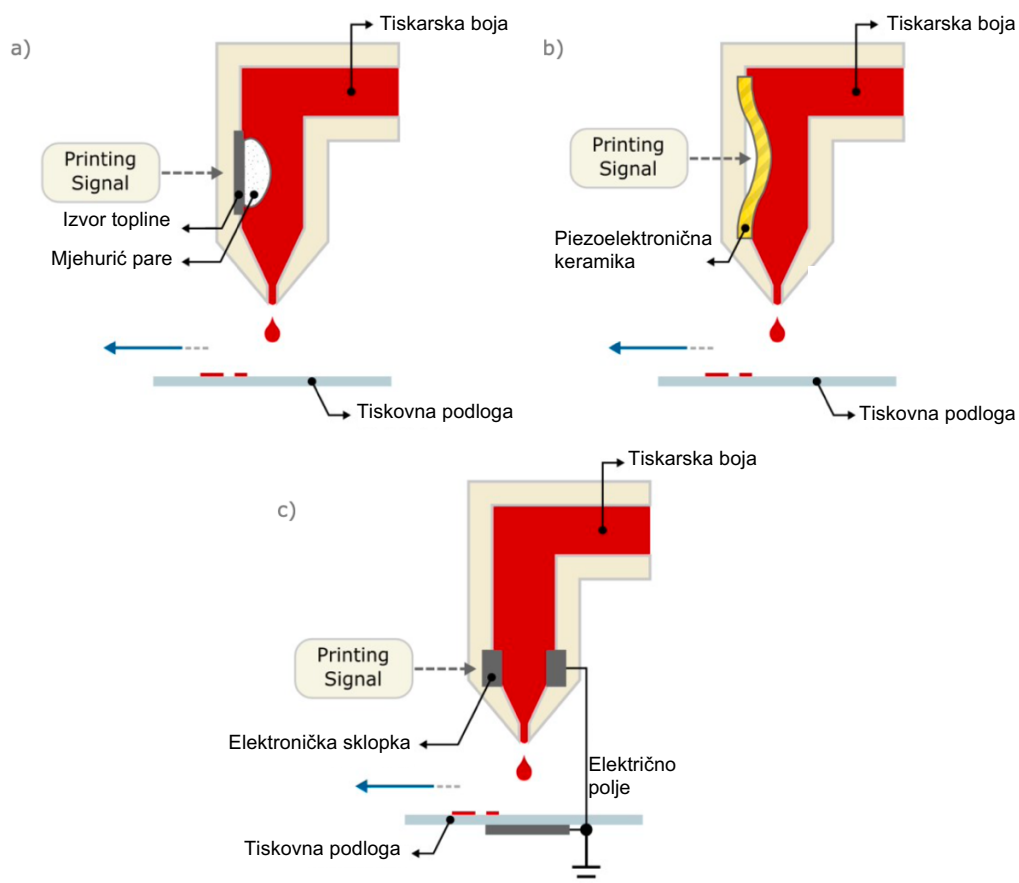
*Drop – on – demand* tisak ili tisak na zahtjev, kapljice tiskarske boje propušta samo kada su potrebne za nastanak tiskovnih elemenata na podlozi zbog čega nema potrebe za sustavom zakretanja i recikliranja.

*Inkjet* sustavi na zahtjev mogu se klasificirati prema postupku kojim se stvaraju pojedinačne kapi tiskarske boje - termalne mlaznice, piezo mlaznice i elektrostatičke mlaznice. Sva 3 funkcionalna principa stvaranja kapljive tiskarske boje prikazana su na slici 11.

Termalni *inkjet* metoda je danas najčešće korištena metoda *inkjet* tiska na tržištu. Tehnologija se sastoji od komore s bojom s grijačem i mlaznicom. Kapi boje nastaju brzim zagrijavanjem (nekoliko mikrosekundi) tekuće tiskarske boje unutar komore s bojom dok ne ispari, a u tom trenutku kap tinte izbacuje se iz mlaznice kao rezultat pritiska koji stvara mjehurić pare. Slijedi punjenje komore bojom nakon čega je sustav ponovo spreman za stvaranje otisaka.

U piezo *inkjet* sustavima kapi boje nastaju zbog promjene volumena unutar komore s bojom zbog deformacije keramičkog piezoelektričnog materijala primjenom električnog polja. izobličenje se koristi za povećanje pritiska unutar komore s tintom i kao rezultat toga, kapljice tinte izbacuju se iz sustava mlaznica prema podlozi za tisak.

Elektrostatička mlaznica svoj rad temelji na djelovanju električnog polja između *inkjet* sustava i tiskovne podloge. Električno polje u mlaznicama rezultira nastankom sila koje mogu biti u ravnoteži ili dolazi do promjena površinske napetosti između tiskarske boje i izlazne mlaznice nakon čega se kap boje oslobađa, kao posljedice električnog polja. [13]



Slika 11. Način rada *drop – on – demand inkjet* tehnologije

- a) Termalni sistem
- b) Piezo sistem
- c) Elektrostatički sistem

(Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics)

*Inkjet* tehnike tiska otiskuju tekućim bojama niske viskoznosti, iako piezo i elektrostatički *inkjet* sustavi mogu koristiti i takozvane vruće tiskarske boje. Ako se koriste tekuće boje, postupkom sušenja dolazi do isparavanja i apsorpcije. Korištenje topljene tiskarske boje, podrazumijeva se da se postupak sušenja automatski uključuje u postupak tiska. Termički topljene tinte moraju se rastopiti prije ispisa i brzo ohladiti i stvrdnuti nakon ispisa. Upotrebom tiskarske boje i njezin odnos s podlogom za tisak određuje se debljina sloja boje i kvaliteta nastale reprodukcije. Pri upotrebi tekuće boje, mogu se nanijeti vrlo tanki filmovi tinte, što rezultira debljinom od približno 0,5  $\mu\text{m}$ . U slučaju korištenja topljene boje, debljina sloja tinte kreće se između 10 i 15  $\mu\text{m}$ . Obje vrste tinte mogu sadržavati boje ili pigmente kao bojila. [13, 16]

#### 2.3.5.3 Primjena *inkjet* tehnologije

Najveće prednosti *inkjet* tiska, u usporedbi s konvencionalnim tehnikama tiska, su mogućnost lake izmjene i prilagođavanja virtualne tiskovne forma uz pomoć računala i sposobnost izrade visokokvalitetnih otisaka na raznim podlogama uz relativno nisku cijenu. Cijena pogona relativno je jeftina te ju je moguće nadograđivati.

Nažalost, produktivnost ovih proizvoda još uvijek nazaduje za onima nastalima klasičnim tehnikama.

*Inkjet* tisak relativno je nova tehnologija i predstavlja određena ograničenja u brzini obrade i brzini nanosa tiskarske boje.

Danas su *inkjet* pisači praktički nadohvat svima, a prisutni su u većini kućanstava ekonomski razvijenijih zemalja.

Tiskana elektronika, u velikom postotku, svoje otiske dobiva *inkjet* tehnologijama te je spektar primjene ove tehnike tiska vrlo opsežan. Neki od proizvoda su tranzistori, tiskane memorije, zasloni, fotonaponske ćelije, RFID modeli [17], senzori i slično.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Na sveučilištu u Belgiji, 2012 godine, provedeno je istraživanje otisaka tiskane elektronike. Cilj istraživanja bio je odrediti vodljivost otisaka nakon otiskivanja, kao i nakon šezdeset ciklusa pranja.

Istraživanje se provelo nad četrnaest tekstilnih podloga na koje se sitotiskarskom tehnikom reproducirao motiv uz pomoć četiri vodljive tiskarske boje na bazi srebra.

Četrnaest izabranih tekstilnih podloga napravljeno je od prirodnih vlakana, sintetičkih vlakana te od oba pomiješana vlakna. Pamuk, viskoza, aramid, poliamid, poliester, pamuk/poliester, poliester/viskoza, neka su od vlakana tiskovnih podloga koje su bile ispitivane. Razlike u svojstvima ovih materijala utjecat će na vodljiva svojstva otisaka nakon otiskivanja.

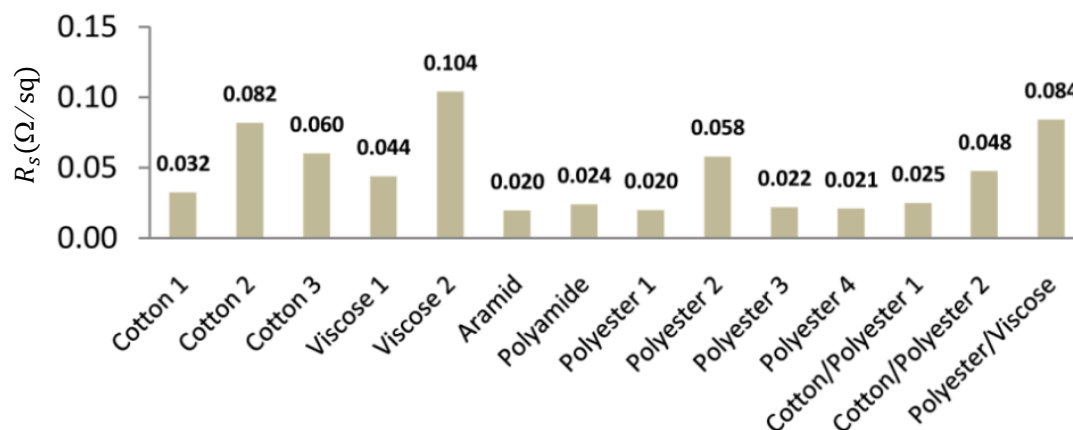
Upotrebene vodljive tiskarske boje na bazi srebra razlikuju se po količini srebra, brzini skrućivanja i viskoznosti.

Vodljivi otisak reproduciran je tehnikom sitotiska zbog mogućnosti nanosa tiskarske boje u različitim debljinama. [3]

Nakon otiskivanja, izmjeren je otpor uzoraka na temelju kojeg je zaključeno da otpor dobivenog vodljivog sloja ovisi o tekstilnom materijalu. Prijanjanje vodljive tiskarske boje nije jednako na svim površinama, zato što tekstil djelomično upija tiskarsku boju. Ova uočena pojava djelomičnog nanosa tiskarske boja, a samim time i smanjenje električne vodljivosti otisaka, za proizvođače vodljivih tiskarskih boja stvara probleme. Općenito, prilikom ispitivanja vodljivosti boje, otisak je nanesen na krutu ravnu površinu, gdje je nanos tiskarske boje u potpunosti adsorbiran.

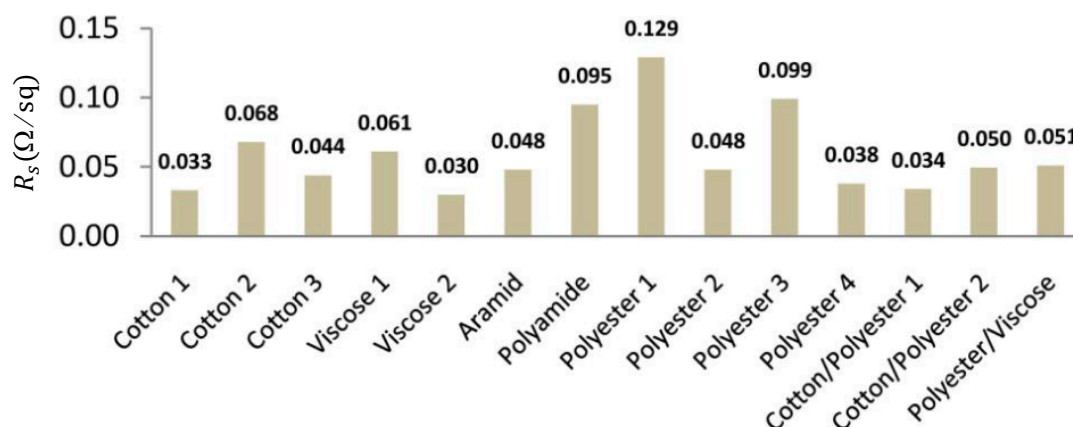
Na slici 12. i 13. moguće je usporediti vrijednosti otpora na otiscima, nakon što su reproducirani te potom sušeni u pećnici, kako bi se boja bolje povezala i

učvrstila za podlogu. Tiskarska boja koja je prikazana na slici 12. je proizvođača *DuPont*, dok je boja korištena na slici 13. proizvođača *Acheson*.



Slika 12. Otpor tiskanih uzoraka otisnutih vodljivom bojom proizvođača *DuPont*

Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials



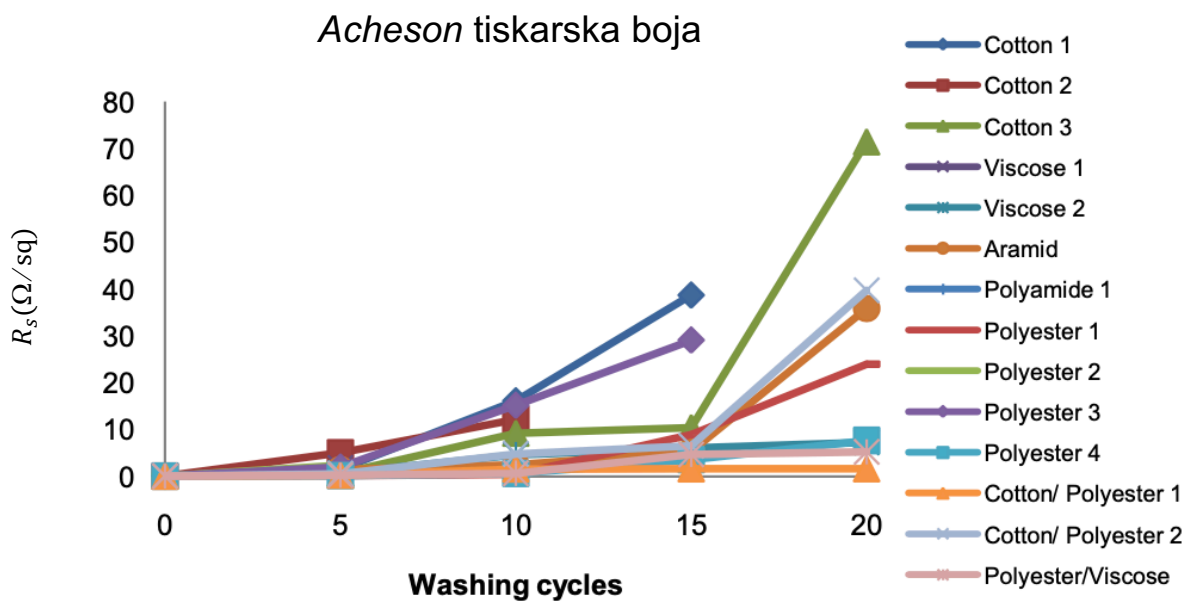
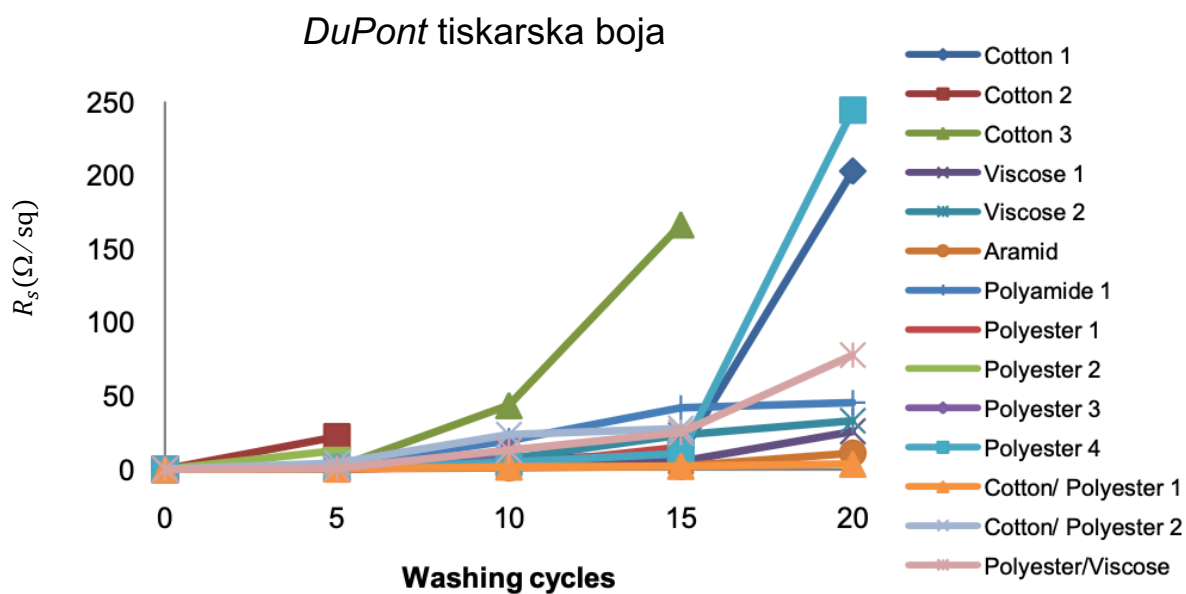
Slika 13. Otpor tiskanih uzoraka otisnutih vodljivom bojom proizvođača *Acheson*

Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials

Pametni tekstil, koji je trenutno dostupan na tržištu, kao *O'Neil* – ova *NavJacket* sa integriranim GPS sustavom, zahtijeva uklanjanje svih elektroničkih uređaja prije pranja. S gledišta potrošača, to nije željena situacija jer komplicira održavanje. Ako je ovaj tiskani vodljivi tekstil namijenjen uporabi u pametnim tekstilnim aplikacijama, dobra svojstva pranja presudna su. [3]

Sljedeći dio istraživanja *Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials*, bio je otkriti otpornost vodljivog otiska na određeni broj ciklusa pranja. Svaki je uzorak bio ispran pet, deset, petnaest, dvadeset te potom šezdeset puta. Nakon dvadeset ciklusa pranja, gotovo polovica uzoraka izgubila je vodljivost, a preostali uzorci imali su vrlo visoke otpore. Zbog toga, daljnji ciklusi pranja nisu se proveli.

Na slici 14. prikazan je postepen porast otpora nakon svakih pet ciklusa pranja dviju reprodukcija otisnutih različitim vodljivim tiskarskim bojama na bazi srebra.



Slika 14. Otpori tiskanih uzoraka izmjereni nakon svakih pet ciklusa pranja

Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials



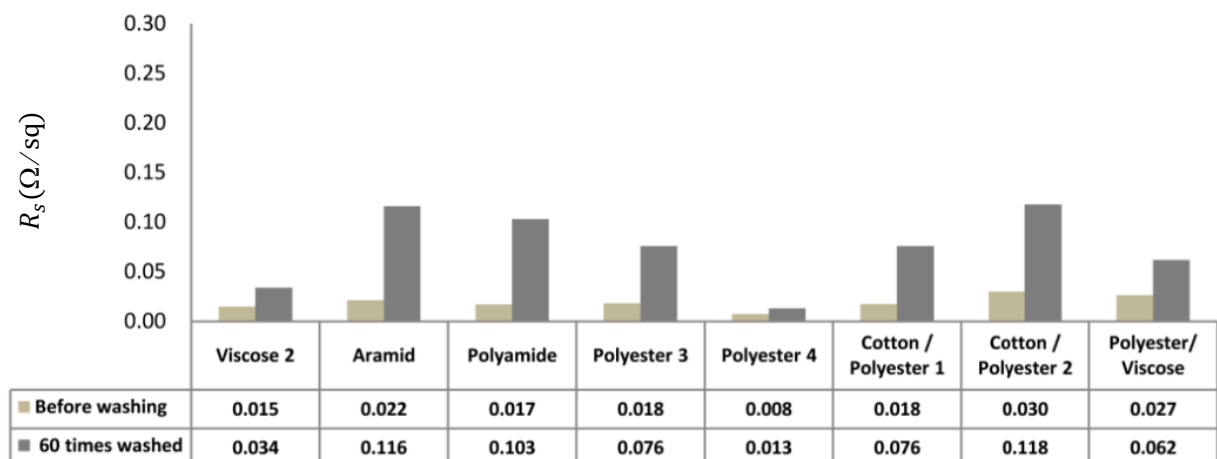
Kako bi se izbjeglo nastajanje pukotina uslijed ciklusa pranja ili nestanak tiskarske boje sa tiskovne podloge, nad otiskom može se provesti nekoliko vrsta predobrade.

U ovom se istraživačkom radu, *Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials*, otisnute vodljive motive, odlučilo zaštititi termoplastičnim poliuretanskim (TPU) slojem.

Nakon nanosa TPU sloja, uočen je znatni pad otpora na određenim materijalima.

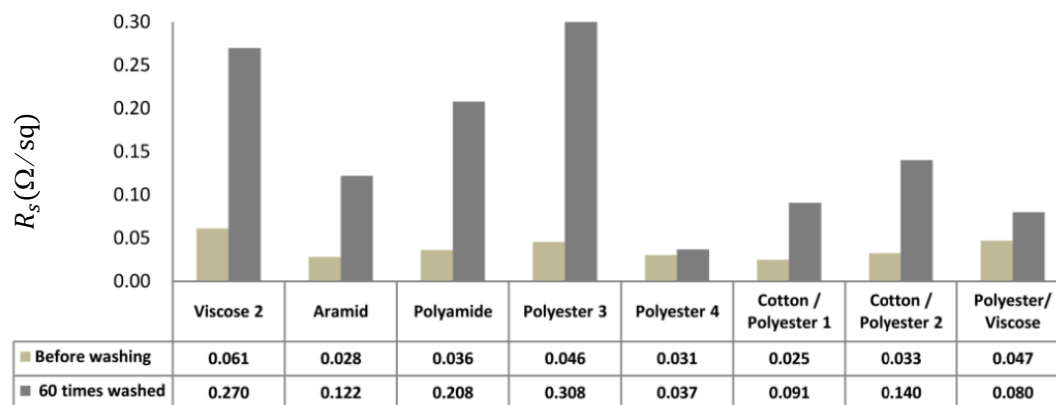
Uslijedio je ponovni ciklus ispiranja vodljivog otiska, no sada sa nanesenim TPU slojem na vodič. Otisci su isprani šezdeset puta.

Na slikama 15. i 16. moguće je usporediti vrijednosti otpora na otiscima otisnutim vodljivom tiskarskom bojom (*DuPont* i *Acheson*) te potom oslojenim TPU slojem.



Slika 15. Otpor ispranih uzoraka prekrivenih TPU slojem otisnutih vodljivom bojom proizvođača *DuPont*

Ilda K. (2012). *Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials*



Slika 16. Otpor ispranih uzoraka prekrivenih TPU slojem otisnutih vodljivom bojom proizvođača *Acheson*

Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials

Ovim istraživanjem dokazano je da kombinacija tekstila i vodljivih tiskarskih boja omogućuje proizvodnju fleksibilnog, provodljivog, laganog, praktičnog i udobnog pametnog tekstila.

Tehnika sitotisk sa vodljivim tiskarskim bojama kvalitetna je i jeftina metoda za stvaranje vodljivog tekstila.

Električna svojstva vodljivog sloja na tiskanim uzorcima određivala su se otporom izmjerenim nakon otiskivanja, kao i nakon pranja. Na izmjereni otpor utjecala je količina nanosa vodljive tiskarske boje i količina srebra u tiskarskoj boji, kao i sastav tiskovnog materijala.

Tiskani uzorci sa nanosenim i bez nanosa TPU sloja isprani su do dvadeset i šezdeset puta. Tiskani sloj bez nanosa TPU zaštitnog sloja pokazao je pukotine nakon dvadeset pranja, a vodljivi sloj je nestao tijekom ciklusa pranja, što je rezultiralo gubitkom vodljivosti. Međutim, kada je vodljivi sloj bio zaštićen TPU slojem, vodljivost se održavala i nakon šezdeset ciklusa pranja. [3]

Dokazano je da su elektrovodljivi tekstili dobiveni sitotiskom boja na bazi srebra, zaštićeni TPU slojem, prikladni za pranje, a samim time i za masovnu primjenu.

## 4. PRIMJENA TISKANE ELEKTRONIKE

Obzirom na trenutnu primjenu tiskane elektronike u svijetu, nova otkrića i istraživanja svakodnevno otkrivaju područja koje će uskoro prisvojiti tiskanu elektroniku kao vrlo perspektivnu tehniku i početak je primjenjivati u elektroničkim područjima.

Predviđene primjene različite su i pronalaze se gotovo u svim granama znanstvene, strojarske, medicinske, ekonomske i grafičke struke.

### 4.1 Dinamične novine, časopisi i natpis

Koristeći kombinirane prednosti papira s dinamičnim digitalnim sadržajem, tvrtke mogu stvoriti nove formate za prezentaciju vizualnih informacija i oglašavanja svojih proizvoda. To uključuje animirane reklame u časopisima i novinama ili izradu dinamičnih natpisa i panoa. Ostale mogućnosti uključuju, ali nisu ograničene na, plakate, posjetnice, pakete proizvoda i naljepnice. [1]

### 4.2 Pametna ambalaža

Tiskani zasloni mogu se ugraditi u pakete proizvoda ne samo s ciljem da ih učine vizualno privlačnijima i atraktivnijima, već i korisnijima i korisnicima. Stoga se tiskani elektronički sustavi mogu koristiti u pakiranju radi poboljšanja čitljivosti i detalja dostupnih podataka o proizvodu, a time i poboljšanja podataka kojima potrošači imaju pristup prilikom kupovine.

Nadalje, mjere protiv krivotvorenja također se mogu primijeniti izravno na proizvode, sprečavajući ili barem zakomplicirajući krivotvorenje proizvoda. [1]

### 4.3 Pametne naljepnice

Od jeftinih ažuriranih elektroničkih naljepnica na policama i oznaka za cijene koje se koriste u supermarketima i trgovinama do dinamičkih naljepnica s informacijama o proizvodima. [1]

## 4.4 Pametne kartice

Primjena sustava tiskane elektronike na pametnim karticama mogla bi omogućiti korisnicima brzi pristup informacijama koje se nalaze na kartici, gdje god i kad god žele. To bi, na primjer, omogućilo kupcima da lako provjere iznos kredita na pametnoj kartici javnog prijevoza ili valjanost pretplate. Kartica s čestim letcima ili bilo koja druga vrsta kartice vjernosti može ukazivati na prikupljene bodove za vjernost ili upozoriti korisnika na promocije. Pametne kartice u zdravstvu također bi se mogle poboljšati, omogućujući korisnicima da lako provjere određene podatke u svom medicinskom kartonu, poput krvne grupe, jesu li cjepiva ažurirana, kada je zadnji put otišao liječniku ili kada bi trebao imati sljedeći liječnički posjet. [1]

## 4.5 Dijagnostički uređaji u zdravstvu

Potencijali tiskane elektronike mogu biti revolucionarni u zdravstvu. Omogućujući proizvodnju jednokratnih tiskanih biosenzora uz djelić cijene ekvivalentnih neispisanih rješenja, oni mogu složene zdravstvene preglede učiniti ne samo jeftinijim već i bržim. Ti se biosenzori tradicionalno koriste u medicinskom nadzoru, dijagnostici i isporuci lijekova. Primjeri uključuju biosenzore za praćenje vitalnih znakova (npr. puls, tjelesna temperatura, krvni tlak), potom za ispitivanje metaboličkih varijacija (npr. glukoza u krvi, kolesterol, lakta) i za otkrivanje elemenata patogena (npr. bakterija i virusa). [1]

## 4.6 Uređaji za prikupljanje i skladištenje energije

Razne tehnologije tiska već se koriste kao alati za proizvodnju fotonaponskih ćelija i baterija. Kako tiskane fotonaponske ćelije postaju učinkovitije i pouzdanije kao izvor energije, s vremenom će postati sve raširenije. Jeftine tiskane fotonaponske ćelije omogućit će stvaranje energije tamo gdje je to potrebno. S obzirom na njihovu fleksibilnu prirodu, mogu se lako integrirati u građevinske konstrukcije, poput zidnih obloga, ili od njih napraviti zavjese. Isto tako, tiskane baterije pružaju lagane, fleksibilne izvore napajanja koji se mogu

integrirati u mobilne elektroničke uređaje ili u bilo koju drugu vrstu potrošačke sprave male snage ili tiskani elektronički sustav. [1]

#### 4.7 Aktivna/pametna odjeća

Tiskani elektronički sustavi također se mogu neprimjetno integrirati u tekstil. Mogu se koristiti za poboljšanje funkcionalnosti odjeće, na primjer, korištenjem ugrađenih biosenzora i zaslona za praćenje i prikazivanje vitalnih znakova korisnika, ili umjesto toga na moderniji način za jednostavno prikazivanje dinamičnih uzoraka u tkanini. [1]

## 5. ZAKLJUČAK

Razvoj tiskane elektronike uvelike je uvjetovan obradom vodljivih tiskarskih boja, odgovarajućih tiskovnim podlogama, obradom i tehnikom tiska.

Praktičnost tiskane elektronike oslanja se prvenstveno na razvoj novih boja korištenih za stvaranje elektroničkih komponenata. Usprkos visokoj cijeni, tiskarske boje na bazi srebra široke su primjene zbog visoke vodljivosti samog metala, a samim time dobro prijanjaju na različite tiskovne podloge. Srebro je nerijetko zamijenjeno bakrom zbog sličnih karakteristika vodljivosti, ali nanos vodljive tiskarske boje na bazi bakra, potrebno je oslojavati sa ciljem usporavanja procesa oksidacije. Iako posjeduje svojstvo vrlo visoke vodljivosti, otisci nastali tiskarskom bojom na bazi zlata, primjenjuju se samo kod izrade izuzetno kvalitetnih uređaja zbog vrlo visoke cijene metala. Tiskana elektronika široke primjene, vrlo se često otiskuje vodljivim bojama na bazi ugljika (grafena). Grafen, na polju tiskane elektronike, omogućuje proizvodnju vodljivih tiskarskih boja s velikom vodljivošću i fleksibilnošću po cijeni daleko nižoj od ostalih vodljivih boja.

Do sada su najčešće tiskovne podloge polimerni filmovi, tekstil, keramika, staklo i silicij.

Tiskanje vodljivih boja na papir također je moguće, ali može predstavljati neke izazove zbog grube, vlaknaste površine papira.

Tehnike tiska koju su pokazale najviše uspjeha na području tiskane elektronike su sitotisak i *inkjet*. Obje tehnike omogućuju varijacije nanosa boje pri čemu ne iziskuju velika financijska pokrića, što bi dugoročno moglo rezultirati smanjenjem cijena proizvodnje elektroničkih sustava, a u konačnici i pojeftinjenja elektroničkih uređaja.

Za stvarnu masovnu proizvodnju tiskanih elektroničkih sustava potrebno je optimizirati trenutne tehnologije, zato što su tradicionalne tehnike primarno bile razvijene samo za vizualni prikaz. [18]

## 6. LITERATURA

1. Valente de Jesus Rosa (2015). Minimal Computation Structures for Visual Information Applications based on Printed Electronics
2. D. Meoli, T. May-Plumlee (2002). Interactive electronic textile development: A review of technologies.
3. Ilda K. (2012). Study of Screen-Printed Electroconductive Textile Materials
4. Jerić J. (2015). Određivanje utjecaja podloge i IR sušenja na električnu otpornost elektrovodljivih tiskarskih boja
5. Das A. (2012). Superoleophobic and conductive carbon nanofiber/ fluoropolymer composite films, Carbon
6. X. Tao (2001). Smart fibres , fabrics and clothing
7. Laakso P, Ruotsalainen S, Halonen E (2009). Sintering of printed nanoparticle structures using laser treatment
8. Haque MM, Cho D and Lee CS (2013). Investigation of sintering behavior of octanethiol-coated copper nano ink under various atmospheres
9. Bonfil Y, Brand M and Kirowa-Eisner E (2000). Trace determination of mercury by anodic stripping voltammetry at the rotating gold electrode
10. Rupprecht H, Rikkola R and Hernberg I (2012). Research, development and commercialisation highlights in Printed Intelligence
11. Boujtita M, Hart JP and Pittson R (2000). Development of a disposable ethanol biosensor based on a chemically modified screen-printed electrode coated with alcohol oxidase for the analysis of beer
12. Crouch E, Cowell DC, Hoskins S (2005). A novel, disposable, screen-printed amperometric biosensor for glucose in serum fabricated using a water-based carbon ink
13. Kipphan H (2001). Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods
14. Hanson E (2009). How an ink jet printer works. Society for Imaging Sciences and Technology



15. Ishii H, Fletcher HR, Lee J (1999). Conference abstracts and applications
16. Romano F (1999). Printing Processes. In: Professional Prepress, Printing, & Publishing
17. Yang L and Tentzeris M (2007). Design and Characterization of Novel Paper-based *Inkjet*-Printed RFID and Microwave Structures for Telecommunication and Sensing Applications
18. Hübler AC, Bellmann M, Schmidt GC (2012). Fully mass printed loudspeakers on paper - Organic Electronics