

Jaana Kujala

# Painetun elektroniikan valmistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

30.4.2018

Tekijä Otsikko	Jaana Kujala Painetun elektroniikan valmistus
Sivumäärä Aika	29 sivua 30.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Graafinen tekniikka
Ohjaaja	Tutkijaopettaja Aarne Klemetti
<p>Insinööriä tehtiin kirjallisuusselvityksenä, ja siinä tutkittiin painetun elektroniikan valmistusta. Painetun elektroniikan ala on jatkuvassa muutoksessa, kun uusia älytuotteita ja tekniikoita kehitetään koko ajan, mutta tuotannon perusteet pysyvät pääosin samoina, ja tämän insinööriä tarkoituksena oli tutkia niitä. Työssä perehdyttiin painomateriaalien, painomenetelmien sekä jälkikäsittelymenetelmien ominaisuuksien ja toimintamallien tutkimiseen. Insinööriä tavoitteena oli selvittää työn tilanteelle ammattikorkeakoululle, mitä kaikkea pitää ottaa huomioon, kun aletaan valmistaa painettua elektroniikkaa.</p> <p>Insinööriä tutkimuksessa saatiin selville painettuun elektroniikkaan sopivien painomateriaalien, kuten painoalustojen ja johtavien painovärien, erilaisia ominaisuuksia. Tutkittujen materiaalien ominaisuuksia vertailtiin toisiinsa, ja vertailussa huomattiin, että yksikään materiaali ei ollut huomattavasti parempi kuin muut. Niillä kaikilla oli omat hyvät ja huonot puolensa.</p> <p>Insinööriä tutkimuksessa tutkittiin ja vertailtiin myös erilaisia paino- ja jälkikäsittelymenetelmiä. Painomenetelmät jaettiin kontaktittomiin ja kontaktillisiin painomenetelmiin sen mukaan, tapahtuuko painovärien siirto painoalustalle käyttäen esimerkiksi painolevyä vai suihkuteaanko painoväritippoja painoalustalle. Tutkimusta tehdessä selvisi myös, että painetun elektroniikan jälkikäsittelyyn kuuluvat ainoastaan erilaiset kuivaus- ja sintrausmenetelmät.</p> <p>Vastauksena työn tavoitteeseen saatiin selville, että kaikki, mitä painetun elektroniikan valmistuksessa pitää ottaa huomioon, määräytyy valmistettavan älytuotteen perusteella. Pitää selvittää, mitkä ominaisuudet ovat tärkeimpiä valmistettavalle tuotteelle, ja sen perusteella valitaan käytettävät painomateriaalit. Painomateriaalien valinta taas vaikuttaa siihen, mitä paino- ja jälkikäsittelymenetelmiä voidaan käyttää älytuotteen valmistuksessa.</p>	
Avainsanat	painettu elektroniikka, painomenetelmät, painomateriaalit, jälkikäsittely

Author Title	Jaana Kujala Manufacturing printed electronics
Number of Pages Date	29 pages 30 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Graphic Technology
Instructor	Aarne Klemetti, Researching Lecturer
<p>The thesis was made as a literature review and the objective was to research the manufacturing of printed electronics (PE). The field of printed electronics is changing quickly and new ideas for products and advances in technology are made all the time, but the basics of the manufacturing stay the same and this thesis tried to shed light on that subject. The aim of the thesis was to study the properties of different materials, printing methods and post processing techniques used in printed electronics. The aim of the thesis was to clarify for the University of Applied Sciences, what must be considered, when manufacturing printed electronics.</p> <p>While researching the subject of the thesis, the properties of the different materials suitable for printed electronics, such as the substrates and conductive inks, were discovered and compared with each other. It was noticed in the comparison, that none of the materials were significantly better than the rest, and all of them had their good and bad sides. It's the manufacturers job to decide, which properties are the most important for the PE product, that they are manufacturing.</p> <p>Different printing and post processing methods were also studied and compared in the thesis. The printing methods were classified in two categories: non-contact and contact printing. This classification was made based on how the ink is transferred to the substrate. In the contact printing the ink is transferred to the substrate via a printing plate and in the non-contact printing the ink is for example ejected as small droplets to the substrate. While researching the subject of post processing, it was discovered that only different types of curing and sintering techniques are used in manufacturing PE products.</p> <p>As an answer for the aim of the thesis, it was discovered, that the PE product determines what must be taken into consideration, when manufacturing printed electronics. The most important features of the PE product define the materials, that can be used in the manufacturing, and the materials define, which printing and post-processing techniques are the most suitable for the manufacturing process.</p>	
Keywords	printed electronics, printing methods, materials, post-processing

## Sisälllys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Painettu elektroniikka	2
3	Painomateriaalit	4
3.1	Painoalustat	4
3.2	Painovärit	7
4	Painomenetelmät	12
4.1	Kontaktiton painaminen	12
4.2	Kontaktipainaminen	16
5	Jälkikäsittely	22
6	Tulevaisuudennäkymiä	24
7	Yhteenveto	26
	Lähteet	29

## Lyhenteet

DDP	Direct dry printing. Canatun kehittämä menetelmä hiilinanoputkien yhdistämiseen kaikenlaisten pohjamateriaalien kanssa.
NTT	Nippon Telegraph and Telephone. Japanilainen tietoliikenneyhtiö.
PET	Polyeteenitereftalaatti.
PEN	Polyetyleeninaftalaatti.
PI	Polyimidi.
TFC	Transparent conductive film. Läpinäkyvä johtava kalvo.
MOD	Metal-Organic Decomposition. Metalli-orgaaninen hajoaminen.
TFC	Transparent Conductive Film. Läpinäkyvä johtava kalvo.
EHD	Electrohydrodynamic. Elektrohydrodynaaminen on yksi mustesuihkujärjestelmä.
PDMS	Polydimetyylisiloksaani on yleisimmin käytössä oleva piipohjainen orgaaninen polymeeri.

## 1 Johdanto

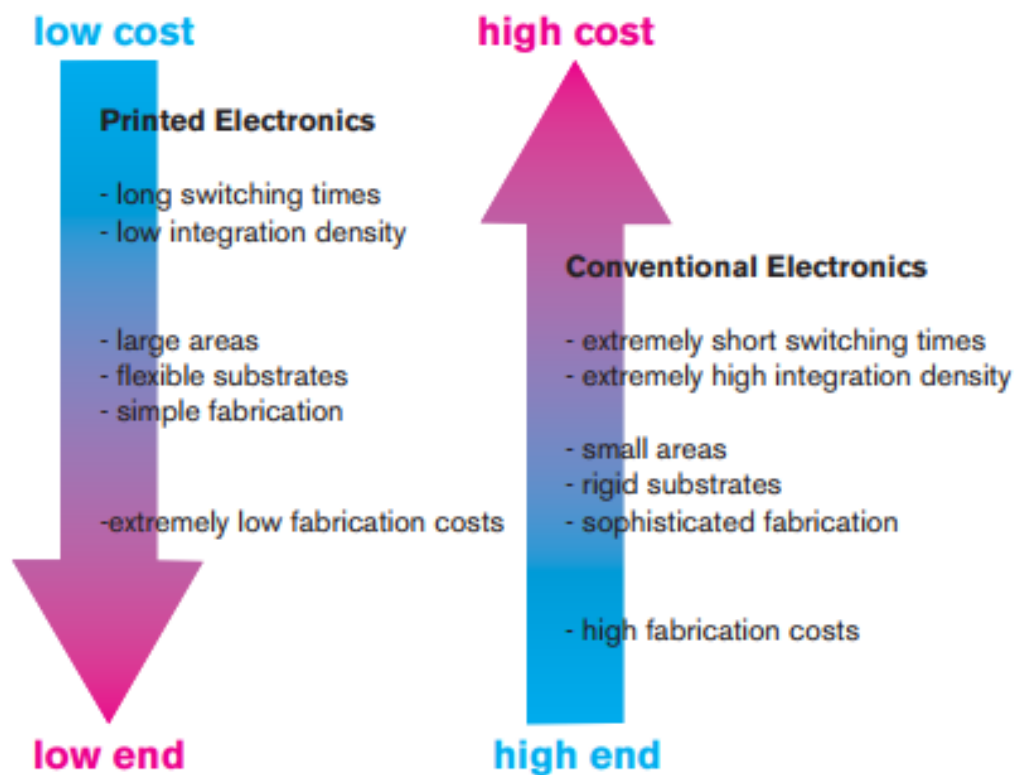
Painettu elektroniikka tarkoittaa perinteisiä painomenetelmiä hyödyntävää elektroniikan valmistusta, joka mahdollistaa esimerkiksi edullisen, ympäristöystävällisen ja kertakäyttöisen elektroniikan valmistuksen. Painettu elektroniikka on koko ajan kasvava tekniikan ala, ja sen mahdollisuudet ovat lähes rajattomat.

Tämä insinööriyö on kirjallisuusselvitys, jonka tarkoituksena on tutkia ja vertailla erilaisia tapoja valmistaa painettua elektroniikkaa sekä selvittää, minkälaisista materiaaleista painettua elektroniikkaa voidaan valmistaa. Suurin osa käyttämistäni lähteistä on digitaalisia, sillä suurin osa painettuun elektroniikkaan liittyvistä tutkimuksista ja artikkeleista on saatavilla kaikkein kätevimmin Internetistä. Olen myös hyödyntänyt tässä insinööriyössä opiskeluaikana käymieni kurssien kurssimateriaaleja. Tietoa hain pääasiassa käyttämällä Google-, Google Scholar- ja IEEE Explore -hakupalveluita.

Työn tilaajana on Metropolia Ammattikorkeakoulu, joka on kiinnostunut selvittämään painetun elektroniikan mahdollisuuksia. Insinööriyön tutkimuskysymyksenä on, *mitä kaikkea pitää ottaa huomioon, kun aletaan valmistaa painettua elektroniikkaa.*

## 2 Painettu elektroniikka

Painettu elektroniikka on kaikenkattava termi perinteisiä painomenetelmiä ja digitaalista tulostamista hyödyntävälle elektroniikkatuotteiden valmistukselle. Toisin sanoen se tarkoittaa teknologiaa, jossa yhdistetään elektroniikan tuotanto perinteisten painomenetelmien kanssa. Verrattuna perinteiseen elektroniikan valmistukseen (kuva 1) painetulla elektroniikalla voidaan erittäin kustannustehokkaasti valmistaa suuria määriä yksinkertaisia elektronisia komponentteja ja laitteita, jotka ovat kevyitä, ohuita ja taipuisia [5, s. 68]. Painettu elektroniikka mahdollistaa myös korkealaatuisen elektroniikan tuotannon ollen samalla erittäin kustannustehokasta sekä ympäristöystävällistä. [1; 2, s. 1; 4.]

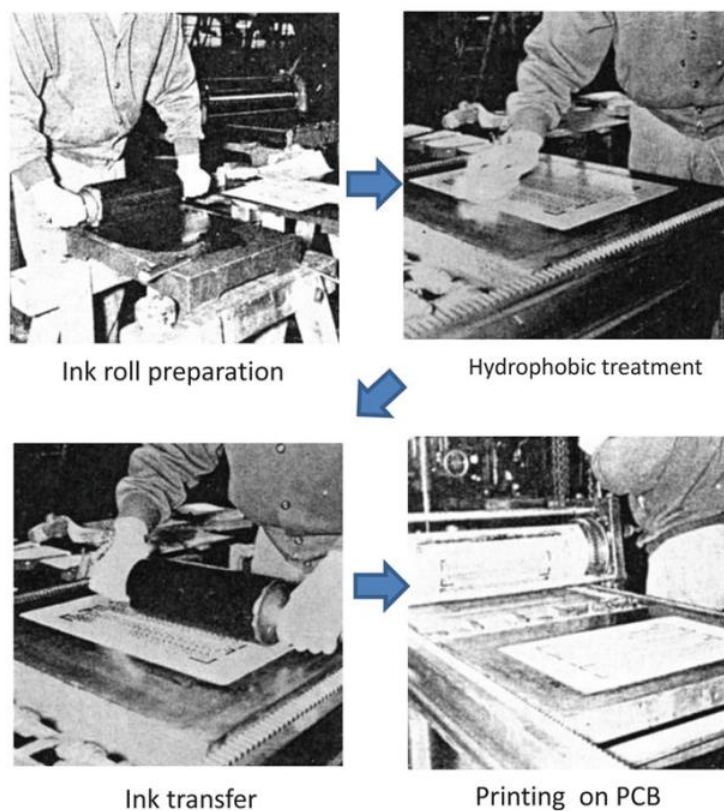


Kuva 1. Painetun ja perinteisen elektroniikan valmistuksen eroja [5, s. 68].

Painetun elektroniikan ansiosta elektroniikkatuotteita voidaan valmistaa useista erilaisista materiaaleista, ja ne voivat olla ohuita, kevyitä, taipuisia sekä päällä pidettäviä. Painetun elektroniikan tuotteita eli älytuotteita voivat olla esimerkiksi piirilevyt sekä erilaiset sensorit ja antennit, mutta myös taipuisat näytöt, aurinkokennot ja integroitu älytekniikka, kuten RFID:t, urheilu- ja terveyslaitteet sekä älytekstiilit. [1; 2, s. 1, s. 15.]

Elektroniikan painaminen ei ole uusi käsite, vaan se on ollut olemassa jo 1900-luvun vaihteessa, jolloin alettiin tutkia painamisen hyödyntämistä piirien ja johdotusten valmistuksessa, niin Thomas Edisonin kuin monien muidenkin tunnettujen keksijöiden toimesta. Alussa piirejä valmistettiin lisäävällä prosessilla, jossa johtimet asetettiin dielektriseen aineeseen eli sähköeristeeseen. Vuonna 1913 Arthur Berry patentoi poistavan menetelmän, jossa piirejä valmistettiin etsaamalla eli syövyttämällä metallia. 1920-luvun puolestavälistä alkaen optisen litografian käyttö piirien valmistusmenetelmänä alkoi nousta ja se on nykyään yksi käytetyimmistä menetelmistä. [3.]

1950-luvulla Japanissa NTT (Nippon Telegraph and Telephone) tutki syväpainamista johdotusten ja piirilevyjen valmistuksessa sen erinomaisen tarkkuuden vuoksi (kuva 2), mutta se ei kuitenkaan onnistunut syrjäyttämään litografiaa elektroniikan painamisessa. Samoihin aikoihin myös seripainoa käytettiin pienimuotoisesti keraamisten substraattijohdotuslevyjen valmistuksessa. Vuosien varrella myös televisioiden kuvaputkia valmistettiin yhdistämällä painaminen ja etsaus. Nykyaikaisten näyttöjen, kuten LCD- ja OLED-paneelien, valmistuksessa käytetään myös painamista. [2, s. 1, s. 10.]



Kuva 2. Painettujen piirilevyjen valmistusta syväpainomenetelmällä NT:ssä Japanissa 1950-luvulla [2, s. 2].



### 3 Painomateriaalit

Painetussa elektroniikassa painomateriaalien valinnassa tärkeintä on se, mitä älytuotetta ollaan valmistamassa. Painoalustalle tärkeitä ominaisuuksia ovat muiden muassa materiaalin taipuisuus, pinnan sileys, paksuus ja paino, ja usein halutaan, että materiaalilla on alhainen opasiteetti eli sen halutaan olevan erittäin läpinäkyvää. Usein on myös tärkeää, että painoalusta on kuumuutta kestävä ja sen lämpölaajeneminen on vähäistä. Tärkeää on myös, että painoalusta ei ole sähkönjohtavaa, sillä se aiheuttaisi häiriötä johtavan painoväriin toiminnassa. Painetussa elektroniikassa useimmin käytettyjä painoalustoja ovat esimerkiksi lasi, metallit, paperi ja muovi. [2, s. 1, s. 87.]

Elektronisissa tuotteissa johdotus on avainasemassa, ja painetussa elektroniikassa johdotukset tehdään painamalla, minkä vuoksi on kehitetty erilaisia johtavia painovärejä. Joissain tapauksissa johtavan aineen siirto painoalustalle tapahtuu aerosolia käyttäen. Johtavat painovärit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: jalometallit, orgaaniset materiaalit ja keraamiset materiaalit. [2, s. 49; 8; 10.]

#### 3.1 Painoalustat

##### Polymeerikalvot

PET-kalvo eli polyeteenitereftalaattikalvo on yleisimmin käytetty muovikalvo ja sen hyviin puoliin kuuluvat läpinäkyvyys, keveys, taipuisuus ja alhainen hinta verrattuna muihin painoalustoihin. Taulukosta 1 voidaan tarkastella painoalustojen erilaisia ominaisuuksia, ja siitä nähdään, että PET-kalvoilla voidaan saavuttaa jopa yli 90 prosentin läpinäkyvyys ja kalvon utuisuus on parhaimmillaan vain 0,3 prosentin luokkaa. Huono puoli PET-kalvossa on se, että se ei kestä kuumuutta hyvin. Tämän vuoksi koko painoprosessi pitää suorittaa alle 120 celsiusasteen lämpötilassa. Paremman lämmönkestävyyden saa, kun käytetään joko PEN- (polyetyleeninaftalaatti) tai PI-kalvoa (polyimidi). PEN-kalvon painoprosessin lämpötilaraja on 155 celsiusasteessa ja PI-kalvon 300 celsiusasteessa. Lämmönkestävyyden kasvaessa kalvojen läpinäkyvyys ja utuisuus kuitenkin huononevat. PEN- ja PI-kalvot ovat myös kalliimpia kuin PET-kalvo. [2, s. 87.]

Verrattuna muihin painoalustoihin polymeerikalvoilla saadaan tarvittaessa kaikkein ohuimmat painoalustat. Niiden paksuudet ovat ohuimmillaan 12 mikrometriä (1  $\mu\text{m}$  = 0,001 mm). Polymeerikalvoista valmistettujen älytuotteiden tuotannossa pitää kiinnittää huomiota kalvon mahdolliseen vääristymiseen erityisesti rullalta-rullalle-tekniikkaa käytettäessä. Kalvon vääristymistä voidaan estää ja vähentää hallitsemalla ja korjaamalla ympäröivän tilan lämpötilaa ja kosteutta, samoin painokoneessa tapahtuvaa venymistä sekä mahdollista kuivumista painokoneen ratakameran ja vääristymisen havainnoin avulla. [2, s. 87.]

Taulukko 1. Taipuisien painoalustojen eri ominaisuuksia [2, s. 88]. Tg tarkoittaa lasittumislämpötilaa.

	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	Transparency (%)	Haze (%)	Tg ( $^{\circ}\text{C}$ )	Process temperature limit ( $^{\circ}\text{C}$ )	Notes
PET	16–100	1.4	90	Approx. 0.3	80	120	
PEN	12–250	1.4	87	Approx. 0.8	120	155	
PI	12–125	1.4	–	–	410	300	
Glass	50–700	2.5	90	0.1	500	400	
Paper	100	0.6–1.0	–	–	–	130	
Transparent paper	20–200	Approx. 1	90	1–2	200 (?)	150	Made of nanocel- lulose fibers [1]
Steel	200	7.9	–	–	–	600 <sup>a</sup>	

<sup>a</sup>Needed to prevent oxidation

## Lasi

Painetussa elektroniikassa lasi on erittäin suosittu painoalusta optisten älytuotteiden, kuten näyttöjen, aurinkokennojen ja valojen valmistuksessa. Kuten taulukosta 1 nähdään, lasin opasiteetti on erittäin alhainen ja sen utuisuuskin on kaikista listatuista painoalustoista parhain, vain 0,1 %. Taulukossa 1 näytetään myös, että lasi voi olla ohuimmillaan 50 mikrometriä paksua, mutta nykyään on jo kehitetty ultraohutta lasia, joka on ohuimmillaan 25 mikrometriä paksua [13]. Tätä ultraohutta lasia pystyy myös taivuttamaan, kuten kuvasta 3 voidaan nähdä.

Lasin lämmönkestävyys on erinomainen: se kestää jopa 400 celsiusasteen tuotantolämpötilan, mikä mahdollistaa johtavien musteiden sintraamisen sen pinnalle. Yksi lasin parhaista ominaisuuksista on sen hermeettisyys eli ilmatiiviys, jonka ansiosta se tarjoaa erinomaisen suojan orgaanisille materiaaleille, jotka ovat herkkiä hapen ja kosteuden vaikutuksille. Lasin huonona puolena on, että se on raskaampaa, hauraampaa ja kalliimpaa, kun sitä verrataan polymeerisubstraatteihin. [2, s. 87; 14; 17.]



Kuva 3. Ultraohutta lasia, joka on ohuimmillaan myös taipuisaa [14].

## Metalli

Painetussa elektroniikassa painoalustana yleisimmin käytetty metalli on teräs ja erityisesti ferriittiset ruostumattomat ja vähähiiliset teräkset. Niitä käytetään hyvin paljon esimerkiksi aurinkokennojen valmistuksessa. Painoalustana teräs mahdollistaa korkeimmat tuotantolämpötilat kaikista taulukossa 1 listatuista substraateista, jopa 600 celsiusasteeseen. Toisaalta se tarvitsee korkeat tuotantolämpötilat hapettumisen estämiseksi. Teräksen lämpölaajeneminenkin on vähäistä verrattuna esimerkiksi muovikalvoihin. Toisin kuin monet muut painetussa elektroniikassa käytetyt painoalustat, teräs on sähköä johtavaa, eikä se siksi käy sellaisenaan painetun elektroniikan painoalustaksi, vaan se pitää ensin passivoida eli sen pinnasta poistetaan kemikaalisesti vapaana oleva rauta ja samalla luodaan teräkselle reagoimaton ja suojaava oksidikerros. [2, s. 89—90; 14.]

## Paperi

Paperisten painoalustojen etuina painetussa elektroniikassa ovat niiden edullinen hinta ja kertakäyttöisyys biohajoavuuden ansiosta, mikä tekee niistä myös erittäin ympäristöystävällisen vaihtoehdon. Paperin heikkouksia on sen tuotantolämpötila, joka on 130 celsiusastetta, mikä tekee siitä toiseksi huonoimman taulukossa 1 listatuista substraateista, sekä opasiteetti. On kuitenkin kehitetty läpinäkyvää nanoselluloosapaperia, jonka opasiteetti on samalla tasolla PET-kalvon kanssa. Se kestää kuumuutta tuotannossa 150 celsiusasteeseen asti, ja sen lämpölaajeneminen on vähäistä. Sen utuisuus on kuitenkin huonompi kuin muiden aiemmin mainittujen läpinäkyvien substraattien, 1—2 %:n luokkaa. [2, s. 88.]

## 3.2 Painovärit

### Jalometallit

Johtavissa painoväreissä käytettäviä metalleja ovat kulta, hopea ja kupari, joista hopea on yleisimmin käytetty. Taulukosta 2 nähdään, että hopean sähkönjohtavuus on paras kolmesta edellä mainitusta metallista, ja lisäksi se kestää hyvin hapettumista. Toisena taulukossa on kupari ja kolmantena kulta. Parhaan sähkönjohtavuuden metallisilla painoväreillä saa, kun käytetään painovärejä, jotka perustuvat joko nanopartikkeleihin tai esiasteisiin metalleihin. Metalliset nanopartikkelit muodostetaan yleensä tasapainottamalla ne käyttämällä joko ohutta orgaanista kerrosta tai oksidikerrosta. Orgaaniset kerrokset ovat joko monomeerejä tai polymeerejä riippuen käsiteltävästä metallista. [2, s. 49; 8.]

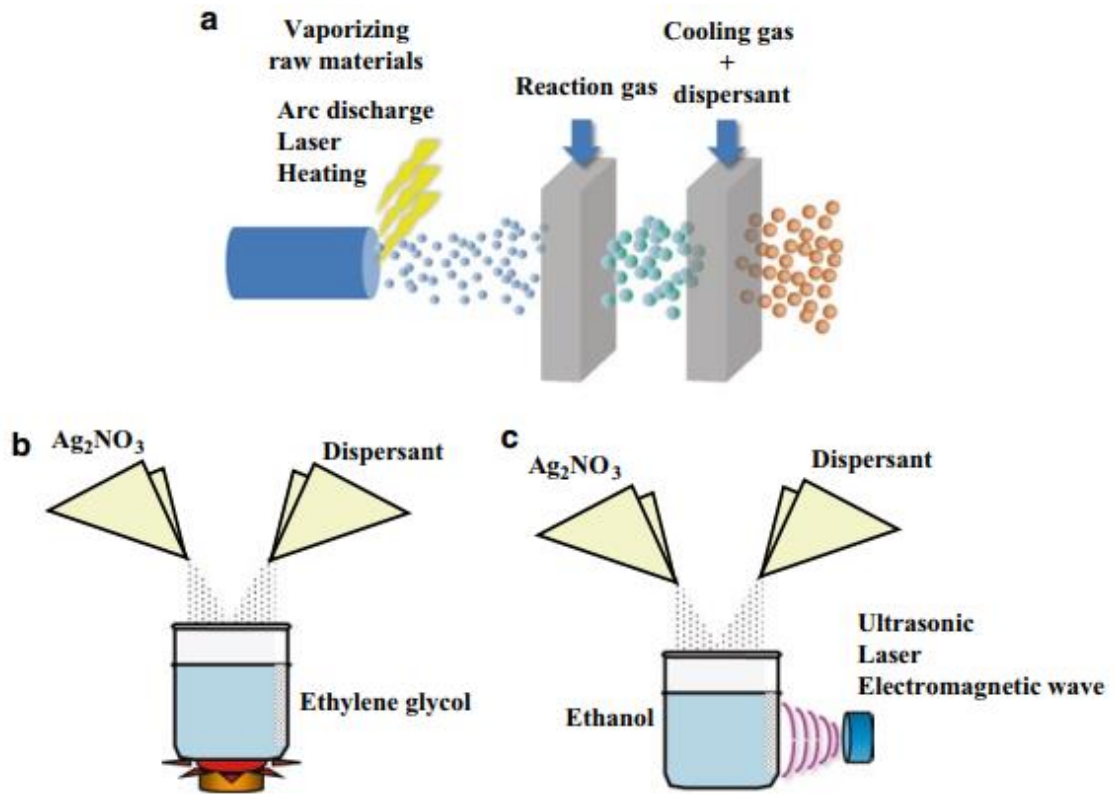
Taulukko 2. Johtavien materiaalien sähkönjohtavuuden vertailua [2, s.50]. CNT (hiilinanoputki, engl. Carbon Nanotube)

Materials		Electrical conductivity (Siemens/cm)	Notes
Metals	Ag	$6.2 \times 10^5$	Bulk properties
	Cu	$5.9 \times 10^5$	
	Au	$4.4 \times 10^5$	
	Pt	$1.0 \times 10^5$	
	Ni	$1.4 \times 10^5$	
Organic	PEDOT/PSS	$1-10^3$	
Ceramics	ITO	$10^3-10^4$	Depends on doping/composition, oxygen defects, and crystallinity
	CNT	$1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ( $\sim 10^4 \text{ S/cm}$ for CNT fiber [1])	High-temperature treatment required Theoretical values of single-wall (SW) CNT electron mobility (electron mobility of Si is approx. $10^3 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ). Depends on carrier concentration
	Graphene	$2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V s}$	One- and two-dimensional materials

Kuvasta 4 nähdään, että on kolme eri tapaa valmistaa nanopartikkeleita:

- höyryfaasiprosessi
- polyoliprosessi
- energialähteellä pienentäminen.

Höyryfaasiprosessi aloitetaan kuumentamalla raakamateriaalia laserilla, jotta siitä alkaa irrota partikkeleita, jotka ohjataan tyhjiössä reaktiokaasun läpi kohti viilennyskaasua ja dispergointiainetta, minkä tarkoituksena on vähentää raakamateriaalin pintajännitystä ja auttaa materiaaleja sekoittumaan tasaisemmin toisiinsa. Polyoliprosessissa jauhattua metallia kuumennetaan etyleeniglykolissa sille sopivan dispergointiaineen kanssa. Kolmannessa prosessissa eli energialähteellä pienentämisessä, jauhattu metalli sekoitetaan etanoliin sille sopivan dispergointiaineen kanssa, jonka jälkeen dekantterilasia 'ammutaan' ultraäänellä, laserilla tai elektromagneettisilla aalloilla. Hopea- ja kultananopartikkeleita valmistetaan yleensä liuosprosesseilla, mutta kupari tarvitsee nanopartikkeleiden valmistuksessa tyhjiön, sillä se hapettuu herkästi. [2, s. 50—54.]



Kuva 4. Kolme nanopartikkelien valmistusmenetelmää: a) höyryfaasiprosessi b) polyoliprosessi c) energialähteellä pienentäminen [2, s. 50].

Metallijohdotuksia voidaan myös tehdä hyödyntämällä liuoksia, joissa metalli-orgaanisten esiasteiden molekyylinen luonne mahdollistaa alhaiset tuotantolämpötilat metallien muodostumiselle. Tämänkaltaisia liuoksia kutsutaan MOD (metalli-orgaaninen hajoaminen, engl. Metal-Organic Decomposition) -painoväreiksi, ja niitä voidaan valmistaa niin hopeasta, kuparista kuin kullastakin. MOD-painovärillä painetut kuvat muuntautuvat yhtenäiseksi, sähköä johtavaksi metalliradaksi, kun sitä kuumennetaan laskeuman jälkeen. MOD-painovärin etuna on sillä painetun kuvion peilimäinen pinnan sileys, joka tulee esille kovettamisen jälkeen. Hopeapohjaiset MOD-painovärit hajoavat alhaisimmassa lämpötilassa, noin 100 °C:ssa. Kuparille MOD-painoväri on erityisen hyödyllinen, sillä se estää metallien hapettumisen säilytyksessä, mutta sen kovettaminen on haastavaa, sillä hapettumisen vaikutuksia on vaikea estää. Siihen tarvitaan joko vahva pelkistysaine tai inertti ilmakehä ja korkeammat lämpötilat. Kuparipohjaiset MOD-painovärit tarvitsevat hajoamiseen noin 150 °C:n lämpötilan. Hyvänä puolena kuparipohjaisissa MOD-painoväreissä on se, että ne ovat halvempia kuin hopea- ja kultapohjaiset. [2, s. 56—58; 16.]

## Orgaaniset materiaalit

Orgaanisten materiaalien sähkönjohtavuus ei ole yhtä hyvä kuin metallien, mutta niiden muut ominaisuudet, kuten taipuisuus ja painoväriin formulaatio, tekevät niistä hyvän vaihtoehdon metallisille painoväreille. Orgaaniset materiaalit voidaan jakaa kahteen ryhmään: monomeereihin ja polymeereihin. Polymeerit ovat suurimmaksi osin johtavia elementtejä ja monomeerit puolijohteita. Hyvä esimerkki johtavasta polymeeristä on PEDOT/PSS (poly(3,4-etyleenidioksitiofeeni) polystyreenisulfonaatti). Yksinään PEDOT ei ole luontaisesti liukeneva, vaan se tarvitsee PSS:n muuttuakseen liukenevaksi. PEDOT/PSS:a voi kutsua vakaaksi johtavaksi polymeeriksi, joka tarjoaa kohtuullisen johtavuuden alhaisella hinnalla sekä matalan tuotantolämpötilan ja yhteensopivuuden vesipohjaisten liuottimien kanssa. Sen rajoituksena on kuitenkin sen luotettavuus, kun se altistuu valolle, lämmölle ja kosteudelle. [2, s. 60—62; 8.]

## Keraamiset materiaalit

Keraamisia materiaaleja ovat oksidikeramiikka ja hiilimateriaalit, kuten hiilinanoputket ja grafeeni. Sähköä johtavien oksidien valmistuksessa oksidit valmistetaan lisäämällä niihin seosainetta, joka vääristää joko kationin eli metalli-ionin tai anionin eli negatiivisen ionin ristikon (engl. lattice). Kaikista seostetuista materiaaleista ITO (indiumtinaoksidi) on paras valinta johtavaksi elektrodiksi. Sitä käytetään TFC:nä (läpinäkyvä johtava kalvo, engl. Transparent Conductive Film) erilaisissa näytöissä, aurinkokennoissa ja OLED-valaistuksessa erilaisilla painoalustoilla. ITO on yksi yleisimmin käytetyistä johtavista painoväreistä useimmissa sovelluksissa sen edullisuuden ansiosta, vaikka sen ominaisuudet eivät ole teknologialtaan parhaita. Se alkaa vähitellen menettää jalansijaansa muille vaihtoehdoille, jotka ovat kehittyneet ITO:a pidemmälle. [2, s. 62—63; 20.]

Hiilinanomateriaaleja ovat niin grafeeni ja hiilinanoputket kuin Canatun kehittämä Carbon NanoBudkin, joka on hiilinanoputken ja fullereenin hybridi ja yhdistää niiden parhaat ominaisuudet. NanoBudin ominaisuuksiin kuuluu säädettävä, erinomainen sähköinen johdettavuus, kestävyys, korkea lämpö- ja mekaaninen tasapaino sekä yksiseinäisen verkoston mahdollistama molekyylin taipuisuus, joka moniseinäisiltä ja jäykiltä nanoputkilta puuttuu. Hiilinanoputkien sattumanvaraiset verkostot ovat herättäneet kiinnostusta TCF-sovellusten valinnassa sen tasapainoisuuden ansiosta. Hiilinanoputket ovat ympäristön vaikutusten suhteen erittäin vakaita, ja niiden sähkönjohtavuus tekee niistä halutun materiaalin. Hiilinanoputkia on kahta sähköä johtavaa tyyppiä: metallijohteet ja puolijohteet,

ja niiden erottaminen toisistaan on olennaisen tärkeää. Yksiseinäiset hiilinanoputket ovat erinomaisia johteita, mutta niiden huonoina puolina on niiden korkea hinta verrattuna yksinkertaisemmin valmistettuihin hiilinanoputki- ja grafeenipainoväreihin ja hankaluus tuottaa erittäin läpinäkyvää ja johtavaa muovikalvoa, sillä se vaatii yhtenäisten pitkien hiilinanoputkien hajauttamisen kalvon alueelle. Grafeeni on kaksiulotteinen hiilen allotrooppi, ja se on hiilinanoputkien tapaan vakaa ympäristön vaikutusten suhteen. Sen sähkönjohtavuus on taulukon 1 mukaan hieman parempi kuin hiilinanoputkien. [2, s. 62, 64—67; 8; 21.]

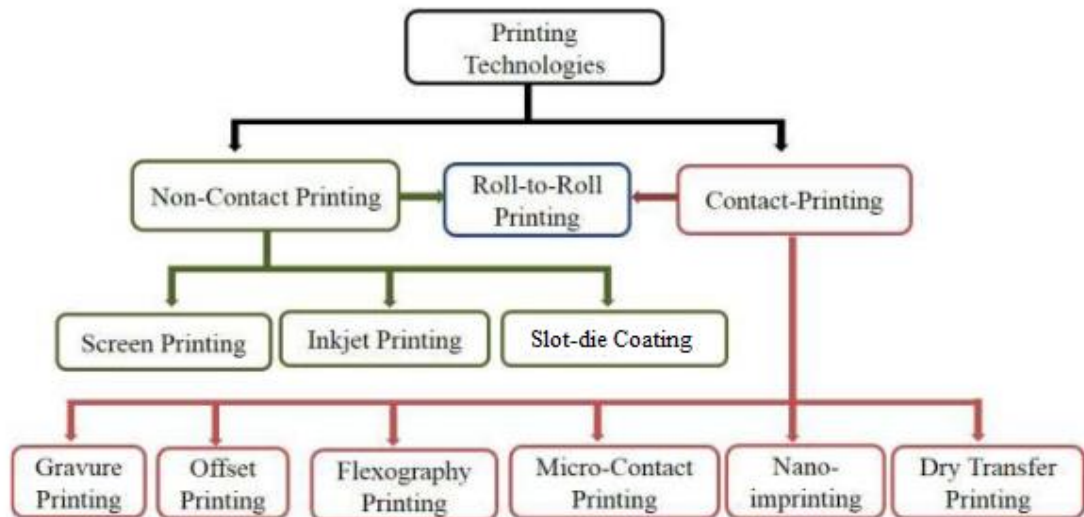
#### Tekstiileille sopivat painovärit

Tekstiilejä varten ovat tutkijat Cambridgen yliopistossa kehittäneet tekstiilien ominaisuuksille sopivia johtavia grafeenipainovärejä, joita voidaan painaa suoraan kankaalle ja luoda siihen integroitua piirejä, jotka kestävät venymistä, kuluttavat vähän energiaa ja säilyvät toimintakelpoisina jopa 20 pesukertaa tavallisessa pyykinpesukoneessa. Nämä painovärit ovat halpoja, turvallisia ja ympäristöystävällisiä, toisin kuin yleensä painetussa elektroniikassa käytettävät painovärit. [15.]



## 4 Painomenetelmät

Painetussa elektroniikassa painomenetelmän valintaan vaikuttaa sen yhteensopivuus painoväriin, painoalustan ja painokoneen välillä. Painomenetelmä vaikuttaa myös valmistettavan älytuotteen monimutkaisuuteen. Korkealaatuisia tuotteita saadaan valmistettua hitailla menetelmillä puhdastiloissa, mutta jos älytuotteen valmistuksessa korkeaa laatua tärkeämpää on nopeus ja valmistettujen tuotteiden määrä, kannattaa valita painatusnopeudeltaan nopeat painomenetelmät. [16; 24, s. 13.] Tärkeitä parametrejä painamiselle ovat tarkkuus ja resoluutio, painojäljen yhdenmukaisuus sekä kustutuksen hallinta ja rajapinnan muodostus [2, s. 1, 23]. Painomenetelmät voidaan jakaa kuvan 5 mukaan kontaktittomaan ja kontaktilliseen painamiseen.



Kuva 5. Yleisimpien painomenetelmien luokittelu [17, s.1].

### 4.1 Kontaktiton painaminen

#### Seripaino

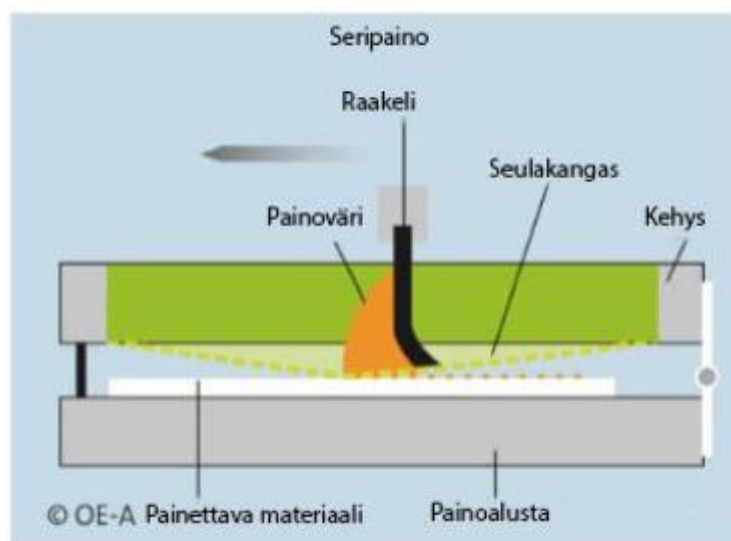
Elektroniikan valmistuksessa seripainaminen on ollut jo vuosia yksi suosituimmista ja pisimmälle kehitetyistä menetelmistä. Seripainon yksi huomattavimmista ominaisuuksista verrattuna muihin painomenetelmiin on sen suuri painosuhte. Se on nopea ja helposti mukautettava painomenetelmä, ja lisäksi se tekee tuotantoprosessista yksinkertaisen ja kustannustehokkaan. Sillä on mahdollista painaa muutamista mikrometreistä aina yli 100  $\mu\text{m}$ :n paksuisiin kuvioihin, riippuen tietenkin siitä kuinka paksua seulaa käytetään.

Kun verrataan seripainoa taulukossa 3 oleviin muihin painomenetelmiin voidaan huomata, että tyypillisten painokerrosten paksuudet ovat alle 5 µm paksuja. [2, s. 30—31; 17, s. 5.]

Taulukko 3. Painomenetelmien vertailua [17, s. 4].

Parameter	Gravure	Offset	Flexographic	Slot-die	Screen	Inkjet	Microcontact & Nanoimprint	Transfer
Print Resolution (µm)	50-200	20-50	30-80	200	30-100	15-100	1-20	4-50
Print Thickness (µm)	0.02-12	0.6-2	0.17-8	0.15-60	3-30	0.01-0.5	0.18-0.7	0.23-2.5
Printing Speed (m/min)	8-100	0.6-15	5-180	0.6-5	0.6-100	0.02-5	0.006-0.6	NA
Req. Solution Viscosity (Pa. S)	0.01-1.1	5 – 2	0.010-0.500	0.002-5	0.500–5	0.001-0.10	~ 0.10	NA
Solution Surface Tension (mN/m)	41- 44		13.9 -23	65-70	38-47	15-25	22-80	NA
Material Wastage	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No
Controlled Environment	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes
Experimental Approach	Contact	Contact	Contact	Contact-less	Contact	Contact-less	Contact	Contact
Process Mode (sample pattern line)	Multi-steps	Multi-Steps	Multi-steps	Single-Step	Multi-Steps	Single-Step	Multi-steps	Multi-Steps
R2R Compatibility	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Inter-mediate	Yes	No
Hard Mask Requirement for each Printing Step	No	No	No	No	Yes	No	No	Yes
Printing area	Large	Large	Large	Large	Medium	Large	Medium	Medium
References	[4, 31, 34, 73, 75, 79]	[31, 34, 80-82]	[31, 34, 75] [8, 83-85]	[86-90]	[31, 34, 91-94]	[31, 35, 95-97][74][38, 98, 99]	[2, 7, 100-106]	[37, 62, 107-111]

Seripainokoneita on kahta erilaista: tasokoneita ja rotaatiokoneita. Rotaatiokone toimii rullalta-rullalle-menetelmällä, ja se sopii paremmin jatkuvaan tuotantoon, kun taas tasokone sopii hyvin esimerkiksi pieniin painolaboratorioihin. Rotaatiokoneilla voidaan saavuttaa suhteellisen nopea tuotantonopeus, mutta sen huonoina puolina ovat kalliit seulat, joiden puhdistus on erittäin vaikeaa. Seripainossa kuvio muodostetaan painokaaviolla, joka kiinnitetään seulakankaaseen. Seulakankaan päälle kaadetaan painoväriä, ja kumi- raakeli levittää painoväriä niin, että haluttu määrä väriä puristuu seulakankaan läpi painettavalle materiaalille (kuva 6). [17, s. 5; 23, s. 88; 25.]



Kuva 6. Seripainotekniikka [23, s. 17].

Seripainon painolaatuun vaikuttavat mm. painovärin viskositeetti eli virtausominaisuudet, painonopeus ja -kulma, raakelin geometrinen muoto sekä seulakankaan irtoaminen painoalustasta. Seripainossa painovärin virtausominaisuuksien täytyy olla juuri sopivat, jotta se siirtyy kunnolla seulakankaan läpi painoalustalle, mikä voi olla lähes mitä tahansa materiaalia. Seripaino on yleensä yhteensopiva korkean viskositeetin painoväreille, sillä alhaisen viskositeetin painovärit vain valuisivat suoraan seulakankaan lävitse. Seripainomenetelmän haasteena painetussa elektroniikassa on sen resoluutio, joka on 30—100 µm (taulukko 3) ja menetelmän vaatima korkeaviskootin painoväri. Seripainoväri-ssä olevat sideaineet eivät välttämättä poistu kuivauksen aikana, ja ne estävät painetun pinnan johtavuuden ja painetusta pinnasta tulee painoalustaa resistiivisempää. [17, s. 6; 23, s. 91, 13.]

### Mustesuihku

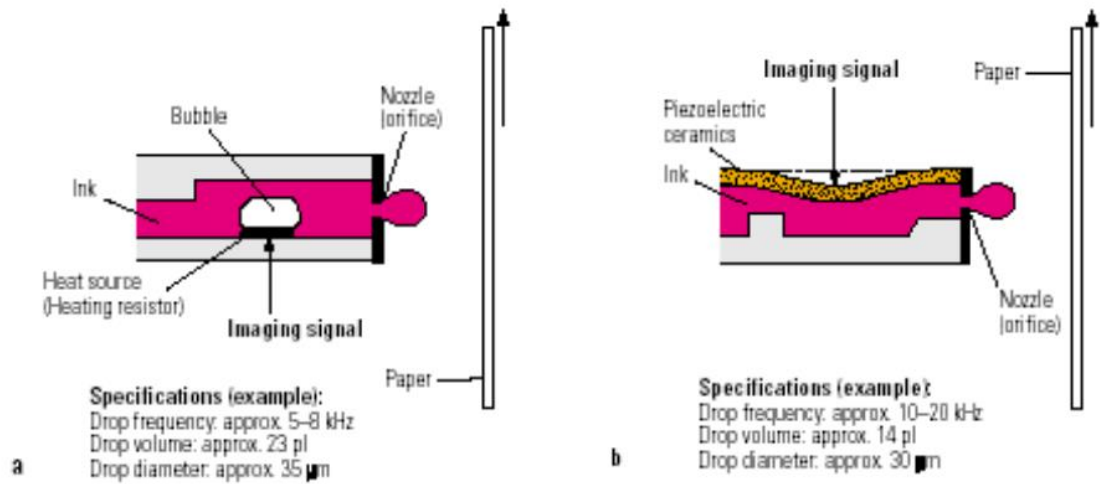
Mustesuihkutulostimia on kahta eri tyyppiä: jatkuvasyötteisiä (engl. Continuous Stream) ja DoD-tulostimia eli pisara kerrallaan tulostavia (engl. Drop-on-Demand). Jatkuvasyötteisten tulostimien laatu on keskiluokkaa, mutta niiden tulostusnopeus on erittäin nopea, kun taas DoD-tyyppiset tulostimet tarjoavat korkealaatuisen painojäljen vähän hitaamalla tulostusnopeudella. Mustesuihulla on mahdollista valmistaa erittäin tarkkoja kuvioita. Taulukosta 3 nähdään, että sen resoluutio on parhaimmillaan 15 µm, mutta sen vaihteluväli on 85 µm. [28.]

Huomattavimmat tekniikat mustesuihkutulostuksessa ovat

- lämpömustesuihkujärjestelmä
- pietsosähköinen mustesuihkujärjestelmä
- elektrostaattinen mustesuihkujärjestelmä
- EHD (elektrohydrodynaaminen, engl. Electrohydrodynamic) mustesuihkujärjestelmä.

Lämpö- ja pietsosähköinen mustesuihkutulostus ovat molemmat DoD-tyyppisiä mustesuihkutekniikoita. Lämpötulostuksessa painoväritippa muodostuu, kun suutin saa kuvantamissignaalin, jolloin lämmitysvastus luo kuplan suuttimen sisälle ja samalla kuplan kokoinen tippa painoväriä tippuu painoalustalle (kuva 7 a).

Pietsosähköisessä tulostuksessa painoväritippa saadaan ulos suuttimesta pietsosähköisellä keraamisella levyllä, joka kuvantamissignaalin saadessaan taipuu sen verran, että tippa putoaa suuttimesta painoalustalle (kuva 7 b). [2, s. 32—35; 28.]



Kuva 7. a) Lämpö- ja b) pietsosähköinen DoD-mustesuihkutekniikka [28].

EHD-tulostuksessa painoväri suihkutetaan luomalla korkea sähkökenttä suuttimen ja vastaelektrodin välille. Tärkein vaatimus EHD-mustesuihkujärjestelmässä on vakaa kartion muotoinen suutin. EHD-tekniikka on otettu onnistuneesti käyttöön elektronisten laitteiden valmistuksessa. [17, s. 7—9.]

Elektrostaattinen tulostus kuuluu myös DoD-tekniikoihin, ja sillä on mahdollista saada aikaan erittäin tarkkaa painojälkeä. Siinä yleisimmin käytetty painoväri on korkeaviskootista. Elektrostaattisessa tulostuksessa suuttimen ja painoalustan välissä olevassa elektrostaattisessa kentässä on kineettistä energiaa, joka saa painoväritipan liikkeelle. Koska elektrostaattinen kenttä vetää painoväritippaa puoleensa, painoväri muodostaa suuttimen päähän kartion. Tämän kartion ansiosta korkeaviskoottisella painovärillä on mahdollista muodostaa erittäin pieni tippa ilman, että suuttimen aukko vaikuttaisi tipan koon. Tällä tekniikalla on mahdollista luoda viivoja, joiden leveys on pienempi kuin 1 μm, vaikka suuttimen aukon halkaisija olisi välillä 20—100 μm. [2, s. 41.]

## Slot-die-pinnoitus

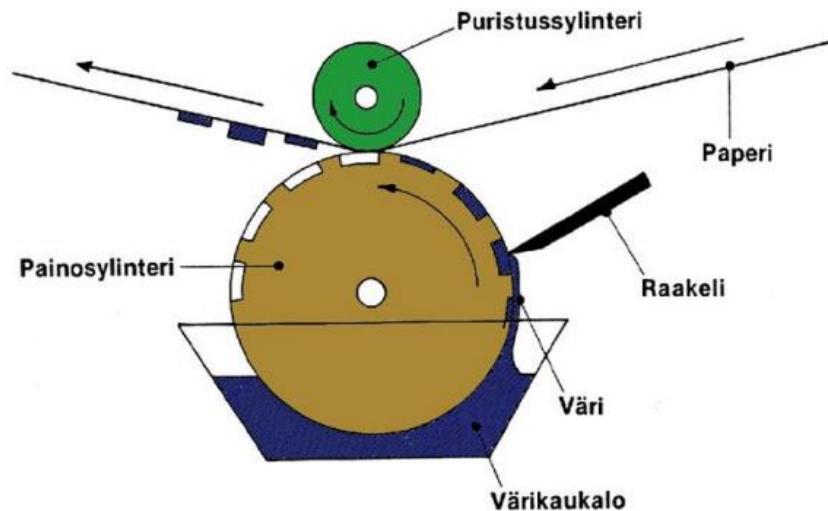
Slot-die-pinnoituksessa painoalusta pinnoitetaan annostelemalla painoväriä (pinnoitusainetta). Slot-die-prosessi on mahdollista jakaa kahteen vaiheeseen: ensimmäisessä vaiheessa saadaan aikaan yhtenäinen virtaus painoväriä, ja toisessa vaiheessa säädetään käyttömuuttujien, kuten slot-dien ja painoalustan, välistä loittonemaa sekä painoalustan nopeutta. Slot-die-pinnoituksessa painoalusta kiinnitetään pyörivään sylinteriin ja painoväriä kaadetaan sylinterin yläpuolella olevasta suuttimesta. [17, s. 9.]

Tekniikka sopii hyvin suurille pinnoille, mutta korkearesoluutioisten kuvioiden valmistaminen voi tällä tekniikalla osoittautua haasteelliseksi [17, s. 9]. Slot-die-pinnoituksella paras saavutettava resoluutio onkin 200 µm, mikä on muiden painomenetelmien resoluutioihin verrattuna erittäin huono (taulukko 3).

## 4.2 Kontaktipainaminen

### Syväpaino

Syväpaino on suurille painosmäärille tarkoitettu painomenetelmä, sillä sen painosylinterien valmistus on kallista ja monista eri vaiheista koostuvaa. Tämän takia syväpainon aloituskustannukset ovat korkeat. Syväpainossa käytettävä painoväri on matalaviskootista ja kaikki painettavat elementit ovat rasteroituja. Syväpainomenetelmässä painavat pinnat ovat kuparipintaisella painosylinterillä alempana kuin ei-painavat pinnat. Pyörivä painosylinteri kastetaan painoväriin värikaukalossa, minkä jälkeen raakeli pyyhkäisee ylimääräisen painovärin takaisin värikaukaloon. Painoväri siirretään painoalustalle puristustelan avulla (kuva 8). [25.]



Kuva 8. Syväpainomenetelmä [25].

Syväpainossa painosylinteriä on mahdollista korjailta levynvalmistuksen jälkeenkin, joko alueellisella lisäsyövytyksellä, joka kasvattaa rasterikupin kokoa, tai alueellisella hiomisella, lakkauksella tai kuparoinnilla kuppien koon pienentämiseksi. Syväpainomenetelmän hyviä puolia on sen painonopeus ja tasainen laatu. [25.]

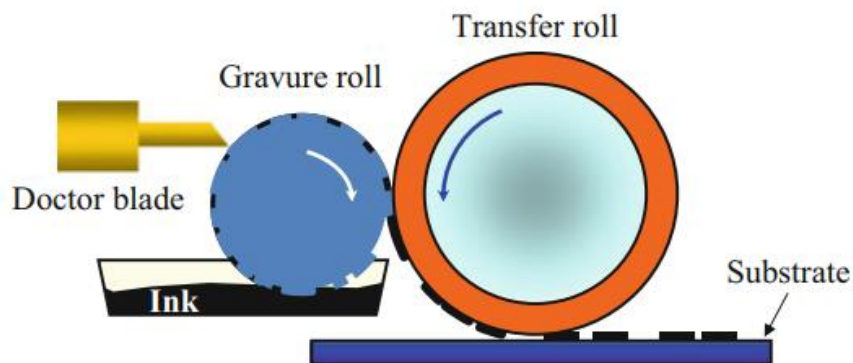
Painetussa elektroniikassa painon tarkkuus on avainasemassa, ja tästä syystä syväpaino ei välttämättä sovi eniten tarkkuutta vaativien painetun elektroniikan tuotteiden valmistukseen. Syväpainon resoluutio on välillä 50—200  $\mu\text{m}$  (taulukko 3). Syväpainon resoluutio vaihtelee siis eniten verrattuna muihin painomenetelmiin, eikä sillä ole mahdollista tuottaa erityisen tarkkaa painojälkeä rastereiden takia. Syväpainon käyttökohteita painetussa elektroniikassa voivat olla esimerkiksi OLED, suuritiheyksiset transistorit, piirit, aurinkokennot ja RFID:t [26, s. 33].

### Offsetpaino

Offsetpainomenetelmä perustuu öljyn ja veden toisiaan hylkivään ominaisuuteen, eli niiden pintajännitykset ovat toisistaan erilaiset. Offsetpainokoneet voivat olla arkkioffsetkoneita tai offsetrotaatiokoneita, ja käytettävä painoväri on korkeaviskootista. Painokoneessa voi olla yhdestä kymmeneen väriä ja yleisimpiä ovat 1-, 2- ja 4-värikoneet. Painolevyt pinnoitetaan valoherkällä kalvolla, ja levy valotetaan joko positiivi- tai negatiivifilmin avulla tai tulostamalla painokuvio suoraan levyille (CTP engl. Computer To Plate) Offsetpainossa käytetään täysin tasaisia, yleensä alumiinisia painolevyjä, joille levitetään

kostutusvettä, joka leviää ainoastaan ei-painaville pinnoille. Seuraavaksi painolevyille levitetään öljypohjainen painoväri, ja se leviää ainoastaan painaville pinnoille. Painoväri siirretään kumisylinlerin avulla painoalustalle (kuva 9). [25.]

Sivulla 14 olevasta taulukosta 3 nähdään, että offsetpainon resoluutio on 20—50  $\mu\text{m}$ . Verrattuna muihin perinteisiin painomenetelmiin offsetpainon tarkkuus vaihtelee vähiten, sillä sen resoluution vaihteluväli on noin 30  $\mu\text{m}$ . Offsetpainolla voidaan valmistaa esimerkiksi aurinkokennoja, vastuksia, antureita, RFID:tä ja monia muita painetun elektronikan tuotteita [17, s. 11].



Kuva 9. Offsetpainomenetelmä [2, s. 37].

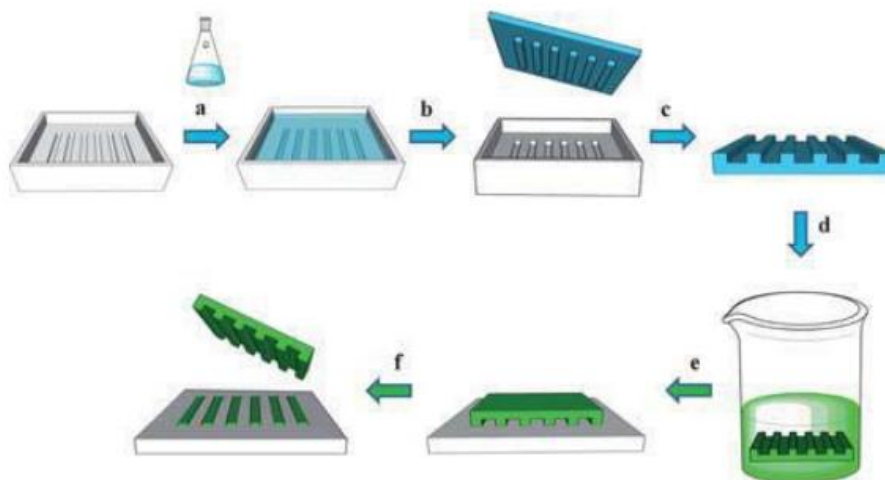
### Fleksopaino

Fleksopaino on kohopainomenetelmä, joka eroaa muista perinteisistä painomenetelmistä siinä käytettävien joustavien painolevyjen tai -laattojen vuoksi. Joustava painolevy mahdollistaa painamisen niin sileälle kuin karheallekin pinnalle ja sekä päällystetylle että päällystämättömälle pinnalle. Koska fleksopaino on kohopainomenetelmä, siinä painava pinta on painolevyssä korkeammalla kuin ei-painava pinta, ja se soveltuu esimerkiksi papereiden, kartonkien, aaltopahvin ja muovin painamiseen. Käytettävä painoväri on matalaviskootista eli juoksevaa, mikä tarkoittaa mahdollisuutta käyttää vesipohjaisia painovärejä sekä pienemmän nippipuristuksen riittävyttä painokuvion toistamiseen. Liian suuri nippipuristus aiheuttaa painovärin leviämisen yli painokuvion reunojen. [25.]

Kun fleksopainon resoluutiota verrataan muihin perinteisiin painomenetelmiin (taulukko 3) voidaan huomata, että sen resoluutio on parhaimmillaan samalla tasolla seripainon kassa eli 30  $\mu\text{m}$ . Fleksopainon resoluution vaihteluväli on kuitenkin pienempi, noin 50  $\mu\text{m}$ , ja sen resoluutio on heikoimmillaan 80  $\mu\text{m}$ , kun seripainon resoluutio oli heikoimmillaan 100  $\mu\text{m}$ . Fleksopainolla on valtava potentiaali rullalta-rullalle-menetelmänä tuottaa erilaisia painetun elektronikan tuotteita, kuten taipuisia näyttöjä, bio-antureita, kertakäyttöistä elektroniikkaa sekä älytekstiilejä. [17, s. 4; 27.]

### Mikrokontaktipaino

Mikrokontaktipaino ( $\mu\text{CP}$ , engl. Microcontact Printing) tunnetaan myös pehmeänä litografiana, sillä se imitoi fotolitografiaa. Sillä voidaan valmistaa 2-ulotteisia kuvioita käyttämällä kuvioitua leimasinta. Kuvasta 10 nähdään mikrokontaktipainomenetelmän painoprosessi. Ensimmäisessä vaiheessa esipolymeeriä kaadetaan fotolitografiseen muottiin, minkä jälkeen se kovetetaan, ja sitten siitä saadaan kuorimalla elastomeerinen leimasin. Yleisimmin käytetty elastomeeri on PDMS (polydimetyylisiloksaani), koska sillä on huomattavasti paremmat ominaisuudet kuin muilla elastomeereillä. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa helposti irtoavuus, useiden käyttökertojen kestävyys ja alhainen vapaa pintaenergia. Leimasinta leikataan pienempiin osiin, minkä jälkeen se upotetaan painoväriin. Painaminen tehdään asettamalla leimasin sopivalle painoalustalle. Leimasimen käyttöä pitää hallita tarkasti, ja se täytyy suunnata mikrometrin tarkkuudella oikein. Se vaatii myös pintaenergioiden tarkan säätelyn, jotta painoväri jää oikealla tavalla painoalustaan kiinni. Haasteita tämä painomenetelmä aiheuttaa, kun leimasin epämuodostuu, kuviot sotkeutuvat ja leimasin pitää irrottaa muotista. [2, s. 40—41; 17, s. 12.]



Kuva 10. Mikrokontaktipainomenetelmä [17, s. 12].



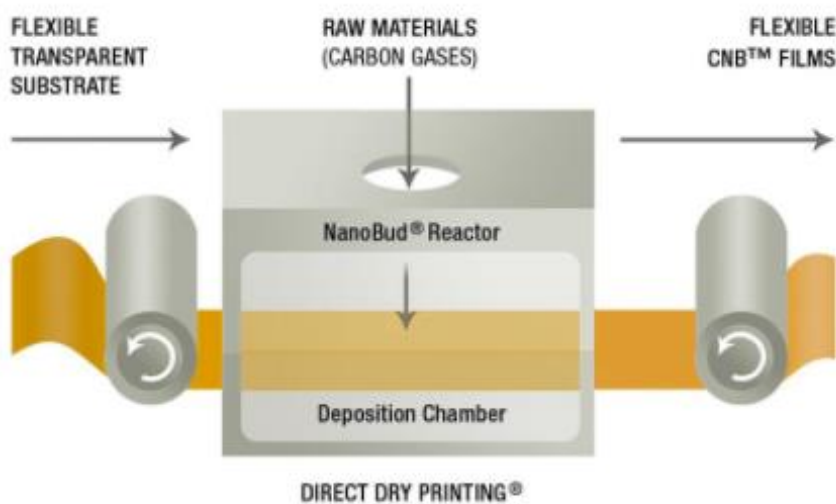
## Nanopainatus

Nanopainatuksen (NI, engl. nanoimprint) tarkoituksena on tuottaa mikronia (1  $\mu\text{m}$ ) pienempiä kuvioita. Sitä käytetään kiintolevyjen massatuotannossa. Menetelmä koostuu muotista, jonka pinnalla on nanoluokan kuvioituja rakenteita, jotka puristetaan valokseen hallitussa lämpötilassa ja paineessa. Puristuksen seurauksena valokseen on luotu paksuuskontrasti. Muotin ulokkeiden alle jätetään tarkoituksella ohut kerros polymeeristä materiaalia, joka toimii pehmikkeenä kovan muotin iskua vastaan ja samalla suojaa herkästi rikkoutuvaa muotin pinnalla olevaa nanoluokan kuviota. Muotti on yleensä valmistettu kvartsista tai piioksidista käyttämällä elektronisuihkulitografiaa (EBL, engl. Electron Beam Lithography). Nanopainatuksen hyötyjä ovat nanorakenteiden monistaminen laajoilla alueilla, käytettävät materiaalit ovat halpoja ja sen yhteensopivuus edullisten prosessien kanssa. Haasteita nanopainatukseen luo polymeerimateriaalien mekaaninen muovaus. [17, s. 13.]

Kuten näiden kahden painotekniikan nimistä (mikrokontaktipaino ja nanopainatus) voi päätellä, ne ovat erittäin tarkkoja painomenetelmiä ja ilmeisesti niiden tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, sillä sivulla 14 olevassa taulukossa 3 molemmat painomenetelmät on laitettu samaan sarakkeeseen. Niin mikrokontaktipainon kuin nanopainatuksenkin resoluutiot ovat välillä 1—20  $\mu\text{m}$ . [17, s. 4.]

## Canatun Direct Dry Printing

Canatun kehittämä ohutkalvon valmistusmenetelmä Direct Dry Printing (DDP, suora kuivapaino) yhdistää tavallisesti kolme eri vaihetta yhdeksi tuotantovaiheeksi (kuva 11). Ensimmäinen vaihe on synteesiprosessi, joka johtaa hiilinanomateriaalimolekyylit aerosolivirtaan. Toinen vaihe on suorapainatus, ja kolmas vaihe on nanomateriaalikalvojen karkea kuviointi. Nanomateriaalikalvot voidaan suorakuvioida melkein mille tahansa painoalustalle normaalissa huoneenlämmössä ja paineessa, minkä ansiosta tuotantoprosessi on edullinen, yksinkertainen ja skaalattava. Canatu käyttää DDP-menetelmässä niin arkki- kuin rullalta-rullalle-tekniikoita. [22.]



Kuva 11. DDP:n valmistusmenetelmä [22].

## 5 Jälkikäsittely

Painon jälkeen painetut tuotteet pitää kuivata tai kovettaa, erityisesti siinä tapauksessa, että tuote tarvitsee useita painokertoja. Kuivaus voidaan suorittaa joko uunissa tai erilaisilla kuivaimilla. Painetun elektroniikan painoväreillä on muitakin vaatimuksia kuin kuivaus. Esimerkiksi monet metalliset ja orgaanittomat painovärit tarvitsevat korkeita lämpötiloja tiivistymiseksi tai kristallisoitumiseksi, jotta ne saavat niille halutut ominaisuudet. Korkeat lämpötilat saattavat kuitenkin vahingoittaa erityisesti useimpia muovisia painoalustoja, joten hyvänä vaihtoehtona uunikuivaukselle ovat laser-, salamavalon-, mikroaalto- ja UV-kuivaukset, plasmakäsittely sekä sähkösintraus. [2, s. 44.]

Laserkuivausta käytetään painetussa elektroniikassa painettujen painovärien kovettamisessa tai sintrauksessa. Laserin lämpöenergiaa hyväksi käyttäen säteilytetyt kuviot kuumenevat hetkeksi. Säättämällä laserin säteen kokoa ja voimakkuutta voidaan saada kuvioitua usean mikrometrin levyinen alue lämpöherkällä substraatilla. [2, s. 44.]

Salamavalokuivaus käyttää voimakasta valosäteilyä kuivattaviin kohteisiin, jotka ovat lämpöherkän substraatin päällä. Suodatettua Xe-lamppua käyttäen valo voidaan kohdistaa ainoastaan painoväriä kuumentavaksi. Näin painoalusta ei kärsi valosta johtuvia vaurioita. Salamavalokuivauksen hyötyjä ovat kerralla laaja-alainen kuivaus, lyhyt käsittelyaika ja se, että se ei vaadi ympäristöltään tarkasti määrättyjä olosuhteita. [2, s. 44—45.]

Mikroaaltokuivaus on tehokas keino metallisten ja epäorgaanisten materiaalien sintrauksessa. Se parantaa materiaalin johtavuutta, kun materiaalia on sintrattu 100 sekuntia, ja melkein saturoi materiaalin pinnan, jos 100 sekuntia ylitetään. Hopean käsittely mikroaaltokuivauksella tekee siitä noin 20 kertaa johtavampaa kuin käsittelemätön hopea. Muihin kuivausmenetelmiin verrattuna mikroaaltokuivauksen etuina ovat sen lyhyt käsittelyaika ja materiaalin johtavuuden paraneminen. [2, s. 47.]

UV-kuivauksella on paljon hyviä puolia painetun elektroniikan kannalta, kuten infrapunan puuttuminen sen valospektristä, tasainen säteilytys koko valotuksen alueelta, edullinen hinta, pitkäikäisyys sekä vähäinen energiankulutus. UV-kuivaus saattaa kuitenkin vahingoittaa muovikalvoja. Plasmakäsittely on valikoiva sintrausmenetelmä metallisille painoväreille, ja se käyttää matalapaineista argonplasmaa. Mitä kauemmin plasmakäsittelyä

tehdään, sitä enemmän materiaalin resistiivisyys laskee, ja hopean kohdalla lopullinen johtavuus voi olla noin kolme kertaa parempi kuin käsittelemättömän hopean. [2, s. 46—47.]

Sähkösintrauksessa painettu materiaali sintrataan syöttämällä jännitettä materiaalin lävitse, mikä johtaa hajoamisen aiheuttamaan alueelliseen lämpenemiseen. Sähkösintrauksella on mahdollista parantaa paperille painettujen johdosten johtavuutta satkertaisesti verrattuna uunikuivaukseen. Sähkösintraus mahdollistaa erittäin lyhyet käsittelyajat: muutokset voivat tapahtua jopa 2 mikrosekunnissa. Sähkösintrauksen etuja ovat siis painoalustan vähäinen lämpeneminen, lyhyt käsittelyaika ja ennalta määritellyn johtavuuden saavuttaminen. [29.]

## 6 Tulevaisuudennäkymiä

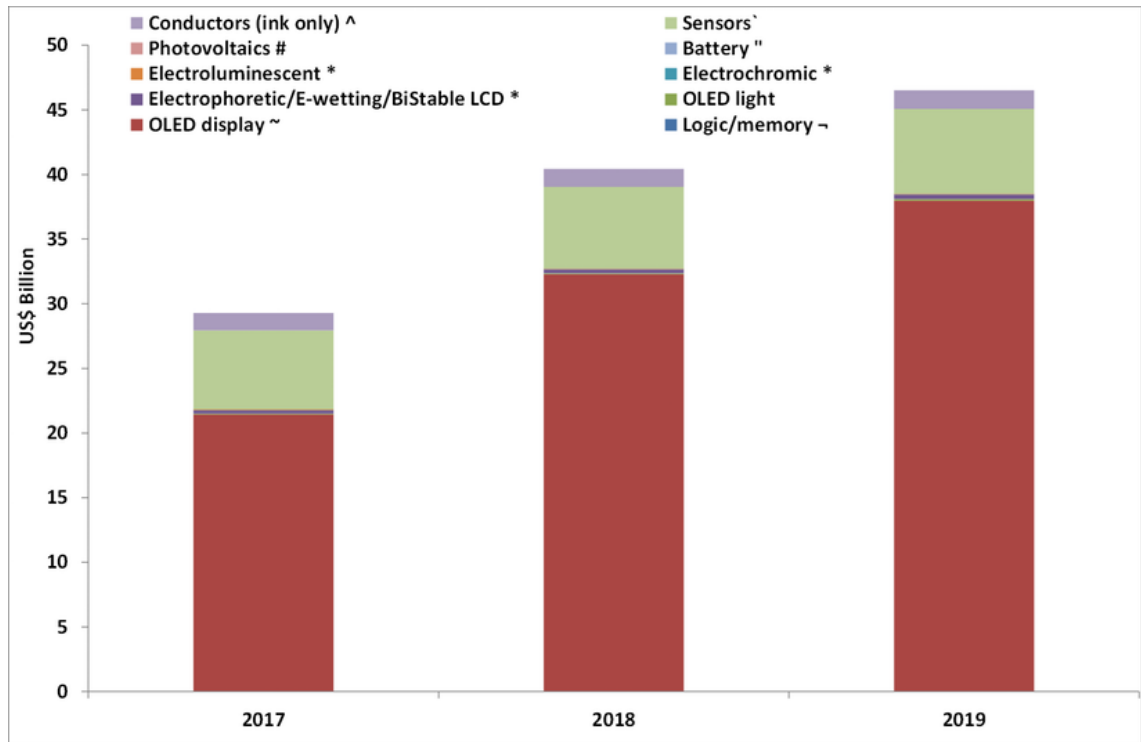
Painettu elektroniikka lisääntyy koko ajan, ja varsinkin Suomessa sillä on erittäin valoisa tulevaisuus, sillä korkeakouluista ympäri maata valmistuu jatkuvasti uusia osaajia alalle. Suomessa on myös viime vuosina perustettu paljon uusia painettuun elektroniikkaan keskittyviä yrityksiä, ja niihin sijoitetaan joka vuosi enemmän rahaa, kun sijoittajat alkavat nähdä selkeämmin tulevaisuuden, jota painettu elektroniikka lupaa. VTT:stä nousut Dispelix on kehittänyt massatuotantoon sopivan läpinäkyvän virtuaalinäytön, ja tämän vuoden (2018) aikana sen liikevaihdon arvioidaan nousevan 5–8 miljoonaan euroon viime vuoden 1 miljoonasta eurosta. [30.]

Viime vuonna Canon järjesti pakkausalan workshopin, jossa yhtenä puheenaiheena oli painettu elektroniikka. Suomen pakkausalan yritykset ovat jo vuosia kehittäneet erilaisia älypakkauksia. Tulevaisuudessa pakkauksien on tarkoitus pystyä välittämään tietoa tuotteesta ja sen tilasta, käytöstä ja sijainnista eri kohderyhmille. Pakkausalalla kehitetään myös tapoja kiinnittää kuluttajien huomio paremmin pakkaukseen erilaisilla monitahoisilla aistikokemuksilla. Pakkausten teknologinen kehitys ja uudet innovaatiot mahdollistavat lukemattomia kehitysmahdollisuuksia toiminnan tehostamisesta aina lisäarvon tuottamiseen. Rullalta-rullalle-painomenetelmillä älyä voidaan lisätä pakkauksiin kerroksittain. [31.]

Nykyään painettua elektroniikkaa valmistetaan vielä erillisessä tuotantoprosessissa, minkä jälkeen ne kiinnitetään pakkaukseen tarran tai etiketin muodossa, mutta tulevaisuudessa voi olla mahdollista saada kaikki toiminnallisuudet mukaan yhteen painoprosessiin. VTT:n tutkijan Antti Kemppaisen mukaan painettua elektroniikkaa aletaan hyödyntää ensin auto- ja lääketieteellisyydessä, sillä suurin osa markkinoilla olevista painetusta elektroniikasta on kemiallisia sensoreita, joilla voidaan mitata puhtautta, kosteutta, lämpötilaa ja erilaisia kaasuja. [31.]

Maailmanlaajuisesti katsottuna painetun elektroniikan trendi on samanlaista kuin Suomessaakin: se kasvaa koko ajan, mutta suuremmassa mittaluokassa. IDTechExin tekemässä raportissa arvioidaan painetun, taipuisan ja orgaanisen elektroniikan markkinakoon kasvavan vuoden 2017 kokonaismarkkinasta, 29 miljardista Yhdysvaltain dollarista, 73 miljardiin Yhdysvaltain dollariin vuoteen 2027 mennessä. IDTechEx arvioi, että vuoteen 2019 mennessä painetun elektroniikan kokonaismarkkina on kasvanut noin 45

miljardiin Yhdysvaltain dollariin (kuva 12). Suurin markkinaosuus kuuluu OLED:lle ja joh-  
taville painoväreille, mutta vaikka venytettävällä elektroniikalla, logiikalla ja muistilla ja  
ohutkalvosensoreilla on vielä pienet markkinaosuudet alalla, niillä on erinomaiset mah-  
dollisuudet kasvaa huomattavasti suuremmiksi. [32.]



Kuva 12. Arvio eri painetun elektroniikan osa-alueiden markkinaosuuksista Yhdysvaltain dolla-  
rilla mitattuna [32].

## 7 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli tutkia, mitä kaikkea pitää ottaa huomioon, kun valmistetaan painettua elektroniikkaa. Työssä vertailtiin painetussa elektroniikassa käytettyjä materiaaleja, painomenetelmiä ja jälkikäsittelytekniikoita toisiinsa niiden eri ominaisuuksien osalta.

Painettua elektroniikkaa on ollut olemassa jo kauan. Painomenetelmien käyttöä elektronisten tuotteiden valmistuksessa alettiin tutkia jo 1900-luvun vaihteessa, ja siitä lähtien on painamisen mahdollisuuksia tutkittu ympäri maailmaa. Alun perin tutkittiin piirien ja johdotusten valmistamista painamalla. Ajan saatossa myös televisioiden kuvaputkia valmistettiin painamalla, ja nykyään painamalla voidaan valmistaa lukuisia erilaisia elektronisia tuotteita, kuten älyvaatteita, taipuisia näyttöjä ja aurinkokennoja.

Insinööriyössä määriteltiin tärkeimmiksi painoalustojen valintaan vaikuttaviksi ominaisuuksiksi materiaalin taipuisuus, pinnan sileys, paksuus ja paino sekä alhainen opasiteetti. Kuumuuden kesto, vähäinen lämpölaajeneminen sekä resistiivisyys ovat myös tärkeitä ominaisuuksia painoalustaa valittaessa. Painetussa elektroniikassa käytettyjä painoalustoja ovat erilaiset muovikalvot, paperi, lasi ja metallit, joista suosituimpia ovat muovikalvot, sillä ne ovat ominaisuuksiltaan kaikkein lähinnä sitä, mitä painetun elektroniikan tuotteilta yleensä toivotaan.

Painetussa elektroniikassa elektronisten tuotteiden johdotukset tehdään käyttämällä johtavia painovärejä, joiden halutuimpia ominaisuuksia ovat erinomainen sähkön johtavuus, taipuisuus sekä alhainen tuotantolämpötila. Johtavat painovärit on mahdollista jakaa kolmeen kategoriaan: jalometalleihin, orgaanisiin materiaaleihin sekä keraamisiin materiaaleihin. Insinööriyötä tehdessä selvisi myös, että materiaalien muuttaminen nanopartikkeleiksi parantaa niiden sähkönjohtavuutta. Painoväreissä eniten käytettyjä jalometalleja ovat hopea, kupari ja kulta, joista hopean sähkönjohtavuus on paras. Orgaanisissa painoväreissä käytetään monomeerejä ja polymeerejä. Niiden sähköjohtavuudet eivät ylety metallien tasolle, mutta niiden taipuisuus ja edullisuus tekevät niistä hyvän vaihtoehdon metallisille painoväreille. PEDOT/PSS-polymeeri on käytetyin orgaaninen painovärimateriaali.

Keraamisia materiaaleja ovat oksidikeramiikka sekä hiilimateriaalit, kuten hiilinanoputket ja grafeeni. Oksidikeraamisista materiaaleista ITO on kaikkein käytetyin johtava elektrodi sen edullisuuden vuoksi, mutta se on alkanut menettää jalansijaansa muille, pidemmälle kehitetyille vaihtoehdoille. Hiilinanomateriaalit ja grafeeni ovat vakaita ympäristön vaikutusten suhteen, ja niiden taipuisuus ja sähköjohtavuudet ovat erinomaisia. Grafeenista on myös kehitetty johtavia painovärejä tekstiilien painatusta varten.

Painomenetelmän valintaan vaikuttaa painovärin, painoalustan ja painokoneen välinen yhteensopivuus. Älytuotteen laatuun vaikuttaa se, kuinka nopeaa painomenetelmää käytetään. Hitaammilla menetelmillä saadaan valmistettua korkealaatuisia tuotteita, ja nopeilla menetelmillä valmistetaan kerralla suuria määriä heikompileatuisia tuotteita. Painomenetelmät voidaan jakaa kontaktittomaan ja kontaktilliseen painamiseen. Kontaktittomia painomenetelmiä ovat seripaino, mustesuihkutulostus sekä slot-die-pinnoitus, ja kontaktillisia menetelmiä ovat syvä-, offset-, flekso-, mikrokontakti-, nano- sekä kuivasiirtopaino. Nopeista painomenetelmistä offsetpaino tarjoaa parhaan ja tasaisimman painolaadun, ja korkealaatuisista painomenetelmistä elektrostaattinen mustesuihkutulostus tarjoaa sekä korkealaatuisen painojäljen että myös mustesuihkutulostuksen nopeuden.

Painetussa elektroniikassa jälkikäsitteily tarkoittaa pääasiassa painettujen pintojen käsittelemistä erilaisilla kuivaimilla, joilla niitä kovetetaan ja sintrataan. Hyviä jälkikäsitteilyvaihtoehtoja ovat laser-, salamavallo-, mikroaalto- ja UV-kuivaimet, plasmakäsittely sekä sähkösintraus. Niiden tarjoamia hyviä ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi lyhyet käsittelyajat ja materiaalien johtavuuksien parantaminen. Menetelmän valintaan vaikuttaa pääasiassa painoalustan materiaali, sillä osa menetelmistä saattaa vahingoittaa valittua painoalustaa.

Insinööriyön tutkimuskysymyksenä oli, *mitä kaikkea pitää ottaa huomioon, kun valmistetaan painettua elektroniikkaa*, ja vastauksena kysymykseen saatiin selville, että kaikki, mitä projektissa täytyy ottaa huomioon, määräytyy valmistettavan älytuotteen perusteella. Ensimmäiseksi valitaan sopivat materiaalit eli painoalusta ja johtava painoväri. Pitää miettiä, mitkä ominaisuudet ovat tärkeitä tuotteelle – halutaanko esimerkiksi, että se on läpinäkyvä, kuinka taipuisa sen pitää olla ja valmistetaanko tuotetta, jonka on tarkoitus olla kestävä vai onko tuotteen tarkoitus säilyä käyttökelpoisena vain hetken. Painomenetelmän valinta riippuu sekä itse tuotteesta että myös valituista materiaaleista. Painomenetelmää valittaessa pitää miettiä, kuinka tärkeää painojäljen tarkkuus on valmistettavalle tuotteelle verrattuna painonopeuteen. Tärkeää on myös selvittää, ovatko



valitut painomateriaalit yhteensopivia painomenetelmän kanssa. Lopuksi jälkikäsittelytekniikan valinnassa halutaan parantaa johdosten sähkönjohtavuutta mahdollisimman paljon ilman, että painoalusta kärsii vahinkoa valitun tekniikan vuoksi.

## Lähteet

- 1 What is Printed Electronics? 2017. Verkkodokumentti. Pannam Imaging. <<https://www.pannam.com/blog/what-is-printed-electronics/>>. Päivitetty 31.5.2017. Luettu 10.9.2017
- 2 Suganuma, Katsuaki. 2014. Introduction to Printed Electronics. New York. Springer.
- 3 The Circuit Centennial. 2009. Verkkodokumentti. ET-Trends. <[http://www.et-trends.com/files/Circuits\\_100Years.pdf](http://www.et-trends.com/files/Circuits_100Years.pdf)>. Päivitetty 25.9.2009. Luettu 16.9.2017.
- 4 Kappaun, Stefan. 2012. Printed Electronics: Inks and the Technical Challenges. Verkkodokumentti. Printing News. <<http://www.printingnews.com/article/10565756/printed-electronics-inks-and-the-technical-challenges>>. Päivitetty 16.1.2012. Luettu 11.9.2017.
- 5 Neuvo, Yrjö & Ylönen, Sami. 2009. Bit Bang Rays to the Future. Helsinki. Helsinki University of Technology.
- 6 Kopola, Harri. 2007. Technologies, innovations and new business opportunities in printed intelligence. Verkkodokumentti. VTT. <[http://www.vtt.fi/proj/cpi/files/Kopola\\_plenary\\_\\_PlasticElectronics.pdf](http://www.vtt.fi/proj/cpi/files/Kopola_plenary__PlasticElectronics.pdf)>. Luettu 16.9.2017.
- 7 Introduction to Printed Electronics. 2012. Verkkodokumentti. CPI. <<http://www.bossfederation.com/stream.asp?stream=true&eid=8627&node=98&cchcheck=207CC4448E492F015A2279250328E6A4>>. Päivitetty 3/2012. Luettu 16.9.2017.
- 8 Secor, Ethan & Hersam, Mark. 2015. Graphene Inks for Printed Electronics. Verkkodokumentti. Sigma-Aldrich. <<https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/technology-spotlights/graphene-inks-for-printed-electronics.html>>. Luettu 17.9.2017.
- 9 ITO Coated PEN Film. 2017. Verkkodokumentti. Diamond Coatings Ltd. <<http://www.diamondcoatings.co.uk/ito-coated-pen-film/>>. Luettu 25.9.2017.
- 10 Caledon Controls announces a new transparent conductor alternative to ITO. 2011. Verkkodokumentti. OLED-info. <<https://www.oled-info.com/caledon-control-announces-new-non%E2%80%93printed-clear-conductor-alternative-ito>>. Päivitetty 5.1.2011. Luettu 25.9.2017.
- 11 Thin Glass, Microsheets, & Display Glass. 2017. Verkkodokumentti. PGO. <[https://www.pgo-online.com/intl/thin-glass.html](http://www.pgo-online.com/intl/thin-glass.html)>. Luettu 25.9.2017.

- 12 Sprengard, Rüdiger. 2017. Printed electronics. Verkkodokumentti. Schott. <<http://www.schott.com/innovation/en/printed-electronics/>>. Päivitetty 25.1.2017. Luettu 30.9.2017.
- 13 Ultra-Thin Glass. 2017. Verkkodokumentti. Schott. <[http://www.us.schott.com/advanced\\_optics/english/products/wafers-and-thin-glass/glass-wafer-and-substrates/ultra-thin-glass/index.html](http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/products/wafers-and-thin-glass/glass-wafer-and-substrates/ultra-thin-glass/index.html)>. Luettu 25.9.2017.
- 14 What is Passivation? 2017. Verkkodokumentti. Best Technology. <<https://www.besttechnologyinc.com/passivation-systems/what-is-passivation/>>. Päivitetty 30.9.2017. Luettu 30.9.2017.
- 15 Fully integrated circuits printed directly onto fabric. 2017. Verkkodokumentti. Printed Electronics World. <<https://www.printedelectronicsworld.com/articles/13117/fully-integrated-circuits-printed-directly-onto-fabric>>. Päivitetty 9.11.2017. Luettu 11.12.2017.
- 16 Kawaguchi, Yuki, Arakawa, Ryuichi & Kawasaki, Hideya. 2016. Formate-Free Metal-Organic Decomposition Inks of Copper Particles and Self-Reductive Copper Complex for the Fabrication of Conductive Copper Films. Verkkodokumentti. Lifescience Global. <<http://www.lifescienceglobal.com/pms/index.php/jcst/article/download/4135/2396>>. Päivitetty 2016. Luettu 12.12.2017.
- 17 Khan, Saleem, Lorenzelli, Leandro & Dahiya, Ravinder. 2015. Technologies for Printed Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. Verkkodokumentti. IEEE. <<https://cris.fbk.eu/retrieve/handle/11582/300858/7712/Technologies%20for%20Printing%20Sensors%20and%20Electronics%20Over%20Large%20Flexible%20Substrates-A%20Review.pdf>>. Päivitetty 22.10.2015. Luettu 2.10.2017.
- 18 Palavesam, Nagarajan, Marin, Sonja, Hemmetzberger, Dieter, Landesberger, Christof, Bock, Karlheinz & Kutter Christoph. 2018. Roll-to-roll processing of film substrates for hybrid integrated flexible electronics. Verkkodokumentti. Flexible and Printed Electronics. <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-8585/aaaa04/pdf>>. Päivitetty 21.2.2018. Luettu 5.3.2018.
- 19 Vacuum Printing Encapsulation System (VPES). 2017. Verkkodokumentti. Sanyu Rec. <<http://www.sanyu-rec.jp/en/product/semiconductor/entry/383.html>>. Päivitetty 16.9.2017. Luettu 16.9.2017.
- 20 Relative Permittivity & Dielectric Constant. 2017. Verkkodokumentti. Adrio Communications. <<http://www.radio-electronics.com/info/formulae/capacitance/capacitors-dielectric-constant-permittivity.php>>. Päivitetty 20.10.2017. Luettu 20.10.2017.
- 21 ITO and its alternatives: major decisions loom large. 2018. Verkkodokumentti. Printed Electronics World. <<https://www.printedelectronicsworld.com/articles/13510/ito-and-its-alternatives-major-decisions-loom-large>>. Päivitetty 24.1.2018. Luettu 10.3.2018.

- 22 Unique technology. 2016. Verkkodokumentti. Canatu Oy. <<https://canatu.com/technology/#directdryprinting>>. Päivitetty 19.1.2016. Luettu 19.1.2016.
- 23 Viluksela, Pentti, Ristimäki, Seija & Spännäri, Toni. 2010. Painoviestinnän tekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- 24 Bollström, Roger. 2013. Paper for printed electronica and functionality. Doctoral thesis. Åbo Akademi.
- 25 Nieppola, Merja. 2014. Painotekniikka. Kurssimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 26 Serenius, Eric. 2011. Printed Electronics and Gravure. Verkkodokumentti. Tappi. <<http://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/696.632%20A.pdf>>. Luettu 10.3.2018.
- 27 Flexo printing has a future in printed electronics. 2016. Verkkodokumentti. Flexo Gravure Global. <<https://flexo-gravure.com/flexo-gravure-global/flexo-printing-has-a-future-in-printed-electronics/>>. Päivitetty 25.1.2016. Luettu 15.3.2018.
- 28 Viluksela, Pentti. 2015. Digitaaliset tulostustekniikat. Kurssimateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 29 Allen, Mark. 2008. Nanotechnology. Verkkodokumentti. IOP. <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/19/17/175201/meta>>. Päivitetty 25.3.2008. Luettu 15.4.2018.
- 30 Keränen, Matti. 2017. Suomalainen elektroniikkateollisuus herää taas henkiin – lukuisia lupaavia yrityksiä. Verkkodokumentti. Tekniikka & Talous. <<https://www.tekniikkatalous.fi/ttpaiva/suomalainen-elektroniikkateollisuus-heraa-taas-henkiin-lukuisia-lupaavia-yrityksia-6654449>>. Päivitetty 2.6.2017. Luettu 15.4.2018.
- 31 Pakkausalan tulevaisuus – mitkä kehityspolut suuntaa määrittävät? 2017. Verkkodokumentti. Canon Oy. <<https://www.slideshare.net/CanonBusinessFI/pakkausalan-tulevaisuus-mitk-kehityspolut-suuntaa-mrittvt>>. Päivitetty 13.3.2017. Luettu 14.5.2018.
- 32 Printed, Organic & Flexible Electronics Forecast, Players & Opportunities 2017-2027. 2017. Verkkodokumentti. IDTechEx. <<https://www.idtechex.com/research/reports/printed-organic-and-flexible-electronics-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027-000510.asp>>. Päivitetty 11/2017. Luettu 14.5.2018.