



Painettava elektroniikka ja sen sovellukset

Teemu Korhonen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Tieto- ja viestintäteknikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tieto- ja viestintäteknikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

KORHONEN, TEEMU:
Painettava elektroniikka ja sen sovellutukset

Opinnäytetyö 43 sivua
Toukokuu 2022

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää painettava elektroniikka teknologiana sekä tutustua painettavan elektroniikan valmistusprosessiin ja käyttösovellutuksiin. Työssä perehdytään painettavan elektroniikan valmistusprosesseihin usealla eri paino-, tulostus- ja 3D-tulostusmenetelmällä ja tutustutaan painettavan elektroniikan yleisimpiin sovellutuksiin.

Työssä perehdytään painettavaan elektroniikkaan, painettavan elektroniikan hyötyihin ja haittapuoliin verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Tämän lisäksi työssä perehdytään fleksopainon, syväpainon, silkkipainon, offsetpainon, tampopainon, mustesuihkutulostimen, aerosolisuihkutulostimen, elektrohydrodynaamisen suihkutulostimen ja ekstruusiopohjaisen tulostimen toimintaperiaatteisiin.

Työssä tutkittiin painettavan elektroniikan sovellutuksia RFID-järjestelmissä, orgaanisissa ohutkalvotransistoreissa, akuissa, OLED-näytöissä ja aurinkokennoissa sekä lisäksi perehdyttiin sovellutusten toimintaan.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava ja tiivis teoriapohja painettavan elektroniikan valmistustapoihin sekä yleisimpiin käyttösovellutuksiin. Työssä on selvitetty painettavan elektroniikan eri paino- ja tulostusmenetelmien sovellutuksia erilaisiin piireihin sekä painettavan elektroniikan sovellutusten tulevaisuuden mahdollisuuksia. Työn perusteella on helppo lähteä tutkimaan painettavaa elektroniikkaa ja sen sovellutuksia syvällisemmin.

Asiasanat: painettu elektroniikka, rfid, ohutkalvotransistori, oled, aurinkokenno

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Telecommunications and Networks

KORHONEN, TEEMU:
Printed Electronics and Its Applications

Bachelor's thesis 43 pages
May 2021

The purpose of this thesis was to examine multiple printing processes used in printed electronics, and the most common applications of this technology.

This thesis covers printed electronics and its advantages and disadvantages compared to conventional printing methods. In addition to this, discussion is provided on flexography, gravure printing, screen printing, offset printing, pad printing, inkjet printing, aerosol jet printing, electrohydrodynamic jet printing and extrusion-based printing processes.

Furthermore, the focus in this study was on printed electronics applications in RFID systems, thin-film transistors, batteries, OLED screens and solar cells, and the related applications.

The result of this thesis is a comprehensive theoretical summary of printed electronics printing processes and the most common practical applications. As a result of this study, an overview of the future possibilities of printed electronics was produced. This thesis gives good foundation to research printed electronics and its applications in depth.

Key words: printed electronics, rfid, thin-film transistor, oled, solar cell

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	PAINETTAVA ELEKTRONIIKKA	8
	2.1 Hyödyt.....	8
	2.2 Haittapuolet.....	8
3	PAINOMENETELMÄT	9
	3.1 Fleksopaino.....	9
	3.2 Syväpaino	10
	3.3 Silkkipaino.....	11
	3.4 Offsetpaino.....	12
	3.5 Tampopaino	13
4	TULOSTUSMENETELMÄT	14
	4.1 Mustesuihkutulostus.....	14
	4.1.1 Jatkuva mustesuihkutulostus.....	14
	4.1.2 Drop-on-demand mustesuihkutulostin	15
	4.2 Aerosolisuihkutulostus	16
	4.3 Elektrohydrodynaaminen suihkutulostus.....	17
5	3D-TULOSTUSMENETELMÄT	19
	5.1 Ekstruusiopohjainen tulostus	19
	5.1.1 Filamenttipohjainen ekstruusio	19
	5.1.2 Mäntäpohjainen ekstruusio.....	20
	5.1.3 Pneumaattinen ekstruusio	21
	5.1.4 Ruuvipohjainen ekstruusio	22
6	SOVELLUTUKSET	23
	6.1 RFID.....	24
	6.1.1 Aktiivinen RFID.....	25
	6.1.2 Passiivinen RFID	25
	6.1.3 RFID Sovellutuksia	26
	6.2 Orgaaniset ohutkalvotransistorit.....	27
	6.2.1 Vaihtosuuntaaja.....	29
	6.2.2 Vahvistin.....	29
	6.2.3 Rengasoskillaattori	30
	6.2.4 D-kiihku.....	31
	6.2.5 Loogiset portit.....	31
	6.2.6 SRAM	32
	6.3 Akku	33
	6.3.1 Litiumioniakku.....	33

6.3.2 Natriumioniakku.....	34
6.3.3 Sinkki-ioniakku.....	34
6.4 OLED	35
6.5 Aurinkokenno	36
POHDINTA	39
LÄHTEET.....	41

LYHENTEET JA TERMIT

ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
NIP	Non-Impact Printing
OLED	Organic Light Emitting Diode
SRAM	Static Random-Access Memory
Substraatti	Pohjamateriaali
Taylor-kartio	Sähkövarautuneessa pisarassa oleva kartiomainen meniski
Transponder	Laite, joka vastaanottaessaan signaalin lähettää vastaussignaalin
UHF	Ultra-High Frequency

1 JOHDANTO

Painettava elektroniikka on tuore tuotantotapa, jossa elektroniikkajärjestelmät ja komponentit valmistetaan suoraan jäykkään, taipuisaan tai venyväälle alustalle edullisilla paino- tai tulostusprosesseilla perinteisten piipohjaisten prosessien sijaan. Viimeisen vuosikymmenen aikana painetusta elektroniikasta on tullut luopaava tuotantotapa, jonka kehitys on korostunut useissa sovellutuksissa.

Koska tällaisten elektronisten laitteiden suurille mutta kohtuuhintaisille tuotantomäärille on jatkuvasti kasvava kysyntä, on painettava elektroniikka herättänyt huomiota teollisuudessa ja tiedemaailmassa. Ymmärtääkseen painettavan elektroniikan potentiaalia ja tulevaisuuden mahdollisuuksia on tämän opinnäytetyön tavoitteena lisätä ymmärrystä painettavan elektroniikan teknologiasta, valmistusprosessista ja käyttösovellutuksista, sekä ymmärtää painettavan elektroniikan hyödyt ja haittapuolet.

Opinnäytetyön tarkoitus on perehtyä painettavaan elektroniikkaan teknologiana ja painettavan elektroniikan valmistusprosessiin usealla eri paino- tulostus- ja 3D-tulostusmenetelmällä, sekä tutustua painettavan elektroniikan yleisimpiin sovellutuksiin ja niiden toimintaan.

Opinnäytetyössä käsitellään aluksi useita eri paino- tulostus- ja 3D-tulostusmenetelmiä, sekä niiden toimintaperiaatteita. Sen jälkeen käydään läpi painettavan elektroniikan sovellutuksia kuten radiotaajuustunnisteita, ohutkalvotransistoreja, akkuja, OLED-näyttöjä ja aurinkokennoja.

2 PAINETTAVA ELEKTRONIikka

Painettava elektroniikka on teknologian muoto, jolla voidaan rakentaa komponentteja ja virtapiirejä erilaisia paino- ja tulostusmenetelmiä hyödyntämällä. Painettavassa elektroniikassa käytetään paljon orgaanisia aineita tehden tästä ekologisen ratkaisun verrattuna perinteisiin valmistustapoihin.

2.1 Hyödyt

Painettava elektroniikka tarjoaa biohajoavan ja kierrätettävän ratkaisun vähentämään elektroniikkajätettä, jota kasvava elektroniikantuotanto aiheuttaa. Painettava elektroniikka valmistetaan levittämällä johtavia mustekerrosyhdisteitä substraattiin, joka on mahdollista kierrättää ja/tai on biohajoava. (Jäntti, Karakoç, Palko, Paltakari, Ruttik, Wiklund & Yiğitler 2021.)

IPC-standardien mukaan painettava elektroniikka on edullinen tapa valmistaa komponentteja ja virtapiirejä. Painettava elektroniikka mahdollistaa komponenttien ja virtapiirien rakentamisen kevyiksi ja taipuisiksi. Painettava elektroniikka soveltuukin erinomaisesti esimerkiksi taipuisiin näyttöihin, RFID-tunnisteisiin, aurinkopaneeleihin ja älyvaatteisiin.

2.2 Haittapuolet

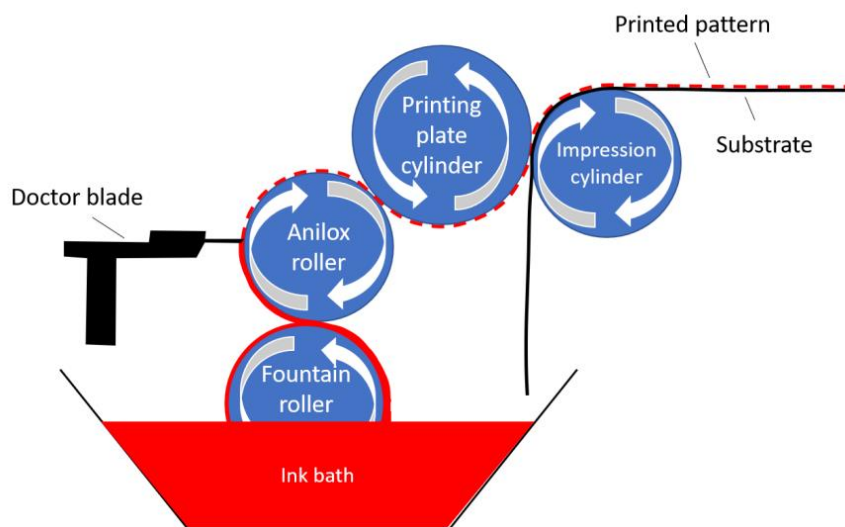
Painettavan elektroniikan prototypointi ja käyttöönotto on kallista verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin. Painettavan elektroniikan käyttöikä on taipuisuutensa vuoksi lyhyempi kuin perinteisellä elektroniikalla. (Proto-Electronics 2020.)

3 PAINOMENETELMÄT

Painatusprosessiin kuuluu musteen kontrolloitu kerrostaminen substraatille siten, että muodostuu ennalta määrätty kuvio. Erilaisilla painomenetelmillä voidaan nopeasti tuottaa identtisiä piirejä ja komponentteja. (Beedasy & Smith 2020.)

3.1 Fleksopaino

Fleksopaino on painamistekniikkaan kuuluva tuotantotapa, joka toimii rullalta rullalle tekniikalla. Fleksopaino (kuva 1) koostuu kahdesta yksiköstä, musteyksiköstä ja painoyksiköstä. Musteyksikkö koostuu mustesäiliöstä (ink bath) ja rasteritelasta (anilox roller) ja painoyksikkö koostuu levysylinteristä (printing plate cylinder) ja painatussylinteristä (impression cylinder). (Ganz, Lupo & Nisato 2016.)



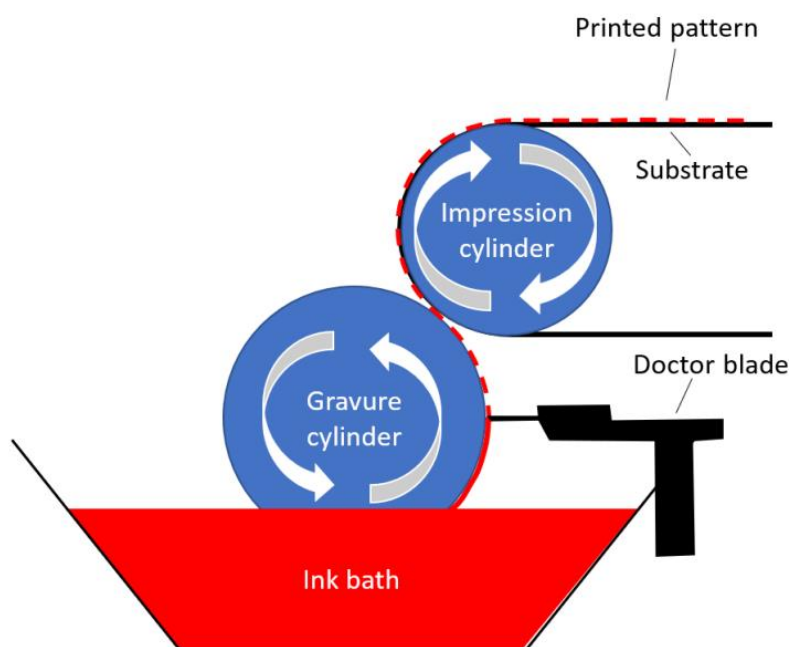
KUVA 1. Fleksopainon toiminta (Jäntti ym. 2021)

Muste vietään mustesäiliöstä rasteritelalle, josta raakeli (doctor blade) poistaa ylimääräisen musteen, jättäen mustetta ainoastaan rasteritelassa oleviin soluihin. Levysylinterin painolevyssä on koholla pikseleitä, joihin muste siirretään, tästä muste siirtyy NIPillä eli ilman fyysistä kontaktia substraattiin, jossa paine sallii musteen siirtymisen parantamalla musteen ja substraatin kontaktia. NIPin ulostulossa muste halkeaa jättäen osan musteesta substraattiin. Musteesta haihdutetaan musteen liuotin puhaltamalla kuumaa ilmaa musteen pinnalle. (Jäntti ym. 2021.)

Fleksopaino on todella nopea painomenetelmä ja sen painonopeudet ovat 3–12 *m/s* ja resoluutio on 60 riviä senttimetriä kohden. Fleksopainoa sovelletaan RFID-tunnisteiden, akkujen, OLED-näyttöjen ja valaisimien valmistukseen. (Jäntti ym. 2021.)

3.2 Syväpaino

Syväpaino on tuotantotapa, joka toimii rullalta rullalle periaatteella. Syväpaino (kuva 2) koostuu kahdesta sylinteristä, painosylinteristä (gravure cylinder), johon painettavan piirin kuva on kaiverrettu ja painatussylinteristä. (Jäntti ym. 2021.)



KUVA 2. Syväpainon toiminta (Jäntti ym. 2021)

Syväpainossa painosylinteri pyörii mustesäiliössä, muste tarttuu painosylinterin pintaan, josta ylimääräinen muste poistetaan raakelilla, jättäen mustetta kaiverrettuihin soluihin. Muste siirtyy painosylinteriltä NIPillä substraattiin, jossa paine sallii musteen siirtymisen parantamalla musteen ja substraatin kontaktia. (Jäntti ym. 2021.)

Musteen siirtymistä parannetaan usein käyttämällä sähköstaattista avustusjärjestelmää. Avustusjärjestelmä luo sähkökentän NIPin poikki, sähkökenttä auttaa

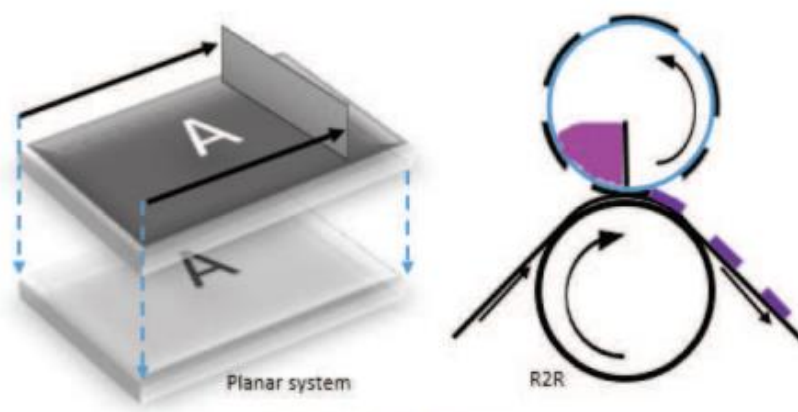
siirtämään musteen soluilta substraattiin. Musteesta haihdutetaan liuotin puhaltamalla kuumaa ilmaa musteen pinnalle. (Jäntti ym. 2021.)

Syväpaino tunnetaan korkeasta painolaadusta ja nopeudesta. Syväpainon resoluutio on 20–400 riviä senttimetriä kohden ja painonopeus on 13–16 *m/s*. Syväpainon etuina ovat yksinkertainen tulostus, tarkka musteenlevitys ja joustavuus painosylinterin suunnittelussa. (Jäntti ym. 2021.)

3.3 Silkkipaino

Silkkipaino (kuva 3) on painamistekniikkaan kuuluva tuotantotapa, joka toimii tasomaisessa järjestelmässä tai rullalta rullalle periaatteella. Tasomaisessa järjestelmässä käytetään verkkoa, jossa on tulostettavan piirin kuva ja vetolastaa. Verkko on kosketuksessa substraatin kanssa, verkolle asetetaan mustetta, joka pyyhkäistään vetolastalla täyttäen verkko. Muste siirtyy substraattiin verkosta muodostaen halutun virtapiirin kuvan. (Rackauskas 2018.)

Rullalta rullalle tekniikassa vetolasta on korvattu telalla, jonka sisälle muste ja vetolasta on asetettu. Telan pyöriessä vetolasta pakottaa mustetta verkon läpi, prosessi on jatkuva toisin kuin tasomaisessa järjestelmässä mikä mahdollistaa nopean tuotannon. (Rackauskas 2018.)



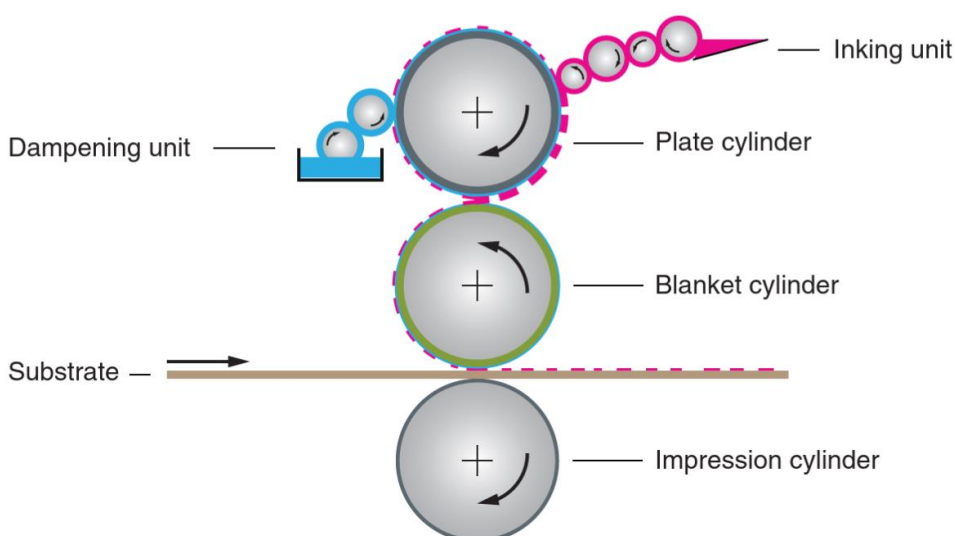
KUVA 3. Silkkipainon toiminta (Rackauskas 2018)

Silkkipaino on monipuolinen ja yksinkertainen tuotantotapa. Tämän lisäksi se on vanhin elektroniikan painamiseen käytetty tekniikka. Se soveltuu hyvin esimerkiksi sähkömagneettisten koteloiden, kondensaattorien, kalvokytkimien tai transistorielektrodien tulostamiseen. (Jäntti ym. 2021.)

3.4 Offsetpaino

Offsetpaino on painamistekniikkaan kuuluva tuotantotapa, joka toimii rullalta rullalle periaatteella. Offsetpaino (kuva 4) koostuu kostutusyksiköstä (dampening unit), monisyylinterisestä musteyksiköstä (inking unit), levysylinteristä johon painolevy on asennettu, peittosylinteristä (blanket cylinder) ja painatussylinteristä. (Costa, Lanceros-Méndez & Oliveira 2018.)

Painoprosessissa kostutusyksikkö kostuttaa levysylinterin painolevyn, painolevyn saadaan piirin kuva käyttämällä hydrofiilisiä ja oleofiilisiä elementtejä, hydrofiiliset elementit hylkivät mustetta ja pitävät vettä, kun taas oleofiiliset hylkivät vettä ja pitävät musteen. Kostutuksen jälkeen muste siirretään painolevylle. Levysylinterin painolevyltä muste siirretään aluksi peittosylinterille, peittosylinteriltä muste siirretään substraatille halkaisemalla muste korkeaa 1 MPa painetta painopainetta käyttäen. (Costa ym. 2018.)

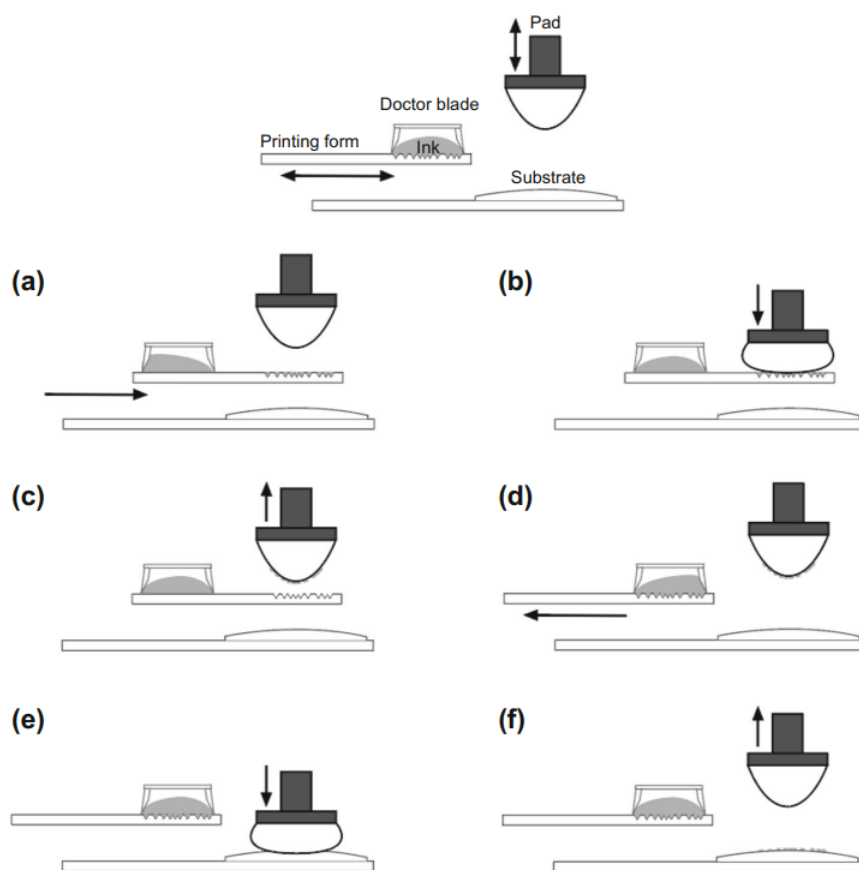


KUVA 4. Offsetpainon toiminta (Costa ym. 2018)

3.5 Tampopaino

Tampopaino on epäsuora syväpainoon perustuva painotekniikka. Tampopaino koostuu painolevystä, johon painokuvio on kaiverrettu, superelastisesta silikonityynystä ja substraatista. (Bodenstein, Dörsam, Hirmer & Sauer 2019.)

Tampopainon painoprosessissa (kuva 5) a) täytetään painolevyn kaiverretut kennot musteella ja muste poistetaan vetolastalla. b) Muste siirretään silikonityynnyyn painamalla se painolevylle, c) tyynyn noustessa tyyny ottaa musteen painolevyn kennoista. d) Painolevy siirretään pois ja tämän jälkeen e) tyyny painetaan substraattiin levittäen musteen, f) lopuksi tyyny nostetaan substraatilta. (Bodenstein ym. 2019.)



KUVA 5. Tampopainon toiminta (Bodenstein ym. 2019)

Tampopainon superelastisen silikonityynyn ansiosta muste voidaan siirtää kaarville ja kolmiulotteisille pinnoille (Bodenstein ym. 2019).

4 TULOSTUSMENETELMÄT

Suihkutulostus menetelmät ovat täysin digitaalisia ja kontaktittomia valmistusmenetelmiä. Suihkutulostus perustuu nestemäisten mustepisaroiden muodostumiseen, jotka suihkutetaan tulostuspään suuttimesta kohti alustaa, johon ne kertyvät muodostaen halutun kuvion. Suihkutulostuksessa käsitellään laimennettuja musteita suihkuttaen ne hyvin pieninä nestemäärinä tarkkoihin paikkoihin minioiden pintakontaminaation ja mustejätteen. Suihkutulostus on sopivin valmistustekniikka korkean hinnan musteilla tulostamiseen. (Battaglini, Bridonneau, Carn, Lemarchand, Mattana, Noël, Piro & Zrig 2022.)

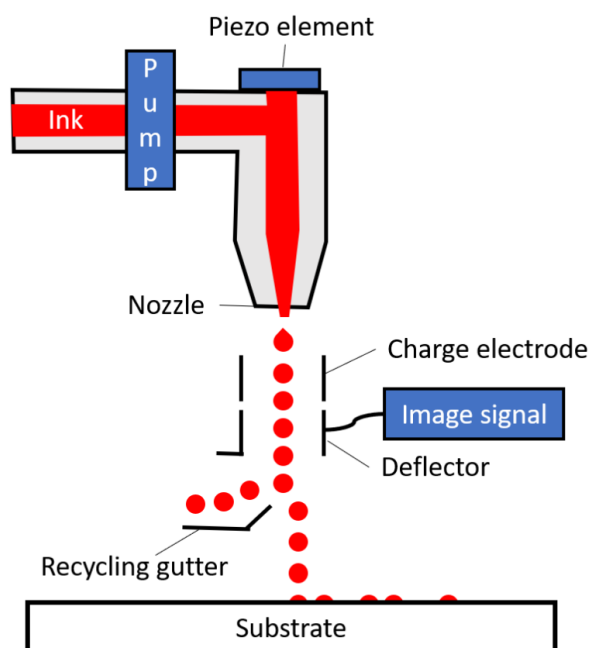
4.1 Mustesuihkutulostus

Mustesuihkutulostus on tuotantotapa, jolla voidaan rakentaa haluttu komponentti tai virtapiiri pisara pisaralta. Korkea toistettavuus pisaratuotannossa mahdollistaa pisaroiden käsittelyä rakennuspalikoina. Mustesuihkutulostimet voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan, jatkuvaan mustesuihkuun ja drop-on-demand mustesuihkuun. (Beedasy & Smith 2020.)

4.1.1 Jatkuva mustesuihkutulostus

Jatkuvassa mustesuihkutulostuksessa syntyy jatkuva pisaravirta, joka syötetään latauslevyjen välistä, jonka seurauksena pisaravirta saa sähkövarauksen, pisaravirta ohjataan kohti substraattia (kuva 6). Ohjaukseen voidaan tarvittaessa käyttää sähkökenttää. (Beedasy & Smith 2020.)

Koska jatkuvassa mustesuihkutulostuksessa pisaravirta on jatkuvaa, täytyy käyttämättömät pisarat käsitellä. Käyttämättömät pisarat ohjataan kouruun ja tästä takaisin säiliöön uudelleenkäyttöä varten. (Beedasy & Smith 2020.)



KUVA 6. Jatkuvan mustesuihkutulostimen toiminta (Jäntti ym. 2021)

4.1.2 Drop-on-demand mustesuihkutulostin

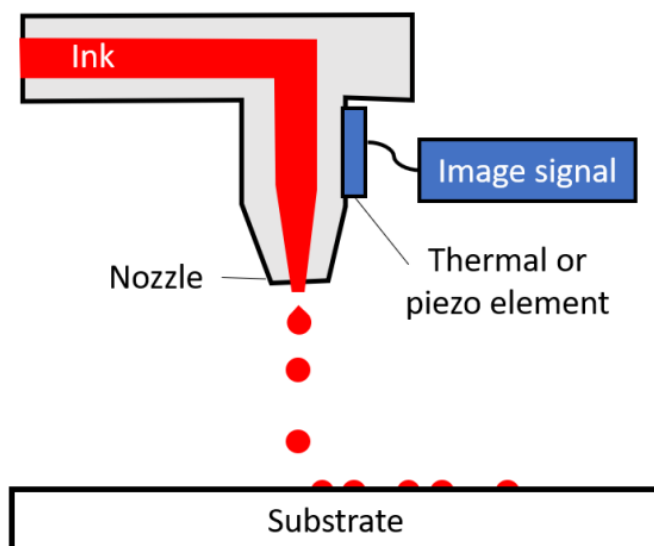
DOD eli drop-on-demand mustesuihkutulostimessa pisaroita syntyy vain tarvittaessa tehden tästä energiatehokkaamman kuin jatkuva mustesuihkutulostin (Beedasy & Smith 2020).

DOD mustesuihkutulostimella (kuva 7) on kaksi menetelmää pisaran luomiseksi, lämpö-DOD ja pietsosähköinen DOD. Lämpö-DOD mustesuihkutulostimessa on mustesäiliössä vastus, joka kuumenee höyrystäen musteen, aiheuttaen mustekuplan muodostumisen. (Beedasy & Smith 2020.)

Pietsosähköisessä DOD-mustesuihkutulostimessa on mustesäiliössä pietsosähköinen toimilaite, joka muodostaa painepulssin heittäen mustepisaran ulos (Beedasy & Smith 2020).

DOD ei luo käyttämättömiä pisaroita, joita tarvitsisi kierrättää pienentäen musteen riskiä pilaantua (Beedasy & Smith 2020).

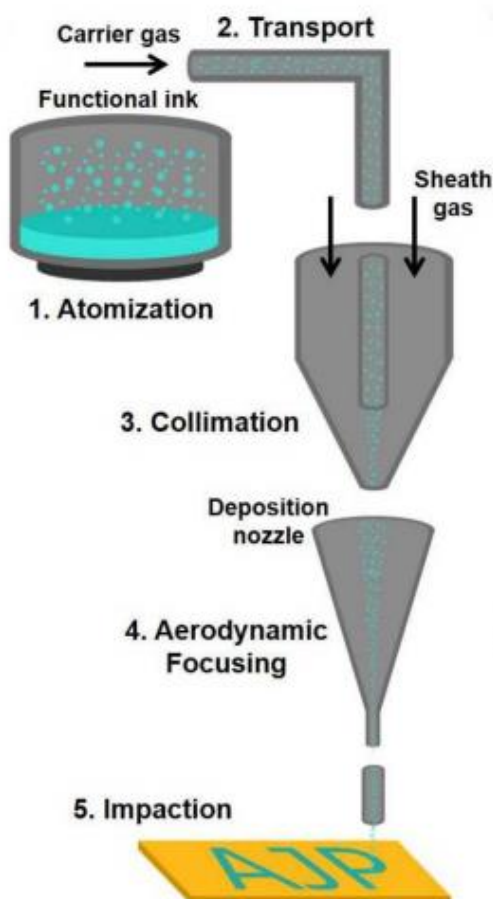
Koska DOD mustesuihkutulostimen käytössä on hetkiä, jolloin mustepisaroita ei synny, on suuttimen tukkeutuminen mahdollista musteen haihtumisen seurauksena (Beedasy & Smith 2020).



KUVA 7. DOD-mustesuihkutulostimen toiminta (Jäntti ym. 2021)

4.2 Aerosolisuihkutulostus

Aerosolisuihkutulostin on tuotantotapa, jossa muste aerosolisoidaan eli muutetaan sumutteeksi ja viedään substraattiin kantokaasun avulla. Aerosolisuihkutulostimessa (kuva 8) käytetään ultraäänisumutusta mustepisaroiden luomiseen, pisarat kuljetetaan tulostimen pinnoituspäähän kantokaasua käyttämällä. Pinnoituspäässä vaippakaasu ympäröi kantokaasun kollimoiden eli muuttaen virtaukset yhdensuuntaiseksi leviämisen vähentämiseksi. Mustepisaroiden kulkiessa pinnoituspään läpi pisarat voidaan ohjata virtauksestaan pois kapeassa, yhtenevässä suuttimessa olevien inertia vaikutusten vuoksi, tämä johtaa aerodynaamiseen tarkennukseen. Lopuksi pisarat ohjataan kohti substraattia, substraattiin törmäävällä suihkulla. (Secor 2018.)



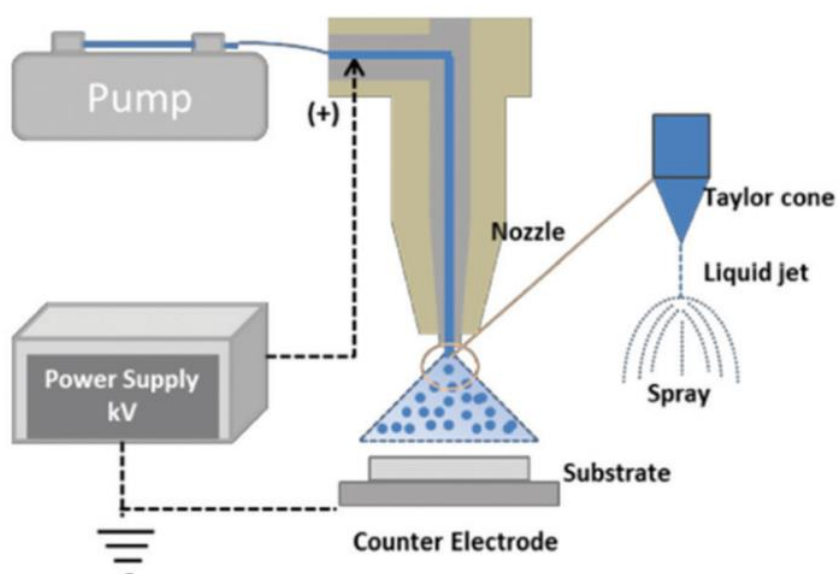
KUVA 8. Aerosolisuihkutulostimen toiminta (Secor 2018)

Aerosolisuihkutulostimella voidaan tuottaa $10 \mu\text{m}$ ominaisuuskokoja mahdollistaen korkean resoluution tulostuksen. Aerosolisuihkutulostimen suurin haittapuoli on nopeus, joka on korkeintaan 12 m/min , joten se ei sovellu elektroniikan massatuotantoon. (Jäntti ym. 2021.)

4.3 Elektrohydrodynaaminen suihkutulostus

Elektrohydrodynaaminen eli EHD-suihkutulostin on tuotantotapa, joka hyödyntää mustepisaroiden käyttäytymistä sähkökentässä suihkutuksessa. EHD-suihkutulostin hyödyntää Taylor-kartion muodostustapoja, tämä johtaa nano- tai mikrometrin kokoisten kuvioden muodostumiseen. Lämpö- ja pietsosähköisissä mustesuihkutulostusmenetelmissä pienen suuttimen käyttäminen on epäkäytännöllistä, sillä kapillaarivoimien voittamiseksi tarvitaan erittäin korkea paine. EHD-suihkutulostin käyttää ulkoista sähkökenttää musteen vetämiseen ulos suuttimesta, joten kapillaarivoimat voidaan voittaa helposti. (Choi, Hong, Jeong, Kim, Kwon, Li & Nam 2021.)

EHD-suihkutulostimessa (kuva 9) suuttimen ja johtavan levyn väliin syötetään jännite musteen virtauksen käynnistämiseksi. Suuttimen pumpun vastapaine siirtää musteen kohti suuttimen kärkeä, joka on päällystetty metallikerroksella. Sähkökenttä aiheuttaa musteessa olevien ionien tai liuenneiden aineiden kerääntymistä meniskin eli nesteen kuperaan tai koveraan pintaan. Hiukkasten välillä vaikuttava Coulombin laki muuttaa pyöreän meniskin Taylor-kartioksi. Sähköstaattiset jännitykset ylittävät pintajännityksen, joten mustepisarat tulevat ulos kartiosta. Menetelmä tuottaa suihkun, jonka halkaisija on pienempi kuin perinteisissä mustesuihkutulostimissa. (Choi ym. 2021.)



KUVA 9. EHD-suihkutulostimen toiminta (Choi ym. 2021)

5 3D-TULOSTUSMENETELMÄT

3D-tulostus herättää jatkuvaa kiinnostusta sovellusten ja jatkuvan tutkimus- ja kehitystyön lisääntyessä. 3D-tulostuksessa materiaali kerrostetaan kontrolloidusti halutun kohteen rakentamiseksi. Historiallisesti 3D-tulostus on ollut pääsääntöisesti roolissa prototyyppien valmistuksessa, mutta viimeaikainen kehitys on mahdollistanut sen, että teknologiaa on voitu käyttää perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistettuihin tuotteisiin verrattavissa olevien tuotteiden tuottamiseen. (Persad & Rocke 2022.)

5.1 Ekstruusiopohjainen tulostus

Ekstruusio eli suulakepuristus pohjainen tulostustekniikka on yksinkertainen ja edullinen tuotantotapa. Ekstruusiopohjaisessa tulostimessa materiaalia puristetaan suuttimen läpi jatkuvalla virtauksella. Ekstruusiopohjaisella tulostustekniikalla voidaan annostella materiaaleja laajalla viskositeettialueella, ja siinä on vähemmän tukkeutumiso ongelmia verrattuna muihin tulostuspohjaisiin valmistustekniikoihin. Ekstruusiopohjainen tulostustekniikka on kuitenkin paljon hitaampi ja sen tulostustarkkuus on huonompi verrattuna muihin paino- ja tulostustapoihin. (Choong, Chua, Kuo, Low & Tan 2022.)

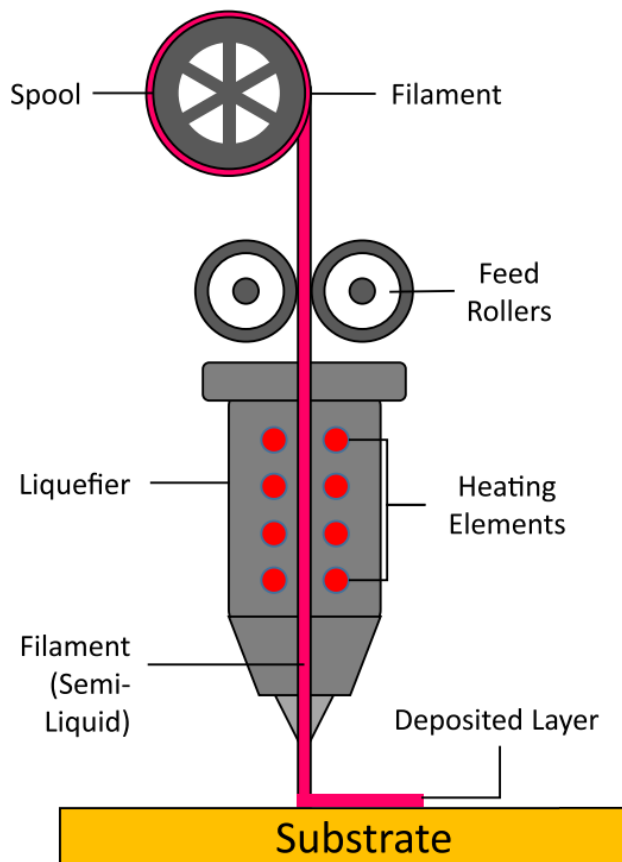
Suulakepuristimen tyypistä riippuen ekstruusiopohjainen tulostin voidaan jakaa filamenttipohjaiseen suulakepuristimeen, mäntäpohjaiseen suulakepuristimeen, pneumaattiseen suulakepuristimeen tai ruuvipohjaiseen suulakepuristimeen (Choong ym. 2022).

5.1.1 Filamenttipohjainen ekstruusio

Filamenttipohjainen suulakepuristin (kuva 10) koostuu filamenttikelasta (filament), syöttötelaparista (feed rollers), nesteytysaineesta (liquefier) ja lämmityselementistä (heating elements). Filamentti syötetään suulakepuristuspäähän syöttötelaparin avulla ja kuumennetaan ekstruusiopään sisällä olevien lämmityselementtien avulla puolimestemäiseen tilaan. Lopuksi puolimestemäinen filamentti

tulostetaan kuumennetun suuttimen läpi substraatille ohuina kerroksina. (Choong ym. 2022.)

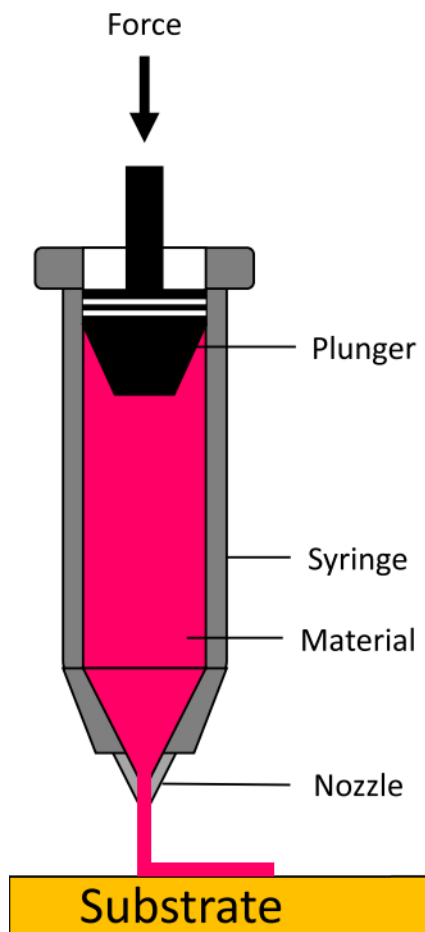
Kerros-kerrokselta tulostustavassa tulostusprosessi toistetaan 3D-sähkökomponenttien valmistamiseksi. Termoplastisia filamentteja voidaan tulostaa sähköä johtavien komposiittifilamenttien kanssa yhdessä tulostustyössä elektronikan valmistamiseksi, jossa sähköpiirit ja komponentit ovat upotettuina polymeerirakenteisiin. (Choong ym. 2022.)



KUVA 10. Filamenttipohjaisen suulakepuristimen toiminta (Choong ym. 2022)

5.1.2 Mäntäpohjainen ekstruusio

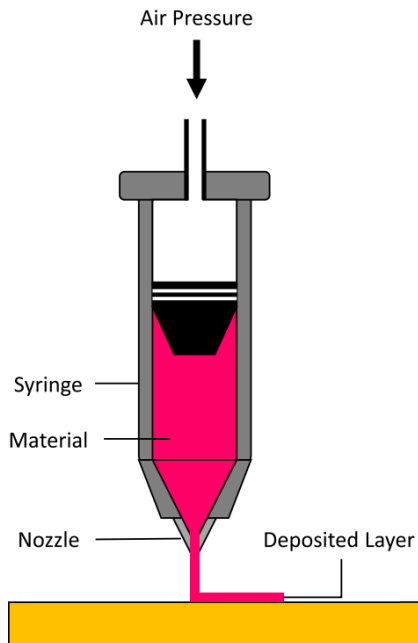
Mäntäpohjainen ekstruusiotekniikka (kuva 11) on yksi yksinkertaisimmista suulakepuristimista. Mäntäpohjainen suulakepuristin pakottaa tulostusmateriaalin ulos suuttimesta mäntää (plunger) apuna käyttäen. Männän nopeus alaspäin ohjaa materiaalin virtausnopeutta. Suulakepuristusprosessi pysähtyy, kun mäntään kohdistuva voima vapautuu. (Choong ym. 2022.)



KUVA 11. Mäntäpohjaisen suulakepuristimen toiminta (Choong ym. 2022)

5.1.3 Pneumaattinen ekstruusio

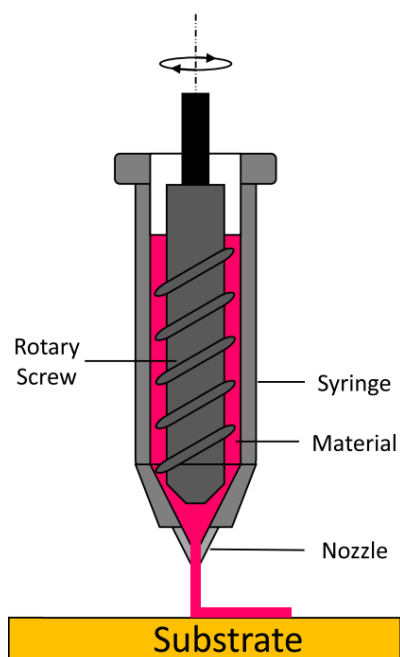
Pneumaattisessa suulakepuristimessa (kuva 12) materiaali puristetaan ulos suuttimesta ilmanpaineen avulla. Puristettavan materiaalin virtausnopeutta voidaan säätää säätämällä ilmanpainetta. Kaasun tilavuuden puristamiseen käytettävän ajan vuoksi tässä tekniikassa voi olla huomattavia viiveitä tulostusprosessin alussa ja lopussa. (Choong ym. 2022.)



KUVA 12. Pneumaattisen suulakepuristimen toiminta (Choong ym. 2022)

5.1.4 Ruuvipohjainen ekstruusio

Ruuvipohjaisessa suulakepuristustekniikassa (kuva 13) käytetään pyörivää ruuvia (rotary screw) pumppausliikkeen aikaansaamiseksi, pakottaen painettavan materiaalin ulos suuttimesta. Materiaalivirtausta ohjataan mittaamalla pyörivän ruovin kulmanopeus, materiaalivirtauksen tarkka säätäminen on paljon vaikeampaa mäntäpohjaiseen suulakepuristimeen verrattuna. (Choong ym. 2022.)



KUVA 13. Ruuvipohjaisen suulakepuristimen toiminta (Choong ym. 2022)

6 SOVELLUTUKSET

Painettava elektroniikka on nopeasti kasvava elektroniikan ala ja laajenee yhä enemmän ihmisten jokapäiväiseen elämään. Vaikka painettava elektroniikka ei todennäköisesti täysin korvaisi piipohjaista elektroniikkaa, sen osuus maailman elektroniikkamarkkinoilla kasvaa suurella vauhdilla. Painettava elektroniikka tarjoaa mekaanista joustavuutta, kevyttä painoa, alhaisia kustannuskuluja ja ympäristöystävällisyyttä. Painettavan elektroniikan tyypillisiä sovellutuksia ovat RFID-tunnisteet, OLED-näytöt, aurinkopaneelit, biolääketieteen sovellutukset ja mukautuvat elektroniikat. Suurin osa näistä sovellutuksista ei ole mahdollista toteuttaa käyttämällä perinteistä jäykkää elektroniikkaa, koska ne vaativat joustavia substraatteja, mikä tekee painettavasta elektroniikasta houkuttelevamman vaihtoehdon. (Hoelck, Jakubowska, Kallmayer, Krshiwoblozki, Scenev, Schneider-Ramelow, Szalapak & Werft 2022.)

Lääketieteessä puettavat elektroniset laitteet tarjoavat erinomaisen mahdollisuuden seurata ihmisen elintoimintoja. Painatustekniikat ovat lupaava teknologia puettavien laitteiden valmistukseen. (Chen, Gengenbach, Koker & Mansour 2020.)

Lääketieteessä puettavat laitteet ovat elektronisia järjestelmiä, jotka täyttävät lääketieteelliset toiminnot. Puettavat laitteet ovat vartaloon suoraan ihokosketuksessa tai vaatteisiin integroituina. Lääketieteen puettavien laitteiden sovellutuksiin kuuluu elintoimintojen seuranta, hikianalyysi, sylkianalyysi, haavanseuranta ja magneettikuvaus. (Chen ym. 2020.)

Painoteknologia on lääketieteelle lupaava valmistumisprosessi puettaville vaatteille. Suuria etuja ovat elektronisten piirien taipuisuus, tämä mahdollistaa piirien asennuksen suoraan iholle. Painettavan elektroniikan halvat substraatit ja alhainen materiaalinkulutus mahdollistavat kertakäyttöisten laitteiden valmistuksen, kertakäyttöisillä laitteilla voidaan välttää monimutkaiset sterilointiprosessit. (Chen ym. 2020.)

6.1 RFID

RFID eli radiotaajuinen etätunnistin on edullinen langaton tekniikka, joka mahdollistaa miljoonien asioiden yhdistämisen, millä kuluttajat ja yritykset voivat ottaa yhteyttä, tunnistaa, paikantaa, käydä kauppaa ja todentaa tuotteita. (Borgese, Costa, Dicandia, Genovesi, Manara & Michel 2021.)

RFID on järjestelmä, millä etäkohteet voidaan tunnistaa automaattisesti. RFID-järjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista, lukija-antennista, tunnistesta ja järjestelmästä, missä näiden kahden komponentin viestintää ylläpidetään. (Chen, He, Khan, Mehmood & Virkki 2021.)

RFID-tunnisteet ovat yleistymässä monilla talouden aloilla, esimerkiksi viljelyskasvien ja karjan valvonnassa, ilmailussa, asiakaspalautteissa, elintarvikkeiden laadun ja turvallisuuden seurannassa, terveysturvassa, kirjasto- ja museopalveluissa, logistiikassa, vähittäismyynnissä, turvallisuusvalvonnassa, lähimaksuissa ja puettavissa laitteissa (Fellegara, Fugikawa-Santos, Gomes, Gozzi, Marques, Quadros, Rebello, Santos, Santos, Valério & Vieira 2021).

Teknologioiden kuten RFID tutkimisen on mahdollistanut uudet piirisarjat, nämä toimivat korkealla taajuuskaistalla, NFC 13,56 MHz taajuudella, ja UHF taajuuskaistalla, ETSI 866 MHz taajuudella ja FCC 910 MHz taajuudella, jotka ovat omistettu tukemaan useita anturialustoja (Borgese ym. 2021).

RFID-tunniste koostuu yleensä antennista, joka on kytketty integroituun virtapiiriin ja jolla on tietty toimintakaistataajuus ja lukualue. Matalataajuisia 125 kHz RFID-tunnisteita käytetään eniten sovellutuksissa, jotka ovat yhteensopivia lyhyille 1–3 cm lukuetaisyyksille, korkeataajuiset 13,56 MHz RFID-tunnisteet mahdollistavat lukuetaisyyden 50 cm asti. Pidempiä lukualueita vaativat sovellutukset käyttävät UHF taajuuskaistaa 860–960 MHz, tämä mahdollistaa usean metrin lukuetaisyyden. (Fellegara ym. 2021.)

RFID-tunnisteet luokitellaan aktiivisiksi ja passiivisiksi virtalähteen luonteen mukaan (Fellegara ym. 2021).

6.1.1 Aktiivinen RFID

Aktiivisessa RFID järjestelmässä tunnistamiseen on integroitu anturi. RFID mikropiiri kommunikoi anturin kanssa saadakseen tietoa monitoroidusta datasta ja sisällyttää tiedon takaisinsironneeseen bittisekvenssiin. Aktiivinen RFID järjestelmä tarjoaa paljon pidemmän lukualueen kuin passiiviset RFID järjestelmät, koska ne on varustettu akulla. (Borgese ym. 2021.)

Aktiiviset RFID järjestelmät toimivat taajuuksilla 433 MHz tai 2,45 GHz, 433 MHz on suositumpi vaihtoehto pitkien aallonpituuksien vuoksi, jotka sopivat paremmin materiaaleille kuten metallille ja vedelle (Borgese ym. 2021).

Aktiivisia RFID järjestelmiä voidaan käyttää transpondereina ja majakoina, majakan lukuetaisyys on satoja metrejä, akun säästämiseksi niiden lähetysteho asetetaan noin 100 metrin lukualueelle (Borgese ym. 2021).

6.1.2 Passiivinen RFID

Passiivinen RFID järjestelmä ei vaadi erillistä virtalähdettä toimiakseen, tämä tekee niistä edullisia ja helppoja valmistaa. Passiiviset RFID-tunnisteet saavat virran lukijan antamasta signaalista. Lukijan ja RFID-tunnisteen välinen viestintä tapahtuu takaisinsironnaksi kutsutulla menetelmällä. (Chen ym. 2021.)









Passiivisia RFID järjestelmiä on perinteisesti käytetty varastonhallintaan, logistiikkaan ja henkilöstön tunnistamiseen. Passiivisia RFID järjestelmiä pystytään soveltamaan perinteisiä tunnistuspohjaisia sovellutuksiaan laajemmalle alueelle. (Chen ym. 2021.)

Passiivisia RFID järjestelmiä voidaan käyttää langattomina antureina, nämä ovat helppoja valmistaa, edullisia ja tehokkaita. RFID järjestelmien tunnistusominaisuuksien lisäämistä passiivisiin tunnistimiin on tutkittu laajasti ja tunnistajien takaisinsirontasignaalien muutoksia on käytetty tunnistamaan muutoksia kosteudessa, paineessa ja lämpötilassa ilman ulkoisia antureita passiivisissa UHF RFID-järjestelmissä. (Chen ym. 2021.)

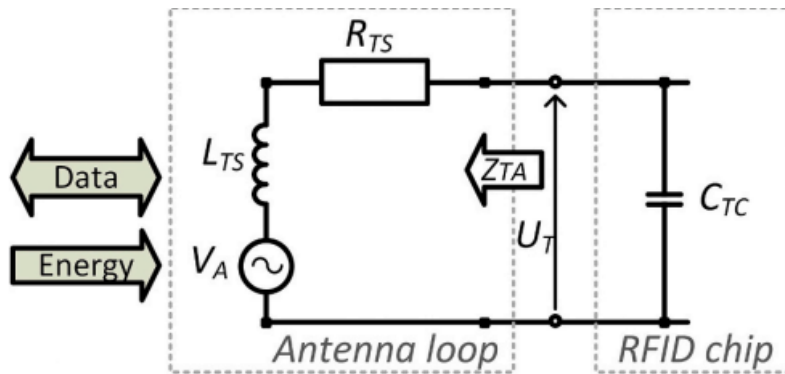
6.1.3 RFID Sovellutuksia

Puettava elektroniikka edellyttää usein langattomien solmujen käyttöä, jotka usein perustuvat RFID-järjestelmällä varustettuihin antureihin. RFID-järjestelmät mahdollistavat kohteiden automaattisen tunnistamisen ja monitoroinnin radioaaltojen avulla (taulukko 1). Tyypillinen RFID-järjestelmä (kuva 14) koostuu transponderista ja lukijasta. Transponderi koostuu antenniin kytketystä sirusta, joka pystyy kommunikoimaan lukijan kanssa langattomasti. Lukija on antennista ja elektronisista piireistä koostuva yksikkö, joka voidaan liittää internet-päätteisiin, näin kohdetta voidaan seurata automaattisesti reaaliajassa ja se näkyy myös verkossa. (Jankowski-Miśłowicz, Lukacs, Pietrikova, potenci & Tomaszewski 2022.)

TAULUKKO 1. RFID-järjestelmien käyttökohteita

RFID Sensors							
Healthcare	Food Quality	Agriculture	Automotive	Structural Health Monitoring	Space	Wearable & Implantable	Localization & activity monitoring
							
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Body temperature monitoring ▪ Blood glucose monitoring ▪ Activity and gesture sensing ▪ Sleep disorders 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meat, fish, vegetable freshness monitoring ▪ Expiration date monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soil moisture monitoring ▪ Precision irrigation ▪ Agro-food supply chain monitoring ▪ Vineyard monitoring ▪ Cold chain monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatic production monitoring ▪ Security of infants ▪ Tire pressure sensors ▪ Vehicles road distance 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal and concrete crack monitoring ▪ Structural damage detection ▪ Monitoring of structural movements ▪ Corrosion monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperature monitoring ▪ CO₂ monitoring ▪ Battery level monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ human movements ▪ Heart & breath frequency monitoring ▪ monitoring body areas and vascular prosthesis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ human movements ▪ Heart & breath frequency monitoring ▪ monitoring body areas and vascular prosthesis

Painatustekniikassa korkean taajuuskaistajärjestelmän transponderiantenni valmistetaan usein suoraan joustavalle substraatille tasomaisena kelana. Järjestelmän pääperiaatteen mukaan antennielementin tulee pystyä välittämään dataa ja keräämään energiaa tietyllä taajuudella syntyvästä magneettikentästä. Koska antennisilmukan geometria, materiaalit ja tekniikka määräävät koko antennin rakenteellisten ominaisuuksien parametrit, ne on otettava huomioon antennin suunnitteluvaiheessa. (Jankowski-Miśłowicz ym. 2022.)



KUVA 14. Antennipiiri yhdistetty RFID-järjestelmään (Jankowski-Mihułowicz ym. 2022)

Antennisilmukan virtapiiri koostuu jännitelähteestä V_A , joka indusoi jännitteen antennissa sen ollessa sähkömagneettikentässä, vastuksesta R_{TS} ja kelasta L_{TS} . Antennisilmukka on kytketty RFID-sirun tuloon, joka nähdään kondensaattorina C_{TC} . Antennin liittimien maksimijännite U_T muodostetaan rinnakkaisresonanssia varten kelan ja kondensaattorin välillä, kun siru on aktiivinen. (Jankowski-Mihułowicz ym. 2022.)

Korkeataajuisen sirun, joka toimii $13,56 \text{ MHz}$ taajuudella, ja sirun sisäinen kapasitanssi on $27,5 \text{ pF}$, tulee laskea tarvittava kelan induktanssi kaavalla.

$$L = \frac{1}{(4\pi^2 f^2 C)} \quad (1)$$

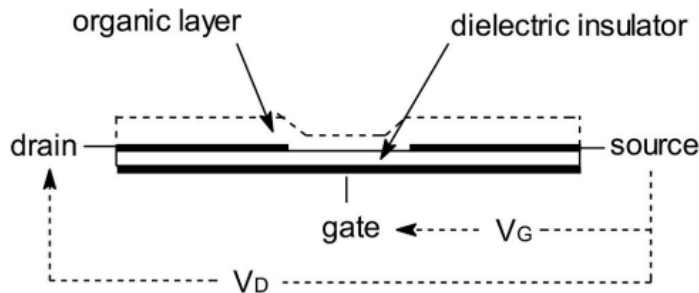
Korkeataajuisen antennin induktanssi tulee olla $5 \mu\text{H}$, koska passiivinen siru kerää energian sähkömagneettikentästä on vastuksen R_{TS} oltava samanaikaisesti suhteellisen pieni. (Jankowski-Mihułowicz ym. 2022.)

6.2 Orgaaniset ohutkalvotransistorit

Orgaanisia laitteita pidetään mahdollisina uusina laitteina nousevalla IoT-aikakaudella haluttujen ominaisuuksien kuten, keveyden, joustavuuden, painettavuuden ja yksinkertaistuneen laajan alueen toteutuksen vuoksi. Laajamittaisten loogiikkapiirien käyttöönotto helpottaa digitaalista signaalinkäsittelyä ja viestintää. Lisäksi piirit voidaan toteuttaa analogisten vahvistimien ja anturielementtien li-

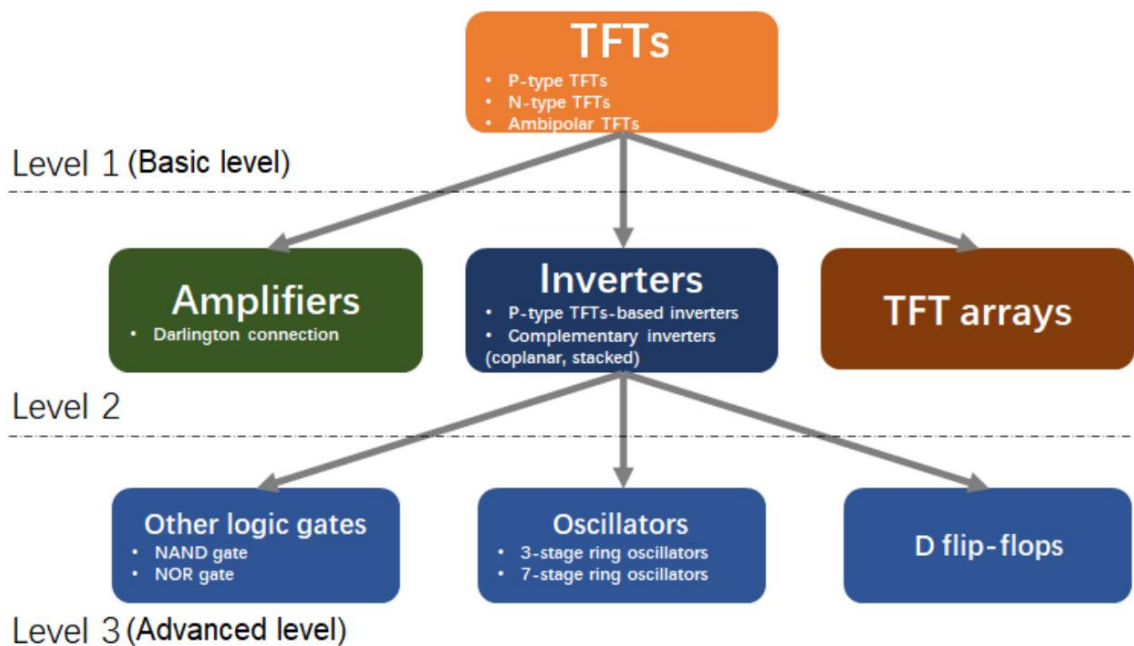
säksi joustavina ja tulostettavina piireinä. Yksinkertaisemman valmistuksen ja alhaisen painon vuoksi integroitu logiikkapiiri orgaanisten laitteiden kanssa voi nopeuttaa puettavien sovellutusten kehitystä. (Ogasahara 2022.)

Painettuja ohutkalvotransistoreja (kuva 15) voidaan käyttää monien piirien, kuten digitaalisten logiikkaporttien, analogisten vahvistimien tai ohutkalvotransistorijoukkojen rakentamiseen (kuva 16) (Ma & Soin 2022).



KUVA 15. Orgaaninen ohutkalvotransistori (Faris & Winscom 2020)

Näytöissä kuten LCD-, OLED- ja LED-näytöissä on käytetty avainteknologiana ohutkalvotransistoreja. Ohutkalvotransistoreja käytetään myös puettavissa laitteissa, läpinäkyvissä näytöissä ja rullattavissa televisioissa. (Chen, Gao, Guo, Liu, Liu, Wu, Xiao, Yu & Zhang 2022.)

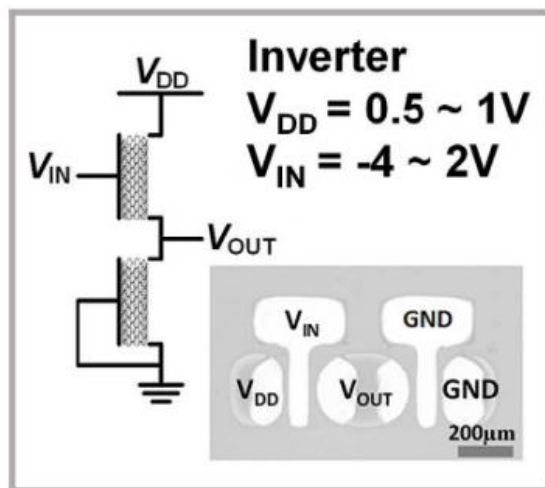


KUVA 16. Ohutkalvotransistorin sovellutuskohteita (Ma & Soin 2022)

Suuren kanta-aallon liikkuvuuden, hyvän yhteensopivuuden, optisen läpinäkyvyyden, alhaisen kustannuksen ja joustavuuden ansiosta ohutkalvotransistoreja on sovitettu muihin sovellutuksiin kuin näyttöihin. Ohutkalvotransistoreja käytetään virtuaalitodellisuudessa, lisättyssä todellisuudessa, elektronisissa paperinäytöissä, analogisissa ja digitaalisissa piireissä. (Chen ym. 2022.)

6.2.1 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja (kuva 17) on tärkeä komponentti joustavissa antureissa, näyttöissä, RFID-järjestelmissä ja operaatiovahvistimissa, joka muuttaa tasavirran vaihtovirraksi (Chen ym. 2022).

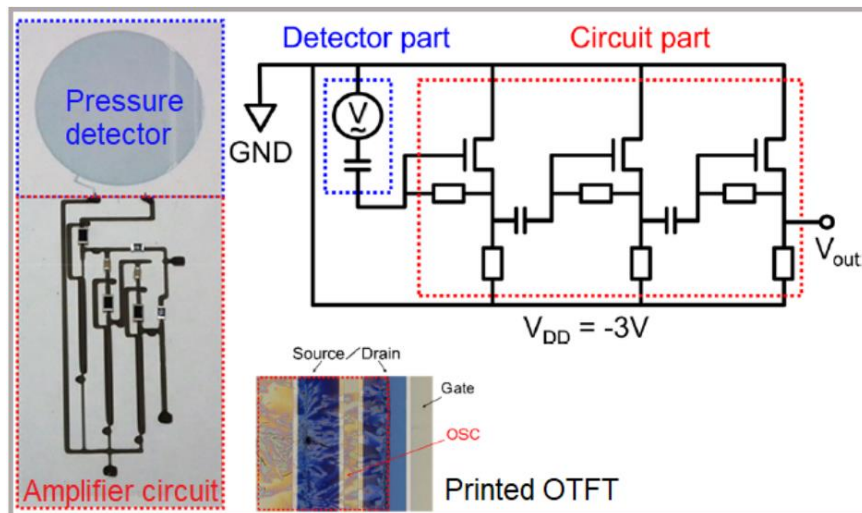


KUVA 17. Yksinapainen ohutkalvotransistori vaihtosuuntaaja (Ma & Sojin 2022)

Vaihtosuuntaaja koostuu diodista, joka on kytketty kuormaohutkalvotransistorista ja ohjausohutkalvotransistorista. Suurin jännitteenvahvistus on 7,8, -50–20 V tulojännitteellä ja 0– -40 V lähtöjännitteellä. Pienjännitesyötöllä 0,5–1,5 V ja tulojännitteellä -3–5 V piiri tuottaa tunnistettavan digitaalisen ulostulon 80 % jännitteen heilahtelulla. (Ma & Sojin 2022.)

6.2.2 Vahvistin

Vahvistin (kuva 18) on yksi tärkeimpiä moduuleja piirissä, vahvistimia käytetään signaalien vahvistamiseen analogisissa piireissä (Chen ym. 2022).

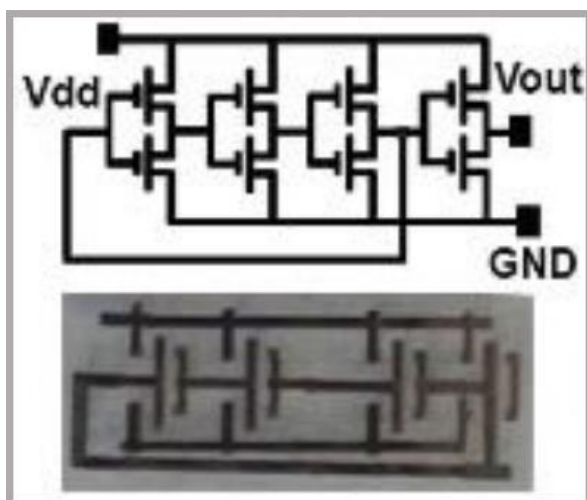


KUVA 18. Darlingtonkytkentään perustuva analoginen vahvistinpiiri (Ma & Soin 2022)

Darlingtonkytkentään perustuva vahvistinpiiri voi vahvistaa anturin signaalia 10 vahvistuskertoimella pulssiaallon tarkkailua varten (Ma & Soin 2022).

6.2.3 Rengasoskillaattori

Sarja, jossa on yhdistetty pariton määrä vaihtosuuntaajia ketjussa ja jossa syötetään viimeisen vaihtosuuntaajan lähtö takaisin ensimmäisen vaihtosuuntaajan tuloon, on rengasoskillaattorin perustopologia. Rengasoskillaattoria (kuva 19) voidaan hyödyntää sirulla sijaitsevaan kellogeneraattoriin, jonka taajuusalue on 1 kHz-1 MHz. (Ma & Soin 2022.)



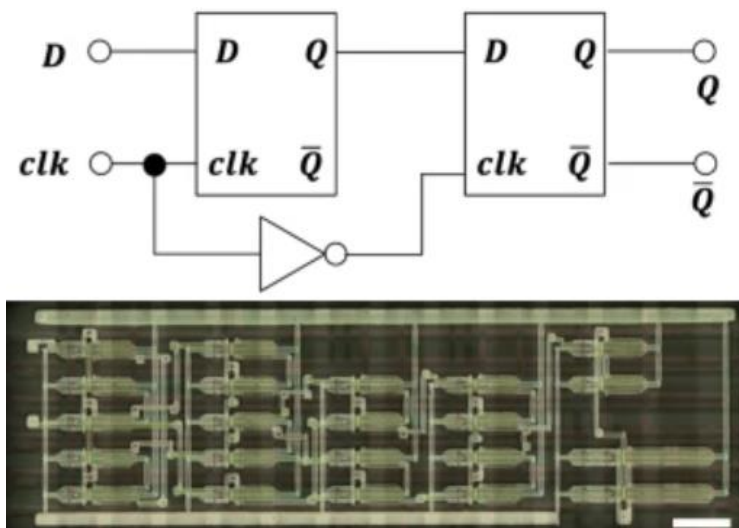
KUVA 19. 3 Vaiheinen rengasoskillaattori (Ma & Soin 2022)

3 Vaiheinen rengasoskillaattori tuottaa 3,3 kHz värähtelytaajuuden 1 V jännitteellä, yhden vaiheen viiveajalla 50 μ s (Ma & Soin 2022).

6.2.4 D-kiikku

D-kiikkua (kuva 20) pidetään tärkeimpänä muistisoluna suurimmassa osassa digitaalisia piirejä, tämä tuo sille laajan käyttöasteen erityisesti alhaisella virrankulutuksella (Bennet, Kayalvizhi, Mageswari, Priya & Sathya 2022).

D-kiikkua käytetään laajasti digitaalisissa järjestelmissä ja tietokonesovelluksissa, kuten digitaalisessa signaalirekisterissä, siirtorekisterissä ja aaltomuotogeneraattorissa (Chen ym. 2022).

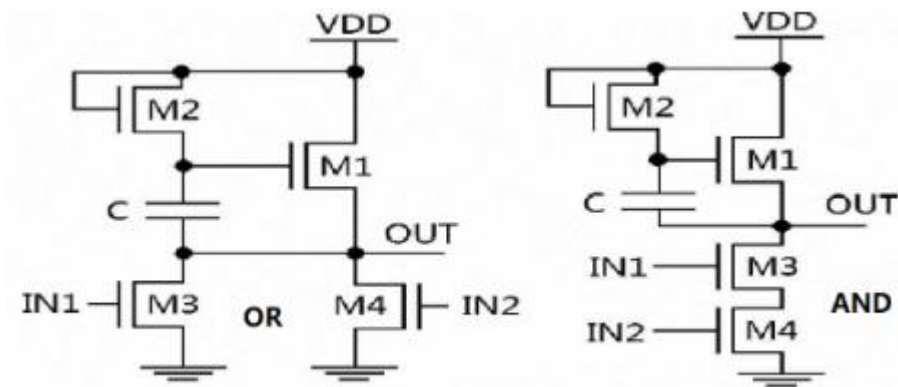


KUVA 20. Vaihtosuuntaajapohjainen D-kiikku (Ma & Soin 2022)

Vaihtosuuntaajapohjainen D-kiikku sisältää yli 40 ohutkalvotransistoria ja toimii 75 Hz taajuudella 10 V jännitteellä (Ma & Soin 2022).

6.2.5 Loogiset portit

Looginen portti on digitaalisen virtapiirin peruslohko. Yksinkertaiset loogiset portit koostuvat transistoreista, kuten AND, OR (kuva 21) ja NOT portit. Korkeat ja matalat jännitteet edustavat loogisia "tosi" tai "epätosi" tai binääriä 1 ja 0 arvoja loogisen toiminnan toteuttamiseksi. Optimoiduilla ohutkalvotransistori logiikka-porteilla on esitelty virtapiirejä kuten d-kiikku, laskuri ja RFID. (Chen ym. 2022.)

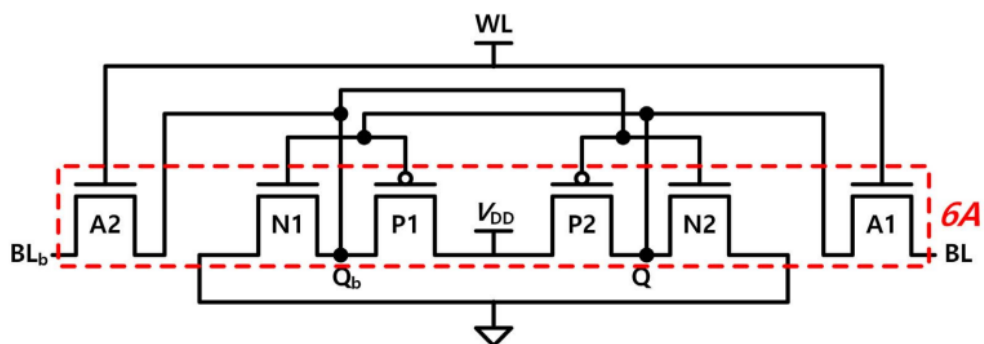


KUVA 21. Ohutkalvotransistori OR ja AND loogiset portit (Chen ym. 2022)

6.2.6 SRAM

Painetut orgaaniset ohutkalvotransistorit, joita voidaan käyttää muistina ovat tärkeitä puettavan älykkään elektroniikan saavuttamiseksi tulevaisuudessa. Verrattuna dynaamiseen hajasaantimuistiin, on staattisella hajasaantimuistilla enemmän etuja, nopean luku- ja kirjoitusnopeuksien, tallennustilan, vahvan kohinasietokyvyn ja alhaisen virrankulutuksen suhteen. (Jung & Kim 2022.)

Perinteinen SRAM (kuva 22) koostuu kuudesta ohutkalvotransistorista. Kahdesta negatiivisesta access-ohutkalvotransistorista, kahdesta alasvetävästä negatiivisesta ohutkalvotransistorista ja kahdesta ylösvetävästä positiivisesta ohutkalvotransistorista. (Jung & Kim 2022.)



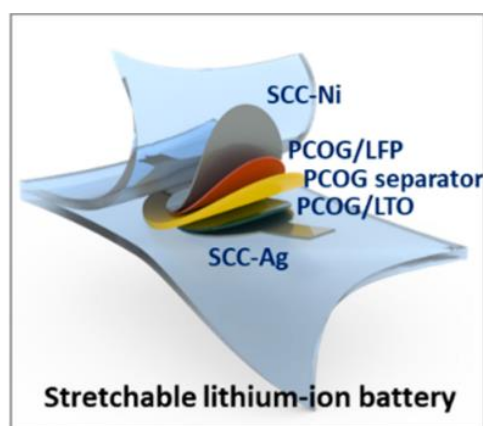
KUVA 22. Perinteinen SRAM muistisolu (Jung & Kim 2022)

6.3 Akku

Elektroniikkateollisuuden kasvu on johtanut kannettavan elektroniikan jatkuvaan tarpeeseen. Erityisesti langattomien antureiden kysyntä on lisääntynyt. Näitä laitteita voidaan käyttää älykkäässä rakennuksen ohjauksessa, teollisuusprosessi-automaatiossa, tehdasautomaatiossa ja monissa muissa sovellutuksissa. Tällaiset laitteet vaativat integroituja virtalähteitä, jotta ne pystyvät tarjoamaan vakaan virransyötön. Virtalähteen tulostaminen suoraan sirulle on edullinen ratkaisu. (Arias, Gaikwad, Maksimovic, Pister, Toor & Wen 2021.)

6.3.1 Litiumioniakku

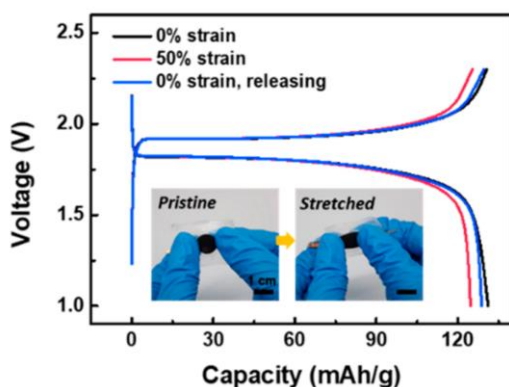
Litiumioniakku (kuva 23), on yleisin käytetty ladattavan energian varastointijärjestelmä sen korkean energiatiheyden, pitkän käyttöiän ja alhaisen itsepurkautumisnopeuden vuoksi. Litiumioniakku koostuu anodista ja katodista, virtakollektorista, erottimesta ja elektrolyytistä. (Cho, Hong, Jee, Kim, Ko, Lee, Son & Yeom 2022.)



KUVA 23. Painettu litiumioniakku (Cho ym. 2022)

Venyvä litiumioni akku koostuu nikkelpohjaisesta katodisesta virtakollektorista, litiumrautafosfaatista, erottimesta, litiumtitanaattianodista ja hopeapohjaisesta anodisesta virtakollektorista (Cho ym. 2022).

Venyvän painettavan litiumioniakun (kuva 24) purkauskapasiteetti on 0,5 C lämpötilassa 131 *mAh* painogrammaa kohden ennen rasiutusta venyttämällä, ja se säilytti korkeat kapasiteettiarvot 50 % rasiutuksella 124 *mAh* painogrammaa kohden, ja rasiutuksesta palattuaan 128 *mAh* painogrammaa kohden (Cho ym. 2022).



KUVA 24. Litiumioniakun kapasiteetti (Cho ym. 2022)

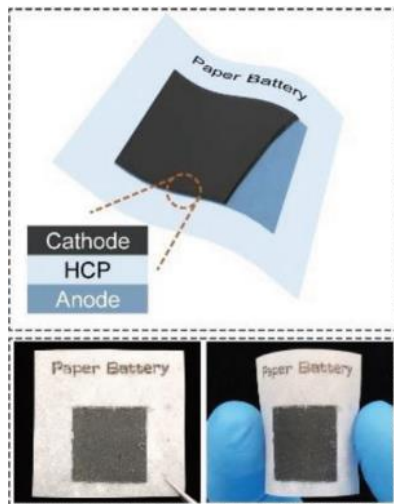
6.3.2 Natriumioniakku

Natriumioniakuilla on monia etuja, kuten runsas elementtipitoisuus, tasainen maantieteellinen jakautuminen ja alhaiset kustannuskulut, joten niitä pidetään hyvänä vaihtoehtona litiumioniakuille. Natriumioniakuilla on laajat sovellusmahdollisuudet aloilla, joilla on kohtalainen kapasiteettitiheysvaatimus. (Ding, Ji, Liu, Zhang & Zheng 2021.)

6.3.3 Sinkki-ioniakku

Sinkki-ioniakkujen (kuva 25) etuina on alhaiset valmistuskulut, korkea käyttöturvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Sinkki-ioniakuilla on potentiaalia laajamittaisien energian varastointijärjestelmien sovellutuksissa. (Ding ym. 2021.)

Sinkki-ioniakussa anodi ja katodi on painettu paperin etu- ja takapuolelle. Paperiakkujen yhteensopivuus joustavien piirien ja laitteiden kanssa mahdollistaa omavoimaisen paperijärjestelmän rakentamisen, joka yhdistää painetun akun virtapiiriin ja aurinkokennoihin. (Fan, Lee, Li & Yang 2022.)



KUVA 25. Painettu sinkki-ioniakku selluloosapaperille (Fan ym. 2022)

6.4 OLED

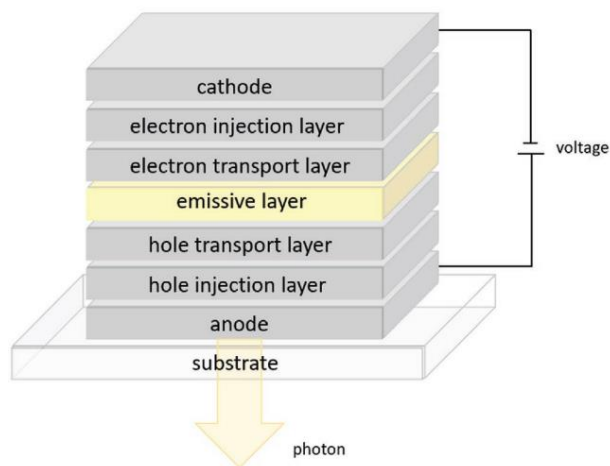
Verrattuna perinteisiin LED näyttöihin on OLED-näytöillä parempia ominaisuuksia kuten, alhaiset kustannuskulut, korkea hyötysuhde, nopea vasteaika, alhainen käyttöjännite, laaja katselukulma, korkea värin puhtaus ja yksinkertainen valmistusprosessi (Aswal ym. 2021).

OLED-näyttöjä käytetään laajasti OLED-televisioissa, matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja puettavissa laitteissa. OLED-näyttötekniikan yksi tärkeimmistä eduista on, että se ei vaadi taustavaloa. (Aswal ym. 2021.)

Perinteisiä LED-valoja käytetään nykyään valaistukseen hehkulamppujen ja loisteputkien sijaan. Valkoisia OLED-valoja pidetään seuraavan sukupolven valaistusteknologiana, koska ne ovat ylivoimaisia, keveyden, joustavuuden ja käyttöiän suhteen. (Aswal ym. 2021.)

OLED-näytöt ovat puolijohdelaitteita, joissa valon säteily tapahtuu orgaanisten materiaalien elektroluminesenssin seurauksena. Elektroluminesenssi tapahtuu, kun orgaanisessa materiaalissa elektronit ja elektroniaukot aiheuttavat rekombinaation valon muodostamiseksi. Emissioaallonpituus riippuu tasojen energiavälistä, joista elektronit ja elektroniaukot yhdistyvät. (Aswal, Chauhan, Jha & Yakhmi 2021.)

OLED-näytöt ovat tyypillisesti ohuita monikerroksisia laitteita (kuva 26), jotka koostuvat orgaanisten puolijohdekerroksista. Varauksenkantajat eli elektronit ja elektroniaukot saadaan katodista ja anodista ulkoista jännitettä käyttämällä. Varauksenkantajat ruiskutetaan elektroni- ja elektroniaukkoinjektiokerroksiin. Elektronit ja elektroniaukot siirtyvät kuljetuskerroksen läpi emissio kerrokseen, jossa tapahtuu varauksenkantajien rekombinaatio ja eksitonien muodostuminen. Elektroluminesenssi tapahtuu, kun eksitonit palautuvat säteilevästi virittyneestä tilasta perustilaan. (Busch, Bräse, Gan, Hong, Leonhardt, Seibert & Zhang 2021.)



KUVA 26. OLED näytön kerrokset (Busch ym. 2021)

OLED-näyttöjen suorituskykyä mitataan värin puhtaudella, kirkkaudella, luminanssilla, käyttöiällä ja tehokkuudella. Vaikka jokaisen parametrin on oltava korkeita, käytännön sovellutuksissa käyttöikä ja hyötysuhde ovat paljon tärkeämpiä. (Aswal ym. 2021.)

OLED-näytön luminanssin heikkeneminen ajan myötä vakioympäristössä ja sähköiset toimintaparametrit kuten virrantiheys ja jännite ovat OLED-näytön käyttöiän mitta (Aswal ym. 2021).

6.5 Aurinkokenno

Ympäristön saastumisen ja fossiilisten polttoaineiden lisääntyvän käytön vuoksi aurinkokennoa pidetään tehokkaimpana ratkaisuna ongelmaan. Aurinkoenergia

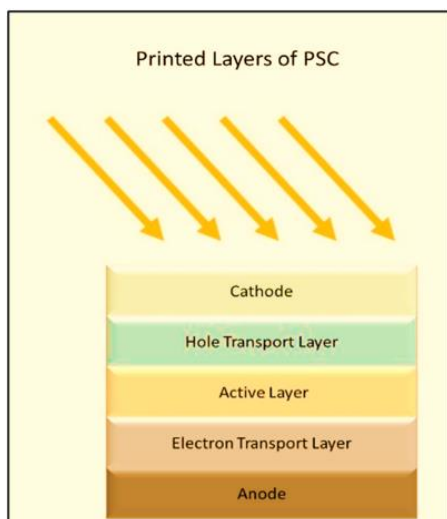
on hyvä kilpailija fossiilisille polttoaineille runsaan saatavuuden ja alhaisen hinnan vuoksi. Koska aurinkoenergia ja muut uusiutuvat energialähteet eivät tuota hiilidioksidipäästöjä, ovat ne puhtaampia ja kestävämpiä ratkaisuja. Koska aurinkoenergia on skaalautuvaa ja se voidaan varastoida sähköverkkoon tai akkuihin, se on tehokas energianlähde. (Kapoor, Najar, Parida, Samantaray, Sharma, Singh & Soga 2022.)

Viimeaikaisen kehityksen ansiosta perovskiiittiaurinkokennojen hyötysuhteeksi on saatu 25,6 % ja niiden stabiilisuus on 450 tuntia. Perovskiiittipohjaisen aurinkokennon tehokkuus kasvaa jatkuvasti ja on verrattavissa kaupallisesti saataviin aurinkokennoihin. Skaalautuvuus on kuitenkin edelleen puutteellista valmistuksessa käytettävän korkean lämpötilan vuoksi. (Kapoor ym. 2022.)

Joustavalla aurinkokennoteknologialla tavoitellaan ohuiden, kevyiden aurinkosähkömoduuleiden alhaisen kustannuksen massatuotantoa, joita voidaan integroida mihin tahansa pintaan tai rakenteeseen. Matalan lämpötilan menetelmiä kehitetään, jotta joustavat perovskiiittiaurinkokennot voidaan rakentaa substraatteihin kuten polyeteenitereftalaattiin, jota ei voida käsitellä yli 200 °C lämpötilassa. (Dong, Hamukwaya, Hao, Hao, Mashingaidze, Xing, Zhao & Zhong 2022.)

Joustavan perovskiiittiaurinkokennon korkea hyötysuhde johtuu alhaisen lämpötilan elektronisista kerroksista ja korkealaatuisen perovskiiitin vaimentimen ominaisuuksista (Dong ym. 2022).

Tyypillinen aurinkokenno (kuva 27) koostuu substraatista, anodista, katodista, kantajakuljetuskerroksista ja fotoaktiivisesta kerroksesta. Joustavan alustan lämmönkestävyyden vuoksi kantajakuljetuskerros voidaan valmistaa vain alhaisessa lämpötilassa. (Gu, Li, Song, Zhang & Zhao 2022.)



KUVA 27. Perovskiittiaurinkokennon kerrokset (Kapoor ym. 2022)

POHDINTA

Työssä oli tarkoitus perehtyä painettavaan elektroniikkaan teknologiana ja painettavan elektroniikan valmistusprosessiin, sekä tutustua RFID-järjestelmiin, orgaanisiin ohutkalvotransistoreihin, akkuihin, OLED-näyttöihin ja aurinkokennoihin. Työn tärkeimpänä tavoitteena oli ymmärtää painettavan elektroniikan eri valmistusprosessit, sekä yleisimmät käyttökohteet ja huomata painettavana elektroniikan potentiaali ja tulevaisuuden mahdollisuudet.

Työssä käsiteltiin tiiviisti todella laajaa aihepiiriä, jonka uutuuden ja jatkuvan kehityksen vuoksi ajankohtaista kirjallisuutta tai muuta materiaalia oli todella haastavaa löytää, mutta useiden vieraskielisten artikkeleiden kautta saatiin kasattua aiheesta hyvä ja kattava teoriakokonaisuus, jonka avulla aihetta päästiin tutki-
maan. Työn yksikään osa-alue ei onnistunut varsinaisen helposti. Työn ongelmat saatiin ratkottua useita artikkeleita lukemalla. Opinnäytetyön tavoite saavutettiin hyvin ja opinnäytetyössä perehdyttiin kattavasti painettavan elektroniikan valmistustapoihin, sekä yleisimpiin sovellutuksiin ja näiden toimintaan kasvattaen teoreettista ymmärrystä aiheeseen liittyen.

Työn lopputuloksena tuli opittua painettavan elektroniikan hyvät ja haittapuolek verrattuna perinteisiin valmistusmenetelmiin, sekä opittua eri paino- ja tulostusmenetelmien omat hyötypuolek, sekä käyttökohteet. Työssä opittiin, että eri painomenetelmiä sovelletaan yksinkertaisempiin piireihin, joita voidaan tuottaa nopeasti ja edullisesti. Työssä myös opittiin tulostusmenetelmien olevan soveltuvaisia vaikeampiin ja yksityiskohtaisempiin piireihin edullisemmalla prototypoinnilla, hitaamman valmistusnopeuden kustannuksella.

Työn lopputuloksena tuli opittua painettavan elektroniikan sovellutusten tulevaisuuden mahdollisuuksia. Työssä opittiin, kuinka transistorit ovat painettavan elektroniikan tärkeimpiä komponentteja, sekä RFID-järjestelmien suurta kysyntää usealla eri alalla. Lopputuloksena opittiin kuinka painettava elektroniikka mahdollistaa transistoroiden, RFID-järjestelmien, OLED-näyttöjen, akkujen ja loogisten porttien massatuotannon ja kuinka tärkeitä ne ovat jokapäiväisessä elämässä.

Painettava elektroniikka ei varmasti tule täysin korvaamaan perinteistä elektroniikkaa, mutta tulee olemaan todella lupaava vaihtoehto elektroniikan valmistuksessa ja tuoden mahdollisuuden valmistaa hybridielektroniikkaa käyttäen sovellutuksissa perinteisen elektroniikan lisäksi painettavaa elektroniikkaa.

Opinnäytetyö tarjoaa teknologiaan kiinnostuneelle kattavan ja tiiviin teoriapohjan painettavan elektroniikan valmistukseen sekä sovellutuksiin ja sen pohjalta on helppo lähteä tutkimaan painettavan elektroniikan teknologiaa, tuotantotapoja ja sen sovellutuksia syvällisemmin.

LÄHTEET

- Arias, A., Gaikwad, A., Maksimovic, F., Pister, K., Toor, A., Wen, A. 2021. Stencil-printed Lithium-ion micro batteries for IoT applications. *Nano energy* 82 (1), 105666.
- Aswal, D., Chauhan, A., Jha, P., Yakhmi, J. 2021. Organic Devices: Fabrication, Application, and Challenges. *Journal of electronic materials* 51 (2), 447-485.
- Battaglini, N., Bridonneau, N., Carn, F., Lemarchand, J., Mattana, G., Noël, V., Piro, B., Zrig, S. 2022. Challenges, Prospects, and Emerging Applications of Inkjet-Printed Electronics: A Chemist's Point of View. *Angewandte Chemie (International ed.)* (e202200166)
- Beedasy, V., Smith. P. 2020. Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing. *Materials* 13 (3), 704.
- Bennet, M., Kayalvizhi, M., Mageswari, M., Priya, M., Sathya, N. 2022. Design of Low Complexity Accumulator Using Finfet for Various Technologies. *International journal on smart sensing and intelligent systems* 10 (5), 225-235.
- Bodenstein, C., Dörsam, E., Hirmer, K., Sauer, H. 2019. Printing process and characterization of fully pad printed electroluminescent panels on curved surfaces. *JCT research* 16 (6), 1673-1681.
- Borgese, M., Costa, F., Dicandia, F., Genovesi, S., Manara, G., Michel, A. 2021. A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things. *Sensors* 21 (9), 3138.
- Busch, J., Bräse, S., Gan, X., Hong, G., Leonhardt, C., Seibert, J., Zhang, Z. 2021. A Brief History of OLEDs – Emitter Development and Industry Milestones. *Advanced materials* 33 (9), 2005630.
- Chen, J., Gao, H., Guo, M., Liu, B., Liu, C., Wu, W., Xiao, W., Yu, H., Zhang, L. 2022. Strategies for Applications of Oxide-Based Thin Film Transistors. *Electronics* 11 (6), 960.
- Chen, X., He, H., Khan, Z., Mehmood, A., Virkki, J. 2021. A Bending passive RFID Tag as a Sensor for High-Temperature Exposure. *International Journal of Antennas and Propagation* 2021 (5541197), 1-9.
- Chen, Z., Gengenbach, U., Koker, L., Mansour, M. 2020. Approaches for Solution-Processed Encapsulation of Printed Medical Wearable Devices. *Current directions in biomedical engineering* 6 (3), 131-134.
- Cho, J., Hong, S., Jee, S., Kim H., Ko, Y., Lee, K., Son, J., Yeom, B. 2022. Intrinsically Stretchable and Printable Lithium-Ion Battery for Free-Form Configuration. *ACS nano* 16 (2), 2271-2281.

Choi, H., Hong, J., Jeong, Y., Kim, S., Kwon, H., Li, X., Nam, S. 2021. Overview of recent progress in electrohydrodynamic jet printing in practical printed electronics: focus on the variety of printable materials for each component. *Materials advances* 2 (17), 5593-5615.

Choong, Y., Chua, C., Kuo, C., Low, H., Tan, H. 2022. 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. *Progress in Materials Science* 127 (100945), 1-6.

Costa, C., Lanceros-Méndez, S., Oliveira, J. 2018. *Printed Batteries: An Overview*. 1. painos. Braga: Wiley.

Ding, J., Ji, D., Liu, W., Zhang, H., Zheng, H. 2021. 3D printed high-performance sodium ion and zinc ion full batteries. *Journal of alloys and compounds* 900 (1), 163394.

Dong, J., Hamukwaya, S., Hao, H., Hao, L., Mashingaidze, M., Xing, J., Zhao, Z., Zhong, T. 2022. A Review of Recent Developments in Preparation Methods for Large-Area Perovskite Solar Cells. *Coatings* 12 (2), 252.

Fan, H., Lee, S., Li, J., Yang, P. 2022. Printed Zinc Paper Batteries. *Advanced science* 9 (2), 2103894-2103909.

Faris, T., Winscom, C. 2020. Statistical modelling of organic thin film transistor behaviour. *Organic electronics* 92 (5), 105846.

Fellegara, H., Ferro, V., Fugikawa-Santos, L., Gomes, T., Gozzi, G., Marques, A., Quadros, M., Rebello, P., Santos, D., Santos, E., Valério, P., Vieira, K. 2021. Environmentally Friendly, Semi-transparent, Screen Printed Antenna for RFID Tag Applications. *Brazilian journal of physics* 51 (3), 434-438.

Ganz, Simone., Lupo, Donald., Nisato, Giovanni. 2016. *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*. 1. painos. Dubai: Jenny Stanford Publishing.

Gu, Z., Li, P., Song, Y., Zhang, Y., Zhao, R. 2022. Flexible and Wearable Optoelectronic Devices based on Perovskites. *Advanced materials technologies* 7 (3), 2101124.

Hoelck, O., Jakubowska, M., Kallmayer, C., Krshiwoblozki, M., Scenev, V., Schneider-Ramelow, M., Szalapak, J., Werft, L. 2022. Low-Temperature Processible Highly Conducting Pastes for Printed Electronics Applications. *Luettu* 10.4.2022.

<https://doi.org/10.1002/adem.202101752>

Jankowski-Miśkiewicz, P., Lukacs, P., Pietrikova, A., Potencki, J., Tomaszewski, G. 2022. Inkjet-printed HF antenna made on PET substrate. *Microelectronics and reliability* 129 (2), 114473.

Jung, S., Kim, Woojo. 2022. Static Response of Three-Dimensional and Printed Complementary Organic TFTs-Based Static Random-Access Memory. *IEEE electron device letters* 43 (3), 438-441.

Jäntti, R., Karakoç, A., Palko, T., Paltakari, J., Ruttik, K., Wiklund, J., Yiğitler, H. 2021. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5 (3), 89.

Kapoor, A., Najar, A., Parida, B., Samantaray, N., Sharma, A., Singh, A., Soga, T. 2022. Recent Development and Directions in Printed Perovskite Solar Cells. *Physica status solidi. A, Applications and materials science* 219 (6), 2100629.

Ma, L., Soin, N. 2022. Recent Progress in Printed Physical Sensing Electronics for Wearable Health-Monitoring Devices: A Review. *IEEE sensors journal* 22 (5), 3844-3859.

Ogasahara, Y. 2022. Yield and leakage current of organic thin-film transistor logic gates toward reliable and low-power operation of large-scale logic circuits for IOT nodes. *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 61 (SC1044), 1-8.

Persad, J., Rocke, S. 2022. A Survey of 3D Printing Technologies as Applied to Printed Electronics. *IEEE access* 10 (1), 27289-27319.

Proto-Electronics. 2020. Flexible PCBs: advantages and disadvantages. *Luettu* 4.4.2022.

<https://www.proto-electronics.com/blog/flexible-pcbs-advantages-disadvantages>

Rackauskas, S. 2018. *Flexible Electronics*. 1. painos. London: IntechOpen.

Secor, E. 2018. Principles of Aerosol Jet Printing. *Flexible and printed electronics* 3 (3), 35002.

Suganuma, K. 2014. *Introduction to Printed Electronics*. 1. painos. New York: Springer.