

Tomi Kinnunen

RFID-LIITOSALUSTAT

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Tomi Kinnunen: RFID-Liitosalustat

Tampereen yliopisto

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

Kandidaatintyö

Toukokuu 2021

Radiotaajuinen etätunnistus (engl. Radio Frequency Identification, RFID) on käytössä monissa tunnistussovelluksissa, kuten logistiikassa, kulku- ja tunnistekorteissa, kirjastoissa ja useissa muissa. Se tarjoaa monia etuja muhin tunnistusmenetelmiin verrattuna. RFID-tunnisteet sallivat laajemman lukuetaisyyden, usean tunnisteen samanaikaisen lukemisen, kiinteiden esineiden läpi lukemisen ja tunnisteen uudelleenkirjoitettavuuden.

Yksi suurimpia esteitä laajemmalle käyttöönotolle on RFID-tunnisteen suhteellisen suuri hinta. Uudet valmistusmenetelmät ja -materiaalit ovat viime vuosina alentaneet tunnisteen hintaa, ja aihetta tutkitaan yhä aktiivisesti. Työn tarkoituksena on tuoda esille joitakin nyt käytössä olevia tunnisteen valmistusmenetelmiä ja liitosalustojen materiaaleja. Lisäksi työn lopussa esitellään uutta alalla tapahtuvaa tutkimusta ja mahdollisia tulevaisuudessa käyttöön tulevia menetelmiä ja materiaaleja.

Työ on muodoltaan kirjallisuustutkimus, joka käsittelee aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, artikkeleita ja tutkimusjulkaisuja. Rakenteen alkaa RFID-tekniikan taustateorian selityksestä ja etenee valmistusmenetelmien lyhyeen esittelyyn ja eri menetelmien etujen ja haittojen vertailuun. Työ jatkuu liitosalustojen rakentamiseen käytettyjen materiaalien esittelyllä ja materiaalien etujen ja haittojen vertailulla. Lopuksi työssä esitellään alalla tapahtuvaa uutta tutkimusta ja mahdollisia tulevaisuudennäkymiä.

Työ osoittaa, että materiaali- ja valmistuskulut ovat suurin este RFID-tekniikan laajemmalle käytölle. Se tuo esille, miten tätä ongelmaa on viime vuosina korjattu ja miten nykyisessä tutkimuksessa pyritään yhä etsimään halvempia materiaaleja ja menetelmiä. Työssä esitellään nykyisin käytössä olevat ja mahdolliset tulevaisuudessa käyttöön tulevat materiaalit ja menetelmät. Näiden etuja ja haittoja vertaillaan hinnan, ekologisuuden ja muiden mahdollisten ongelmien kannalta.

Avainsanat: Radiotaajuinen etätunnistus, RFID, RFID-liitosalustat

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RFID	2
2.1 RFID järjestelmän koostumus	2
2.2 Aktiivinen ja passiivinen RFID	3
2.3 Taajuusalueet	5
2.4 Lähi- ja kaukokenttä	6
3. VALMISTUSMENETELMÄT	8
3.1 Etsaus	8
3.2 Additiivinen tuotanto	9
3.3 Mustesuihkutulostus	9
3.4 3D-suoratulostus	10
3.5 Silkkipaino	11
3.6 Syväpaino	11
3.7 Fleksopaino	12
4. LIITOSALUSTAN MATERIAALIT	14
4.1 Muovit	14
4.2 Paperit, pahvit	15
4.3 Tekstiilit	16
4.4 Puu	17
5. NYKYINEN TUTKIMUS	18
5.1 Mikrosiruton RFID	18
6. YHTEENVETO	20
LÄHTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	engl. Additive manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus
HF	engl. High frequency, korkeataajuus
IC	engl. Integrated circuit, mikropiiri
IoT	engl. Internet of things, esineiden internet
LF	engl. Low frequency, matalataajuus
NFC	engl. Near field communication, lähitunnistus
PC	Polykarbonaatti
PE	Polyeteeni
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PI	Polyimidit
RF	engl. Radio frequency, radiotaajuus
RFID	engl. Radio frequency identification, radiotaajuinen etätunnistus
SAW	engl. Surface acoustic wave, akustinen pinta-aalto
UHF	engl. Ultra high frequency, ultrakorkeataajuus

1. JOHDANTO

Radiotaajuinen etätunnistus (engl. Radio Frequency Identification, RFID) on kehitetty jo 1940-luvulla [1], mutta sille löydetään yhä jatkuvasti uusia käyttötarkoituksia. RFID-teknologia on laajassa käytössä erilaisissa avain-, maksu- ja tunnistuskorteissa sekä passeissa. Se on myös kasvavasti käytössä erityisesti logistiikan ja kaupan aloilla, joissa RFID-tunnisteiden käyttö optisten viivakoodien osittaisena korvaajana on tuottanut hyviä tuloksia. Lisäksi RFID-teknologiaa on ehdotettu ja sovellettu moniin esineiden internetin (engl. Internet of things, IoT) laitteisiin tiedonsiirtoon, teknologian monipuolisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi.

Yksi suurimpia esteitä suuremmalle käyttöönotolle on RFID-teknologian suhteellisen suuri hinta muihin tunnistusmenetelmiin verrattuna. Halvimmat RFID -tunnisteet maksavat noin 0.10 €/kpl, paljon enemmän kuin esimerkiksi viivakoodit [2]. Tutkimus on viime vuosina tuonut esille monia mahdollisuuksia teknologian kehittämiseksi ja tunnisteiden hinnan alentamiseksi, tunnisteiden liitosalustan materiaalivalinnan ja valmistusmenetelmän valinnan avulla.

Uudet valmistusmenetelmät ja -materiaalit mahdollistavat RFID-tunnisteiden tuottamisen entistä halvemmin ja ympäristöystävällisemmin sekä tunnisteiden liittämisen suoraan tuotteen tai pakkauksen pintaan erillisen liitosalustan sijasta. Tämän työn tarkoitus on tuoda esille joitakin nyt käytössä olevia liitosalustojen materiaaleja ja tunnisteiden valmistusmenetelmiä.

Työ on muodoltaan kirjallisuustutkimus, joka käsittelee aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, artikkeleita ja tutkimusjulkaisuja. Rakenne alkaa luvussa kaksi RFID-teknologian taustateorian selityksestä ja etenee luvussa kolme valmistusmenetelmien lyhyeen esittelyyn ja eri menetelmien etujen ja haittojen vertailuun. Työ jatkuu luvussa neljä liitosalustojen rakentamiseen käytettyjen materiaalien esittelyllä ja materiaalien etujen ja haittojen vertailulla. Lopuksi luvussa viisi esitellään alalla tapahtuvaa uutta tutkimusta ja mahdollisia tulevaisuudessa käyttöön tulevia menetelmiä ja materiaaleja. Luvussa kuusi on yhteenveto työn esittelemistä tiedoista.

2. RFID

RFID on tunnistusmenetelmä, joka nimensä mukaisesti perustuu radioaaltoihin. Sen etuna muihin yleisimpiin tunnistusmenetelmiin, kuten optisiin viivakodeihin tai kosketuspohjaisiin tunnistuslaitteisiin verrattuna on pidemmällä etäisyydellä mahdollinen toiminta sekä suurempi tiedonsiirtonopeus ja muisti. RFID:n etuja ovat myös tunnisteiden uudelleenkirjoitettavuus ja kyky lukea suuri määrä tunnisteita samanaikaisesti. [3]

Optiset tunnistusmenetelmät, kuten perinteinen viivakoodi vaativat suoran näköyhteyden lukijan ja tunnisteiden välillä. Kosketuspohjaiset tunnistusmenetelmät, kuten perinteiset sirukortit, vaativat kosketuksen tunnisteiden ja lukijan välillä. RFID-tekniikassa nämä vaatimukset vältetään toteuttamalla tiedonsiirto radioaaltojen kautta, jotka voidaan lukea toteutuksesta riippuen useiden metrien etäisyydeltä ja esineiden läpi. [3] [4]

Toiminnan heikkoutena on radioaaltojen vaimeneminen esimerkiksi vedessä ja metalleissa. Myös sääolosuhteiden vaikutus esineen pintaan toteutettuun tunnistukseen on huomattava, joskin näiden vaikutusta voidaan heikentää sijoittamalla tunniste esineen tai pakkauksen sisäpuolelle.

RFID-tekniikka on laajalti käytössä tuotannon ja logistiikan aloilla, tunnistuksen ja tavaramerkkien hallinnan tehtävissä. Tekniikkaa käytetään myös monissa kulkuavaimissa, passeissa, kirjastoissa, lemmikki- ja karjaeläimissä ja monissa muissa tunnistustilanteissa. RFID:n eräs ilmentymä lähitunnistus (engl. Near field communication, NFC) on laajassa käytössä tunnistuskorteissa, avainkorteissa ja kontaktittomissa lähimaksukorteissa. [3] [5]

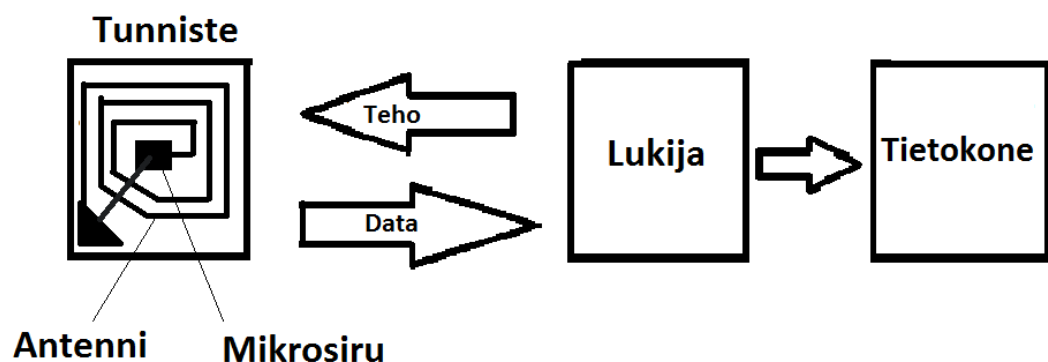
Kaupallisesti RFID-tunnisteiden pääasiallisena ongelmana on niiden suhteellisen suuri hinta. Tällä hetkellä halvimmat RFID-tunnisteet maksavat noin 0.10 €/kpl eli monikertaisesti enemmän kuin esimerkiksi optiset viivakoodit [2]. Erityisesti logistiikan ja kaupan tehtävissä tarvitaan erittäin suuria määriä mahdollisimman halpoja tunnisteita, josta syystä viivakoodit ovat yhä yleisin käytetty tunnistusmenetelmä. [3]

2.1 RFID-järjestelmän koostumus

RFID-järjestelmä sisältää tunnistettavaan esineeseen liitetyn tunnisteiden (engl. tag, transponder) sekä lukijan (engl. reader), jota voidaan myös joissakin laitteistoissa käyttää tunnistuslaitteisiin kirjoittamiseen. Lisäksi lukija voi olla yhteydessä erilliseen tietokoneeseen, joka

käsittelee luettua tietoa ja ohjaa lukijoiden toimintaa. Tunniste koostuu liitosalustasta, mikrosirusta ja antennista.

Mikrosirun muistiin on tallennettu haluttu tunnistedata, ja se tuottaa lukijalle luettavan radiosignaalin. Antennia käytetään radioaaltojen vastaanottoon ja lähettämiseen. Lukijan tullessa lukuetaisyydelle tunnisteesta tunniste vastaanottaa sen lähettämän radiosignaalin ja alkaa lähettää tunnistetietoaan lukijalle. Kuvassa 1 esitellään RFID-systeemin toimintaperiaate. [3] [4]



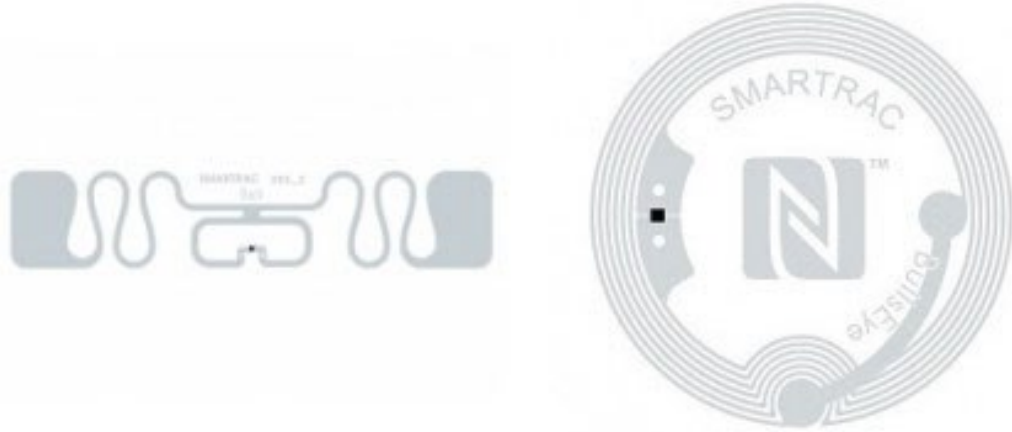
Kuva 1. RFID-systeemin toiminta.

Tunnisteita jaotellaan niiden taajuusalueen perusteella, sekä sen mukaan, sisältävätkö ne virtalähteen. Eri tunnisteiden suunnittelu ja rakenne eroavat huomattavasti näiden erojen sekä eri käyttötarkoituksiin tarkoitettujen tunnisteiden erojen vuoksi. Eri taajuusalueilla toimivat tunnisteet vaativat rakenteeltaan hyvin erilaiset antennit. Virtalähteen sisällyttäminen mahdollistaa muun muassa tunnisteiden muistin laajentamisen ja lukuetaisyyden pidentämisen, mutta nostaa hintaa moninkertaiseksi. [3] [6]

2.2 Aktiivinen ja passiivinen RFID

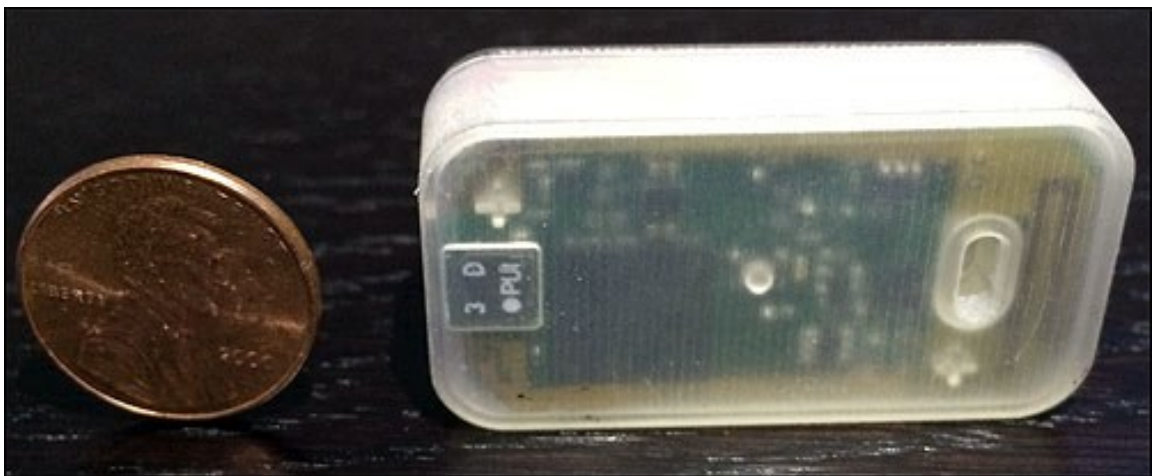
RFID-tunnisteet on jaoteltu passiivisiin, puolipassiivisiin ja aktiivisiin riippuen siitä, sisältävätkö ne virtalähteen. Passiivisessa tunnisteessa ei ole omaa virtalähdettä. Se saa tarvitsemansa tehon lukijan tuottamien radioaaltojen aiheuttamasta antenniinsa indusoituvasta pienestä virrasta. Se on siis ilman lukijaa täysin passiivinen eikä voi lähettää

mitään signaalia. Passiiviset tunnisteet toimivat vain melko lyhyellä lukuetaisyydellä, sillä niiden teho saadaan lukijan signaalista [3]. Kuvassa 2 on kaksi esimerkkiä passiivisista RFID-tunnisteista.



Kuva 2. UHF RFID-tunniste ja NFC-tunniste. [7]

Aktiivisessa tunnisteessa oma virtalähde mahdollistaa pidemmän lähetysetäisyyden ja vahvemman signaalin sekä heikomman lukijan signaalin käytön [3]. Lisäksi paristo sallii suuremman muistin käytön, jolloin tunnisteelle voidaan tallentaa suoraan tietoa, joka olisi passiivisessa tunnisteessa esimerkiksi tallennettava ulkoiseen tietokantaan. Aktiivinen tunniste voidaan myös toteuttaa lähettämään signaalinsa tasaisin väliajoin, ilman lukijan signaalia [4]. Kuvassa 3 on esimerkki aktiivisesta RFID-tunnisteesta.



Kuva 3. Aktiivinen RFID-tunniste kotelossa. [8]

Puolipassiivisessa tunnisteessa on oma pieni virtalähde, jota käytetään mikropiirin toimintojen ylläpitämiseen mutta ei signaalin lähettämiseen tai vahvistamiseen. puolipassiivisilla tunnisteilla on pidempi lukuetaisyys, sillä ne eivät tarvitse lukijan signaalin tehoa toimiakseen. [4]

Passiiviset tunnisteet ovat laajimmassa käytössä niiden huomattavasti halvemman hinnan sekä pienemmän koon vuoksi. Aktiivisia ja puolipassiivisia tunnisteita käytetään lähinnä tilanteissa, joissa erityisen pitkä lukuetaisyys tai lukijasta riippumaton toiminta ovat oleellisia. [4]

2.3 Taajuusalueet

Tunnisteissa käytetään käyttötarkoituksesta ja halutuista ominaisuuksista riippuen useita eri taajuusalueita. Valittu taajuus vaikuttaa signaalin kulkumatkaan, tiedonsiirron nopeuteen ja signaalin vaimenemiseen eri olosuhteissa. Käytettyihin taajuusalueisiin vaikuttavat myös eri maiden radiolainsäädäntö ja -sopimukset sekä standardointi. Taulukossa 1 esitellään yleisimmät käytetyt taajuusaluejärjestelmät ja niiden tyypillisiä ominaisuuksia passiivilla tunnisteilla. [9]

Taulukko 1. Passiivisten RFID-systeemien taajuusalueet Euroopassa. [9]

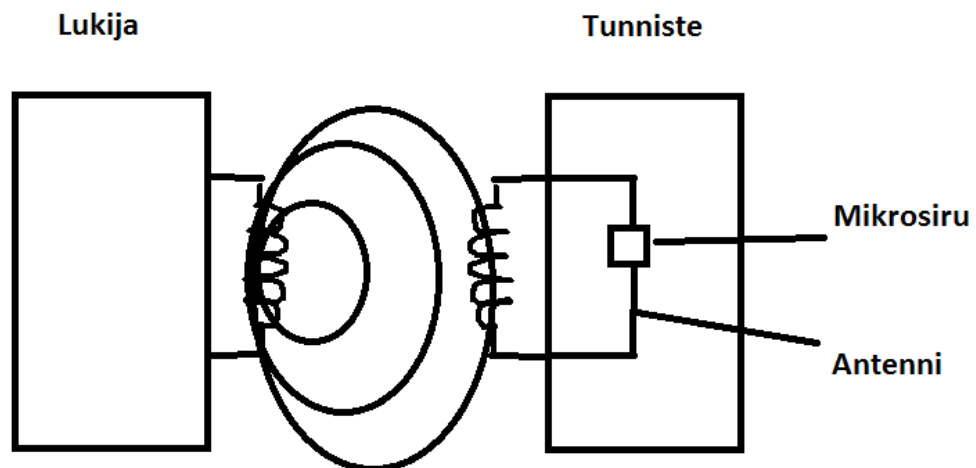
Taajuus-alue	Tyypillinen lukuetaisyys	Hyötyjä	Haittoja	Tyypillisiä käyttökohteita	
LF	<135 kHz	< 0,5m	metallien ja märekyiden vaikutus luettavuuteen erittäin pieni	pieni tiedonsiirtonopeus, elektronisen häiriövaikutus suuri, lyhyt lukuetaisyys	avainkortit, eläinten merkintä
HF	13,553-13,567 MHz	<1m	metallien ja märekyiden vaikutus luettavuuteen pieni	tarkka standardointi NFC käytössä	maksukortit, passit, kirjasotot, joukkoliikenneliput
UHF	865.6-867.6 MHz	5m	suuri tiedonsiirtonopeus	metallien ja märekyiden vaikutus luettavuuteen suuri, muiden käyttökohteiden interferenssi	logistiikka, IoT
Mikroaalto	2,446-2,454 GHz	1m	erittäin suuri tiedonsiirtonopeus, erittäin monen tunnisteiden luku samanaikaisesti	Metallien ja märekyiden vaikutus luettavuuteen erittäin suuri	Tietullit, ajoneuvojen tunnistus

Matalataajuisia (engl. low frequency, LF) ja korkeataajuisia (engl. high frequency, HF) tunnisteita käytetään pääasiassa sovelluksissa, joissa lyhyt lukuetaisyys ei ole ongelma vaan jopa haluttavaa, kuten avain-, henkilöllisyys- ja maksukorteissa. Erilaisissa logistiikan ja kaupan alojen käytöissä yleisimpiä ovat ultrakorkeataajuiset (engl. Ultra high frequency, UHF) tunnisteet, pitkän lukuetaisyytensä ja nopean tiedonsiirtonsa vuoksi. [3] [4] [10]

2.4 Lähi- ja kaukokenttä

Eri taajuusalueilla lukijan ja tunnisteiden välisen tiedonsiirron toteuttamiseen käytetään eri menetelmiä. Matalammassa taajuusalueissa käytetään magneettikenttään perustuvaa induktiota lähikentässä. Korkeammassa taajuusalueissa sähkökenttään perustuvaa kytkemistä kaukokentässä. Nämä vaativat muodoltaan suuresti eroavat antennit.

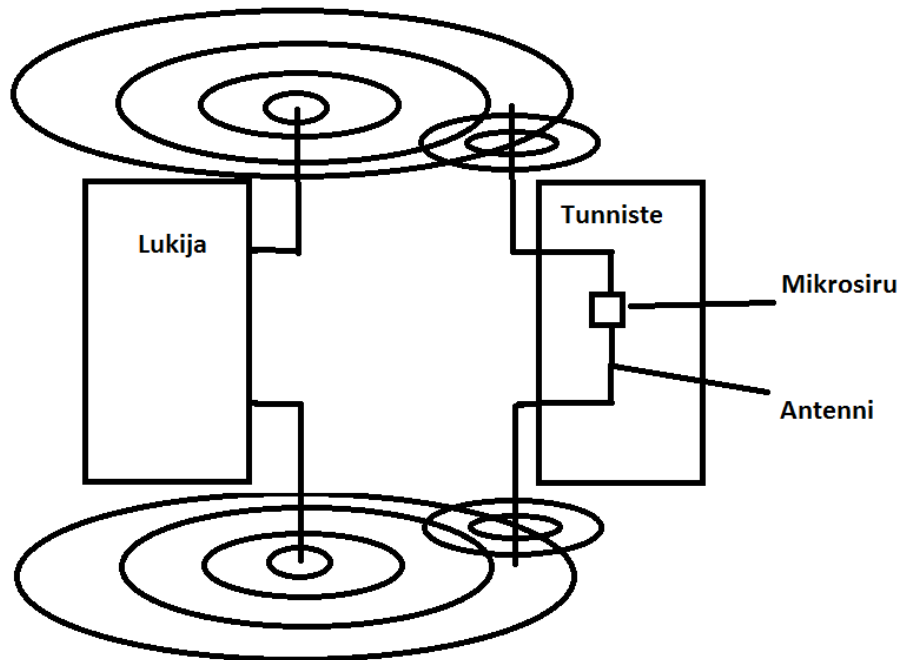
LF- ja HF-taajuusalueilla toimivissa tunnisteissa käytetään käämimuotoisia antennia induktiivisen kytkennän muodostamiseen. Kuvassa 4 esitellään induktiivisen kytkennän teoria. Lukijan käämimuotoinen antenni muodostaa lähialueelleen magneettikentän, joka kytkyy tunnisteeseen vastaavaan anteniin sähkömagneettisen induktion avulla.



Kuva 4. Lähikentän induktiivinen kytkentä.

UHF- ja mikroaalto-taajuusalueilla toimivissa tunnisteissa käytetään sähkökenttää ja dipoliantenneja yhteyden muodostamiseen. Tämä mahdollistaa pidemmän lukuetaisyy-

den, mutta häiriöherkemman signaalin. Kuvassa 5 on sähkökenttään perustuvan kytkeytymisen teoria, jossa lukijan dipoliantenni säteilee sähkömagneettisia aaltoja ja lukee niiden takaisinsironnan tunnisteesta dipoliantennista. [4] [10]



Kuva 5. Kaukokentän sähkökenttään perustuva kytkeytyminen.

3. VALMISTUSMENETELMÄT

RFID-tunnisteen valmistus koostuu antennin valmistamisesta liitosalustaan eli substraattiin sekä mikropiirin valmistuksesta ja liittamisestä antenniin. Yleisimmät käytössä olevat liitosalustat ovat ohuita muovi- tai paperipintoja. Useimmiten valmistettu tunniste liitetään liimalla haluttuun pintaan. Joskus tunniste asetetaan muovisten suojakuorien sisälle tai johonkin erityiskäyttöön sopivaan pakkaukseen. [11]

Tämä työ keskittyy substraatin materiaalivalintaan ja antennin valmistamiseen substraatin pintaan. Tämä voidaan tehdä joko substraktiivisesti tai additiivisesti. Substraktiivisessa tuotannossa substraatti aluksi peitetään johtavalla materiaalilla, josta suurin osa poistetaan jättäen vain halutut johtimet. Substraktiivisia tuotantomenetelmiä käytetään laajalti ja niiden menetelmät ja laitteistot ovat helposti saatavilla. [11] [12]

Additiivisessa tuotannossa materiaalia lisätään substraatin pintaan vain halutuille alueille. RFID-antennien tuottamiseen sopivia additiivisia menetelmiä on useita, joissa kaikissa on etuja ja haittoja. Tässä kappaleessa esitellään yleisimpiä valmistusmenetelmiä ja niiden etuja RFID-tunnisteiden valmistuksessa.

3.1 Etsaus

Etsaus on yleisin käytetty menetelmä RFID-antennien valmistuksessa, sekä yleisemmin elektroniikan tuotannossa [12]. Se perustuu substraatin peittämiseen kerroksella johtavaa materiaalia, josta tietyt alueet suojataan ja loput poistetaan. Yleisimmin johdinmateriaalina käytetään kuparia tai alumiinia, johon asetetaan haluttu kuvio valoresistillä ja muu johdinmateriaali syövytetään pois kemiallisesti. [13]

Etsauksen huonoina puolina on kuitenkin suuri materiaalikulutus, sillä suurin osa johdesta poistetaan, sekä kemiallisten hukkatuotteiden hävittämiskustannukset. Tämä on haitallista sekä tuotantokustannusten että ekologisten haittojen kannalta. Ongelmana on myös prosessin monimutkaisuus ja monivaiheisuus, jotka nostavat tuotannon hintaa. Monien substraattimateriaalien käyttö on lisäksi mahdotonta etsatessa, koska ne eivät kestä prosessissa käytettyjä kemikaaleja. [11] [12]

3.2 Additiivinen tuotanto

Additiivisissa tuotantomenetelmissä johdemateriaalia lisätään substraatin pintaan. Tähän on useita eri menetelmiä, jotka voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, suoratulostusmenetelmät ja muut, sapluunan tai painolaatan vaativat menetelmät. Suoratulostusmenetelmissä materiaalia asetetaan suoraan halutuille alueille, jolloin materiaalin tuhlaus on minimaalista. Esimerkkejä tästä ovat eri 3D-tulostusmenetelmät kuten mustesuihkutulostus ja 3d suoratulostus. [14] [15]

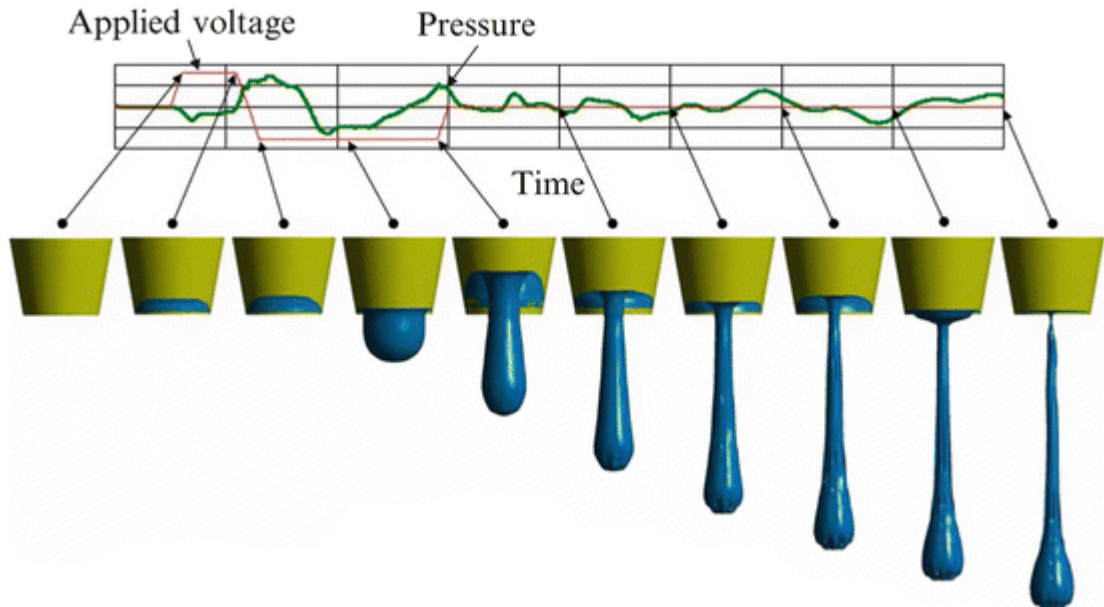
Muissa menetelmissä käytetään joko sapluunaa, johon on leikattu haluttu johdekuvio tai painolaattaa, jossa johdekuvio on korotettu tai upotettu. Sapluunaa käytettäessä substraatti peitetään ja johdemateriaali painetaan sapluunan läpi haluttuihin kohtiin. Painolaattaa käytettäessä muste siirretään sen korotusten kautta substraatin pintaan. [16] [15]

Sekä sapluunaa, että painolaattaa käyttäviä menetelmiä on useita, mutta näissä kaikissa etuna suoratulostusmenetelmiin nähden on prosessin nopeus. Huonona puolena on suurempi materiaalin tuhlaus, sillä johdetta jää sapluunaan tai painolaattaan. Yleisin sapluunaan perustuva menetelmä on silkkipaino ja painolaattaan perustuvia syväpaino ja Fleksopaino. Teollisuudessa käyttöön on otettu erityisesti flekso- ja silkkipaino, sillä nämä soveltuvat hyvin laajoihin tuotantomääriin ja nopeaan tuotantoon. [15] [16]

Kaikissa additiivisen tuotannon menetelmissä viimeisenä prosessivaiheena on substraatin pintaan asetetun johtavan musteen sintraus. Sintrauksessa muste kiinteytetään sijaintiinsa, yleensä lämmittämällä sitä noin lämpötilaan 250 °C. Moni substraattimateriaali, kuten useat muovit, puu- ja tekstiilipohjaiset materiaalit, eivät kestä näin suuria lämpötiloja, mikä estää lämpösintrauksen käytön. Joudutaan sen sijaan käyttämään valosintrausta, jossa voimakasta xenonlamppua käytetään tarvittun energian tuottamiseen paljon pienemmissä lämpötiloissa. [17]

3.3 Mustesuihkutulostus

Mustesuihkutulostus on käytössä elektroniikan tuotannossa ja sen soveltuvuutta RFID-tuotannossa on tutkittu viime vuosina. Mustesuihkutulostuksessa johtavaa mustetta syötetään pisaroittain vain halutessa. Tällöin voidaan tuottaa erittäin tarkkoja ja ohuita johtimia ja säästää johdemateriaalia. Mustesuihkutulostus toimii hyvin käytettäessä substraattimateriaalina muovia tai paperia. Kuva 6 esittää yhden mustepisaran tulostustapahtuman. [14]



Kuva 6. Mustesuihkutulostuksen yksittäinen mustepisara. [15]

Huonona puolena on prosessin hitaus. Suuria tuotemääriä toteuttaessa mustesuihkutulostus ei siis ole sopiva menetelmä. Myös tuotettujen johdinpintojen ohuus on ongelma RFID-tunnisteiden valmistuksessa. Joudutaan printtaamaan useita kerroksia johdetta ja tekemään sintraus useita kertoja, jolloin prosessi hidastuu edelleen. [14] [15]

3.4 3D-suoratulostus

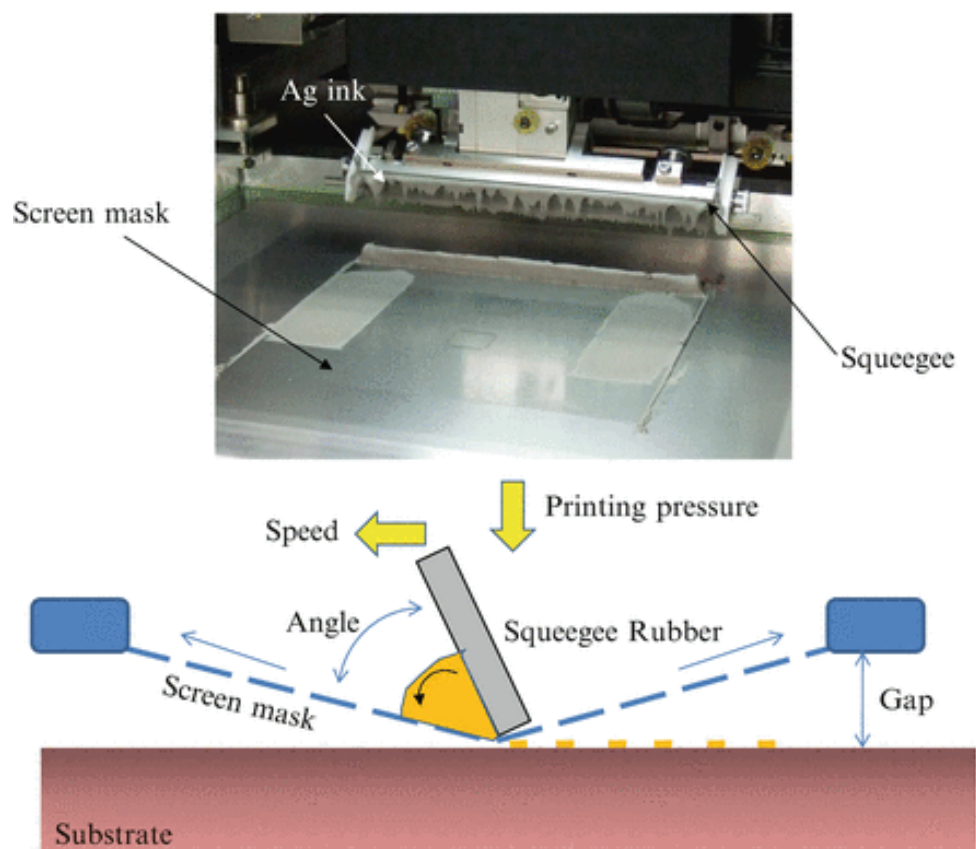
3D-suoratulostus viittaa useaan eri menetelmään, jotka on kehitetty passiivisten tai aktiivisten elektronisten komponenttien valmistamiseen suoraan tietokonetiedostosta [6]. 3D-suoratulostuksessa johtavaa mustetta syötetään jatkuvasti, toisin kuin mustesuihkutulostuksessa. Menetelmän käyttö RFID-tunnisteiden valmistuksessa on ollut tutkimuksen aiheena ja tuottanut lupaavia tuloksia [18] [19] [20].

Menetelmä sallii suhteellisen paksun ja täten johdeominaisuuksiltaan hyvän johdekerroksen tulostamisen. Tämä mahdollistaa sujuvan antennien valmistamisen pinnaltaan epätasaisen tai mustetta imevän substraatin, kuten tekstiilien, puun ja paperin pintaan. Toisaalta jatkuva mustevirta ja paksu tuloste johtavat suurempiin materiaalikuluihin. [21]

3.5 Silkkipaino

Silkkipainossa sapluuna asetetaan substraatin ylle ja johdemateriaalia levitetään lastalla sapluunan läpi. Se on laajalti käytössä sekä RFID-tunnisteiden että laajemmin elektronikan valmistuksessa. Kuvassa 7 on esimerkki silkkipainosta ja sen toimintaperiaatteen esittely.

Etuna silkkipainossa ovat useimpia muita menetelmiä paksummat ja täten paremmin johtavat pinnat. Se on kuitenkin hitaampaa kuin osa muista menetelmistä, suhteellisen epätarkkaa ja materiaalihukaltaan melko suurta. [15]



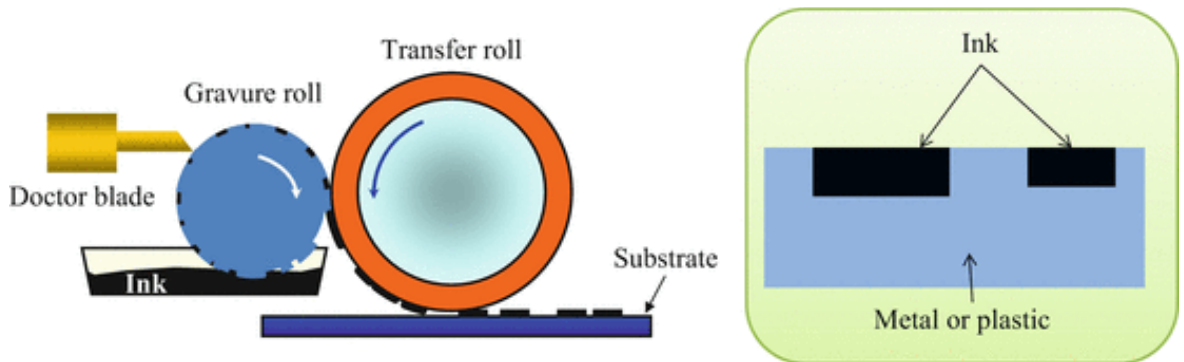
Kuva 7. Silkkipainon toimintaperiaate. [15]

3.6 Syväpaino

Syväpaino on menetelmä, jossa haluttu kuvio on upotettu painolaatalle yleensä fotolito graafisesti. Upotettuna ovat ne alueet, joihin mustetta halutaan painaa. Painolaatta on asetettu sylinterin ympärille, joka pyöriessään upottaa sen musteseen, ylimääräinen

muste pyyhitään pois raakelilla ja kuvio painetaan substraatin pintaan. Tämä toimintaperiaate esitellään kuvassa 8.

Menetelmän etuna on nopeus ja tarkkuus. Syväpaino soveltuu erityisesti erittäin laajojen tuotantomäärien toteuttamiseen paperisubstraatille. Syväpaino ei kuitenkaan sovellu suuren paineen vuoksi joustaviin tai pehmeisiin substraatteihin. [15]

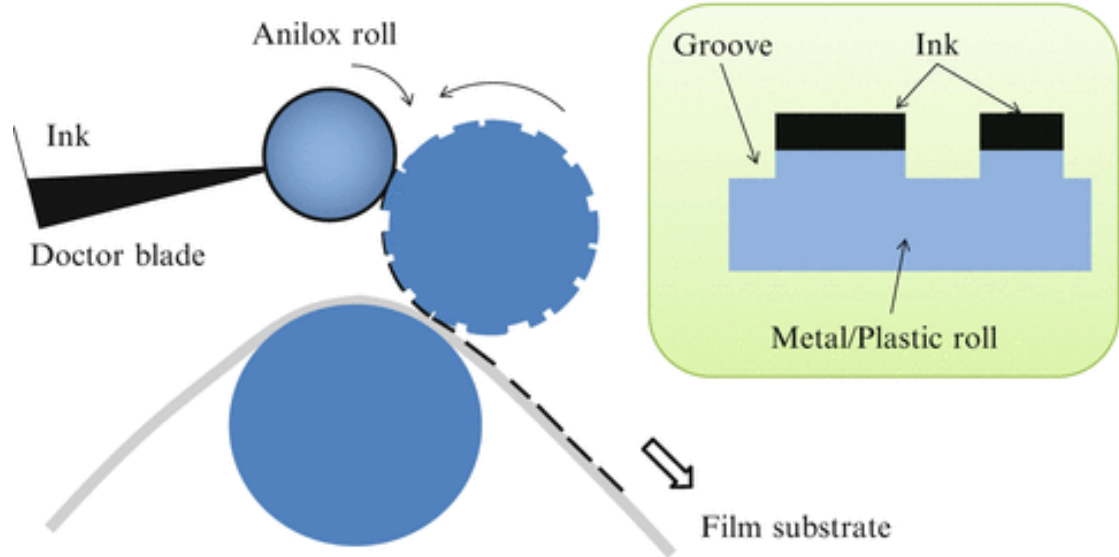


Kuva 8. Syväpainon toimintaperiaate. [15]

3.7 Fleksopaino

Fleksopaino on kohopainomenetelmä, jossa käytetään joustavaa painolaattaa. Haluttu kuvio korotetaan painolaatalle ja painolaatta asetetaan sylinterin ympärille. Pyörivä sylinteri upottaa kuvion musteeseen ja siirtää sen substraatille. Fleksopaino soveltuu käytettäessä joustavaa substraattimateriaalia. Se on laajassa käytössä RFID-tunnisteiden ja laajemmin elektroniikan valmistuksessa. Kuvassa 9 esitellään Fleksopainon toimintaperiaate.

Menetelmän etuna on suuri nopeus ja tarkkuus. Esimerkiksi paperit, pahvit, polymeerit toimivat hyvin substraatteina. Se on nykyisin erityisesti paperille painettujen RFID-tunnisteiden valmistuksessa. [15]



Kuva 9. Fleksopainon toimintaperiaate. [15]

4. LIITOSALUSTAN MATERIAALIT

RFID-tunnisteiden liitosalustan materiaalina toimii yleisimmin jokin muovi, jotka sopivat erityisesti etsauspohjaiseen tuotantoon. Uudet tuotantomenetelmät ovat kuitenkin nostaneet esille useita uusia materiaaleja, jotka voivat tarjota useita etuja. Sopivalla materiaalivalinnalla voidaan säästää tuotantokustannuksissa ja valmistaa ympäristöystävällisemmin.

Käytettävän materiaalin tulisi olla halpaa, helposti ja laajasti saatavilla sekä ympäristö- ja kierrätysnäkökulmasta hyväksyttävää. Optimaalista materiaalikulutuksen kannalta olisi, jos liitosalustana voitaisiin käyttää suoraan tuotteen tai pakkauksen pintaa, jota tunnisteella yksilöidään. Tunnisteiden laajimmissa käyttökohteissa logistiikan ja kaupan aloilla keskeisiä materiaaleja ovat puu ja pahvi. Näiden materiaalien erityispiirteet tekevät kuitenkin niiden käytöstä tunnisteiden liitosalustana hankalaa. [22]

Luvussa 3 esitellyissä additiivisen tuotannon menetelmissä substraatin keskeisiä ongelmia aiheuttavia ominaisuuksia ovat sen pinnan karkeus ja epätasaisuus sekä johdemuutteen imeytyminen substraattiin. Epätasaisesti levinnyt tai substraattiin imeytynyt johdemuste heikentää muodostetun piirin sähköisiä ominaisuuksia ja täten tunnisteiden toimintaa.

4.1 Muovit

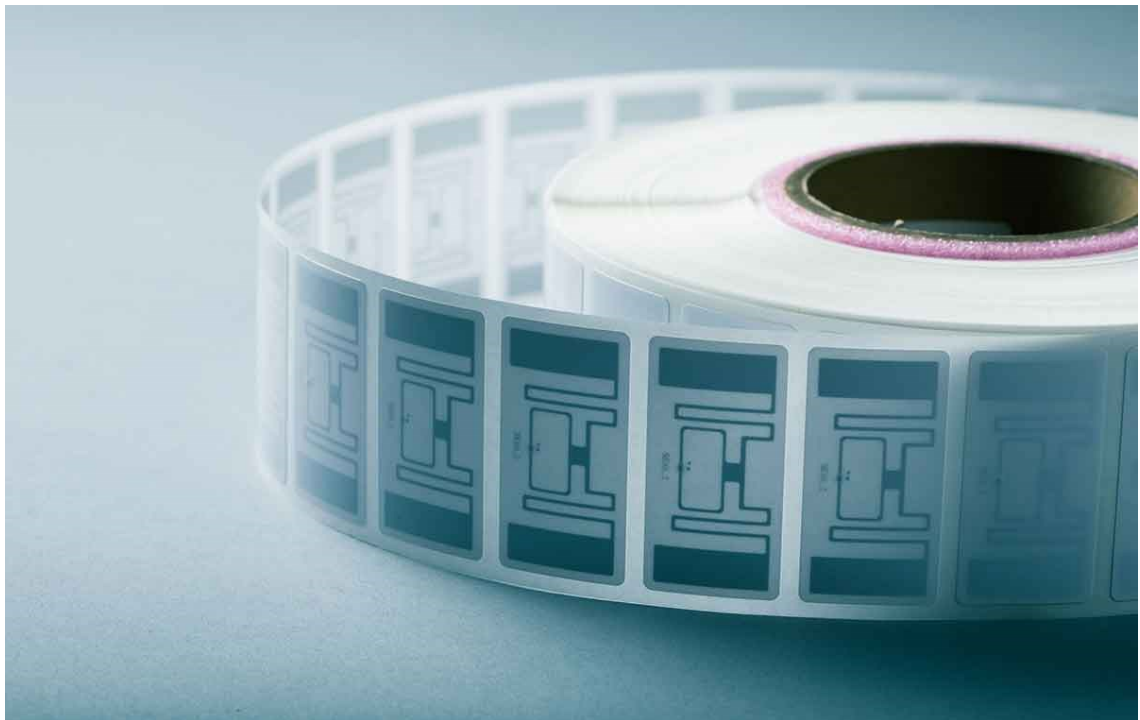
Erilaiset muovit ovat yleisimpiä RFID-tunnisteissa käytettyjä liitosalustamateriaaleja. Eri-tyisesti Polyetyleenitereftalaatti eli PET on laajalti käytössä etsausprosessin substraattina. PET on ominaisuuksiltaan hyvin soveltuvaa käyttöön sekä RFID-tunnisteissa, että elektroniikassa laajemmin. Se on joustavaa, suhteellisen halpaa ja laajassa tuotannossa. PET-muovin huono lämmönkestävyys estää additiivisessa tuotannossa lämpösintrauksen käytön, joka hidastaa prosessia. Muovien käyttö on myös ympäristönäkökulmasta epähaluttavaa, varsinkin kun tavoitteena on halpojen kertakäyttöisten tunnisteiden toteutus. [23]

PET:n lisäksi muita RFID-tunnisteiden valmistukseen ehdotettuja muoveja ovat polyeteeni PE, polykarbonaatti PC ja polyimidit PI. PE käytössä on monia ongelmia sen heikon lämmönkestävyyden ja muiden ominaisuuksien vuoksi, mutta se on houkuttelevaa erittäin alhaisen hinnan takia. PI on ominaisuuksiltaan hyvin kestävä ja muutoin sopivaa, mutta korkean hintansa vuoksi se ei sovellu laajaan tuotantoon. [23]

4.2 Paperit, pahvit

Paperissa haluttavaa on erityisesti sen halpuus, laaja saatavuus ja biohajoavuus. Myös pahvi hyöttyy samoista ominaisuuksista. Pahvi on lisäksi laajassa käytössä monissa käyttötarkoituksissa, joihin RFID-tunnisteita sovelletaan, joka mahdollistaa tunnisteen rakentamisen suoraan pahvipakkauksen pintaan.

Paperille painetut antennit ovat tällä hetkellä käytössä RFID-tunnisteiden valmistuksessa, esimerkiksi kuvassa 10 Stora Enson ECO RFID-tunnisteissa [24]. Nykyisin tunnisteen valmistamiseen paperituotteisiin käytetään lähinnä flekso- ja silkipainomenetelmiä, jotka soveltuvat hyvin suuriin tuotantomääriin. Paperin ja pahvin substraattina käyttöön parhaiten sopivien menetelmien valitseminen on ollut tutkimusaiheena [18] ja eri menetelmiä tutkitaan yhä. Paperi- ja pahvipinnat ovat epätasaisia ja johtavaa mustetta imeviä, joten painomenetelmien valinta ja tulostetun johteen paksuus vaikuttavat huomattavasti tunnisteen toimintaan.

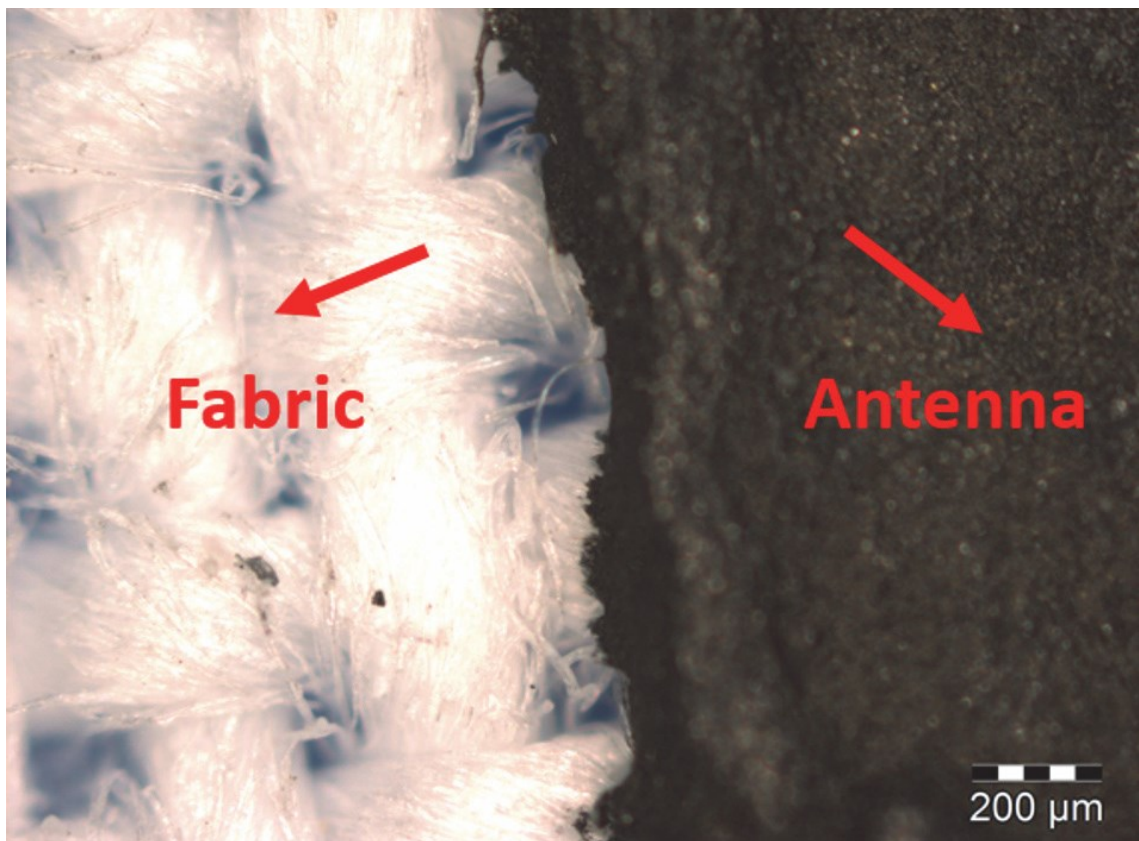


Kuva 10. Paperille painettuja RFID-tunnisteita. [24]

4.3 Tekstiilit

Vaatteisiin liitetty elektroniikka on yksi mahdollinen RFID-tunnisteiden tulevaisuuden käyttökohde. Nykyisin saatavilla olevissa vaatteisiin liitetyissä RFID-tunnisteissa yleensä muoviseen liitosalustaan kiinnitetty tunniste on upotettu tekstiiliin sisään. Erillisen muovisen liitosalustan sijasta suoraan tekstiilipintaan painettu tai ommeltu tunniste on mahdollinen tapa säästää materiaalikuluissa.

Johtavasta langasta ommellun UHF RFID-antennin on testattu toimivan puettuna noin 4,5 metrin etäisyydellä [25]. Myös tekstiileihin printattava antenni on ollut tutkimuksen kohteena [16] [20] [21] ja tuottanut lupaavia tuloksia. Kuvassa 11 on mikroskooppikuva puuvillapinnalle 3D-suoratulostetusta antennista.

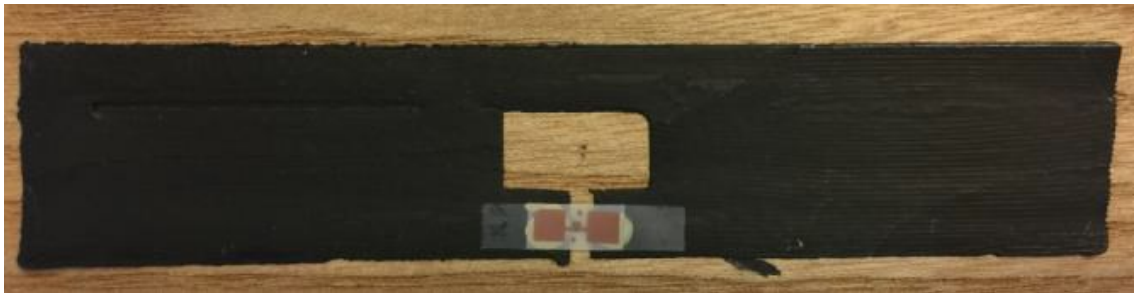


Kuva 11. Puuvillalle tulostettu RFID-antenni. [20]

4.4 Puu

Moni RFID-tunnisteen käyttökohde, kuten kuljetuslaatikot on rakennettu puusta, joten sen käyttö substraattina on houkuttelevaa. Puu on halpaa, laajasti saatavilla ja biohajoavaa. Aiheesta on julkaistu tutkimuksia [19] [26] [27], jotka osoittavat puutuotteisiin tulostetun antennin toimivaksi, mutta toteutukseltaan hankalaksi.

Puun rakenteen vuoksi sen käyttö on hankalaa. Puupinta on karkeaa, epätasaista ja huokoista, joka vaikeuttaa monien valmistusmenetelmien käyttöä. Useimpien tulostusmenetelmien käyttö on mahdotonta, koska johtava muste ei asetu karkealle pinnalle halutusti ja osittain imeytyy puuhun. Joudutaan käyttämään paksun mustekerroksen toteutavaa menetelmää, kuten 3D-suoratulostusta. Kuvassa 12 on puuviilulle 3D-suoratulostuksella toteutettu RFID-antenni. [19]



Kuva 12. Puuviilulle tulostettu RFID-antenni. [19]

5. NYKYINEN TUTKIMUS

Viime vuosina on julkaistu suuri määrä tutkimuksia, patenteja ja muita julkaisuja RFID-järjestelmien aiheesta. Tunnisteiden valmistusmenetelmät, erilaiset käyttökohteet ja niihin soveltuvat RFID-järjestelmät ovat jatkuvasti tutkimustyön aiheena [28] [29] [30]. Erityisesti tutkimuksen aiheena ovat olleet antennien suunnittelu ja rakentaminen [31] [32] [33]. Erilaiset antenni- ja substraattimateriaalit, antennin muodot ja muut tavat parantaa antennin toimintaa mahdollistavat tiettyihin käyttökohteisiin soveltuvien antennien valmistamisen.

Tutkimus tämän työn esittelemillä alueilla, tunnisteiden liitosalustan materiaalit ja valmistusmenetelmät, jatkuu aktiivisesti. Sekä työssä esiteltyjen, että muiden menetelmien ja materiaalien soveltuvuutta RFID-tuotantoon tutkitaan. Erityisesti tutkimusaiheena ovat olleet tekstiilit ja paperi liitosalustan materiaalina [34] [35]. Myös eri 3D-tulostusmenetelmien soveltuminen RFID-tunnisteiden tuotantoon on säilynyt tutkimustyön yleisenä aiheena [35] [36] [37] [38].

Yksi nouseva tutkimuskohde on mikrosiruttomien RFID-tunnisteiden kehitys, joka mahdollistaa huomattavasti halvempien tunnisteiden valmistuksen. Mikrosiruttomat tunnisteet ovat herättäneet paljon huomiota viime vuosina, sillä ne tarjoavat mahdollisuuden alentaa tunnisteiden valmistuskustannuksia huomattavasti.

5.1 Mikrosiruton RFID

Edellisten kymmenen vuoden aikana on tehty paljon tutkimusta mikrosiruttomien RFID-tunnisteiden luomiseksi ja kehittämiseksi. Mikrosirun valmistamisen ja liittämisen kulut ovat noin kaksi kolmasosaa tunnisteiden hinnasta, joten tämä on luonnollinen kohde valmistushinnan alentamisessa [39]. Tunnisteiden toiminnallisuus kuitenkin kärsii lukuetaisyyden, häiriöherkkyyden sekä erityisesti muistin koon kannalta. Mikrosiru toimii perinteisessä RFID-tunnisteessa sen muistina, joten sen korvaaminen pienentää mahdollisen tunnisteelle kirjoitettavan tiedon kokoa. [38] [39]

Ensimmäiset mikrosiruttomat tunnisteet kehitettiin 2000-luvun alussa. Teknologian kehittyminen viime vuosina on mahdollistanut näiden tulehisen laajempaan käyttöön. Tutkimus viime vuosina on keskittynyt eri tapoihin laajentaa muistikokoa. [40]

Mikrosiruttomien RFID-tunnisteiden toimintaperiaatteita on useita, mutta ne kaikki perustuvat samaan ideaan. Tunnisteen pintaan tehdään radioaaltoja heijastavia ja näiden perusteella tunnistettavia johtimia tai muita järjestelmiä. Tämän aikaansaamiseksi käytetään esimerkiksi riviä eri taajuuksille viritettyjä dipoliantenneja tai akustisiin pinta-aaltoihin (engl. surface acoustic wave, SAW) perustuvaa järjestelyä. [39] [40]

SAW-pohjaiset tunnisteet ovat muodoltaan perinteisiä RFID-tunnisteita vastaavia, mutta mikrosiru on korvattu akusto-optisesta materiaalista tehdyillä komponenteilla. SAW on nykyisin käytetyin menetelmä mutta sillä on haittapuolia. SAW-tunniste on hankala tehdä useille tässä työssä esitellyille liitosalustan materiaaleille ja se ei ole hinnaltaan paljon halvempi kuin mikrosirullinen tunniste. [39]

Toinen menetelmä mikrosiruttoman tunnisteen tuottamiseen perustuu antennien asetteluun viivakoodia muistuttavaan riviin. Tunnisteen mikrosiru korvataan rivillä eri taajuuksille viritettyjä antenneja ja lukija käy koko taajuusalueen läpi vastaanottaen tietyille taajuuksille viritettyjen antennien vastaukset ja saaden näin tunnisteen tiedot. [39]

Muita menetelmiä on tutkittu ja kehitetty viime vuosina ja mikrosiruttomat tunnisteet säilyvät nykyisessä RFID-tunnisteisiin liittyvässä tutkimustyössä keskeisessä asemassa. Mikrosirun poistaminen alentaa tunnisteen valmistushintaa jopa yli 50%, joka tekee näistä paljon kilpailukykyisempiä optisten viivakoodien kanssa. RFID-tunnisteiden oleelliset hyödyt, kuten pidempi lukuetaisyys, esineiden läpi lukeminen ja usean tunnisteen samanaikainen lukeminen pätevät myös mikrosiruttomiin tunnisteisiin. Mikrosiruttomissa tunnisteissa hintaa voidaan siis alentaa erittäin merkittävästi, silti säilyttäen RFID-tunnisteiden tärkeimmät edut muihin tunnistusmenetelmiin verrattuna.

6. YHTEENVETO

RFID-tunnisteet tarjoavat monia etuja muihin tunnistusmenetelmiin verrattuna. Niiden käyttö on kasvussa ja niille löydetään jatkuvasti uusia käyttökohteita. Päälimmäinen este nykyistä laajemmalle käyttöönotolle on RFID-tunnisteiden suuri hinta muihin tunnistusmenetelmiin verrattuna. Erityisesti käyttötarkoituksissa, joissa tarvitaan erittäin suuri määrä kertakäyttöisiä tunnisteita optiset viivakoodit ovat pysyneet johtoasemassa erittäin matalan hintansa vuoksi. RFID-tunnisteiden laajempi käyttö esimerkiksi logistiikan ja kaupan aloilla on mahdollista vain, jos tunnisteiden hintaa kyetään alentamaan huomattavasti.

Tätä ongelmaa on viime vuosina lievennetty soveltamalla tunnisteiden tuotantoon uusia menetelmiä, ja liitosalustojen materiaaleja. Aihetta tutkitaan yhä aktiivisesti ja tällä hetkellä tutkimuksen alaisena olevat menetelmät ja materiaalit voivat tulevaisuudessa huomattavasti alentaa tunnisteiden hintaa ja tehdä niiden laajemmasta käytöstä taloudellisesti mahdollista.

Additiivisilla tuotantomenetelmillä voidaan säästää materiaalia sekä hinnan alentamiseksi että ympäristöystävällisemmän tuotannon aikaansaamiseksi. Käytössä ovat jo erityisesti flekso- ja silkkipaino. Myös 3D-tulostusmenetelmien soveltuvuutta RFID-tunnisteiden valmistuksessa on tutkittu paljon.

Paperi, pahvi ja tekstiilit ovat houkuttelevimpia mahdollisia liitosalustan materiaaleja. Erityisesti haluttavaa on tunnisteiden rakentaminen suoraan tunnistettavan tuotteen tai pakauksen pintaan. Näillä materiaaleilla voidaan mahdollisesti tuottaa huomattavasti halvempia tunnisteita, mutta niiden käytössä on otettava huomioon jokaisen materiaalin ominaisuudet ja niihin parhaiten soveltuvat valmistusmenetelmät.

Mikrosiruttomat RFID-tunnisteet ovat saaneet paljon huomiota viime vuosina mahdollisena tapana säilyttää RFID-tekniikan oleelliset edut, alentaen silti hintaa yli puolella. Niiden suunnittelu ja käyttöönotto on vielä melko rajattua, mutta jatkuva tutkimus alueella saattaa tulevina vuosina tehdä niistä hyvin kilpailukykyisiä tietyillä aloilla.

RFID-tekniikka on laajassa käytössä monissa tunnistussovelluksissa ja se on kasvavassa käytössä. Tunnistustekniikka on oleellista monilla aloilla, logistiikasta IoT-laitteisiin. RFID-tunnisteiden valmistusmenetelmät ja niiden liitosalustamateriaalit ovat olleet viime vuosina usean tutkimuksen aiheena ja tarjoaa mahdollisuuden korjata RFID-tekniikan suurimman ongelman. Näissä esiin tulleilla menetelmillä voidaan alentaa tunnisteiden hintaa merkittävästi ja tehdä niistä taloudellisesti entistä kilpailukykyisempiä.

LÄHTEET

- [1] H. Stockman, Communication by means of reflected power, Proceedings of the IRE, vol. 36 (10), 1948, pp. 1196–1204.
- [2] V. Burton, Encyclopedia of management 8th ed, Gale, Farmington Hills, MI, USA, 2019.
- [3] K. Finkenzeller, RFID Handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication 3rd ed., John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 2010.
- [4] R. Amin., L. Yang, M. Tentzeris, RFID-enabled sensor design and applications, Artech House, Boston, MA, USA, 2010.
- [5] A. Voulodimos, et al., A complete farm management system based on animal identification using RFID technology, Computers and electronics in agriculture, vol. 70 (2), Elsevier B.V, Amsterdam, NL, 2010, pp. 380–388.
- [6] I. Gibson et al., Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing 2nd ed., Springer, New York, NY, USA, 2015.
- [7] Mitä RFID on?, Aksulit oy, verkkosivu Saatavissa (viitattu 24.4.2021): <https://aksulit.com/rfid/>.
- [8] Iotera develops active RFID tag with 4-mile read range, rfid journal, 2014, verkkosivu Saatavissa (viitattu 24.4.2021), <https://www.rfidjournal.com/iotera-develops-active-rfid-tag-with-4-mile-read-range>
- [9] V. Chawla, D. Ha, An overview of passive RFID, IEEE communications magazine vol. 45 (9), 2007, pp. 11–17.
- [10] R. Want, An introduction to RFID technology, IEEE pervasive computing vol 5 (1), IEEE, 2006, pp. 25–33.
- [11] D. Guha, Y. Antar. Microstrip and printed antennas: New trends, techniques and applications 1st ed. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 2010.
- [12] T. Björninen et al. The effect of fabrication method on passive UHF RFID tag performance, International journal of antennas and propagation, vol. 2009, Hindawi Publishing Corporation, New York, NY, USA, 2009, pp. 1–8.
- [13] C. Mack, Fundamental principles of optical lithography: The science of microfabrication 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2008.
- [14] I. Hutchings, M. Graham, Inkjet technology for digital fabrication. 1st ed., John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 2013.
- [15] K. Saganuma, Introduction to printed electronics 1st ed., Springer, New York, NY, USA, 2014.

- [16] J. Wang et al., Brush-painting and photonic sintering of copper and silver inks on cotton fabric to form antennas for wearable ultra-high-frequency radio-frequency Identification tags, *Textile research journal* vol. 86 (15), SAGE Publications, London, England, 2016, pp. 1616–1624.
- [17] T. Falat et al., Low-temperature, photonic approach to sintering the ink-jet printed conductive microstructures containing nano sized silver particles, 18th European microelectronics & packaging conference, IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [18] H. He et al., Fabrication and Performance Evaluation of 3D-Printed Graphene Passive UHF RFID Tags on Cardboard, 2017 Progress in electromagnetics research symposium - Spring (PIERS), IEEE, 2017, pp. 3322–3325.
- [19] H. He et al., Fabrication and evaluation of 3D-printed heat and photonic cured graphene RFID tags on veneer, in proceedings of applied computational electromagnetics society symposium, Suzhou, China, 2017, pp. 1–2.
- [20] H. He et al., 3D-printed graphene antennas and interconnections for textile RFID tags: fabrication and reliability towards humidity, *International journal of antennas and propagation*, Vol. 2017, 2017, pp. 1–5.
- [21] T. Björninen et al., Possibilities of 3D direct write dispensing for textile UHF RFID tag manufacturing, 2015 IEEE international symposium on antennas and propagation & USNC/URSI national radio science meeting, IEEE, 2015, pp. 1316–1317.
- [22] S. Merilampi et al., The effect of conductive ink layer thickness on the functioning of printed UHF RFID antennas, *Proceedings of the IEEE* vol. 98 (9), 2010, pp. 1610–1619.
- [23] J. Niittynen et al., Alternative sintering methods compared to conventional thermal sintering for inkjet printed silver nanoparticle ink, *Thin solid films* vol 556, 2014, pp. 452–459.
- [24] ECO, Stora Enso Oyj, verkkosivu Saatavissa (viitattu 26.4.2021): <https://www.storaenso.com/fi-fi/products/intelligent-packaging/eco-by-storaenso>.
- [25] Y. Jiang et al., Machine embroidered wearable e-textile wideband UHF RFID tag antenna, 2019 IEEE international symposium on antennas and propagation and USNC-URSI radio science meeting, IEEE, Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 643–644.
- [26] M. Akbari et al. 3D printed and photonicly cured graphene UHF RFID tags on textile, wood, and cardboard substrates, *International journal of antennas and propagation* vol. 2017, Hindawi Publishing Corporation, New York, NY, USA, 2017, pp. 1–8.
- [27] E. Sipilä et al., Experimental study on brush-painted passive RFID-based humidity sensors embedded into plywood structures, *International journal of antennas and propagation* Vol. 2016, Hindawi Publishing Corporation, New York, NY, USA, 2016, pp. 1–8.

- [28] A. Mehmood et al. ClothFace: A batteryless glove-integrated user interface solution based on passive UHF RFID technology, 2020 IEEE 8th international conference on serious games and applications for health (SeGAH), IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [29] A. Healey et al., RFID sensors in medical applications, IEEE journal of radio frequency identification vol. 4 (3), 2020, pp. 212–221.
- [30] B. Pawłowicz et al., Dynamic RFID identification in urban traffic management systems, Sensors vol. 20 (15), MDPI, Basel, Switzerland, 2020, p. 4225.
- [31] L. Zhu et al., Compact wideband circularly-polarized antenna for universal UHF RFID handheld reader, Microwave and optical technology letters vol. 63 (4), 2021, pp. 1201–1206.
- [32] Z. Wang et al., Metamaterial-based, miniaturised circularly polarised antennas for RFID application, IET microwaves, antennas & propagation vol 15(6), 2021, pp. 547–559.
- [33] M. Masud et al., Using the zeroth order resonance of an inter-digital capacitive unit-cell to design antennas for passive UHF RFID tags, Electronics letters vol. 57 (11), John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2021, pp. 427–429.
- [34] A. Moraru et al., A new washable UHF RFID tag: Design, fabrication, and assessment, Sensors vol. 20 (12), MDPI, Basel, Switzerland, 2020, p. 3451.
- [35] Z. Khan et al., Dipole antennas 3D-printed from conductive thermoplastic filament, 2020 IEEE 8th electronics system-integration technology conference (ESTC), IEEE, 2020. pp. 1–4.
- [36] S. Min et al., Stretchable chipless RFID multi-strain sensors using direct printing of aerosolised nanocomposite, Sensors and actuators vol. 313, 2020
- [37] R. Colella et al., Analysis of FDM and DLP 3D-printing technologies to prototype electromagnetic devices for RFID applications, Sensors vol. 21 (3), MDPI, Basel, Switzerland, 2021, p. 897.
- [38] S. Terranova et al, Three-dimensional chipless RFID tags: Fabrication through additive manufacturing, Sensors vol. 20 (17), MDPI, Basel, Switzerland, 2020, p. 4740.
- [39] E. Perret, Radio frequency identification and sensors: From RFID to chipless RFID, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, 2014.
- [40] N. Karmakar et al., Chipless RFID sensors, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2016.