



Jari Varjus

PAINETTUIJEN KELOJEN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTELY

PAINETTUIJEN KELOJEN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTELY

Jari Varjus
Opinnäytetyö
Syksy 2012
Tietotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka, langaton tietoliikenne

Tekijä: Jari Varjus

Opinnäytetyön nimi: Painettujen kelojen ominaisuuksien määrittely

Työn ohjaaja: Timo Vainio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2012 Sivumäärä: 60 + 6 liitettä

Työn aiheena oli määrittellä painettujen kelojen ominaisuuksia. Tämän lisäksi työn tavoitteena oli tutustua painettuun älykkyyteen ja sen valmistusmenetelmiin. Työssä tutustuttiin painettujen kelojen ominaisuuksiin ja suunnitella niille testilayoutit. Työ edellytti komponenttien painoprosessien seuraamista sekä valmiiden komponenttien testaamista sähköisesti ja mekaanisesti. Lisäksi mittaustuloksia analysoitiin, jotta niiden pohjalta voitiin tehdä tietolomake komponentista.

Työ toteutettiin vaiheittain VTT:n ja OAMK:n tiloissa. Suurin osa testauksista tehtiin OAMK:n tiloissa, kun taas kelat painettiin VTT:n tiloissa olevalla painokoneella.

Tuloksia kertyi kohtuullisen hyvin, mutta tuloksesta olisi voinut saada kattavamman, mikäli painoprosessi olisi onnistunut hieman paremmin. Kelalle tehtiin kosteus- ja lämpötilatesti, lämpötilatesti, tehonkeston testaus ja tauvutustesti. Testien tulosten perusteella voidaan päätellä, että painettua kelaa on mahdollista hyödyntää jatkossa suuremmissa kytkennöissä. Saatuja tuloksia on hyvä lähteä vertailemaan tulevaisuudessa tehtävien komponenttien valmistusten kanssa. Opinnäytetyö onnistui kokonaisuudessaan kohtuullisen hyvin, vaikka aihe olikin täysin uusi minulle.

Asiasanat: kelat, passiivikomponentit, painettu älykkyyys

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme in Information Technology,
Option of Wireless Devices and Networks

Author: Jari Varjus

Title of thesis: Definition of printed inductors characteristics

Supervisor: Timo Vainio

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2012 Pages: 60 + 6
appendices

Subject of this thesis was definition of printed inductors characteristics. Objective for this subject was to get familiar with printed electronics and production methods. Also target was to learn features about printed inductors and to design test layouts for them. Watching printing process was part of this thesis to know how the components are printed and after printing testing inductors mechanically and electrically. Measuring results was analyzed and made in to information form.

The implementation was made phases at VTT and OUAS. Most of testing was done at OUAS. Inductor printing took place at VTT with their printing machines.

Results obtained were quite good, but they would have been lot comprehensive if printing process would have gone little bit better. Obtained results can be used in the future to compare them with new components. I think that my thesis went quite well even though this field of technology was all new to me.

Keywords: inductors, passive component, printed intelligence

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty kevään ja kesän aikana vuonna 2012 VTT:lle. Tehtävänä oli painetun kelan ominaisuuksien määrittäminen.

Haluan kiittää erikoistutkija ja tiimpäällikkö Mikko Paakkolanvaaraa ja erikoistutkija Harri Määttä opinnäytetyön mahdollistamisesta. Kummaltakin sain hyviä ohjeita ja neuvoja opinnäytetyön aikana. Kiitokset Timo Vainiolle opinnäytetyön ohjauksesta ja Tuula Hopeavuorelle tekstiohjauksesta. Kiitos kaikille VTT:n ja OAMK:n henkilöille, jotka avustivat opinnäytetyön aikana omalla työpanoksellaan. Kiitokset myös muille minun kanssani opinnäytetöitä tehneille opiskelijoille Jouni Räisäselle, Jussi Torpalle ja Laura Leinoselle.

Oulussa 22.8.2012

Jari Varjus

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 PAINETTU ÄLYKKYYS JA PAINOMENETELMÄT	10
2.1 Laakapaino	10
2.2 Syväpaino (Gravure)	11
2.3 Fleksopaino	13
2.4 Seripaino	14
2.5 Mustesuihku	16
2.6 Kuumapuristus	17
2.7 Kalanterointi	18
3 R2R-TEKNIikka	19
3.1 Painokoneet	19
3.1.1 PICO	19
3.1.2 ROKO	20
3.1.3 NICO	21
3.1.4 MAXI	22
3.1.5 EVA R2R-evaporator	23
3.1.6 R2R post treatment unit	24
3.1.7 R2R laser processing	24
3.1.8 SOM-100	25
3.2 Painojäljen tarkkailu	26
4 PERINTEINEN KELA	28
5 PAINETUN KELAN TOTEUTUS	32
5.1 Materiaali- ja geometriavaihtoehdot	33
5.1.1 Materiaalit	33
5.1.2 Geometriat	34
5.1.3 Kelojen paksuus	35

5.2 Toimintaa kuvaavat parametrit	35
5.2.1 Induktanssi	35
5.2.2 Toleranssi	36
5.2.3 Tehonkesto	36
5.2.4 Vastinpiiri	37
5.2.5 Toimintaolosuhteiden vaikutus	37
6 KÄYTETYT MATERIAALIT, TEKNIIKAT JA PARAMETRIT	39
6.1 Materiaalit	39
6.2 Tekniikat	39
6.2.1 Painoprosessi	39
6.2.2 Mittaaminen	42
6.3 Parametrit	42
7 MITTAUKSET	44
7.1 Induktanssi	44
7.2 Tehonkesto	48
7.3 Toimintaolosuhdetestaukset	51
7.3.1 Kosteus- ja lämpötilatesti	52
7.3.2 Lämpötilatesti	53
7.3.3 Taivutustesti	53
8 YHTEENVETO	55
9 POHDINTA	56
LÄHTEET	57
LIITTEET	61

SANASTO

Hz	Taajuuden yksikkö. Taajuus, jonka värähdysjaksot toistuvat sekunnin välein
IR	Infrapuna, sähkömagneettinen säteily
ISO7	ISO 14644-1 -standardeihin kuuluva standardi
JEDEC	Kehittää avoimia standardeja mikroelektronikka teollisuudelle
kHz	Kilohertsi. 1000 Hz. 10^3
MHz	Megahertsi. 1 000 000 Hz. 10^6
UV	Ultraviolettisäteily
μ	Mikro. Miljoonasosa. 10^{-6}

1 JOHDANTO

Painettava älykkyys on menetelmä, jolla kehitetään uusia ja edullisia ratkaisuja tuottaa helppokäyttöisiä ja toiminnallisuuksia sisältäviä painotuotteita. Tässä työssä kehityksen kohteena on elektroniikassa yleisesti käytettävä kela.

Opinnäytetyön mahdollistivat yhteistyössä Valtion teknillinen tutkimuslaitos (VTT) ja Oulun seudun ammattikorkeakoulu (OAMK). VTT on saanut kansainvälistä tunnustusta painetun älyn keskuksestaan, jossa työskentelee yli sata kokenutta painetun älykkyyden asiantuntijaa. OAMK:lla on myös oma pieni ryhmä, jonka voimin tutkitaan painetun älykkyyden käyttökohteita.

Opinnäytetyön aiheena oli tutustua painettavaan kelaan ja sen ominaisuuksiin. Painettavalle kelalle tuli tehdä useita testejä, joiden avulla kartoitetaan sen käyttöä tulevaisuudessa. Painetuista keloista oli ennestään hyvin vähän tietoa, joten ominaisuuksien määrittely oli tarpeellista.

Painettavassa älykkydessä käytettävä kela on vielä hyvin alkutekijöissään, joten opinnäytetyöaiheena se olikin hyvin mielenkiintoinen ja osittain haastava. Lisäksi opinnäytetöitä tekivät kolme muuta opiskelijaa: Laura Leinonen vastuksista, Jussi Torppa johtimista ja Jouni Räisänen kondensaattoreista. Teimmekin työn alussa tiivistä yhteistyötä, minkä ansiosta saimme työt nopeasti etenemään. Jokaisesta komponentista tulee VTT:n käyttöön tietolomake, jossa on tärkeimmät tiedot testauksista. Tietolomake on myös tämän opinnäytetyön liitteenä 6.

2 PAINETTU ÄLYKKYYS JA PAINOMENETELMÄT

Painettu älykkyys antaa painomenetelmässä käytettäville pohjamateriaaleille uusia toiminnallisuuksia, joita niillä ei aikaisemmin ollut. Näitä toiminnallisuuksia saadaan aikaiseksi, kun erilaisin painoteknisin menetelmin painetaan väriaineilla erilaisia kerroksia pohjamateriaalille. Väriaineita on useita ja niistä jokainen tuo pohjamateriaalille omanlaisen toiminnallisuuden. Jotkut väriaineista toimivat sähköä johtavana, toiset vastustavat sähkövirtaa tai jopa eristävät sitä. Yhdistelemällä erilaisia väriaineita saadaan aikaiseksi hyvin laaja valikoima erilaisia toiminnallisuuksia.

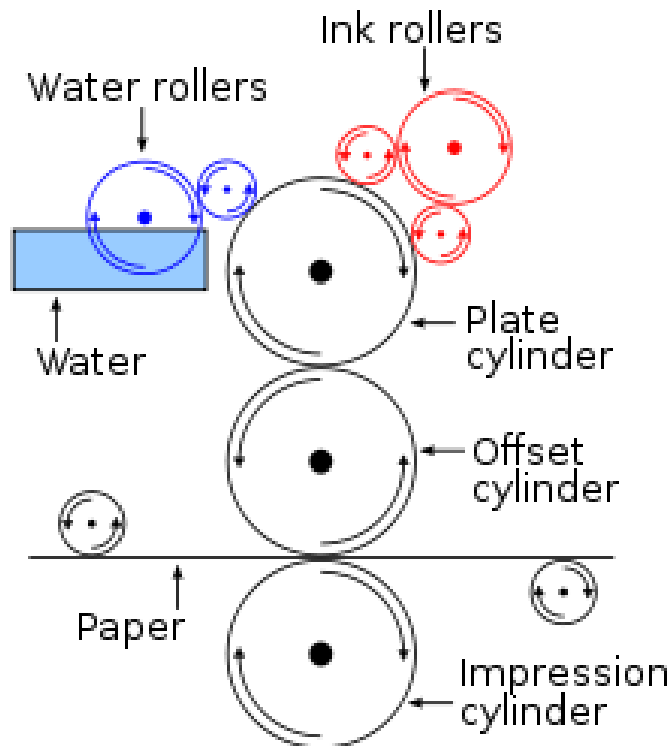
Monet painomenetelmät on kehitetty jo 1400-luvulla, kauan ennen sähköä. Ensimmäisen painokoneen keksi Johannes Gutenberg vuonna 1436. Tämä mullistus on saanut aikaan painomenetelmien kehittämisen, jota on jatkettu aina 2000-luvulle asti ja kehitys jatkuu edelleen. Seuraavissa luvuissa on kuvattu painomenetelmiä, joita käytetään myös painettavassa älykkydessä. (1.)

2.1 Laakapaino

Laakapaino eli offset on maailmalla hyvin yleisesti käytetty painomenetelmä. Painettavassa älykkydessä se ei ole kuitenkaan vielä kovin laajassa käytössä. Laakapainon painomenetelmässä painava ja ei-painava pinta ovat samassa tasossa, mutta pintamateriaalit ovat erilaisia. Yleisimmät offsetpainokoneet ovat arkkioffsetkoneet ja offsetrotaatiot. Rotaatiolle on käytössä nimitykset rullapainokone tai rainapainokone. Nimien perusteella voi päätellä, että arkkikoneet painavat arkkipaperille, kun taas rotaatiot käyttävät rullapaperia. Rotaatiota on olemassa kahta perustyyppiä: painoväriin kuivauksella varustettuja heatset-offsetkoneita ja coldset-offsetkoneita, joissa ei ole kuivainta. Joissakin rotaatioissa on sekä heatset- että coldset-osat. (1.)

Offsetissa käytetty painaminen toimii siten, että öljy ja vesi hylkivät toisiaan, jolloin ne eivät sekoitu keskenään erilaisten pintajännitteiden takia. Myös kiinteillä pinnoilla on erilaiset pintaenergiat, jolloin neste leviää ja tarttuu kiinteille pinnoille, mikäli pintajännitys on kiinteän aineen pintaenergiaa alhaisempi. Offsetissa käytettävä painolevy kastellaan kostutusvedellä ensin. Vesi leviää ei-

painettaville alueille, kun taas painettaessa käytettävä muste leviää painoalueille, jolloin saadaan aikaiseksi haluttu kuvio. Painettavalta pinnalta muste siirretään kumiselle telalle, joka painaa kuvan painomateriaalille. Laakapainon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 1. (1.)



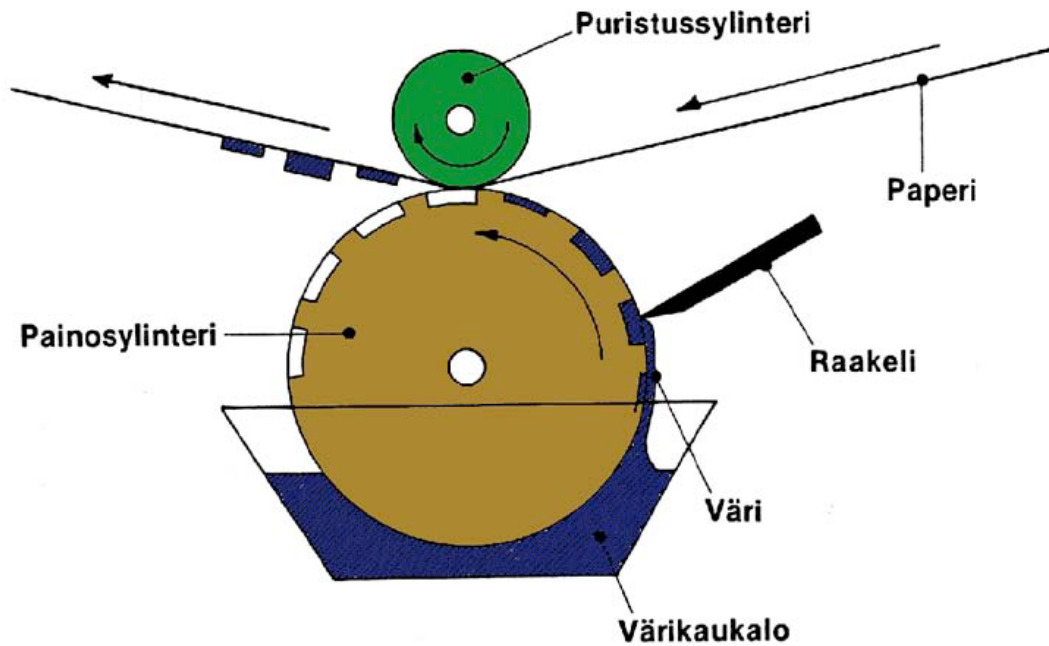
KUVA 1. Laakapainossa käytettävä tekniikka (2)

2.2 Syväpaino

Syväpainomenetelmällä (gravure) voidaan painaa aikakauslehtiä sekä erilaisia pakkaustuotteita. Pakkauspainoissa painetaan yleensä rullalta rullalle ja vain toiselle puolelle rataa. Tätä samaa menetelmää käytetään myös painetussa älykkydessä. (1.)

Syväpainossa käytetään erilaisia sylintereitä, jotka ovat kuparipinnoitettuja ja joiden pinnoille on kaiverrettu tai syövytetty haluttu kuvio. Kuparipinnoitteen päälle tulee vielä kromipinnoite, joka nostaa painokestävyyttä. Kaiverruksiin muodostuu eräänlaisia kuppeja, rasterikuppeja, joihin juoksutettava painoväri menee. Sylinterin pinnalle jäävä ylimääräinen väri pyyhitään pois käyttämällä metallista raakelinterää, jolloin painavalle pinnalle, joka on ei-painavaa pintaa alempana, jää painatuksessa käytettävä väri. Jotta painoväri saadaan siirrettyä

kaiverretuista rasterikupeista, käytetään painosylinterin lisäksi puristuskelaa. Näiden läpi kulkee materiaali, johon haluttua kuviota halutaan painaa. Painoväri tarttuu painomateriaaliin painosylinterin ja puristustelan muodostamassa painonipissä. Puristustela on kuminen, jotta saadaan aikaiseksi tasaisempi puristus painettaessa. Painotekniikkaa on havainnollistettu kuvassa 2. (1.)



KUVA 2. Syväpainon tekniikka (3)

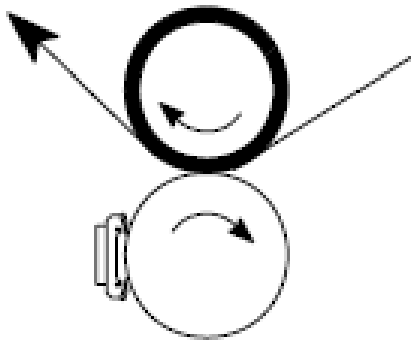
Syväpainossa, kuten muissakin rotaatiopainomenetelmissä, materiaalin kuljetus tapahtuu telojen avulla. Välillä materiaalia pitää kohdistaa pituus- ja sivuttaissuunnassa, mikäli painokuvio ei osu kohdilleen painomateriaalille. Kohdistukseen käytetään yleensä automaattista kohdistusta. Kohdistuksen apuna käytetään myös radan reunaan painettuja kohdistusmerkkejä, joita kohdistuslaitteen valokenno lukee. Pituuskohdistuksessa käytetään kompensointiteloja, joiden avulla painomateriaalia kiristetään tai löysätään. Sivuttaiskohdistuksen säätäminen tehdään siirtämällä painosylinteriä sivusuunnassa. (1.)

Painettua materiaalia kuivatetaan, jotta väriaine pysyy materiaalilla eikä lähde leviämään. Kuivaamisen ansiosta pystytään painamaan toinen haluttu kuvio materiaalille, jolloin saadaan suurempi kokonaisuus painopinnalle. Linjastolla

voi olla yksi tai useampi kuivain. Yleensä jokaisella painoyksiköllä on oma kuivain, jolla kuivataan kyseisestä painoyksiköstä tuleva painoväri. (1.)

Syväpainossa ja muissakin painotekniikoissa painomateriaalia esikäsitellään ennen painovaihetta. Painomateriaalilta puretaan staattinen sähkö käyttämällä siihen kehitettyä laitetta. Tämän lisäksi painomateriaalilta puhdistetaan irtonaisia partikkeleja käyttämällä radanpuhdistinta. (1.)

Painettavassa elektroniikassa voidaan käyttää syväpainon lisäksi käänteistä syväpainoa (reverse gravure). Käänteisessä syväpainossa painotela pyörii vastakkaiseen suuntaan painomateriaalin kanssa, mikä on nähtävissä kuvassa 3. Normaalisissa syväpainossa painotela ja painomateriaali liikkuvat samaan suuntaan. Käänteisellä syväpainomenetelmällä voidaan painaa vain yhtenäisiä kuviota, kuten viivoja. (4.)

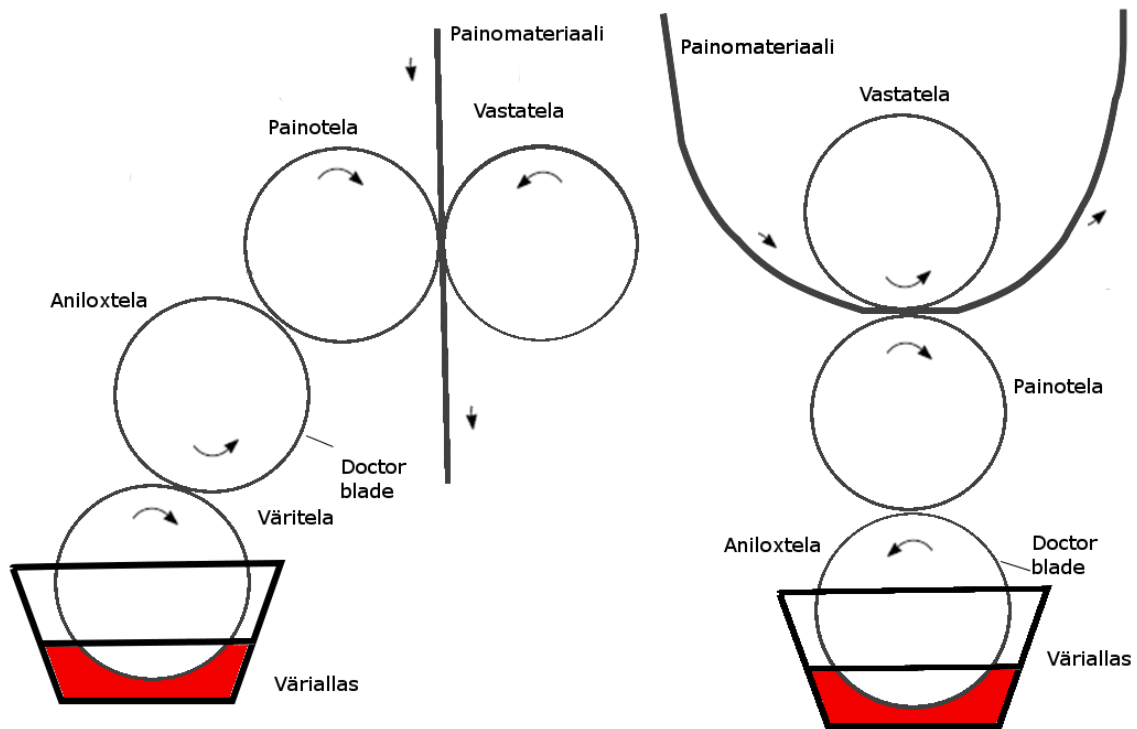


KUVA 3. Käänteisen syväpainon tekniikka (4)

2.3 Fleksopaino

Fleksopaino muistuttaa osittain kohopainoa, jossa painamisessa käytetään koholla olevaa kuvaa. Kohopainossa painava osa on joustamatonta, kun taas fleksopainossa painolevy tai laatta on joustava. Fleksopainossa käytettävä painoväri on muihin painamistekniikoihin verrattuna matalaviskoottisempaa eli juoksevaa. Fleksopainossa käytettävät värit ovat joko vesi- tai alkoholipohjaisia. Painovärien siirtämiseen voidaan käyttää kahta tai kolmea telaa sen mukaan, kumpi menetelmästä on käytössä. Kolmen telan menetelmässä ensimmäinen tela on osittain upotettuna väriainetta sisältävään altaaseen, josta se siirtää väriä aniloxtelalle. Aniloxtelalta poistetaan ylimääräinen väri metallisella terällä,

josta käytetään nimitystä raakeliterä (doctor blade). Aniloxtelalta väri siirtyy painolevylle, jonka kautta väri siirtyy painomateriaalille, ja täten saadaan aikaiseksi painolevyllä oleva kuvio. Kahden telan menetelmässä ensimmäistä telaa ei ole. Tällöin aniloxtela on upotettuna värialtaaseen, josta se siirtää väriä painolevylle. Tässäkin tapauksessa ylimääräinen väriaines poistetaan aniloxtelan päältä metallisella terällä, jotta painokuvio pysyy tasaisena. Kummatkin menetelmät on havainnollistettu kuvassa 4. (1.)



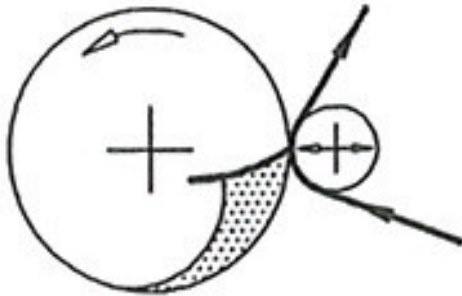
KUVA 4. Flexopainon menetelmät

Flexopainossa voidaan painaa karhealle pinnalle joustavan painolevyn ansiosta. Painonipin käyttö on erittäin tärkeää, koska liian kovalla puristuksella painojälki leviää ja liian pienellä puristuksella se näkyy värin puuttumisena painopinnalla. (1.)

2.4 Seripaino

Seripainossa, joka on myös silkkipainona tunnettu menetelmä, haluttu painokuvio on leikattu sapluunalle. Sapluunaa voidaan kutsua myös painokaavioksi tai stensiiliksi. Painokaavio kiinnitetään seulakankaaseen, jonka läpi painoväri painetaan materiaalille. Tällöin saadaan painokaaviossa olevat

kuviot näkyviin painomateriaalille. Painovaiheen aikana itse painaminen tapahtuu käyttämällä raakelia, jonka avulla painomuste puristetaan seulakankaan läpi, kuten kuvasta 5 voi havaita. Painokaavio itse toimii esteenä muodostaen ei-painavan pinnan, jolloin painoväri ei pääse leviämään alueille, joille sitä ei haluta. (1.)



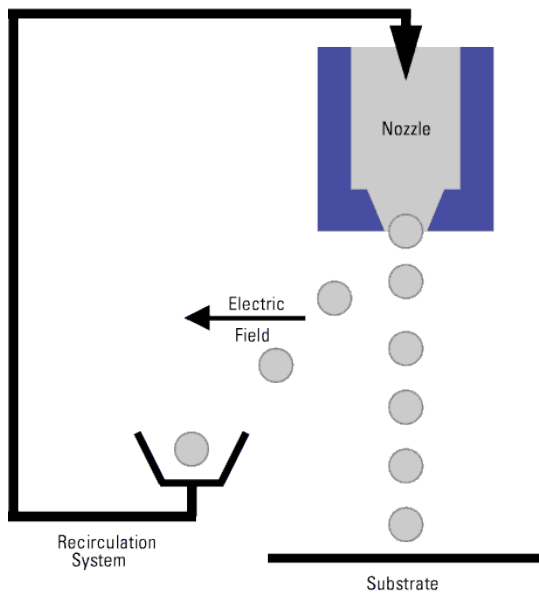
KUVA 5. Rullaseripainon toiminta (5)

Seulakankaan tehtävänä on pitää painokaaviota aloillaan koko painoprosessin ajan ja päästää painoväriä läpi halutuista kohdista. Painokaavion tulee olla tiukasti kankaassa kiinni, jottei painamisen aikana tule virheellistä jälkeä painopinnalle. Seulakankaan täytyy olla kestävä, koska siihen kohdistuu mekaanista rasitusta ja sitä pitää pystyä puhdistamaan. Kangas ei saa kutistua, vaan sen tulee pysyä mitoissaan mahdollisia uusia painokertoja varten. Jotta painojälki olisi mahdollisimman hyvää, tulee kankaan olla rakenteeltaan ja paksuudeltaan tasaista. Seulakankaissa käytetään useimmiten synteettisiä materiaaleja, kuten polyamidi- ja polyesterilankoja. Seulakankaassa on myös mahdollista käyttää silkkiä, mistä juontuu nimitys silkkipaino. (1.)

Teollisuudessa kaavion valmistukseen käytetään valotuskaaviota. Tässä menetelmässä seulaan levitetään valoherkkä emulsio, joka kuivatetaan. Tämän jälkeen verkolle asetetaan valotusoriginaali eli filmi. Tämä filmi peittää emulsion ja päästää valoa läpi halutuista kohdista. Kun seulaa altistetaan ultravioletivalolle eli valotetaan, emulsio kovettuu niiltä kohdin, joista valo läpäisee filmin. Käsittelyn jälkeen valottamaton emulsio saadaan poistettua pesemällä. Tällöin verkon reiät aukeavat, jolloin ne päästävät painomusteen läpi painoprosessin aikana. (6.)

2.5 Mustesuihku

Mustesuihku eli inkjet on jokaiselle tuttu kotona olevasta tulostimesta. Mustesuihku kuuluu digitaaliseen painomenetelmään, jossa väriainesta eli mustetta ei paineta puristamalla painopinnalle, vaan se syötetään pisaroina, joita kirjoituspäät tuottavat jopa noin 75 000 pisaraa sekunnissa. Tieto tulostettavasta kuvasta tulee lähettäjältä, esimerkiksi tietokoneesta, signaaleina, joiden mukaan mustetta suihkutetaan painoalustalle. Mustesuihkutukseen on olemassa kaksi menetelmää: jatkuva pisaroituminen ja epäjatkuvaa pisaroituminen. Jatkuvassa pisaroitumisessa tuotetaan jatkuva tasainen pisaravirta, kun taas epäjatkuvassa menetelmässä pisaroita tuotetaan, kun mustesuihkun kärki on tulostettavan pisteen kohdalla. Jatkuvassa pisaroinnissa mustepisaroita voidaan kerätä talteen, kun tulostuspään ja painopinnan väliin luodaan sähkökenttä. Sähkökenttä ohjaa pisarat keräysastiaan, joten niitä voidaan käyttää tulostuksessa uudelleen. Jatkuvan pisaroinnin menetelmää on havainnollistettu kuvassa 6. (1.)



KUVA 6. Mustesuihku, jossa jatkuvan pisaroinnin menetelmä (7)

Mustesuihkun käyttö on hyvin yleistä nykypäivänä niin kodeissa kuin työpaikoillakin. Sanoma- ja aikakauslehdissä inkjetä on käytetty tulostamaan osoitetiedot lehtiin ja lehtinippuihin. Tällä menetelmällä voidaan tuottaa myös valokuvia ja suurkuvatulostusta. Käyttökohteet lisääntyvät jatkuvasti sitä mukaa,

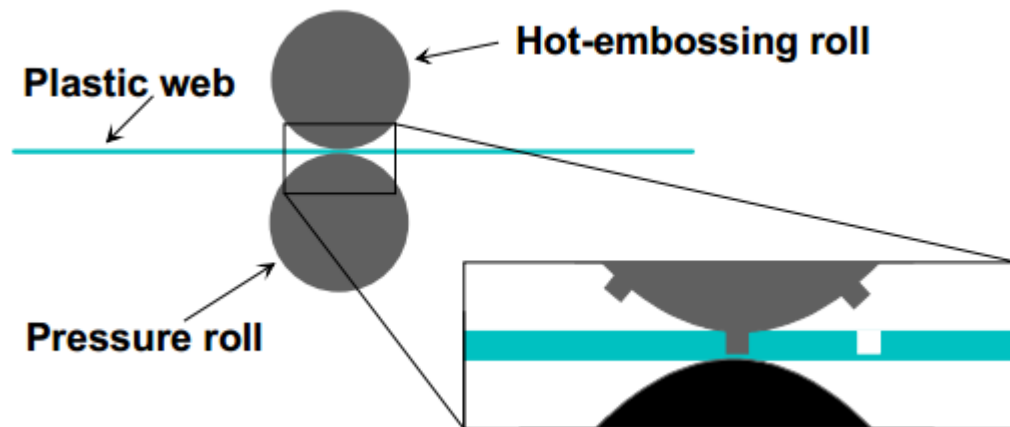
kun kehitetään uusia menetelmiä. Nykyään voidaan jopa tulostaa kakkujen ja keksien päälle haluttu kuvio käyttämällä elintarvikekelpoisia musteita. (1.)

Mustesuihkua voidaan käyttää myös painettavassa älykkyydessä. Tällä hetkellä menetelmä on vielä kallis musteiden hintojen vuoksi. Myös tulostusnopeus ja suuttimien tukkeutuminen tekevät menetelmästä tällä hetkellä haasteellisen. Suurilla nopeuksilla tulostettavan jäljen tarkkuus kärsii, joten suuria määriä valmistettaessa ei mustesuihkun käyttäminen ole optimaalista.

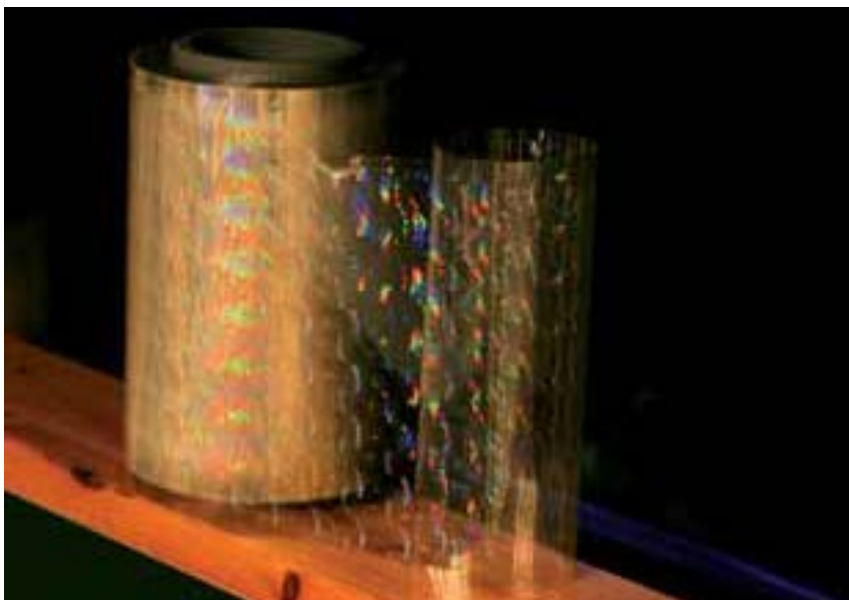
2.6 Kuumapuristus

Kuumapuristusmenetelmässä eli hot embossingissa kuumapuristetaan telalla oleva kuvio, joka halutaan saada painomateriaalille. Nämä materiaalit ovat yleensä pakkauksissa käytettäviä materiaaleja. (8.)

Puristuksessa käytetään kahta telaa: kuumapuristustelaa ja vastatelaa. Kummatkin telat ovat kiinteitä ja tasaisia, mutta vasta tela on pehmeämpää materiaalia. Kuvioden muodostamista varten kuumapuristustelalle laitetaan terämuotti, joka painaa kuviot painomateriaalille. Teloja lämmitetään sekä painetaan yhteen kovalla paineella, minkä seurauksena kuviot siirtyvät terämuottia käyttäen painomateriaalille. Menetelmää on havainnollistettu kuvassa 7. Kuumapuristamalla voidaan saada aikaan dynaamista grafiikkaa, jonka voi nähdä paljaalla silmällä. Dynaamiset kuvat muuttavat väriään, kun niitä katsoo eri suunnista. Tämä on vain yksi monista mahdollisuuksista, mihin kuumapuristusta voidaan käyttää. Muita käyttökohteita ovat esimerkiksi hologrammit, pakkausmateriaalit, urheiluvälineet ja koristeluun käytettävät tuotteet. Lisäksi kuumapuristusta käytetään mikroluokan kokoisten kanavien tekemiseen, joita voidaan käyttää kapillaari-ilmiön avulla nestenäytteiden liikuttamiseen. VTT:lla tehtyä ekologista hologrammia voi nähdä kuvasta 8. (8; 9; 10.)



KUVA 7. Hot embossing -menetelmä (8)



KUVA 8. VTT:lla painettu ekologinen hologrammi (11, s. 13)

2.7 Kalanterointi

Kalanterointi on menetelmä, jolla muokataan materiaalin paksuutta, karheutta tai kiiltoa. Kalanteroinnissa käytetään kahta telaa, joista toinen on lämmitetty haluttuun lämpötilaan käyttäen joko öljykiertoa tai sähkövastusta. Tarpeeksi suurella puristusvoimalla ja lämpötilalla saadaan materiaa puristettua telojen nipissä. Kalanterointi tehdään yleensä ennen päällystyskonetta tasaamaan paksuusprofiilia. (12; 13.)

3 R2R-TEKNIikka

R2R eli roll-to-roll tarkoittaa suomennettuna rullalta rullalle. Rullalta rullalle -tekniikan avulla painetaan elektronisia laitteita joustavalle painomateriaalille kuten muoville. Rullalla oleva painomateriaali asetetaan painolaitteen alkuun, vedetään painokoneen lävitse haluttujen prosessien kautta ja yhdistetään painolaitteen lopussa olevaan rullaan, johon painovalmis rulla kelataan sitä mukaa, kun painamisprosessi etenee. Suomessa käytössä olevia rullalta rullalle -painokoneita löytyy jokaisesta painotalosta. Painetun älykkyyden käyttöön painokoneita on vähemmän. Näistä osa on VTT:n ja OAMK:n tiloissa Oulussa. (11, s. 72–73; 14; 15;)

3.1 Painokoneet

R2R-painokoneita on VTT:n tiloissa Oulussa neljä kappaletta. Uusin niistä vihittiin käyttöön vuoden 2012 alkukevästä. Tavallisten painokoneiden lisäksi löytyy myös jälkikäsitteilykoneita, jotka toimivat rullalta rullalle -menetelmällä. (12.)

3.1.1 PICO

PICO on ensimmäinen VTT:n rullalta rullalle -painokone, joka asennettiin vuonna 2003. Tässä painokoneessa on mahdollista käyttää painomenetelminä syväpainoa ja kuumapuristusta. Näiden lisäksi laitteessa on laminointiyksikkö ja kuivaimet, jotka toimivat ilmalla, ultraviolettilla ja infrapunalla. PICOssa voidaan käyttää materiaaleja, jotka ovat maksimissaan 200 mm leveitä. Maksiminopeus on 100 m/min. Painokone asennettiin ISO7-standardin mukaiseen puhtaaseen huoneeseen. PICOssa on manuaalinen rekisteröintijärjestelmä kameroilla. Kuvassa 9 on kuva PICOsta. (11, s. 72; 16.)



KUVA 9. PICO-painokone (16)

3.1.2 ROKO

ROKO-painokone on ollut käytössä vuodesta 2007. ROKOssa on neljä painoyksikköpaikkaa, joihin voidaan asentaa tarpeen mukaan haluttu painoyksikkö: syväpaino eteen- ja taaksepäin, seripaino ja fleksopaino. Näiden lisäksi on laminointia varten oleva yksikkö ja kuivaimet, jotka toimivat ilmalla, UV:lla ja IR:llä. ROKO:lla voidaan ajaa 300 mm leveitä painomateriaaleja. Maksiminopeus on 10 m/min. ROKOssa on myös manuaalinen rekisteröintijärjestelmä kameroilla. ROKO:ssa olevia prosesseja ovat myös lift off, jonka avulla tehdään kuvioita silikooniin, pastan etsaus, liuotinlaminointi ja ultraäänipesu. ROKO on nähtävissä kuvassa 10. (11, s. 72; 16.)



KUVA 10. ROKO-painokone (16)

3.1.3 NICO

NICO-painokone on ollut käytössä vuodesta 2010. NICO eroaa muista painokoneista siten, että painaminen tapahtuu eristetyssä ilmakehässä, jossa hapen määrä on vain 0,1–1%. NICO:ssa happi korvataan typellä, jolloin koneen sisällä olevasta ilmakehästä saadaan reaktiokyvyn. Käytettäviä painomenetelmiä ovat syväpaino ja seripaino. Näiden lisäksi löytyy laminointiyksikkö. Kuivaaminen tapahtuu pelkästään IR-menetelmällä. Painomateriaali voi olla 300 mm leveä ja sitä pystytään ajamaan maksimissaan 20 m/min. NICO on nähtävissä kuvassa 11. (11, s. 72.)



KUVA 11. NICO-painokone (11)

3.1.4 MAXI

MAXI oli aluksi tunnettu nimellä R2R-PILOT-painolinja. Nimensä MAXI sai PrintoCent 2012 -tapahtumassa Oulussa. MAXI on suurin VTT:lla oleva painokone, kahden kerroksen korkuinen. MAXI:lla testataan painettavaa älykkyyttä tuotannon mittakaavassa. Painoyksikköpaikkoja on neljä, ja niihin voidaan asentaa jokin seuraavista painoyksiköistä: syväpaino eteen- ja taaksepäin, seripaino, fleksopaino ja "slot die coating". R2R-tekniikkaan perustuva mustesuihkuyksikkö sekä laseryksikkö on mahdollista asentaa jälkikäteen niille varatuille paikoille. Edellä mainittujen painomenetelmien lisäksi on useita lisäominaisuuksia, kuten painomateriaalille käytettävä plasmayksikkö, jolla muutetaan painomateriaalin pintaenergiaa, laminointiyksikkö, R2R-kuumapuristusyksikkö, rullastanssausyksikkö (die cutting) ja ilmalla ja UV:lla toimivat kuivausyksiköt. MAXI:ssa on myös käytössä automaattinen rekisteröintijärjestelmä, jonka avulla painaminen on huomattavasti tarkempaa ja helpompaa kuin manuaalisesti. Maksimileveys painomateriaalille on 300 mm ja painonopeus 30 m/min. MAXI on nähtävissä kuvassa 12. (17, s. 72; 18)



KUVA 12. MAXI-painokone. Kuva on painokoneen ylemmästä kerroksesta. (17, s. 72.)

3.1.5 EVA R2R-evaporator

EVA on höyrystinkone. Siinä koneen sisälle asetetaan pohjamateriaali, jota voidaan rullata kelaimelta toiselle. Koneen keskellä tapahtuu höyrystysprosessi. Kun haluttua metallia, hopeaa, alumiinia tai kalsiumia, lämmitetään niiden höyrystymispisteeseen asti, saadaan aikaiseksi esimerkiksi hopeahöyryä. Tämä höyry ohjautuu pohjamateriaalin pinnalle ja muodostaa 10–100 nm:n paksuisen kerroksen käytettyä metallia. Pohjamateriaalin nopeus ja höyryn määrä vaikuttavat kerroksen paksuuteen. Syntyvä kerros on jatkuvaa kuviota, joka voi kattaa koko materiaalin leveyden. Haluttaessa voidaan tehdä myös maskia käyttämällä painomateriaalin suuntaisia palkkeja. EVA:n höyrystyskammioon imetään tyhjiö käytön ajaksi. Painomateriaalin maksimileveys on 320 mm ja ajettaessa maksiminopeus on 2 m/min. EVA on nähtävissä kuvassa 13. (17, s. 73)



KUVA 13. EVA R2R-evaporator (17, s. 73)

3.1.6 R2R post treatment unit

Jälkikäsittely-yksikön avulla voidaan jälkikäsitellä rullalla olevaa painomateriaalia. Käsittelytapoja ovat rullan kelaaminen laitteen toiseen päähän takaisin rullalle, painomateriaalin leikkaaminen pitkittäissuunnassa ja erilaisten muotojen leikkaaminen irti (die cutting). Jälkikäsittely-yksikön avulla voidaan testata myös kameroiden toimintaa. Painomateriaalin maksimileveys on 300 mm ja maksimijonoisuus on 50 m/min. Jälkikäsittely-yksikkö nähtävissä kuvassa 14. (17, s. 73)

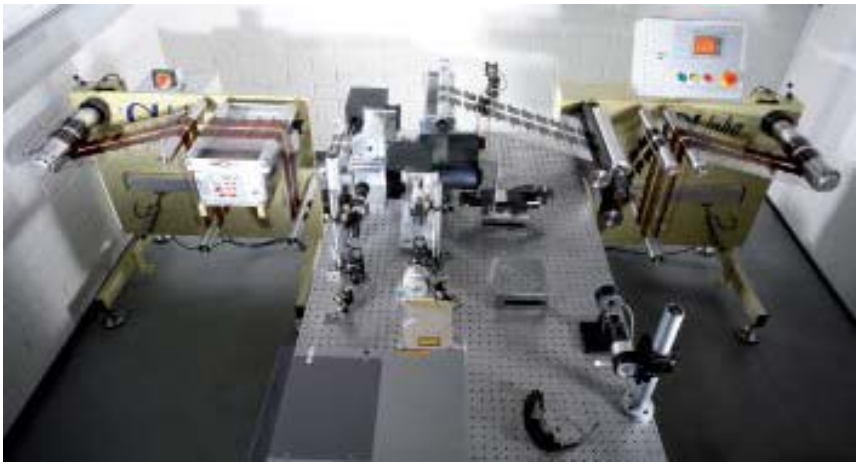


KUVA 14. R2R post treatment unit (17, s.73)

3.1.7 R2R laser processing

Painomateriaalia voidaan käsitellä laserkäsittely-yksiköllä. Käsittelyä varten käytettävälle laserille on olemassa monia lähteitä. Lähteitä ovat Nd:YAG

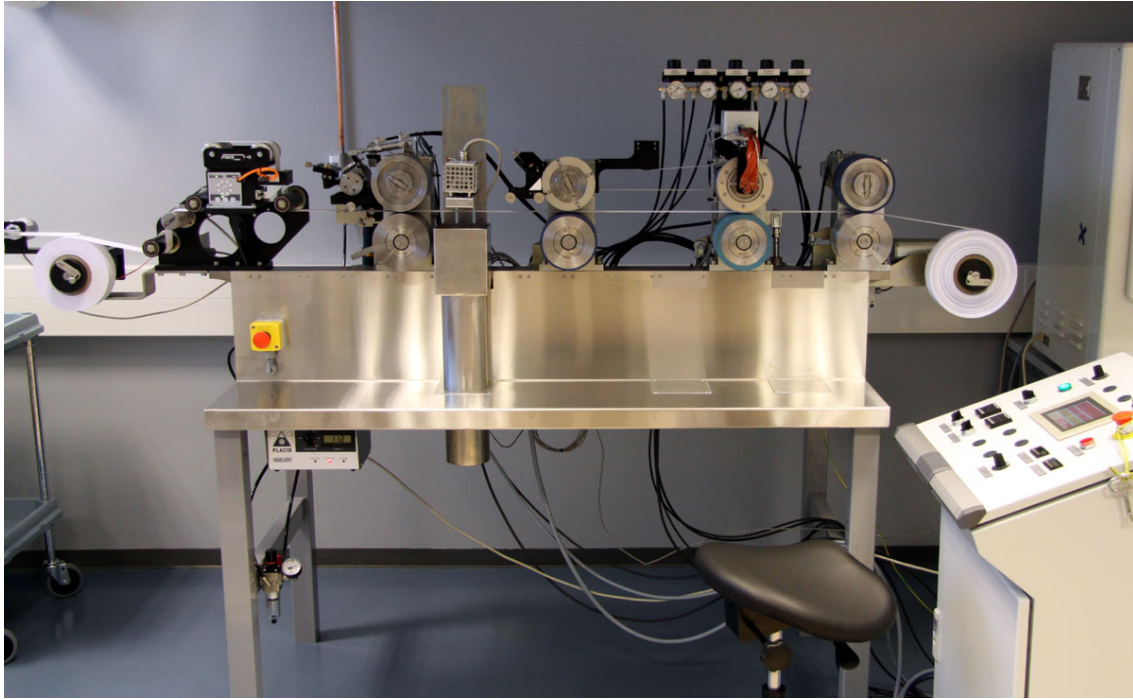
(neodymium-doped yttrium aluminum garnet; Nd:Y₃Al₅O₁₂), CO₂ (hiilidioksidi), diodi, laserkuitu ja pulssitetut nano-, piko- ja femtosekuntilaserit. Eriste- ja metallipinnoitteita voidaan poistaa laserin avulla. Toimenpidettä kutsutaan myös laserablaatioksi. Laserien avulla voidaan tehdä merkkauksia, rei'ityksiä ja leikkauksia painomateriaalille. Lisäksi voidaan leikata painettuja nanopartikkeleita pystysuoraan. Painomateriaali voi olla leveimmillään 400 mm. Maksiminopeus laitteella ajettaessa voi olla 30 m/min. Tämä linja on VTT:lla Lappeenrannassa. Kuvassa 15 on laserkäsittely-yksikkö. (17, s. 74; 19)



KUVA 15. R2R-laserkäsittely-yksikkö (17, s.74)

3.1.8 SOM-100

SOM-100 on OAMK:n tiloissa oleva yksinkertainen R2R-laite, joka poikkeaa edellä mainituista isommista painokoneista, joita on VTT:lla. SOM-100:ssa on mahdollista käyttää flekso- ja syväpainomenetelmiä. Näiden lisäksi linjalla on kuumapuristus- ja kuivausyksikkö. Rullat voivat olla maksimissaan 250 mm paksuisia. Telojen halkaisija on 130,372mm ja radan leveys on 50 mm. Liitteessä 5 on piirros SOM-100-painokoneesta. Kuvassa 16 on painokone käyttövalmiina.

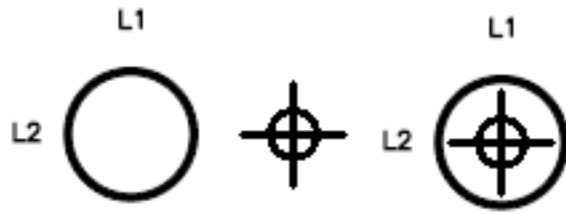


KUVA 16. SOM-100-painokone (kuva: Harri Määttä)

3.2 Painojäljen tarkkailu

Kun käytetään R2R-tekniikkaa, joudutaan rullaa todennäköisesti kelaamaan uudelleen painovaiheeseen, jotta saadaan ajettua kaikki kerrokset samalle rullalle. Rullausten määrä riippuu täysin kerrosten määrästä ja siitä, pystytäänkö samalla kertaa painamaan useampia kerroksia. Jotta kerrokset saataisiin osumaan kohdilleen, käytetään sitä varten erilaisia rekisteröinti- ja tarkkailumenetelmiä. (11, s. 80–82.)

Manuaalisessa kohdistuksessa painokoneen käyttäjä tähtää painomateriaalin reunoille tulevien kohdistusruutujen perusteella kerrokset kohdilleen. Mikäli painamisen aikana huomataan, että kohdistukset eivät mene kohdilleen, joutuu painokoneen käyttäjä kiristämään linjalla olevaa painomateriaalia pituussuunnassa, hidastamaan sitä tai siirtämään sivuttaissuunnassa, jotta kerrokset saadaan kohdistettua toisiinsa nähden. Pituussuunnan säätämistä voidaan muuttaa myös painosylinterin pyörimisnopeuden avulla. Kohdistuksessa voidaan käyttää ympyröitä, joiden sisään tähdätään kohdistusmerkeillä. Tämä menetelmä on havainnollistettu kuvassa 17. Toinen menetelmä on kohdistaa kuvan 18 mukaisesti.



KUVA 17: Painamisessa käytettävä kohdistusmenetelmä ympyrällä



KUVA 18: Painamisessa käytettävä kohdistusmenetelmä neliöllä

Painokoneisiin voidaan asentaa painolaadun tarkkailua varten tietokoneella toimivia automaattisia järjestelmiä, jollainen on MAXI:ssa. Tämä järjestelmä seuraa painomateriaalin reunoilla olevia merkintöjä ja niiden perusteella rekisteröi painamisen aikana tapahtuvaa liikettä. Mikäli järjestelmä huomaa, että kohdistus ei ole kohdillaan, kohdistusta varten tehdään tarvittavia toimenpiteitä, kuten sivuttais- tai pituussuunnan liikkeitä. (11, s. 80–82.)

4 PERINTEINEN KELA

Kela on elektroniikassa käytettävä komponentti. Kelalla on monia käyttökohteita, joista yksi on eritaajuuksisten signaalien erottaminen toisistaan suodatinpiirissä. (20.)

Kelojen käyttäminen elektroniikassa ei ole yhtä yleistä kuin vastuksien ja kondensaattoreiden. Erityisesti digitaalitekniikassa keloja käytetään melko vähän. Useimmiten keloja joudutaan tilaamaan ”mittatilaustyönä”, koska saatavana olevien kelojen valikoima on suppea. Valmiista keloista suurtaajuuskeloilla on paras valikoima, ja niistä saa jopa pintaliitosversioita. Kelojen valmistajia ovat esimerkiksi Coilcraft ja TOKO. Kelojen, releiden ja muuntajien käämitykset tehdään lakatulla ja emalieristeisellä dynamo- eli muuntajalangalla. Saatavana on erityyppisiä tyhjiä käämirunkoja ja kelasydämiä. Suurtaajuuskeloja (20–200 MHz) voidaan valmistaa suoraan piirilevyn foliopintaan, mitä näkee esimerkiksi matkaradioissa. Suurivirtaiset kelat eli kuristimet suodattavat jännitettä ja rajoittavat virrankulkua. (20.)

Kela on rakenteeltaan yksinkertainen komponentti. Yksinkertaisimmillaan rakenne voi olla kiepille kääritty kuparilangan pätkä. Sydänaineena toimii tällöin ilma. Kelan ominaisuutta kuvataan induktanssilla. Induktanssi kertoo kelan kyvyn vastustaa sähkövirran suuruuden ja suunnan vaihteluita; kela pyrkii pitämään käämissä kulkevan virran suunnan ja suuruuden. Induktanssista käytetään tunnusta L ja perusyksikkönä on henry, jota merkitään lyhenteellä H. (20.)

Kela toimii siten, että se varastoi energiaa magneettikenttäänsä, joka muodostuu käämitykseen. Magneettikentän tuottaman energian avulla se vastustaa virran suuruuden ja suunnan vaihteluita. (20.)

Kelassa käytetään erilaisia materiaaleja, joilla on erilaisia magneettisia ominaisuuksia. Magneettisesti toimivat aineet jaetaan kolmeen eri ryhmään niiden ominaisuuksien perusteella. Ryhmät ovat dia-, para- ja ferromagneettiset aineet. Aineet jaetaan ryhmiin vertaamalla niiden arvoa suhteelliseen permeabiliteettiin μ_r . Diamagneettisilla aineilla $\mu_r < 1$, paramagneettisilla aineilla

$\mu_r > 1$ ja ferromagneettisilla aineilla $\mu_r \gg 1$. Kelan sydänaineella on merkitystä kelan induktanssiin. Esimerkiksi ilmasydämisessä kelassa käytettäessä ryhmään 1 kuuluvaa sydäntä induktanssi pienenee. Ryhmän 2 sydämellä induktanssi kasvaa hieman ja ryhmän 3 sydämellä induktanssi kasvaa jo huomattavasti. Tyhjiön permeabiliteetti μ_0 kuvaa sydänaineen vaikutusta induktanssiin. Tyhjiön permeabiliteetti on $1,257 \times 10^{-6}$ H/m. Ilmasydämisessä kelan induktanssin muutosta eri sydänaineilla voidaan verrata suhteellisella permeabiliteetilla. Ferromagneettisilla sydänmateriaaleilla suhteellinen permeabiliteetti voi olla 1–10 000. Tähän vaikuttaa jonkin verran taajuus ja lämpötila. Kelan induktanssin suuruuteen vaikuttavat kelassa olevan käämityksen kierrosten lukumäärä, kelasydämen materiaali ja suhteellisen permeabiliteetin kaava (20, s. 131):

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

KAAVA 1

μ = permeabiliteetti (H/m)

μ_r = suhteellinen permeabiliteetti

μ_0 = tyhjiön permeabiliteetti (H/m)

Kelan sydämen valinnan yhteydessä tulee ottaa huomioon, millä taajuudella kelaa tullaan käyttämään. Rautasydämiset kelat eivät ole optimaalisia korkeille taajuuksille, koska ne lämpenevät helposti sydänmateriaalin suurista pyörrevirtahäviöistä johtuen. Suurilla taajuuksilla käytetään yleensä ferriittisydämellä tai ilmasydämellä tehtyjä keloja. Taulukossa 1 on havainnollistettu kelojen erilaiset sydänaineet ja niiden käytettävyys. (20.)

TAULUKKO 1. Kelojen sydänmateriaalit (20, s. 132)

Sydänaine	Taajuus
Umpirautasydän	< 20 Hz
Levysydän	20 Hz – 20 kHz
Puristettu rautajauhe	< 50 MHz
Ferriittisydän	< satoja MHz
Ilmasydän	> satoja MHz

Keloja voi ostaa valmiina tai sitten niitä voi käämiä itse, mikäli halutunlaista kelaa ei löydy valmiina. Kelan käämimistä varten tulee tietää haluttu induktanssi ja toimintataajuus, jotta tiedetään, montako kierrosta tarvitaan ja minkälaista sydäntä kelassa kannattaa käyttää. Valmiin kelan voi tarkistaa induktanssimittarilla ja tarvittaessa kierrosmäärää voidaan muuttaa. Kelan tekemiseen löytyy kaksi erilaista kaavaa, joita voidaan hyödyntää. Haluttu kierros määrä N voidaan laskea kaavalla 2, kun tiedetään haluttu induktanssi L ja valmiiksi viritetyn kelasydämen induktanssikerroin A_L . Mikäli kelasydämen kerroin α on tiedossa, voidaan kierrosmäärä laskea kaavasta 3. Kaavat ovat päteviä ainoastaan silloin, mikäli taajuusalue on kelasydämelle sopiva eikä kelan virta eli magneettivuon tiheys ole liian suuri (20, s. 132.)

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

KAAVA 2

N = kierrosmäärä

L = induktanssi (nH)

A_L = induktanssikerroin (nH)

$$N = \alpha\sqrt{L}$$

KAAVA 3

N = kierrosmäärä

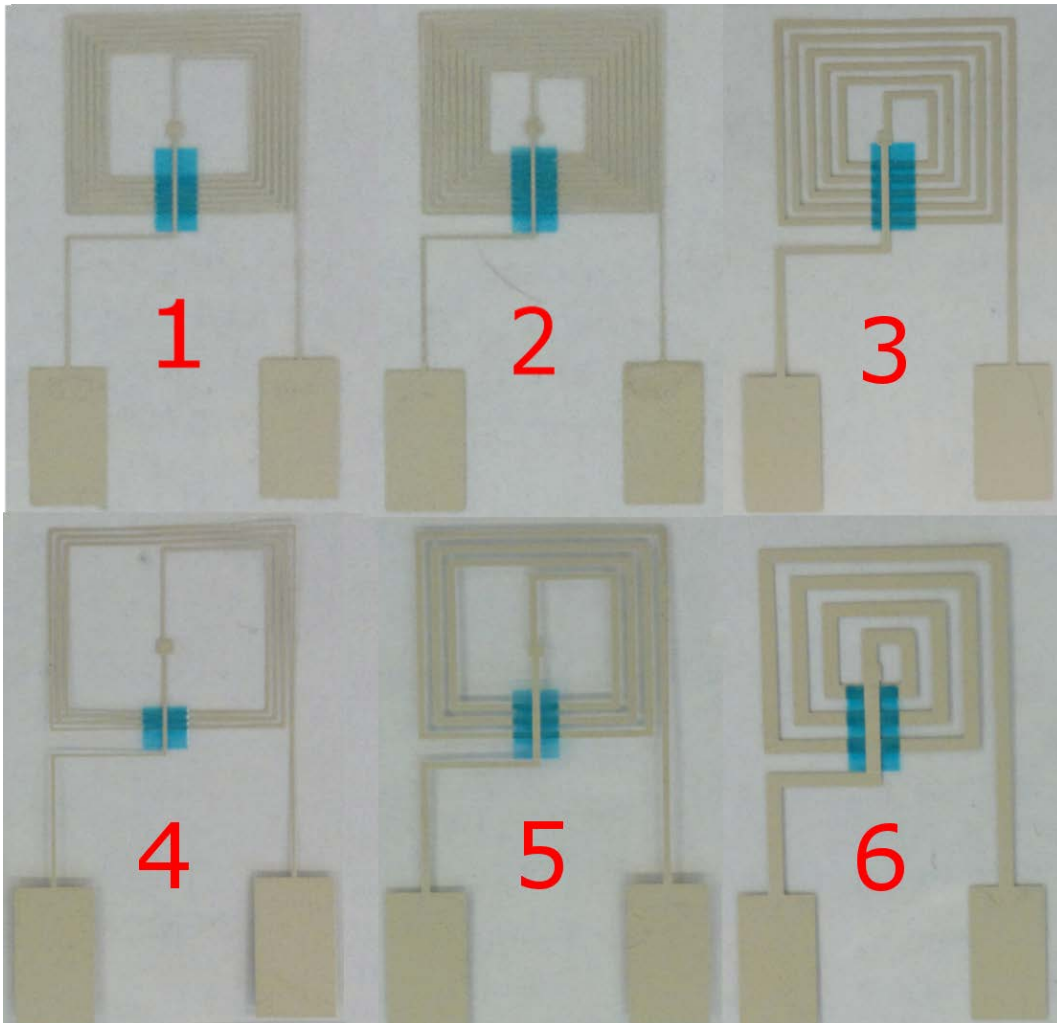
α = kelasydämen kerroin

L = induktanssi

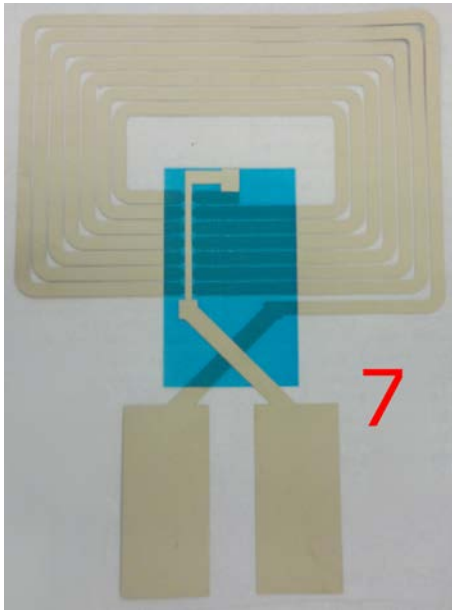
Kellon ollessa virtapiirissä riippuu sen käyttäytyminen siitä, syötetäänkö piirille tasavirtaa tai vaihtovirtaa. Tasavirralla kelan kuparinen kääminlanka aiheuttaa käytännössä oikosulun. Kelan ympärille syntyy magneettikenttä, kun tasavirta pysyy vakiona. Kun kelassa on rautasydän, syntyy sähkömagneetti. Vaihtovirralla kelan ympärille syntyy virran taajuuden tahdissa vaihteleva magneettikenttä. Magneettikenttään varastoituu energiaa, jolloin kela pystyy vastustamaan sen läpi kulkevan vaihtovirran suunnan ja suuruuden muutoksia. Mitä suurempi virran taajuus, sitä suurempi on vastustus. Kelaa voidaan ajatella taajuusriippuvaisena vastuksena, koska se vastustaa virran kulkua sitä enemmän, mitä suurempi taajuus on. (20.)

5 PAINETUN KELAN TOTEUTUS

Painettu kela saadaan aikaiseksi käyttämällä painetun älykkyyden menetelmiä. Tässä opinnäytetyössä painamisen menetelmänä käytettiin seripainoa ja seuraavassa luvussa mainittuja materiaaleja. Painettu kela eroaa perinteisestä kelasta siten, että siinä käämitystä ei tehdä rungon ympärille. Käämitys näyttää enemmän spiraalimaiselta kuviolta, joka alkaa sähköä johtavalta pinnalta ja loppuen sähköä johtavaan pintaan. Näiden pintojen avulla on testeissä helpompaa syöttää jännitettä kelaan käyttämällä hauenleukoja. Tulevaisuudessa nämä erilliset kontaktointiin käytetyt kosketuspinnat poistuvat, kun useampia komponentteja halutaan yhdistää mutkikkaammiksi piireiksi. Painetut kelat ovat kuvissa 19 ja 20.



KUVA 19. Kelat 1–6



KUVA 20. Kela 7

Painettuna kela on huomattavasti suurempi pinta-alaltaan kuin esimerkiksi monet tällä hetkellä käytettävät perinteiset pintaliitoskelat. Tämä on nähtävissä kuvista 19 ja 20. Paksuudeltaan painetut kelat ovat kuitenkin omaa luokkaansa verrattuna perinteisiin elektroniikassa käytettäviin keloihin.

Painettujen kelojen arvojen muutoksiin vaikuttavat kierrosten määrä, johtimen paksuus ja etenkin hopeamusteen johtavuus. Mitattaessa myös syötetyn taajuuden korkeus vaikuttaa kelan käyttäytymiseen.

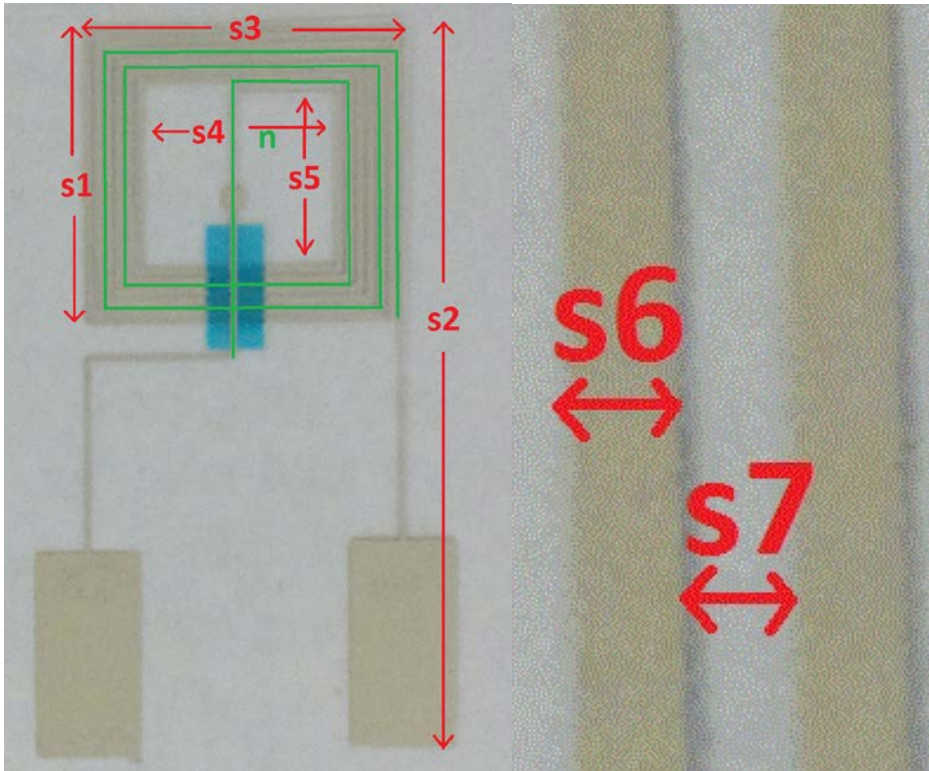
5.1 Materiaali- ja geometriavaihtoehdot

5.1.1 Materiaalit

Painomateriaaleissa ei vaihtoehtoja ollut, joten painamisessa käytettiin Melinex ST506 -painomateriaalia, jonka paksuus on 125 μm ja leveys 300 mm. Hopeamusteista vaihtoehtoina olivat Asahi LS-411 AW ja Sunchemical CRSN2442. Eristeissä vaihtoehtoina olivat Asahi CR-18GT-KT1 ja Sunchemical UV600B. (21; 22; 23; 24.)

5.1.2 Geometriat

Painettavissa keloissa geometriavaihtoehtoja löytyy tuhansia. Muuttamalla kelassa olevien johtimien kierrosten määrää, johdinten paksuutta ja kelan kokoa saadaan aikaiseksi useita erilaisia painettuja keloja. Tässä työssä päädyttiin taulukossa 2 oleviin vaihtoehtoihin. Geometriat mitattiin käyttämällä Smartscope ZIP 250 -mittalaitetta. Mitatut kohdat on havainnollistettu kuvassa 21.



KUVA 21. Keloista otetut mitat

TAULUKKO 2. Kelojen geometriat

Kela	1	2	3	4	5	6	7
s1	14,20 mm	14,19 mm	14,40 mm	14,20 mm	14,46 mm	14,93 mm	69,81mm
s2	34,62 mm	34,63 mm	34,56 mm	34,60 mm	34,67 mm	34,93 mm	129,42 mm
s3	15,23 mm	15,19 mm	15,48 mm	15,25 mm	15,47 mm	15,97 mm	95,46 mm
s4	9,26 mm	6,20 mm	5,33 mm	12,27 mm	9,55 mm	8,04 mm	47,53 mm
s5	8,79 mm	5,80 mm	5,51 mm	11,75 mm	9,53 mm	8,99 mm	21,03 mm
s6	0,25 mm	0,26 mm	0,44 mm	0,25 mm	0,50 mm	1,00 mm	2,98 mm
s7	0,21 mm	0,24 mm	0,50 mm	0,22 mm	0,50 mm	0,50 mm	0,51mm
n	6	9	5	3	3	3	7

5.1.3 Kelojen paksuus

Keloissa käytetyistä musteista mitattiin kerrosten paksuudet. Mittalaitteena käytettiin Veeco Dektak 150 -mittalaitetta. Paksuudet mitattiin kalanteroinnin jälkeen. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Mustekerrosten paksuudet

	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerrokset 1+2	Kerrokset 1+2+3
Paksuus μm	5,143	20,771	6,312	25,914	32,226

5.2 Toimintaa kuvaavat parametrit

Painettavan kelan toimivuutta kuvaavat samat parametrit kuin normaalissa kelassa, joista tärkeimpänä parametrina on kelan ominaisarvo, induktanssi.

5.2.1 Induktanssi

Induktanssi, jonka tunnus on L , kuvaa komponentin ominaisuutta vastustaa virran muutoksia. Induktanssin yksikkö on henry (H), joka saadaan laskettua kaavasta 4. (25.)

$$L = \frac{V_s}{A} = H$$

KAAVA 4

L = induktanssi

V_s = volttisekuntti

A = ampeeri

H = henry

Painetuista keloista induktanssi voitiin mitata käyttämällä VTT:llä olevaa Hewlett Packard 4284A Precision LCR meter -mittalaitetta. Mittalaitteessa taajuudeksi oli asetettu 100 kHz mittauksen ajaksi.

5.2.2 Toleranssi

Toleranssi ilmoittaa, kuinka paljon jonkin kappaleen arvolla voi olla heittoa. Esimerkiksi vastuksissa voidaan ilmoittaa toleranssiksi 1 %, jolloin 100 ohmin vastuksen arvo voi vaihdella 99–101 ohmin välillä. (26.)

Keloille tehtyjen induktanssimittauksien jälkeen pystyttiin laskemaan toleranssit. Saadut arvot on havainnollistettu luvussa 7, taulukossa 7. Toleranssi saadaan, kun keloista lasketaan min%- ja max% -arvot. Min% lasketaan kaavalla 5 ja max% lasketaan kaavalla 6.

$$\left(1 - \frac{\min}{\text{avr}}\right) * 100$$

KAAVA 5

min = minimiarvo

avr = keskiarvo

$$\left(\frac{\max}{\text{avr}} - 1\right) * 100$$

KAAVA 6

max = maksimiarvo

Toleranssiksi on valittu min%- ja max%-arvoista suurempi, jolloin toleranssi ei ole liian pieni. Jos valittaisiin pienempi arvo, kelojen arvot heittäisivät enemmän kuin annettu toleranssi kertoo.

5.2.3 Tehonkesto

Tehonkestoilla mitattiin painettujen kelojen kykyä sietää niihin syötettävää jännitettä. Kun keloihin syötettiin jännitettä, saatiin siitä mitattua virran määrä tietyllä jännitearvolla. Jännite ja virran kulku aiheuttivat kelassa lämpenemistä. Kun jännitettä nostettiin liian korkealle, se aiheutti hopeamusteen liiallisen lämpenemisen, jolloin painomateriaali alkoi taipua. Tästä syystä kelasta tuli lopulta toimintakyvytön. Jännitteen syöttöön käytettiin Mascot Type 719 -jännitelähdettä.

5.2.4 Vastinpiiri

Vastinpiirillä tarkoitetaan komponentissa syntyviä ominaisuuksia sen ensisijaisen ominaisuuden lisäksi. Tässä tapauksessa ensisijainen ominaisuus on kelalle ominainen induktanssi. Tämän lisäksi kelassa voidaan havaita kapasitanssia ja resistanssia. (27; 28.)

5.2.5 Toimintaolosuhteiden vaikutus

Toimintaolosuhdetesteillä selvitettiin kelan toimintaa erilaisissa olosuhteissa. Testeinä olivat kosteus- ja lämpötilatesti, lämpötilatesti ja taivutustesti.

Kosteus- ja lämpötilatesti

Kosteus- ja lämpötilatesti on JESD22-A101C-standardin mukainen, jonka on kehittänyt JEDEC. Testin tarkoituksena oli selvittää kelan toimivuutta standardin mukaisessa ympäristössä. Testissä käytettiin lämpökaappia, jonka lämpötilaksi asetettiin 85 celsiusastetta ja kosteudeksi 85 %. Nämä arvot olivat testissä vakioita, eikä niitä muutettu. Testistä voidaan käyttää myös nimitystä 85/85-testi. Standardin mukaan mittaus kestää vähintään 1000 tuntia. (29, s. 38-39; 30.)

Lämpötilatesti

Lämpötilatesti suunniteltiin yhdessä muiden opinnäytetöitä tekevien kanssa. Suunniteltu testi oli seuraavanlainen: Alkulämpötilana oli 25 celsiusta, jota nostettiin tai laskettiin porrastetusti 25 celsiuksen verran. Porrastukset tapahtuivat seuraavanlaisesti: 25, 50, 75, 50, 25, 0, -25, 0, 25. Kyseinen kierros toistettiin kahdesti. Lisäksi testissä kosteus asetettiin 40 %:iin, joka vastasi mittaushuoneen kosteutta. Testissä käytettiin samaa lämpökaappia, jota käytettiin myös kosteus- ja lämpötilatestissä.

Taivutustesti

Taivutustestissä käytettiin Oulun yliopistolla sijaitsevaa, siellä kehitettyä taivutuslaitetta. Tällä laitteella saatiin aikaiseksi keloihin tehty taivutus. Mittalaitteena käytettiin HIOKI 3522-50 LCR Hitesteriä, josta mittatulokset tulivat

näkyviin LabView-ohjelmalla tehtyyn taulukkoon sekä ne tallentuivat samalla Excel-tiedostoksi. Taivutustestillä tutkittiin, miten kelan arvot muuttuvat siihen tapahtuvan taivutuksen aikana. Taivutukset voitiin tehdä tensiona, jolloin kela oli venyvässä taivutuksessa, tai kompressiona, jolloin kela oli kasaan puristuvassa taivutuksessa. (31.)

6 KÄYTETYT MATERIAALIT, TEKNIIKAT JA PARAMETRIT

6.1 Materiaalit

Työssä käytettiin seuraavia materiaaleja: Painomateriaalina toimi Melinex ST506 125 µm / 300 mm. Painomusteina toimivat Sunchemical CRSN2442 -hopeamuste, johon lisättiin painotapahtuman aikana Sunchemical 503-99033 -hidastinta 3 m%. Kerrosten erotteluun käytetty eriste oli UV-valolla kovetettava Sunchemical UV600B. Musteiden valinnassa päätökset syntyivät suurimmaksi osaksi niiden hinnan perusteella. Laadukkaammat musteet olisivat tulleet huomattavasti kalliimmiksi.

6.2 Tekniikat

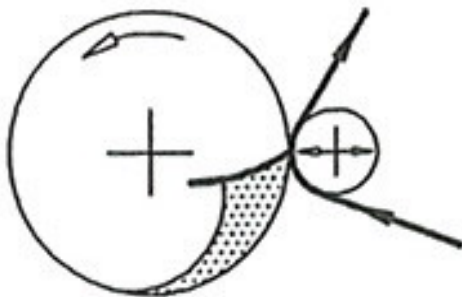
Työ sisälsi useita eri vaiheita. Ensimmäisenä oli kelojen painaminen. Painoprosessin jälkeen keloille tehtiin useita erilaisia testauksia ja mittauksia. Painoprosessi ja käytetyt mittalaitteet on esitelty alla olevissa kohdissa.

6.2.1 Painoprosessi

Painoprosessi toteutettiin käyttämällä ROKO-painokonetta, joka on kuvassa 10 ja 22. Painomenetelmänä käytimme rullaseripainoa, englanniksi rotary screen. Seripainossa painomuste syötettiin telan sisään, jossa se puristettiin raakelin avulla seulakankaan läpi painomateriaalille. Kuva 23 havainnollistaa rullaseripainon toimintaa.

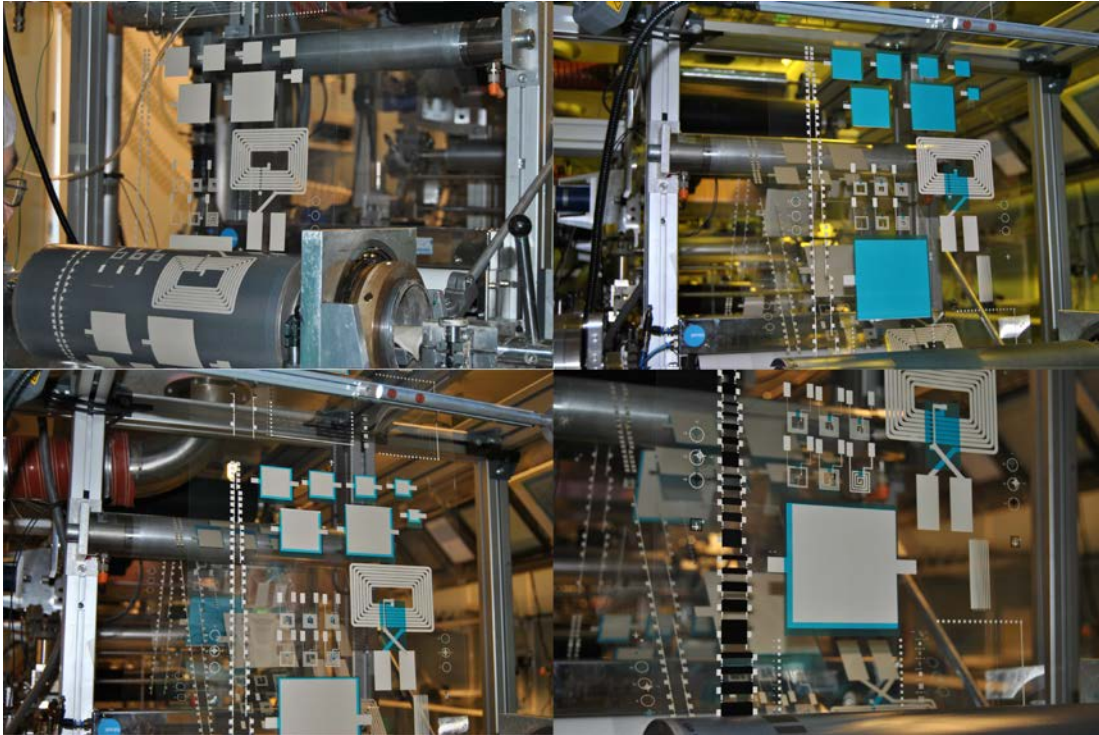


KUVA 22. ROKO painokone (16)



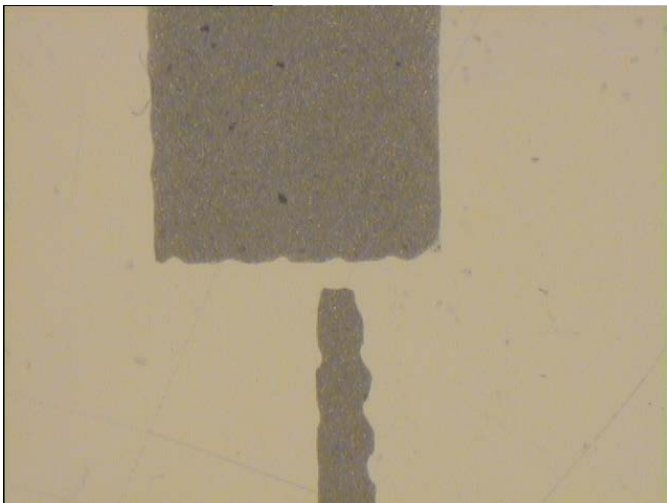
KUVA 23. Rullaseripainon toiminta (5)

Kerrosten painaminen tapahtui neljässä eri vaiheessa, koska komponentteja painettaessa jokainen kerros piti painattaa erikseen johtuen kuivauskapasiteetin vähäisyyden vuoksi. Ensimmäisellä ja kolmannella painokerralla käytettiin hopeamustetta. Toisella painokerralla ajettiin tarvittavien komponenttien päälle UV-kovetettavaa eristemustetta. Neljännellä kerralla toteutettiin vastusten rakenteet. Kerrosten kohdistus tapahtui painomateriaalin reunaan tehdyillä merkinnöillä ja kohdistamisesta vastasi painokoneen operaattori Mikko Hietala. Kohdistus tapahtui manuaalisesti. Kuvasta 24 näkee, kuinka kaikki neljä painokerrosta muodostuvat. Lisäksi painokerrokset on esitetty liitteinä 1, 2, 3 ja 4.



KUVA 24. Komponenttien painaminen kerroksittain

Kerrostien kohdistaminen oli tarkkaa. Kuvasta 25 voi havaita, että pienikin heitto painoprosessin aikana voi saada kelan toimimattomaksi. Nähtävissä oleva rako on pienempi kuin kelan 1 johtimen leveys. Kelan 1 johtimen leveys on vain 0,25 millia ja rako on lähes puolet pienempi.



KUVA 25. Toimimaton kela

Painettaessa painettavaa älykkyyttä käytettiin kuivauksessa kolmea kuivainta, vaikka painatus tapahtui vain yhdellä painoyksiköllä. Tällä menetelmällä kuivausta tehostettiin. Ensimmäiseen, kolmanteen ja neljänteen kerrokseen käytettiin lämpöuuneja, joilla saatiin painomuste kuivumaan. Uuneissa lämmöt olivat +130—+140 celsiusasteessa. Toisen kerroksen eristeeseen käytettiin ensimmäisen uunin tilalla UV-kuivuria, joka kovetti eristeen.

Kalanterointia, jolla puristettiin keloja kasaan, testattiin opinnäytetyössä. Tarkoituksena oli testata, miten kelojen arvot muuttuvat, kun ne kalanteroidaan. Liian suurella lämpötilalla kalanteroitaessa hopeamuste irtosi sekä eristekerrosten kohdalta että painomateriaalilta. Erityisesti suurista kondensaattoreista hopeamuste irtosi helposti. Näytteiden kalanterointiin käytettiin PICO-painokonetta. Kalanterointia varten näytteet leikattiin kahtia, jolloin kaikki komponentit saatiin kalanteroitua kunnolla. Ilman leikkaamista näytteiden leveys oli liian leveä, jolloin reunimmaisiiin komponentteihin tuli vain osittainen kalanterointi.

6.2.2 Mittaaminen

Kelojen induktanssimittauksissa käytettiin VTT:n tiloissa olevaa Hewlett Packard 4284A Precision LCR meter -mittalaitetta, jonka asetuksissa kela oli sarjassa vastuksen kanssa. Tehonkestomittauksessa virran mittaamiseen käytössä oli Hewlett Packard 34401A Multimeter -mittalaite ja Fluke-yleismittari lämpötilan mittausta varten. Kosteus- ja lämpötilamittauksessa kelan mittaamiseen käytettiin Fluke PM6304 -mittalaitetta. Kelojen geometrioiden mittaamisessa käytettiin Smartscope ZIP 250 -mittalaitetta. Kelojen kerroksien paksuudet mitattiin Veeco Dektak 150 -mittalaitteella.

6.3 Parametrit

ROKO:lla painaessa painonopeus oli 2 m/min jokaisella neljällä kerroksella. Ensimmäisellä ja kolmannella painokerralla uunien lämmöt olivat +130 celsiusastetta ja neljännellä painokerralla +140 celsiusastetta vastuspastan tarvitseman korkeamman lämpötilan vuoksi. UV-kuivuria käytettäessä sen tehoksi asetettiin 65 %.

Käytettyjä painomusteita kului jokaisella painokerralla eri määrä. Yhteensä käytetyn painomateriaalin pituus oli noin 180 metriä. Ensimmäisellä painokerralla hopeamustetta käytettiin 629 g, josta 3 m% oli hopean hidastinta, jolla estettiin hopean liian nopea kuivuminen. Toisella painokerralla painettiin UV-eristettä 466 g. Kolmas kerros ajettiin taas hopealla, jolloin mustetta kului 466 g, josta 3 m% oli hopean hidastinta. Neljännellä kierroksella painettiin vastukset käyttämällä sitä varten tehtyä vastuspastaa. Vastuspastassa käytettiin myös hidastinta 3 m%. Vastuspastaa kului 158 g.

7 MITTAUKSET

Työn aikana suoritimme useita mittauksia, joilla testattiin kelan toimivuutta erilaisissa olosuhteissa ja tilanteissa. Yksinkertaisin mittausta oli induktanssin selvittäminen. Lisäksi keloista mitattiin induktanssin muuttumista kosteus- ja lämpötilatestin, lämpötilatestin, tehonkestotestin ja taivutustestin aikana.

7.1 Induktanssi

Induktanssin mittaamiseen käytettiin VTT:n tiloissa olevaa Hewlett Packard 4284A Precision LCR meter -mittalaitetta. Kyseisellä mittalaitteella taajuusarvot voivat olla väliltä 20 Hz – 1 MHz. Keloja mitattaessa käytettiin taajuutena 100 kHz. Keloista saadut induktanssiarvot ovat nähtävissä taulukossa 4. Kaikki arvot ovat mikrohenryjä (μH). Kelat, jotka olivat viallisia, merkattiin viivalla.

TAULUKKO 4. Keloista mitatut induktanssiarvot

		Näyte										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Kela μH	1	-	-	0,889	0,884	0,886	0,888	-	-	-	0,889	
	2	1,264	-	1,276	1,257	1,257	1,198	-	1,258	1,250	1,266	
	3	0,422	-	0,420	-	0,413	0,388	0,410	0,416	0,412	0,419	
	4	-	0,425	0,423	0,420	0,418	0,420	-	-	-	0,424	
	5	0,302	-	0,303	0,293	0,294	0,298	0,293	0,298	0,291	0,300	
	6	0,171	0,173	0,172	0,153	0,154	0,167	0,153	0,157	0,162	0,169	
	7	3,610	3,601	3,581	3,582	3,580	3,586	2,591	3,581	3,578	3,567	
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Kela μH	1	0,887	-	0,889	0,888	0,884	-	0,886	-	0,886	0,884	
	2	1,263	-	1,261	1,259	1,259	-	1,260	1,265	1,265	-	
	3	0,414	0,416	0,415	0,414	0,412	0,413	0,415	0,415	0,416	!-	
	4	0,423	-	0,425	-	0,415	-	-	0,423	-	-	
	5	0,298	-	0,297	-	0,292	-	0,296	0,295	0,296	0,293	
	6	0,168	0,168	0,166	0,169	0,161	0,166	0,166	0,165	0,164	0,165	
	7	3,581	3,584	3,575	3,562	3,578	3,582	3,572	3,578	3,576	3,569	
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Kela μH	1	0,889	-	-	0,884	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	1,258	1,199	1,257	1,255	1,253	1,263	1,190	1,256	
	3	0,413	0,415	0,414	0,384	0,409	0,407	0,409	0,412	0,379	0,408	
	4	-	-	-	-	-	-	0,413	0,415	0,320	0,414	
	5	0,295	-	0,296	0,295	0,291	0,293	0,289	0,292	0,287	0,293	
	6	0,150	-	0,163	0,153	0,151	0,158	0,146	-	0,147	0,162	
	7	3,570	3,582	3,582	3,587	3,576	3,578	3,573	3,565	3,573	3,582	
		31	32									
Kela uH	1	-	-									
	2	1,259	-									
	3	0,406	-									
	4	0,413	-									
	5	0,290	-									
	6	0,161	0,148									
	7	3,577	0,296									

Ensimmäisen mittauksen jälkeen näytteet käytettiin kalanteroinnissa, jonka jälkeen ne mitattiin uudelleen. Tulokset ovat nähtävissä taulukossa 5. Tämän lisäksi vertasin kalanteroitujen ja kalanteroimattomien kelojen arvojen eroja.

TAULUKKO 5. Kelojen arvot kalanteroinnin jälkeen

		Näyte										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Kela μH	1	-	-	0,865	0,873	0,877	0,883	-	-	-	0,887	
	2	-	-	1,240	1,255	1,250	1,194	1,245	1,250	1,246	1,261	
	3	-	-	0,401	-	0,408	0,383	0,410	0,409	0,410	0,412	
	4	-	0,413	0,399	0,414	0,414	0,416	-	-	-	0,417	
	5	-	-	0,281	0,291	0,292	0,295	-	0,291	0,291	0,293	
	6	-	0,160	0,156	0,147	0,148	0,163	0,147	0,151	0,162	0,161	
	7	3,565	3,582	3,544	3,576	3,566	3,557	2,580	3,561	3,563	3,551	
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Kela μH	1	0,882	-	0,880	0,883	0,881	-	0,887	-	0,884	0,885	
	2	1,257	-	1,255	1,256	1,252	-	1,261	1,264	1,261	-	
	3	0,410	0,409	0,411	0,413	0,410	0,408	0,413	0,414	0,414	!-	
	4	0,418	-	0,416	-	0,415	-	-	0,419	-	-	
	5	0,295	-	0,290	0,293	0,292	-	0,294	0,292	0,294	0,297	
	6	0,160	0,165	0,159	0,165	0,162	0,161	0,161	0,163	0,163	0,164	
	7	3,546	3,570	3,555	3,568	3,559	3,561	3,555	3,567	3,575	3,568	
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Kela μH	1	0,886	-	-	0,884	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	1,258	1,200	1,259	1,244	1,245	1,257	1,193	1,257	
	3	0,414	0,416	0,411	0,384	0,414	0,404	0,404	0,413	0,386	0,413	
	4	-	-	-	-	-	-	0,411	0,417	0,319	0,415	
	5	0,290	-	0,294	0,291	0,293	0,285	0,287	0,291	0,286	0,291	
	6	0,152	-	0,160	0,149	0,151	0,157	0,147	-	0,149	0,160	
	7	3,562	3,576	3,561	3,571	3,561	3,567	3,561	3,544	3,566	3,563	
		31	32									
Kela μH	1	-	-									
	2	1,257	-									
	3	0,409	-									
	4	0,416	-									
	5	0,287	-									
	6	0,161	0,145									
	7	3,571	-									

Induktanssiarvojen tarkastelu

Saatujen induktanssiarvojen perusteella pystyttiin laskemaan jokaisen kelan minimi-, maksimi- ja keskiarvo. Näiden lisäksi pystyttiin laskemaan minimi- ja maksimiarvon ero keskiarvosta, jolloin saatiin min%- ja max%-arvot, jotka määräsivät lopulta jokaisen kelan toleranssin. Taulukossa 6 on nähtävissä keloista saadut arvot ja taulukossa 7 kalanteroitujen kelojen arvot.

TAULUKKO 6. Kelojen min, max, keskiarvo, min%, max% ja toleranssi

	Min	Max	Keskiarvo	min%	max%	Toleranssi +/-
Kela 1	0,884	0,889	0,887	0,298075	0,26585	0,2980746
µH 2	1,190	1,276	1,252	4,952077	1,916933	4,9520767
3	0,379	0,422	0,410	7,609263	2,873063	7,6092635
4	0,320	0,425	0,413	22,4681	2,972056	22,468099
5	0,287	0,300	0,294	2,281239	2,145046	2,2812394
6	0,146	0,173	0,161	9,557522	7,168142	9,5575221
7	2,591	3,610	3,549	26,99416	1,717898	26,994162

TAULUKKO 7. Kalanteroitujen kelojen min, max, keskiarvo, min%, max% ja toleranssi

	Min	Max	Keskiarvo	Min%	Max%	Toleranssi +/-
Kela 1	0,865	0,887	0,881	1,839994	0,656562	1,8399935
µH 2	1,193	1,264	1,247	4,295217	1,400541	4,2952168
3	0,383	0,416	0,408	6,016541	2,081251	6,0165409
4	0,319	0,419	0,408	21,80095	2,712862	21,800948
5	0,281	0,297	0,291	3,449698	2,047828	3,4496976
6	0,145	0,165	0,157	7,562102	5,187953	7,5621016
7	2,580	3,582	3,531	26,94022	1,434157	26,940222

Taulukoiden perusteella pystytään vertailemaan, syntyikö keloihin kalanteroinnin jälkeen minkäänlaisia eroja. Vertailuksi tein taulukon 8, josta näkyy kalanteroimattomien ja kalanteroitujen kelojen erotuksesta syntyvä ero. Arvot, joiden edessä on miinusmerkki (–), tarkoittavat, että kalanteroimattomien kelojen arvot olivat suurempia, kun taas positiiviset arvot tarkoittavat kalanteroitujen arvojen olevan suurempia.

TAULUKKO 8. Kalanteroimattomien ja kalanteroitujen kelojen erot

	Min	Max	Keskiarvo	Min%	Max%
1	-0,019	-0,002	-0,005	1,542	0,391
2	0,003	-0,012	-0,005	-0,657	-0,516
3	0,004	-0,006	-0,003	-1,593	-0,792
4	-0,001	-0,006	-0,005	-0,667	-0,259
5	-0,006	-0,003	-0,003	1,168	-0,097
6	-0,001	-0,008	-0,005	-1,995	-1,980
7	-0,011	-0,028	-0,018	-0,054	-0,284

Arvojen verailussa min%- ja max%-arvojen vertailu on kaikista olennaisin. Siitä nähdään, onko arvojen prosentuaalinen heitto kaventunut vai kasvanut. Voidaan todeta, että osassa keloista kalanterointi on parantanut tuloksien heittoa toisistaan, jolloin prosentuaalinen ero on pienentynyt hieman.

7.2 Tehonkesto

Tehonkestomittauksella selvitettiin kelojen kykyä kestää jännitettä. Testauksen aikana syötin jännitettä tunnin verran ja otin arvot 0, 5, 15, 30, 45 ja 60 minuutin kohdalta. Arvot, joita tarkkailin, olivat kelan läpi kulkeva virta, kelan tuottama lämpö ja mittaushuoneen lämpötila ja kosteus. Taulukossa 9 näkyvät kaikille seitsemälle kelalle tehdyt mittaukset. Saatujen tulosten perusteella voidaan kartoittaa kelojen käyttöä erilaisissa kytkennöissä.

TAULUKKO 9: Kelojen tehonkesto

Kela 1						
Huoneen kosteus	39,30 %					38,70 %
Huoneen lämpötila	24,4 °C					24,3 °C
Jännite U	5 V					5V
Virta / mA	37,981	37,644	37,588	37,568	37,607	37,617
Lämpötila °C	26	28,6	29,1	29,2	29,5	29,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

(Taulukko 9 jatkuu)

(Taulukko 9 jatkuu)

Huoneen kosteus	38,60 %					37,60 %
Huoneen lämpötila	24,5 °C					24,7 °C
Jännite U	10 V					10 V
Virta I mA	71,852	72,587	73,783	74,85	75,758	76,371
Lämpötila °C	33,6	42,1	45,4	46,6	48,3	51,2
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 2

Huoneen kosteus	37,10 %					37,00 %
Huoneen lämpötila	24,9 °C					24,8 °C
Jännite U	5 V					5 V
Virta I mA	30,613	30,786	30,875	30,919	30,944	30,969
Lämpötila °C	33,9	33,4	32,4	31,9	31,5	31,5
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	37,20 %					37,00 %
Huoneen lämpötila	24,9 °C					24,8 °C
Jännite U	10 V					10 V
Virta I mA	59,142	58,93	59,368	59,887	60,179	60,458
Lämpötila °C	37,7	47,7	49,7	49,6	50,2	50
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 3

Huoneen kosteus	47,80 %					47,10 %
Huoneen lämpötila	24,3 °C					24,7 °C
Jännite U	5 V					5 V
Virta I mA	101,125	99,366	99,532	99,978	100,688	100,912
Lämpötila °C	28,9	39,7	41,3	42,7	42,4	43,4
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	47,10 %					47,00 %
Huoneen lämpötila	24,5 °C					24,2 °C
Jännite U	7 V					7 V
Virta I mA	158,82	174,62	184,88	197,54	201,32	208,48
Lämpötila °C	50,8	73,4	78,3	82,2	83,7	85,5
Aika min	0	5	15	30	45	60

(Taulukko 9 jatkuu)

(Taulukko 9 jatkuu)

Kela 4						
Huoneen kosteus	45,60 %					44,60 %
Huoneen lämpötila	24,7 °C					24,9 °C
Jännite U	5 V					5 V
Virta I mA	56,843	57,665	58,218	58,531	58,65	58,625
Lämpötila °C	46,4	42,5	39,2	37,5	37,8	37,2
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	45,10 %					44,90 %
Huoneen lämpötila	24,8 °C					24,9 °C
Jännite U	10 V					10 V
Virta I mA	112,059	115,584	119,771	133,11	136,98	138,7
Lämpötila °C	41,9	53,2	58,2	63,8	67,4	65,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 5						
Huoneen kosteus	43,60 %					41,50 %
Huoneen lämpötila	25,0 °C					25,1 °C
Jännite U	5 V					5 V
Virta I mA	143,61	145,21	147,94	150,19	151,09	152,05
Lämpötila °C	43,4	48,7	53,5	53,1	53,3	54,3
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	41,50 %					41,30 %
Huoneen lämpötila	25,2 °C					25,0 °C
Jännite U	7 V					7 V
Virta I mA	203,39	223,67	244,94	258,96	264,4	266,96
Lämpötila °C	59,7	72,6	77,6	81,4	86,7	87,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 6						
Huoneen kosteus	39,80 %					39,20 %
Huoneen lämpötila	25,3 °C					25,3 °C
Jännite U	2.5 V					2,5 V
Virta I mA	179,38	183,39	184,79	185,71	186,23	186,78
Lämpötila °C	53,8	49,1	46,8	44,8	44,8	44,8
Aika min	0	5	15	30	45	60

(Taulukko 9 jatkuu)

(Taulukko 9 jatkuu)

Huoneen kosteus	28,80 %					26,50 %
Huoneen lämpötila	22,6 °C					23,1 °C
Jännite U	4 V					4 V
Virta I mA	293,06	296,55	304,93	321,03	330,16	336,74
Lämpötila °C	40,4	54,1	59,5	63,3	66,6	68,1
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 7

Huoneen kosteus	27,50 %					26,50 %
Huoneen lämpötila	23,0 °C					23,1 °C
Jännite U	5 V					5 V
Virta I mA	107,265	107,127	107,183	107,105	107,98	107,081
Lämpötila °C	28,8	27,8	26,5	26,1	25,9	25,7
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	26,50 %					26,60 %
Huoneen lämpötila	23,1 °C					23,3 °C
Jännite U	10 V					10 V
Virta I mA	235,75	233,51	231,56	230,42	230,1	230,26
Lämpötila °C	26,7	33,2	35,1	35,9	36,5	36,1
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kuten taulukosta voidaan havaita, yleisimmät jännitearvot olivat 5 V ja 10 V. Keloille 3 ja 5 jouduttiin käyttämään arvoa 7 V, koska suurempi jännitearvo rikkoi kelan vääntämällä painomateriaalia. Kelojen 3 ja 5 arvoihin vaikutti johtimien leveys. Leveämmällä johtimella on vähemmän resistanssia jännitettä kohtaan, koska siinä pystytään kuljettamaan enemmän jännitettä kerralla.

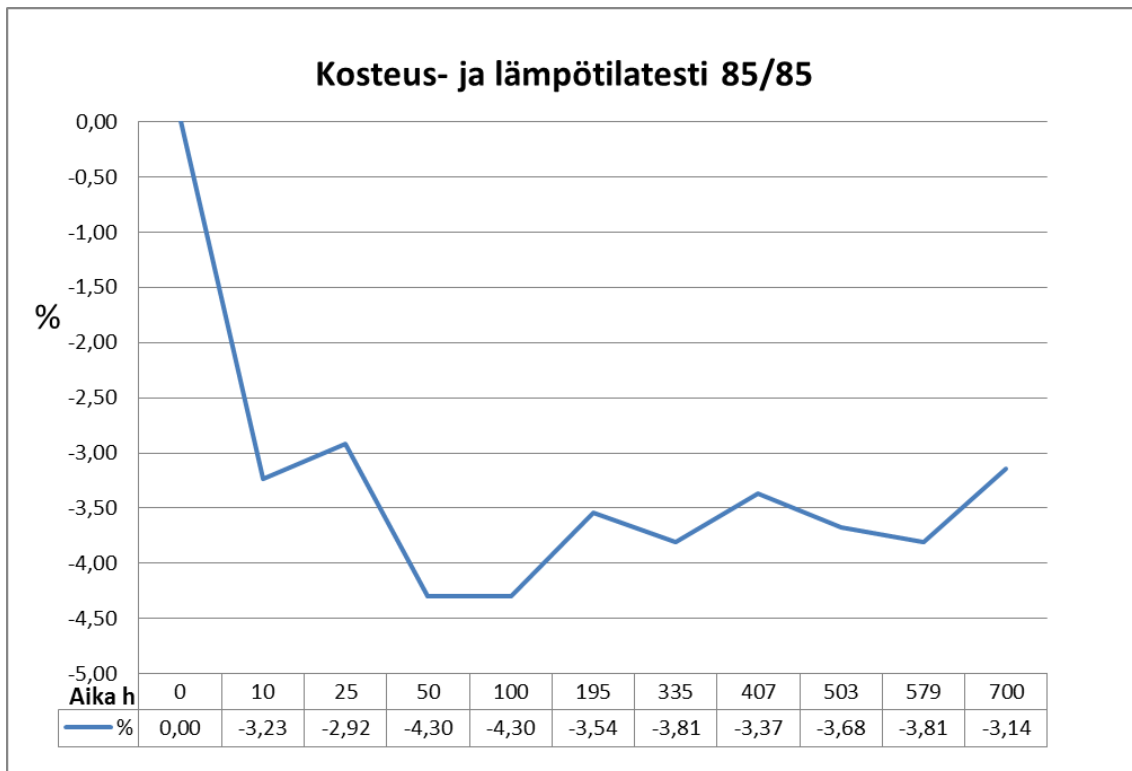
Kelalle 6 syötettävän jännitteen arvot olivat kaikista pienimmät. Mittaus täytyi aloittaa syöttämällä vain 2,5 V. Suurin mahdollinen jännitearvo, jolloin kela oli vielä toimintakuntoinen, oli 4 V. Jo 5 V:in jännitteellä lämpötila nousi yli 80 celsiusen, mikä aiheutti painomateriaalin vääntymisen.

7.3 Toimintaolosuhdetestaukset

Työn aikana tehtiin kolme toimintaolosuhdetestausta, jotka olivat kosteus- ja lämpötilatesti, lämpötilatesti ja taivutustesti.

7.3.1 Kosteus- ja lämpötilatesti

Kosteus- ja lämpötilatestinä käytettiin JEDECin standardia JESD22-A101C, jonka mukaan testin aikana lämpötila ja kosteus pysyttelevät jatkuvasti 85:ssä. Testiin käytettävä aika on 1000 tuntia. Testissä käytin näytteen 4 kelaa numero 3. Testistä saaduista tuloksista tehty käyrä on kuvassa 26. (29, s. 38–39; 30.)



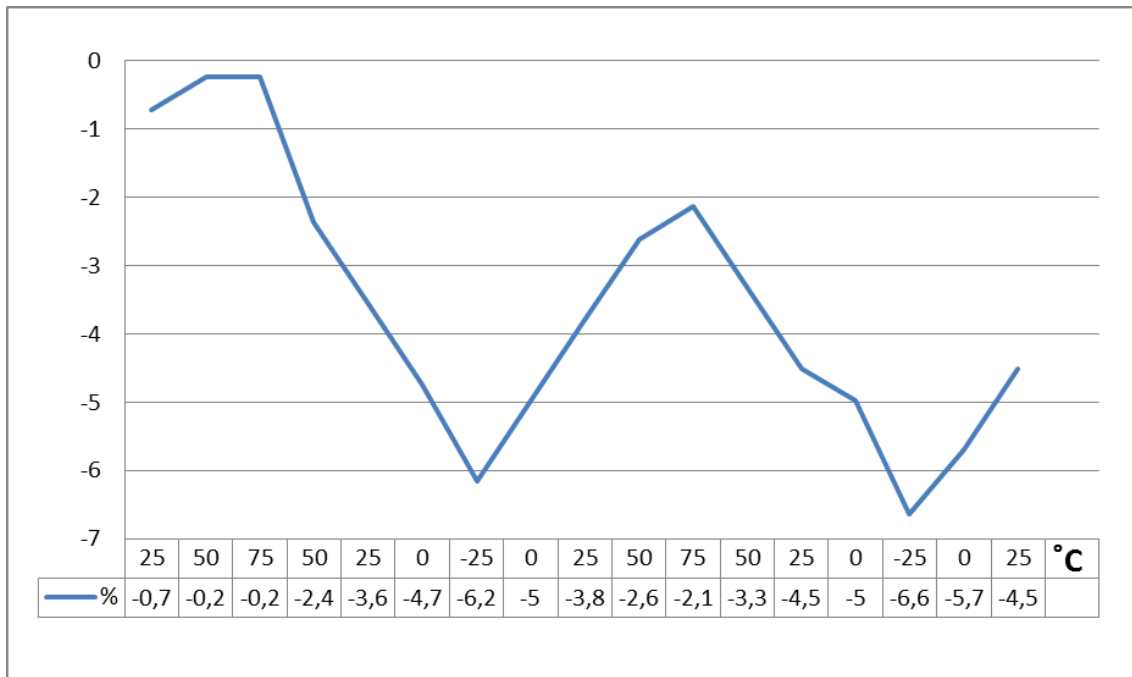
KUVA 26. Kosteus- ja lämpötilatestin tulokset prosentteina

Kuten kuvasta huomaa, ensimmäisen 10 tunnin aikana tapahtui kelassa suurin induktanssiarvon pudotus, mutta tämän jälkeen induktanssiarvot heittelivät tasaisesti -3% :n ja -4% :n tuntumassa alkuarvosta.

Valitettavasti testin aikana lämpökaapille tapahtui jotain, jolloin siitä katkesivat virrat 735 tunnin kohdalla, joten 700 tunnin kohdalta saadut tulokset jäivät viimeisiksi. Katkoksen jälkeen testiä ei voinut enää jatkaa, koska lämpötila ja kosteus olivat ehtineet laskea. Uutta testiä ei ehditty tekemään aikataulun vuoksi. Painettuja keloja on testattu ennen tätä opinnäytetyötä aikaisemmin myös Oulun yliopistolla ja sieltä saatujen tulosten perusteella voi todeta, että kelat kestävät helposti yli 1000 tuntia. (31.)

7.3.2 Lämpötilatesti

Lämpötilatesti toteutettiin käyttämällä muiden opinnäytetöitä tekevien kanssa kehitettyä lämpötilatestiä. Lämpökaappiin asetettiin alkuarvoiksi 25 °C ja 40 %:n kosteus. Kosteutta pidettiin vakiona ja ainoastaan lämpötilaa muunneltiin. Testissä käytin näytteen 9 kelaa numero 6. Kuvassa 27 on testistä saatujen tulosten käyrä.



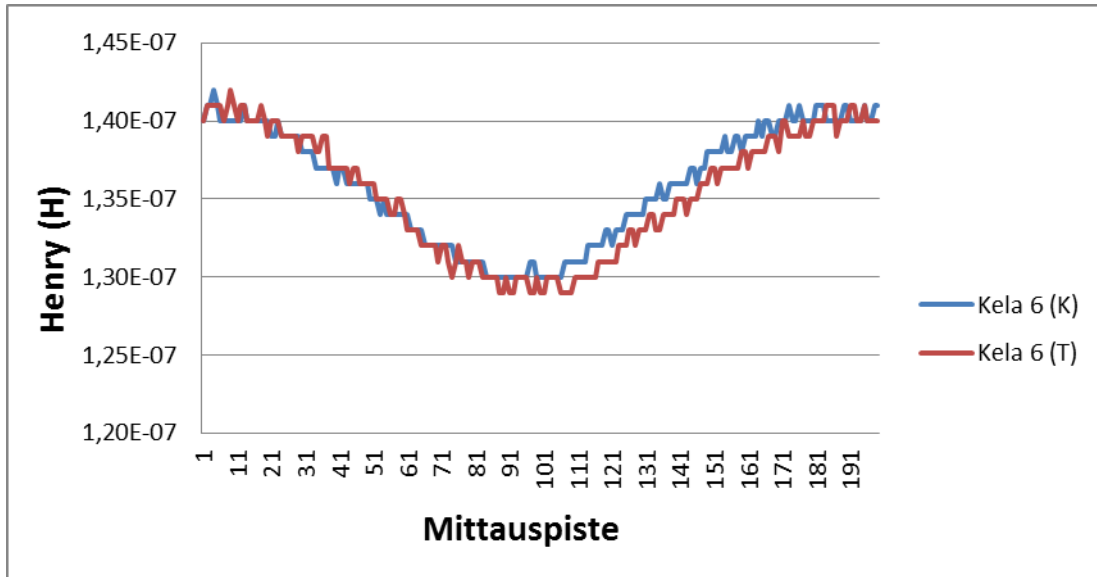
KUVA 27. Lämpötilatestin tulokset

Kuten taulukosta voidaan havaita, kelan induktanssiarvo muuttui alkutilanteeseen nähden verrannollisesti lämpötilaan. Arvojen muuttuminen oli kuitenkin hyvin pientä. Lämpötilaa ei voitu nostaa 100 asteeseen, koska käytettyjen mittalaitteiden johtimet eivät kestä yli 85 asteen lämpötiloja.

7.3.3 Taivutustesti

Taivutustestillä selvitettiin induktanssin muuttumista taivutuksessa. Vertailuksi käytettiin kahta eri kelaa, joiden johtimien paksuudet erosivat toisistaan. Täten saatiin selville prosentuaalinen muutos induktanssissa kummallekin kelalle ja niiden eroavaisuus. Kelan 5 prosentuaalinen heitto kompressiotaivutuksessa oli -8,6 %:n luokkaa ja kelalla 6 kompressiotaivutuksessa eroa lähtötilanteeseen

oli $-8,4\%$:a. Kelalla 6 testattu tensiotaivutus tuotti $-9,1\%$:n eron lähtötilanteeseen. Kuvasta 28 voi havaita, että kompressiolla ja tensiolla ei ollut suurta eroa taivutuksessa. Kela on maksimaalisessa ($r = 7\text{ mm}$) taivutuksessa käyrän ollessa alhaalla.



KUVA 28. Kelan 6 tension ja kompression taivutusten tulokset

Kuvassa 28 näkee kelalle 6 tehdyn kompressio- ja tensiotaivutuksen tulokset. Mittauspisteet kertovat kelan induktanssiarvon taivuttamisen aikana. Mittaus on otettu samasta kohtaa. Mittauksen aikana induktanssi ja kelan kulma r muuttuvat taivutuksen mukaan. Taivuttaessa kela kasaan arvot laskevat ja taivuttaessa takaisin alkuasentoon arvot nousevat. Mittauksien aikana otettiin tulokset 1000 kohtaa, joista nähtävillä on 199 mittauksen tuottama käyrä.

Koska komponentti ei taivu symmetrisesti, ei kelalle tapahtuvasta taivutussäteestä voida olla täysin varmoja jatkuvasti. Tärkeimpänä tietona voidaan kuitenkin pitää hetkeä, kun kela on taivutettu maksimiin, jonka jälkeen alkaa jälleen leventäminen. Kun kela on taivutettu maksimiin on sen r eli kulma tällöin noin 7 mm . Kulma on voitu määrittää webbikameran ja erillisen ohjelman avulla. Ohjelma sijoittaa ympyrän kaarelle taivutetun komponentin jokaiseen pisteeseen, jolloin saadaan arvioitu taivutussäde.

8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia komponenttia kela, joka oli tuotettu painetun älykkyyden menetelmällä. Työn myötä kelasta sai selville erilaisia toiminnallisia ominaisuuksia, joiden avulla sen käyttämistä voidaan kartoittaa tulevaisuuden käyttöä varten. Tärkeimpiä tietoja ovat kelojen käyttäytyminen ja kestävyys eri lämpötiloissa, korkeassa lämpötilassa, jossa myös kosteus on korkealla, tehonkesto ja taivutuksien aiheuttamat muutokset induktanssiin.

Lämpötiloissa kelojen arvot eivät muutu huimasti. Keloissa käytettävä hopeamuste kestää hyvin kuumuuden ja kosteuden. Kelat toimivat myös –25 celsiusuksessa. Tehonkestossa sai hyvin selville kelojen kestävyuden, kun niihin syötettiin jännitettä. Taivutuksessa olevan kelan induktanssiarvo muuttuu, mutta ei mitenkään huomattavasti, jolloin taivutuksesta olisi kelalle haittaa.

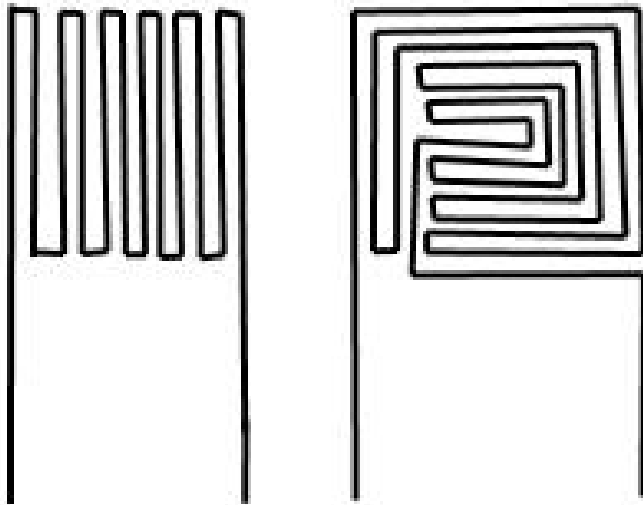
Painetulla kelalla ei ole tällä hetkellä suurta käyttöä. Komponenttien tutkiminen on vielä hyvin varhaisessa vaiheessa, mutta menetelmiä kehitellään jatkuvasti ja painamisessa käytettäviä materiaaleja kehitetään paremmiksi. Tutkimuksia tullaan jatkamaan VTT:lla.

Parempien painomusteiden ja menetelmien myötä on painetuilla komponenteilla mahdollista saada aikaan toimivia elektronisia kytkentöjä, joiden paksuudet ovat huomattavasti ohuempia kuin nykyajan piirilevyillä ja komponenteilla varustetuilla kytkennöillä.

9 POHDINTA

Painettu älykkyys ei ollut minulle entuudestaan tuttua. Tämän vuoksi opinnäytetyö kiinnosti minua alusta alkaen. Vaikkakin aihe ei itsessään ollut vaikea, joutui sitä varten etsimään hyvin paljon oikeita lähteitä, eritoten painetusta älykkyudesta, joka ei ole vielä kovin yleistä. Suomenkielistä materiaalia löytyy hyvin niukasti, joten englannin kielen taidoista oli hyvin paljon hyötyä tietoa etsiessä.

Työn aikana sattui paljon onnistumisia sekä tilanteita, jolloin joutui pysähtymään hetkeksi miettimään, mitä pitäisi oikein tehdä. Eritoten erilaisten testausten toteuttaminen täytyi miettiä, jotta ne olisivat tarpeeksi kattavia ja suuntaa antavia. Lisäksi päässäni liikkui erilaisia ideoita kelojen geometrioista, joita voitaisiin mahdollisesti kokeilla testausmielessä. Näitä ideoita voi nähdä kuvasta 29.



KUVA 29. Mahdollisia kelan geometrioita

Työn aikana pääsin tutustumaan hyvin paljon tekniikoihin, jotka eivät liity elektroniikkaan. Tällaisia tekniikoita olivat painotekniikat, jotka olivat minulle täysin uusia. Niistä syntyi kuitenkin hyvin kattava kuva. Näkemys erilaisten tekniikoiden käytöstä yhdessä laajentui huomattavasti.

LÄHTEET

1. Viluksela, Pentti – Ristimäki, Seija – Spännäri, Toni 2007. Painoviestinnän tekniikka. Opetushallinto.
2. Offset printing. 2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Offset_printing. Hakupäivä 25.7.2012.
3. Syväpaino. 2008. Saatavissa: <http://nww.evtek.fi/n/penttiv/paino2/syvapaino.pdf>. Hakupäivä 24.7.2012.
4. Ostness, Lee A 2006. Coating Technology for Flexible Packing. Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/enewsletters/eplace/2006/06PLA50.pdf>. Hakupäivä 25.7.2012.
5. Paakkolanvaara, Mikko 2012. PrintoCent. Printed intelligence Pilot Factory. Tehtaan esittelymateriaali.
6. Silkkipaino. 2012. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Silkkipaino>. Hakupäivä 25.7.2012.
7. Continuous inkjet. 2012. Saatavissa: <http://oecotextiles.wordpress.com/tag/continuous-inkjet/>. Hakupäivä 25.7.2012.
8. Printed Intelligence- Applications and Technologies; Low cost diagnostics. 2009. Saatavissa: http://www.micropolis.fi/files/micropolis/photonicroad/printed_intelligence_applications_technologies_low_cost_diagnostics_markku_kansakoski_vtt_photeroadsme_oulu_050709.pdf. Hakupäivä 16.7.2012.
9. Hot Embossing for holographil effects and brand promotion. VTT. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/services/ipr/ict/hotembossing_technolog_brochure.pdf. Hakupäivä 16.7.2012.

10. Research and development activities in printed intelligence. 2009. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/download/scientific_reports/cpi_09_review.pdf. Hakupäivä 16.7.2012.
11. Research, development and commercialisation activities in printed intelligence. 2010. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavissa: http://www.vttprintedintelligence.fi/cpi_2010.pdf. Hakupäivä 10.7.2012.
12. Kalanteri. 2012. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Kalanteri> Hakupäivä 16.7.2012.
13. Calender. 2012. Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Calender> Hakupäivä 16.7.2012.
14. Roll-to-roll processing. 2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Roll-to-roll_processing. Hakupäivä 9.7.2012.
15. Rullalta rullalle prosessi. 2012. VTT. Saatavissa: http://www.vtt.fi/service/roll_to_roll_processing.jsp. Hakupäivä 9.7.2012.
16. Kemppainen, Antti 2010. VTT Printed Intelligence. Saatavissa: http://www.micropolis.fi/files/photonicroad/printed_intelligence_15.2.2010.pdf. Hakupäivä 9.7.2012.
17. Research, development and commercialisation highlights in printed intelligence. 2011-2012 Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/pico/VTT_pi_2011_2012.pdf. Hakupäivä 10.7.2012.
18. Plasma treatment. 2012. Saatavissa: <http://www.dunmore.com/technical/plasma-treatment.html> Hakupäivä 10.7.2012.
19. Nd:YAG laser. 2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser Hakupäivä 10.7.2012.

20. Volotinen, Vesa 2004. Analoginen elektroniikka: Komponentit ja peruskytkenät. Sanoma Pro Oy.
21. DuPont Teijin Films. 2010. Saatavissa: <http://www.dupontteijinfilms.com/filmenterprise/Datasheet.asp?ID=271&Version=US>. Hakupäivä 16.7.2012.
22. Asahi PTF Paster. Asahi Chemical research laboratory. Saatavissa: [http://www.ama-prom-electronics.fi/downloads/Asahi/LS-411AW%20\(TDS-E\).pdf](http://www.ama-prom-electronics.fi/downloads/Asahi/LS-411AW%20(TDS-E).pdf). Hakupäivä 16.7.2012.
23. Flexible Soldermask and Flexible Coverlay. 2012. Saatavissa: <http://www.sunchemical.com/products/printed-circuit-products/products/flexible-resists>. Hakupäivä 16.7.2012.
24. Conductive Silver Ink and Conductive Carbon Ink. 2012. Saatavissa: <http://www.sunchemical.com/products--services/products/printed-circuit-products/conductive>. Hakupäivä 16.7.2012.
25. Kallankari, Mika – Suhonen, Pekka 1997. Induktanssi. Saatavissa: <http://ylivieska.cop.fi/tst/kela.htm> Hakupäivä 11.7.2012.
26. Toleranssi. 2011. Saatavissa: [http://fi.wikipedia.org/wiki/Toleranssi_\(valmistustekniikka\)](http://fi.wikipedia.org/wiki/Toleranssi_(valmistustekniikka)) Hakupäivä 11.7.2012.
27. Parasitic capacitance. 2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Parasitic_capacitance. Hakupäivä 19.7.2012.
28. Parasiittinen komponentti. 2004. Saatavissa: http://wiki.ham.fi/Parasiittinen_komponentti. Hakupäivä 19.7.2012.
29. Niiranen, Sini 2011. Plasmakäsitellyn nestekidepolymeerin ja silikonin välisen adheesion heikkeneminen kiihdytetyissä ympäristörasitustesteissä. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Diplomityö.
30. JEDEC STANDARD Steady State Temperature Humidity Bias Life Test JESD22-A101C. 2009. Saatavissa:

<http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/22a101c.pdf>.

Hakupäivä

17.7.2012.

31. Happonen, Tuomas – Häkkinen, Juha – Voutilainen, Juha-Veikko 2012. Component level reliability of printed electronics – CLRPE Final Report. University of Oulu. Optoelectronics and measurement Techniques Laboratory.

LIITTEET

Liite 1. Painokerros 1

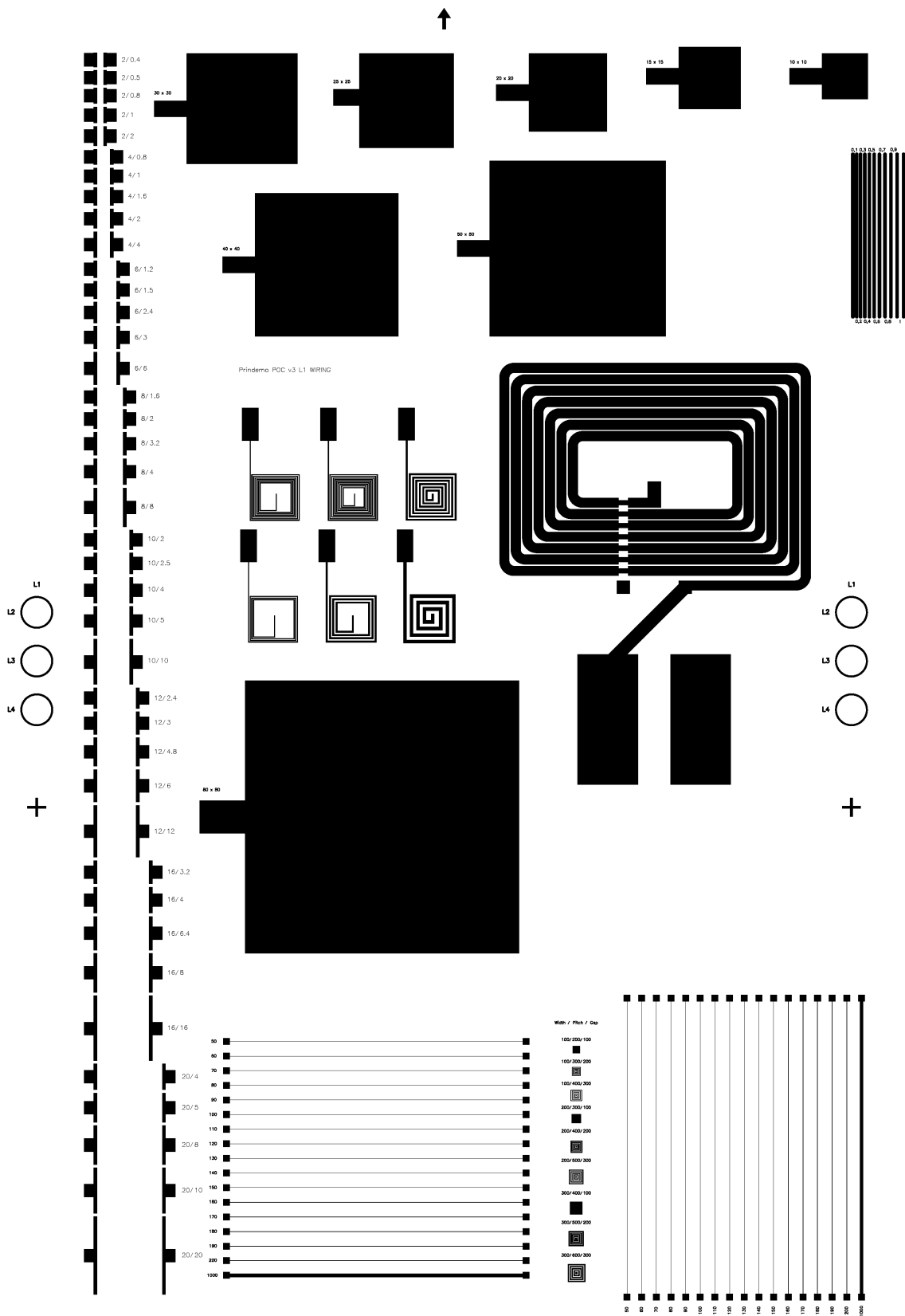
Liite 2. Painokerros 2

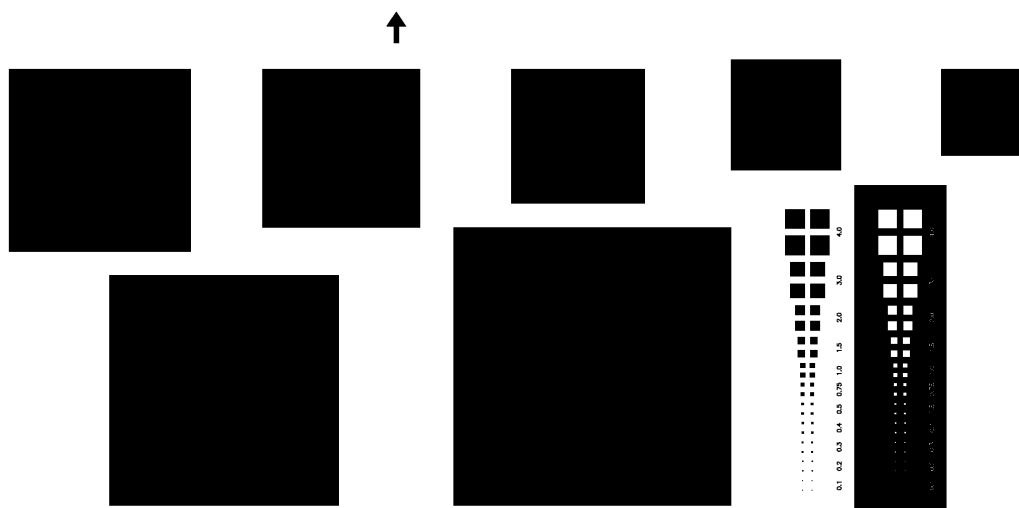
Liite 3. Painokerros 3

Liite 4. Painokerros 4

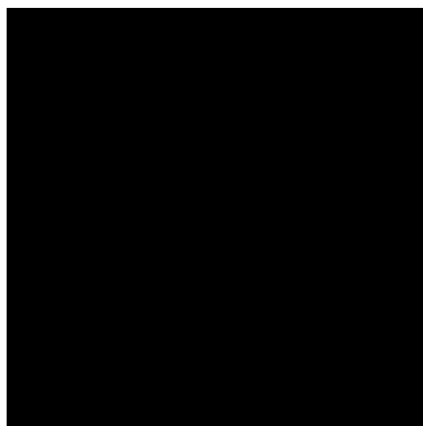
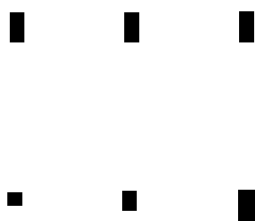
Liite 5. SOM 100-painokone

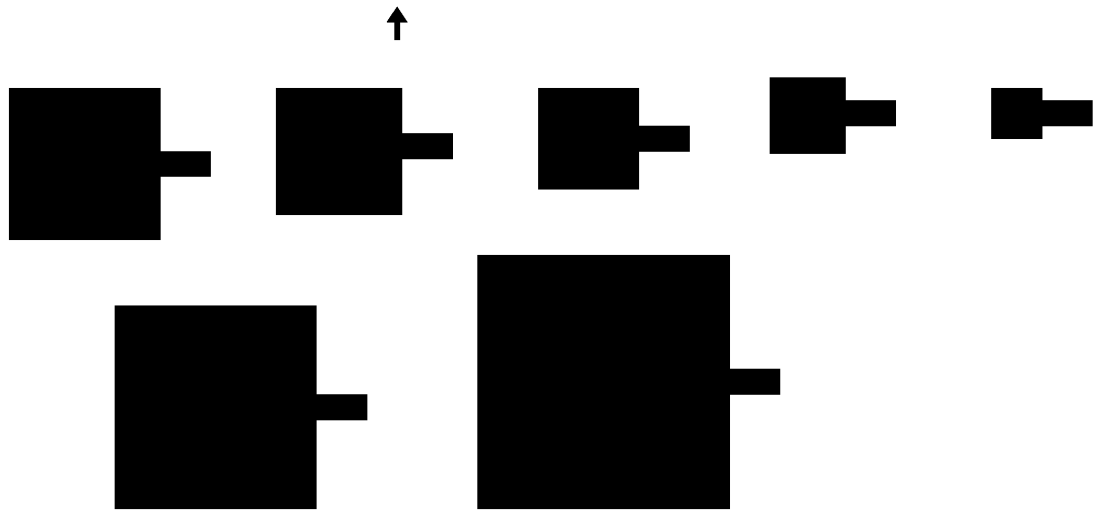
Liite 6. Painetun kelan tietolomake



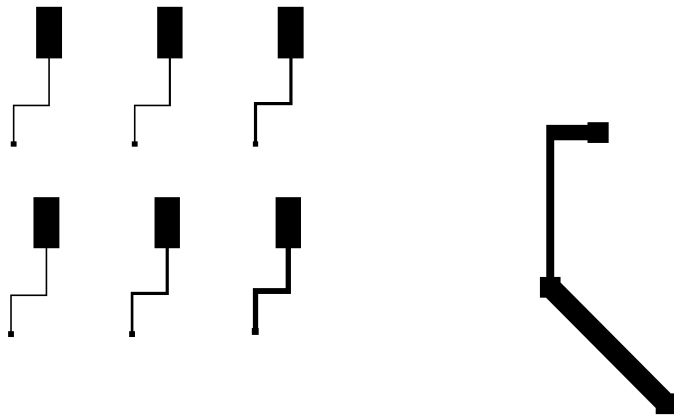


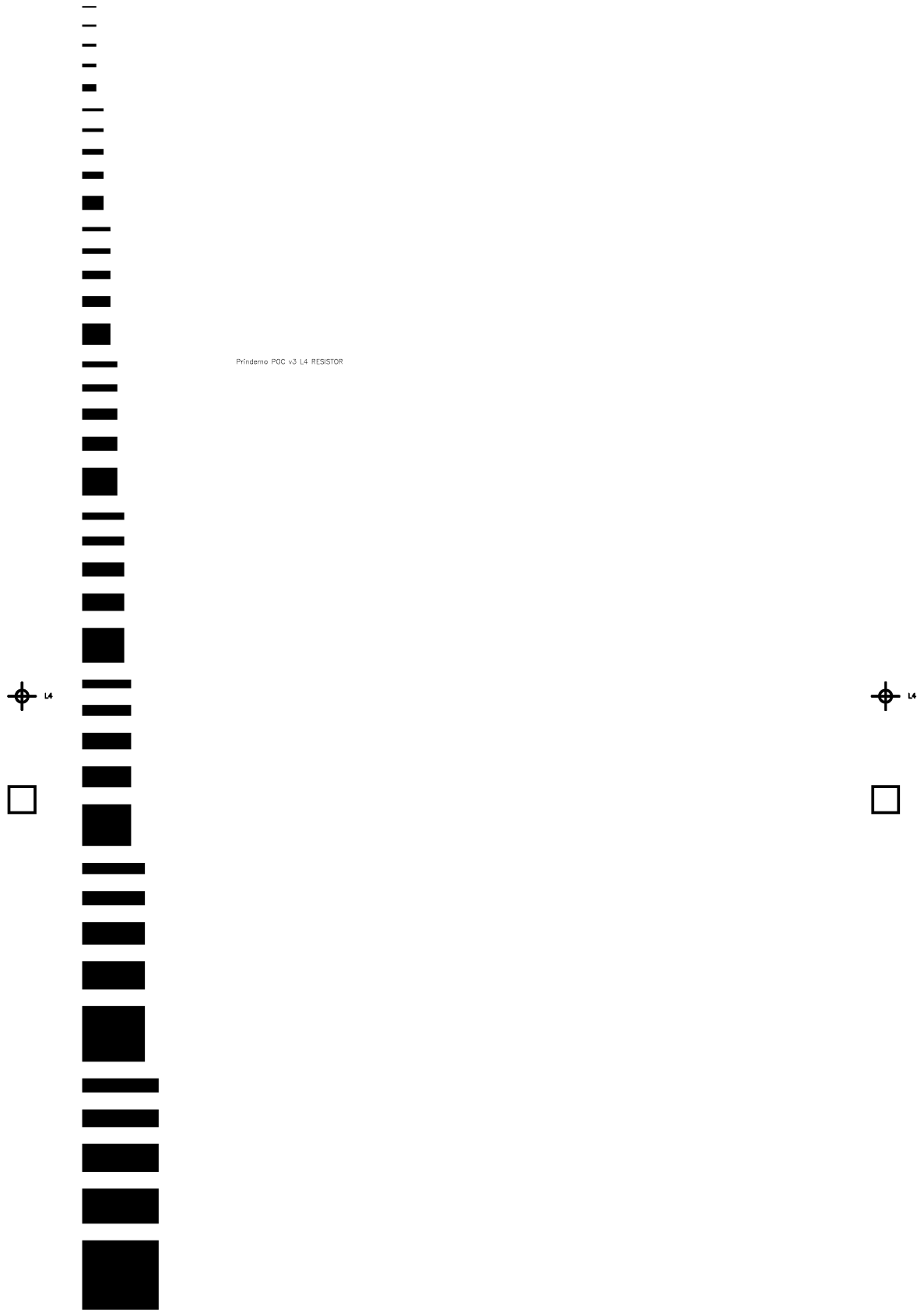
Prindemo PDC v3 L2 INSULATOR

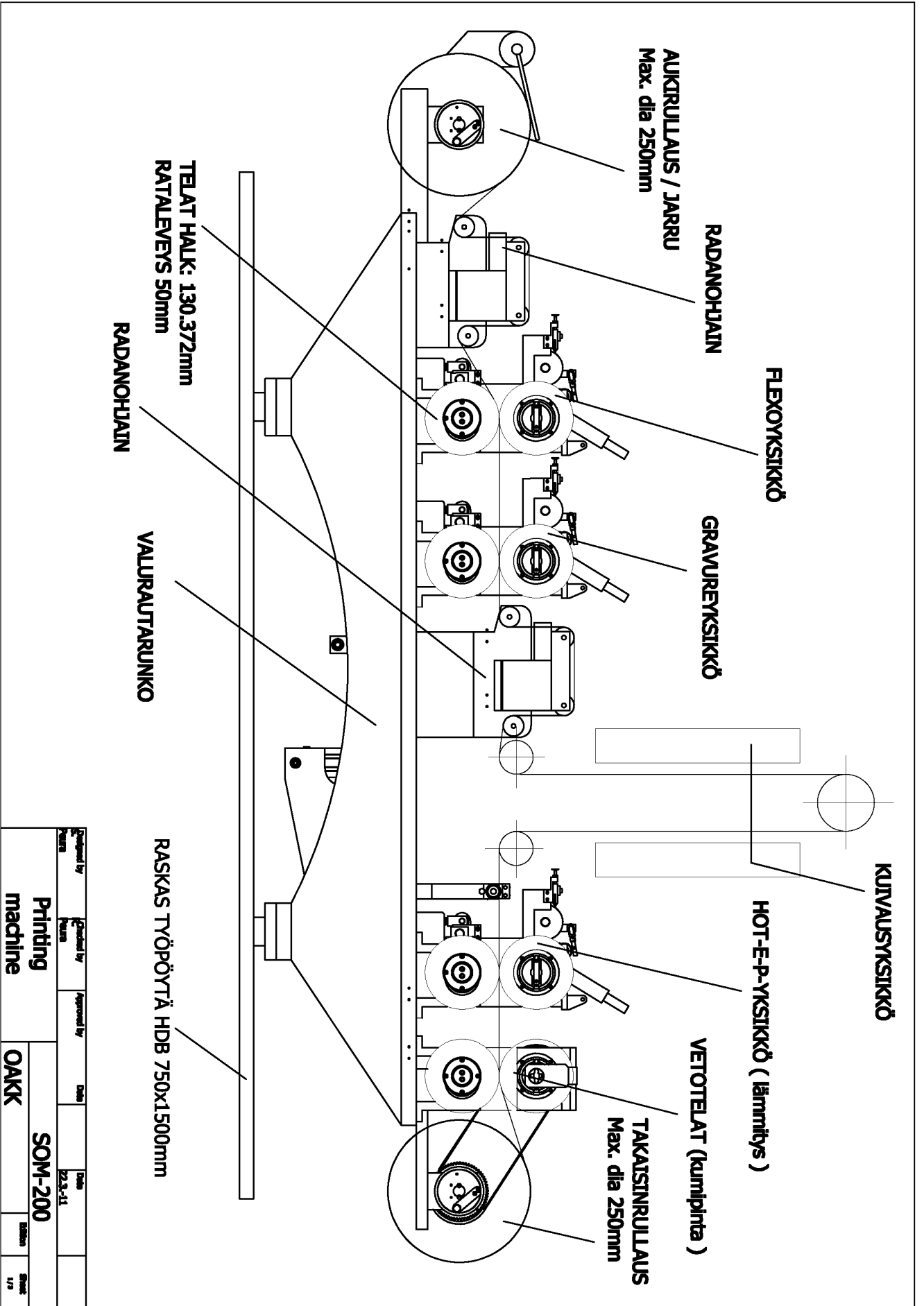




Printemo POC v3 L3 BRIDGE







Painetun kelan tietolomake

Käytetyt menetelmät

Painokone: ROKO

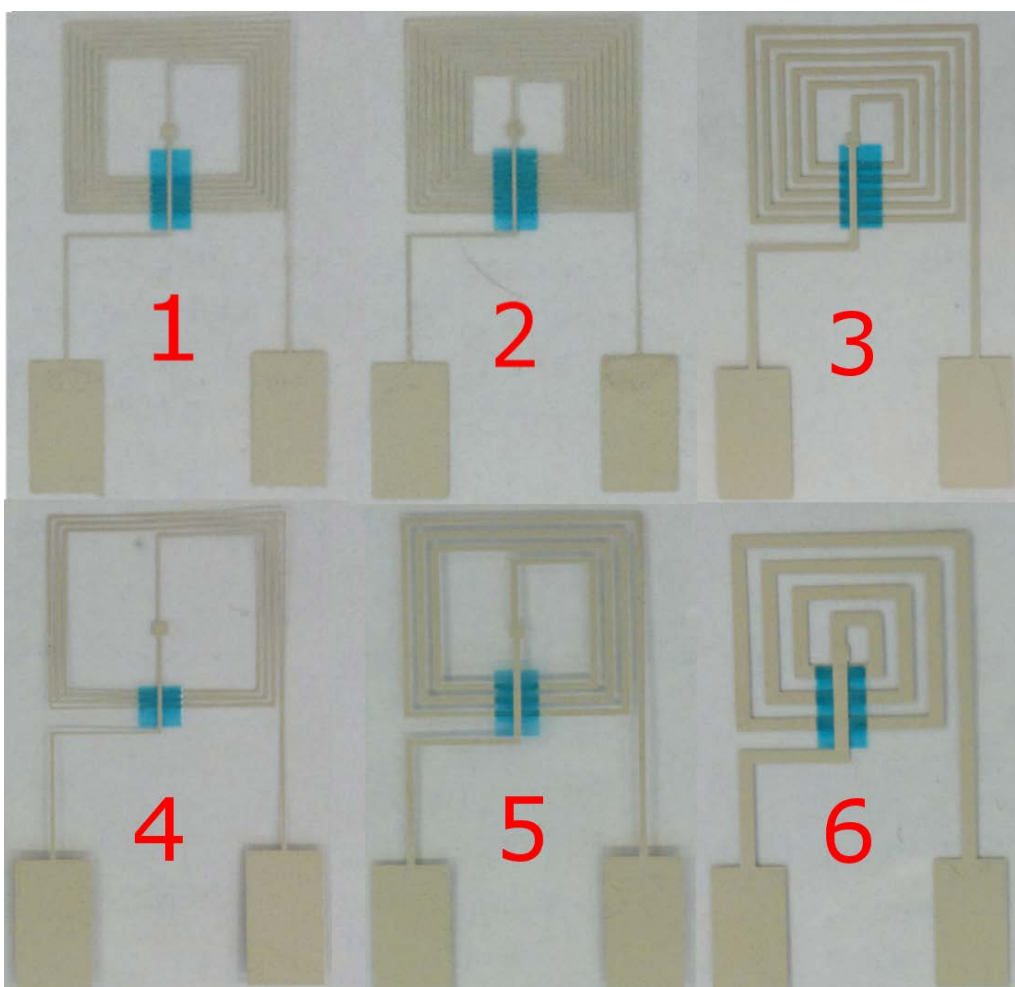
Painotekniikka: Silkkipaino/Seripaino

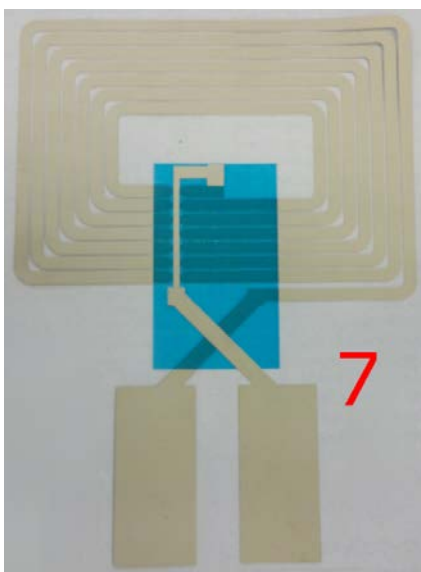
Käytetyt materiaalit

Painomateriaali: Melinex ST506 125 µm / 300 mm

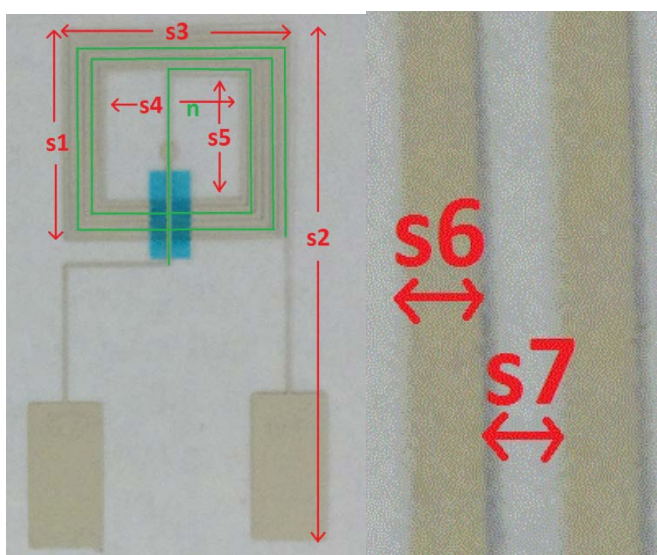
Painomusteet: Hopeamuste: Sunchemical CRSN2442 ja Sunchemical Hidastin 503-99033 (3 m% hopeamusteessa). Käytettiin kerroksissa 1 ja 3. UV-kovetettava eriste: Sunchemical UV600B

Kelat





Keloista otetut mitat



Kela	1	2	3	4	5	6	7
s1	14,20 mm	14,19 mm	14,40 mm	14,20 mm	14,46 mm	14,93 mm	69,81 mm
s2	34,62 mm	34,63 mm	34,56 mm	34,60 mm	34,67 mm	34,93 mm	129,42 mm
s3	15,23 mm	15,19 mm	15,48 mm	15,25 mm	15,47 mm	15,97 mm	95,46 mm
s4	9,26 mm	6,20 mm	5,33 mm	12,27 mm	9,55 mm	8,04 mm	47,53 mm
s5	8,79 mm	5,80 mm	5,51 mm	11,75 mm	9,53 mm	8,99 mm	21,03 mm
s6	0,25 mm	0,26 mm	0,44 mm	0,25 mm	0,50 mm	1,00 mm	2,98 mm
s7	0,21 mm	0,24 mm	0,50 mm	0,22 mm	0,50 mm	0,50 mm	0,51 mm
n	6	9	5	3	3	3	7

Kelojen kerrosten paksuudet:

	Kerros 1	Kerros 2	Kerros 3	Kerrokset 1+2	Kerrokset 1+2+3
Paksuus μm	5,143	20,771	6,312	25,914	32,226

Keloista saadut induktanssiarvot

		Min	Max	Keskiarvo	min%	max%	Toleranssi +/-
Kela μH	1	0,884	0,889	0,887	0,298075	0,26585	0,2980746
	2	1,190	1,276	1,252	4,952077	1,916933	4,9520767
	3	0,379	0,422	0,410	7,609263	2,873063	7,6092635
	4	0,320	0,425	0,413	22,4681	2,972056	22,468099
	5	0,287	0,300	0,294	2,281239	2,145046	2,2812394
	6	0,146	0,173	0,161	9,557522	7,168142	9,5575221
	7	2,591	3,610	3,549	26,99416	1,717898	26,994162

Kalanteroiduista keloista saadut induktanssiarvot

		Min	Max	Keskiarvo	Min%	Max%	Toleranssi +/-
Kela μH	1	0,865	0,887	0,881	1,839994	0,656562	1,8399935
	2	1,193	1,264	1,247	4,295217	1,400541	4,2952168
	3	0,383	0,416	0,408	6,016541	2,081251	6,0165409
	4	0,319	0,419	0,408	21,80095	2,712862	21,800948
	5	0,281	0,297	0,291	3,449698	2,047828	3,4496976
	6	0,145	0,165	0,157	7,562102	5,187953	7,5621016
	7	2,580	3,582	3,531	26,94022	1,434157	26,940222

Kelojen tehonkesto

Kela 1						
Huoneen kosteus	39,30 %					38,70 %
Huoneen lämpötila	24,4 °C					24,3 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	37,981	37,644	37,588	37,568	37,607	37,617
Lämpötila °C	26	28,6	29,1	29,2	29,5	29,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	38,60 %					37,60 %
Huoneen lämpötila	24,5 °C					24,7 °C
Jännite U	10V					10V
Virta I mA	71,852	72,587	73,783	74,85	75,758	76,371
Lämpötila °C	33,6	42,1	45,4	46,6	48,3	51,2
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 2

Huoneen kosteus	37,10 %					37,00 %
Huoneen lämpötila	24,9 °C					24,8 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	30,613	30,786	30,875	30,919	30,944	30,969
Lämpötila °C	33,9	33,4	32,4	31,9	31,5	31,5
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	37,20 %					37,00 %
Huoneen lämpötila	24,9 °C					24,8 °C
Jännite U	10V					10V
Virta I mA	59,142	58,93	59,368	59,887	60,179	60,458
Lämpötila °C	37,7	47,7	49,7	49,6	50,2	50
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 3

Huoneen kosteus	47,80 %					47,10 %
Huoneen lämpötila	24,3 °C					24,7 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	101,125	99,366	99,532	99,978	100,688	100,912
Lämpötila °C	28,9	39,7	41,3	42,7	42,4	43,4
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	47,10 %					47,00 %
Huoneen lämpötila	24,5 °C					24,2 °C
Jännite U	7V					7V
Virta I mA	158,82	174,62	184,88	197,54	201,32	208,48
Lämpötila °C	50,8	73,4	78,3	82,2	83,7	85,5
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 4

Huoneen kosteus	45,60 %					44,60 %
Huoneen lämpötila	24,7 °C					24,9 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	56,843	57,665	58,218	58,531	58,65	58,625
Lämpötila °C	46,4	42,5	39,2	37,5	37,8	37,2
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	45,10 %					44,90 %
Huoneen lämpötila	24,8 °C					24,9 °C
Jännite U	10V					10V
Virta I mA	112,059	115,584	119,771	133,11	136,98	138,7
Lämpötila °C	41,9	53,2	58,2	63,8	67,4	65,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 5

Huoneen kosteus	43,60 %					41,50 %
Huoneen lämpötila	25,0 °C					25,1 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	143,61	145,21	147,94	150,19	151,09	152,05
Lämpötila °C	43,4	48,7	53,5	53,1	53,3	54,3
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	41,50 %					41,30 %
Huoneen lämpötila	25,2 °C					25,0 °C
Jännite U	7 V					7V
Virta I mA	203,39	223,67	244,94	258,96	264,4	266,96
Lämpötila °C	59,7	72,6	77,6	81,4	86,7	87,6
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 6

Huoneen kosteus	39,80 %					39,20 %
Huoneen lämpötila	25,3 °C					25,3 °C
Jännite U	2.5 V					5V
Virta I mA	179,38	183,39	184,79	185,71	186,23	186,78
Lämpötila °C	53,8	49,1	46,8	44,8	44,8	44,8
Aika min	0	5	15	30	45	60

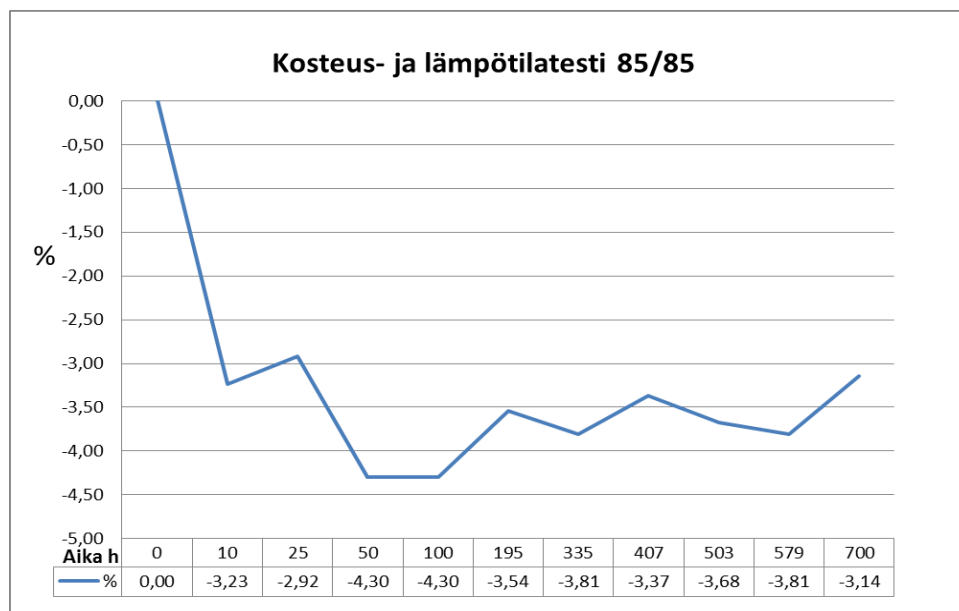
Huoneen kosteus	28,80 %					26,50 %
Huoneen lämpötila	22,6 °C					23,1 °C
Jännite U	4V					5V
Virta I mA	293,06	296,55	304,93	321,03	330,16	336,74
Lämpötila °C	40,4	54,1	59,5	63,3	66,6	68,1
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kela 7

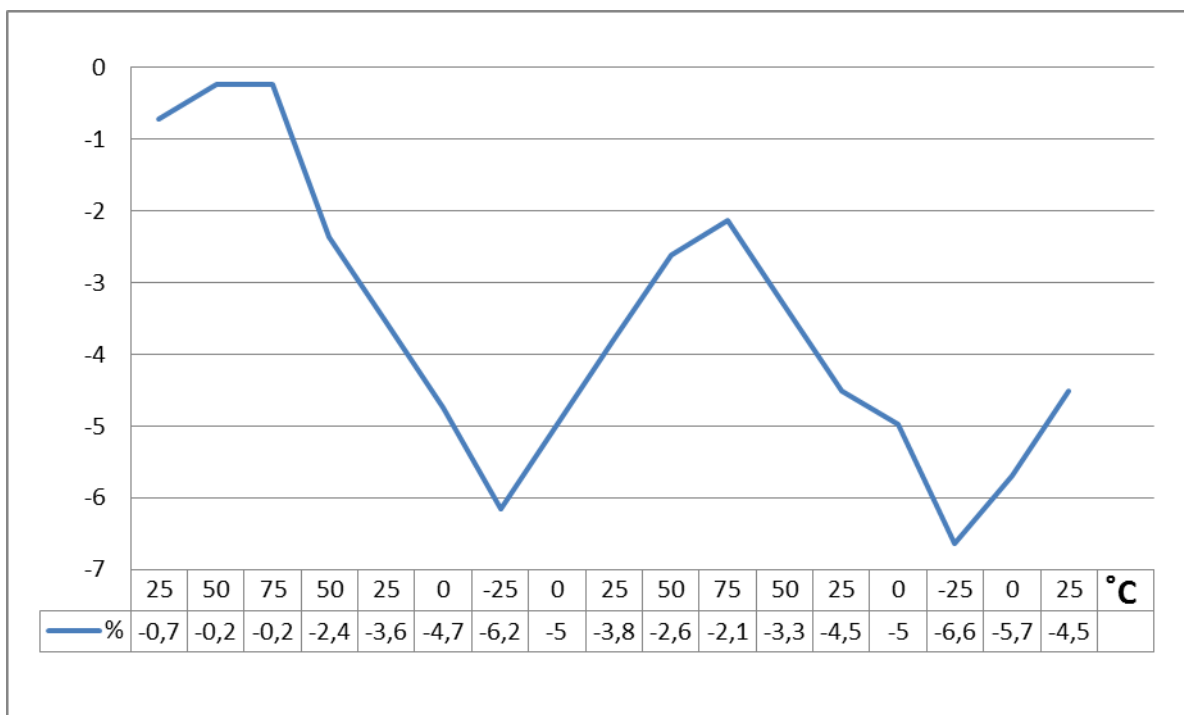
Huoneen kosteus	27,50 %					26,50 %
Huoneen lämpötila	23,0 °C					23,1 °C
Jännite U	5V					5V
Virta I mA	107,265	107,127	107,183	107,105	107,98	107,081
Lämpötila °C	28,8	27,8	26,5	26,1	25,9	25,7
Aika min	0	5	15	30	45	60

Huoneen kosteus	26,50 %					26,60 %
Huoneen lämpötila	23,1 °C					23,3 °C
Jännite U	10V					5V
Virta I mA	235,75	233,51	231,56	230,42	230,1	230,26
Lämpötila °C	26,7	33,2	35,1	35,9	36,5	36,1
Aika min	0	5	15	30	45	60

Kosteus- ja lämpötilatesti 85/85



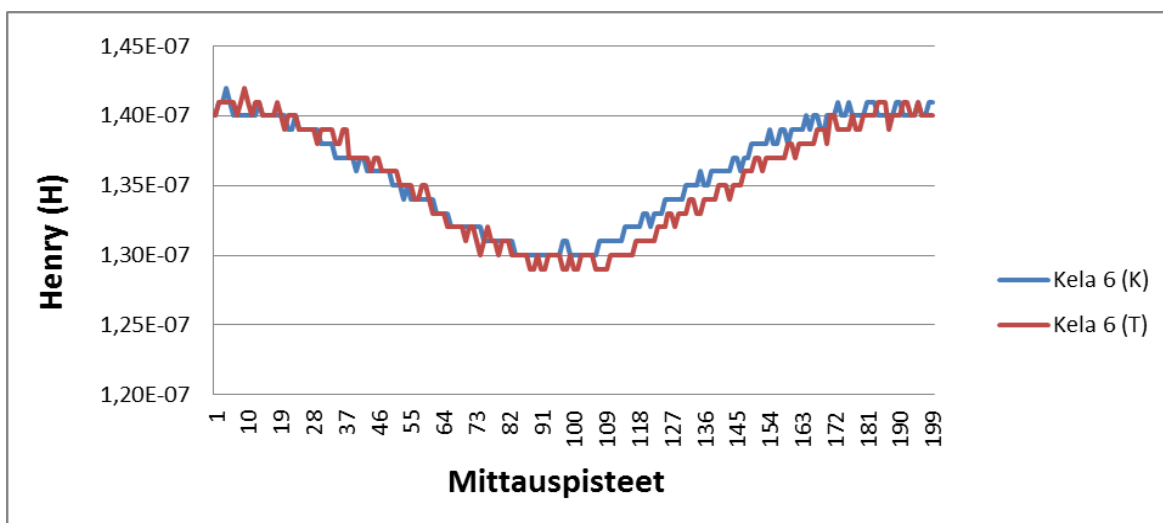
Kelan induktanssin lähtöarvosta pudotusta oli noin -3 %:n mittauksen alussa. Muutoin arvot heittelivät -3 %:n ja -4 %:n välillä.

Lämpötilatesti

Induktanssi muuttui lämpötilan mukaisesti.

Taivutustesti

Kuvassa näkee kelalle 6 tehdyn kompressio- ja tensiotaivutuksen tulokset. Mittauspisteet kertovat kelan induktanssiarvon taivuttamisen aikana. Mittaus on otettu samasta kohtaa. Mittauksen aikana induktanssi ja kelan kulma r muuttuvat taivutuksen mukaan. Taivuttaessa kela kasaan arvot laskevat ja taivuttaessa takaisin alkuasentoon arvot nousevat. Mittauksien aikana otettiin tulokset 1000 kohtaa, joista nähtävillä on 199 mittauksen tuottama käyrä.



Taivutuksessa kompressiolla ja tensiolla ei ole suurta eroa. Kompressiossa heittoa on $-8,4\%$:a induktanssin alkuarvoon ja tensiossa $-9,1\%$:a alkuarvoon nähden. Kelalle 5 tehdyssä taivutuksessa kompressio tuotti $-8,6\%$ eron alkuarvoon. Kela 5 johdin on kelan 6 johdinta kapeampi. Kela on taivutuksessa maksimissaan taulukossa olevan kuvaajan ollessa alhaalla.

Koska komponentti ei taivu symmetrisesti, ei kelalle tapahtuvasta taivutussäteestä voida olla täysin varmoja jatkuvasti. Tärkeimpänä tietona voidaan kuitenkin pitää hetkeä, kun kela on taivutettu maksimiin, jonka jälkeen alkaa jälleen leventäminen. Kun kela on taivutettu maksimiin on sen r eli kulma tällöin noin 7 mm . Kulma on voitu määrittää webbikameran ja erillisten ohjelman avulla. Ohjelma sijoittaa ympyrän kaarelle taivutetun komponentin jokaiseen pisteeseen, jolloin saadaan arvioitu taivutussäde.