

Henna Lepistö

# Fotoresistien soveltuvuuden testaus teräslevyjen etsaukseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

30.4.2016

Tekijä Otsikko	Henna Lepistö Fotoresistien soveltuvuuden testaus teräslevyjen etsaukseen
Sivumäärä Aika	51 sivua + 3 liitettä 30.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Prosessitekniikka
Ohjaajat	Lehtori Timo Seuranen R&D Project Manager Kristian Lappalainen
<p>ID-turvatuotteiden valmistusprosessi sisältää vaiheen, jossa asiakkaan haluama kuva syövytetään teräslevyyn. Tässä insinööriyössä tutkittiin kahta erilaista, markkinoilla olevaa fotoresististä ja testattiin niiden soveltuvuutta teräslevyjen etsaukseen. Fotoresisteistä toinen oli koostumukseltaan kiinteä kuivaresisti ja toinen nesteresisti. Sekä kuivaresistillä että nesteresistillä saavutettua syövytyksen laatua verrattiin yrityksellä nykyisin käytössä olevan fotoresistin antamaan laatuun. Nykyiselle fotoresistille pitäisi löytää korvaava vaihtoehto vuoteen 2017 mennessä, ennen kuin yksi sen sisältämistä komponenteista muuttuu luvanvaraiseksi.</p> <p>Kokeissa resisteille testattiin eri valotusaikoja, kehitysaikoja, kehitystapoja sekä syövytysaikoja. Tavoitteena oli löytää oikeat arvot kullekin parametrille, joilla saisi aikaan yhtä hyvää laatua kuin nykyisellä prosessillakin. Suurin osa kokeista suoritettiin yrityksen tiloissa, lukuun ottamatta muutamia kuivaresistikokeita, jotka suoritettiin piirilevytehtaalla Tuusulassa. Lisäksi kuivaresistillä tehtiin laminointikokeita ja nesteresistille etsittiin sopivaa laimennussuhdetta.</p> <p>Nykyinen fotoresisti pystyy toistamaan jopa 10 µm leveää viivaa ja sitä tavoiteltiin myös testattavien resistien kanssa. Kuivaresistin kanssa tulokset olivat melko huonoja ja pienin viivanleveys johon päästiin, oli 40 µm. Nesteresisti puolestaan antoi heti selkeästi parempia tuloksia ja lopulta sillä saatiinkin toistettavaa, 20 µm:n levyistä linjaa. Vielä ei voida kuitenkaan sanoa, että nykyiselle fotoresistille olisi löytynyt korvaaja.</p> <p>Vaikka tavoiteltu viivanleveys jäi vielä saavuttamatta, on suositeltavaa jatkaa kokeita mieluummin nesteresistin, kuin kuivaresistin kanssa. Nesteresistin ongelmat, kuten kalvon reikäisyys, on ratkaistava, jos se halutaan ottaa käyttöön etsausprosessiin. Tutkimus antoi kuitenkin positiivisia tuloksia ja on mahdollista, että tavoiteltu laatu ja viivanleveys saavutetaan vielä lisäkokeiden avulla.</p>	
Avainsanat	fotoresisti, etsaus, kuivaresisti, nesteresisti

Author Title	Henna Lepistö Testing the suitability of photoresists for steel plates etching
Number of Pages Date	51 pages + 3 appendices 30 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	Process Engineering
Instructors	Timo Seuranen, Senior Lecturer Kristian Lappalainen, R&D Project Manager
<p>ID product production includes one process step called steel plate etching. The subject of this thesis was study two different, commercial photoresists and to test how they suit the etching process. One of the resists was a solid dry film, and the other was a liquid photoresist. The target was to compare these two films and the etching quality that they give, to the current photoresist's etching quality. The company must find a new photoresist to replace the current one because one of the components in the current photoresist will be forbidden in 2017.</p> <p>In the experimental part, resists were tested with respect to different exposure times, development times, development methods and etching times. The aim was to find suitable values for each parameter, in order to achieve the same quality as the process yields. Most of the tests were made at the company, but some tests were made at the PCB factory in Tuusula. Dry film underwent lamination tests, and liquid film was tested with different dilutions.</p> <p>The current photoresist can reach a 10-<math>\mu\text{m}</math> linewidth, which was also the target for the tested photoresists. The results with dry film were not so good, and the smallest linewidth that was possible to reach was 40 <math>\mu\text{m}</math>. Etching with liquid film gave considerably better results, and the smallest linewidth result was 20 <math>\mu\text{m}</math>. Despite the fact that the result with liquid film was very close to the current quality, it is not possible to say that liquid film could replace the current photoresist immediately.</p> <p>Although the target of a 10-<math>\mu\text{m}</math> linewidth was not achieved, it is recommended that these tests be continued with liquid film rather than with dry film. Liquid film still has its problems with holes, dust and dirt, which has to be solved before the resist can be used in the etching process. Nevertheless, this research gave very positive results, and it is very possible to reach the desired quality and linewidth by conducting a few extra tests.</p>	
Keywords	photoresist, etching, dry film, liquid film

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Fotoresisti	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Kuivaresisti	2
2.3	Nesteresisti	4
2.4	Fotoresistin aktiivisuus	5
3	Etsausprosessin vaiheet	6
3.1	Levyn pinnan esikäsittely	6
3.2	Resistin siirto levyille	7
3.3	Valotus	8
3.3.1	Filmi	8
3.3.2	Valotusreaktio	9
3.3.3	Paikkaus	10
3.4	Kehitys	10
3.5	Syövytys	11
3.6	Resistin poisto	11
4	Nykyisen etsausprosessin ongelmat	12
4.1	Ongelmat etsausprosessin eri vaiheissa	12
4.2	Ammoniumdikromaatti	12
5	Kuivaresistikokeet	13
5.1	Kuivaresistin laminointi	13
5.2	Valotuskokeet	14
5.3	Kehityskokeet	15
5.4	Syövytyskokeet	15
5.5	Laminointi-, valotus- ja kehityskokeet piirilevytehtaalla	16
5.6	Pistearviointi ja parametrien tarkastelu suhteessa viivanleveyteen	17
6	Kuivaresistikokeiden tulokset	18

6.1	Laminointikokeiden tulokset	18
6.2	Alustavat kokeet	20
6.3	Valotusajan ja kehitystavan vaikutukset	22
6.4	Toistokokeet	23
6.5	Piirilevytehtaalla tehdyt kokeet	24
6.6	Piirilevytehtaalla laminoitujen levyjen koetulokset	25
6.7	Pistearviointi	27
6.8	Parametrien vaikutus viivanleveyteen	30
6.9	Tulosten tarkastelu	33
7	Nesteresistikokeet	34
7.1	Laimennussuhde ja resistin paksuus	34
7.2	Koesuunnitelma	35
7.2.1	12 askeleen ohjelma	35
7.2.2	Koesuunnitelman kokeet	35
7.3	Toistokokeet	37
7.4	Lisäkokeet resistin paksuuden ja syövytysajan muutoksille	37
8	Nesteresistikokeiden tulokset	38
8.1	Laimennussuhteen löytyminen	38
8.2	Koesuunnitelman tulokset	38
8.2.1	Viivanleveyteen vaikuttavat tekijät	39
8.2.2	Mallin luotettavuuden toteaminen ja optimiarvot	41
8.3	Toistokokeiden ja lisäkokeiden tulokset	44
8.4	Tulosten tarkastelu	46
9	Uuden fotoresistin vaatimat muutokset etsausprosessiin	47
9.1	Kuivaresisti	47
9.2	Nesteresisti	48
10	Päätelmät ja jatkosuunnitelma	48
11	Yhteenveto	49
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Liite 1. Toistokokeiden tulokset kuivaresistillä	
	Liite 2. Pistearvioinnin tulokset	
	Liite 3. 12 askeleen ohjelma	

## Lyhenteet

DNQ	Diatsonaftakinoni, positiivisen nesteresistin valoherkkä komponentti.
ID	<i>Identifier</i> , yksilöllinen tunniste.
Mikroni	Mikrometri, $\mu\text{m}$ .
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i> . Euroopan parlamentin ja neuvoston antama asetus kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista.
Resisti	Valoherkkä kalvo, fotoresisti.
UV-valo	Ultraviolettisäteily, aallonpituus 100–380 nm.

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tilaajana toimii kansainvälinen yritys, joka on alan johtava digitaalisen turvallisuuden tuottaja maailmassa. Suomen toimipisteessä valmistetaan korkean teknologian ja turvatason ID-tuotteita, kuten passeja ja henkilökortteja. ID-tuotteiden valmistusprosessi sisältää lukuisia työvaiheita, joista yksi on teräslevyjen etsaus. Tässä työssä teräslevyjen etsauksella tarkoitetaan asiakkaan tilaaman kuvan syövyttämistä teräslevyyn. Prosessissa on kuusi vaihetta: pinnan esikäsitteleminen, valoherkän kalvon siirto levyille, valotus, kehitys, syövytys ja valoherkän kalvon poisto. [1; 2.]

Nykyisessä etsausprosessissa käytetään valoherkkänä kalvona materiaalia, joka sisältää ammoniumdikromaattia. Ammoniumdikromaatin käytöstä tulee luvanvaraista 21.9.2017, mikä tarkoittaa, että yrityksen on lopetettava sen käyttö määräaikaan mennessä. Jotta etsausta pystytään jatkamaan, on löydettävä korvaava vaihtoehto ammoniumdikromaatille tai kokonaan uusi valoherkkä kalvomateriaali. [3; 4.]

Insinööriyön tavoitteena on testata kahta erilaista, markkinoilla olevaa valoherkkää kalvoa, verrata niiden tuottamaa laatua nykyisellä etsausprosessilla saatavaan laatuun ja selvittää, mitä prosessimuutoksia uusi kalvo tulisi tarvitsemaan. Toivottavaa on, että ainakin toinen kalvoista tuottaisi yhtä hyvää tai parempaa laatua kuin nykyinen kalvomateriaali, ja nykyinen prosessi pystyttäisiin muuttamaan uuden kalvon kanssa toimivaksi ennen määräajan täyttymistä. Jos nykyiselle kalvomateriaalille ei löydetä korvaajaa insinööriyön teon aikana, todetaan tulos ja ehdotetaan, miten testausta voisi jatkaa tulevaisuudessa.

Valoherkkää kalvoa eli fotoresistiä käytetään paljon myös piirilevyjen valmistuksessa ja puolijohdeteollisuudessa, ja näistä aloista ja niiden tekniikoista onkin otettu mallia tätä insinööriyötä varten. Puolijohdeteollisuudessa fotoresistiä tarvitaan mikropiirien valmistuksessa, jolloin valmistusmenetelmää kutsutaan optiseksi litografiaksi, fotolitografiaksi tai UV-litografiaksi. Fotoresistin ja optisen litografian historia ulottuu vuoteen 1826, jolloin ranskalainen keksijä Joseph Niepce päälysti tinaseosta sisältävän levyn luonnonasfaltilla ja huomasi asfaltin olevan herkkä valolle sen kovettuessa auringonvalossa. Optisen litografian keksimisen lisäksi Niepceä pidetään myös valokuvauksen pioneerina. [5; 6.]

## 2 Fotoresisti

### 2.1 Yleistä

Fotoresistiksi kutsutaan valoherkkää materiaalia, joka pystyy muodostamaan yhtenäisen kalvon substraatin pinnalle. Olennainen ominaisuus fotoresisteille on, että sopivalla aallonpituudella valotettuna resistin valottuneita ja valottumattomia alueita voidaan jatkokäsitellä ilman, että ne vaikuttavat toisiinsa. Fotoresistit ovat herkkiä valolle aallonpituudella 200–500 nm, ja ne valotetaan UV-valolla (aallonpituus 100-380 nm). [7, s. 296–297.]

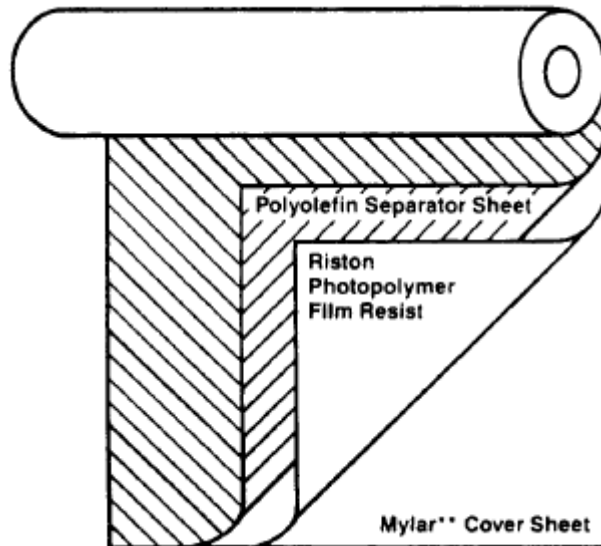
Sopiva työskentelytila resisteille on puhdas, jotta pystytään välttämään epäpuhtauksien tarttuminen resistiin. Huoneen lämpötila saisi olla noin 20 astetta ja kosteus noin 50 %. Erityisen tärkeää on työskennellä keltaisessa valossa, sillä normaalissa valossa resisti valottuu ennen aikojaan ja muuttuu käyttökelvottomaksi. Keltaisen valon alue on 560–700 nm välissä. Resistien teknisissä ohjeissa on usein mainittu työskentelyolosuhteiden lisäksi myös säilytysolosuhteet. Resisti olisi hyvä säilyttää ohjeiden mukaisesti, jotta sen ominaisuudet eivät heikkenisi ja resisti pysyisi toimivana koko käyttöikänsä ajan. [7, s. 297; 8, s. 6, 11.]

Fotoresistit voidaan jakaa kiinteisiin kuivakalvoihin (kuivaresisti) ja nestemäisiin märkäkalvoihin (nesteresisti). Riippumatta siitä kumpaa resistityyppiä käyttää, kuvan siirto substraatille, eli tässä tapauksessa teräslevyyn, tapahtuu samojen vaiheiden kautta. Sekä kiinteitä että nestemäisiä resistejä löytyy positiivisesti ja negatiivisesti aktiivisina. Tässä työssä keskitytään negatiiviseen kuivaresistiin ja positiiviseen nesteresistiin. [7, s. 297.]

### 2.2 Kuivaresisti

Kuivaresisti koostuu kolmesta erilaisesta kalvokerroksesta (kuva 1): päällyskalvo on polyesteriä, keskimmäinen kalvo fotoresistiä (polymeeriä) ja alin kalvo polyeteeniä. Kuivaresistiä on helppo käsitellä, koska se on kiinteää, tasalaatuista ja toimitetaan rullissa. Fotoresistikalvojen paksuus vaihtelee 25–50 µm välillä. [9, s. 588.]





Kuva 1. Kuivaresistin rakenne [9, s. 588].

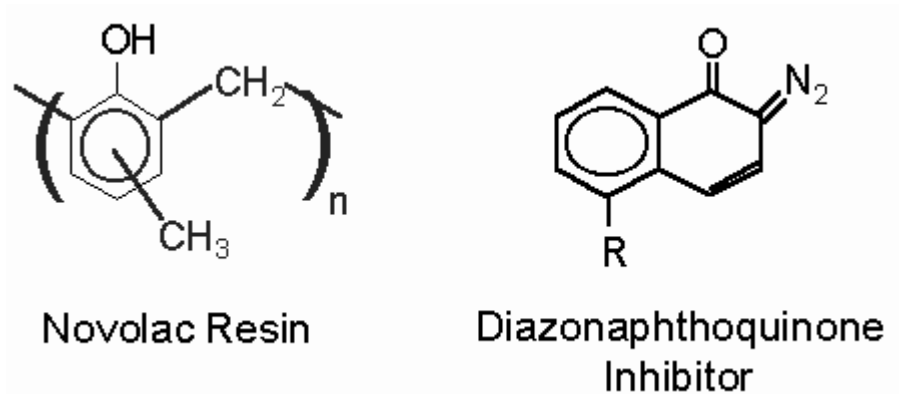
Helppokäyttöisyyden lisäksi kuivaresistin huomattavin hyöty on, että kalvosta tulee saman paksuinen ja tasainen joka puolelta, mikä edesauttaa paremman ja tasaisemman laadun saamista valmiiseen tuotteeseen. Kuivaresisti hylkii myös paremmin epäpuhtauksia kuin nesteresisti, koska kalvo on kiinteä ja sisältää suojakalvon. [10.]

Vaikka eri kuivaresistien kemiallinen koostumus vaihtelee, jokainen niistä rakentuu polymeerisestä perusrakenteesta, joka määrittää resistin liukoisuuden ja kemiallisen vastustuskyvyn. Lisäksi kuivaresisti sisältää aina valoherkän komponentin, monomeerin, väriaineen sekä lisäaineita. Valotuksessa valoherkkä komponentti reagoi UV-valoon ja samalla monomeeriin, joka muuttaa resistin liukoisuutta valottuneilla alueilla. Väriaine vaihtaa väriään valotuksen aikana, jolloin resistiin ilmestyy näkyviin siihen valotettu kuva. Lisäaineina on yleensä adheesiota tukevia, resistiä notkistavia aineita ja muita komponentteja, jotka lisäävät resistin toivottavia ominaisuuksia. [9, s. 589–590.]

Laminointi on ainoa tapa saada kuivaresistikalvo substraatin päälle. Yleisin laminaattorimalli on kuumarullalaminaattori, jossa substraatti kulkee kahden kuuman (noin 110 °C) rullan läpi ja kalvo samalla laminoituu substraatin päälle. Samaan aikaan laminaattori poistaa resistin alimman polyeteenikalvon. [7, s. 301; 11.]

### 2.3 Nesteresisti

Positiivisten nesteresistien pohjana on usein Novolak-polymeeri, eli kresolihartsia, joka on synteettisesti valmistettu fenolista ja formaldehydistä. Molekyyliketjun pituus vaikuttaa resistin ominaisuuksiin: pidempiketjuisilla resisteillä on parempi lämmönkestävyys, kun taas lyhempiketjuisuus parantaa substraatin ja resistin välistä adheesiota. Novolakin lisäksi resisti tarvitsee valoherkän komponentin, joka positiivisissa nesteresisteissä on usein diatsonaftakinoni (DNQ). Kuvassa 2 on esitetty Novolakin ja DNQ:n kemialliset rakenteet. [12, s. 7.]



Kuva 2. Positiivisen nesteresistin komponenttien kemialliset rakenteet [13].

UV-valolla valottaessa DNQ muuttuu valon vaikutuksesta karboksyylihapoksi. Karboksyylihapo lisää Novolakin emäsluokoisuutta ja saa valottuneet alueet kehittymään paremmin kehitysvaiheessa, koska kehite on emäksistä. Reaktio on esitetty kohdassa 3.3.2 Valotusreaktio. [12, s. 7.]

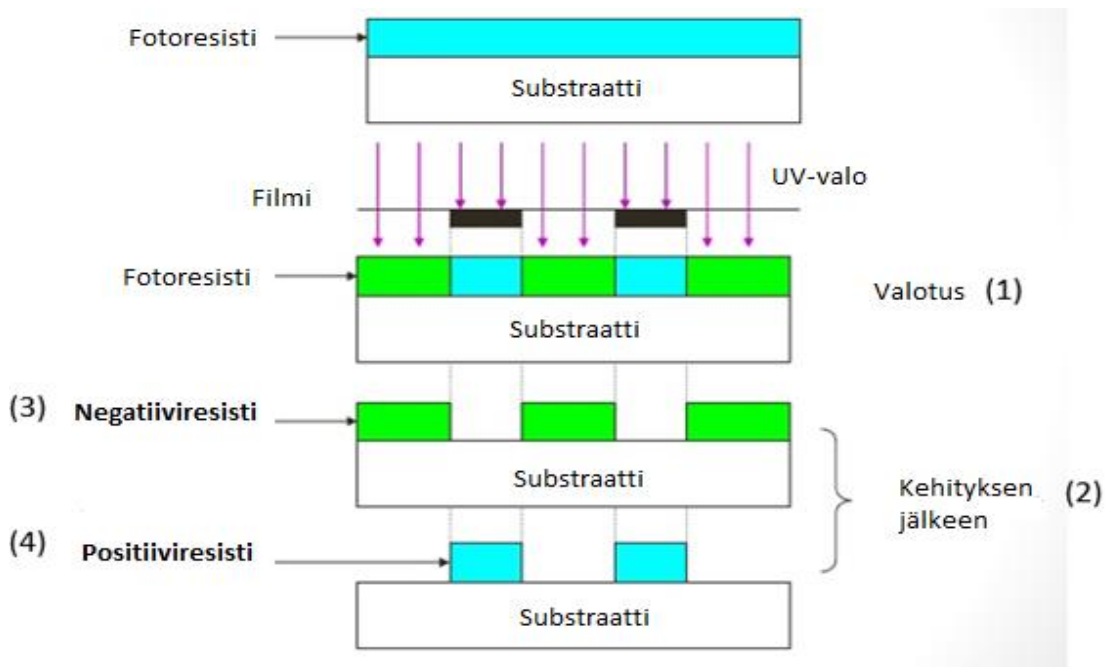
Negatiivinen nesteresisti valmistetaan yleensä kresolihartsista ja melamiinista, tai akryylihartsista. Kuten positiivisessa nesteresistissä, myös negatiivisen resistin valotuksessa syntyy karboksyylihapo. Hapon tehtävä on toimia alustavana tekijänä siinä, että polymeeriketjut alkavat kiinnittymään toisiinsa. [12, s. 7.]

Päällystettäessä substraattia nesteresistillä päällystystapa voidaan valita neljästä menetelmästä, jotka ovat ruiskutus, kastaminen, rullapäällystys ja linkoaminen. Tässä työssä

keskitytään linkoamiseen. Nesteresistillä tiedetään olevan parempi resoluutio kuin kuu- varesistillä, jolloin sillä voidaan oletettavasti päästä tarkempaan laatuun ja kapeampaan viivanleveyteen linjoissa. Negatiivisia puoliakin nesteresististä löytyy, sillä kalvon pak- suus vaihtelee helposti nestemäisyyden takia, resistimateriaali on voimakkaan hajuista sekä sotkevaa, ja resistiä täytyy laimentaa ennen sen levittämistä. [10, 14.]

#### 2.4 Fotoresistin aktiivisuus

Fotoresisti voi olla joko negatiivisesti tai positiivisesti aktiivinen. Kuvassa 3 näkyy aktiivi- suuden vaikutus valotus- ja kehitysvaiheessa. Aktiivisuuden suunta on merkittävä valo- tuksessa (1), sillä negatiiviresistissä valottuneet alueet kovettuvat ja positiiviresistissä ne muuttuvat helpommin liukeneviksi. Kehityksen jälkeen (2) negatiivista resistiä (3) käytet- täessä resisti jää niihin kohtiin, joihin valo on osunut, ja valottumattomat alueet kehittyvät auki. Positiivisessa resistissä (4) vaikutus on päinvastainen: valottuneet alueet kehittyvät auki ja valottumattomille alueille jää resisti. [7, s. 297]



Kuva 3. Negatiivisen ja positiivisen resistin erot [15].

Negatiivinen kuivaresisti on käytetyin resistityyppi teräslevyjen etsauksessa, ja niitä myös valmistetaan huomattavasti enemmän kuin positiivisia. Nesteresisteistä käytetympi on positiivinen resisti, jota käytetään muun muassa mikropiirien valmistuksessa. Positiivinen resisti on erottelukyvyltään useimmiten myös parempi kuin negatiivinen. [16.]

### **3 Etsausprosessin vaiheet**

Teräslevyn etsaukseen sisältyy kuusi vaihetta: levyn pinnan esikäsitely, resistin siirto levyn pinnalle, valotus, kehitys, syövytys ja resistin poisto. Etsausprosessin alussa on vain sileä ja peilipintainen teräslevy ja prosessin lopussa levyssä on siihen syövytetty kuva, jolloin levy on valmis siirtymään jatkokäsiteltäväksi seuraavaan prosessiin.

#### **3.1 Levyn pinnan esikäsitely**

Teräslevystä poistetaan sitä suojaavat muovikalvot ja paljas levy esikäsitellään ennen resistin laminointia tai levittämistä. Ensimmäiseksi tarkistetaan onko levy naarmuttunut tai muuten vahingoittunut. Naarmut ja muut virheet levyssä johtavat automaattisesti levyn hylkäämiseen, sillä pinnan täytyy pysyä täysin sileänä prosessin loppuun saakka. [2.]

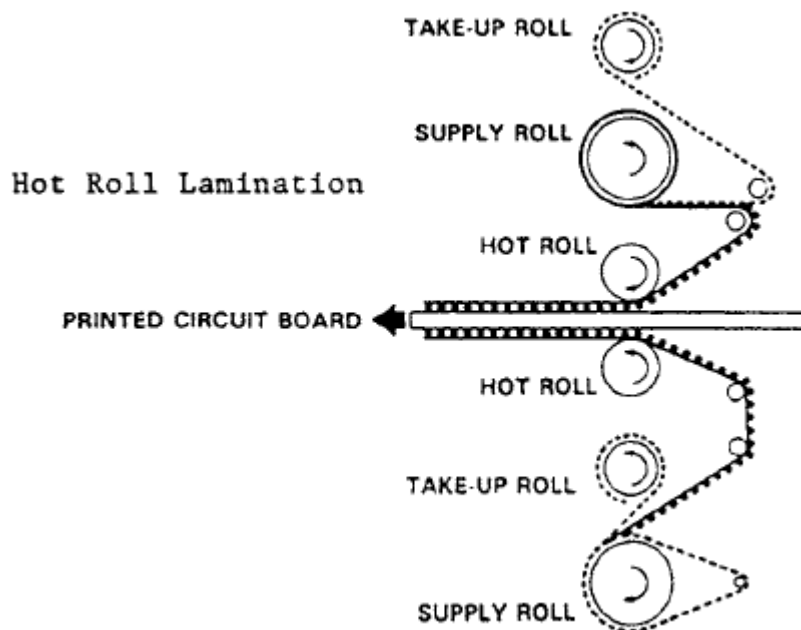
Esikäsitelyn tarkoituksena on puhdistaa levy rasvoista ja epäpuhtauksista. Lisäksi levyn pinnan ja resistin välistä adheesiota pyritään kasvattamaan, jotta resisti kiinnittyisi levyn pintaan paremmin. Koska levyn pinta halutaan pitää sileänä ja peilipintaisena, adheesiota ei voida kasvattaa mekaanisin keinoin, kuten esimerkiksi piirilevyteollisuudessa on tapana tehdä. [2.]

Pinnan esikäsitelymekanismit eivät ole aina samoja, vaan riippuvat muun muassa levyn materiaalista ja resistin ominaisuuksista. Jotkin kuivaresistit eivät kestä emäksiä, jolloin levyn pinnan pH täytyy saada neutraaliksi tai happamaksi [10]. Nesteresistiä käytettäessä suositellaan kaksivaiheista puhdistusprosessia: orgaanisten epäpuhtauksien poistoa asetonilla ja huolellista jälkihuuhdelua isopropanolilla [12, s. 15]. Resistejä löytyy sekä vesi-, että liuotinpohjaisia, jolloin on huomioitava myös veden käytön mahdollisuus levyä puhdistettaessa.

### 3.2 Resistin siirto levyille

Resistin siirtotapa riippuu sen koostumuksesta. Kuivaresisti laminoidaan levyn päälle ja nesteresisti voidaan levittää esimerkiksi linkoamalla, kastamalla tai ruiskuttamalla. Siirtovaihe on hyvin merkittävä, sillä resistin on kiinnityttävä levyyn tasaisesti ja joka puolelta, jotta se kestävä tulevat prosessivaiheet. Vaihe on myös hyvin riskialtis epäpuhtauksille, jotka saattavat pilata resistin käyttökeltottomaksi. Puhtauden lisäksi on otettava huomioon, että siirto tapahtuu keltaisessa valossa, jolloin resisti ei pääse valottumaan ennen aikojaan.

Laminoinnissa käytetään usein kuumarullalaminaattoria, jossa resisti laminoituu levyn (kuvassa 4 *Printed Circuit Board*) molemmille puolille kahden kuuman rullan puristuksesta. Laminaattori syöttää resistiä kohti rullia ja samalla irrottaa ja kerää talteen resistin alimman kalvon. Kuumarullalaminaattorin toiminta on havainnollistettu kuvassa 4. Eri kuivaresisteille on olemassa valmistajilta saatavat ohjeet laminoinnissa käytettävistä lämpötiloista ja paineista.



Kuva 4. Kuumarullalaminaattorin toiminta [9, s. 597].

Tässä työssä käytetään nesteresistin levitystapana ainoastaan linkoamista, joten muihin levitystapoihin ei ole keskitytty sen enempää. Linkouksessa puhdas levy laitetaan pyöri-

mään linkoon ja nesteresisti kaadetaan levyn keskelle. Keskipakoisvoiman vaikutuksesta resisti leviää levyn reunoille saakka. Levyn annetaan pyöriä lingossa noin 15 minuutin ajan, jolloin resisti ehtii hiukan kuivua ja levyä on silloin helpompi käsitellä. Pyörimisen jälkeen levy nostetaan uuniin, jossa resisti kuivuu kokonaan. Nesteresistin teknisissä ohjeissa on usein ilmoitettu tarvittava uunitusaika ja -lämpötila. [2, 10.]

### 3.3 Valotus

Valotus tapahtuu valotuskoneella, jossa UV-valon vaikutuksesta resistin valottuneet osat joko kovettuvat tai muuttuvat helpommin liukeneviksi. Usein resistien valmistajat ovat maininneet, millä aallonpituudella resisti valottuu ja missä sijaitsee spektrin huippu. Valotuskoneen UV-lampun on vastattava tätä aallonpituutta ja toivottavaa on, että lampun spektrin huippu olisi samassa kohtaa kuin resistinkin.

Valotuskoneita on erilaisia: osassa valotus tapahtuu yksipuoleisesti, jolloin valo tulee yleensä ylhäältä päin ja näin valottaa vain levyn toisen puolen. Lisäksi on olemassa myös koneita, joissa valotus tapahtuu sekä ylhäältä, että alhaalta päin. Näin levy valottuu molemmilta puolilta. Tässä työssä on kuitenkin keskitytty enemmän yksipuoliseen valotukseen.

Valotuksessa levy, joka on päällystetty resistillä, asetetaan valotuskoneeseen UV-lampun alle. Levyn päälle asetetaan filmi, johon on tulostettu haluttu kuva. Levyn ja filmin päälle lasketaan kansi, joka on yleensä kirkasta lasia tai muovia. Ennen varsinaista valotusreaktiota kone luo kannen alle vakuumin eli tyhjiön, jolloin levy ja filmi painautuvat tiukasti kantta vasten. Valotuksen alkaessa valotusalue on peitettävä verholla tai muulla suojalla, jotta UV-valoa ei pääse muualle ympäristöön. [2.]

#### 3.3.1 Filmi

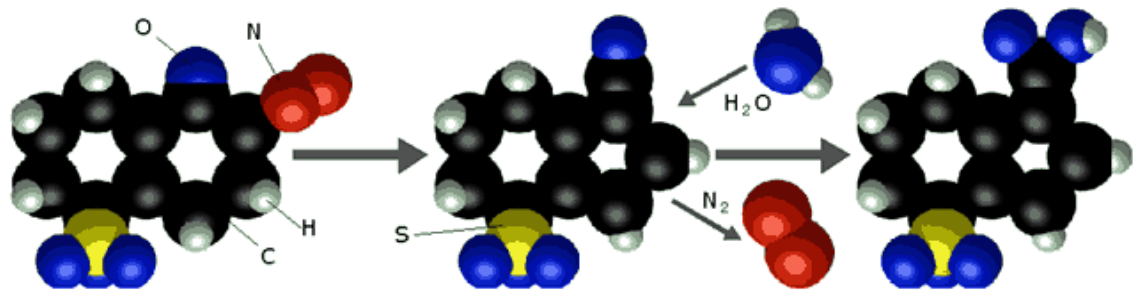
Valotuksessa käytettävä filmi luodaan tietokoneohjelman avulla, piirtämällä siihen haluttu, syövytettävä kuva, jonka jälkeen filmi on valmis tulostettavaksi. Laitteistosta riippuen filmin tulostus kestää keskimäärin noin 20 minuuttia.

Filmejä, kuten resistejäkin, on olemassa sekä positiivisia että negatiivisia. Positiivisessa filmissä syövyttävät linjat on tulostettu mustalla värillä ja muu ympäristö on läpinäkyvää. Negatiivisessa asia on päinvastoin, eli syövyttävät linjat ovat kirkkaalla pohjalla ja ympäristö mustalla pohjalla. Tässä työssä käytettiin negatiiviresistillä positiivista filmiä ja positiiviresistillä negatiivista filmiä. Näin molemmissa tapauksissa levyihin syöpyivät samat linjat.

### 3.3.2 Valotusreaktio

Kuivaresistissä, joka on materiaaliltaan polymeeriä, tapahtuu valotuksen aikana hapettumisreaktio. Hapettumisen vaikutuksesta valottuneiden alueiden väri muuttuu ja valottettu kuva tulee näkyviin resistin pintaan. Mitä pidempi valotusaika on, sitä kauemmin hapettumista tapahtuu ja reaktiossa alkaa muodostumaan karbonyyliryhmiä. Negatiiviresistissä valottunut alue kovettuu ja tummentuu, kun taas positiiviresistissä valottunut alue muuttuu helpommin liukenevaksi. [7, s. 297; 17, s. 2.]

Positiivisessa nesteresistissä, jossa valoherkkänä komponenttina on DNQ, valotuksen vaikutuksesta DNQ menettää typpimolekyylin ja vastaanottaa vesimolekyylin, jolloin DNQ muuttuu karboksyylihapoksi. Kuvasta 5 näkee tämän reaktion. Vasemmalla on DNQ-molekyyli ennen substituutioreaktiota ja oikealla jälkeen.



Kuva 5. Positiivisessa nesteresistissä tapahtuva valotusreaktio [18, s. 5].

Valottumattomiin alueisiin verrattuna karboksyylihappo nostaa resistin emäслиukoisuutta suuresti, minkä vuoksi vain valottuneet alueet kehittyvät auki. [12, s. 45.]

Liian lyhyellä valotusajalla resisti ei ehdi kovettua tarpeeksi, jolloin sen jatkokäsittelyssä saattaa ilmetä ongelmia. Jos substituutioreaktiota ei ole kerennyt tapahtumaan, resisti jää liian pehmeäksi eikä kehity kunnolla. Valotuksen jälkeen onkin hyvä antaa valotetun

levyn odottaa hetken aikaa ennen kehittämistä, jotta resisti ehtii kovettua kunnolla. Liian pitkään valotusaika ei saa olla, sillä silloin valo alkaa kaivautumaan valotettavien linjojen alle. Tämä kaventaa linjoja, jolloin valotettavasta kuvasta ei tule oikeanlainen. [19.]

### 3.3.3 Paikkaus

Valituksen jälkeen, tai joissain tapauksissa vasta kehityksen jälkeen, on mahdollista korjata resistin siirtovaiheessa syntyneet virheet. Näitä virheitä voivat olla muun muassa muodostuneet reiät, roskat ja muut silmällä havaittavat epäpuhtaudet. Virheet tulee paikata sellaisella maalilla tai lakalla, joka kestää syövytyksen. Paikkausaine estää reiän syöpmisen levyyn, jolloin levyyn ei ilmesty ei-haluttuja kuvioita. Jos reikä tai muu epäpuhtaus on valotetun linjan päällä, virhe voi olla mahdotonta paikata ja etsausprosessi on tällöin aloitettava alusta. Resistiiä poistettaessa myös paikkausaine pestään pois. [2.]

### 3.4 Kehitys

Kehitys on yksi tärkeimmistä vaiheista etsausprosessissa. Resistin aktiivisuudesta riippuen joko valottuneiden tai valottumattomien alueiden on kehityttävä kokonaan, jotta etsaus onnistuu ja levyyn syntyy haluttu kuva kokonaisuutena. Kehityksen aikana kehittyneet linjat kirkastuvat, joten on mahdollista itse nähdä, milloin kaikki alueet ovat kehittyneet.

Kehityksen tarkoituksena on kehittää resisti pois niiltä alueilta, jotka halutaan syövyttää. Valotuksessa resistin valottuneet tai valottumattomat osat muuttuvat liukoisuudeltaan erilaisiksi, jolloin kehitysvaiheessa kehite reagoi vain niihin alueisiin, jotka liukenevat kehitteeseen. Kehitteen pitoisuus, lämpötila ja liikkuvuus ovat avaintekijöitä onnistuneeseen kehitykseen. Resistin teknisissä ohjeissa kerrotaan, minkälaisista kehiteliuosta sen kanssa tulee käyttää. [9, s. 610.]

Kehitteen ominaisuuksien lisäksi teknisissä ohjeissa on usein ilmoitettu myös resistin kehittämiseen menevä aika tai breakpoint. Kehitysaika saattaa kuitenkin vaihdella käytännössä suuresti, koska on olemassa erilaisia kehitystapoja ja -koneita, jotka voivat nopeuttaa tai hidastaa kehitystä. Breakpoint ilmaisee prosentuaalisesti sen matkan, jonka kehitettävä levy on kulkenut kehityskoneessa, kunnes kaikki kehitettävät alueet ovat kehittyneet auki. Keskimäärin breakpoint sijaitsee 50–60 prosentin välillä. [8, s. 7.]



Varsinkin kehityskoneissa (ruiskutuskone) ja -kammioissa on yleistä käyttää vaahdonestoaineita vaahtoamisen hallitsemiseksi. Ruiskusuuttimista tuleva kehite vaahtoa herkästi, mutta siitä ei ole mitään haittaa kehitykselle. Usein kehitystä seuraa vielä 1- tai 2-vaiheinen vesihuuhtelu, jonka tarkoituksena on pysäyttää kehittyminen. Huuhteluveden kovuuden kasvattaminen kalsium- tai magnesiumsuoloilla usein parantaa kehittyneen kuvan laatua, mikä taas parantaa syöpymistarkkuutta. [9, s. 610.]

### 3.5 Syövytys

Tässä etsausprosessissa syövytysliuksena toimii rauta(III)kloridi ( $\text{FeCl}_3$ ). Syövytysliuksella täytetään matala allas, johon levyt lasketaan syövytyksen ajaksi. Syövytysliuos peittää levyt kokonaan ja niitä on vaikea havaita liuksen alta, rauta(III)kloridin lähes mustan värin vuoksi. Rauta(III)kloridilla tiedetään olevan korkea syövytystaso ja sitä voidaan käyttää sekä kuiva- että nesteresistillä päällystettyjen levyjen syövytykseen. [7, s. 366.]

Syövytysaika määräytyy sen perusteella, kuinka syväksi syövytettävä kuva halutaan. Syöpymistä nopeuttavat syövytysliuksen tuoreistaminen, eli syövytysliuksen vaihto tuoreempaan, lämpötilan nosto ja syövytettyjen levyjen pyyhkiminen. Pyyhkimisellä tarkoitetaan tässä levyjen sivelyä, jolloin saadaan pyyhittyä syövytysliuosta pois levyn syöpymisurista ja samalla uutta liuosta pääsee pureutumaan syvemmälle uriin. [2.]

### 3.6 Resistin poisto

Viimeinen vaihe etsausprosessissa on resistin poisto eli strippaus. Yleensä strippausaineena toimii 1–3-prosenttinen NaOH- tai KOH-liuos, joka on lämmitetty 50 asteeseen [11]. Levy kastetaan altaassa olevaan strippausaineeseen, jolloin resisti liukenee pois levyn päältä. Kuivaresistin tapauksessa kiinteä resisti irtoaa pieninä paloina, jolloin ne on suodatettava pois strippausaineesta ja hävitettävä erikseen. Nesteresistin poistossa resisti liukenee tasaisesti strippausaineeseen ja joissain tapauksissa myös värjää strippausaineen samalla. Strippausaine on hyvä vaihtaa tasaisin väliajoin poistotehokkuuden takaamiseksi. Poistovaihe on ehdottomasti prosessin helpoin ja yksinkertaisin vaihe eikä vaadi tarkkaa säätelyä eri parametrien kanssa.

## 4 Nykyisen etsausprosessin ongelmat

Suurimmat ongelmat nykyisessä etsausprosessissa ovat resistiin kiinnittyvät epäpuhtaudet, manuaalisuus ja veteen liukeneva fotoresisti. Itse fotoresistiin liittyvä ongelma on sen valoherkkä komponentti, ammoniumdikromaatti.

### 4.1 Ongelmat etsausprosessin eri vaiheissa

Nykyisessä prosessissa resisti on nestemäinen ja haasteita tuottaa erityisesti resistin levitysvaiheessa muodostuvat ilmakuplat ja reiät, sekä kiinnittyneet roskat ja muut epäpuhtaudet. Jotta myöhemmissä vaiheissa ei ilmenisi ongelmia, resistikerroksen tulisi olla puhdas ja tasainen joka puolelta. Resistissä olevia reikiä pystytään paikkaamaan valotuksen jälkeen, jos reiät eivät sijaitse valotetun kuvan kohdalla. [2.]

Prosessi on manuaalinen ja jokainen tuote tehdään käsityönä, jolloin jokaisessa prosessivaiheessa on mahdollista tehdä virhe, joka aiheuttaa tuotteen hylkäämisen. Erityisen varovainen on oltava veden kanssa, sillä jo pienikin tippa esimerkiksi sylkeä, rikkoo resistin. Prosessin lopussa resisti poistetaan vedellä. [2.]

Syövytyksessä levyjä sivellään syvemmän syövytyksen aikaansaamiseksi. Tässäkin vaiheessa on mahdollista esimerkiksi naarmuttaa levyä. Myös liian pitkä syövytysaika vahingoittaa tuotteen laatua. Syövytyksessä levyt ovat matalassa rauta(III)kloridilla täytetyssä altaassa, eikä niitä pysty näkemään liuoksen alta, rauta(III)kloridin tumman värin vuoksi. Tämän vuoksi myös nostettaessa levyjä pois syövytysaltaasta, on hyvin mahdollista aiheuttaa levyihin vaurioita. [2.]

### 4.2 Ammoniumdikromaatti

Ammoniumdikromaatti määritellään sen käyttöturvallisuustiedotteessa hapettavaksi, syövyttäväksi, välittömästi myrkylliseksi, ympäristölle vaaralliseksi ja kroonisia terveyshaittoja aiheuttavaksi. Vaaralausekkeissa sen sanotaan aiheuttavan mahdollisesti perimävaurioita, syöpää, sekä hengitettynä vahingoittavan keskushermostoa ja keuhkoja. Nykyisessä resistissä ammoniumdikromaatti toimii valoherkkänä aineena. Työntekijät käyttävät suojavälineinä raitisilmamaskeja ja haponkestäviä käsineitä. [20, 21.]

Ammoniumdikromaatti lisättiin REACH-asetuksen luvanvaraisten aineiden luetteloon vuonna 2013. Lisäyksen perusteena oli ammoniumdikromaatin karsinogeenisuus eli sen syöpää aiheuttavat ja perimää vaurioittavat ominaisuudet. Karsinogeenisuuden ammoniumdikromaattissa aiheuttaa dikromaatti-ioni, jossa kromi esiintyy hapetusluvulla kuusi. Työterveyslaitoksen mukaan kromi(VI)-yhdisteet ovat työpaikkojen yleisimpiä karsinogeenisiä aineita ja Suomessa niille altistuu noin 27 000 työntekijää vuodessa. [22, 23.]

## 5 Kuivaresistikokeet

Kokeissa testattiin DuPont:n Riston® ES102 kuivaresistiä, joka on negatiivisesti käyttäytyvä resisti. Sitä käytetään yleisesti happoetsauksissa, joten se sopi hyvin testattavaksi yrityksen etsausprosessiin. Resisti on paksuudeltaan 32 µm, mikä on lähellä nykyisen nesteresistin paksuutta. ES102 kehitetään natriumkarbonaatilla ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ja resisti poistetaan 2-prosenttisella natriumhydroksidilla (NaOH). Kuivaresistikokeista ei tehty koesuunnitelmaa, vaan testimuuttujien arvoja vaihdettiin sen perusteella, millä arvoilla saatiin parempia tuloksia. Kaikki kokeet suoritettiin nykyisen etsausprosessin tiloissa, lukuun ottamatta laminointikokeita. [10, 11.]

### 5.1 Kuivaresistin laminointi

Tämän insinööriyön ensimmäisillä kokeilla selvitettiin, millä parametreilla resisti kiinnittyy teräslevyyn. Ohjeen mukaan laminointi tulisi suorittaa kuumarullalaminaattorilla 110 asteen lämpötilassa ja kolmen barin paineessa [11]. Yrityksellä ei ollut käytössä kuumarullalaminaattoria, joten laminointi tehtiin passilaminaattorilla yrityksen laboratoriossa.

Passilaminaattoria varten teräslevyistä leikattiin 120 x 210 mm:n kokoisia paloja. Ensimmäisten kokeiden kohdalla levyjä ei puhdistettu millään tavalla, vaan ainostaan reunat viilattiin pyöreämmiksi, ettei passilaminaattori vahingoittuisi. Laminaattorissa levy kulki kahden rullan läpi, joiden molempien lämpötiloja pystyi säätämään erikseen. Resisti laminoitiin vain toiselle puolelle levyä, jolloin alarullan lämpötila ei vaikuttanut kiinnittymiseen yhtä paljon kuin ylärullan lämpötila. Sopivaa lämpötilaa resistin kiinnittymiselle etsittiin 130 ja 150 asteen välistä, sillä oletettiin, ettei 110 asteen asetus lämpötilaksi riitä passilaminaattorille.

Lämpötilakokeiden lisäksi testattiin eri materiaaleja resistin päälle, resistin telausta sekä paineen lisäystä, ja niiden vaikutusta laminoititulosken tasaisuuteen. Ensimmäisissä kokeissa levyn alla oli pahvia, resisti asetettiin levyn päälle ja resistin päälle tuli vielä kopiopaperi. Kopiopaperin lisäksi resistin päälle kokeiltiin myös teflonia, silikonikumia, valokuvapaperia ja kopiofilmiä. Päälysmateriaalin uskottiin sekä suojaavan resistiä että vaikuttavan laminoititulosken tasaisuuteen vähentämällä ilmakuplien määrää.

Resistin asettamisen lisäksi kokeiltiin myös resistin telaamista levyn päälle. Telaamisvälineinä toimivat kumitela ja viivoitin. Telaamisen toivottiin vähentävän ilmakuplien määrää ja parantavan resistin kiinnittyvyyttä.

Passilaminaattorista ei pystynyt näkemään kuinka suuri paine laminaattorissa oli, joten ei voida tietää, oliko paine lähelläkään kolmea baria. Painetta lisättiin laittamalla levyn alle pahvin palan lisäksi myös kartonkia, mikä nosti kokonaispaksuutta ja lisäsi laminaattorirullien puristavuutta.

Päälysmateriaalin, telaamisen ja paineen noston lisäksi testattiin myös, onko levyn puhdistamisella mitään vaikutusta laminoinnin laatuun. Levyt pestiin kalkilla rasvan poistamiseksi ja lopuksi huuhdeltiin vielä laimealla rikkihapolla happaman pinnan aikaansaamiseksi, sillä resisti ei kestänyt emäksiä.

## 5.2 Valotuskokeet

Kokeissa käytettiin kahta positiivista filmiä: asiakasfilmiä ja testifilmiä. Kokeet suoritettiin nykyisen etsausprosessin tiloissa samalla valotuskoneella, jolla nykyistäkin resistiä valotetaan.

Valotus tapahtuu UV-valon avulla, jonka vuoksi on tärkeää tietää sekä UV-lampun että resistille suositeltu aallonpituus ja spektrin huippu. Valotuskoneen UV-valon spektrin huipun ilmoitettiin olevan 360–417 nm. Testatulle kuivaresistille ilmoitettiin spektrin huippu kohdassa 365 nm. [10; 24.]

Valotuskokeilla haluttiin selvittää, mikä on resistille sopiva valotusaika. Valotusajan sijaan resistin ohjearvoksi valotuksessa annettiin vain tarvittava energiamäärä ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ), mitä ei yrityksen tiloissa pystynyt mittaamaan. Nykyisessä prosessissa valotusaika on

neljä minuuttia ja siitä lähdettiin liikkeelle kuivaresistinkin kanssa. Myöhemmin selvisi, että piirilevyteollisuudessa vastaavien kuivaresistien kanssa valotusaika on vain 10–20 sekuntia. [19.]

Valotusaikaa lähdettiin laskemaan neljästä minuutista kahteen minuuttiin, sitten yhteen minuuttiin ja lopulta 10 sekuntiin. Kaiken kaikkiaan testattiin yli 15 eri valotusaikaa, joista eniten testejä tehtiin ajoilla 10 sekuntia, 24 sekuntia, 35 sekuntia ja 60 sekuntia. Sopivan valotusajan löytämiseksi käytettiin myös Stoufferin 21 askeleen harmaakiilaa, josta näki kehityksen jälkeen, mille askeleelle kiila oli valottunut. Resistin ohjeessa mainittiin vain Riston®:n kiilan arvo, joten Stoufferin kiilan käytöstä ei apua juurikaan ollut.

Eri valotusaikoja ja niiden vaikutuksia lähdettiin testaamaan alustavilla kokeilla, joissa resistiin vasta tutustuttiin ja otettiin selvää, miten se toimii. Kun resistin käyttäytymistä alettiin ymmärtämään, suoritettiin toistokokeet viidelle eri valotusajalle.

### 5.3 Kehityskokeet

Resistin kehitykseen ohjeistettiin, että kehitteen tulisi olla  $0,85 \pm 0,1$ -prosenttista natriumkarbonaattia, kehityksen lämpötilan noin 28 astetta ja kehitysajan 42 sekuntia [11]. Normaaliolosuhteissa kehitys kuitenkin tapahtuu ruiskutuskoneessa, jossa levy kulkee kehitettä syöttävien suutinten läpi, ja lopuksi on runsas vesihuuhtelu. Ruiskutuskoneen sijasta testeissä käytettiin spraypulloa ja paineruiskua. Lisäksi kehitystä testattiin pienessä altaassa, kehiteliuosta sekoittaen. Kehitysaine huuhdeltiin pois levyltä ionivaihdetulla vedellä.

Kehitysmenetelmien kanssa testattiin myös eri kehitysajoja ja kehitteen eri pitoisuuksia. Kehitysajat vaihtelivat yhdestä minuutista viiteen minuuttiin ja pitoisuudet 0,85–3 prosentin välillä. Eniten testejä tehtiin ruiskuttamalla, kahden minuutin kehitysajalla ja kahden prosentin kehittepitoisuudella.

### 5.4 Syövytyskokeet

Kuivaresistin kestävyttä testattiin syövyttämällä resistiä rauta(III)kloridilla kuusi, kahdeksan, kymmenen ja kaksitoista minuuttia. Syövytettävät levyt laitettiin matalaan,

rauta(III)kloridilla täytettyyn altaaseen ja levyjä siveltiin, jotta syövytys pureutuisi paremmin. Rauta(III)kloridin lämpötila oli testeissä 20 astetta.

Syövytyskokeilla selvitettiin, kestäkö resisti pitkiäkin syövytysaikoja vai alkaako se irtolemaan tai halkeilemaan. Tämän lisäksi syövytetyistä levyistä mitattiin neljästä eri kohdasta syövytyksen syvyys. Syövytyskokeissa käytetyt levyt oli laminoitu piirilevytehtaalla kuumarullalaminaattorilla. Kokeiden tulokset on esitetty kohdassa 6.6.

### 5.5 Laminointi-, valotus- ja kehityskokeet piirilevytehtaalla

Insinööriyön aikana ilmaantui mahdollisuus käydä vierilemassa piirilevytehtaalla, sekä tekemään siellä laminointi-, valotus- ja kehityskokeita teräslevyille oikeanlaisilla laitteilla. Ennen vierailua levyjen toinen puoli esikäsiteltiin yrityksen omissa tiloissa kalkilla ja rikkihapolla, kuten omisakin laminointitesteissä oli esikäsitelty. Piirilevyteollisuudessa linjoja syövytetään kuparilevyille, jolloin kupari esikäsitellään mekaanisesti harjaamalla [2]. Harjaus rikkoo kuparilevyn pintaa, mikä parantaa resistin ja pinnan välistä adheesiota eli resisti tarttuu levyyn paremmin kiinni. Ennen laminointikokeita ajateltiin, että riittämätön adheesio ja resistin kiinnittyminen voisi olla teräslevyissä ongelma, sillä teräslevyn pinta piti säilyttää sileänä peilipintana. [19.]

Laminointi suoritettiin kuumarullalaminaattorilla 110 asteessa ja kolmen barin paineessa, eli juuri resistille suositelluilla arvoilla. Levyjä laminoitiin sekä kuivana että nopean vesihuuhtelun jälkeen märkänä. Levyjä laminoitiin molemminpuolisesti, jolloin yksi levy kerrallaan kulki laminaattorin läpi, resistin laminoituessa levyn molemmille puolille. Myöhemmissä testeissä oli huomioitava, että vain toinen puoli oli esikäsitelty puhtaaksi.

Levyjä laminoitiin myös yksipuoleisesti, jolloin kaksi levyä laitettiin puhdistamattomat puolet vastakkain ja yhtä aikaa laminaattorin läpi. Näin resisti laminoitui vain levyjen puhtaille puolille. Laminointinopeutta pystyi myös säätämään, ja nopeutta nostettiinkin kerran testien aikana. Hitaamman laminoinnin nopeus oli 2 min/m, mutta nopeamman laminoinnin arvoa ei mitattu. Tuloksissa puhutaan vain hitaammin ja nopeammin laminoituista levyistä.

Valotuskoneessa valotus tapahtui sekä ylä- että alapuolelta. Testejä varten tulostettiin niin sanottu testifilmi, jossa oli erilaisia kuvioita ja viivanleveyksiä. Molemmiin puoliin laminoituissa levyissä käytettiin alapuolella negatiivista testifilmiä ja yläpuolella (puhtaalla puolella) positiivista testifilmiä. Yksipuolisesti laminoituissa levyissä käytettiin vain ylävaloa ja positiivista filmiä. Ylävalo valotti noin 15 sekuntia ja alavalon noin 10 sekuntia.

Kehityskoneessa levy kulki vaakasuorassa rullien päällä ja kehiteainetta syötettiin ruiskusuuttimista sekä ylä-, että alapuolelta. Kehitys tapahtui siis molemminpuolisesti, kuten valotuskin, mutta suurin osa testilevyistä kehitettiin puhtas, positiivisella filmillä valotettu puoli ylöspäin. Kehiteaineena oli 2-prosenttista natriumkarbonaattia ja sitä syötettiin kahden barin paineella. Kehityskoneen lopussa levy kulki vielä kahden vesihuuhtelun läpi. Kokonaisuudessaan kehitysvaihe kesti noin minuutin verran.

Osa testeihin tuoduista levyistä vain kuiva- tai märkälaminoitiin, osa myös valotettiin ja näiden kahden vaiheen jälkeen osa myös kehitettiin. Näillä levyillä jatkettiin valotus-, kehitys- ja syövytykskokeita nykyisen etsausprosessin tiloissa. Tarkemmat koejärjestelyt on esitetty tulosten yhteydessä kohdassa 6.6.

## 5.6 Pistearviointi ja parametrien tarkastelu suhteessa viivanleveyteen

Tehtyjen kokeiden ja niistä saatujen tulosten perusteella suoritettiin jokaiselle testilevyille pistearviointi. Pistearvioinnissa määritettiin arviointikriteerit mikrotekstille ja viivanleveydelle. Arviointikriteerit on taulukoituna tuloksissa, kohdassa 6.7.

Pistearvioinnin lisäksi tarkasteltiin Excelin ja Minitab-ohjelman avulla tehtyjen kuvaajien kautta viivanleveyteen vaikuttavia tekijöitä. Myös tekijöiden tarkastelussa käytettiin aiemmin suoritettujen kokeiden tuloksia. Tulokset on esitetty kohdassa 6.8.

## 6 Kuivaresistikokeiden tulokset

### 6.1 Laminoitukokeiden tulokset

Laminoitukokeilla etsittiin sopivaa laminoitilämpötilaa jolla resisti kiinnittyy teräslevyyn, sekä päällysmateriaalia, telausmenetelmää ja muita parametreja, joilla saattaisi olla merkitystä laminoinnin laatuun. Resistin tulisi olla mahdollisimman tasainen ja ilmakuplaton, sillä kuplista aiheutuu reikiä resistiin ja syövytysvaiheessa itse levyyn.

Passilaminaattorin laminoitilämpötilaa testattiin 130–150 asteen välillä ja lopulta päädyttiin sekä ylä- että alarullassa lämpötilaan 130 °C. Päällysmateriaaliksi valittiin kopio-paperi, sillä silmämääräisesti katsottuna se antoi resistille sileimmän pinnan. Resistin asettamista levyn päälle kokeiltiin laskemalla se varovasti levyn päälle, sekä telaamalla se kumitelan ja viivoittimen avulla. Viivoitin jätti näkyvät jäljet resistiin, eikä pelkkä resistin laskeminenkaan auttanut vähentämään laminoinnissa syntyvien ilmakuplien määrää. Tasaisin ja vähiten ilmakuplia sisältävä kalvopinta saatiinkin telaamalla resisti kumitelalla levyn päälle ennen laminointia.

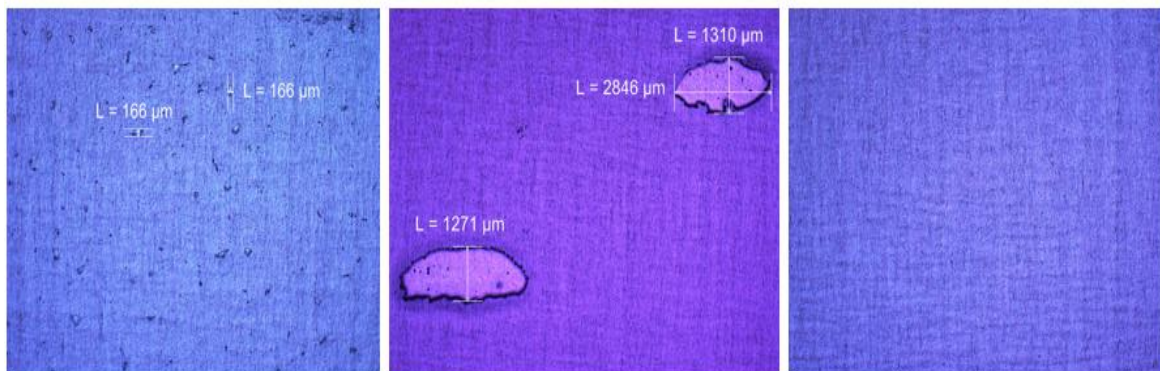
Muina parametreina kokeiltiin paineen kasvattamista ja levyn puhdistamista. Painetta kasvatettiin laittamalla levyn alle pahvin lisäksi myös kartonkia. Tuloksena todettiin, että paineen nosto paransi laminoinnin jälkeä. Levyt puhdistettiin kalkilla ja rikkihapolla, ja testien jälkeen havaittiin, että myös levyn puhdistaminen tuotti parempaa laminoitilaa. Taulukossa 1 on kuvattu laminoitukokeiden parametreja ja tuloksia.



Taulukko 1. Laminointikokeiden tulokset.

Levy	Asetusarvo (°C)		Levyn alla	Resistin päällä	Tulokset
	ylä	ala			
1	130	150	pahvi	kopiopaperi	resisti telattu viivoittimen avulla, josta jäi vain jälkiä ja ilmakuplia
2	130	140	pahvi	kopiopaperi	resisti asetettu levyn päälle, paljon pieniä ilmakuplia
3	130	130	pahvi	teflon	paljon ilmakuplia
4	130	130	kopiofilmi	sileä paperi	isoja ilmakuplia (pienempi paine)
5	130	130	pahvi	kopiopaperi	<b>puhdistettu levy</b> , resisti asetettu levyn päälle, pieniä ilmakuplia
6	130	130	pahvi+kartonki	sileä paperi	<b>puhdistettu levy</b> , resisti telattu, muutama iso ilmakupla
7	130	130	pahvi+kartonki	kopiopaperi	<b>puhdistettu levy</b> , resisti telattu, pinta näyttää tasaiselta, pieniä ilmakuplia joukossa

Täysin tasaista ja sileää pintaa ei saatu passilaminaattorilla aikaan, koska painetta ei pystynyt mittaamaan eikä passilaminaattori ole resistin laminointiin tarkoitettu laite. Kuvasta 6 nähdään, miten erikokoisia ilmakuplia laminoinnissa syntyi.



Kuva 6. Kuivaresisti laminoituna.

Vasemmalla on kuvattu pieniä ilmakuplia, keskellä isoja ilmakuplia ja oikealla tasaisin laminoititulos. Kuvat on otettu mikroskoopilla, NIS Elements D -ohjelman avulla.

## 6.2 Alustavat kokeet

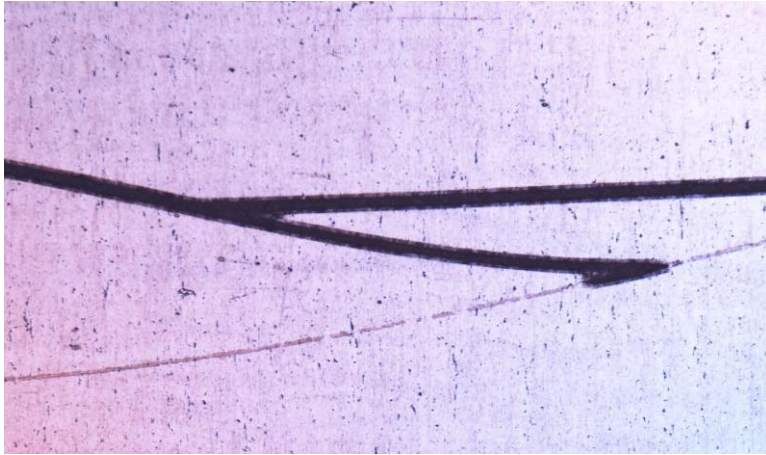
Varsinaiset kokeet kuivaresistin kanssa aloitettiin neljän minuutin valotusajalla, 0,85-prosenttisella kehitteellä ja neljän minuutin syövytysajalla. Valotusajan valinta perustui nykyisen resistin valotusaikaan, joka on neljä minuuttia. Kehitteen pitoisuus oli ilmoitettu resistin käyttöohjeessa. Nykyisessä prosessissa lyhyempi syövytysaika on 4,5 minuuttia, joten tuntui sopivalta lähteä testaamaan uutta resistiä neljän minuutin syövytyksellä.

Ensimmäistä kahta levyä valotettiin neljä minuuttia ja kehitettiin 0,85-prosenttisella kehitteellä. Toista levyä kehitettiin neljä minuuttia ja toista kahdeksan minuuttia, eikä kummastakaan kehittynyt näkyviin juuri mitään. Kehitteen pitoisuutta nostettiin 3 %:iin, mutta tulos ei juurikaan parantunut. Näissä testeissä kehitys tapahtui pienessä altaassa, jossa levy oli kokonaan kehitteen alla ja allasta liikuteltiin, jotta kehite liikkuisi levyn päällä.

Valotusaikaa päätettiin lyhentää yrityksen yhteyshenkilön neuvosta, ensin kahteen minuuttiin ja lopulta yhteen minuuttiin. Kummallakin ajalla lopputulos oli parempi kuin aikaisemmin. Kehite oli edelleen 3-prosenttista, vaikka yhteyshenkilö sanoi sen olevan liian vahvaa. Samalla hän painotti paineen merkitystä kehityksessä: normaalisti kehitys tapahtuu ruiskutus koneessa kahden barin paineessa.

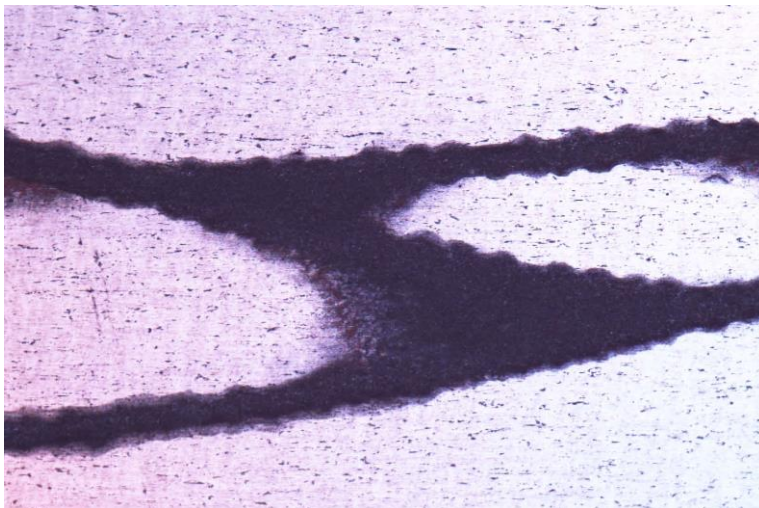
Seuraavaksi vakioitiin kehitys kolmeen minuuttiin ja valotettiin yhden minuutin, 45 sekunnin ja 30 sekunnin ajoilla. Kuvissa 7–9 on kuvattu tuloksia eri levyistä, jokaisesta samasta

kohtaa. Kuvassa 7 alin linja ei ole kehittynyt juuri ollenkaan ja ylemmät linjat näyttävän rosoisilta.



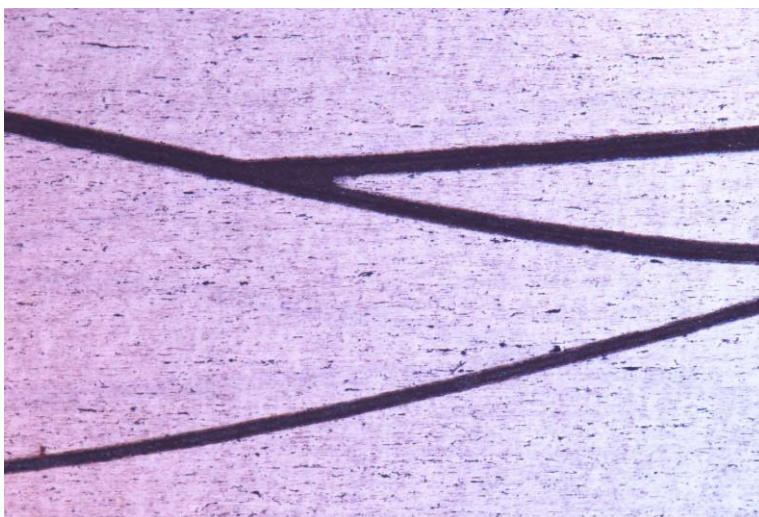
Kuva 7. Valotusaika yksi minuutti, 3-prosenttinen kehite.

Kuvassa 8 linjat ovat niin sanotusti menneet umpeen, eli levinneet melko rajusti, mikä voi tarkoittaa ylivalottumista tai -kehittymistä. Valotuksessa valoa on päässyt resistin alle, jolloin valottunut alue on myös kehittynyt laajemmin ja syövytyksen jälkeen tulos näyttää tältä.



Kuva 8. Valotusaika 45 sekuntia, 3-prosenttinen kehite.

Kuvassa 9 linjat näyttävät hyvin kehittyneiltä mutta melko ohuilta.



Kuva 9. Valotusaika 30 sekuntia, 3-prosenttinen kehite.

Tulokset vaihtelivat suuresti, joten tarkalleen ei voida sanoa, että pelkällä valotusajalla olisi merkitystä. Jos tuloksissa olisi selvä logiikka, kuvassa 8 esitelty testilevy ei olisi valottunut noin rajusti, vaan mahdollisesti linjojen leviämiseen on vaikuttanut kehitysaika, kehitteen pitoisuus tai resistissä olleet ilmakuplat.

Kehitysaajan vaikutusta seurattiin valottamalla testilevyjä yksi minuutti ja kehittämällä niitä 1,5–4 minuuttia 2-prosenttisellä kehiteellä. Lisäksi kehitealtaassa olevaa levyä sudittiin kapealla maalisudilla, jotta kehite vaikuttaisi paremmin ja linjat kehittyisivät nopeammin. Tuloksista todettiin, että lyhemässä ajassa kehitys on tasaisempaa levyn joka puolelta, mutta ohuimmat linjat eivät kehittyneet kunnolla. Yli 3,5 minuutin kehitysaikalla linjat alkoivat jo kehittymään umpeen. Koska kehite ei pureutunut tasaisesti, eikä sopivaa kehitysaikaa tuntunut löytyvän, päätettiin kokeilla seuraaviin kokeisiin kehitteen ruiskuttamista.

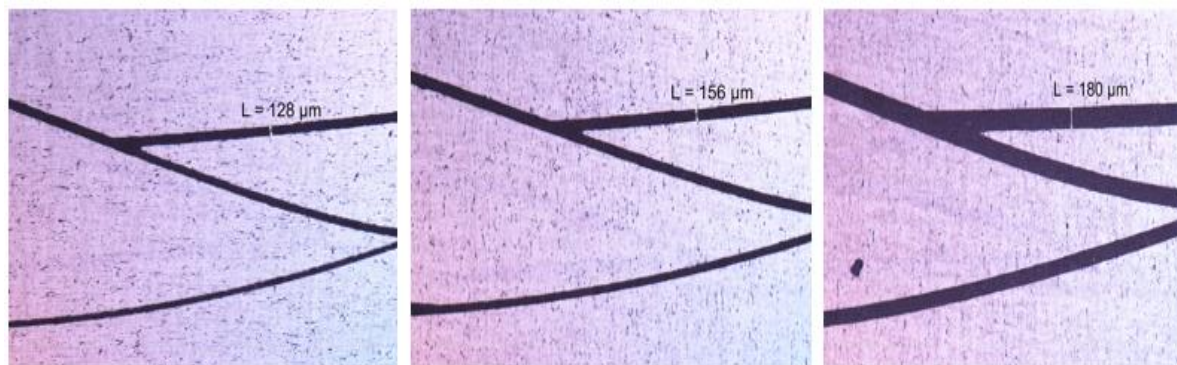
Resistin poisto eli strippaus tapahtui laittamalla levy lopuksi 2-prosenttiseen NaOH-liuokseen, jolloin resisti irtosi noin minuutissa levyn päältä. Strippauksen kanssa ei ollut ongelmia missään vaiheessa kokeita, vaan resisti irtosi aina hyvin. Resistin rippeet jäivät NaOH-altaaseen melko isoina palasina, josta ne saatiin kerättyä erikseen roskakoriin.

### 6.3 Valotusajan ja kehitystavan vaikutukset

Alustavien testien jälkeen lähdettiin kokeilemaan vieläkin lyhyempiä valotusaikoja, sekä ruiskuttamaan kehite. Kehitteen pitoisuus oli 2 % ja syövytysaika neljä minuuttia. Lyhin



aika, mihin valotuksen sai säädettyä, oli seitsemän sekuntia. Aika todettiin liian lyhyeksi, koska resisti irtosi kehitysvaiheessa kokonaan. Irtoamiseen vaikutti se, ettei resisti ehtinyt kovettumaan tarpeeksi valotuksen aikana. Valotusajan vaikutusta testattiin 10 sekunnista 30 sekuntiin, jolloin huomattiin lyhemmän valotusajan kasvattavan linjojen viivanleveyttä. Kuvassa 10 on nähtävissä kolmen eri valotusajan vaikutus viivanleveyteen.



Kuva 10. Valotusajan vaikutus viivanleveyteen.

Vasemmalla valotusaika on 60 sekuntia (128  $\mu\text{m}$ ), keskellä 30 sekuntia (156  $\mu\text{m}$ ) ja oikealla valotusaika 12 sekuntia (180  $\mu\text{m}$ ).

Vaikka tulokset näyttävätkin järkevilä, niistä ei aina löytynyt samaa johdonmukaisuutta. Esimerkiksi 15 sekunnin valotusajalla viivanleveydeksi mitattiin 153  $\mu\text{m}$ , mikä on pienempi kuin 30 sekunnin ajalla saatu viivanleveys 156  $\mu\text{m}$ .

Kuvista näkyy myös hyvin se, miten ruiskuttamalla kehite on saatu linjat pysymään ehjinä, eivätkä risteyskohdat ole päässeet leviämään. Samanlaista ylivalottumista tai –kehittymistä kuin alustavissa kokeissa ei ole havaittavissa. Ruiskutus pidettiin kehitystapana aina kuivaresistikokeiden loppuun saakka.

#### 6.4 Toistokokeet

Kuivaresistillä suoritettiin toistokokeita, joissa valotusaika vaihteli ja kehitysaika sekä syövytysaika oli vakioitu kahteen ja neljään minuuttiin. Kokeissa käytettiin viittä eri valotusaikaa (10, 14, 17, 22 ja 35 sekuntia) ja kullakin ajalla valotettiin kaksi levyä. Kokeiden jälkeen kaikista kymmenestä levystä mitattiin vertailuarvoiksi syövytyksen syvyys kolmesta eri kohdasta, sekä kahdeksasta levystä viivanleveydet kuudesta eri kohdasta.

Kaksi viimeistä levyä epäonnistuivat, koska kehitealtaaseen oli kertynyt liikaa kehitettä, eikä ruiskutus enää purrut yhtä hyvin kuin muissa.

Samalla ajalla valotetuista levyistä verrattiin syövytysvyökyksien tuloksia. Jokaisella valotusparilla syvyydet heittivät alle 2 µm, joten tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan. Kaikki levyt mukaan lukien syvyydet vaihtelivat 3,3–8,8 µm välillä. Viivanleveyttä pystyttiin vertailemaan kolmesta valotusparista, sillä kahdesta viimeisestä parista ei pystytty mittaamaan toistojen viivanleveyttä ollenkaan. Viivanleveyksien suhteen erot olivat suuremmat kuin syövytysvyökyksissä. 14 sekunnin valotusparin välillä viivanleveydessä oli heittoa 11 mikronia ja 35 sekunnin parilla 13,5 mikronia. 10 sekunnin valotusparilla viivanleveydet heitti alle yhden mikronin, mikä oli positiivisin tulos. Muiden toistettavuustulosten perusteella, toistokokeet eivät onnistuneet niin hyvin kuin olisi toivottu. Toistokokeiden tulokset on esitelty liitteessä 1.

#### 6.5 Piirilevytehtaalla tehdyt kokeet

Piirilevytehtaalla testattiin sekä kuiva- että märkälaminointia, joista märkälaminoinnin todettiin olevan parempia tapa teräslevyn laminointiin. Märkälaminoinnilla kalvo laminoitui tasaisemmin ja kehittyi paremmin, mutta yhtään täysin kuplatonta kalvoa ei saatu aikaiseksi. Myöhempiä kokeita varten laminoitiin kolme levyä kuivana ja viisi märkänä. Kuivalaminoiduissa levyissä käytettiin nopeampaa laminointia ja märkälaminoiduissa hitaampaa laminointia (2 min/m). Osa levyistä oli laminoitu yksi kerrallaan, jolloin resistiä oli molemmin puolin ja osa niin, että kaksi levyä laminoitiin päällekkäin, jolloin resisti kiinnittyi vain toiselle puolelle levyjä. Sillä ei kuitenkaan todettu olevan mitään merkitystä, oliko levyt laminoitu yksi vai kaksi kerrallaan.

Valotus suoritettiin aina samalla tavalla, joten sen osalta varsinaisia kokeita tai tuloksia ei ole. Kehitys ei antanut heti tyydyttävää tulosta, joten sen vaikutusta testattiin kehittämällä levyjä sekä ylä-, että alapuolelta ja nopeammalla kehitysajalla. Nopeuttaminen paransi tulosta hieman, mutta ei merkittävästi. Kehityssuunnassa päädyttiin kehittämään levy yläpuolelta, vaikka sen epäiltiin jättävän niin sanotusti kehitepatjan levyn päälle ja tällöin vaikeuttamaan kehittymistä. Alapuolelta kehitettäessä laatu oli kuitenkin samalaista kuin yläpuolelta kehitettäessä. Piirilevytehtaan työntekijän mukaan kehityskoneen ruiskusuuttimista osa saattoi olla tukossa, jolloin epätasainen syöttökin saattoi vaikuttaa kehityksen huonoon laatuun.

## 6.6 Piirilevytehtaalla laminoitujen levyjen koetulokset

Piirilevytehtaalta tuotiin yrityksen tiloihin testattavaksi kolme kuivalaminoitua levyä ja viisi märkälaminoitua levyä. Valotettuja levyjä tuotiin viisi kappaletta, joista yksi oli kuivalaminoitu ja neljä märkälaminoitu. Kehitettyjä levyjä tuotiin yhteensä seitsemän kappaletta, joista yksi oli kuivalaminoitu ja kuusi märkälaminoitu.

Ensimmäisenä selvitettiin kuiva- ja märkälaminoidun levyn eroja. Levyt leikattiin neljään osaan ja jokainen osa valotettiin eri ajalla. Ajat olivat 10, 24, 35 ja 48 sekuntia. Levyt kehitettiin paineruiskua käyttäen 2-prosenttisella natriumkarbonaatilla yhden minuutin ajan. Levyjä syövytettiin neljä minuuttia, jonka jälkeen resisti stripattiin natriumhydroksidilla. Kuivalaminoidusta levystä osa, jota oli valotettu 24 sekunnin ajan, näytti ulkoisesti parhaimmalta. Myös märkälaminoidun levyn osa, jonka valotusaika oli 24 sekuntia, oli kaikista märkälaminoiduista osista paras. Levyjen laatua arvioitiin silmämääräisesti, sekä tarkemmin luupilla ja mikroskoopilla. Kaikki märkälaminoidut levyt näyttivät yleisellä tasolla paremmilta kuin kuivalaminoidut. Myöhemmin huomattiin, että märkälaminoidut resistit kestivät myös säilytystä pidempään kuin kuivalaminoidut.

Kehitteen pitoisuuden vaikutusta testattiin kehittämällä samalla valotusajalla valotettuja levyjä 1- ja 2-prosenttisillä liuoksilla. Kehitys tehtiin ruiskuttamalla eli paineruiskua käyttäen. 10 sekunnin ajan valotetuista levyistä 2-prosenttisellä kehitteellä kehitetty levy oli minuutissa paremmin kehittynyt, kuin 1-prosenttisellä kehitteellä kehitetty levy. 24 sekunnin ajan valotetuissa levyissä vaikutus oli aivan päinvastainen, sillä 1-prosenttisellä kehitteellä levy kehittyi paljon paremmin kuin 2-prosenttisellä. Näiden kokeiden perusteella havaittiin, että valotusajalla ja kehitteen pitoisuudella voisi olla vaikutusta toisiinsa. Kokeiden toistettavuus jäi testaamatta, minkä vuoksi on mahdotonta sanoa, onko näillä kahdella tekijällä oikeasti keskinäistä merkittävyyttä.

Pitoisuuskokeiden perusteella kehitteen pitoisuudeksi valittiin 1 %:n liuos jatkotestejä varten. Seuraavaksi testattiin kehitysajan vaikutusta ja levyinä käytettiin piirilevytehtaalla märkälaminoituja ja valotettuja levyjä. Kehitys suoritettiin ruiskuttamalla levyjä kahden, kolmen ja neljän minuutin ajan, jonka jälkeen niitä syövytettiin neljä minuuttia. Aikaisemmin kehitysaikana oli käytetty yhtä minuuttia. Tuloksia arvioitiin mikrotekstin ja viivanlevyden perusteella ja verrattiin nykyisellä prosessiteknikalla tehtyyn referenssilevyyn (kuva 11). Kahden minuutin kehitysajalla saatiin visuaalisesti tarkasteltuna paras yleisilme sekä mikrotekstin laatu oli hyvä. Kolmen ja neljän minuutin kehityksillä linjat olivat

osittain katkonaisia niin tekstissä kuin viivanleveyksissäkin. Yleisilmeeltään kolmen minuutin levy näytti paremmalta kuin neljän minuutin levy.



Kuva 11. Referenssikuvat mikrotekstistä ja viivanleveydestä.

Kuvan 11 vasemmalla puolella näkyy mikrotekstiä kahdella eri tavalla: ylempänä itse teksti on syöplynyt ja alempana tekstin ympärillä oleva alue on syöplynyt. Tekstin koko pienenee mitä alemmas mennään. Oikealla on nähtävissä minimi viivanleveys 0,01 mm eli 10  $\mu$ m. Viiva levenee siitä ylöspäin aina 1 mm:iin asti. Sekä mikroteksti että viivanleveys on valotettu testifilmillä, jonka avulla vertailuja oli helppo suorittaa vieressä olevan asteikon avulla. Teksti ja numerot ovat levyssä peilikuvina, koska nykyisessä syöplytysprosessissa kaikkiin tuotteisiin syöplytetään kuva näin päin.

Viimeiseksi laminoituista levyistä testattiin resistin kestävyyttä syöplytyksessä. Laminoinnin lisäksi nämä testilevyt oli myös valotettu ja kehitetty jo piirilevytehtaalla. Kokeet suoritettiin kuuden, kahdeksan, kymmenen ja kahdentoista minuutin syöplytysajoilla rauta(III)kloridin ollessa 20 asteista. Syöplytyksen jälkeen levyistä mitattiin syöplytyksen syvyys neljästä eri kohdasta. Tulokset on esitetty taulukossa 2.



Taulukko 2. Syövytyskokeiden syvyytulokset.

Syövytysaika (min)	Syövytyksen syvyys (µm)				Keskiarvo
	Kohta 1	Kohta 2	Kohta 3	Kohta 4	
6	7	5,6	7,4	5,6	6,4
8	8	9,7	8,5	7,1	8,325
10	9,1	11,1	11,5	10,5	10,55
12	11,9	14,1	13,6	9,3	12,225
Keskiarvo	9	10,125	10,25	8,125	

Taulukosta 2 nähdään, että keskiarvojen perusteella syöpymisnopeus on noin yksi mikroni minuutissa. Syöpymisvauhti on melko hidaskin, sillä nykyisellä prosessilla pisin syövytysaika on kahdeksan minuuttia, jolla saavutetaan yli 11 mikronin syvyys. Vauhtia saadaan kuitenkin kasvatettua muun muassa lämmittämällä rauta(III)kloridia ja tuoreistamalla, eli lisäämällä tuoreempaa rauta(III)kloridia vanhan tilalle. Resistin kestävyudessa ei ollut mitään ongelmia, vaan resisti pysyi ehjänä pisimmätkin syövytysajat.

Testilevyjen ulkonäkö syövytyksen jälkeen ei kuitenkaan ollut yhtään lähellä referenssilevyn tulosta, joten voidaan päätellä, etteivät piirilevytehtaalla käytetyt valotus- ja kehitysajat olleet optimaalisia teräslevyn syövytykseen. Viimeisimpiä testejä suorittaessa levyt olivat ehtineet olla varastossa jo muutaman viikon, jolloin resistin teho oli saattanut heikentyä. Nopeampaan aikatauluun ei kuitenkaan riittänyt resursseja, joten on hyväksyttävä, että kaikkien kokeiden tulokset eivät ole niin yhdenvertaisia kuin ne voisivat olla.

## 6.7 Pistearviointi

Koska aiemmillä kokeilla ei suoraan saatu hyviä tuloksia eikä sopivia valotus-, kehitys- ja syövytysaikoja löydetty, päätettiin suorittaa kaikille edellisille kokeille pistearviointi. Arvioinnissa oli mukana sekä itse laminoituja, että piirilevytehtaalla laminoituja levyjä. Osa levyistä oli valotettu asiakasfilmillä ja osa testifilmillä. Kokeissa käytetyt valotusajat vaihtelivat 10 sekunnista kahteen minuuttiin, kehitysajat olivat 1–5 minuuttia ja kehitteen pitoisuus 1–3 prosenttia. Kaikkia levyjä verrattiin nykyisen prosessin tekniikalla syövytettyihin referenssilevyihin, joista toinen oli valotettu asiakasfilmillä ja toinen testifilmillä. Arviointikriteerit on listattu taulukoihin 3–5.

Taulukko 3. Mikrotekstin laadun arviointikriteerit.

<b>Mikrotekstin laatu</b>	
<b>Erinomainen</b>	3 pistettä
<b>Luettavissa (osin katko-naista)</b>	2 pistettä
<b>Todella huono</b>	1 piste
<b>Ei näy mitään</b>	0 pistettä

Mikrotekstin laatua arvioitiin sekä asiakas-, että testifilmistä. Asiakasfilmillä valotetuista levyistä arvioitiin vain syövytetyn mikrotekstin näkyvyyttä ja laatua. Testifilmin kanssa valotetuista levyistä arvioitiin sekä syövytetyn tekstin laatua, että tekstin laatua silloin, kun sen ympäristö oli syövytetty.

Taulukko 4. Asiakasfilmin viivanleveyden arviointi.

<b>Viivanleveys suhteessa referenssiin (asiakasfilmi)</b>	
<b>10 µm heitto (tai alle)</b>	3 pistettä
<b>20 µm heitto</b>	2 pistettä
<b>30 µm heitto</b>	1 piste
<b>40 µm heitto</b>	0 pistettä

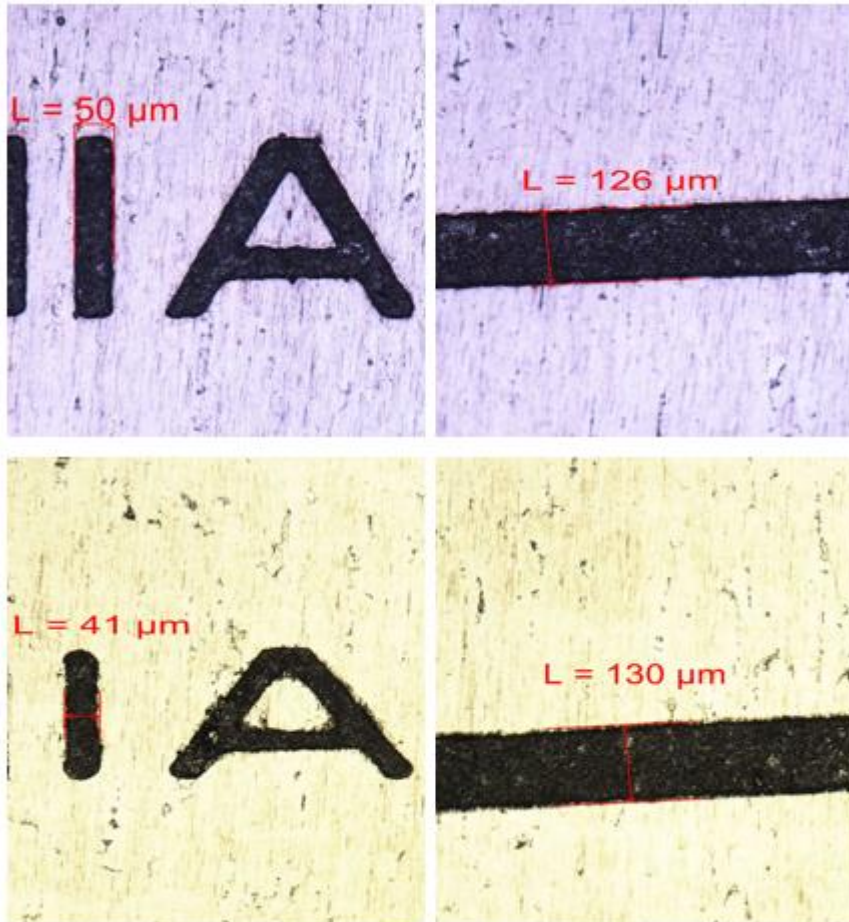
Asiakasfilmillä valotetuista levyistä mitattiin viivanleveyttä kahdesta eri kohdasta ja niiden tuloksia verrattiin referenssilevyn viivanleveyteen samoissa kohdissa. Arviointi perustui siihen, paljonko testilevyn viivanleveys erosi referenssilevystä. Jos eroa oli 10 µm tai alle, sai kolme pistettä, jos eroa oli yli 40 µm, jäi kokonaan pisteittä.

Taulukko 5. Testifilmin viivanleveyden arviointi.

<b>Pienin viivanleveys mihin päästään (testifilmi)</b>		
<b>10</b>	$\mu\text{m}$	3 pistettä
<b>20</b>	$\mu\text{m}$	2,7
<b>30</b>	$\mu\text{m}$	2,4
<b>40</b>	$\mu\text{m}$	2,1
<b>50</b>	$\mu\text{m}$	1,8
<b>60</b>	$\mu\text{m}$	1,2
<b>70</b>	$\mu\text{m}$	0,9
<b>80</b>	$\mu\text{m}$	0,6
<b>90</b>	$\mu\text{m}$	0,3
<b>100</b>	$\mu\text{m}$	0 pistettä

Testifilmillä valotetuista levyistä katsottiin, kuinka pieneen viivanleveyteen niillä oli päästy. Testifilmissä oli paljon erilaisia kuvia, joista yhdessä viivanleveys kaventui 1 mm:stä aina 10 mikroniin asti. Siitä kohdasta katsottiin mikroskoopilla, mihin asti testilevyissä viiva pysyi ehjänä. Nykyisellä prosessilla päästään 10 mikroniin, mihin tietysti pyritään myös uuden prosessin kanssa.

Kaikista levyistä arvioitiin mikrotekstin laatu ja viivanleveyden suhde referenssiin, jolloin maksimi pistemäärä oli kuusi pistettä. Täydet kuusi pistettä sai yksi asiakasfilmillä valotettu levy, joka on esitelty referenssinsä kanssa kuvassa 12. Kuvassa ylempänä näkyvät referenssilevyn tulokset ja alempana kuuden pisteen levy.

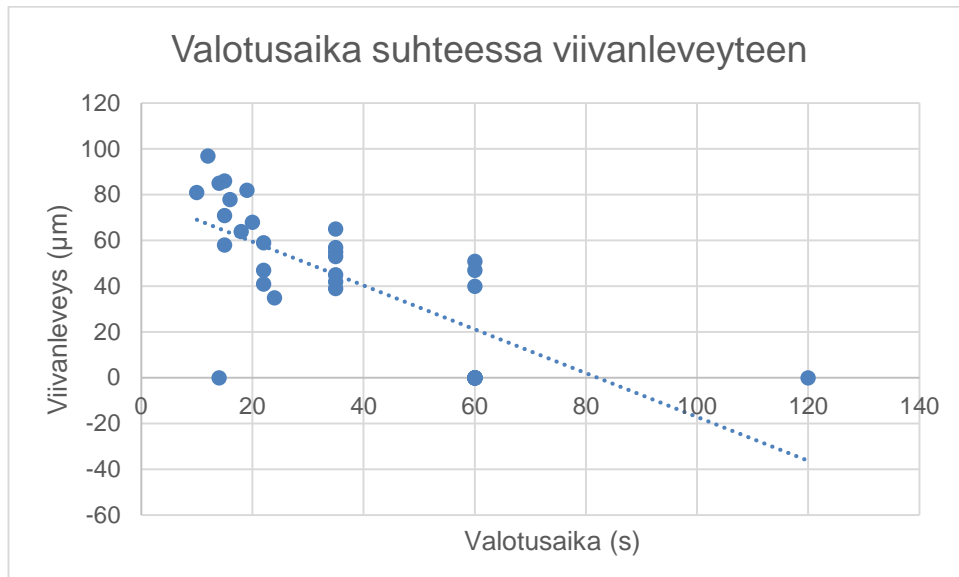


Kuva 12. Referenssilevy ja pistearvioinnin parhaat pisteet saanut levy.

Kuvasta 12 huomaa hyvin, kuinka testilevyn linjat eivät ole yhtä vahvoja kuin referenssilevyssä. Kuitenkin mikroteksti on selkeästi luettavissa ja viivanleveyksillä oli alle kymmenen mikronia heittoa. Kaikki pistearvioinnissa käytetyt arvot ja tulokset on esitetty liitteessä 2.

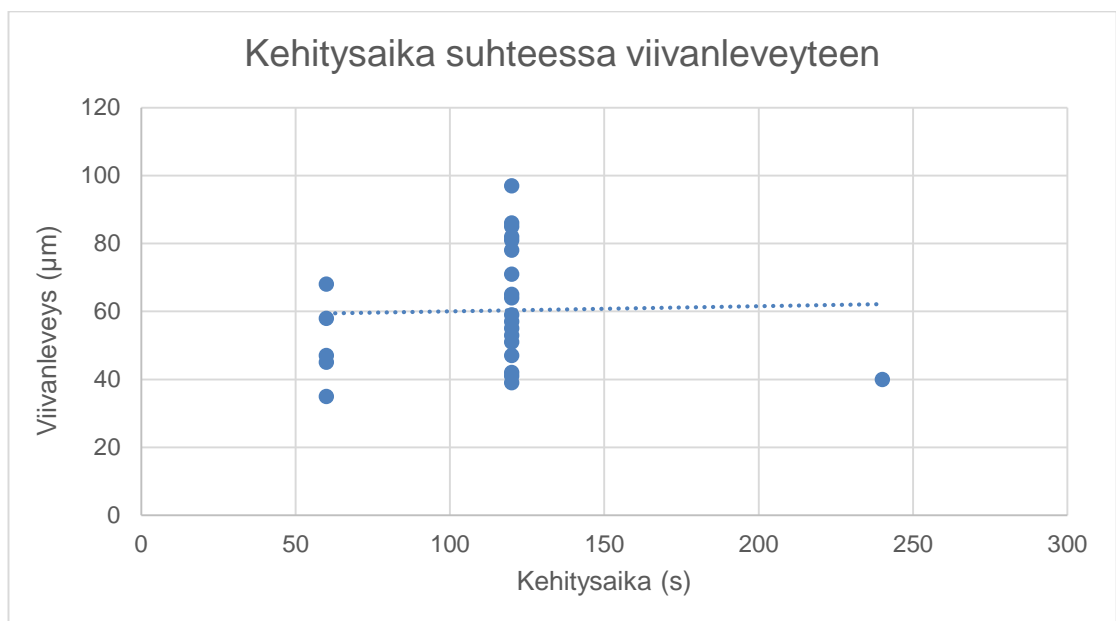
## 6.8 Parametrien vaikutus viivanleveyteen

Excelin ja Minitab-ohjelman avulla tutkittiin, kuinka suuri vaikutus valotusajalla, kehitysaajalla ja kehitteen pitoisuudella on viivanleveyteen. Kokeissa oli mukana 27 levyä, joista mitattiin viivanleveys kahdesta eri kohdasta. Tuloksia varten laskettiin korrelaatiot kullekin parametrille ja piirrettiin kuvaajat. Kuvassa 13 näkyy valotusaika suhteessa viivanleveyteen. Korrelaatioksi saatiin  $-0,73$ , mikä kertoo, että valotusajalla on jotain vaikutusta viivanleveyteen. Kuvassa 13 oleva kuvaaja kertoo myös, että valotusajan kasvaessa viivanleveys kapenee.



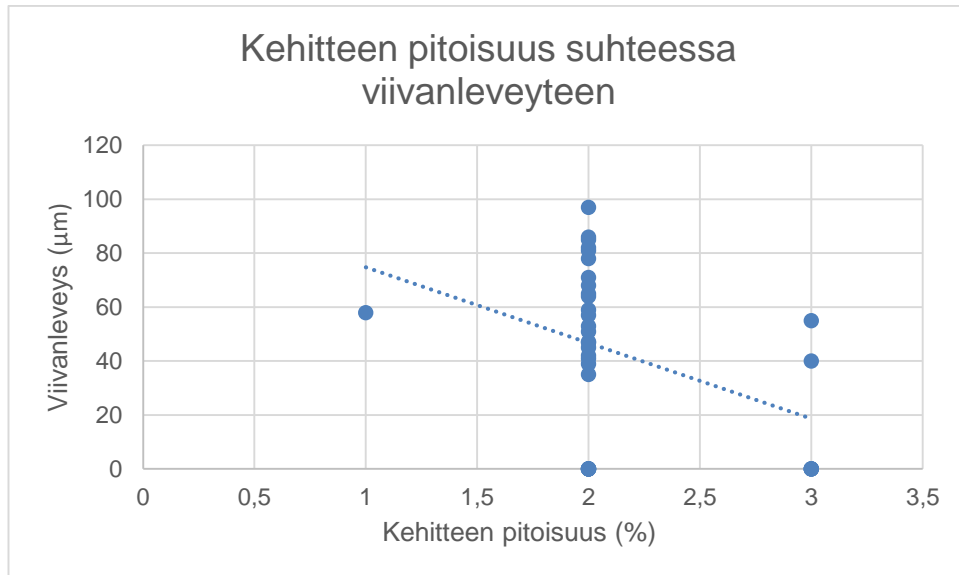
Kuva 13. Valotusajan vaikutus viivanleveyteen.

Kuvasta 14 nähdään kehitysaajan vaikutus viivanleveyteen. Korrelaatioksi laskettiin 0,03, mikä kertoo, ettei korrelaatiota näiden kahden parametrin välillä ole. Kehitysaika ei siis vaikuta merkittävästi viivanleveyteen.



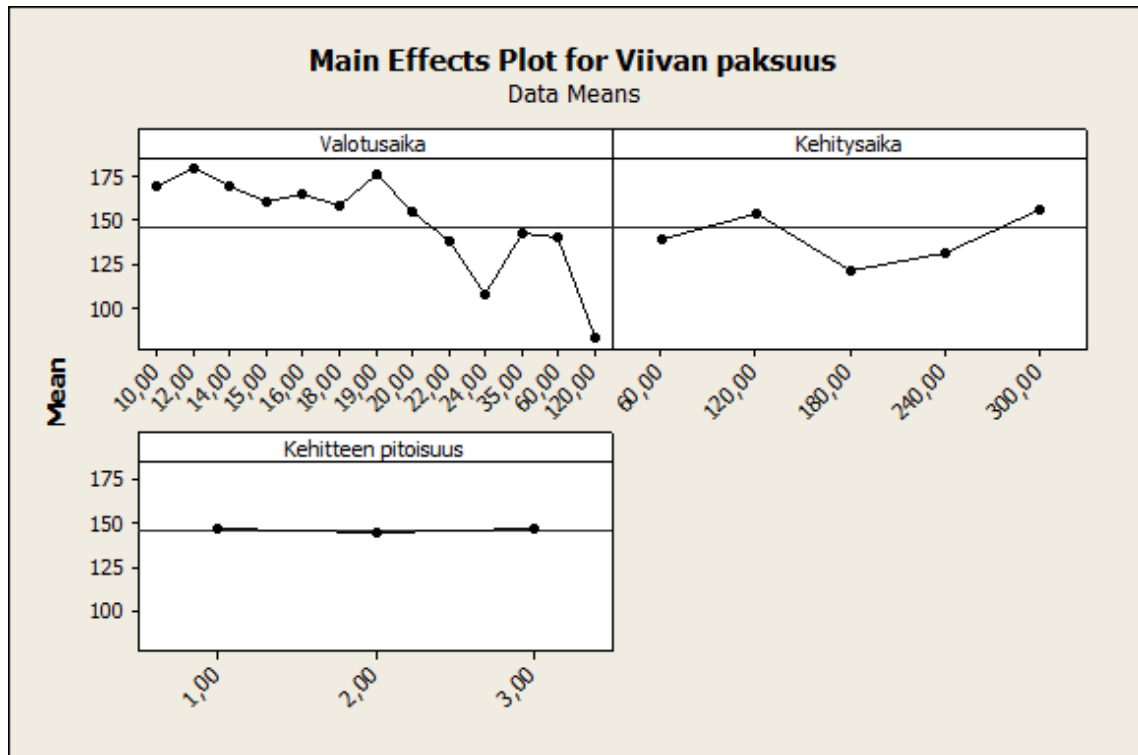
Kuva 14. Kehitysaajan vaikutus viivanleveyteen.

Viimeiseksi piirrettiin vielä kuvaaja kehitteen pitoisuuden vaikutuksesta viivanleveyteen ja se näkyy kuvassa 14. Tässä korrelaatioksi saatiin  $-0,39$ . Kehitteen pitoisuudella näyttäisi siis olevan enemmän merkitystä kuin kehitysajalla, mutta ei yhtä suurta merkitystä kuin valotusajalla.



Kuva 15. Kehitteen pitoisuuden vaikutus viivanleveyteen.

Minitab-ohjelmalla yhdistettiin vielä kaikki kuvaajat yhteen kuvaan (kuva 16). Minitab antoi hieman erilaisen tuloksen kuin Excel. Edelleen valotusajalla näyttäisi olevan eniten merkitystä viivanleveyteen, mutta kehitysajan ja kehitteen pitoisuuden vaikutuksesta ei osata sanoa varmasti. Niilläkin saattaa olla pientä vaikutusta viivanleveyteen, mutta varmempia tuloksia varten olisi täytynyt tehdä useampia toistokokeita samoilla arvoilla.



Kuva 16. Parametrien vaikutus kuvattuna Minitab –ohjelmalla.

Kuivaresistin kanssa saavutettu kapein viivanleveys oli 40  $\mu\text{m}$ , mikä on vielä kaukana tavoitellusta 10  $\mu\text{m}$ :sta. Tulokseen päästiin levyllä, jota oli valotettu 24 sekuntia, kehitetty ruiskuttamalla 1-prosenttisellä kehitteellä minuutin ajan ja syövytetty neljä minuuttia. Levy oli märkälaminoitu piirilevytehtaalla.

## 6.9 Tulosten tarkastelu

Kuivaresistikokeiden kanssa ei ollut selkeää koesuunnitelmaa, vaan kokeita suoritettiin satunnaisilla arvoilla ja katsottiin, millä arvoilla tulee parasta laatua. Alustavissa kokeissa lähdettiin käyttämään niitä arvoja, joita resistin teknisissä ohjeissa oli annettu. Arvoja muutettiin kokeiden edetessä aina siihen suuntaan, jossa tulosta syntyi. Loppujen lopuksi tuloksena oli kasa eri arvoilla suoritettuja testilevyjä ja vähän toistoja.

Suunnitelman ja toistojen puuttumisen vuoksi ei pystytä varmuudella sanomaan, mitkä parametrit vaikuttavat viivanleveyteen. Referenssilevyn antamaan tulokseen ja laatuun halutaan kuitenkin päästä. Suurin syy saattaa lopulta olla itse kuivaresistissä, joka on liian paksu (32  $\mu\text{m}$ ) ja heikko resoluutioltaan, jolloin sillä ei pystytä saavuttamaan niin kapeaa viivalinjaa kuin nykyisellä prosessilla pystytään.

## 7 Nesteresistikokeet

Kokeissa käytettiin Merckin PL 177 positiivista nesteresistiä, joka on yleisesti elektroniikkateollisuudessa käytetty fotoresisti [25]. Resistillä on korkea resoluutiotarkkuus, joten sen toivottiin antavan parempia tuloksia kun kuivaresisti. Kehitteenä käytettiin AZ 351 B -kehiteainetta, jota laimennettiin vedellä 1:4. Resisti pestiin pois 5-prosenttisella natriumhydroksidilla (NaOH). PL 177:lle suoritettiin alustavia testejä sopivan laimennussuhteen löytämiseksi, jonka jälkeen muita testejä varten tehtiin selkeä koesuunnitelma. [14.]

### 7.1 Laimennussuhde ja resistin paksuus

PL 177-nesteresistin teknisissä ohjeissa suositeltiin laimentamaan sitä ennen resistin levittämistä levyn päälle. Laimennusaineena toimi AZ EBR Solvent -liuotin. Ohjeissa oli mainittu, kuinka resistin viskositeetti muuttuu laimentamisen vaikutuksesta, mutta viskositeetin mittaaminen ei ollut tämän työn aikana mahdollista. Alustavat kokeet aloitettiin laimentamalla resistiä 1:0,1, 1:0,5, 1:1 ja lopulta niin, että liuotinta oli enemmän kuin itse resistiä. [14.]

Kaikissa kokeissa resistin levittäminen suoritettiin samalla tavalla: ensin resisti ja liuotin sekoitettiin suljetussa pullossa ravistamalla voimakkaasti. Seuraavaksi laimennettu resisti kaadettiin suljettuun astiaan liuotimen haihtuvuuden ehkäisemiseksi. Dekanterilas annettiin olla pimeässä huoneessa noin puolen tunnin ajan, jotta resistissä olevat ilmakuplat kerkesivät poistua. Odotellessa teräslevy puhdistettiin kalkilla ja rikkihapolla, kuten kuivaresistinkin kanssa. Sen jälkeen resisti kaadettiin puhtaalle levylle lingon pyöriessä. Levyn annettiin pyöriä noin 15 minuutin ajan, jonka jälkeen se laitettiin 90-asteeseen uuniin kuivumaan 20 minuutiksi.

Teknisissä ohjeissa oli annettu valotus- ja kehitysaikoja vain tietyn paksuiselle resistille, joten oletettiin resistin paksuudella olevan suuri merkitys jatkoprosessien kannalta. Paksuutta mitattiin mikrometrillä kuivasta levystä, mutta paksuuden vaihdellessa suuresti levyn eri kohdissa, päädyttiin kuvaamaan resistin paksuutta käytetyn laimennussuhteen avulla. Esimerkiksi 1:1 (resistiä ja liuotinta yhtä paljon) tarkoitti paksua resistikerrosta ja 1:2 (liuotinta kaksi kertaa enemmän kuin resistiä) ohutta kerrosta.



## 7.2 Koesuunnitelma

### 7.2.1 12 askeleen ohjelma

Koesuunnitelman laatiminen aloitettiin kirjaamalla 12 askeleen ohjelmaan lähtökohtainen ongelma ja tavoitteet, mitä koesuunnitelmalla halutaan saavuttaa. Lähtökohtana oli nykyisessä prosessissa käytössä oleva fotoresisti, joka sisältää pian luvanvaraista ammoniumdikromaattia, jonka vuoksi sille pitäisi löytää korvaaja. PL 177:n avulla pitäisi saada aikaan yhtä hyvää tai parempaa laatua kuin nykyiselläkin fotoresistillä, eli päästä vähintään 10  $\mu\text{m}$ :n viivanleveyteen. Koesuunnitelman tavoitteena on löytää toimiva prosessi PL 177:lle hakemalla ensin kaikki prosessiin vaikuttavat tekijät ja sen jälkeen mallintaa prosessiparametrit. 12 askeleen ohjelman viisi ensimmäistä kohtaa on nähtävissä liitteessä 3.

### 7.2.2 Koesuunnitelman kokeet

12 askeleen ohjelman perusteella valittiin koesuunnitelmaan viisi lopputulokseen vaikuttavaa tekijää eli faktoria: resistin laimennussuhde (resistin paksuus), valotusaika, kehitysaika, kehitystapa ja syövytysaika. Jokaiselle faktorille, lukuun ottamatta kehitystapaa, määritettiin minimi- ja maksimiarvo, jotta prosessi-ikkuna saatiin rajattua. Kehitystavaksi valittiin paineruiskulla ruiskuttaminen sekä sekoitus, jossa levy on upotettu kehitysaltaaseen ja kehitettä liikutetaan heiluttamalla allasta käsin.

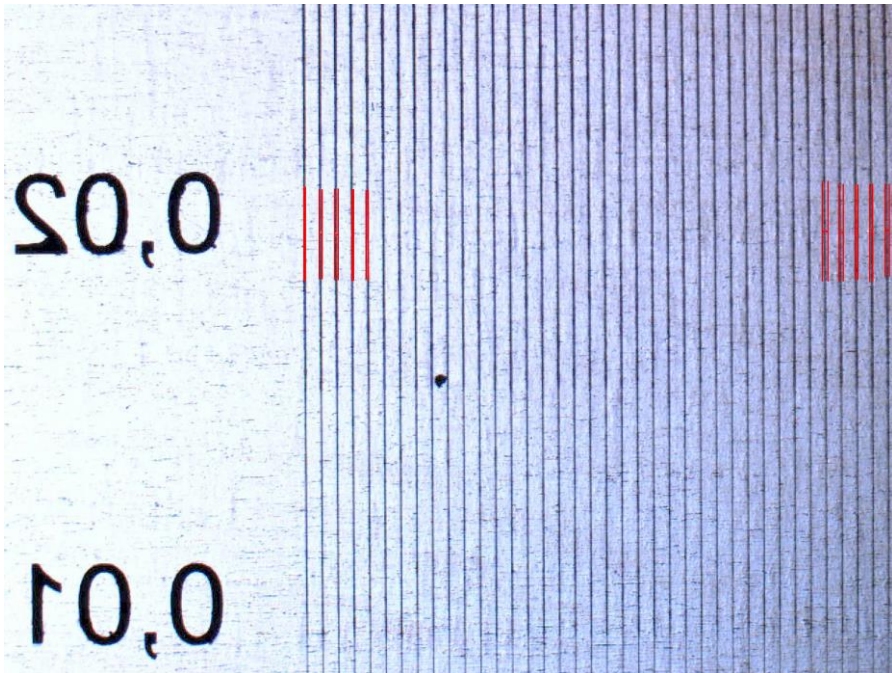
Minitab-ohjelma loi 18 kokeen sekalaisen koejärjestyksen, jota muutettiin sen verran, että ensin suoritettiin kokeet ohuella resistikalvolla, sitten paksulla kalvolla ja lopuksi keskiarvoilla. Ohuella kalvolla tarkoitetaan laimennusta, jossa resistiä on 50 ml ja liuotinta 100 ml. Paksussa kalvossa molempia on yhtä paljon eli 100 ml. Valotus- ja kehitysajat olivat 120 sekuntia ja 240 sekuntia. Syövytysajan minimiarvona oli neljä minuuttia ja maksimina 12 minuuttia. Koesuunnitelma on havainnollistettu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Koesuunnitelma nesteresistille.

Koejärjestys	Resistin pak- suus (re- sisti/liuotin - suhde (ml))	Valotusaika (s)	Kehitysaika (s)	Kehitystapa	Syövy- tysaika (min)
1	50/100	120	120	Sekoitus	12
9	100/100	120	120	Sekoitus	4
2	50/100	240	120	Sekoitus	4
10	100/100	240	120	Sekoitus	12
3	50/100	120	240	Sekoitus	4
11	100/100	120	240	Sekoitus	12
4	50/100	240	240	Sekoitus	12
12	100/100	240	240	Sekoitus	4
5	50/100	120	120	Ruiskutus	4
13	100/100	120	120	Ruiskutus	12
6	50/100	240	120	Ruiskutus	12
14	100/100	240	120	Ruiskutus	4
7	50/100	120	240	Ruiskutus	12
15	100/100	120	240	Ruiskutus	4
8	50/100	240	240	Ruiskutus	4
16	100/100	240	240	Ruiskutus	12
17	75/100	180	180	Sekoitus	8
18	75/100	180	180	Ruiskutus	8

Kokeita kertyi kummallekin resistipaksuudelle kahdeksan, eli yhteensä kuusitoista koetta. Näiden lisäksi koesuunnitelmassa oli kaksi koetta faktorien keskiarvoilla ja niissä vain kehitystapa oli eri. Yhden resistipaksuuden kokeet suoritettiin aina saman päivän aikana, jotta tulokset olisivat hyvin verrattavissa ja resisti niin sanotusti yhtä tuoretta jokaisessa testilevyssä.

Jokainen testilevy valotettiin samalla testifilmillä, jota oli käytetty myös kuivaresistiko-keissa. Kokeiden jälkeen jokaisesta levystä mitattiin viivanleveys samasta kohdasta. Yhdestä levystä mitattiin viivanleveys aina kymmenestä kohtaa, jotta saatiin tuloksia varten tarpeeksi mittauspisteitä ja mahdollista vaihtelua oli helpompi havaita. Mittauspisteiksi valittiin viisi ensimmäistä ja viisi viimeistä viivaston viivaa, ja ne on havainnollistettu kuvaan 17 punaisella.



Kuva 17. 20 mikronin viivanleveyden mittauspisteet.

Viivanleveys mitattiin asteikon kohdasta 0,02 mm eli 20 mikronin viivanleveyden kohdalta.

### 7.3 Toistokokeet

Koesuunnitelman mittaustuloksista katsottiin keskiarvoltaan lähimpänä 20 mikronia olevat kokeet, jotka toistettiin uudelleen. Lisäksi toistettiin koe, jonka tulokset olivat keskiarvoltaan pienimmät, vain 16 mikronia. Yksi testilevy antoi tulokseksi nolla, joten se toistettiin myös uudelleen.

### 7.4 Lisäkokeet resistin paksuuden ja syövytysajan muutoksille

Lisäkokeilla testattiin, muuttuuko viivanleveys merkittävästi, jos resistin paksuus tai syövytysaika muuttuu hiukan. Kokeilla haluttiin selvittää, vaikuttaako viivanleveyteen mahdollisesti resistin laimenuksessa tapahtuva virhe tai levyn unohtaminen syövytysaltaaseen. Levystä mitattiin viivanleveys 20 mikronin kohdasta, kuten aiemmissa kokeissakin.

Resistin paksuudeksi valittiin laimennussuhde 1:1, jossa oli 100 ml resistiä ja 100 ml liuotinta. Lisäkokeita tehtiin yhteensä neljä kappaletta, joissa kahdessa laimennussuhde oli 80 ml resistiä ja 100 ml liuotinta, ja kahdessa 120 ml resistiä ja 100 ml liuotinta. Resistin määrä oli siis  $\pm 20$  ml. Muut faktorit olivat arvoiltaan koesuunnitelmalla selvitettyjä optimiarvoja.

Syövytysajaksi valittiin neljä minuuttia ja lisäkokeissa testattiin syövytysajan vaikutusta kolmen ja viiden minuutin ajoilla. Viiden minuutin testissä levyä sudittiin neljä minuuttia ja viimeinen minuutti sen annettiin vain olla syövytysaltaassa. Kokeita suoritettiin kaksi kappaletta kummallekin ajalle. Muiden faktorien arvot olivat optimiarvoja.

## 8 Nesteresistikokeiden tulokset

### 8.1 Laimennussuhteen löytyminen

Laimennettaessa resistiä 1:0,1:een resisti jähmettyi levitysvaiheessa levyn keskelle eikä levinnyt läheskään koko levyllä. Kun liuotinta lisättiin, suhteessa 1:0,5, resisti levittyi jo paremmin, mutta ei vielä kukaan koko levyllä. Resistin ja liuotimen suhteen ollessa 1:1 resisti peitti levyn kokonaan. Lopuksi kokeiltiin vielä lisätä liuotinta enemmän kuin resistiä, 1:2:een, jolloin resisti levittyi edelleen hyvin koko levyllä, tosin oli väriltään hieman haaleampi kuin edelliset laimennokset. Tuloksien perusteella päädyttiin, että laimennussuhteen on oltava vähintään 1:1 tai jopa laimeampi.

Jokaisen levityksen jälkeen resistissä näkyi pieniä reikiä ja roskia, vaikka ennen levitystä oli odotettu ilmakuplien poistumista vähintään puoli tuntia. Viimeisessä, eli laimeimassa resistissä, levityksen jälkeen epäpuhtauksia oli hiukan vähemmän kuin muissa. Reikäisyyden ja roskaisuuden poistamiseen ei takerruttu tässä työssä sen enempää, vaan keskityttiin sopivan laimennussuhteen löytymiseen ja halutun laadun saantiin.

### 8.2 Koesuunnitelman tulokset

Koesuunnitelma sisälsi 18 koetta, joista jokaisesta tehtiin oma testilevy. Levyistä mitattiin viivanleveys 10 eri pisteestä ja tulokset sekä keskiarvot on esitetty taulukossa 7. Taulukon arvot ovat mikrometreinä ( $\mu\text{m}$ ).

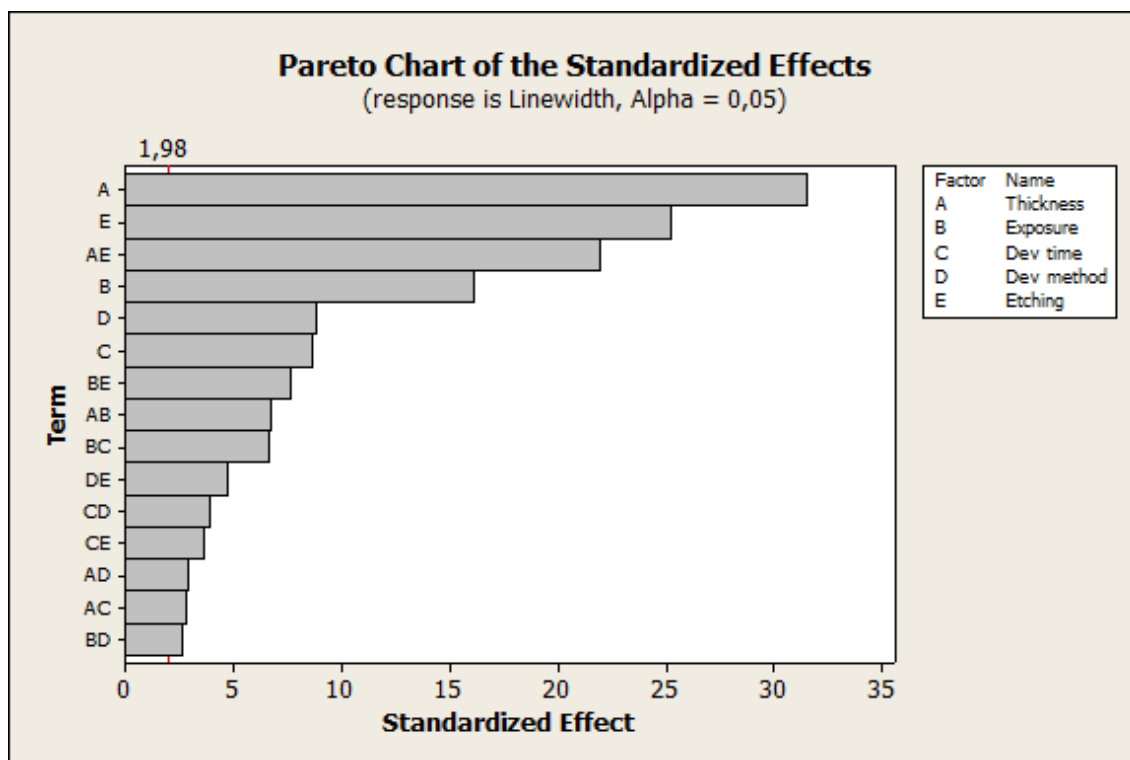
Taulukko 7. Koesuunnitelman tulokset.

Koejärjestys	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskiarvo (µm)
1	57	51	49	49	53	53	45	51	51	49	50,8
9	12	14	16	20	16	16	16	16	16	20	16,2
2	24	24	26	26	27	27	31	33	33	45	29,6
10	33	35	35	37	33	39	31	37	31	41	35,2
3	29	31	26	31	27	31	31	27	31	27	29,1
11	22	27	26	24	24	27	24	26	24	27	25,1
4	65	61	63	67	71	61	65	63	61	53	63
12	31	27	24	24	27	22	26	29	26	27	26,3
5	16	20	20	16	18	24	26	24	24	24	21,2
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
6	55	51	57	45	55	59	69	59	63	49	56,2
14	24	22	24	22	31	20	16	22	20	26	22,7
7	49	53	47	41	63	57	57	57	47	53	52,4
15	16	24	22	20	22	20	18	16	16	16	19
8	29	31	26	22	24	27	31	29	29	27	27,5
16	33	33	33	27	33	33	31	35	33	27	31,8
17	35	37	39	33	29	35	31	37	37	31	34,4
18	33	33	33	33	33	33	33	35	33	31	33

Testit numero viisi ja viisitoista olivat lähimpänä tavoiteltua 20 mikronia. Tuloksien skaala oli yllättävän laaja, jopa yli 50 mikronista nollaan asti. Suurimmat viivanleveydet esiintyivät niissä levyissä, joita oli syövytetty 12 minuuttia. Mittaustuloksista päätellen ainakin syövytysajalla tuntui olevan vaikutusta viivanleveyteen.

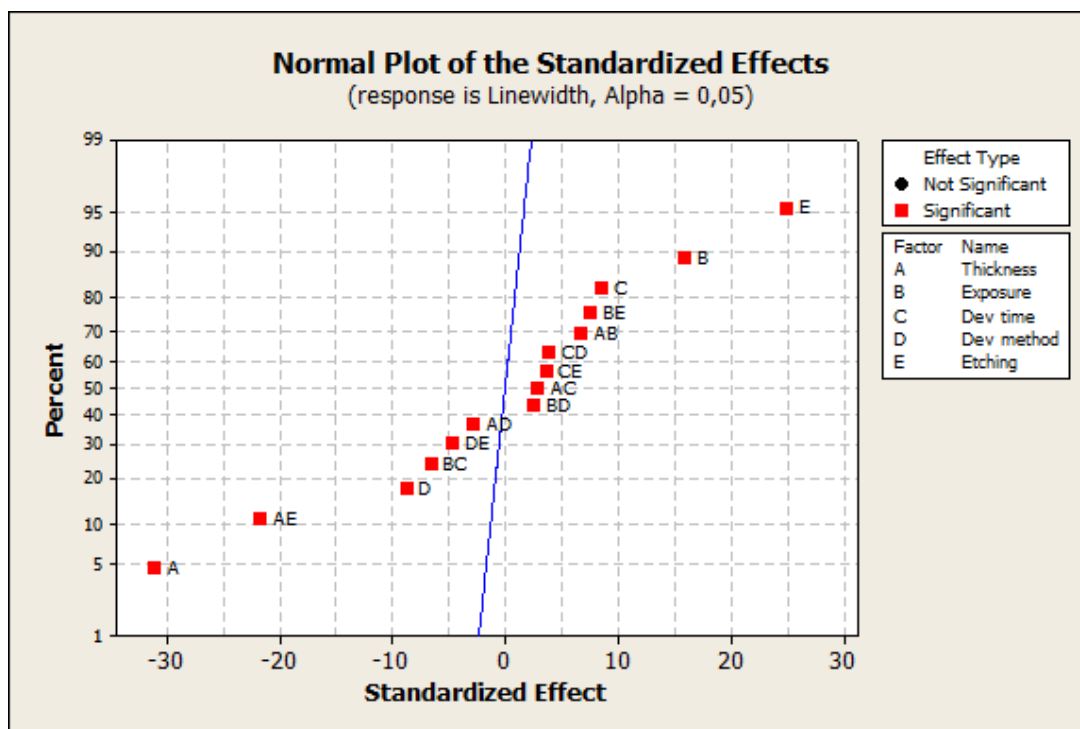
### 8.2.1 Viivanleveyteen vaikuttavat tekijät

Mittaustulokset syötettiin Minitab-ohjelmaan, joka laski faktorien vaikutukset viivanleveyteen. Ohjelma kertoi, kuinka paljon vaikutusta faktorilla on sekä yksinään että faktoreilla keskenään. Kuvasta 18 näkyy faktoreiden vaikutukset. Mitä pidempi palkki on, sitä enemmän kyseisellä tai kyseisillä faktoreilla on vaikutusta viivanleveyteen.



Kuva 18. Faktoreiden vaikutus viivanleveyteen.

Tulosten perusteella resistin paksuudella (A) ja syövytysajalla (E) on sekä yksin että yhdessä selkeästi suurin vaikutus viivanleveyteen. Niitä seuraavat muut faktorit yksinään, ja vähiten vaikutusta näyttää olevan muilla yhdysvaikutuksilla. Kuvasta 19 näkee faktorien vaikutuksen suunnan, eli leventääkö vai kaventaako faktori viivanleveyttä.



Kuva 19. Faktorien vaikutussuunnat.

Kuvasta 19 näkee, että resistin paksuus vaikuttaa negatiivisesti, eli mitä paksumpi kalvo, sitä kapeampi viiva. Syövytysaika puolestaan vaikuttaa positiivisesti, eli syövytysajan kasvattaminen leventää viivalinjaa, minkä pystyi havaitsemaan jo mittaustuloksista. Kuvan perusteella yhdysvaikutukset olisi voinut jättää huomioimatta, sillä ne sijaitsevat kuvaajassa niin lähellä nollaa. Mallinnusta varten päätettiin kuitenkin pitää kaikki faktorit mukana.

### 8.2.2 Mallin luotettavuuden toteaminen ja optimiarvot

Mallia tehdessä ei aina voida olettaa sen olevan luotettava, varsinkaan näin vähällä koemäärällä. Minitab-ohjelma laski mallille korrelaatiokertoimen, jonka arvoksi tuli 94,72 %. Korrelaatiokertoimen ollessa melkein 100 % voidaan todeta, että malli on koesuunnitelmaksi luotettava. Korrelaatio ja faktorien vaikutusten arvot ovat taulukoituna kuvassa 20.

Estimated Effects and Coefficients for Linewidth (coded units)

<u>Term</u>	<u>Effect</u>	<u>Coef</u>	<u>SE Coef</u>	<u>T</u>	<u>P</u>
Constant		31,631	0,3046	103,83	0,000
Block 1		-0,583	0,8617	-0,68	0,499
Block 2		0,028	0,8617	0,03	0,974
Block 3		-0,417	0,8617	-0,48	0,629
Block 4		-2,028	0,8617	-2,35	0,020
Block 5		0,694	0,8617	0,81	0,422
Block 6		0,583	0,8617	0,68	0,499
Block 7		0,417	0,8617	0,48	0,629
Block 8		1,250	0,8617	1,45	0,149
Block 9		0,083	0,8617	0,10	0,923
Thickness	-19,187	-9,594	0,3046	-31,49	0,000
Exposure	9,813	4,906	0,3046	16,10	0,000
Dev time	5,287	2,644	0,3046	8,68	0,000
Dev method	-5,100	-2,550	0,2872	-8,88	0,000
Etching	15,363	7,681	0,3046	25,21	0,000
Thickness*Exposure	4,112	2,056	0,3046	6,75	0,000
Thickness*Dev time	1,738	0,869	0,3046	2,85	0,005
Thickness*Dev method	-1,763	-0,881	0,3046	-2,89	0,004
Thickness*Etching	-13,387	-6,694	0,3046	-21,97	0,000
Exposure*Dev time	-4,063	-2,031	0,3046	-6,67	0,000
Exposure*Dev method	1,587	0,794	0,3046	2,61	0,010
Exposure*Etching	4,663	2,331	0,3046	7,65	0,000
Dev time*Dev method	2,362	1,181	0,3046	3,88	0,000
Dev time*Etching	2,238	1,119	0,3046	3,67	0,000
Dev method*Etching	-2,862	-1,431	0,3046	-4,70	0,000
Ct Pt		2,069	0,9139	2,26	0,025

S = 3,85351      PRESS = 3212,19  
R-Sq = 94,72%      R-Sq(pred) = 92,58%      R-Sq(adj) = 93,86%

Kuva 20. Faktorien vaikutukset lukuina.

Koesuunnitelman kokeiden ja niistä saatujen tulosten perusteella Minitab antoi optimiarvot, joilla levyyn pitäisi saada toistettavaa 20 µm:n levyistä viivaa. Toleranssirajoiksi asetettiin 23 ja 17 µm. Optimiarvot on listattuna kuvassa 21.



**Response Optimization****Parameters**

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
<b><u>Linewidth</u></b>	Target	17	20	23	1	1

**Global Solution**

**Thickness** = 100  
**Exposure** = 120  
**Dev time** = 240  
**Dev method** = 1 (Spray)  
**Etching** = 4

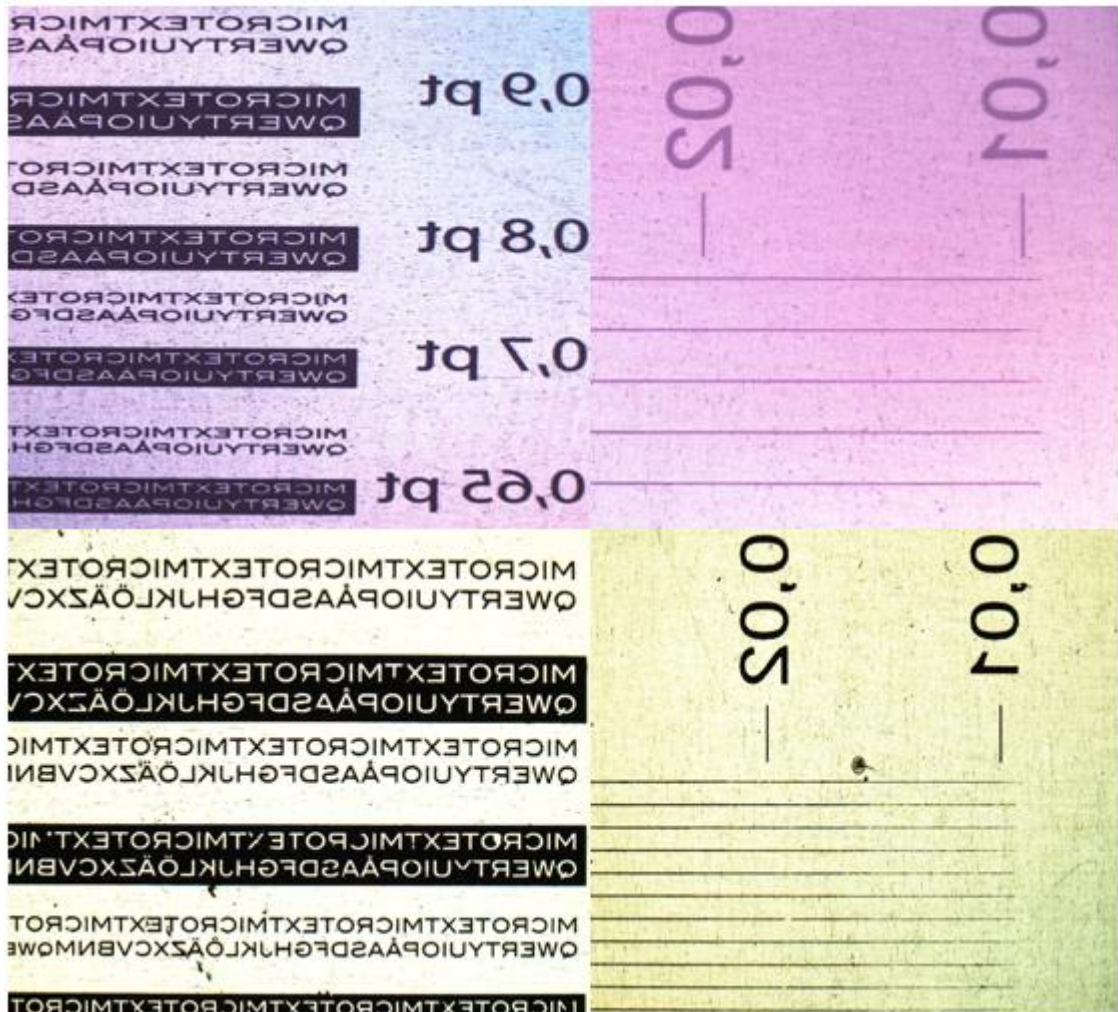
**Predicted Responses**

**Linewidth** = 19,2312 , **desirability** = 0,743750

Composite **Desirability** = 0,743750

Kuva 21. Optimiarvot.

Optimiarvojen mukaan paksumpi resisti, suhteella 1:1, olisi parempi kuin ohuempi resisti. Optimaaliseksi valotusajaksi selvisi 120 sekuntia, kehitysajaksi 240 sekuntia, kehitystavaksi ruiskuttaminen ja syövytysajaksi neljä minuuttia. Koesuunnitelmassa testi numero 15 tehtiin näillä arvoilla ja sen huomattiin näyttävän selkeästi kaikista laadukkainta tulosta ja oli hyvin lähellä referenssilevyn laatua. Kuvassa 22 on esitetty vertailuna referenssilevy (ylhällä) ja testi 15 (alhaalla).



Kuva 22. Referenssilevy ja optimiarvoilla tehty levy.

Optimiarvoilla tehty testilevy numero 15 on yleisilmeeltään hyvin laadukas ja selkeä. Mikroteksti on katkeamatonta kohdissa, joissa itse teksti on syövytetty (teksti vaalealla pohjalla). Viivanleveys näyttää rikkoutuvan 10 mikronin kohdalla, joten ihan täydellistä tulosta ei vielä saavutettu. Testin 15 molemmissa kuvissa näkyy selkeitä reikiä, jotka johtuvat resistissä olleista ilmakuplista ja epäpuhtauksista.

### 8.3 Toistokokeiden ja lisäkokeiden tulokset

Koesuunnitelman kokeille numero 5, 9, 13 ja 15 suoritettiin toistokokeet. Koetta 13 toistettiin kerran, kokeita 5 ja 9 kaksi kertaa ja koetta 15 toistettiin kolme kertaa. Viivanleveydet mitattiin 10 kohtaa, kuten muissakin kokeissa. Toistojen avulla katsottiin, ovatko

mittaustulokset samoja tai lähelläkään samoissa lukemissa kuin ensimmäisellä testikerrolla. Toistokokeiden tulokset on ilmoitettu mikroneina ja ne ovat luettavissa taulukosta 8.

Taulukko 8. Toistokokeiden tulokset.

Koejärjestys	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskiarvo (µm)
5_toisto 1	27	26	24	29	24	24	29	29	29	20	26,1
5_toisto 2	35	29	26	27	27	22	31	35	24	29	28,5
9_toisto 1	8	10	8	8	4	10	6	8	14	12	8,8
9_toisto 2	12	14	4	12	12	14	8	12	6	16	11
13_toisto 1	20	18	26	20	24	22	22	26	24	26	22,8
15_toisto 1	12	20	20	14	20	18	14	18	18	16	17
15_toisto 2	16	16	20	16	16	18	20	18	22	20	18,2
15_toisto 3	14	16	18	18	20	16	14	18	20	20	17,4

Ainoastaan testin 15 toistokokeiden tulokset olivat toleranssirajoissa ( $\pm 3 \mu\text{m}$ ) koesuunnitelman kokeisiin verrattuna. Tämä testi oli optimiarvoilla tehty, joten tulokset antoivat myös varmuutta optimiarvojen oikeellisuuteen.

Lisäkokeissa testattiin resistin paksuuden ja syövytysajan muutosten vaikutusta viivanleveyteen. Tavoitteena oli, että viivanleveys pysyisi 20 mikronissa. Toleranssirajat olivat samat 23 ja 17  $\mu\text{m}$ , kuin koesuunnitelmassa. Molemmissa lisäkokeissa valotusaikana oli 120 sekuntia, kehitysaika 240 sekuntia ja kehitystapana ruiskuttaminen. Lukuun ottamatta yhtä lisäkoetta, kaikki tulokset pysyivät toleranssirajoissa. Tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Lisäkokeiden tulokset.

<b>Resistin paksuuden muutos</b>												
<b>Paksuus (resisti/liuotin – suhde (ml))</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Keskiarvo (µm)</b>	
80/100	20	20	22	18	22	16	18	24	24	24	20,8	
80/100	16	22	16	20	24	16	16	22	16	16	18,4	
120/100	16	10	16	10	10	12	14	12	8	14	12,2	
120/100	18	18	20	18	18	24	14	18	22	22	19,2	
<b>Syövytysajan muutos</b>												
<b>Syövytysaika (min), resisti/liuotin –suhde 100/100 ml</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>Keskiarvo (µm)</b>	
3	16	20	20	14	14	16	20	18	18	14	17	
3	22	20	14	20	18	18	18	18	16	18	18,2	
4+1	18	20	20	22	18	16	20	22	18	18	19,2	
4+1	20	22	18	20	20	18	22	22	24	22	20,8	

Ensimmäinen lisäkoee resistipaksuudella 120/100 antoi keskiarvotulokseksi 12,2 µm, mikä erosi huomattavasti muista tuloksista. Varsinkin toinen samoilla arvoilla tehty koe antoi tulokseksi hyvin lähellä 20 µm olevan arvon, jonka vuoksi voidaan epäillä, että ensimmäistä testiä tehdessä on tapahtunut jokin virhe. Kuitenkin kaikki muut lisäkokeet pysyivät toleranssirajoissa, mikä oli hyvin positiivinen tulos. Pienet muutokset resistin paksuudessa ja syövytysajassa eivät juurikaan vaikuta viivanleveyteen.

#### 8.4 Tulosten tarkastelu

Sopivan laimennussuhteen löytyminen kävi melko nopeasti, mutta yllättävää oli, kuinka paljon liuotinta lopulta tarvittiin resistin täydelliseen levittymiseen. Koesuunnitelman tuloksista kävi kuitenkin ilmi, että paksummalla resistillä saavutetaan kapeampaa viivanleveyttä, joten resistiä ei voida laimentaa liikaa halutun kapean viivanleveyden tavoittamiseksi.

Koesuunnitelman merkittävyyden ja tärkeyden huomasi selkeästi nesteresistikokeissa, koska kuivaresistikokeista se jäi puuttumaan. Kokeita suoritettiin huomattavasti vähemmän kuin kuivaresistillä, mutta tulokset olivat huomattavasti luotettavampia koesuunnitelman avulla luodun mallin vuoksi. Kokeita oli myös helpompi toteuttaa, koska ohjelma loi selkeän koejärjestyksen eikä tarvinnut miettiä, millä arvoilla kokeilee seuraavaksi.

Resistin paksuuden ja syövytysajan vaikutus nousivat eniten viivanleveyteen vaikuttaviksi tekijöiksi, mikä yllätti täysin. Kuivaresistikokeita tehdessä suurimman vaikutusarvon ajateltiin olevan valotusajassa ja sitä seuraten myös kehitysajassa ja –tavassa. Koesuunnitelman avulla selvisi merkittävät tekijät heti ensimmäisten kokeiden jälkeen, jolloin muut tekijät voitiin jättää huomioimatta.

Toistokokeista saatiin toistettavia tuloksia ainoastaan optimiarvoilla tehdyillä kokeilla, mikä kertoo optimiarvojen oikeellisuudesta. Lisäkokeista seitsemässä kokeessa kahdeksasta pysyttiin toleranssirajoissa, mikä myös vahvisti optimiarvojen toistettavuutta. Pienet vaihtelut syövytysajassa ja resistin paksuudessa eivät vaikuttaneet merkittävästi viivanleveyteen, jolloin todellisessa työskentelytilanteessa tapahtuvat inhimilliset virheet eivät välttämättä aiheuta levyjen hylkäämisiä.

## **9 Uuden fotoresistin vaatimat muutokset etsausprosessiin**

### **9.1 Kuivaresisti**

Jos nykyisen fotoresistin tilalle valittaisiin DuPontin kuivaresisti Riston® ES102, se vaatisi ehdottomasti kuumarullalaminaattorin resistin laminoitua varten. Kuivaresistille tarkoitetulla laminaattorilla resisti saataisiin tasaisesti teräslevyn päälle oikeita lämpötiloja ja paineita käyttäen. Valotuskoneesta olisi hyvä tarkistaa UV-lampusta tuleva säteilyenergia tai vaihtaa tilalle lamppu, jonka spektrin huippu olisi varmasti samassa kohtaa kuin resistilläkin.

Kehitystä vasten suositeltavaa olisi hankkia ruiskutuskone, jolloin kehite tulisi ruiskusuuttimista oikealla paineella ja kehite liikkuisi kokoajan. Syövytystä varten voisi myös harkita ruiskukoneen hankintaa, jolloin mahdollisilta sutimisen ja nostojen aiheuttamilta vahingoilta vältyttäisiin kokonaan. Sekä kehitys- että syövytysvaiheessa koneet lisääisivät prosessin automatisointia, mikä vähentäisi myös tapahtuvien vahinkojen määrää huomattavasti.

Resistin poistoa varten tulisi hankkia sopivan kokoinen allas, johon strippausainetta olisi helppo lisätä. Lisäksi levyn asettaminen altaaseen sekä poisotto, tulisi olla yksinkertaista ja altaassa pitäisi olla myös lämmitin strippausaineen lämmittämiseksi. Jätteiden, eli tässä tapauksessa hajonneen resistin palasien, käsittely tulisi suunnitella vaivattomaksi,

jotta palaset kerättäisiin ja hävitettäisiin erikseen eikä päästettäisi suoraan viemäriin. Yrityksellä on oma viemäri-vesien käsittelylaitos, joten suoraan kunnallisiin jätevesiin eivät mitkään liuokset sieltä pääse.

## 9.2 Nesteresisti

Testattu nesteresisti PL 177 ja sen AZ EBR Solvent -liuotin olivat ominaishajuiltaan hyvin vahvoja, minkä vuoksi nykyisen etsausprosessin tiloihin olisi rakennettava parempi ilmanvaihto. Liuotinpohjainen resisti sotki koko lingon resistin levitysvaiheessa eikä irronnut kuin vahvalla natriumhydroksidilla. Natriumhydroksidi on jo itsessään vaarallinen, syövyttävä vahva emäs, joten sitä ei ole kovin miellyttävää käyttää. Lingon puhdistamiseen tarvitsi kehittää jokin muu tekniikka tai aine, jotta työturvallisuustaso pystyttäisiin pitämään ennallaan. Nesteresistin levittämistä olisi hyvä kokeilla myös muilla tekniikoilla kuin linkoamalla. Toisenlaisen tekniikan valinta edellyttäisi tietenkin sille sopivien laitteiden hankintaa.

Osastolle täytyisi hankkia myös oma uuni resistin kuivatusta varten, sillä kokeissa käytetty uuni oli vain lainassa. Valotus-, kehitys- ja syövytysvaiheet tarvitsisivat samalaiset muutokset kuin kuivaresistilläkin. Resistin poistoa varten altaassa tulisi olla vain selkeä syöttö ja poisto, jotta strippausaine saataisiin pidettyä tuoreena.

## 10 Päätelmät ja jatkosuunnitelma

Taloudellisesti ja teknisesti edullisempi vaihtoehto testatuista fotoresisteistä olisi kuivaresisti. Vaikka vaaditut prosessimuutokset ja laitehankinnat maksaisivat hyvin paljon, prosessi maksaisi itsensä takaisin, koska tuotantokapasiteettia pystyttäisiin kasvattamaan reilusti. Kuivaresisti itsessään on huomattavasti halvempaa ja riittäisempää kuin nesteresisti ja laminoimalla levyjä saataisiin myös päällystettyä enemmän ja nopeammin. Kaikin puolin kuivaresistiä on myös miellyttävämpi käsitellä. Laadun suhteen nesteresisti olisi selkeä ykkösvaihtoehto, sillä kuivaresistin tuloksia ei voi edes verrata nesteresistillä saatuihin tuloksiin.

Tutkimusta voitaisiin jatkaa PL 177-nesteresistin kanssa kokeilemalla erilaisia päällystysmekaniikoita, kuten kastamista, ruiskutusta ja resistin telausta. Lisäksi kalvon roskaisu-

den ja reikäisyyden juurisyyt tulisi löytää ja etsiä ongelmiin ratkaisut. Jotta prosessi saataisiin muutettua ennen kuin ammoniumdikromaatista tulee luvanvaraista, uusi fotoresistimateriaali tulisi valita pian ja selvittää prosessimuutoksia varten tarvittavien laitteiden ja koneiden hinnat sekä toimitusajat.

## 11 Yhteenveto

Fotoresistit ja teräslevyjen etsausprosessi olivat täysin tuntemattomia käsitteitä ennen insinööriyön aloittamista. Työ aloitettiin opiskelemalla teoriaa ja kyselemällä alan ammattilaisilta apua. Fotoresisteihin tutustuminen aloitettiin testaamalla niitä teknisissä ohjeissa olevien arvojen mukaan ja arvoja alettiin soveltamaan saatujen tulosten perusteella. Käynti piirilevytehtaalla valotti fotoresistien käyttöä ja käyttäytymistä erittäin hyvin.

Kuivaresistin kanssa saadut, melko huonot, tulokset aiheuttivat ajoittain turhautumista ja päänsäiväa. Lopulta kuitenkin todettiin, että kuivaresistin resoluutio ei yksinkertaisesti riitä antamaan yhtä hyvää laatua, kuin nykyisellä prosessilla saadaan. Kuivaresisti olisi miellyttävämpi vaihtoehto korvaamaan nykyistä fotoresistiä, sen helppokäyttöisyyden ja miedon hajun vuoksi. Mahdollisesti paremman resoluution omaavan kuivaresistin löytäessä, sitä voitaisiin testata uudelleen.

Nesteresistikokeita oli miellyttävä tehdä, sillä laaditun koesuunnitelman takia ei tarvinnut miettiä, millä arvoilla mitäkin prosessiparametria lähtee testaamaan. Oli myös ilo huomata, kuinka merkittävä koesuunnitelma voi olla ja miten paljon aikaa säästää, kun ei tarvitse tehdä turhia kokeita. Nesteresistillä tehdyistä kokeista saatiin erittäin hyviä tuloksia, ja optimiarvoilla tehdyt levyt olivat hyvin lähellä referenssilevyn laatua. Suurimmat ongelmat olivat resistin epämiellyttävät ominaisuudet, kuten haju ja sotkevuus.

Työn tavoitteet tuli selkeästi saavutettua. Tutkimus sisälsi kahden erilaisen fotoresistin testaamista ja saatujen tulosten vertailua nykyiseen laatuun. Lisäksi selvitettiin tarvittavat prosessimuutokset kummankin fotoresistin osalta. Johdannossa esitettiin myös toive, että ainakin toinen kalvoista tuottaisi vähintään yhtä hyvää laatua kuin nykyinen kalvomateriaali. Tätä toivetta ei ihan täysin saavutettu, mutta hyvin lähelle kuitenkin päästiin nesteresistikokeiden kanssa.

## Lähteet

- 1 Gemalto Oy:n kotisivut. Verkkodokumentti. <[www.gemalto.com](http://www.gemalto.com)>. Luettu 25.1.2016.
- 2 Heinonen, Timo. 2016. Galvano Operator, Gemalto Oy. Keskustelu 5.1.2016.
- 3 Nenonen, Jukka. 2016. R&D Engineer, Gemalto Oy. Haastattelu 24.2.2016.
- 4 Kahdeksan ainetta lisätty lupamenettelyyn. 2013. Verkkodokumentti. Kemikaalineuvonta. <[www.kemikaalineuvonta.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/REACH/Kahdeksan-ainetta-lisatty-lupamenettelyyn-/](http://www.kemikaalineuvonta.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/REACH/Kahdeksan-ainetta-lisatty-lupamenettelyyn-/)>. Luettu 25.2.2016.
- 5 Mack, Chris A. Semiconductor Lithography (Photolithography) – The Basic Process. Verkkodokumentti. <[www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html](http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html)>. Luettu 7.4.2016.
- 6 The History of the Photogravure. Verkkodokumentti. <[www.photogravure.com/history/chapter\\_niepce.html](http://www.photogravure.com/history/chapter_niepce.html)>. Luettu 15.3.2016.
- 7 Khandpur, R. S. 2006. Printed Circuit Boards: design, fabrication and assembly. Yhdysvallat: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- 8 DuPont™ Riston® Aqueous Processable Photopolymer Films: General Processing Guide. 2009. E. I. duPont de Nemours and Company.
- 9 Coombs, Clyde F. Jr. 2008. Printed Circuits Handbook, Sixth Edition. The McGraw-Hill Companies. PDF-dokumentti. <[http://www.pearl-hifi.com/06\\_Lit\\_Archive/14\\_Books\\_Tech\\_Papers/Coombs\\_Clyde/Printed%20Circuits%20Handbook,%206th%20Ed.pdf](http://www.pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Coombs_Clyde/Printed%20Circuits%20Handbook,%206th%20Ed.pdf)>.
- 10 Partanen, Jussi. 2016. Managing Director, Elektrokem Oy. Palaveri 20.1.2016.
- 11 DuPont iTechnologies. 2002. Riston® ES102 Data Sheet. Du Pont de Nemours International SA.
- 12 MicroChemicals. 2012. Photolithography.
- 13 Henderson, Clifford L. Untitled Document. Henderson Research Group. Verkkodokumentti. <<http://henderson.chbe.gatech.edu/Introductions/i-line%20resists.htm>>. Luettu 10.4.2016.
- 14 Clariant. PL 177, General-Purpose Positive Resist – Product Data Sheet.



- 15 Rehman, Sami. 2012. Wafer Processing Equipment and Clean Room Inventory For a Research Based IC Fabrication Facility. Diaesitys. <[www.slideshare.net/samiseecs/fab-presentaion](http://www.slideshare.net/samiseecs/fab-presentaion)>. Luettu 10.4.2016.
- 16 Partanen, Jussi. 2016. Managing Director, Elektrokem Oy. Sähköpostikeskustelu 4.2.2016.
- 17 Lawston, M. 2015. The Effect of Ultraviolet and Ultraviolet-Ozone Exposure on Polymers. PDF-dokumentti. <[http://homepages.rpi.edu/~ryuc/out-reach\\_1/2015\\_005\\_Marlene\\_L.pdf](http://homepages.rpi.edu/~ryuc/out-reach_1/2015_005_Marlene_L.pdf)>. Luettu 27.4.2016.
- 18 Microchemicals. 2013. Exposure of Photoresists. Verkkodokumentti. <[http://www.microchemicals.com/technical\\_information/exposure\\_photoresist.pdf](http://www.microchemicals.com/technical_information/exposure_photoresist.pdf)>. Luettu 25.4.2016.
- 19 Partanen, Jussi. 2016. Managing Director, Elektrokem Oy. Haastattelu 5.2.2016.
- 20 Global Marketing Department. 2015. Ammoniumdikromaatin käyttöturvallisuustiedote. Verkkodokumentti. <[www.alfa.com/en/content/msds/finnish/43180.pdf](http://www.alfa.com/en/content/msds/finnish/43180.pdf)>. Luettu 15.3.2016.
- 21 Nenonen, Jukka. 2016. R&D Engineer, Gemalto Oy. Keskustelu 12.4.2016.
- 22 Luvanvaraisten aineiden luettelo. 2015. Kemikaalineuvonta. Verkkodokumentti. <[www.kemikaalineuvonta.fi/Documents/reach/asetus/LIITE%20XIV.pdf](http://www.kemikaalineuvonta.fi/Documents/reach/asetus/LIITE%20XIV.pdf)>. Luettu 25.2.2016.
- 23 Kiilunen, M., ym. 2014. Perustelumuistio liukoisten kromi(VI)-yhdisteiden biologisten altistumisindikaattorien toimenpideraja-arvoille. Työterveyslaitos. Verkkodokumentti. <[www.ttl.fi/fi/palvelut/turvallisempi-tyoymparisto/biomonitorointi/Documents/Kromi.pdf](http://www.ttl.fi/fi/palvelut/turvallisempi-tyoymparisto/biomonitorointi/Documents/Kromi.pdf)>. Luettu 15.3.2016.
- 24 GS Japan Storage Battery CO. 1988. Instruction for Light Source Equipment.
- 25 Merck Performance Materials GmbH. 2016. PL 177 Photoresist, käyttöturvallisuustiedote.

**Toistokokeiden tulokset kuivaresistillä**

Levy nro	Valotusaika (s)	Kehitysaika (min)	Syövytysaika (min)	Syövytyksen syvyys (µm)			Viivaleveys (µm)					
				Ylhäältä	Keskeltä	Alhaalta	1	2	3	4	5	6
40	22	2	4	5,1	5,1	6,3	47	91	58	143	117	98
54	22	2	4	5,8	4,6	6,3	59	90	55	142	118	95
48	35	2	4	4,9	6,4	6,4	39	78	-	144	122	99
55	35	2	4	5,2	6,3	6,2	42	85	36	136	108	90
50	14	2	4	4,1	6,9	6,7	86	111	73	174	144	121
56	14	2	4	4,5	4,3	4,2	71	107	67	159	133	106
51	17	2	4	4,2	5,8	4,2	78	114	72	165	145	125
57	17	2	4	-	3,3	3,6	-	-	-	-	-	-
46	10	2	4	6,8	8,8	7	81	110	80	169	144	122
58	10	2	4	8,2	7,3	6,5	-	-	-	-	-	-

Pistearvioinnin tulokset

Levy nro	Asiakasfilmi	Testifilmi	Kehitysaika (s)		Kehitysilukoksen pit. (%)	Mikrotekstin laatu		Pistearviointi		Vihaleveys suhteessa referenssiin	Pienin vihaleveys	Kokonaispisteet (max. 6 p.)
			Valotusaika (s)	Kehitysaika (s)		Vaalealla pohjalla (teksti syövytetty)	Tumalla pohjalla (ympäritä syövytetty)	Vihaleveys suhteessa referenssiin	Pienin vihaleveys			
18			60	300	3	0	0	0	0	0	0	0
21			120	300	3	0	0	0	0	0	0	0
25			60	120	2	0	0	0	0	0	0	0
27			35	120	3	1	1	1	2	2	2	3
28			60	240	3	1	1	1	2	2	2	3
29			60	300	3	1	1	1	1	1	1	1
31			60	180	3	0	0	0	0	0	0	0
32			60	180	2	0	0	0	0	0	0	0
33			60	180	2	0	0	0	0	0	0	0
34			60	120	2	1	1	1	2	2	2	3
35			60	240	2	0	0	0	0	0	0	0
36			60	60	2	1	1	1	1	1	1	2
37			60	180	2	1	1	1	1	1	1	2
38			35	120	2	2	2	2	3	3	3	5
39			35	120	2	2	2	2	1	1	1	3
40			22	120	2	3	3	3	2	2	2	5
41			12	120	2	2	2	2	0	0	0	2
42			35	60	2	2	2	2	3	3	3	5
43			20	60	2	2	2	2	1	1	1	3
44			14	120	2	1	1	1	0	0	0	1
45			35	120	2	1	1	1	2	2	2	3
46			10	120	2	2	2	2	0	0	0	2
48			35	120	2	2	2	2	2	2	2	4
49			14	120	2	2	2	2	0	0	0	2
50			15	120	2	2	2	2	0	0	0	2
51			16	120	2	2	2	2	0	0	0	2
52			18	120	2	2	2	2	1	1	1	3
53			19	120	2	2	2	2	0	0	0	2
54			22	120	2	3	3	3	2	2	2	5
55			35	120	2	2	2	2	3	3	3	5
56			15	120	2	3	3	3	1	1	1	4
62			22	120	2	3	3	3	3	3	3	6
63			10	120	2	1	1	1	0	0	0	2.4
64			24	60	2	1	1	1	1.8	1.8	1.8	2.3
65			35	60	2	1	1	1	0.9	0.9	0.9	2.4
66			48	60	2	1	1	1	0.9	0.9	0.9	1.9
67			10	60	2	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.3
68			24	60	2	2	2	2	1.2	1.2	1.2	3.2
69			35	60	2	1	1	1	0.9	0.9	0.9	2.4
70			48	60	2	1	1	1	0.6	0.6	0.6	2.6
72			10	60	2	1	1	1	1.2	1.2	1.2	2.7
73			24	60	2	1	1	1	1.2	1.2	1.2	2.2
74			35	60	2	0	0	0	1.2	1.2	1.2	3.2
75			48	60	2	1	1	1	0.9	0.9	0.9	2.9
77			24	60	2	1	1	1	2	2	2	3
78			10	60	1	1	1	1	1	1	1	3.1
79			24	60	1	2	2	2	2.1	2.1	2.1	4.1
80			15	60	1	2	2	2	2	2	2	4
89			12	60	1	2	2	2	2.1	2.1	2.1	4.6
90			14	60	1	1	1	1	1.8	1.8	1.8	3.3
91			16	60	1	2	2	2	1.8	1.8	1.8	3.8
12			24	60	2	2	2	2	1.2	1.2	1.2	3.7
13			35	60	2	1	1	1	1.2	1.2	1.2	3.2

## 12 askeleen ohjelma

### I. Statement of the Problem:

Process development is needed for new photoresist to replace the current Ammonium dichromate based photoresist.  
 New photoresist PL-177 should fulfill the same functionality (or improve) than the current process  
 With recent process we can obtain linewidths of 10µm.

### II. Objective of the Experiment:

Find a working process for the PL-177 photoresist.  
 Experiments in two stages 1) Screening of the significant factors 2) Modelling of the process parameters

Understand process  
 Quantify variation observed  
 Identify factors (historical data analysis & MSA)

III. Start and End Date: Start 21.3.2016, end 22.4.2016

Budget:

### IV. Select Quality Characteristics (also known as responses, outputs, or Y's).

Response	Type (attribute or continuous)	Anticipated Range	How will you measure the response? Is the measurement method accurate and precise?
Linewidth	C	~10 µm	Optical microscope. Considered as accurate/precise enough. MSA?
Line depth	A	5-11µm	MSA?
Air bubbles	A		Visual
Dust & Dirt	A		Visual

### V. Complete a literature review, process flow diagram, and cause/effect diagram. Select factors which are anticipated to have an effect on the response. Write SOPs for all variables that are to be held constant.

### Process windows - key factors

Factor	Type (attribute or continuous)	Controllable or Noise	Range of Interest	Levels	Anticipated Interactions With	How Measured?
Resist thickness	C	X	3-10µm	2	UV energy	Elcometer
Drying time	C	C	10 - 20 min	2	Resist thickness	Dr Hönle
Drying temperature	C	C	70 - 90 °C	2	Resist thickness	
UV exposure energy	C	X	~100 mJ/m <sup>2</sup>	2	Resist thickness	Clock
Development time	C	X	30-120 s	2	Resist thickness	
Development bath temperature	C	N	Room temperature			Thermometer
Agitation of the developer	A	X	Spraying, Bath+Agitation/wiping	2	Dev. Time	
FeCl <sub>3</sub> concentration	C	C/N				
Etching time	C	X	4-12min	2	Resist thickness	
Etching temperature	C	N	Room temperature			
Humidity	C	N	40 - 50 %			

16

TAGUCHI L12

