



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Pulssikuparointilinjan toiminta sekä prosessin seurantajärjestelmän suunnittelu ja toteutus

Jeremy Takalo

PROSESSITEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Diplomityö

Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Pulssikuparointilinjan toiminta sekä prosessin seurantajärjestelmän suunnittelu ja toteutus

Jeremy Takalo

Oulun yliopisto, prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2023, 80 s. + 1 Liite

Työn ohjaajat yliopistolla: Prof. Mika Ruusunen, DI Antti Koistinen, Dos. Aki Sorsa

Työn tavoitteena oli Aspocomp Group Oyj:llä sijaitsevan pulssikuparointilinjan nykytilanteen kartoittaminen sekä linjan seurattavuuden parantaminen erilaisten datan hankintaratkaisujen avulla. Ratkaisussa pyrittiin käyttämään menetelmiä, jotka ovat sovellettavissa myös tehtaan muille prosessilinjoille. Työn teoriaosuudessa perehdyttiin monikerrospiirilevyn valmistamisen päävaiheisiin, elektrolyyttiseen pinnoitukseen, sekä erityisesti pulssikuparointilinjan toimintaan. Lisäksi käytiin läpi työn kokeellisessa osuudessa käytettäviä tilastollisia testejä ja datan hankintamenetelmiä.

Kokeellisessa osuudessa tarkasteltiin pulssikuparointilinjan nykytilannetta kerättävän aineiston sekä erilaisten tilastollisten testien avulla. Samalla tutkittiin myös hielaboratoriossa suoritettavien kuparimittausten luotettavuutta. Kokeellisen osuuden loppupuolella pulssikuparointilinjalle suunniteltiin ja toteutettiin pilvipohjainen monitorointijärjestelmä.

Pulssikuparointilinjan aineistossa havaitut ilmiöt olivat teorian mukaisia, mutta huomioitavaa oli aineistossa esiintyvä suuri vaihtelu. Tutkimalla käytettyä mittaussuunnitelmaa sekä erien ja tuotteiden sisäistä vaihtelua, voitiin vaihtelun todeta johtuvan toistaiseksi tuntemattomista olosuhdetekijöistä. Kokeellisen osuuden loppupuolella toteutetut pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmät eivät ole työn kirjoittamisen aikaan vielä täysin valmiita. Tästä huolimatta voidaan todeta niiden tuovan tulevaisuudessa lisää työkaluja datan analysointiin antaen näin mahdollisuuksia linjan vaihteluvälien havainnointiin sekä vaihtelua selittävien tekijöiden löytämiseen.

Asiasanat: monikerrospiirilevy, datan hankinta, pulssikuparointi

ABSTRACT

The operation of pulse plating line and the design and implementation of the process monitoring system

Jeremy Takalo

University of Oulu, Degree Programme of Process Engineering

Master's thesis 2023, 80 pp. + 1 Appendix

Supervisors at the university: Prof. Mika Ruusunen, M.Sc. (Tech.) Antti Koistinen, Doc. Aki Sorsa

The goal of this work was to study the current state of a pulse plating line located at Aspocomp Group Oyj and to utilize different data acquisition methods to improve the process traceability. The data acquisition methods were selected in a way that they are applicable on other process lines as well. The theory part of the work was focused on basics of multilayer circuit board manufacturing, electroplating and especially the pulse plating process. The theory behind used statistical tests and data acquisition methods in the experimental part was also discussed.

In the experimental part the current state of pulse plating process was studied with a collected data set and different statistical methods. Simultaneously the reliability of the used plating thickness measurement method in the cross-sectional laboratory was analysed. In the end of the experimental part a monitoring system for the pulse plating line was planned and implemented.

The observations within the data set were in line with theory, but a notable amount of deviation was noticed. By studying the used measurement method and deviations inside the products and batches it could be stated that the deviation is caused by unknown circumstance factors. At the end of the experimental part a monitoring system for the pulse plating line was implemented. During the end of this work the visualisations of the monitoring system are not quite ready. Despite this it can already be stated that it will bring more tools to data analysis and help improve process traceability.

Keywords: multilayer circuit board, data acquisition, pulse plating

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Aspocomp Group Oyj:n piirilevytehtaalla. Työssä käytiin läpi monikerrospiirilevyn valmistuksen päävaiheet, sekä erityisesti elektrolyyttisen pinnoituksen ja pulssikuparoinnin toimintaa. Tutkimuskohteena olivat pulssikuparointilinjan nykytilanne sekä mahdollisuudet linjan seurannan parantamiseksi erilaisten datan hankintaratkaisuiden avulla.

Kiitän koko Aspocomp Group Oyj:n tehtaan väkeä vuosistani kesätöiden parissa sekä niiden ja diplomityön kirjoittamisen aikana saamistani neuvoista ja avusta. Erityiskiitokset työni ohjauksesta Hannu-Heikki Sirviölle, Antti Koistiselle, Aki Sorsalle sekä Mika Ruususelelle. Lisäksi vielä kiitos Petri Hietaharjulle avusta lähdeluettelon muotoiluissa.

Oulu, 12.4.2023

Jeremy Takalo
Jeremy Takalo

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto	7
2 Monikerrospiirilevyjen valmistus	8
2.1 Sisäkerrosten valmistus	9
2.2 Prässäys	10
2.3 Poraus	11
2.4 Kuparointi.....	12
2.5 Kuviopinnoitus	12
2.6 Loppupinnoitus.....	14
3 Elektrolyyttinen pinnoitus	15
3.1 Haasteita ja käsitteitä.....	16
3.1.1 Potentiaaliero	16
3.1.2 Heittokyky	17
3.1.3 Massansiirto	18
3.2 Pinnoitusliuos	18
4 Pulssikuparointi.....	20
4.1 Pinnoitusmenetelmä	20
4.2 Prosessivaiheet	22
4.3 Prosessin ohjausjärjestelmät.....	26
4.3.1 Ohjelmitava logiikka	27
4.3.2 Tangot	28
4.3.3 Pulssipinnoitus	28
4.3.4 Lämpötila	31
4.4 Pinnoitukseen vaikuttavat tekijät	31
4.4.1 Esikäsittely.....	31
4.4.2 Käytettävät anodit ja niiden välimatka	32
4.4.3 Sekoitusmenetelmät.....	32
4.4.4 Kuparikylvyn konsentraatiot	33
4.4.5 Pulssipinnoitusyksikkö ja aallonmuoto	33
4.4.6 Levyn ominaisuudet.....	34

4.4.7 Muita tekijöitä.....	35
5 Datan hankinta ja analysointi.....	36
5.1 Hypoteesien testaus.....	37
5.1.1 Hypoteesien valinta.....	37
5.1.2 Tilastollisen testin valinta.....	39
5.1.3 Merkitsevyystaso ja riskin määrittäminen.....	39
5.2 Varianssianalyysi.....	40
5.3 Studentin t-testi.....	41
6 Aineiston kerääminen.....	44
6.1 Pulssikuparointilinjalta pinnoitetut tulppareiat.....	44
6.2 Lisämittaukset tuotteesta AD214906.....	46
7 Tulokset ja niiden tarkastelu.....	49
7.1 Aineiston vaihtelu.....	49
7.2 Tuotteen sisäinen vaihtelu.....	52
7.3 Kuparointikylyn konsentraatiot.....	57
7.4 Pinnoitusprofiilit.....	58
7.5 Tulosten luotettavuusanalyysi.....	59
7.6 Datanhankinnan toteutus ja visualisoinnit.....	61
7.6.1 Työssä käytetyt ohjelmistot ja laitteet.....	62
7.6.2 Soveltuvuus selvitys CloudConnect 712:lle.....	66
7.6.3 Pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmä.....	68
7.7 Pohdinta.....	72
8 Johtopäätökset.....	75
9 Yhteenveto.....	76

LÄHDELUETTELO

LIITEET:

Liite 1. Taulukko Aspocomp Group Oyj:n piirilevytehtaalla käytettävät logiikat.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

CVS	Tehokas työkalu orgaanisten lisäaineiden pitoisuuksien seurantaan pinnoituskylvyissä. Lyhenne sanoista Cyclic Voltammetry Stripping.
ETL	Prosessi, jossa tietojärjestelmien dataa siirretään tietokannoista toisiin tietokantoihin. Lyhenne sanoista Extract, Load ja Transform.
IoT	Digitaalisesti toisiinsa liittyvien laitteiden, tietokoneiden, organismien tai ihmisten verkosto, joka mahdollistaa datan siirron ja vaihtamisen internetin välityksellä ilman ihmisten välistä vuorovaikutusta. Lyhenne sanoista Internet of Things (suom. esineiden internet)
\bar{x}	otoskeskiarvo
μ	populaatikeskiarvo
μm	mikrometri

1 JOHDANTO

Piirilevy on elektroniikkatuotteiden perusrakenne. Kuparisten johtimiensa avulla se mahdollistaa tuotteissa käytettävien komponenttien, kuten mikroprosessorien, vastusten ja kondensaattoreiden yhdistämisen toisiinsa. Samalla se toimii niiden kiinnitysalustana muodostaen sähköisesti toimivan virtapiirin.

Elektrolyyttisen pinnoituksen avulla saadaan piirilevyn läpivienteihin riittävä määrä kuparia, jotta levy kestää sille syötetyt virrat. Läpivientien haasteellisen geometrian sekä pinnoittaessa muodostuvien sähkökenttien eroavaisuudet läpiviennin sisällä ja sen ulkopuolella tekevät tasaisen pinnoituksen saavuttamisesta haastavaa. Pulssikuparointi on elektrolyyttinen pinnoitusmenetelmä, joka on kehitetty vastaamaan näihin haasteisiin.

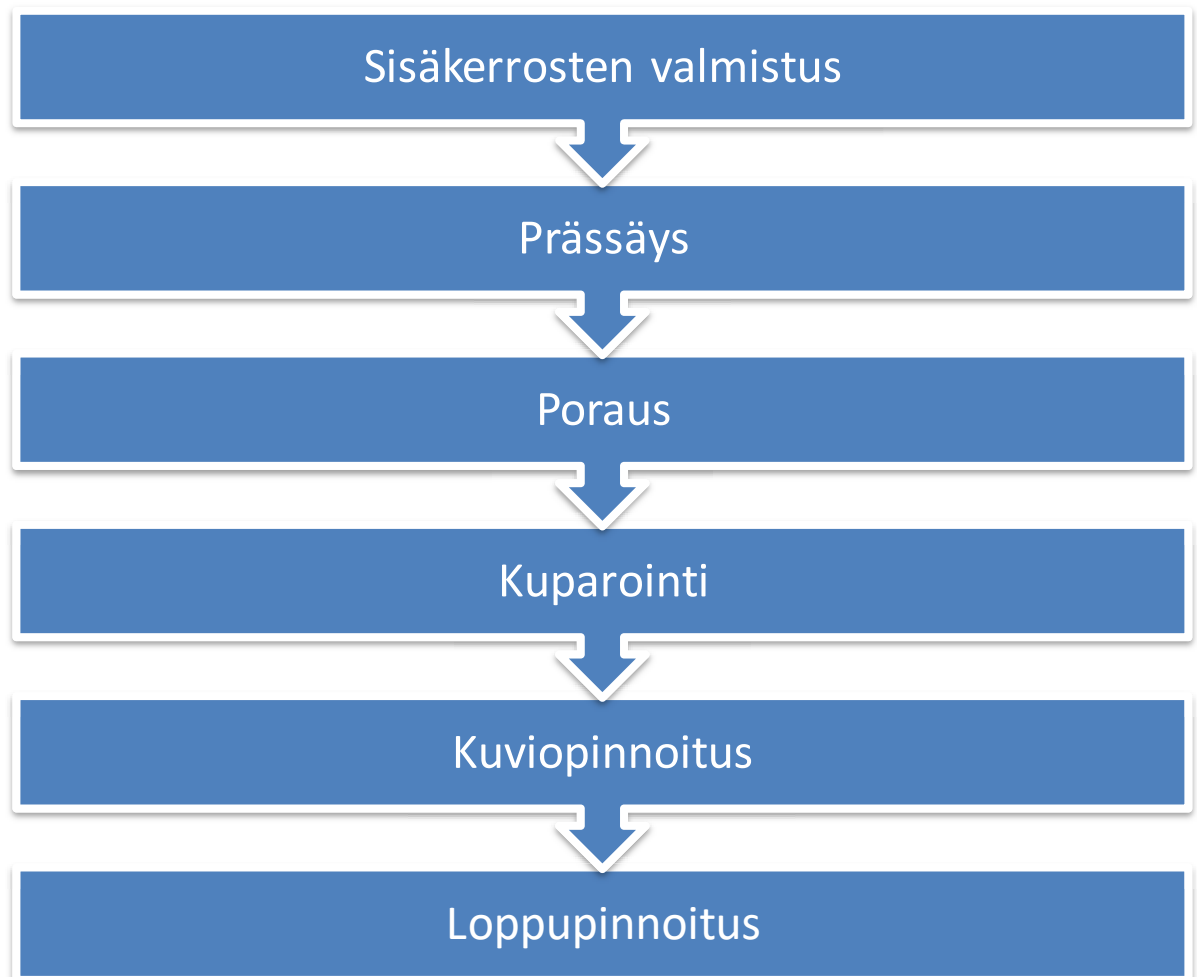
Tuotteiden muuttuessa yhä haastavammiksi ja vaadittavien standardien lisääntyessä kasvaa myös tarve hallita prosesseja entistä tarkemmin. Tilanne, jossa kriittisiä prosessien ajoparametrejä, prosessiolosuhteita ja mittatuloksia syötetään käsin useassa eri sijainnissa oleviin ajopäiväkirjoihin tekee prosessien hallinnasta ja seuraamisesta haastavaa ja työlästä. Erilaisten automaatio- ja datanhankintaratkaisuiden avulla on mahdollista automatisoida nämä ajopäiväkirjat sekä tuoda lisää tarkkailtavia muuttujia prosesseille parantaen hallintaa ja seurattavuutta.

Työn päätavoitteena on Aspocompin Group Oyj:n piirilevytehtaalla sijaitsevan pulssikuparointilinjan nykytilanteen kartoittaminen sekä sen seurattavuuden parantaminen erilaisten datan hankintamenetelmien avulla. Samalla pyritään kuitenkin löytämään ratkaisuja, jotka ovat sovellettavissa myös muille tehtaan prosessilinjoille.

Työn teoriaosuus koostuu monikerrospiirilevyn valmistuksen päävaiheista, elektrolyyttisestä pinnoituksesta, pulssikuparointilinjan toiminnasta, kokeellisessa osuudessa käytettävistä tilastollisista testeistä sekä käytetyistä datan hankintamenetelmistä. Kokeellisessa osuudessa käsitellään puolestaan pulssikuparointilinjan nykytilannetta, datan hankinnan toteutusta sekä kerätylle aineistolle suoritettuja tilastollisia testejä ja analyysiä. Lopuksi käsitellään tulevaisuuden kehityskohteita sekä käydään läpi työn yhteenveto.

2 MONIKERROSPIIRILEVYJEN VALMISTUS

Monikerrospiirilevyjen valmistamiseen kuuluu useita erilaisia prosessivaiheita ja työpolkuja tavoitellusta tuoterakenteesta riippuen. Tästä huolimatta lähes kaikki levyt käyvät läpi samat päävaiheet, joissa monikerrospiirilevyjen pöörä rakenne muodostuu. Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi Aspocomp Group Oyj:llä esiintyvät piirilevyn valmistuksen päävaiheet sekä niiden merkitys toimivan monikerrospiirilevyn valmistamiseksi. Esiteltävät päävaiheet sekä niiden järjestys tuotannossa on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Monikerrospiirilevyjen valmistuksen päävaiheet.

2.1 Sisäkerrosten valmistus

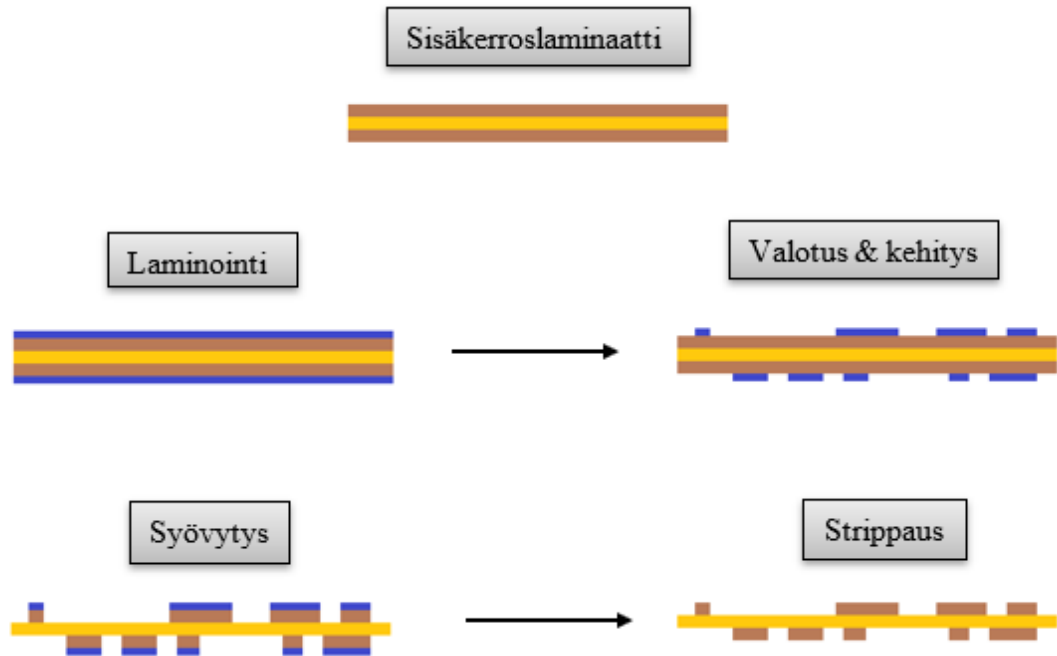
Monikerrospiirilevyn valmistus alkaa valitsemalla haluttu sisäkerroslaminaatti. Sisäkerroslaminaatit koostuvat molemminpuoleisesta kuparipinnasta, joiden välissä on eristekerros. Laminaatit poikkeavat toisistaan kupari- ja eristekerroksen paksuudessa, sekä eristekerroksen materiaaleissa. Eristekerros koostuu epoksihartseista, lasikuidusta, sekä täyteaineista. Eroavaisuudet eristekerroksen koostumuksessa vaikuttavat laminaatin sähköisiin ja termisiin ominaisuuksiin. Kun haluttu sisäkerroslaminaatti on valittu, se viedään kuvionsiirtoon. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

Kuvionsiirto koostuu laminoinnista ja valotuksesta, joissa sisäkerros valmistellaan niin, että asiakkaan haluama kuvio saadaan muodostettua DES-linjalla. Lyhenne DES tulee sanoista kehitys, syövytys ja strippaus (developing, etching, stripping). Laminointiprosessi aloitetaan mikroetsauksella, jonka avulla kuparin pinta saadaan puhtaaksi ja karheaksi. Seuraavaksi sisäkerroslaminaatin kuparipinta laminoidaan kauttaaltaan UV-valoherkällä resistillä. Resistiksi kutsutaan yleisesti pinnoitteita, joiden tehtävänä on suojata kuparialueita syövytykseltä. Aiemmin suoritettu mikroetsaus lisää adheesiota kuparipinnan ja resistin välillä. Laminoinnin jälkeen sisäkerroslaminaatti viedään valotettavaksi. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

Valotuksessa asiakkaan haluama kuvio siirretään sisäkerroslaminaatin pintaan. Valotuksen toiminta perustuu resistien reaktioon valolle altistaessa; valotettu alue polymerisoituu ja kovettuu, jolloin se ei liukene myöhemmässä syövytysvaiheessa. Resistien valotus tapahtuu lasersuoravalottimella (engl. laser direct imaging, LDI). Valotuksen jälkeen levyt siirtyvät kehitykseen, jonka avulla levyn pinnalta saadaan poistettua kovettumaton resisti. Näin ollen pinnalle jää enää toivottu resistikuvio, joka suojaa kuparipintaa syövytykseltä. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

Seuraavana vuorossa on syövytysvaihe. Resistillä suojaamaton kupari syövytetään pois ja jäljelle jää ainoastaan toivottu johdinkuvio, jonka päällä on yhä resisti. Resisti poistetaan DES-linjan viimeisessä vaiheessa, eli strippauksessa. Lopuksi levyihin porataan prässäyksessä tarvittavat kohdistusreiät. DES-linjalta levyt viedään optiseen tarkastukseen, jossa varmistetaan siitä, että levyssä ei ole virheitä. Tämän jälkeen piirikuvioellinen sisäkerroslevy on valmis. Kuvassa 2 nähdään sisäkerroslaminaatin

valmistuminen valmiiksi sisäkerroslevyksi esiteltyjen vaiheiden mukaisesti. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)



Kuva 2. Sisäkerrosten valmistusvaiheet (mukaillen Sirviö 2014).

2.2 Prässäys

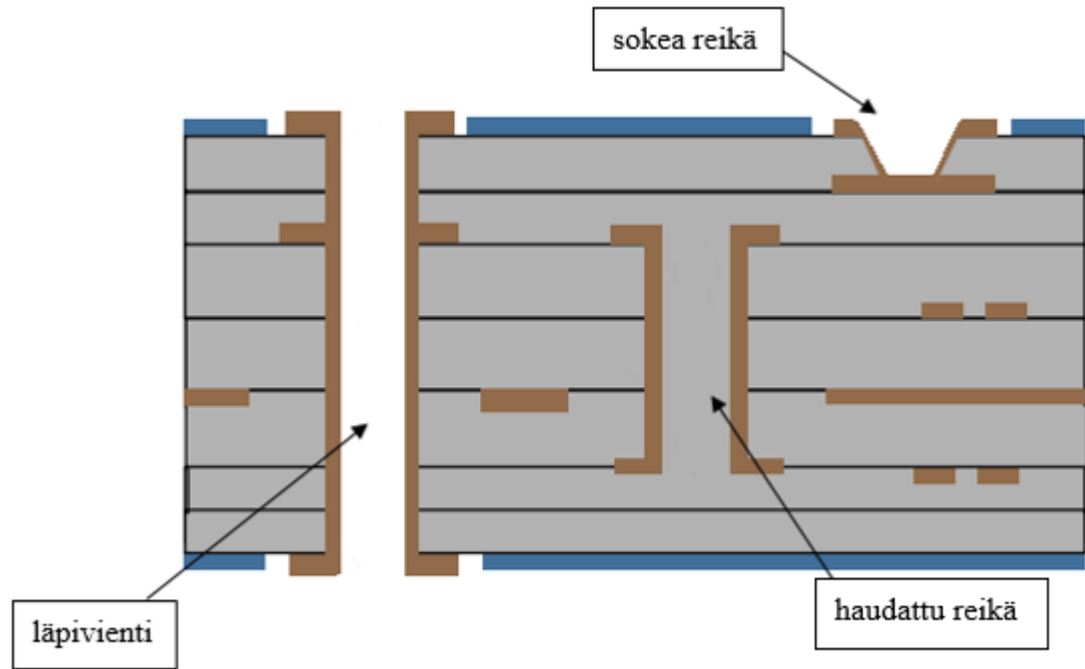
Prässäykseen saapuvat sisäkerroslevyt tulee ensimmäiseksi oksitoida. Oksidointi estää kuparin hapettumisen sekä muodostaa kupariin karheen pinnan parantaen kerrosten välistä sidoslujuutta. Tämä ehkäisee delaminoitumista, joka on ilmiö, jossa kerrokset irtoavat toisistaan valmistuksen jälkeen. Prässäyksessä liitetään yhteen valmiit sisä- ja välikerroslevyt sekä jokaisen kerroksen väliin asetettavat prepreg-kalvot. Aspocomp Group Oyjllä käytetään tyhjiöavusteista hydraulista vakuumpressiä, johon kerroslevyt pinotaan päällekkäin ja prässätään yhteen. Korkean lämpötilan ja paineen vaikutuksesta eristeenä toimivat prepreg-kalvot sulavat kerrosten väliin liittäen ne yhteen. Tämän jälkeen voidaan alkaa jo puhua monikerroslevystä. Prepreg-kalvot ovat koostumukseltaan samankaltaisia kuin sisäkerroslaminaattien eristekerros. Jotta eri kerrosten piirikuvioinnit osuisivat kohdakkain, prässäyksessä hyödynnetään aiemmin porattuja kohdistusreikiä. Ulommaiseksi levyksi asetetaan yleensä kuparikalvo, josta muodostuu eri prosessivaiheiden jälkeen piirilevyn ulkopinta. Jäähdyttyään

monikerrospiirilevyt ovat valmiita vietäväksi seuraavaan prosessivaiheeseen. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

2.3 Poraus

Porauksessa tehdään erilaisia läpivientejä monikerrospiirilevyille, jotka mahdollistavat sähköisten liitännöiden muodostamisen eri kerrosten välille myöhempien prosessivaiheiden avulla. Samalla luodaan paikkoja asiakkaiden komponenttiliitoksille. Ensimmäinen vaihe on niputusreikien poraus. Kuvionsiirrossa muodostetut sisäkerrosmerkit luetaan röntgenporakoneen avulla, jolloin poraus saadaan kohdistettua mahdollisimman tarkasti. Monikerroslevyt niputetaan päällekkäin hyödyntäen niputustappeja. Levyjen määrä nipussa vaihtelee levyjen paksuuden ja käytettävän poranterän halkaisijan koon mukaan. Alle asetetaan aluskate, jonka tehtävänä on suojata poralaitteistoa sekä porattavia levyjä ja minimoida porauslämpötiloja. Vastaavasti päälle asetetaan päällyskate, joka vähentää poranterien katkeamista sekä syntyvien säleiden määrää, keskittää terän ja parantaa reiän laatua. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

Porauksen onnistuminen ja siinä muodostuvien reikien laatu ovat tärkeitä tekijöitä monikerrospiirilevyjen valmistuksessa. Monia muuttujia, kuten käytettäviä teriä sekä terien pyörimis-, ja syöttönopeuksia on harkittava tarkkaan parhaan tuloksen saavuttamiseksi. Tätä varten on usein suoritettava erilaisia poraustestejä. Porauslaitteisto toimii numeerisesti ja lukee reikien paikat xy -koordinaatistosta. Erilaisia monikerrospiirilevyn läpivientejä on esitetty kuvassa 3. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)



Kuva 3. Erilaisia monikerrospiirilevyn läpivientejä (mukaillen Sirviö 2014).

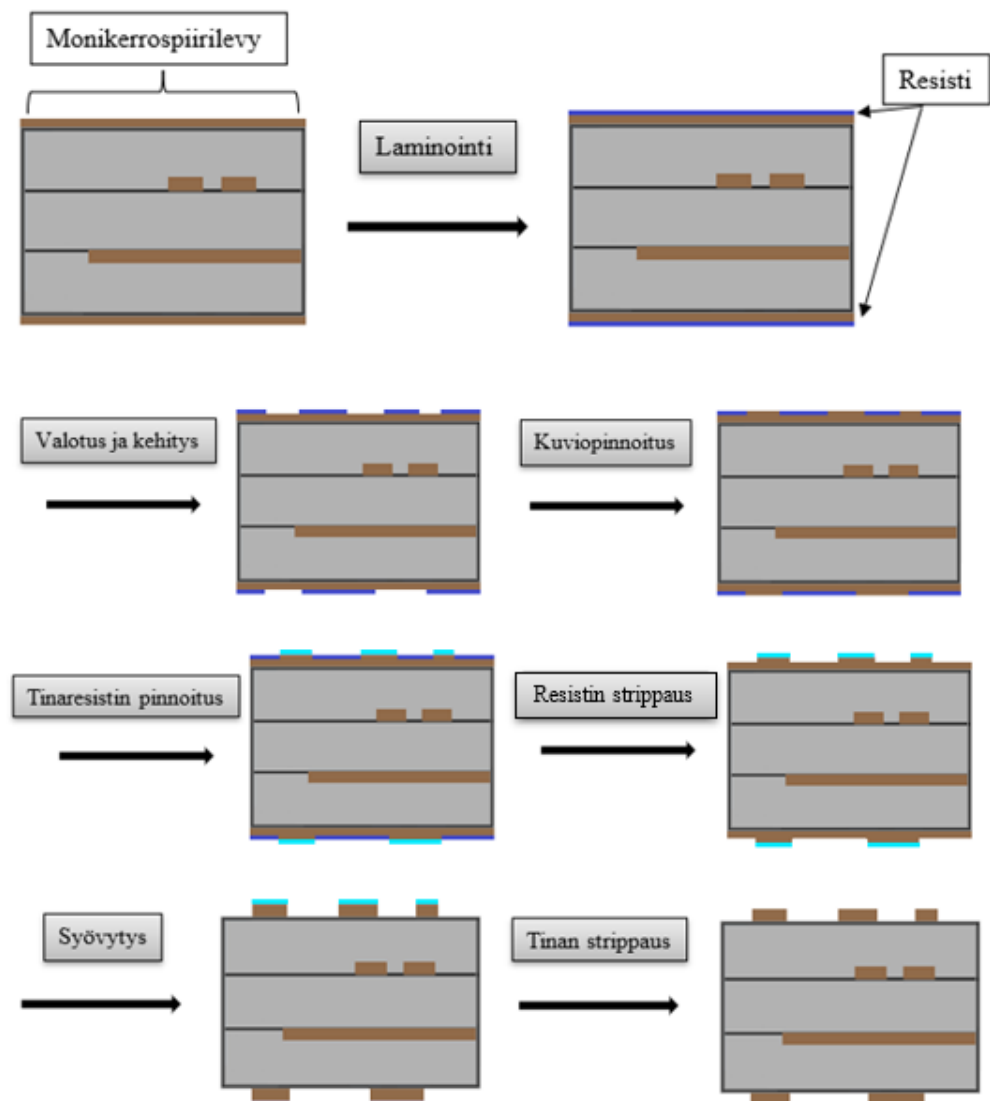
2.4 Kuparointi

Kuparoinnissa kasvatetaan ohut kerros kuparia porattujen reikien pintaan, jotta poratuista läpivienneistä ja muista rei'istä saadaan johtavia. Yleisimmin käytetty prosessi on kemiallinen kuparointi. Prosessin esikäsitteilyyn kuuluu erilaisia puhdistus- ja mikroetsausvaiheita, joissa levyjen pinta saadaan puhtaaksi ja vastaanottavaiseksi tina-palladium -katalyytille. Kun levyjen ei-konduktiivisille pinnoille on saatu ohut kerros katalyyttistä metallia, levyt ajetaan emäksisen liuoksen läpi, jossa ohut kerros kuparia pelkistyy reikien ja läpivientien seinämille. Kemiallisen kuparoinnin jälkeen pinnoitteen paksuus ei ole vielä riittävä ja kuparia onkin kasvatettava reikiin lisää elektrolyttisesti. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

2.5 Kuviopinnoitus

Kemiallisen kuparoinnin jälkeen on ulkokerrosten piirikuvioinnit valmisteltava ennen pinnoitusta. Kuviopinnoitettavat levyt kulkevat läpi vastaavan kuvionsiirron kuin sisäkerrosten valmistuksessa. Poiketen sisäkerrosten valmistuksesta, resisti kehitetään

auki niistä kohdin, johon kuparin halutaan jäävän. Auki kehityville alueille kasvatetaan tuotteen vaatima määrä kuparia elektrolyyttisen pinnoituksen avulla. Pinnoitus tapahtuu kuparikylvyssä, johon syötetään sähkövirtaa. Pinnoitettava paneeli asetetaan linjalle, jolloin se toimii katodina. Kun virta kytketään päälle, kuparikylvyn kupari-ionit pelkistyvät levyn johtaville pinnoille. Vastaavasti anodien kupari-ionit liukenevat elektrolyyttiin. Elektrolyyttisestä pinnoituksesta on kerrottu lisää luvussa 3. Linjan lopuksi johdinkuvio pinnoitetaan vielä tinaresistillä, joka toimii ulkokerrossyövytyksen syövytysresistinä. Syövytyksen jälkeen tina stripataan johdinkuvion päältä ja monikerroslevyn ulkopinnan johdinkuvio on valmis. Ulkokerroksen piirikuvioinnin valmistusta esitetään vaiheittain kuvassa 4. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)



Kuva 4. Ulomman piirikuvioinnin muodostus kuvioinnoituksen avulla (mukaien Sirviö 2014).

2.6 Loppupinnoitus

Viimeinen kemiallinen prosessi monikerrospiirilevyn valmistuksessa on loppupinnoitus. Sen tehtävänä on suojata yhä vapaita kuparipintoja hapettumiselta. Tämä on tärkeää, sillä hapettunutta kuparipintaa ei voida juottaa. Piirilevyille on saatavilla useita eri loppupinnoitteita, joiden käyttöä rajaa tuotteen käyttökohteen lisäksi sen tuoterakenne. Pinnoitetta valittaessa on myös otettava huomioon useita erilaisia sähköisiä-, ympäristöllisiä-, ja kestävyysvaatimuksia. Mikään yksittäinen loppupinnoite ei voi täyttää kaikkia vaatimuksia ja usein onkin tehtävä kompromisseja eri vaihtoehtojen väliltä. Käytettävät prosessit vaihtelevat hieman pinnoitteen mukaan, mutta yleisesti paneelit kastetaan kemialliseen kylpyyn, jossa vapaat kuparipinnat pinnoittuvat halutulla pinnoitteella. Aspocomp Group Oyjllä on loppupinnoitevaihtoehtoina ENIG (Electroless nickel immersion gold), OSP (Organic solderability preservative) sekä immersiotina ja -hopea. Näistä yleisimmin käytössä on immersiotina. (Coombs 2008; Aspocomp Group Oyj 2022)

3 ELEKTROLYTTINEN PINNOITUS

Elektrolyttisessä pinnoituksessa kasvatetaan galvaanisesti kuparia levyn reikiin ja pintaan. Levy upotetaan metalli-ioneita sisältävään pinnoitusliuokseen ja varataan negatiivisesti kytkemällä se pinnoituskehikkoon, jolloin se toimii katodina. Kun sähkövirtaa johdetaan liuoksen läpi, positiivisesti varautuneet kupari-ionit kulkeutuvat vapaille pinnoille ja pelkistyvät. Pinnoituksen paksuus riippuu jännitteestä ja ajasta. Se voidaan ilmaista Faradayn lailla: (Coombs 2008)

$$W = \frac{ItM}{nF}, \quad (1)$$

missä W on pinnoitettavan metallin määrä [g],

I on sähkövirta [A],

t on aika [s],

M on metallin moolimassa [g/mol],

n on elektronien määrä, jotka osallistuvat metalli-ionin pelkistymiseen ja

F on Faradayn vakio 96485,3383 [C/mol].

Ennen elektrolyttistä pinnoitusta läpivienneistä tulee tehdä johtavia kemiallisen kuparoinnin avulla. Elektrolyttisessä pinnoituksessa saadaan levyille riittävä määrä kuparia, jotta levy kestää sille syötetyt virrat. Näin ollen se onkin tärkeimpiä prosessivaiheita piirilevyjen valmistuksessa. Elektrolyttisen pinnoituksen avulla tehdään paneeli- ja kuviopinnoitusta. Paneelipinnoituksessa pinnoitetaan koko aihio ja kuviopinnoituksessa ainoastaan lopullisen piirilevyn johdinkuviot. Tässä työssä keskitytään tarkemmin pulssikuparointilinjaan, josta kerrotaan luvussa 4. Prosessin onnistumisen kannalta on tarkkailtava muodostuneen pinnoitteen paksuuden lisäksi myös laatua, joka vaikuttaa lopputuotteen sähköisiin ja termisiin ominaisuuksiin. (Coombs 2008; Zhang et al. 2021)

3.1 Haasteita ja käsitteitä

Piirilevyjen vaatimusten kehittyessä eteenpäin, pinnoitusprosesseista on tullut yhä tärkeämpi vaihe valmistusprosessia. Korkeammat tiheys- ja integraatiovaatimukset sekä erityisesti HDI-piirilevyt (high density interconnect) muodostavat haasteita elektrolyyttiseen pinnoitukseen. Läpivientejä pinnoitettaessa esimerkiksi konvektio- ja sähkökentät poikkeavat suuresti läpivientien sisällä ja levyn pinnalla. Lisäksi kehityksen myötä tulisi saavuttaa yhä suurempi johdinpinta-ala, jolloin läpivientien halkaisijoita tulisi pienentää entisestään. Levyn muotosuhde (engl. aspect ratio) lasketaan jakamalla levyn paksuus läpiviennin halkaisijalla. Vaaditun kuparin paksuuden tasainen pinnoitus levyn pinnalle ja reikien sisälle niin, ettei levyn pinta ylipinnoitu, on suurimpia haasteita korkean muotosuhteen omaavien levyjen tuotannossa. (Kenny et al. 2005 ; Zhang et al. 2021)

3.1.1 Potentiaaliero

Läpivientejä pinnoitettaessa potentiaaliero pinnan ja reiän välillä on usein huomattava johtuen siitä, että välimatka pinnan ja anodin välillä on pienempi, kuin reiän ja anodin. Samalla myös kemiallisen kuparoinnin avulla muodostettu pinnoite on usein paksumpi levyn pinnalla kuin läpiviennin sisällä. Potentiaaliero pinnan ja läpiviennin välillä voidaan kuvata yhtälöllä: (Zhang et al. 2021)

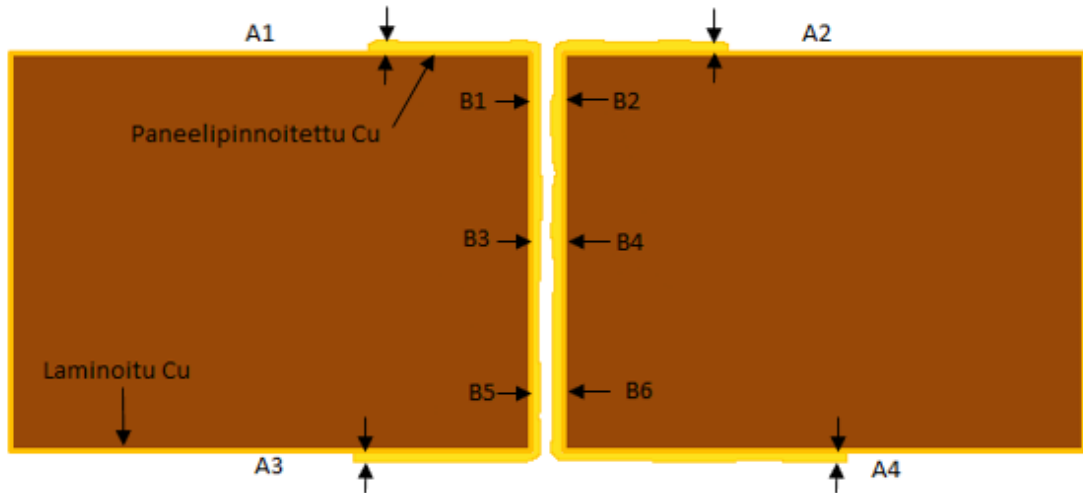
$$E_{ir} = \frac{JL^2}{2kD}, \quad (2)$$

missä E_{ir} on potentiaaliero pinnan ja läpiviennin välillä,
 J on keskimääräinen virrantiheys [A/dm^2],
 L on levyn paksuus,
 k on pinnoitusliuoksen johtokyky ja
 D on läpiviennin halkaisija.

Yhtälöstä 2 nähdään, että potentiaaliero pinnan ja läpiviennin välillä kasvaa muotosuhteen ja virran tiheyden noustessa vaikeuttaen näin korkean muotosuhteen levyjen pinnoittamista. (Zhang et al. 2021; Yung et. al 2014)

3.1.2 Heittokyky

Saavutetun pinnoituksen tasaisuutta arvioidaan usein heittokyvyn (engl. throwing power, TP) avulla. Kuvassa 5 esitetään heittokyvyn laskemiseen tarvittavia kuparipinnoitteen paksuuksia läpiviennin sisältä sekä levyn pinnoilta.



Kuva 5. Poikkileikkauskuva läpiviennistä, josta on nähtävissä throwin powerin laskemiseen tarvittavat kuparin paksuuslukemat (mukailten Huang et al. 2019).

Heittokyky lasketaan kuvan 5 merkintöjä käyttäen kaavalla 3. Ideaalitulanteessa heittokyky on 100 %, jolloin sekä läpiviennin sisällä että levyn pinnalla on pinnoittunee yhtä paljon kuparia:

$$\text{Heittokyky} = \frac{(B1+B2+B3+B4+B5+B6) \div 6}{(A1+A2+A3+A4) \div 4} \times 100 \% \quad (3)$$

Mikäli kuparipinnoitteen paksuuksia ei ole saatavissa levyn pinnoilta, voidaan saavutettua heittokykyä arvioida myös läpiviennin sisältä saatujen mittauksien avulla kaavan 4 mukaisesti. Tällöin heittokyky kuvaa ainoastaan sitä, kuinka tasainen pinnoitus on saavutettu läpiviennin sisällä:

$$\text{Heittokyky} = \frac{(B3 + B4) \times 2}{(B1 + B2 + B5 + B6)} \times 100 \% \quad (4)$$

3.1.3 Massansiirto

Hyvä massansiirto edellyttää sitä, että prosessikemikaalit virtaavat ja vaihtuvat tasaisesti läpi kaikkien levyn pintojen. Huono massansiirto esikäsittelyn aikana saattaa johtaa esimerkiksi epäpuhtauksien jäämiseen levyjen pinnoille. Tämä aiheuttaa kontaminaatiota prosessialtaissa, heikkoa kuparin adheesiota ja pinnoituksen laadun sekä tasaisuuden heikkenemistä. Vastaavasti huono massansiirto pinnoituksen aikana johtaa heikkoon heittokykyyn. Lisäksi johtuen korkean muotosuhteen levyjen haastavasta geometriasta, hyvän massansiirron saavuttaminen reiän sisällä on pintaa haastavampaa. Tehokas massansiirto onkin olennaista prosessin luotettavuuden ja toistettavuuden kannalta. Massansiirtoa on mahdollista tehostaa lisäämällä prosessiin täryjä ja erilaisia agitaatioita. Esimerkiksi ilma-agitaatiossa prosessialtaaseen puhalletaan ilmaa, joka tehostaa kemioden vaihtumista levyn pinnoilla ja reikien sisällä. Vastaavasti täryt liikuttavat aihiota itsessään mekaanisesti, mikä myös tehostaa massansiirtoa. Ilma-agitaatiosta ja muista massansiirtoa tehostavista menetelmistä kerrotaan lisää kappaleessa 4.4.3. (Kenny et al. 2005; Chandrasekar & Pushpavanam 2008)

3.2 Pinnoitusliuos

Elektrolyyttisessä pinnoituksessa käytettävät pinnoitusliuokset ovat nykypäivänä yleensä happamia. Pinnoitusliuokset koostuvat useasta eri komponentista, joiden halutut konsentraatiot vaihtelevat käytössä olevien prosessien mukaan. Jokaisella komponentilla on oma tehtävänsä tasaisen ja laadukkaan pinnoitteen aikaansaamiseksi, jotka on kuvattu alla:

- Kuparisulfaatti (CuSO_4) on lähde pinnoittuville kupari-ioneille. Sen pitoisuus liuoksessa kasvaa prosessin edetessä, kun anodi syöpyy. Liian vähäinen kuparisulfaatin määrä liuoksessa aiheuttaa pinnoitteen palamista, kun taas liiallinen määrä aiheuttaa pinnoitteen karhiintumista ja heittokyvyn putoamista.
- Rikkihappo (H_2SO_4) parantaa liuoksen johtokykyä, mikä mahdollistaa suuren sähkövirran saavuttamisen matalilla jännitteillä. Matala rikkihapon konsentraatio aiheuttaa heittokyvyn heikentymistä, kun taas korkea konsentraatio hidastaa pinnoittumisnopeutta.

- Kloridi-ioni (Cl⁻) on välttämätön osa pinnoitusprosessia. Yleensä sitä lisätään liuokseen natriumkloridina (NaCl) tai vetykloridina (HCl). Anodin pintaan imeytyneet kloridi-ionit reagoivat Cu⁺-ionien kanssa ja kasvattavat anodien polarisaatiota sekä kiihdyttävät hapetusreaktiota. Ylä- ja alarajojen ulkopuolella pinnoitteesta muodostuu juovainen ja karkea. Lisäksi liialliset pitoisuudet aiheuttavat anodien polarisoitumista, joka johtaa pinnoittumisen keskeytymiseen. (Coombs 2008; Zhang et al. 2021)

Pinnoitusliuoksissa käytettävät lisäaineet ovat tärkeä osa pinnoitusliuosta ja ne jaetaan rakenteensa sekä toimintansa perusteella yleensä kolmeen kategoriaan: inhibiittorit, kiihdyttäjät ja tasoituskomponentit. Käytettäviä lisäaineita on useita erilaisia ja ne on suunniteltu käytettäväksi tietyssä pinnoitusprosessissa. Lisäaineet absorboituvat katodin pintaan muuttaen sähkökenttien jakaumaa levyn pinnoilla, vähentäen katodille saapuvien metalli-ionien määrää ja pelkistymisnopeutta ja näin ollen parantaen myös katodin polarisaatiota ja pinnoitteen laatua. Konsentraatiot ovat tarkkaan harkittuja, jotta lisäaineet voivat yhdessä toimiessaan taata parhaan mahdollisen lopputuloksen. Väärät lisäainekonsentraatiot aiheuttavat pinnoitteen palamista ja halkeilua. Lisäaineet poikkeavat toisistaan rakenteeltaan ja toiminnaltaan seuraavalla tavalla:

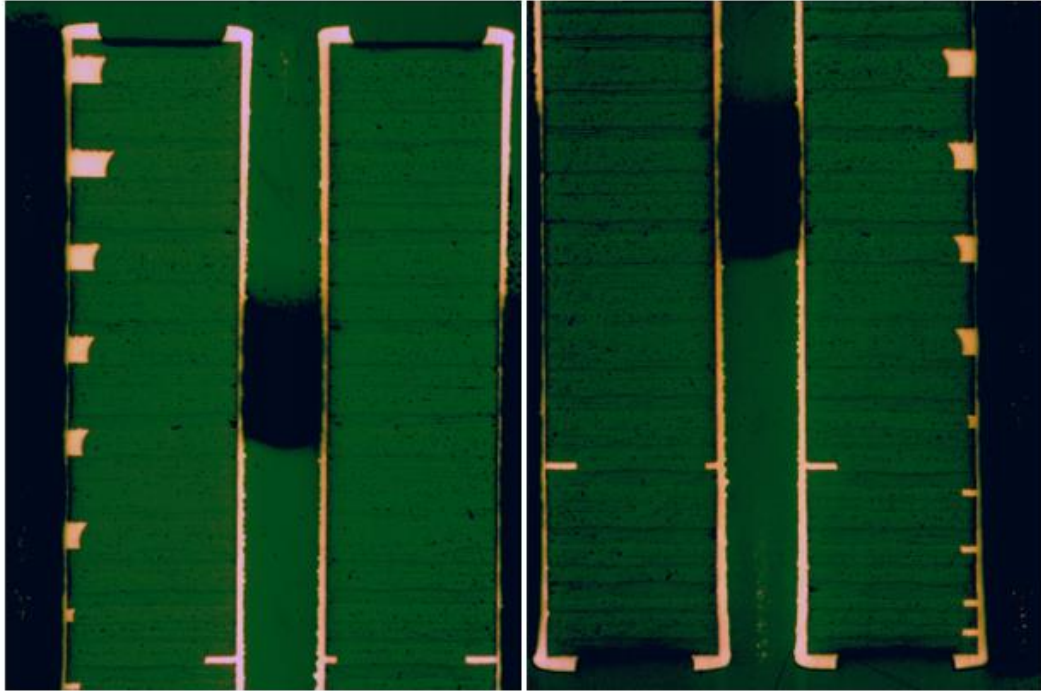
- Kiihdyttäjät ovat yleensä pieniä molekyylisiä orgaanisia sulfideja ja niiden johdannaisia. Monimutkaisten kemiallisten reaktioiden avulla ne nostavat pinnoitteen johtokykyä ja pienentävät vaimennusta.
- Inhibiittoreiksi kutsutaan aineita, jotka hidastavat kemiallisia reaktioita. Ne ovat molekyylimassaltaan raskaita yhdisteitä, jotka absorboituvat katodin pintaan parantaen katodin polarisaatiota ja hidastaen Cu²⁺-ionien pinnoittumista. Tämä vaikuttaa pinnoitteen laatuun pienentäen jyvää.
- Tasoituskomponentit ovat tyypillisesti typpipitoisia heterosyklisiä yhdisteitä. Ne absorboituvat korkean virtatiheyden omaaville alueille negatiivisella varauksella hidastaen pinnoittumista paikallisesti. Tällöin matalamman virtatiheyden alueet pystyvät saavuttamaan saman pinnoittumisnopeuden. (Coombs 2008; Zhang et al. 2021)

4 PULSSIKUPAROINTI

Perinteisillä elektrolyyttisillä pinnoitusmenetelmillä, jotka käyttävät tasavirtaa, ei saavuteta haastavimpien levyjen vaatimaa heittokykyä. Tämän vuoksi on kehitetty pulssipinnoitusmenetelmä, joka on nykypäivänä yksi parhaista menetelmistä korkeiden muotosuhde-levyjen pinnoittamisessa. Paremman heittokyvyn lisäksi pulssipinnoituksen avulla on mahdollista vähentää anodien ja lisäaineiden kulutusta, sekä käyttää korkeampaa virtatiheyttä polttamatta levyä. Näin ollen on mahdollista säästää pinnoitusajassa ja parantaa tuotantotehoa. Tässä kappaleessa kerrotaan pulssikuparoinnin pinnoitusmenetelmästä, Aspocomp Group Oyj:n tehtaalla esiintyvistä prosessivaiheista ja -ohjauksista sekä pinnoitukseen vaikuttavista tekijöistä. (Zhang et al. 2021; Coombs 2008)

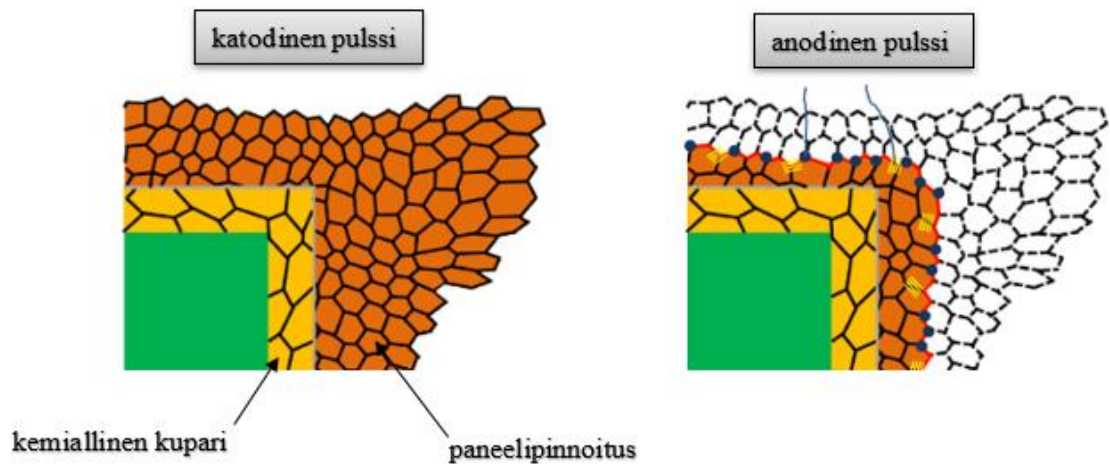
4.1 Pinnoitusmenetelmä

Pulssikuparoinnissa tasavirtaisissa pinnoitusmenetelmissä käytetty tasasuuntaaja korvataan pulssivirtalähteellä, joka pystyy tuottamaan anodisia ja katodisia virtoja. Anodisten pulssien avulla on mahdollista irrottaa korkeiden virtatiheyksien alueille muodostuvaa kuparia. Näin voidaan minimoida esimerkiksi ilmiötä jossa kuparia pinnoittuu enemmän läpivientien sisään- ja ulostulon alueille, kuin läpivientien keskelle. Tällainen ilmiö korostuu erityisesti korkean muotosuhteen levyissä, joka on nähtävissä kuvassa 6. (Huang et al. 2019)



Kuva 6. Poikkileikkauskuva, jossa kuparia on pinnoittunut vähemmän läpiviennin keskelle. Vasemmalle poikkileikkauksen yläosa ja oikealla poikkileikkauksen alaosa. Kuvan levyn muotosuhde on 10 (Aspocomp Group Oyj 2022).

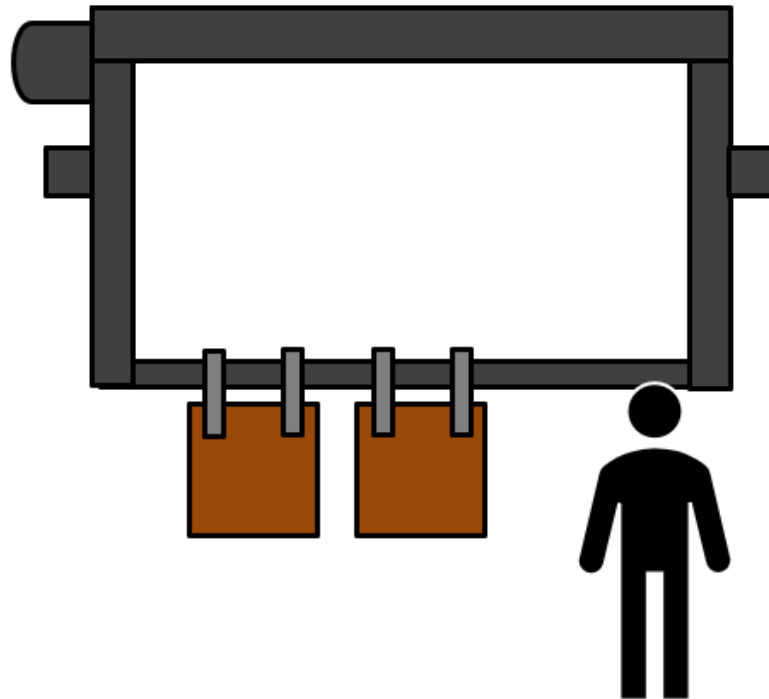
Pulssivirtalähde tuottaa pulssiaallon eteenpäin suuntautuvalla katodisella virralla, jota häiritsevät lyhyet ja voimakkaat anodiset pulssit. Pulssipinnoituksessa tarkkaan valitut kuparointikylvyn komponentit edesauttavat kupari-ionien irtautumista korkean virtatiheyden alueilta vastapulssin aikana. Ilmiö on esitetty kuvassa 7. Vastaavasti alhaisen virtatiheyden alueet saavat pienemmän vastapulssin, jolloin pinnoittuminen rajoittuu vähemmän vastapulssien aikana kuin korkean virtatiheyden alueilla. Näin ollen on mahdollista nähdä huomattavia parannuksia heittokyvyssä ja pinnoituksen tasaisuudessa. Parhaat tulokset saavutetaan neliön muotoisella aallolla ja minimaalisella virran nousuajalla. Tyypillisesti anodinen pulssi on huomattavasti lyhyempi ja voimakkaampi. (Zhang et al. 2021; Coombs 2008)



Kuva 7. Anodisen pulssin avulla pinnoitusta saadaan rajattua korkean virrantiheyden alueilta (mukaiillen Huang et al. 2019).

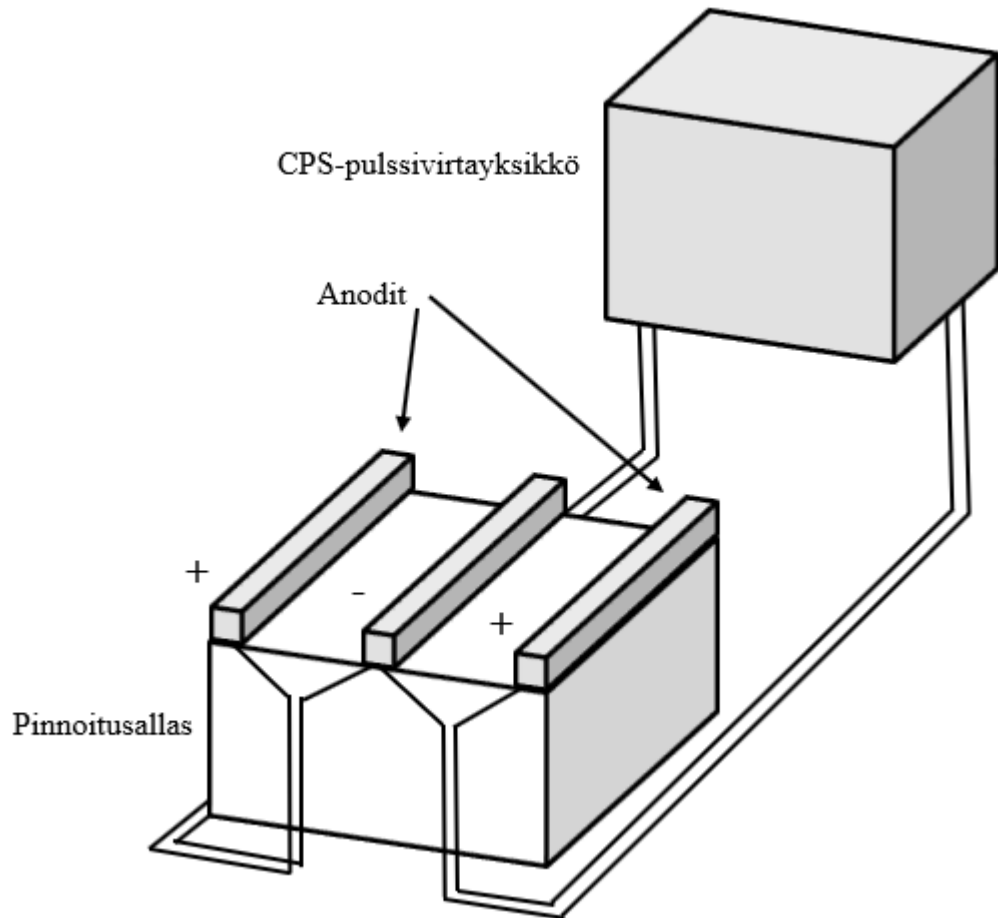
4.2 Prosessivaiheet

Aspocomp Group Oyj:llä käytössä olevan pulssipinnoituslinjan pääraakenne koostuu yhteensä 28 altaasta sekä levyjen kuljettimesta. Altaisiin kuuluu useita eri esikäsitely- ja puhdistusvaiheita, sekä pinnoitusaltaat kuparin ja tinan pinnoittamiseen. Linjalle saavuttuaan levyt kiinnitetään tuotantotankoihin ”näppien” avulla. Levynkuljetin siirtää levyt prosessivaiheesta ja altaasta toiseen annetun ohjelman mukaisesti. Linjalla pyritään ajamaan aina täysiä tuotantotankoja. Levynkuljetin on esitetty kuvassa 8. (Aspocomp Group Oyj 2022)



Kuva 8. Operaattori kiinnittää pinnoitettavaksi saapuvat levyt pinnoitustankoon (mukaiillen CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005).

CPS-pulssivirtayksikkö (lyhenne valmistajan nimestä Chemring Plating Systems) on tietokone ohjattu virtalähde, joka on suunniteltu käytettäväksi pinnoitusprosesseissa. Sen avulla voidaan muodostaa prosessin vaatimia anodisia ja katodisia virtoja. Jokainen linjalla käytetty yksikkö on vesijäähdytteinen ja sisältää upotetun ohjausmoduulin (ECM, Embedded Control Module), jonka avulla voidaan ohjata pinnoitusta. CPS-yksiköt sijaitsevat jokaisen pinnoitusaltaan yhdeydessä. Pulssivirtayksikön sekä käytettävien anodioiden sijainti suhteessa pinnoitusaltaaseen on esitettyä kuvassa 9. (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005)



Kuva 9. CPS Pulssipinnoitusyksikkö ja anodeina käytettävien kuparikuulien sijainti (mukaillen CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005).

Aspocomp Group Oyj:llä käytössä oleva pulssikuparointilinja koostuu seuraavista taulukon 1 mukaisista prosessivaiheista. Taulukossa esiintyvä ORS-huhtelu on lyhenne sanoista Optimised Rinse System. Paneelipinnoitusta tehdessä levyihin ei ajeta tinapinnoitetta päälle.

Taulukko 1. Aspocompin piirilevytehtaalla sijaitsevan pulssikuparointilinjan prosessivaiheet.

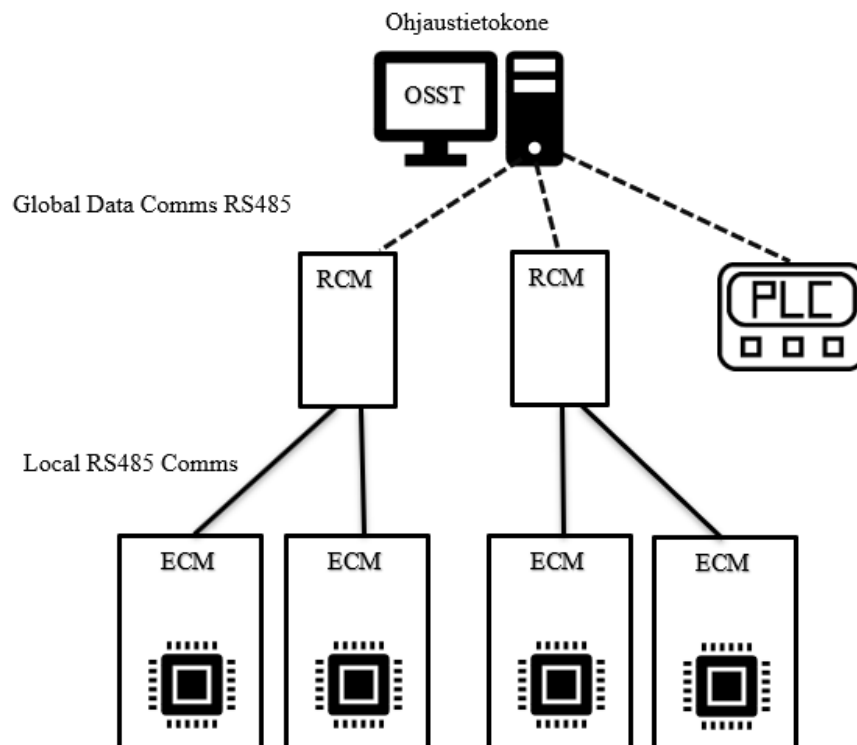
Vaihe	Toiminto
Lastaaminen	Levyjen lastaaminen linjalle. Levyt kiinnitetään tuotantotanko ihin ”näppien” avulla, jotka kuljettavat levyt linjan läpi. Linjalla pyritään ajamaan aina täysiiä tuotantotankoja.
Rasvanpoisto	Levyjen puhdistus. Jos levyt ovat epäpuhtaita, jää pinnoitettavan kuparin adheesio heikoksi.
ORS-huuhtelu	Puhdistuskemikaalijäämien poisto. Mikäli kemikaaleja jää levyille, aiheuttaa se kylpyjen saastumista myöhemmissä vaiheissa.
Huuhtelu	Puhdistuskemikaalijäämien poisto. Mikäli kemikaaleja jää levyille, aiheuttaa se kylpyjen saastumista myöhemmissä vaiheissa.
Mikroetsaus	Oksidien poisto kuparipinnoilta. Oksidit heikentävät kuparin adheesiota.
ORS-huuhtelu	Mikroetsi jäämien poisto. Epäonnistuessaan saastuttaa myöhempiä kylpyjä ja aiheuttaa heikkoa adheesiota.
Rikkihappokasto	Oksidien poisto kuparipinnoilta. Mikäli levyn pinta on hapettunut pinnoittaessa, on kuparin adheesio paikoittain heikko ja pinnoituksesta tulee epätasainen.
Kuparipinnoitus	Halutun kupari määrän pinnoittaminen pulssivirralla. Kuparia tulee olla sekä pinnoilla että rei'issä riittävästi. Samalla on vältettävä ylipinnoittumista ja levyn palamista.
ORS-huuhtelu	Kuparikylpy jäämien poisto. Jäämät aiheuttavat saastumista ja heikentävät tinapinnoitusta.
Rikkihappokasto	Oksidien poisto levyiltä parantaa tinapinnoitetta.
Tinapinnoitus	Halutun kuvion suojaaminen etsaukselta tinaresistin avulla.
ORS huuhtelu	Tinakylpy jäämien poisto. Heikko huuhtelu aiheuttaa hapettumisen.
Huuhtelu	Tinakylpyjäämien poisto
Kuivaus	Paneelin kuivaaminen. Märäksi jäänyt paneeli hapettuu.
Levyjen poisto linjalta	-

4.3 Prosessin ohjausjärjestelmät

Pulssikuparointilinjan ohjauksesta vastaa pääasiassa ohjaustietokoneelle asennettu OSST -ohjausjärjestelmä. OSST (Ordering System for Surface Treatment) on kehitetty pintakäsittelylinjojen ja niiden sivulaitteiden ohjaamiseen. Aspocomp Group Oyj:llä on myös käytössä operaattoreille suunnattu käyttöliittymä OSSTjWin, jonka avulla ohjaustietokoneelta voidaan seurata linjan toimintoja visuaalisesti. Ohjausjärjestelmät voidaan jakaa edelleen kolmeen osaan:

1. Tankojen ohjausjärjestelmä
2. Pulssipinnoituksen ohjausjärjestelmä
3. Lämpötilan ohjausjärjestelmä.

Tässä kappaleessa käydään läpi näiden järjestelmien toimintaperiaatteita. Lisäksi kerrotaan linjan ohjauksessa käytettävän PLC:n toiminnasta. Kuvassa 10 on esitetty pulssikuparointilinjan ohjausjärjestelmien arkkitehtuuri. (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005)



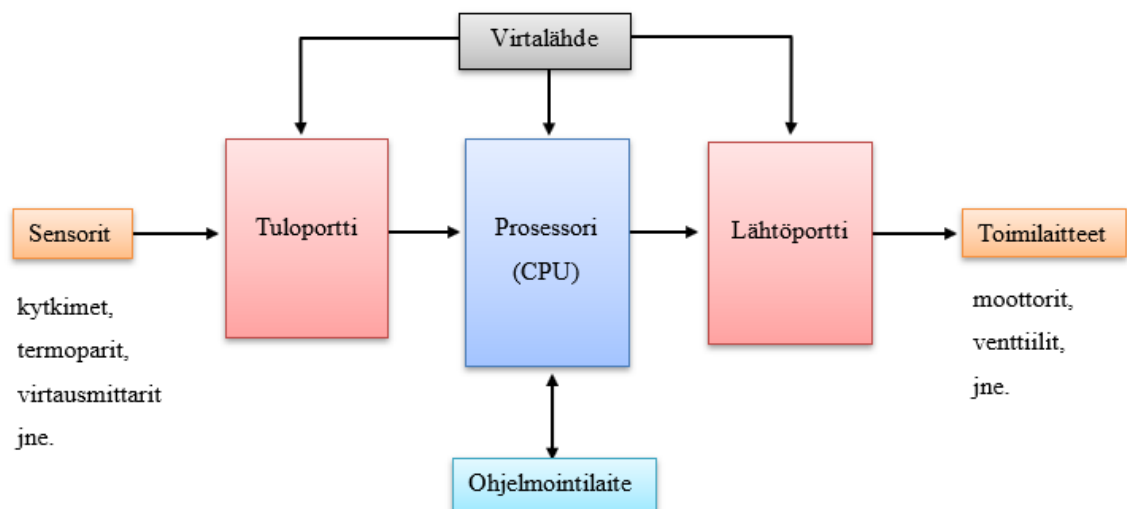
Kuva 10. Pulssikuparointilinjan ohjausjärjestelmien (ECS) arkkitehtuuri (mukailten CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005).

4.3.1 Ohjelmoitava logiikka

PLC (Programmable Logic Controller) eli ohjelmoitava logiikka on mikroprosessoripohjainen laite, jota käytetään reaaliaikaisten automaatioprosessien ohjauksessa. PLC:n toiminta perustuu takaisinkytkentään, jossa PLC saa jatkuvasti tietoa prosessin tilasta tulojen ja lähtöjen avulla. PLC määrittelee nimensä mukaan seuraavasti:

- Programmable (Ohjelmoitava): Tarjoaa mahdollisuuden sisällyttää muistiinsa ohjelmistoa, joka on helposti muutettavissa.
- Logic (Logiikka): Mahdollistaa lähtöjen prosessoinnin arimeettisesti ja loogisesti niin, että toiminnot kuten vertaaminen, summaaminen, kertominen sekä JA/TAI ovat mahdollisia.
- Controller (Ohjaus): Mahdollistaa prosessin ohjauksen ja säädön halutun tulon tuottamiseksi.

Arkkitehtuurinsa puolesta PLC muistuttaa paljon kotikäyttöistä tietokonetta. Poikkeuksena PLC:t eivät sisällä tallennustilaa kuten kovalevyä, vaan paristovarmennetun muistin, johon käyttäjä voi sijoittaa ohjelman logiikan ohjaamista varten. Lisäksi PLC sisältää tulo- ja lähtöportteja, joihin kytketään prosessin ohjaamista varten tarvittavat sensorit ja toimilaitteet. PLC:n rakenne on esitetty kuvassa 11. (Alphonsus & Abdullah 2016)



Kuva 11. Ohjelmoitavan logiikan rakenne (mukaillen Alphonsus & Abdullah 2016).

Kaikkien PLC-järjestelmien oleellimmat laitteistot ovat virtalähde, ohjelmointiterminaali, prosessori, sekä tulo- ja lähtöportit. Virtalähde jakaa tasavirtaa kaikille PLC-järjestelmään kuuluville moduuleille. Ohjelmointiterminaalin kautta voidaan lisätä ohjelmisto laitteen muistiin, jota prosessori (engl. central processing unit, CPU) lukee. Ohjelmointikieli ja käytetty laitteisto ovat valmistajakohtaisia. Ennen ohjelmoinnissa käytettiin ”tikapuulogiikkaa”, mutta nykyaikana on mahdollista käyttää myös perinteisiä ohjelmointikieliä, kuten C. Prosessori kontrolloi koko logiikan toimintaa. Sen tehtävä on toteuttaa muistiin sijoitetun ohjelman käskyt. Tulo- ja lähtöporttien (engl. input/output, I/O) avulla PLC saa tietoa prosessin tilasta ja mahdollistaa sen ohjaamisen. Pienemmillä prosesseilla portit ovat yleensä sisäänrakennettuja PLC:hen, kun taas suuremman kokoluokan prosesseilla portit ovat yleensä modulaarisia tarjoten mahdollisuuden I/O -porttien määrän ja tyyppin muuttamiseen. (Alphonsus & Abdullah, 2016; Setiawan et al. 2019)

4.3.2 Tangot

Tankojen ohjaus saavutetaan pääasiassa PLC:n avulla. Järjestelmän toimivuuden kannalta on oleellista, että PLC:n saamat tiedot tankojen sijainnista antavat tarkan kuvan reaalitytilanteesta. Tämä tapahtuu eri vaiheisiin asennettujen sensorien avulla, jotka kertovat milloin tangot ovat valmiita laskettavaksi tai nostettavaksi. Tankojen ohjausjärjestelmää voidaan ajaa kolmessa eri tilassa. Huoltotilassa tankoja on mahdollista liikuttaa pysty- ja sivuttaissuunnassa niin, että ainoat rajoitukset ovat kiskojen ääriasennot. Manuaalitulassa kaikki ohjaussignaalit syötetään PLC:lle, jolloin samat rajoitukset ovat voimassa kuin automaattitulassa. Tämä estää esimerkiksi tankojen laskun muualla, kuin altaiden yllä. Automaattitulassa PLC toimii muistiinsa asetetun, käyttäjän luoman ohjelman mukaisesti. Tällöin PLC kommunikoi linjan ohjaustietokoneen kanssa saaden tietoa, milloin ohjelmaan asetetut toimenpiteet tulee suorittaa. Tähän kuuluu esimerkiksi tankojen laskeminen haluttuun altaaseen. Kommunikointi ohjaustietokoneen ja PLC:n välillä tapahtuu sarjakommunikaation (RS485) avulla. PLC:n toiminnasta kerrotaan lisää luvussa 4.3.4. (Transporter control manual 2005)

4.3.3 Pulssipinnoitus

ECS (Embedded Control System) on upotettu digitaalinen ohjausjärjestelmä, joka koostuu useista eri moduuleista, joiden avulla voidaan taata joustava ohjausjärjestelmä

useamman eri kokoluokan prosesseille. Järjestelmän yksityiskohtainen toiminta riippuu ohjaustietokoneelle asennetusta ohjelmistosta (OSST). Näin ollen toimintatavat saattavat vaihdella prosessikohtaisesti. ECS:n ydin on ECM (Embedded Control Module), joka on sijoitettu jokaisen pulssipinnoitusyksikön sisälle. ECM sisältää ohjaustyökälut pulssipinnoitusyksikölle, haihtumattoman muistin eri ajoasetuksille sekä digitaalisen tietoliikennerajapinnan RCM:n (Remote Control Module) kanssa. RCM -moduulin päätehtävä on mahdollistaa jatkuva kommunikaatio OSST:n ja ECM -moduulien välillä pinnoitusyklin aikana. Lisäksi se on välttämätön pulssin sekvensoinnissa. Kuusi erilaista pulssi- ja tasavirtasykliä voidaan ladata RCM -moduuliin, jotka ohjaavat CPS -yksiköitä automaattisesti. (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005)

Ohjaustietokone on sarjakytetty jokaisen RCM:n kanssa käyttäen globaalia RS485 -kommunikaatiota. Vastaavasti jokainen RCM on kytketty edelleen yhden tai useamman ECM:n kanssa käyttäen paikallista RS485 -kommunikaatiota. RCM päivittää ja monitoroi jatkuvasti siihen kytkettyjä ECM -moduuleita. Kaikki RCM-, ja ECM-moduulit sisältävät haihtumattoman muistin, jossa ohjaus- ja asetustietoja säilytetään. Muistissa säilytetään kolme erityyppistä dataa, jotka on esitetty taulukossa 2. Kovalla datalla tarkoitetaan tietoja, jotka eivät muutu. Tyypillisesti keskikova data pidetään myös vakiona, mutta saatetaan päivittää pinnoitusykleittäin. Vastaavasti pehmeä data kuvaa tietoa joka vaihtelee pinnoitusykleittäin tai kesken syklin. (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005)

Taulukko 2. RCM- ja ECM-moduuleissa säilytettävät datatyypit (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005).

	RCM	ECM
Kova data	ECM tunnisteet	Max. & Min katodinen virta Max. & Min. anodinen virta Max. & Min. virransuhde (F:R) Pulssin minimi jännite Anodisen jännitteen maksimiarvo Lämpötilarajat
Keskikova data	Pulssin sekvenssitiedot	Maksimi jännite Alku- ja maksimiarvot jännitteelle Pulssin ajoitus Kalibrointidata
Pehmeä data		Katodinen virta Anodinen virta Pulssin ajoitus (Vain RS485) Katodinen jännite Ajoitus

CPS-pulssipinnoitusyksikön ajoparametrit annetaan OSST-ohjelmistossa, jossa pinnoitusohjelma valitaan pinnoitettavan kuparin määrän sekä levyn paksuuden perusteella. Tyypillinen pinnoitusytklin ohjaus etenee taulukon 3 mukaisesti. Pulssinmuoto määräytyy seuraavien parametrien mukaan:

- katodisen pulssin aika (forward time): 1–50 [ms]
- anodisen pulssin aika (reverse time): 0,2–1 [ms]
- anod./katod. suhdeluku (reverse current ratio): 1–5
- katodinen virrantiheys (forward current output): 7–1200 [A/dm²]
- anodinen virrantiheys (reverse peak current): forward current x reverse ratio [A/dm²].

Taulukko 3. Pinnoitusyklin ohjauksen eteneminen (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005).

Vaihe	Ohjaustietokone	ECS
-	Pyytää jatkuvasti ECS:n tilaa ja pinnoitusparamereja	Lähetää pyynnöstä tilan ohjaustietokoneelle
Operaattori täyttää tangot ja syöttää virta-arvot sekä pinnoitusajan.	Lataa pinnoitusparametrit RCM:lle & ECM:lle	Tallettaa pinnoitusparametrit haihtumattomaan muistiin. Pulssipinnoitusyksikkö (CPS) pysähtyneenä. (Ampeerit = 0)
Tangot saapuvat pinnoitusaltaaseen. Pinnoitusaika täyttyy.	Lähetää käskyn aloittaa pinnoitus Lähetää käskyn pysäyttää pinnoitus	Pulssipinnoitusyksikkö (CPS) vaatii virtaa. Pulssipinnoitusyksikkö (CPS) pysähtyy. (Ampeerit = 0)
Tangot poistuvat altaasta.	-	-

4.3.4 Lämpötila

Altaiden haluttu lämpötila, sekä lämpötilojen hälytysrajat voidaan asettaa OSST-ohjelmistossa. Lämpötilaa ohjataan yksinkertaisten jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmien avulla. Altaiden lämpötilojen ylittäessä hälytysrajan lämmitysjärjestelmiltä katkaistaan virta. (CPS Reverse Pulse Plating Manual 2005)

4.4 Pinnoitukseen vaikuttavat tekijät

Muodostuvaan pinnoitukseen vaikuttaa useita eri tekijöitä, eikä kaikkia ole tässä työssä mahdollista listata. Tässä kappaleessa käydään läpi yleisesti merkittävimpinä pidettyjä tekijöitä, joita ovat: esikäsitely, valitut anodit sekä niiden välimatka, agitaatio ja täryt, kuparikylvyn konsentraatiot, levyn ominaisuudet sekä pulssipinnoitusyksikkö ja pulssinmuoto.

4.4.1 Esikäsitely

Pulssikuparointiin, kuten muihinkin galvaanisiin pinnoituslinjoihin kuuluu levyjen esikäsitely. Prosessivaiheisiin kuuluu useita huuhtelu-, puhdistus- ja etsausvaiheita. Esikäsitely aloitetaan rasvanpoistolla, jossa levy pyritään puhdistamaan perusteellisesti. Mikäli puhdistus ei onnistu, aiheuttaa se kuparipinnoitteen heikon adheesion. Jokaista

kemiallista käsittelyvaihetta seuraa usein huuhtelu. Huuhtelulla varmistetaan levyjen puhtauden lisäksi siitä, ettei levyjen mukana kulkeudu kemiajäämiä seuraaviin vaiheisiin. Tämä saattaa aiheuttaa kontaminaatiota myöhemmissä prosessialtaissa. Usein käytössä on kaskadihuuhtelu. Huuhteluvesi on pidettävä puhtaana, jolloin veden annostelun sekä johtokyvyn seuranta on suositeltavaa. Rikkihappokastojen ja mikroetsauksen avulla levyjen pinnat saadaan puhtaaksi oksideista, joka on välttämätöntä paremman adheesio- saavuttamiseksi tina- ja kuparipinnoille. Jokaiselle prosessialtaalle on olemassa optimaaliset konsentraatiot, joita tarkkaillaan laboratorioanalyysillä altaasta riippuen 1–4 kertaa viikossa. Levyjen ja kylpyjen puhtaus on tärkeää prosessin luotettavuuden ja toistettavuuden kannalta. (Kenny et al. 2005; Chandrasekar & Pushpavanam 2008)

4.4.2 Käytettävät anodit ja niiden välimatka

Käytettäviä anodityyppejä ovat liukenevat sekä liukenemattomat anodit. Liukenevat anodit ovat yleensä fosforipitoisia kuparikuulia, joita käytetään myös Aspocomp in piirilevytehtaalla. Kuparikuulat tuottavat anodimutaa sekä kontaminoivat kuparikylpyä heikentäen ajan mittaan kuparikylvyn suorituskykyä. Lisäksi liukenevat anodit vaativat ajoittain huoltamista. Lisäaineiden kulutus on kuitenkin huomattavasti pienempi, kuin liukenemattomia anodeja käytettäessä. Liukenemattomat anodit koostuvat yleensä titaanista sekä seriumin ja zirkoniumin sekaoksidoista. Tällöin vältetään kontaminaatioita ja huoltotoimenpiteiltä, mutta lisätään lisäainekustannuksia. Anodin ja katodin välimatka on myös merkittävä pinnoituksen kannalta ja vaatii huolellista suunnittelua. (Dalian JY Electronic 2015)

4.4.3 Sekoitusmenetelmät

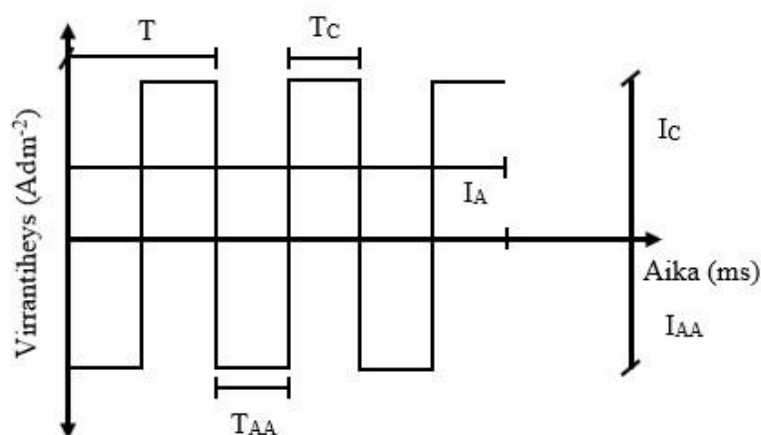
Hyvän massansiirron takaamiseksi on tarjolla useita eri sekoitusmenetelmiä. Yleisimmät käytetyt ovat mekaaniset täryt ja ilma-agitaatio, jossa puhalletaan ilmaa pinnoitusaltaaseen. Ilma-agitaation sijoittamisessa on harkittava montaa tekijää tasaisen sekoituksen saavuttamiseksi, kuten sijoitetaanko agitaatio altaan pohjalle vai sivulle, mikä on ideaalinen agitaation virtausnopeus, sekä mikä on agitaation haluttu etäisyys katodista. Tätä varten on suoritettava useita eri testejä. Virtausmittarien asentaminen on suositeltavaa mittauksen monitorointia varten. Lämpötilan tarkkailu on myös suotavaa, sillä kylvyt ovat usein herkkiä lämpenemään. Liian korkeissa tai matalissa lämpötiloissa pinnoitusteho heikkenee. (Dalian JY Electronic 2015)

4.4.4 Kuparikylvyn konsentraatiot

Perinteisten tasavirtaisten pinnoitusmenetelmien kylpyjen koostumukset eivät ole riittävän tehokkaita pinnoittamaan korkeamman muotosuhteen omaavia aihioita riittäväällä heittokyvyltä. Elektrolyyttikomponenttien pitoisuudet suunniteltiin vastaamaan parhaalla mahdollisella tavalla pulssikuparoinnin aallonmuotoa. Aspocomp Group Oyj:llä kylvyn komponenteille on asetettu tietyt raja-arvot, joiden sisällä konsentraatioiden on pysyttävä parhaan pinnoitustuloksen saavuttamiseksi. Kuparikylvyn konsentraatioita mitataan komponentista riippuen 1–4 kertaa viikossa. Yleisin analyttinen työkalu on CVS (Cyclic Voltametry Stripping), jonka avulla voidaan mitata liuoksen konsentraatioita manuaalisesti. Konsentraatioiden ohittaessa ylä- tai alarajan, kylvyt valmistetaan uudelleen tai tehdään tarvittavia lisäyksiä. Pinnoitusliuoksessa käytettävien komponenttien toimintaa, sekä väärin konsentraatioiden aiheuttamia ongelmia esiteltiin kappaleessa 3.2. (Aspocomp Group Oyj 2022)

4.4.5 Pulssipinnoitusyksikkö ja aallonmuoto

Pinnoitettavan kuparin paksuuteen ja laatuun vaikuttaa oleellisesti käytettävän pulssin aallonmuoto sekä pinnoitusaika. Kuvassa 12 on esitetty pinnoitukseen liittyviä parametrejä.



Kuva 12. Pulssipinnoituksen aallonmuodon parametrit. Kuvassa T on jaksonaika [s], T_{AA} on anodisen pulssin aika [s], T_c on katodisen pulssin aika [s], I_{AA} on anodisen sähkövirran tiheys [A/dm²], I_c on katodisen sähkövirran tiheys [A/dm²] ja I_A on keskimääräinen sähkövirran tiheys [A/dm²] (mukaillen Chandrasekar & Pushpavanam 2008).

Käytettävän pulssipinnoitusyksikön tarkkuus on tärkeää erityisesti kuviopinnoitusta tehdessä, jolloin katodin pinta-ala on huomattavasti pienempi. Yleisesti suositellaan pinnoitusyksiköitä, joiden virhemarginaali on alle 5 %. Sijoittamalla pinnoitusyksikkö pinnoitusaltaan sivulle, saadaan lyhennettyä tarvittavia kaapelin pituuksia ja vähennettyä virran nousuaikaa. Laitetoimittajat suunnittelevat tarkkaan käytettävät kaapelit. Mikäli kaapelin poikkipinta-ala on liian pieni tai kaapeli liian pitkä, ei linjalla pystytä saavuttamaan tuotannon vaatimia virta-arvoja.

Aspocompin piirilevytehtaalla pyritään siihen, että jokaisessa levyssä on reikäkuparia vähintään 25 μm . Kuviopinnoituksia ajetaan monilla erilaisilla pinnoitusasetuksilla, jotka operaattorit valitsevat perustuen hyväksi todettuihin arvoihin sekä aikaisempiin pinnoitustuloksiin vastaavilla tai samoilla tuotteilla. Valittuihin arvoihin vaikuttavat muun muassa pinnoitettavan levyn paksuus sekä layout.

Paneelipinnoitusta tehdessä linjalle on luotu valmiita pinnoitusohjelmia, jotka jaetaan halutun pinnoitusmäärän mukaan. Nämä pinnoitusohjelmat on jaettu edelleen profiileihin, jotka valitaan pinnoitettavan levyn paksuuden mukaan. Yleisesti ottaen paksumpia levyjä ajetaan pienemmillä virrantiheyksillä ja pidemmällä pinnoitusajolla hyvän heittokyvyn saavuttamiseksi.

Ideaalisista pinnoitusparametreistä on tehty useita tutkimuksia joiden tulokset vaihtelevat käytettävien prosessilaitteistojen sekä pinnoitettavien levyjen mukaan. Paneelipinnoittaessaan korkean muotosuhteen omaavia levyjä, Huang (2019) totesi optimaaliseksi pulssien aikasuhteeksi $T_C/T_{AA} = 20/1$ [ms/ms] ja sähkövirran tiheyssuhteeksi $I_C/I_{AA} = 2/6$ [$\text{A}/\text{dm}^2/\text{A}/\text{dm}^2$]. Levylle, jonka muotosuhde oli 10 saavutettiin pinnoitus, jonka heittokyvyksi laskettiin 105,2 %. (Huang et al. 2019; Dalian JY Electronic 2015)

4.4.6 Levyn ominaisuudet

Pinnoitettavaksi tulee useita erilaisia monikerrospiirilevyjä, joiden ominaisuudet vaikuttavat pinnoitukseen. Oleellisimpia näistä ovat aikaisemmin esitellyt levyn paksuus sekä läpiviennin halkaisija, joista muodostuu levyn muotosuhde. Lisäksi levyn pinta-ala sekä läpivientien halkaisijat nostavat pinnoituspinta-ala vähentäen pinnoitettavan kuparin määrää. Levyn layoutilla tarkoitetaan piirilevyn rakennekuvaa, joka vaihtelee tuotteesta

toiseen. Joidenkin tuotteiden layout voi olla haastavampi pinnoittaa tasaisesti johtuen tiheistä reikämatriiseista ja eristetyistä rei'istä. Hyvän ja tasaisen massansiirron saavuttaminen tiheille reikämatriiseille on haastavampaa, jolloin tarvittavan pinnoituksen saavuttaminen näihin reikiin voi epäonnistua. Vastaavasti eristetyt reiät helposti ylipinnoittuvat. (Dalian JY Electronic 2015)

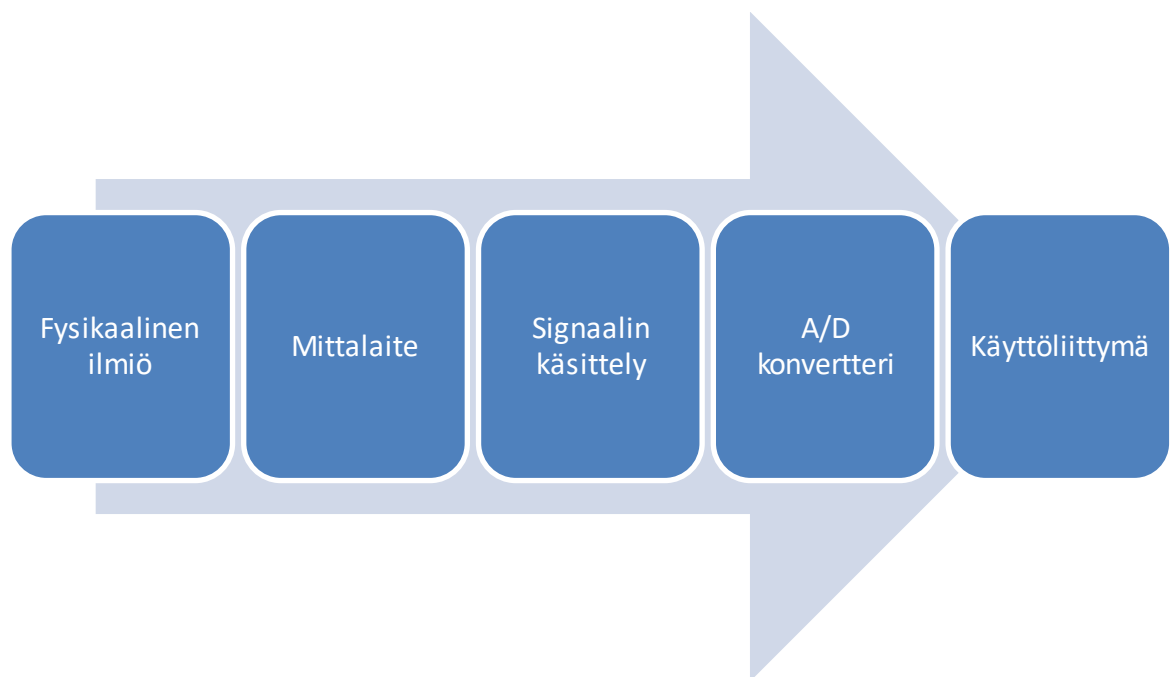
4.4.7 Muita tekijöitä

Kuten aiemmin todettua, pulssikuparoinnilla saavutettu pinnoitus on monen tekijän summa ja epäonnistuneelle pinnoitukselle tai sen vaihtelulle voi olla haastavaa löytää selittävää tekijää. Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi vartenotettavia muuttujia ovat tuotantotangolle käytetty pinnoitusallas, pinnoitusaika, kemiallisen kuparoinnin onnistuminen, linjan huoltovälit, sekä pinnoitetun aihion sijainti tuotantotangolla:

- Pulssikuparointilinjalla on käytössä kuusi pinnoitusallasta kuparille, joiden välillä saattaa olla eroja lämpötilan, kylvyn konsentraatioiden, sekä massansiirron suhteen. Näin ollen saavutettava pinnoitus saattaa vaihdella altaiden välillä.
- Todellinen pinnoitusaika saattaa poiketa asetetusta pinnoitusajasta operaattorin toimenpiteiden tai esimerkiksi levynkuljettimessa ilmenevän vikatilän johdosta.
- Kemiallisen kuparoinnin onnistuminen ja sen tasaisuus sekä riittävä paksuus reiässä vaikuttaa potentiaalieroihin reiän sisällä elektrolyttisessä pinnoituksessa.
- Linjan huoltovälit vaikuttavat altaiden puhtauteen ja kylpyjen ”tuoreuteen”. Näin ollen on mahdollista, että pinnoitusteho heikkenee, mitä kauemman aikaa viimeisimmästä huollosta on kulunut.
- Aihion sijainti tuotantotangolla puolestaan vaikuttaa etäisyyteen anodin ja katodin välillä. Lisäksi agitaatiot ja täryt saattavat vaikuttaa eri tavalla riippuen siitä, missä kohtaa tuotantotankoa aihio on kiinnitetty.

5 DATAN HANKINTA JA ANALYSOINTI

Datan hankinta (engl. Data acquisition, DAQ) on prosessi, jossa digitoidaan tietoa teollisista laitteista tai ympäristöistä, jotta sitä voidaan näyttää, analysoida ja tallentaa tietokoneelle, palvelimelle tai pilviympäristöön. Datanhankinta on perusta kaikille datan hankintajärjestelmille ja sen konsepti koostuu kolmesta pääkomponentista; mittalaitteista, signaalin käsittelystä ja A/D-konvertterista. Mittalaitteilta saadut analogiset signaalit on käsiteltävä, jotta ne voidaan muuntaa digitaaliseen muotoon. Käsitelyyn saattaa kuulua esimerkiksi signaalien vahvistamista tai virittämistä. Datanhankinnan konsepti on esitetty kuvassa 13. (Electronicsnotes 2022)



Kuva 13. Datan hankinnan konsepti (mukaien Electronicsnotes 2022).

Kokeellisen osuuden loppupuolella, kappaleessa 7.6.1, esitellään tässä työssä käytettyjä datan hankintalaitteita ja -ohjelmistoja. Niiden avulla suunnitellaan ja toteutetaan monitorointijärjestelmä, joka mahdollistaa tulevaisuudessa käytettyjen pinnoitusparametrien, saavutettujen pinnoitusten sekä erilaisten pinnoitukseen vaikuttavien muuttujien seuraamisen.

Datan hankintamenetelmien avulla kerättyä dataa on puolestaan mahdollista analysoida erilaisten tilastollisten testien avulla. Niiden avulla on mahdollista selvittää, onko kerätystä ja tutkittavasta perusjoukosta eli populaatiosta otetussa otoksessa havaitut erot tai riippuvuudet sattumasta johtuvia, vai tilastollisesti merkitseviä. Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi erilaisia tilastollisia testejä ja niihin liittyviä käsitteitä, joita hyödynnetään työn kokeellisessa osassa pulssikuparointilinjan aineistoa tutkittaessa.

5.1 Hypoteesien testaus

Hypoteesit ovat ennakko- tai lähtöoletuksia tutkittavasta asiasta. Hypoteesien paikkaansa pitävyyttä voidaan tutkia kerätylle aineistolle suoritettavien tilastollisten testien avulla. Testeissä tutkitaan eroavatko aineiston otokset toisistaan tarkasteltavan ominaisuuden suhteen. Vaihtoehtoisesti voidaan tutkia, eroavatko otoksen arvot jostakin tietyistä arvosta. Hypoteesit perustuvat oletuksille siitä, minkälaisia eroja tai samankaltaisuuksia aineistosta mitattujen muuttujien välille löytyy. Oletukset perustuvat yleensä aikaisemmassa tutkimuksessa löydetyille havainnoille tai tietämykselle tutkittavasta aineistosta tai prosessista. Hypoteesien testaukseen voidaan kuvitella kuuluvan karkeasti viisi vaihetta: (Karjalainen 2010 ; Freund & Wilson 2003)

1. Hypoteesien valinta
2. Tilastollisen testin valinta
3. Merkitsevyytason valinta
4. Testin suorittaminen
5. Lopullisen päätöksen tekeminen.

5.1.1 Hypoteesien valinta

Tilastollisten hypoteesien testaus aloitetaan tekemällä kaksi hypoteesia tutkittavasta asiasta, jotka ovat toisensa pois sulkevia. Toinen hypoteeseistä on aina tosi, jolloin toisen on oltava epätosi. Näitä hypoteeseja kutsutaan nollahypoteesiksi (H_0) ja vastahypoteesiksi (H_1). Yleensä nollahypoteesi määrätään niin, että vertailtavien populaatioiden välillä ei ole eroja ja näiden välillä havaitut poikkeamat ovat sattumaa. Hypoteesit määritellään seuraavasti: (Karjalainen 2010; Freund & Wilson 2003)

Nollahypoteesi, H_0 : Populaatioiden välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa tarkasteltavan muuttujan suhteen.

Vastahypoteesi, H_1 : Populaatioiden välillä on tilastollisesti merkitsevä ero tarkasteltavan muuttujan suhteen.

Tyypillinen tilastollisen analysoinnin keino on verrata keskenään ryhmien keskiarvoja. Tällöin hypoteesit voidaan asettaa seuraavasti, jossa populaatioiden keskiarvoja merkitään symbolein μ_1 ja μ_2 :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad (5)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad (6)$$

Tässä tapauksessa puhutaan kaksisuuntaisesta hypoteesin testauksesta, sillä ainoa oletus on se, että populaatioiden keskiarvot eroavat toisistaan.

Vaihtoehtoinen tarkastelutapa on yksisuuntainen hypoteesien testaus, jossa tehdään olettaus toisen populaation keskiarvon pienemmyydestä:

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad (7)$$

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2 \quad (8)$$

Esitetyt hypoteesit ovat ainoastaan esimerkkejä mahdollisista nolla- ja vastahypoteeseista. Testattavana ei tarvitse aina olla populaatioiden välinen keskiarvo,

vaan hypoteeseja voidaan hyödyntää muidenkin tilastollisten suureiden kanssa. (Freund & Wilson 2003; Karjalainen 2010)

5.1.2 Tilastollisen testin valinta

Käytettävän tilastollisen testin valinta riippuu tutkittavan aineiston ominaisuuksista sekä asetettujen hypoteesien luonteesta. Useat käytetyt menetelmät sisältävät hypoteesien testausta, jolloin niiden esille tuominen ei ole tarpeellista ja tutkijan oletetaan ymmärtävän hypoteesien testauksen peruseriaatteen. Esimerkki tällaisesta tilastollisesta testistä on regressioanalyysi, jonka yhteydessä testataan eroavatko selittävien muuttujien regressiokertoimet tilastollisesti nolasta. Useat eri laskentaohjelmistot tekevät testauksen automaattisesti, jolloin tehtävänä on ainoastaan tulkita saatuja tuloksia oikean johtopäätöksen tekemiseksi. Tällöin myös hypoteesit sisältyvät laskentaan, jolloin on tiedettävä mitä vastahypoteesia ohjelmisto käyttää. (Freund & Wilson 2003; Karjalainen 2010)

5.1.3 Merkitsevyytaso ja riskin määrittäminen

Johtopäätökset hypoteesien voimassaolosta tehdään testisuureen avulla. Jokaisella tilastollisella testillä on oma menetelmänsä testisuureen laskemiseksi, jota verrataan otosta vastaavaan teoreettiseen todennäköisyysjakaumaan. Laskettuja testisuureiden arvoja vastaa aina riskitaso, eli merkitsevyytaso. P-arvo puolestaan on todennäköisyys hylkäämisvirheelle, jonka perusteella tehdään johtopäätökset koskien hypoteesien hylkäämistä. (Freund & Wilson 2003; Karjalainen 2010)

Täyttä varmuutta johtopäätösten oikeellisuudesta ei voi olla, sillä populaatiosta tehtävät päätökset perustuvat otoksesta saatuihin arvoihin. Tutkijalla on mahdollisuus tehdä kaksi päätöksentekoon liittyvää virhettä:

1. lajin virhe eli **hylkäämisvirhe**: Hylätään H_0 , vaikka se on tosi

2. lajin virhe eli **hyväksymisvirhe**: Hylätään H_1 , vaikka se on tosi.

1. lajin virhettä, eli hylkäämisvirhettä pidetään vaihtoehdoista vakavampana. Laskettu p-arvo ilmoittaa, kuinka suuri todennäköisyys on tehdä hylkäämisvirhe. Nollahypoteesi

voidaankin hylätä ainoastaan silloin, kun laskettu p-arvo on alle asetetun riskitason. (Freund & Wilson 2003; Karjalainen 2010)

Riskitasoksi kutsutaan sitä asetettua p-arvoa, jolla nollahypoteesi hylätään. Riskitaso on määrättävissä tutkijan oman harkinnan mukaan, joka tulee valita tutkimuskohteen sekä käytettävän aineiston mukaan. Yleisimmin käytettyjä riskitasoja ovat 5 % ($p < 0,05$) ja 1 % ($p < 0,01$). Tuloksia tulkittaessa on silti käytettävä pohdintaa, takaako esimerkiksi 0,049 p-arvo nollahypoteesin paikkaansa pitävyyden, mutta 0,051 ei. (Freund & Wilson 2003; Karjalainen 2010)

5.2 Varianssianalyysi

Varianssianalyysin (engl. analysis of variance tai ANOVA) avulla voidaan tutkia eroavatko kahden tai useamman populaation keskiarvot tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Menetelmän käyttöä suositellaan erityisesti silloin, kun halutaan vertailla useamman riippumattoman kategorisen muuttujan keskiarvoja toisiinsa samanaikaisesti. Yksinkertaisin varianssianalyysin muoto on yksisuuntainen varianssianalyysi, jossa on vain yksi selittävä muuttuja. Varianssianalyysillä on kuitenkin useita laajennusmahdollisuuksia, kuten kaksisuuntainen varianssianalyysi, kovarianssianalyysi ja monimuuttuja varianssianalyysi. (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

Nimestään huolimatta varianssianalyysillä testataan keskiarvojen eroja, ei varianssien. Keskiarvojen vertailu suoritetaan kuitenkin tutkimalla riippumattomien kategoristen muuttujien aiheuttamia eroja riippuvan muuttujan keskiarvon variansseissa. Riippumatonta kategorista muuttujaa kutsutaan tekijäksi. Tekijä jakaa havainnot eri ryhmiin, joiden voidaan olettaa aiheuttavan vaihtelua mittaustuloksissa. (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

Tarkastelemalla ainoastaan otosten yhteisvarianssia ei voida päätellä ilmenevän varianssin syytä. Yksisuuntaisessa varianssianalyysissä yhteisvarianssi hajotetaan osiin varianssitermeiksi, jotka ovat ryhmien välinen varianssi ja ryhmien sisäinen varianssi. Ryhmien välinen varianssi tarkoittaa ryhmäkeskiarvojen välistä vaihtelua, kun taas ryhmien sisäinen varianssi yksinkertaisuudessaan kuvaa ryhmien 1,2,3...,k havaintojen välistä vaihtelua. Näiden kahden komponentin avulla on mahdollista laskea

erilliset, edellä mainittuihin variansseihin perustuvat estimaatit populaatiovariانسsille. Vertaamalla variansseja keskenään voidaan tutkia, aiheuttaako riippumaton muuttuja tilastollisesti merkitseviä eroja mittaustuloksiin. Testisuurena käytetään Fisherin F-suhdetta, joka on yksinkertaisuudessaan kahden varianssin välinen suhde: (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

$$F = \frac{S_{dependent}^2}{S_{error}^2}, \quad (9)$$

missä

$S_{dependent}^2$ on riippumattoman muuttujan aiheuttama varianssi, eli ryhmien välinen varianssi ja

S_{error}^2 on virhevariانسsi, eli ryhmien sisäinen variانسsi.

F-testisuure ilmoittaa, kuinka paljon mittaustuloksissa on riippumattoman muuttujan, eli tekijän aiheuttamaa vaihtelua. Ryhmäkeskiarvot poikkeavat toisistaan sitä enemmän, mitä suuremman arvon F-testisuure saa. (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

Variانسsianalyysin nollahypoteesina pidetään, että tarkasteltavien ryhmien keskiarvot ovat yhtä suuret. Vastahypoteesi esitetään puolestaan niin, että ainakin yksi ryhmäkeskiarvo poikkeaa muista. Jos variانسsit eivät eroa toisistaan paljon, ovat eri luokkien keskiarvot samat. Tällöin voidaan siis todeta nollahypoteesi oikeaksi jolloin luokkien välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa. (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

5.3 Studentin t-testi

Studentin t-testi on yksi käytetyimmistä tilastollisista testeistä. Sen eri versioilla pystytään vastaamaan useisiin populaatioiden keskiarvoja koskeviin tutkimuskysymyksiin. Testeissä mallina otoskeskiarvojen jakaumalle toimii Studentin t-jakauma. Tätä voidaan hyödyntää silloin, kun populaation hajonta ei ole tunnettu. T-

jakauman hajonta määräytyy vapausasteiden ($df = n - 1$) perusteella, jolloin populaation hajontatermiä ei tarvita. T-jakaumalla approksimoidaan normaalijakaumaa, jolloin riittää, että tutkittava muuttuja on likimain normaalisti jakautunut. Testistä on olemassa kolme eri muunnelmaa, jotka ovat yhden otoksen t-testi, riippumattomien otosten t-testi ja riippuvien otosten t-testi. Tässä työssä keskitytään näistä ensimmäiseen. (Karjalainen 2010; Nummenmaa 2021)

Yhden otoksen t-testillä tarkastellaan yhden jakauman sijaintia, eli poikkeavatko tutkittavan otoksen keskiarvo \bar{x} ja asetettu odotusarvo μ toisistaan tilastollisesti merkittävästi. Tämän testaamisen lasketaan testisuure, joka kertoo kuinka suuri on otoskeskiarvon ja populaatiokeskiarvon välinen erotus suhteessa keskiarvon keskihajontaan eli nk. standardivirheeseen. Tarkasteltava testisuure on siis:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}, \quad (10)$$

missä \bar{x} on otoskeskiarvo,
 μ on populaatiokeskiarvo,
 $\frac{s}{\sqrt{n}}$ on keskiarvon keskihajonta eli standardivirhe.

T-testissä käytettävät hypoteesit ovat:

$$H_0 : \quad \bar{x} = \mu \quad (11)$$

$$H_1 : \quad \bar{x} \neq \mu \quad \text{Kaksisuuntainen testaus} \quad (12)$$

$$H_1 : \quad \bar{x} > \mu \text{ tai } H_1 : \bar{x} < \mu \quad \text{Yksisuuntainen testaus} \quad (13)$$

Saatu testisuureen arvo verrataan käytettävän merkitsevyystason sekä vapausasteiden määrittelemään t-taulukon kriittiseen arvoon. Mikäli testisuureen itseisarvo on kriittistä arvoa suurempi, voidaan asetettu nollahypoteesi hylätä. Myös t-testissä voidaan laskea p-arvo. Voidaan siis todeta, että p-arvon antamalla todennäköisyydellä tutkittavan otoksen keskiarvo poikkeaa tilastollisesti merkittävästi asetetusta odotusarvosta. Yhden otoksen

t-testillä otoskooksi riittää jo noin 15 kappaletta havaintoja. (Nummenmaa 2021; Karjalainen 2010)

6 AINEISTON KERÄÄMINEN

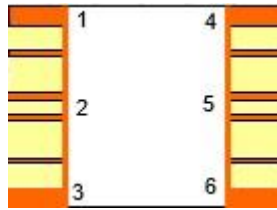
Kerättävän aineiston ja sen käsittelyn avulla pyritään saamaan parempi kuva pulssikuparointilinjan nykytilanteesta. Aspocompin piirilevytehtaalla on käytössä hielaboratorio, jossa valvotaan mm. läpivienteihin saavutettua pinnoituksen paksuutta. Eräkohtaisten mittaustulosten, sekä eri järjestelmistä haettujen tuote- ja linjatietojen avulla saatiin koottua kattava aineisto, jota tutkimalla voidaan löytää selittäviä tekijöitä pinnoituksissa havaittuihin poikkeamiin. Kappaleessa käydään läpi aineiston keräämisen vaiheet sekä aineistossa havaitun vaihtelun tutkimista varten suoritettut lisämittaukset.

6.1 Pulssikuparointilinjalla pinnoitetut tulppareitit

Paneelipinnoituksessa saavutettavaa pinnoituksen tasaisuutta pulssikuparointilinjalla voidaan tutkia tarkkailemalla tulppareikiä. Tulppauksessa tulpattavat reiät täytetään epoksilla, joka toimii läpiviennin suojana kokoonpanovaiheessa sekä mahdollistaa muunmuassa sähköliitosten muodostamisen läpiviennin yli. Ennen tulppausta läpivienteihin pyritään pinnoittamaan vähintään 25µm kuparia.

Hielaboratoriossa suoritettavista mittauksista muodostetaan eräkohtaisia Excel-raportteja, joista eri reikätyyppien ja pintojen kuparimittauksia on nähtävissä. MATLAB® -ohjelmistolla tehtiin skripti, jonka avulla haettiin kaikki 2020–2022 valmistuneiden erien tulppareikien mittaustulokset samaan laskentataulukkoon.

Hielaboratoriossa jokaisesta erästä otetaan tulpparei'istä mittauksia kuudesta eri kohdasta, joissa mittaustulokset 2 ja 5 ovat mittauksia reiän keskeltä. Vastaavasti mittaukset 1, 3, 4 ja 6 ovat reiän nurkista. Mittaukset ovat esitettyinä kuvassa 14. Reikien kuparimäärän lisäksi hielaboratorioraporteista on saatavilla levyn paksuus sekä reikäkoko. Näistä voitiin edelleen laskea tuotekohtaisia muuttujia, kuten heittokyky ja pinnoittuneen kuparin keskiarvot reiässä, reiän nurkissa sekä reiän keskellä.



Kuva 14. Hielaboratoriossa otettavat mittaukset tulppareistä.

Käytössä olevasta Wise-toiminnanohjausjärjestelmästä haettiin kaikki tulpatut erät, joille on ajettu 25 μm pinnoitus pulssikuparointilinjalla. Yhdistämällä näihin hielaboratorion mittaukset, saatiin muodostettua 715 otoksen joukko, joiden avulla voitiin tutkia paneelipinnoituksen tasaisuutta sekä siihen vaikuttavia tekijöitä.

Wise-toiminnanohjausjärjestelmästä saatiin lisäksi levyjen tulppareikien määrä sekä päivämäärä, jolloin levyt on pinnoitettu. Päivämäärän avulla voitiin edelleen lisätä kemianlaboratoriossa mitatut päiväkohtaiset kuparikylvyn konsentraatiot. Tulppareikien määrän, levyn paksuuden, sekä reikien halkaisijoiden avulla laskettiin lisäksi levykohtainen tulppareikien pinta-ala.

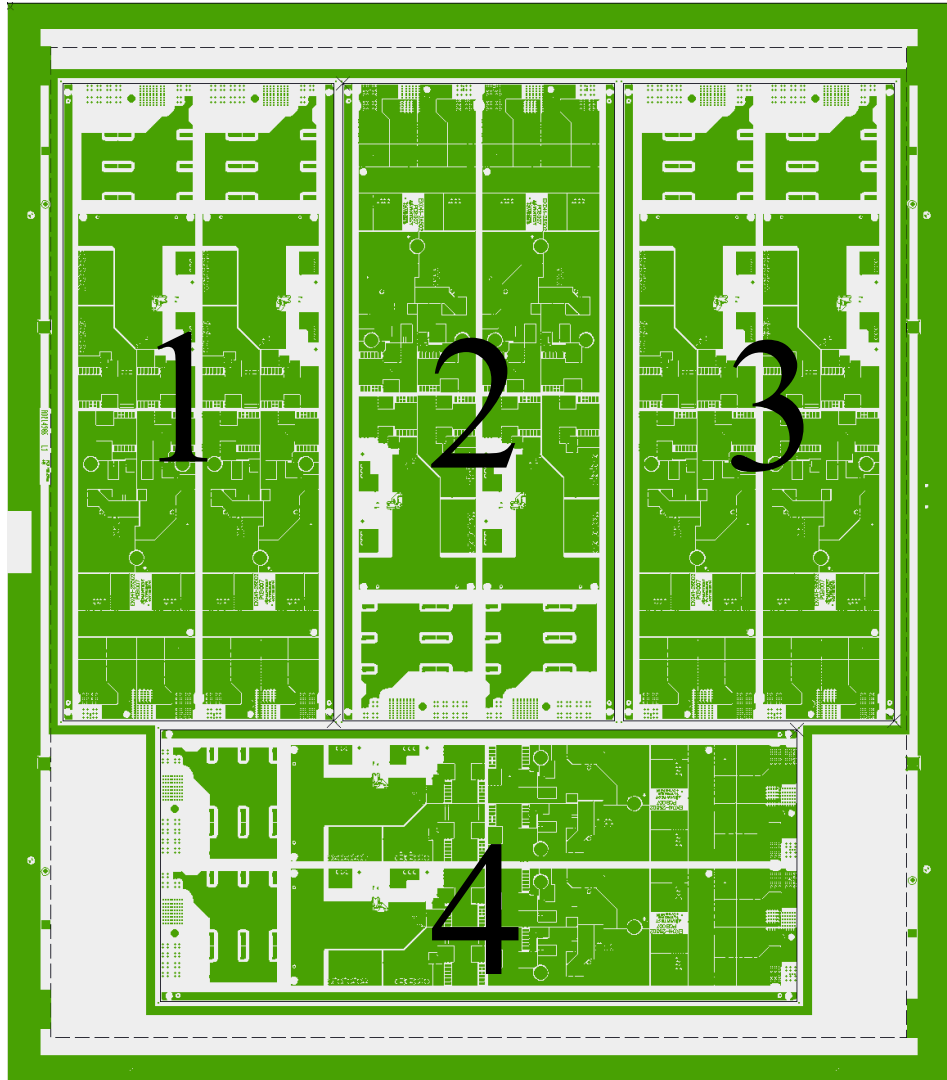
Paneelipinnoituksen pinnoitusohjelma valitaan levyn paksuuden mukaan. Näin ollen saatiin lisättyä levykohtaisesti käytetty pinnoitusprofiili, johon sisältyy pinnoitusaika, sekä eri parametreista muodostuva pulssinmuoto. Profiilit sekä sisältyvät parametrit levyn paksuuksien mukaan on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Pulssikuparointilinjalta käytettävät paneelipinnoitusohjelmat levyn paksuuksien mukaan. Näillä ohjelmilla pyritään pinnoittamaan 25 µm kuparia levyn pinnoille.

Levyn paksuus	Käytettävä ohjelma	Profile	RR	Reverse Peak Current	Forward time (msec)	Reverse time (msec)	Forward current (A/dm ²)	Aika (min)
0,81 - 1,1	PIN25/1.1	18	2,7	6,9768	20	1	2,584	68,85
1,11 - 1,7	PIN25/1.7	3	2,8	7,2352	20	1	2,584	71,4
1,71 - 1,9	PIN25/1.9	19	2,9	7,4936	20	1	2,584	73,95
1,91 - 2,3	PIN25/2.3	13	3,1	8,0104	20	1	2,584	74,97
2,31 - 2,7	PIN25/2.7	5	3,2	8,2688	20	1	2,584	76,5
2,71 - 3,3	PIN25/3.3	58	2	2,584	50	1,6	1,292	132,6
3,31 - 3,7	PIN25/3.7	59	2,5	2,50325	50	1	1,0013	204
3,71 - 4,9	PIN25/4.9	62	2,2	2,20286	50	2	1,0013	204
4,91 - 6,0	PIN25/6	60	2,2	2,20286	50	2,2	1,0013	207,06

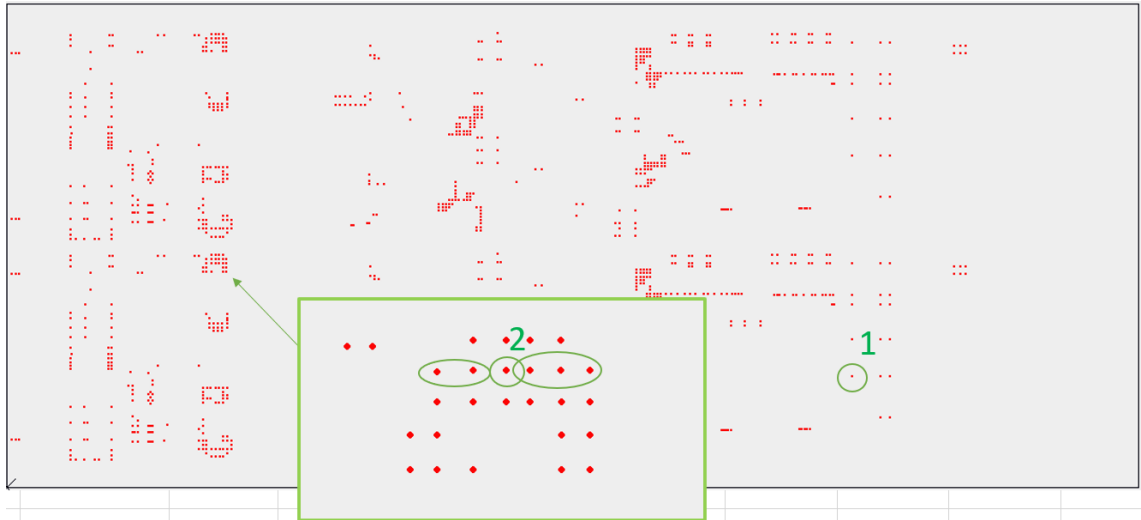
6.2 Lisämittaukset tuotteesta AD214906

Hielaboratoriossa mitattavat pinnoituksen paksuusmittaukset suoritetaan niin, että työntekijä valitsee aihion rei'istä saavutettua pinnoitusta parhaiten kuvaavan. Aihioilla saattaa olla tuhansia tulppareikiä, joista työntekijä käy läpi vain muutamia ja valitsee niistä yhden mitattavaksi. Mikäli aihion sisäinen vaihtelu on suurta, saattaa se aiheuttaa hajontaa myös mittaustuloksissa. Tästä johtuen tuotteesta AD214906 kerättiin talteen hylättyjä toimitusaihioita, joihin merkittiin kuvan 15 mukaisesti sijainti aihioilla, sekä eränumero.



Kuva 15. AD214906 toimitusaihioiden numerointi. Jokaisella ahiolla on neljä toimitusaihiota, joista jokainen toimitusaihio sisältää kaksi piirilevyä.

Näistä toimitusaihioista otettiin ennalta määrätyistä tulppareista mittaauksia, jotka ovat esitetty kuvassa 16. Yksi mittaus eristetystä reiästä (1), sekä yksi mittaus tiheästä reikämatriisista (2). Lisäksi ensimmäisestä kolmesta toimitusaihiosta otettiin rivimittaukset reikämatriisista.



Kuva 16. Toimitusaihiosta otetut mittaukset.

Suoritettujen lisämittausten avulla saadaan enemmän eräkohtaisia otoksia, mikä mahdollistaa erien vertailun keskenään. Lisäksi vertailemalla keskenään yksittäisessä reiässä sekä reikämatriisissa saavutettuja eroja, voidaan tarkastella kuinka suuri vaihtelu on mahdollista saada aikaiseksi nykyisellä mittausten menetelmällä. Teorian mukaan valitut reiät edustavat huonointa mahdollista tilannetta, jossa eristettyyn reikään pinnoittuu enemmän kuparia. Vertailemalla reikien sijaintia aghiolla (1–4) voidaan tutkia aiheutuuko tästä eroja saavutetussa pinnoituksessa.

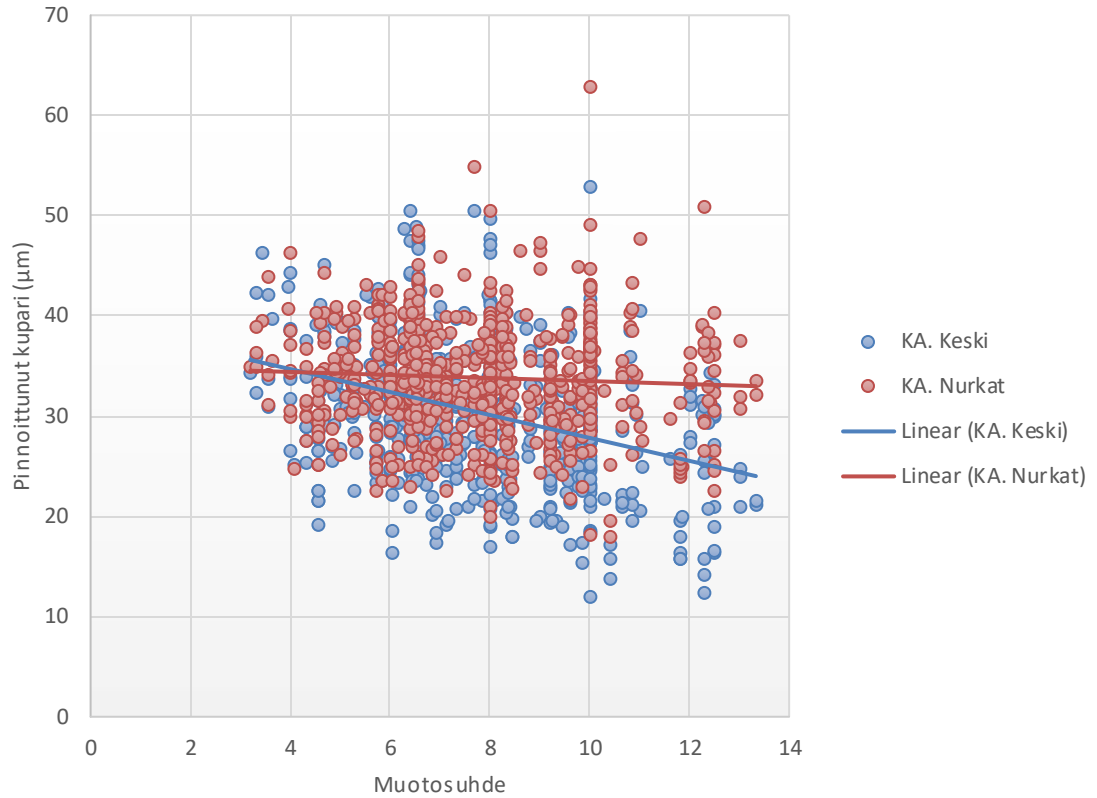
7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä kappaleessa tarkastellaan pulssikuparoinnin nykytilannetta kerätyn aineiston avulla. Erilaisten kuvaajien avulla tehdään havaintoja ilmenevistä poikkeamista ja trendeistä. Havaintojen perusteella suoritetaan tilastollisia testejä, joiden avulla pyritään löytämään selittäviä tekijöitä poikkeamille. Aineisto koostuu kappaleessa 6 kerätyistä eristä, joiden tulppareikiin on ajettu 25 μm paneelipinnoitus sekä erikseen suoritetuista lisämittauksista.

Aineiston käsittelyn jälkeen esitellään pulssikuparointilinjalle rakennettuja datan hankintajärjestelmiä. Esittelyyn kuuluvat käytetyt ohjelmistot ja laitteet, järjestelmien arkkitehtuuri sekä toteutuksen vaiheet. Kappaleen lopuksi pohditaan havaittuja ilmiöitä ja käydään läpi tulevaisuuden kehityskohteita.

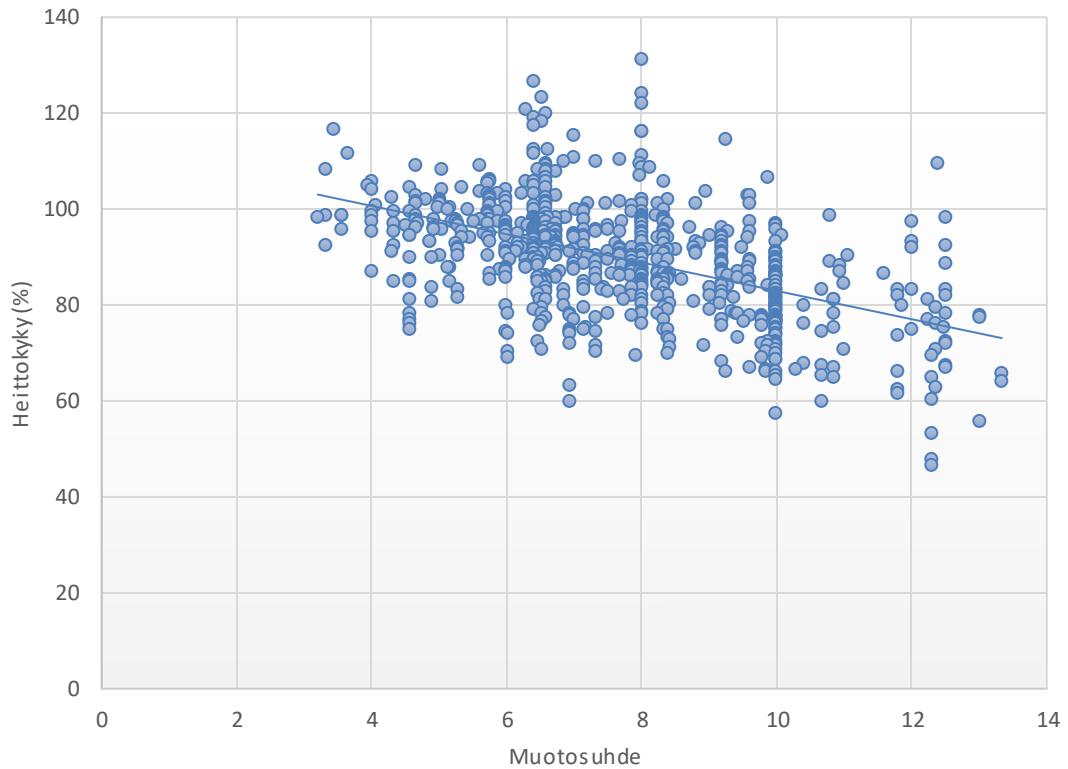
7.1 Aineiston vaihtelu

Aineistoa käsiteltäessä on heti selvää esiintyvä vaihtelu. Tarkastelu aloitettiin tutkimalla yleisesti muotosuhteen vaikutusta heittokykyyn sekä pinnoituksen paksuuteen reiän keskellä sekä nurkissa. Tätä varten piirrettiin kappaleessa 6.1 kerätyistä 715 otoksen aineistosta kuvaajia, joihin sovitettiin lineaarisia trendiviivoja kuvaajien havainnollistamiseksi. Muotosuhde lasketaan siis jakamalla aihion paksuus läpiviennin halkaisijalla. Mitä korkeampi muotosuhde on, sitä haastavampi on saavuttaa tasainen pinnoitus läpiviennin sisällä sekä levyn pinnoilla. Kuvassa 17 on nähtävissä muotosuhteen vaikutus pinnoituksen paksuuteen reiän keskellä ja nurkissa. Nähtävissä on odotettu ilmiö, jossa muotosuhteen kasvun myötä kuparia pinnoittuu vähemmän reiän keskelle. Useassa levyssä ei ole saavutettu 25 μm rajaa, joka minimissään pyritään pinnoittamaan reikien pinnoille. Lisäksi on havaittavissa poikkeavia arvoja, joissa kuparia on pinnoittunut yli 50 μm . Tällaisia tuloksia voidaan todennäköisesti saavuttaa ainoastaan pinnoittamalla virheellisillä ohjelmilla tai vaihtoehtoisesti ajamalla levy kahdesti linjan läpi.



Kuva 17. Muotosuhteen vaikutus kuparin paksuuksiin reiän nurkissa ja keskellä.

Kuvassa 18 esitetään muotosuhteen vaikutus heittokykyyn. Heittokyky on laskettu kaavan 4 mukaisesti. Odotetusti heittokyky heikkenee muotosuhteen kasvun myötä. Rajana hyvälle heittokykyille pidetään 80 %. Yli 120 prosentin heittokyky ei myöskään ole ideaalinen. Näissä tapauksissa kuparia on kyllä pinnoittunut riittävästi reiän nurkkiin, mutta todennäköisesti liian pitkän pinnoitusajan tai väärin valittujen pinnoitusparametrien vuoksi reiän keskusta on ylipinnoittunut.



Kuva 18. Muotosuhteen vaikutus heittokykyyn.

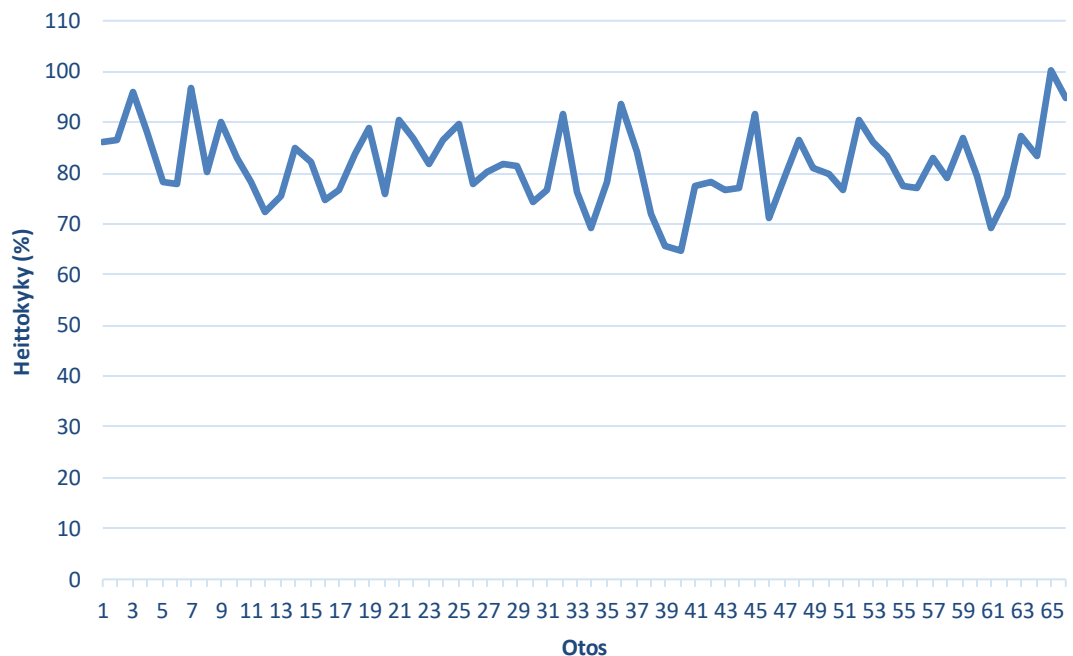
Taulukossa 5 nähdään prosenttiosuudet muotosuhteen mukaan erille, joissa ei ole saavutettu 80 % heittokykyä tai 25 µm pinnoitusta reikien keskelle. Taulukon perusteella voidaan todeta pinnoitushaasteiden alkavan levyistä, joiden muotosuhde on suurempi kuin 10. Näistä levyistä ainoastaan noin 51 prosentissa on saavutettu toivottu heittokyky.

Taulukko 5. Prosenttiosuudet rei'ille, joissa ei ole saavutettu 25 µm pinnoitusta reiän keskellä ja rei'ille, joiden heittokyky on pienempi kuin 80 %. Prosenttiosuudet on laskettu eri muotosuhteille.

Muotosuhde	Pinnoittunut reiän keskelle <25 µm	Heittokyky <80 %
< 6	9/119 = 7,56 %	4/119 = 3,36 %
6–8	33/261 = 12,64 %	32/261 = 12,26 %
8–10	53/194 = 27,32 %	38/194 = 19,59 %
10–12	30/107 = 28,04 %	52/107 = 48,60 %
> 12	15/34 = 44,12 %	23/34 = 67,65 %

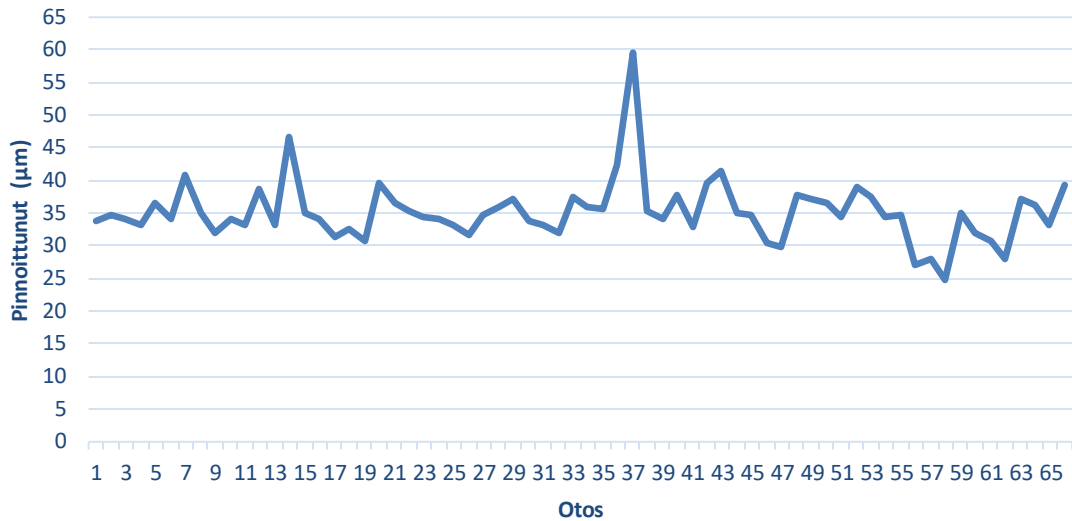
7.2 Tuotteen sisäinen vaihtelu

Aineiston vaihtelua voi osaltaan aiheuttaa eroavaisuudet tuotteiden rakenteissa. Tarkastelemalla ainoastaan tietyn tuotteen sisäistä vaihtelua voidaan tarkistella otoksia, joiden aihiot ovat rakenteeltaan identtisiä. Aineistossa yksi otos kuvaa siis jonkin tuotteen tietyistä erästä otettuja hielaboratorion mittauksia läpivientiin pinnoittuneen kuparin paksuuksista. Jokaisesta reiästä on otettu 6 mittausta kuvan 14 mukaisesti, joiden avulla voidaan laskea pinnoittuneen kuparin keskiarvo sekä heittokyky. Kappaleessa 6.1 kerätystä 715 otoksen joukosta löytyi 66 otosta tuotteesta AD214906. Kuvassa 19 on esitetty tuotteen AD214906 otosten välinen vaihtelu saavutetun heittokyvyn mukaan.



Kuva 19. Tuotteen AD214906 heittokyvyn vaihtelu.

Vastaavasti kuvassa 20 esitetään tuotteen AD214906 pinnoittuneen reikäkuparin keskiarvojen vaihtelua. Esitettyjen kuvaajien perusteella voidaan vaihtelun todeta olevan huomattavaa myös tuotteen sisäisesti, jolloin rakenteelliset erot tuotteiden välillä eivät riitä selittämään vaihtelua.



Kuva 20. Tuotteen AD214906 pinnoittuneen reikäkuparin keskiarvo.

Tuotteen sisäistä vaihtelua tutkittiin tarkemmin kappaleessa 6.2 kerättyjen tuotteen AD214906 lisämittausten avulla. Lisämittauksille laskettiin reikäkohtaisesti kuparin paksuuden minimi (μm), keskiarvo (μm), sekä heittokyky (%). Koska reikämatriisista otettujen rivimittausten todettiin olevan lähes identtisiä keskenään, voitiin todeta yhden reiän mittauksen olevan riittävä kuvaamaan reikämatriisissa saavutettua pinnoitusta. Jokaisesta erästä kerättiin siis 8 mittaustulosta; 4 yksittäisistä rei'istä (Y) ja 4 reikämatriiseista (M). Mittaustuloksille lasketut arvot nähdään taulukossa 6.

Taulukko 6. Tuotteesta AD214906 kerätyt lisämittaukset yksittäisille rei'ille (Y) ja reikämatriiseille (M).

Eränumero	Sijainti aghiolla(1-4)	Y/M	Average (µm)	Min. (µm)	Heittokyky (%)
1274946	1	Y	39,31	35,60	89,69
1274946	2	Y	35,30	30,60	93,04
1274946	3	Y	36,86	33,38	94,20
1274946	4	Y	41,21	38,67	93,78
1275955	3	Y	38,71	30,75	80,33
1275955	1	Y	44,81	34,59	80,38
1275955	1	Y	41,54	35,00	84,20
1275955	4	Y	42,69	37,23	82,28
1274060	2	Y	32,79	29,74	95,86
1274060	3	Y	35,50	31,96	97,46
1274060	4	Y	34,76	32,57	107,78
1274060	2	Y	37,70	36,61	98,93
1274948	1	Y	32,98	30,75	98,19
1274948	2	Y	32,31	30,35	97,97
1274948	3	Y	31,10	29,74	97,47
1274948	4	Y	33,93	33,01	105,26
1274946	1	M	36,08	29,74	80,83
1274946	2	M	35,10	29,74	86,78
1274946	3	M	37,19	31,01	84,83
1274946	4	M	39,20	36,65	92,73
1275955	3	M	35,55	28,33	78,09
1275955	1	M	37,93	29,94	79,16
1275955	1	M	37,22	29,94	81,28
1275955	4	M	37,02	32,98	87,06
1274060	2	M	30,76	27,93	93,72
1274060	3	M	31,69	29,94	99,84
1274060	4	M	32,77	32,17	100,47
1274060	2	M	32,23	30,14	96,89
1274948	1	M	31,26	29,54	100,00
1274948	2	M	31,53	29,54	94,01
1274948	3	M	32,53	30,20	96,64
1274948	4	M	32,78	31,16	104,24

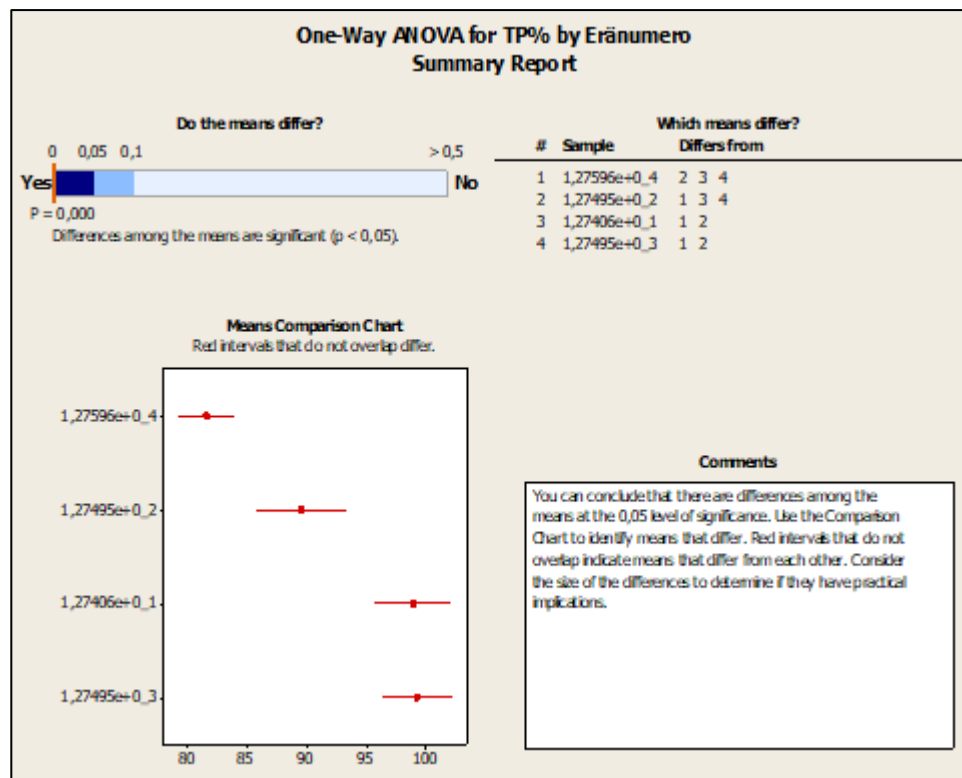
Jotta voidaan varmistua poikkeavatko erät keskenään tilastollisesti merkittävästi, suoritettiin lisämittauksille kaksi yksisuuntaista varianssianalyysiä, joissa riippuvina muuttujina olivat heittokyky sekä pinnoittuneen reikäkuparin keskiarvo. Vastaavasti tekijänä oli eränumero. Näin ollen jokaisesta erästä on siis kahdeksan otosta.

Kun erien keskiarvoja merkitään " $\mu_1, \mu_2 \dots$ ", muodostuvat hypoteesit seuraavalla tavalla:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ Erien välillä ei tilastollisesti merkittävää eroa.

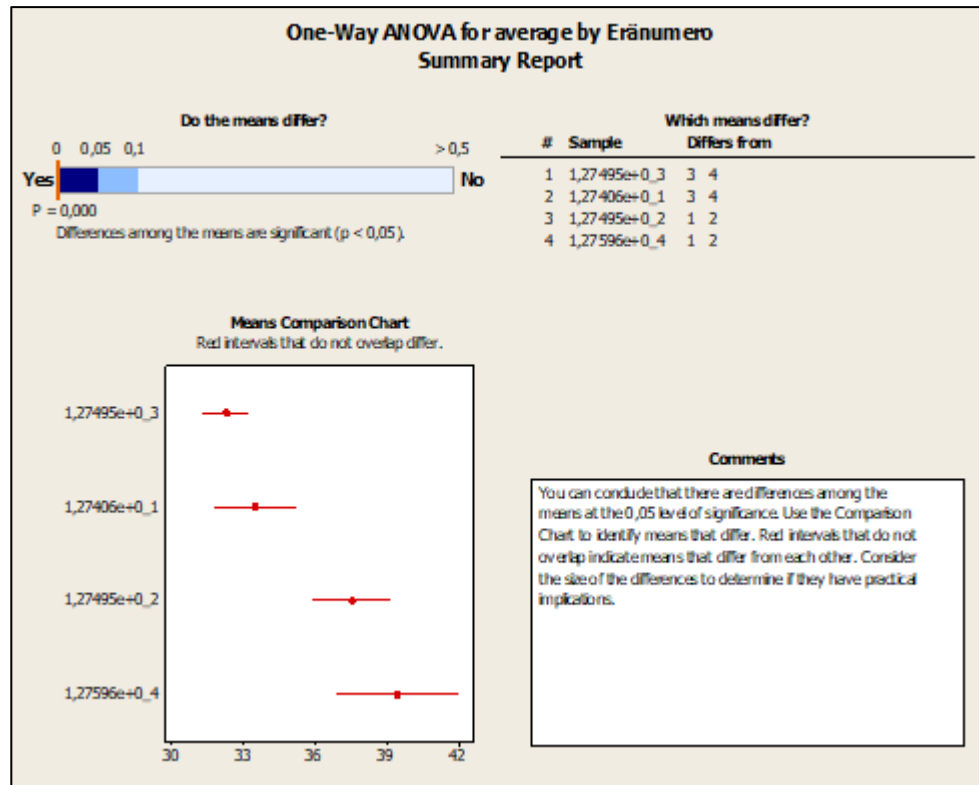
$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$ Vähintään yksi erä eroaa.

Varianssianalyysit suoritettiin Minitab -ohjelmistolla. Kuvassa 21 nähdään varianssianalyysin tulos, jossa riippuvana muuttujana heittokyky. Käytetty merkitsevyystaso oli 0,05. P-arvo on likimain nolla, jolloin heittokyvyn voidaan todeta eroavan tilastollisesti merkittävästi jopa tuotteen sisäisesti.



Kuva 21. Minitab -ohjelmistolla lasketun varianssianalyysin tulokset, jossa riippumattomana muuttujana heittokyky.

Vastaavasti varianssianalyysin tulos, jossa riippumattomana muuttujana reikäkuparien keskiarvot nähdään kuvassa 22. Käytetty merkitsevyystaso oli 0,05. Jälleen p-arvo on likimain nolla, jolloin myös reikäkuparien keskiarvot poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkittävästi tuotteen sisällä.



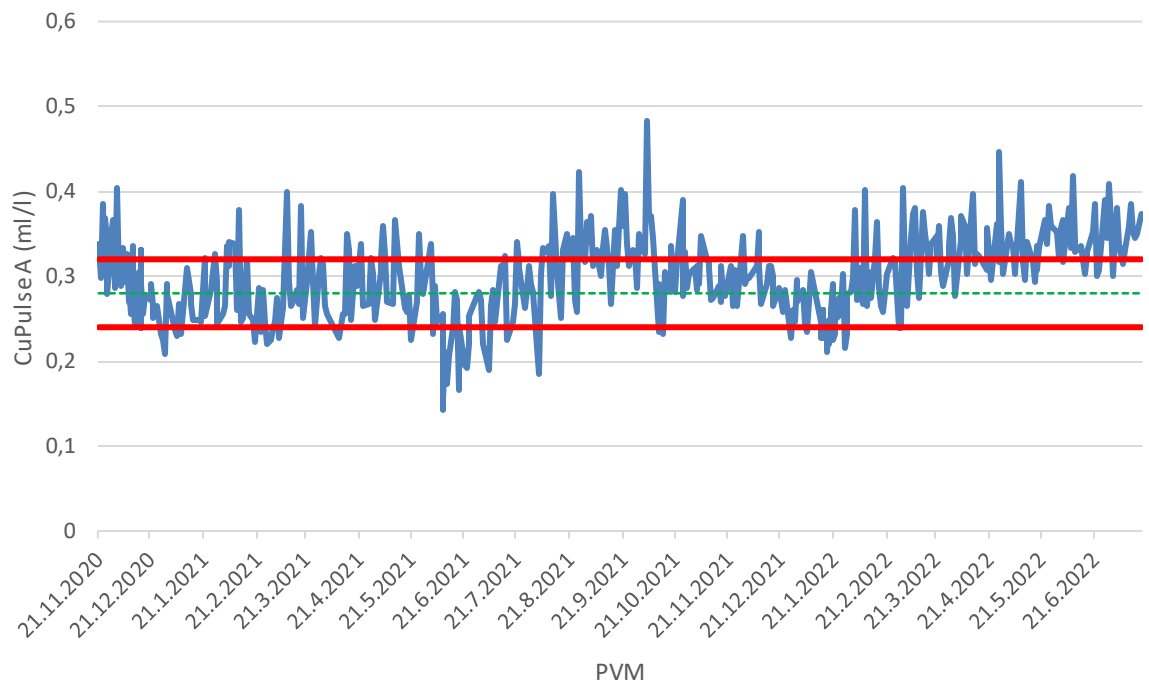
Kuva 22. Minitab -ohjelmistolla lasketun varianssianalyysin tulokset, jossa riippumattomana muuttujana reikäkuparien keskiarvot.

Varianssianalyysien perusteella aineiston vaihtelua ei voida selittää poikkeavilla tuoterakenteilla. Lisämittausten keräämisen yhteydessä merkittiin ylös myös reikien sijainti ahiolla (1–4) tarkoituksena vertailla sijainnin merkitystä saavutettuun pinnoitukseen. Tämän ei myöskään todettu selittävän ilmenevää vaihtelua. Näin ollen syy vaihtelulle täytyy olla eroavaisuudet pinnoitusolosuhteissa tai -arvoissa.

Kuten aiemmin kappaleessa 4.4 todettiin, pinnoitukseen vaikuttavia tekijöitä on pulssikuparointilinjan tapauksessa huomattava määrä ja saavutettu pinnoitus on monen tekijän summa. Aineistossa esiintyvä vaihtelu voikin johtua useasta eri tämän työn teoriaosuudessa esitetystä muuttujasta. On mahdollista, että pinnoituksen vaihtelua ei kokonaisuudessaan pystytä selittämään kerätyllä aineistolla sekä saatavilla olevilla selittäväillä tekijöillä.

7.3 Kuparointikylvyn konsentraatiot

Seuraavaksi pyrittiin tarkastelemaan kuparointikylvyn konsentraatioiden vaikutusta pinnoitukseen. Konsentraatioita mitataan 1–4 kertaa viikossa komponentista riippuen, mikä rajoittaa sellaisten erien määrää joista on saatavilla päiväkohtaiset konsentraatiot. Näin ollen saatavia havaintopisteitä oli rajallisesti joillekin komponenteille. Lisäksi kylvyn pitoisuuksia on muutettu 13.11.2020, jolloin tarkastelu tuli aloittaa sen jälkeen. CuPulse A:n vaihtelu on esitettyä kuvassa 23. Kuvaajasta nähdään heti, että konsentraatio ei pysy asetettujen ylä- ja alarajojen sisällä.



Kuva 23. CuPulse A:n konsentraation vaihtelua esittävä kuvaaja. Asetettu yläraja on 0,32 ml/l ja alaraja 0,24 ml/l.

Cpk (Process capability index) kuvaa sitä, kuinka lähellä prosessi on asetettuja rajojaan suhteessa luonnolliseen hajontaansa nähden. Hyvänä Cpk:n rajana pidetään arvoja, jotka ovat suurempia kuin 1,33. Kuparointikylvyn komponenteille lasketut Cpk-arvot nähdään taulukossa 7. Taulukosta voidaan todeta, että ainoastaan CuPulse C:n Cpk-arvoa voidaan pitää hyvänä.

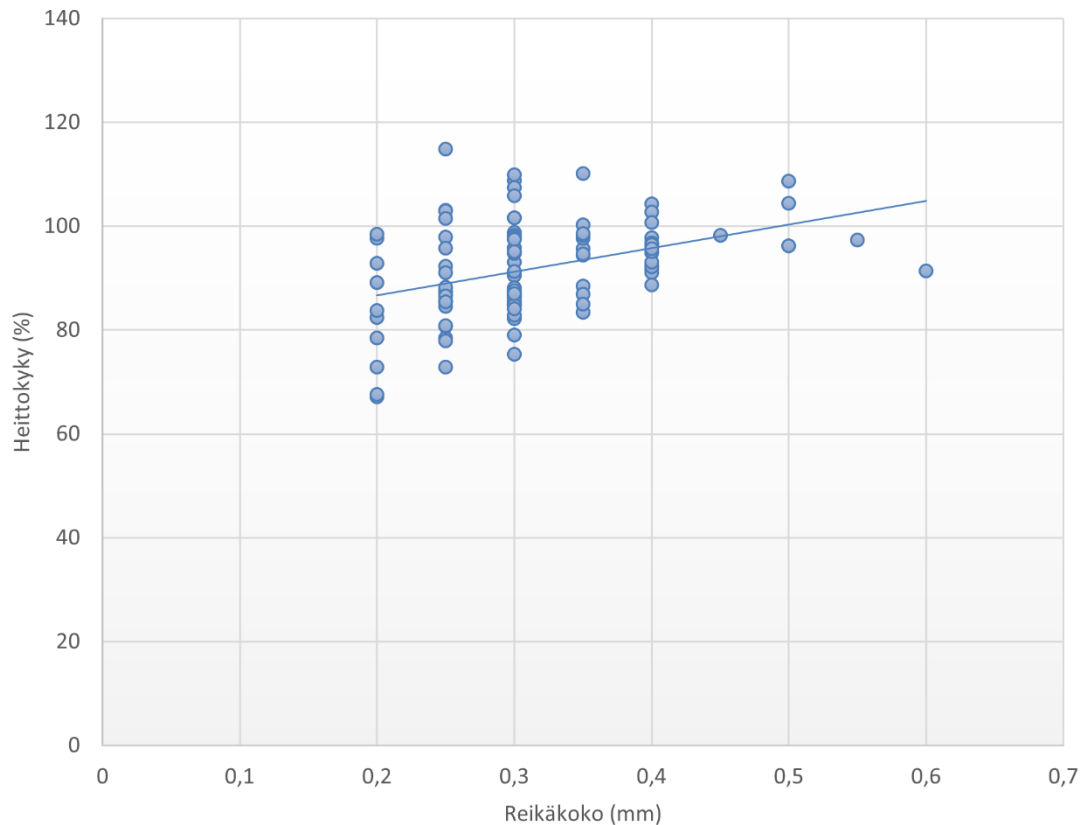
Taulukko 7. Kuparointikylvyn komponenttien Cpk-arvot.

Komponentti	Keskiarvo	Keskihajonta	Yläraja	Alaraja	Cpk
CuPulse A (ml/l)	0,30	0,05	0,32	0,24	0,15
CuPulse C (ml/l)	14,88	0,63	20	12	1,52
Cl ⁻ (mg/l)	31,33	1,47	35	30	0,30
H ₂ SO ₄ (g/l)	225,28	2,48	235	215	1,31
CuSO ₄ (mg/l)	95,99	8,51	110	75	0,55

Edellä esitetyt haasteet pitää komponenttien konsentraatiot asetettujen ylä- ja alarajojen sisällä voivat aiheuttaa vaihtelua pinnoituksessa. Tehtyjen havaintojen perusteella CuPulse A:n annostelua säädettiin 12.9.2022. Konsentraatioiden vaikutusta heittokykyyn sekä pinnoituksen paksuuteen tutkittiin kuvaajien sekä erilaisten tilastollisten testien avulla. Levyjä pyrittiin myös jakamaan eri profiilien, muotosuhteiden ja reikäkokojen mukaan. Suuresta hajonnasta ja vähäisistä havaintopisteistä johtuen selkeää korrelaatiota konsentraatioiden ja saavutetun pinnoituksen välillä ei löydetty.

7.4 Pinnoitusprofiilit

Käytettävä pinnoitusprofiili määräytyy pinnoitettavan aihion paksuuden mukaan. Väärin valittu profiili tai profiilin sisäiset parametrit saattavat aiheuttaa vaihtelua pinnoituksissa. Eri pinnoitusprofiilit sekä niiden sisäiset parametrit 25 µm pinnoitusta ajettaessa esiteltiin taulukossa 4. Vertailemalla eri pinnoitusprofiileilla saavutettuja heittokykyjä nähtiin odotettu ilmiö, jossa pinnoitusongelmia esiintyi enemmän paksummilla levyillä. Vastaavasti heittokyky kasvoi reikäkoon mukana. Esimerkkinä eräästä tarkastellusta kuvaajasta on kuvassa 24 esitelty profiilin 5 heittokyky suhteessa reikäkoon. Vaikkakin profiileja vertailtiin keskenään rajaamalla tarkastelua useilla eri muuttujilla, ei profiilien tai käytettävien parametrien välillä löydetty selkeitä eroja saavutetussa pinnoituksessa.



Kuva 24. Profiililla 5 (aihion paksuus 2,31–2,7mm) saavutettu heittokyky suhteessa reikäkokoan.

7.5 Tulosten luotettavuusanalyysi

Jotta voidaan varmistua siitä, että hielaboratoriossa otetut mittaustulokset kuvaavat todellista tilannetta riittävän tarkasti, laskettiin aiemmin esitellyistä lisämittauksista (taulukko 6) yhden otoksen keskiarvon t-testit yksittäisen reiän (Y) ja reikämatriisin (M) mittaustulosten eroille. Näin voidaan tarkastella, poikkeavatko reikien välille lasketut erot tilastollisesti nolasta. Testissä siis käytännössä tutkitaan, kuinka suuri vaihtelu on mahdollista saavuttaa nykyisellä mittausmenetelmällä, jossa operaattori valitsee ainoastaan yhden reiän mitattavaksi. Vertailussa olevat reiät on mitattu samasta kohdasta aihioita. Reikien välille lasketut erot (Y-M) nähdään taulukossa 8.

Taulukko 8. Yksittäisten reikien (Y) ja reikämatriisien (M) välille lasketut erotukset.

Eränumero	Sijainti Aihioilla	Reikäkuparin keskiarvo (μm)	Reikäkuparin minimi (μm)	Heittokyky (%)
1274946	1	3,23	5,87	8,89
1274946	2	0,21	0,87	6,26
1274946	3	-0,33	2,37	9,37
1274946	4	2,02	2,02	1,05
1275955	3	3,18	2,42	2,24
1275955	1	6,88	4,65	1,23
1275955	1	4,32	5,06	2,92
1275955	4	5,67	4,25	-4,78
1274060	2	2,04	1,81	2,14
1274060	3	3,81	2,02	-2,39
1274060	4	1,99	0,41	7,29
1274060	2	5,46	6,47	2,03
1274948	1	1,72	1,21	-1,81
1274948	2	0,78	0,82	3,96
1274948	3	-1,43	-0,46	0,83
1274948	4	1,15	1,86	1,02

Testattavat hypoteesit ovat kaksisuuntaisessa testauksessa ($\mu_0 = 0$):

$H_0 : \mu = \mu_0$ Reikien välillä ei ole eroa.

$H_1 : \mu \neq \mu_0$ Reikien välillä on tilastollisesti merkitsevä ero.

Minitab-ohjelmistolla lasketun testin tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Yksittäisen reiän (Y) ja reikämatriisin (M) t-testin tulokset. Taulukossa keskiarvo kuvaa keskimääräistä eroa reikien välillä. Vastaavasti luottamusväli kertoo, että reikien väliset erot ovat 90 % todennäköisyydellä rajojen sisällä.

	P-arvo	Keskiarvo	Luottamusväli (90 %)
Reikäkuparin keskiarvo (μm)	~ 0	2,5418 μm	(1,5376; 3,5460) μm
Reikäkuparin minimi (μm)	~ 0	2,6034 μm	(1,7064; 3,5005) μm
Heittokyky (%)	0,011	2,5142 %	(0,79212; 4,2362) %

Tuloksista nähdään odotetusti, että yksittäiseen reikään pinnoittuu keskimäärin enemmän kuparia, sekä saavutettu heittokyky on parempi. Koska hylkäämisvirheen todennäköisyys (p-arvo) on kaikille muuttujille selkeästi $< 0,1$ voidaan nollahypoteesi hylätä. Vastahypoteesi siis hyväksytään, jolloin erot tiheästä reikämatriisista ja yksittäisestä reiästä mitattujen pinnoitusten välillä ovat tilastollisesti merkittäviä. Tästä huolimatta ei voida vielä todeta mittausmenetelmän olevan liian epätarkka ja syy aineistossa esiintyvälle vaihtelulle.

Käytetty 90 prosentin luottamusväli (Confidence interval) kertoo, että otoskeskiarvon ja asetetun nollahypoteesin (0) väliset erot ovat taulukon 9 esittämien arvojen välillä 90 prosentin todennäköisyydellä. Vertailemalla näitä luottamusvälejä havaittuihin tuotteen sisäisiin vaihteluihin huomataan ettei nykyisen mittausmenetelmän avulla saada vastaavaa vaihtelua aikaiseksi. Erityisesti kun otetaan huomioon, että taulukossa 9 esitetyt tulokset kuvaavat niin sanottua huonointa mahdollista tilannetta, jossa reiät on valittu suurimman mahdollisen eron saavuttamiseksi. Esimerkkinä kappaleessa 8.2 esitellyn 66 otoksen vaihteluvälit tuotteesta AD214906 heittokyvylle sekä reikäkuparien keskiarvoille ovat taulukon 10 mukaiset.

Taulukko 10. Aineistossa havaittu tuotteen AD214906 heittokyvyn ja reikäkuparien keskiarvojen vaihteluvälit ja keskihajonta.

	Vaihteluväli	Vaihteluvälin pituus	Keskihajonta
Heittokyky (%)	100,2–64,7 %	35,53 %	7,36 %
Reikäkuparin keskiarvo (μm)	59,6–24,8 μm	34,79 μm	4,69 μm

Vaikkakin mittausmenetelmä voi aiheuttaa pientä hajontaa mittaustuloksissa, voidaan sen todeta olevan riittävän tarkka kuvaamaan saavutettuja pinnoituksia. Näin ollen aineistossa havaitun vaihtelun voidaan todeta johtuvan vaihtelevista pinnoitusolosuhteista.

7.6 Datanhankinnan toteutus ja visualisoinnit

Eräs työn tavoitteista oli parantaa pulssikuparointilinjan seurattavuutta erilaisten datan hankintamenetelmien avulla. Näin ollen päädyttiin suunnittelemaan ja toteuttamaan monitorointijärjestelmä, jonka avulla saadaan tulevaisuudessa parempi käsitys

pinnoituksissa havaitulle vaihtelulle. Samalla pyrittiin löytämään ratkaisuja, jotka ovat toteutettavissa myös muille prosessilinjoille. Erilaisten IoT-ratkaisujen (Internet of Things) ja pilvipalveluiden avulla linjalle suunniteltiin järjestelmä, joka mahdollistaa lähes reaaliaikaisen linjanolosuhteiden monitoroinnin lisäksi mahdollisuuden kerätä ja tallentaa linjalla ajettujen tankojen pinnoitusparametrejä.

Työn pääpaino on OSST-ohjausjärjestelmälle suunnitellussa ja toteutetussa monitorointijärjestelmässä, joka kerää päiväkohtaisesti linjalla ajettujen tankojen pinnoitusparametrejä. Tämän ohessa toteutettiin myös erillinen soveltuvuus selvitys (engl. Proof of concept, POC) Siemensin valmistamalle IoT gatewaylle, joka mahdollistaa lähes reaaliaikaisen linjan parametrien seurannan PLC:n ulostulojen ja lähtöjen avulla. Koska Aspocomp Group Oyillä on käytössä S7-pohjaisia PLC:itä useilla linjoilla, on jatkossa mahdollista hyödyntää näille linjoille tässä työssä esiteltävää toteutustapaa.

Molemmissa ratkaisuissa pilviympäristöksi valittiin Microsoft Azure, joka on pilvilaskenta-alusta ja tarjoaa kattavan valikoiman erilaisia palveluita. Käyttämällä ainoastaan yhden palveluntarjoajan palveluita voidaan saada varmuutta järjestelmän kehittämiseen, käyttöönottoon ja ylläpitoon. Tässä kappaleessa esitellään ensin lyhyesti ratkaisuissa käytettyjä ohjelmistoja ja laitteita. Näihin kuuluvat käytetyt Azure-palvelut, OSST-järjestelmän protokolla sekä soveltuvuus selvityksessä käytetty Siemensin CloudConnect 712. Lopuksi kuvataan molempien ratkaisuiden arkkitehtuuria sekä toteutuksen vaiheita.

7.6.1 Työssä käytetyt ohjelmistot ja laitteet

Alla on listattuna sekä lyhyesti esiteltynä ratkaisuissa käytettyjä Azure-palveluita. Näihin kuuluvat Power BI, Azure Data Factory, Azure Data Lake, Azure SQL Database, IoT Hub, Stream Analytics sekä Blob Storage.

- Power BI on interaktiivinen työkalu tiedon visualisointiin. Sen avulla on mahdollista muuntaa ja raportoida eri tietolähteistä saapuvaa dataa dynaamisten kuvaajien ja taulukoiden avulla. Data voidaan lukea suoraan tietokannasta tai striiimata IoT-laitteista ja verkkosivuilta. Vaihtoehtoisesti sitä voidaan lukea strukturoiduista tiedostoista, kuten Excel-taulukot, CSV (Comma-Separated Values), XML (Extensible Markup Language) tai JSON (JavaScript Object

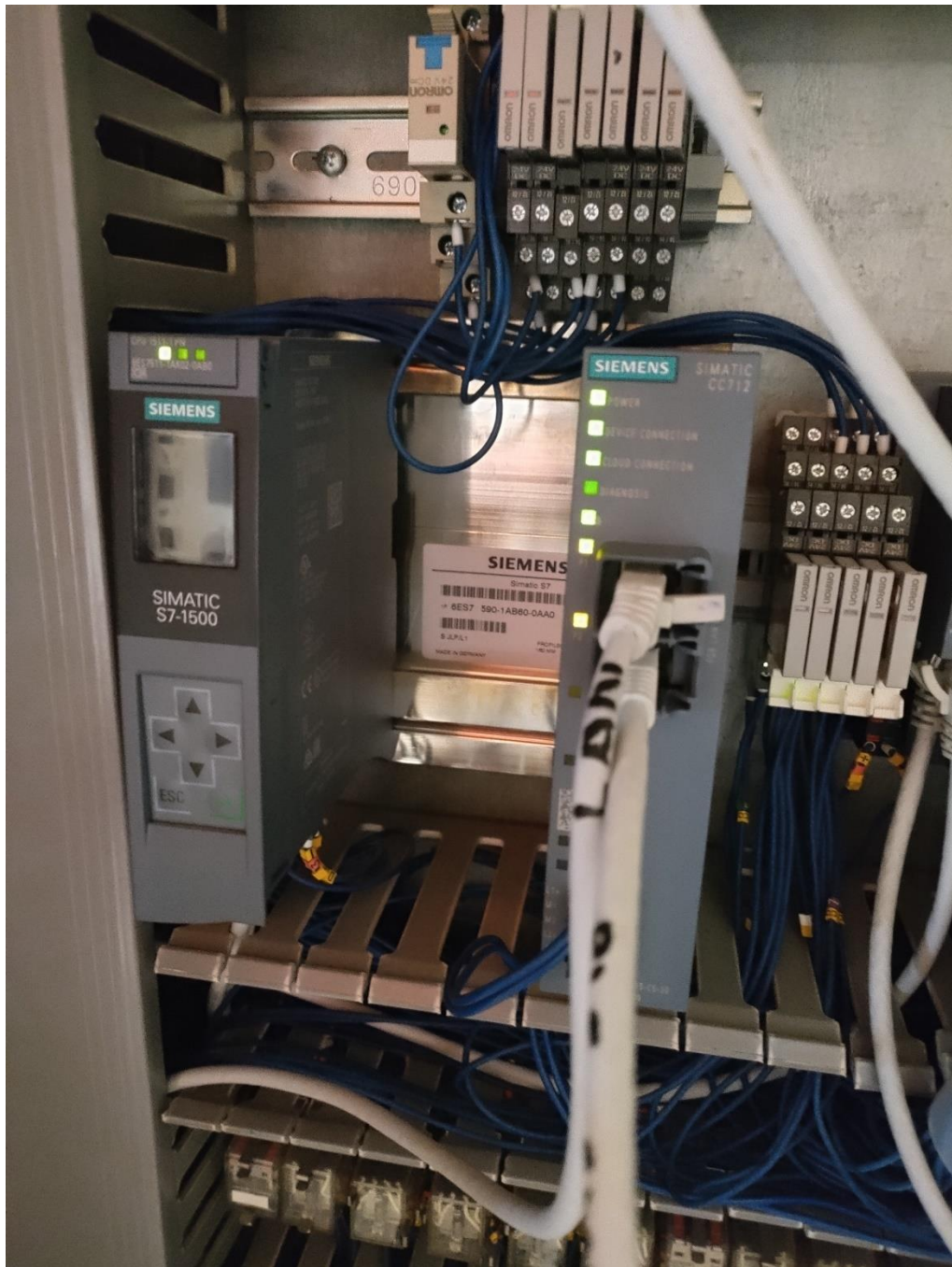
Notation). Työssä suunnitellaan interaktiivisia raportteja, joiden avulla voidaan visualisoida linjalta saatavaa dataa. Data voidaan suodattaa haluttujen parametrien mukaan ja viedä edelleen Excel-taulukoihin analysointia varten. (Dineva & Atanasova 2022) (Microsoft Learn for Azure 2022)

- Azure Data Factory on pilvipalvelu, joka on suunniteltu toteuttamaan erilaisia ETL-prosesseja (extract-transform-load) ja dataintegraatioprojekteja. Suuret datamäärät vaativat usein palvelua, joka pystyy orkestroimaan prosesseja, joissa kerätyt datat saadaan jalostettua käyttökelpoisiksi. Yksinkertaisesti ilmaistuna Data Factory sisältää sarjan toisiinsa yhdistettyjä järjestelmiä, jotka mahdollistavat datapohjaisen tiedonkulun luomisen pilveen. Järjestelmien avulla voidaan luoda automatisoitua datan ohjausta sekä muuntamista. (Microsoft Learn for Azure 2022)
- Azure Data Lake on skaalautuva tiedon tallennus- ja analytiikkapalvelu. Data Lake koostuu kolmesta komponentista, joita ovat Data Lake Storage, Data Lake Analytics ja HDInsight. Esitettyjen komponenttien avulla voidaan tallentaa useassa eri muodossa ja koossa olevaa dataa, sekä suorittaa kaikenlaista prosessointia ja analytiikkaa eri alustoilla ja kielillä. Palvelu on monikäyttöinen ja se on pääasiassa suunniteltu organisaatioille, jotka haluavat saada suuria datamääriä hyötykäyttöön. (Microsoft Learn for Azure 2022)
- Azure SQL Database on tietokantamoottori, jolla voidaan hoitaa useimmat tietokannan hallintatoiminnot. Pilvipalvelun avulla voidaan luoda erilaisia tiedontallennuskerroksia, jotka soveltuvat hyvin nykyaikaisiin pilviratkaisuihin. Sen avulla voidaan käsitellä sekä relaatiotietokantoja, että ei-relaatiotietokantoja. (Microsoft Learn for Azure 2022)
- IoT Hub on Azuren pilvipalvelu, joka mahdollistaa luotettavan ja turvallisen kaksisuuntaisen viestinnän IoT-laitteiden ja pilven välillä. Toimivan kommunikaation luomiseksi IoT Hubiin liitettävät laitteet tulee rekisteröidä. IoT Hub -identiteettirekisterin avulla luodaan jokaiselle rekisteröidylle IoT-laitteelle tarvittavat laitetunnisteet, jotta laitteet voidaan yksilöidä. Näitä laitetunnisteita ovat laite-ID, ensisijainen avain ja yhteysmerkkijono. Laitekohtainen yhteysmerkkijono pohjautuu luotuun ensisijaiseen avaimen, jota käytetään laitteen todentamiseen kaikissa laitteen ja IoT Hubin välisessä kommunikoinnissa. Onnistunut kommunikointi laitteen ja IoT-hubin välillä vaatii, että laitteesta lähetetyt viestit sisältävät IoT Hubin vaatimat

konfigurointitiedot ja rekisteröidyt laitetunnisteet. Kommunikaation toimiessa IoT Hub vastaa laitteilta vastaanotettujen sanomien synkronoinnista ja välittämisestä eteenpäin tilatuille palveluille. (Dineva & Atanasova 2022; Microsoft Learn for Azure 2022)

- Stream Analytics on tiedonkäsittelymoottori, jonka avulla on mahdollista prosessoida nopeasti suuria määriä dataa minimaalisilla viiveillä. Datan prosessointi onnistuu samanaikaisesti useista eri lähteistä, kuten IoT-laitteista tai erilaisista applikaatioista. Saapuva data voidaan ohjata muihin palveluihin hälytyksien, visualisointien ja datanvarastoinnin luomista varten. Stream Analyticsistä voidaan puhua arkkitehtuurin loogisena osana. Ennen ohjausta muihin palveluihin saapuva data voidaan käsitellä ja lajitella ennalta määrättyjen kyselyiden mukaisesti. (Dineva & Atanasova 2022; Microsoft Learn for Azure 2022)
- Blob (binary large object) Storage on osa Azure Data Lakea. Se on optimoitu varastoimaan suuria määriä strukturoimatonta dataa, kuten tekstiä, kuvia videoita, ääntä ja IoT-dataa. Tallennustilaa on kahta eri tyyppiä – kuuma- ja kylmävarasto. Kuumavarastossa säilytetään usein käytettävää dataa, jonka tulee olla nopeasti saatavilla. Kylmävarastossa säilytetään pitkäikäiseen varastointiin tarkoitettua dataa, jolle on käyttöä vain harvoin. Blob Storagen käyttötarkoitus on jatkuvan suodatetun ja raa'an datan varastointi, kuten järjestelmien toimintalogit. (Dineva & Atanasova 2022; Microsoft Learn for Azure 2022)

Työssä toteutetun soveltuvuusselvityksen keskeisin laite on SIMATIC CloudConnect 712. Se on Siemensin valmistama, teollisuuskäyttöön suunniteltu IoT gateway. IoT gateway on reititin tyyppinen ratkaisu, jolla voidaan lukea PLC:n I/O-dataa ja lähettää sitä pilvipalveluihin. Näin ollen on mahdollista saavuttaa lähes reaaliaikainen prosessin seuranta ilman kalliita datanhankintajärjestelmiä. CloudConnect 712 mahdollistaa S7-pohjaisten ohjaimien datan lukemisen ja siirtämisen MQTT-protokollaa tukeviin pilvipalveluihin. Näihin pilvipalveluihin kuuluvat muunmuassa MindSphere, Microsoft Azure ja IBM Cloud. CloudConnect kommunikoi ethernetin avulla S7-300/400/1200/1500 CPU:iden kanssa. I/O data voidaan lähettää pilviympäristöön halutuilla sykleillä tai ennalta määrättyjen raja-arvojen ylittyessä. Pulsrikuparointilinjalle asennettu CloudConnect 712, sekä Siemens SIMATIC S7-1500 CPU ovat nähtävissä kuvassa 25. (Siemens 2022)



Kuva 25. Siemens S7-1500 PLC, sekä pulssikuparointilinjalle asennettu CloudConnect 712.

OSST-ohjausjärjestelmän käyttämä protokolla mahdollistaa datan lukemisen järjestelmästä TCP/IP kommunikation avulla. Tätä varten voidaan kirjoittaa skripti Windows-tietokoneelle, jolla on pääsy OSST-palvelimelle. Palvelin kuuntelee ennalta määrättyä porttia, jonka kautta voidaan kommunikoida erilaisten funktioiden avulla. Protokolla rakentuu siten, että luotu skripti pyytää haluttua toimintoa, johon palvelin

vastaa (request/reply). Jokaisen pyynnön tunnisteessa käytetään funktion kutsunimeä. Operaattoreille suunnattu, linjalla sijaitseva OSSTjwin graafinen käyttöliittymä käyttää tätä samaa menetelmää. Kuvassa 26 näkyvässä esimerkissä C (client) kuvaa asiakasohjelman viestiä ja S (server) palvelimen:

```

C:      ((Request xxx yyy))
        ::: data
        ((End xxx yyy))
        where:
        xxx is the request type with additional yyy (depending of
        request)
        data is additional data for the particular request

S:      ((Reply xxx yyy))
        ::: data
        ((End xxx yyy))
        where data could be one of:

        OK
        RequestNotInMain
        RequestNotInFunction
        EndFoundWithoutRequest
        NotAllowed (general error)
        data for the function

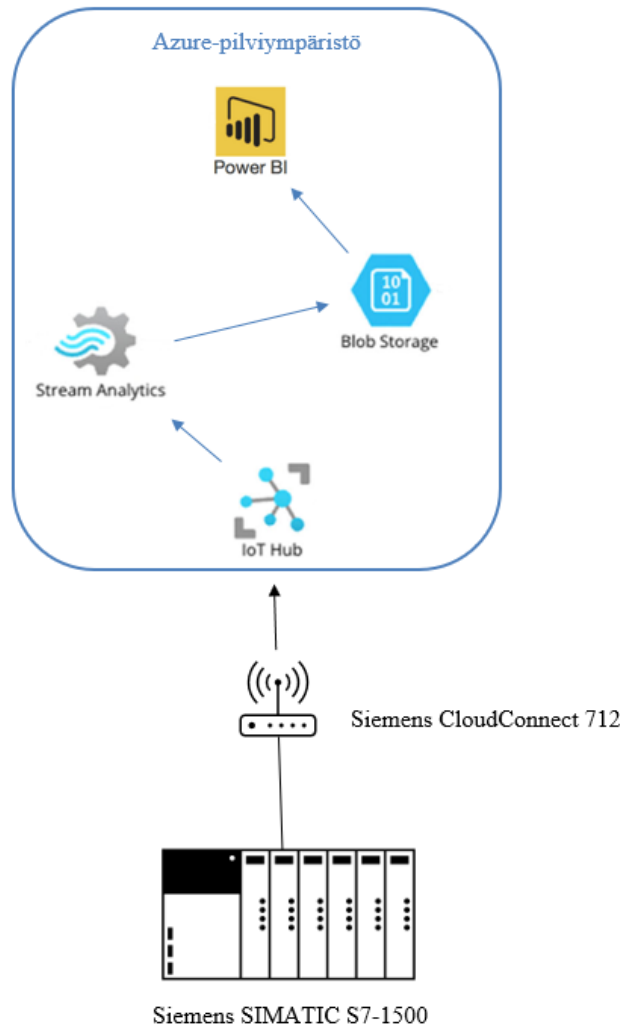
```

Kuva 26. OSST:n protokollan esimerkki (OSSTjwin Protocol 2018).

Käytettävä protokolla voidaan jakaa päävaiheeseen sekä erillisiin OSST-järjestelmän funktioihin. Päävaihe käsittelee yleisiä kommunikaatioita kuten konfigurointia ja järjestelmäversiota. Erillisten järjestelmäfunktioiden avulla saadaan haettua tankokohtaisia ajotietoja ajetuista levyistä ja käytetyistä pinnoitusohjelmista. (OSSTjwin Protocol 2018)

7.6.2 Soveltuvuus selvitys CloudConnect 712:lle

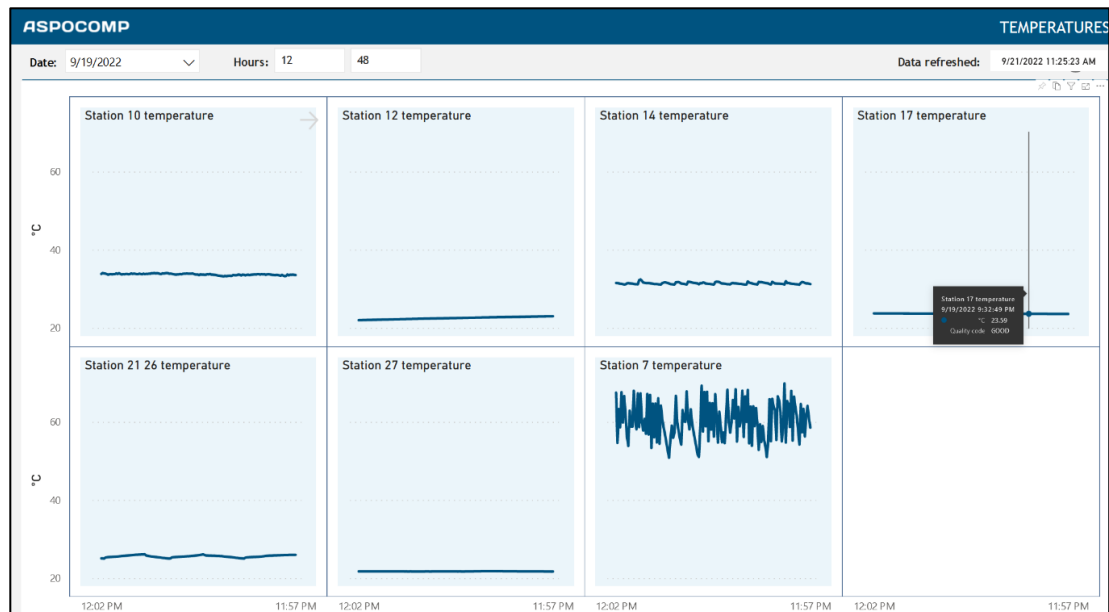
Suunnittelun ja toteutetun soveltuvuus selvityksen arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 27. Toteuksessa ulkoistettiin Azure-pilviympäristön konfigurointi sekä Power BI:hin luotavien visualisointien rakentaminen.



Kuva 27. CloudConnect 712:lle tehdyn soveltuvuus selvityksen arkkitehtuuri.

CloudConnect 712:hden konfigurointia varten poimittiin ensiksi PLC:n tagilista, josta on nähtävillä tulo- ja lähtöporttien osoitteet logiikalla. PLC:n ohjelmointiin itsessään ei tarvitse tehdä muutoksia, kunhan ohjaimen "PUT/GET" -toiminto on aktiivisena. Tämä luvittaa I/O datan lukemisen liitetyille laitteille. CloudConnectin konfigurointi tapahtuu WBM:n (Web Based Management) avulla. WBM koostuu web-sivusta, johon päästään käsiksi CloudConnectin porttiin liitetyn tietokoneen verkkoselaimen ja HTTPS:n avulla. Konfiguroinnissa määritettiin yhteydet IoT Hubin sekä CPU:n välillä, ja valittiin halutut datapisteet sekä niiden siirtosykli. Ratkaisun toimivuuden selvittämiseksi linjalta ajettiin eri altaiden lämpötila-arvoja viiden minuutin sykleillä pilvipalveluun, jolloin pystyttiin muodostamaan taulukoita lämpötilavaihteluiden seuranta varten. Pilveen ajettavat

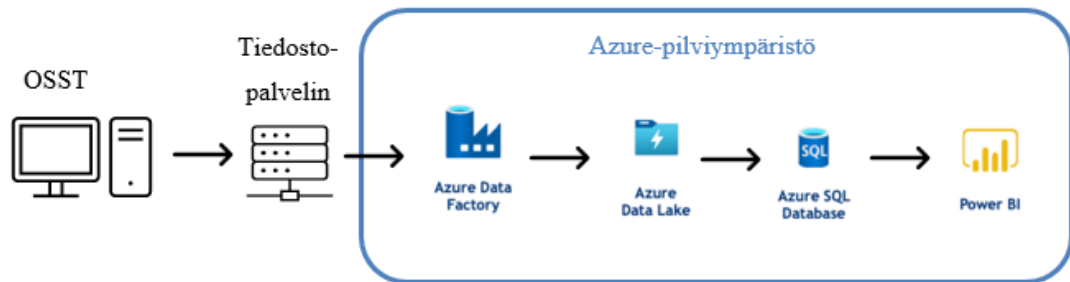
datapisteet voidaan hakea manuaalisesti tai tuoda PLC:n ohjelmasta. Power BI:hin muodostetut taulut on esitettyinä kuvassa 28.



Kuva 28. Siemens CloudConnect 712 POC: Lämpötila-arvot Power BI:ssä.

7.6.3 Pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmä

Arkkitehtuuri, joka kuvaa datan kulkua OSST-ohjausjärjestelmästä aina Power BI-visualisointeihin saakka esitetään kuvassa 29. Toteutuksessa ulkoistettiin Azure-pilviympäristön konfigurointi sekä OSST-ohjausjärjestelmän datan hankintaa varten kirjoitettavan skriptin luominen. Pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmä koostuu aiemmin esiteltyjen Azure-palveluiden ja ratkaisujen lisäksi jo aikaisempien projektien yhteydessä pilviympäristöön ajetuista Wise-toiminnanohjausjärjestelmän tiedoista sekä hielaboratorion mittaustuloksista.



Kuva 29. OSST-datan hankintajärjestelmän arkkitehtuuri.

Datan kulku etenee seuraavalla tavalla:

1. Microsoft Task Schedulerin avulla ajastettu skripti luo päiväkohtaisen CSV-tiedoston tiedostopalvelimelle, jossa nähtävillä tietoja päivän aikana pinnoitetuista aihioista ja tuotteista.
2. Azure Data Factory -palvelun avulla päiväkohtaiset CSV-tiedostot luetaan ajastetusti sellaisenaan tietoaaltaana toimivaan Azure Data Lake -palveluun. Onnistuneen siirron jälkeen tiedostot poistetaan tiedostopalvelimelta. Kaikkien toimintojen ETL-prosessit (Extract, Transform, Load) orkestroidaan Data Factoryn avulla.
3. Data Lakesta tiedostot luetaan Azure SQL Database -palveluun, jossa data säilötään erilaisissa tietokantaskeemoissa. SQL-tietokanta muodostuu yhden tai useamman kaavion (=skeema) määrittelemistä tauluista.
4. Tietojen hyödyntäminen raportoinnin ja visualisoinnin avulla toteutetaan Power BI:ssä, joka lukee määritetyt taulut SQL Databasen dw-tietokantaskeemasta. Power BI:ssä toteutetaan vielä jotain transformaatioita esimerkiksi muotoilujen ja sarakenimien suhteen.

Skriptin luontia varten tutustuttiin OSST:ssä käytettäviin sisäisiin kutsuihin (function), joiden avulla saadaan haettua halutut tiedot CSV-tiedostolle. OSST-protokollaa esiteltiin kappaleessa 7.6.1. Spesifikaatiot kirjoitettiin käytettävistä funktioista ja tarvittavista parametreista. Skriptin luonti itsessään ulkoistettiin. Skripti on toteutettu Python-

ohjelmointikielellä ja kirjautuu OSST-palvelimelle käyttäen TCP/IP-yhteyttä sekä tarvittavia kirjautumistietoja. Kirjautumisen jälkeen skripti pystyy hakemaan OSST-protokollan määrittämällä sisäisillä funktioilla erilaisia tietoja päivän aikana ajetuista tangoista. Koska OSST vaatii kirjautumista jokaisen funktion käytön yhteydessä skripti rakentuu niin, että jokainen tarvittava funktio ajetaan erikseen seuraavalla tavalla:

1. Kirjautuminen sisään funktiolle
2. Funktion haku
3. Tiedon tallentaminen dataframelle
4. Kirjautuminen ulos.

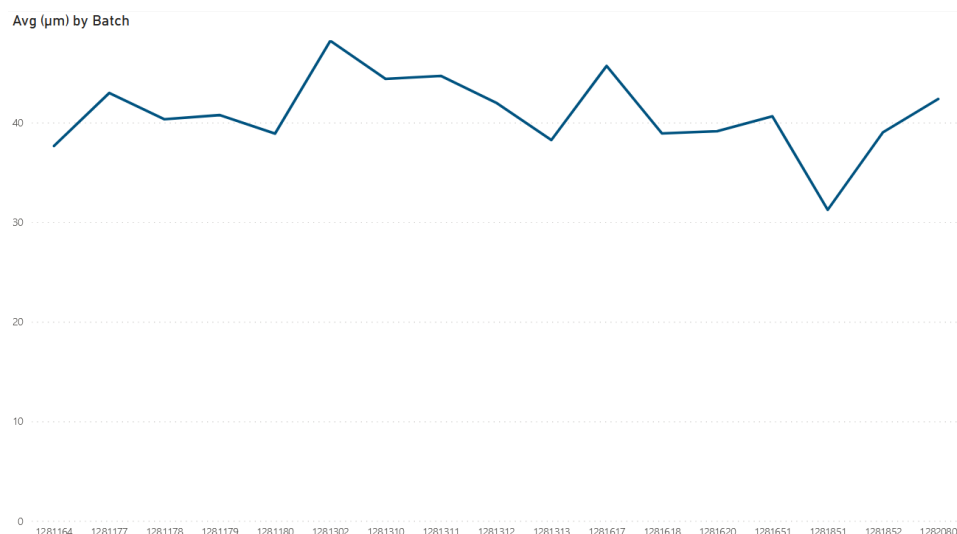
Dataframe on eräänlainen laskutaulukko, joka toimii alustavana outputtina ennen CSV-tiedoston luontia. Kun kaikki tarvittavat tiedot on saatu dataframeille, haetaan dataframeista halutut tiedot CSV-tiedoston muodostamiseksi. Skripti ajetaan ajastetusti kerran päivässä Microsoft Task Schedulerin avulla, jolloin tiedostopalvelimelle tallentuu päiväkohtainen CSV-tiedosto, josta se poimitaan edelleen ajastetusti pilviympäristöön Azure Data Factory -palvelun avulla.

Suunniteltu datan visualisointi muodostetaan Power BI:ssä ja se koostuu kahdesta eri näkymästä sekä erilaisista kuvaajista. Koska linjalla ajettuja pinnoituksia ei ole mahdollista yhdistää oikeaan työvaiheeseen tai reikätyyppiin käytettävissä olevilla järjestelmillä, päädyttiin luomaan erilliset näkymät OSST:stä saatavalle raakadatalle, sekä hielaboratorio mittauksista ja Wise-toiminnanohjausjärjestelmästä saataville työvaihe- ja tuotetiedoille. Lisäksi suunniteltiin näistä taulukoista muodostettavia kuvaajia, joiden avulla voidaan helposti havaita esiintyviä poikkeamia tai trendejä. Visualisoinnit koostuvat edellä mainituista lähteistä saapuvista datoista, joiden tavoitteena on luoda selkeä ja toimiva ratkaisu linjalla ajettujen erien sekä saavutetun pinnoituksen seuraamiseksi. Seurattavuuden ja helppokäyttöisyyden parantamiseksi molemmille näkymille sekä kuvaajille lisättiin filterit, jotka mahdollistavat datan filteröimisen tuotteen, eränumeron, pinnoitusajan, reikätyypin, ahion paksuuden, reiän halkaisijan, muotosuhteen ja reikään ajettavien pinnoitusten mukaan.

- Näkymää, jossa on nähtävillä kaikkien pulssikuparointilinjan läpi ajettavien tankojen pinnoitustietoja kutsutaan Flightbars -näkymäksi. Poimittavat tiedot saadaan tiedostopalvelimelle päivittäin muodostuvasta CSV-tiedostosta. Näkymä

on siis tankokohtainen ja on lähes siinä muodossa, kuin se OSST:ltä saadaan. Rivikohtaisessa taulukossa on nähtävissä esimerkiksi erä- ja tuotenumero, syötetty pinta-ala, pinnoitusallas, sekä pinnoitusajat ja -parametrit ajettaville kupari- ja tinapinnoituksille.

- Plating results -näkömään muodostuu rivejä sitä mukaan, kun eristä saadaan hielaboratorio mittauksia. Jokaisesta erästä poimitaan oma rivinsä tulppa-, laser- ja PTH-rei'ille. PTH on lyhenne sanoista plated through hole ja sillä tarkoitetaan perinteistä läpivientä. Kaikille reikätyypeille lasketaan minimi ja keskiarvot muodostuneelle pinnoitukselle sekä heittokyky (%) kuvaamaan muodostuneen pinnoituksen tasaisuutta. Hielaboratoriotuloksista poimitaan lisäksi levyn paksuus ja reiän halkaisija, joista lasketaan muotosuhde. Wise-toiminnanohjausjärjestelmästä haetaan reikämäärä, reikä pinta-ala, sekä kyseiselle reikätyypille ajettut pinnoitukset.
- Kuvaajat koostuvat Plating results -näkömään tiedoista. Kuvaajien avulla voidaan muodostaa asetettujen filtereiden mukaisia visualisointeja piste- ja viivakaavioilla. Kuvaajat, käytettävät filterit ja vapaasti valittavissa olevat X- ja Y-akselien muuttujat mahdollistavat pinnoitusten seuraamisen monella eri tavalla. Kuvassa 30 on esimerkki Power BI:n viivakaaviosta, jossa X-akselille on valittu muuttujaksi eränumero ja Y-akselille reikäkuparin keskiarvo. Filteriksi on valittu tuote AD192627, jolloin voidaan seurata kyseisen tuotteen pinnoituksen vaihtelua halutussa reikätyypissä eräkohtaisesti.



Kuva 30. Esimerkki Power BI:n viivakaaviosta, jossa nähtävillä tuotteen AD192627 reikäkuparien keskiarvo eräkohtaisesti.

7.7 Pohdinta

Pulssikuparointilinjalla pinnoitettavien levyjen vaihteluväli on olennainen tieto tuotesuunnittelun kannalta. Esimerkiksi suunniteltaessa läpivientien poraamiseen käytettävän poranterän halkaisijaa, haluttaisiin lähtökohtaisesti käyttää mahdollisimman pientä teräkkoa oikosulkujen välttämiseksi sisäkerroksissa. Mikäli tuotteeseen saavutettavan pinnoituksen vaihteluväli olisi tiedossa, saattaisi se mahdollistaa pienempien teräkköiden käyttämisen. Aineiston käsittelyn perusteella on todettava tämän hetkisten vaihteluvälien olevan vielä arvaamattomia sekä kohtuuttoman suuria.

Seuraamalla useampia olennaisia linjamuuttujia, voidaan löytää lisää pinnoitukseen vaikuttavia tekijöitä. Tällä hetkellä ei esimerkiksi ole varmuutta siitä, toimivatko linjan sekoitusmenetelmät aina toivotulla tavalla. Sekoituksen epäonnistuminen esikäsittelyn tai pinnoituksen aikana saattaa vaikuttaa merkittävästi esiintyvään vaihteluun. Toinen tärkeä seurattava muuttuja on huuhteluvesien puhtaus. Huuhteluvesien epäpuhtaus aiheuttaa vaihtelun lisäksi kylpyjen kontaminaatiota. Varteenotettavia ensiaskeleita pulssikuparointilinjan seurannan parantamiseksi ovatkin sensorien lisääminen huuhteluveden johtokyvyn sekä ilma-agitaation seuraamiseksi. Seuranta parantamalla on mahdollista löytää vaihtelua aiheuttavia tekijöitä ja pienentää havaittuja vaihteluvälejä. Eriolaisten olosuhdetekijöiden lisäksi vaihtelua saattaa aiheuttaa poikkeamat operaattorien käyttämissä pinnoitusarvoissa, joista ei voida olla täysin varmoja. Tässä työssä suunniteltu ja toteutettu linjan monitorointijärjestelmä mahdollistaa käytettyjen pinnoitusarvojen seuraamisen.

Vaikkakin aineistoa käsitellessä ei kuparointikylvyn konsentraatioiden huomattu aiheuttavan vaihtelua suuresta hajonnasta ja vähäisistä havaintopisteistä johtuen, saattaa se silti olla yksi merkittävä tekijä. Analyysiväliä lyhentämällä, sekä annosteluita säättämällä on mahdollista saada konsentraatiot pysymään haluttujen ylä- ja alarajojen sisällä. CuPulse A:n annostelua säädettiin ensimmäisen kerran 12.9.2022 ja lisäsäätöjä on tehty havaittujen muutosten perusteella. Vaikkakin konsentraatio näyttää jo pysyvän paremmin asetettujen ylä- ja alarajojen sisällä, tarvitaan vielä lisää aikaa tämän varmistamiseksi. Samalla myös muut konsentraatiot on saatava pysymään asetettujen raja-arvojen sisällä.

Kerättyä aineistoa sekä käytettyjä pinnoitusprofileja tarkastellessa havaittiin korkean muotosuhteen tuotteiden pinnoituksissa haasteita erityisesti heittokyvyyssä. Tämän korjaamiseksi on mahdollista muuttaa näille tuotteille käytettäviä pinnoitusarvoja. Kuten kappaleessa 4.4.5 todettiin, haastavimpia levyjä pyritään lähtökohtaisesti pinnoittamaan pienemmillä virrantiheyksillä sekä pidemmällä pinnoitusajoilla. Tuotannon kannalta täytyykin pitää mielessä, etteivät läpimenoajat veny liian pitkiksi.

Toteutettu soveltuvuus selvitys Siemensin CloudConnect 712:lle on varteenotettava ratkaisu, mikäli halutaan seurata erilaisia linjaolosuhteita lähes reaaliaikaisesti. Ratkaisu mahdollistaa myös linjalla ilmenevien hälytysten seurannan. PLC:ltä saatavat tiedot riippuvat siitä, miten linjan ohjaus on suunniteltu. Esimerkiksi pulssikuparointilinjan tapauksessa PLC vastaa pääasiassa kuljettimen ohjauksesta, jolloin CloudConnect:n avulla ei pystytä tällä hetkellä seuraamaan juurikaan pinnoituksen kannalta mielenkiintoisia arvoja. Tästä huolimatta CloudConnect tarjoaa valmiin yhteyden pilviympäristöön, jolloin erilaisten sensorien lisääminen PLC:lle mahdollistaa uusien muuttujien seuraamisen pilviympäristössä mutkattomasti. Pulssikuparointilinjan tapauksessa tämä mahdollistaa esimerkiksi aiemmin mainittujen huuhteluveden puhtauden sekä käytettyjen sekoitusmenetelmien seurannan. Ratkaisu on toteutettavissa useille muille Aspocomp Group Oyj:n tehtaalla sijaitseville prosessilinjoille, joissa on käytössä S7-pohjainen PLC.

Diplomityön kirjoittamisen aikana pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmälle suunnitellut Power BI-visualisoinnit eivät ole vielä täysin valmiita. Testausvaiheessa järjestelmä on kuitenkin todettu jo toimivaksi esimerkiksi väärillä pinnoitusarvoilla ajettujen tuotteiden löytämiseksi. Visualisointien valmistuttua on mahdollista saada tietoon tuotekohtaisia vaihteluvälejä sekä hyödyntää saatua tietoa niiden pienentämiseksi. Käytetty pinnoitusallas, väärillä ohjelmilla ja parametreilla ajettut tangot, sekä pinnoitusajat voivat kaikki aiheuttaa suurta vaihtelua pinnoituksissa. Monitorointijärjestelmä mahdollistaa myös eri pinnoitusohjelmien ja -profilien vertailun keskenään, jolloin on mahdollista saada optimoitua käytettäviä pinnoitusohjelmia. Vastaava ratkaisu on toteutettavissa myös muille OSST-ohjausjärjestelmää käyttäville linjoille. Näihin kuuluvat kemiallinen kuparointi, liitinkultaus sekä ENIG.

Yksi toteutetun monitorointijärjestelmän haasteista oli kyvyttömyys yksilöidä aihioita erän sisällä, minkä johdosta päädyttiin muodostamaan erilliset näkymät OSST:ltä saatavalle raakadatalle sekä hielaboratoriosta ja Wise-toiminnanohjausjärjestelmästä saataville tiedoille. Esimerkiksi jos tiettyä erää ajetaan suuria määriä, on erästä saatavilla useita eri tankokohtaisia rivejä erilaisilla pinnoitusarvoilla. Koska aihioita ei ole yksilöity, on mahdotonta yhdistää yhdestä ahiosta otettu hielaboratorion mittaustulos tiettyihin pinnoitusarvoihin. Tämän korjaamiseksi eräs mahdollinen keino on paneeli-ID. Aihion reunaan lisättävään QR-koodiin olisi mahdollista tallentaa tuote-, erä- ja paneelinumeron lisäksi käytettävä tuotantopolku. Linjoille sijoitettavien lukijoiden avulla olisi näin ollen mahdollista automatisoida esimerkiksi tuotteelle ajettavien pora- tai pinnoitusohjelmien valintaa. Näin voitaisiin vähentää tuotannossa esiintyviä inhimillisiä virheitä, joissa operaattorit valitsevat väärin ohjelmia ajettavaksi. Samalla on mahdollista yksilöidä millaisten prosessivaiheiden läpi aihio on kulkenut. Pulssikuparointilinjan tapauksessa olisi mahdollista saada tieto siitä, missä kohtaa tuotantotankoa ja millaisilla arvoilla tutkittava aihio on pinnoitettu. Merkintälaitteisiin, lukijoihin ja linjan automaatioihin vaadittavien investointien lisäksi haasteena on oikeanlaisen merkintätavan löytäminen. QR-koodien tulee pysyä luettavassa muodossa useiden eri prosessivaiheiden läpi, jotka sisältävät suuria lämpötilavaihteluita ja erilaisia kemikaaleja. Monikerrospiirilevyn tapauksessa QR-koodin pitäminen ei olisi mahdollista koko tuotannonläpi, vaan merkintä tulisi tehdä aihion pintaan uudelleen tiettyjen prosessivaiheiden jälkeen. Tästä huolimatta kyseinen menetelmä on käytössä joillakin tunnetuilla piirilevyvalmistajilla.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aineistoa käsiteltäessä havaitut ilmiöt olivat teorian mukaisia. Samalla huomattiin aineistossa esiintyvä suuri vaihtelu, jota ei pystytä selittämään kerätyn aineiston avulla. Vaihtelua ilmenee myös tuotteen sisäisesti, jolloin vaihtelu ei ole peräisin eriävistä tuoterakenteista. Käytetyn mittausmenetelmän todettiin esittävän saavutettuja pinnoituksia riittävän tarkasti, jolloin vaihtelun täytyy syntyä pääasiassa vaihtelevista olosuhdetekijöistä. Vaihteluvälien pienentämiseksi tulisi kerätä tietoa useammista pinnoitukseen vaikuttavista muuttujista. Lisäksi linjan kylvyissä käytettävien kemikaalisten komponenttien pitoisuudet tulisi saada pysymään asetettujen raja-arvojen sisällä. Kuten teoriasosuudessa todettiin, on vaikuttavia muuttujia pulssikuparoinnin tapauksessa useita. Tästä huolimatta vartenotettavia vaihtoehtoja tulevaisuuden kehityskohteiksi ovat komponenttien Cpk-arvojen parantamisen lisäksi huuhteluviesien puhtauden sekä sekoitusmenetelmien seuranta.

Soveltuvuusselvityksessä CloudConnect 712:n ja Azure-pilviympäristön välille muodostettiin yhteys, jolloin pulssikuparointilinjan lämpötila-arvoja saatiin ajettua sekä visualisoitua viiden minuutin sykleillä Power BI:hin. CloudConnect712 on vartenotettava vaihtoehto Aspocompin piirilevytehtaalla sijaitseville linjoille, joilla on käytössä S7-pohjainen PLC. Samalla se mahdollistaa näille linjoille uusien muuttujien seurannan lisäämällä sensoreita linjojen logikoille. Liitteessä 1, taulukossa 1 esitetään tehtaalla sijaitsevien prosessilinjojen ohjaimien malleja.

Vaikkakin pulssikuparointilinjan monitorointijärjestelmän Power BI-visualisoinnit eivät ole vielä täysin valmiita, on järjestelmä todettu jo toimivaksi ratkaisuksi väärillä pinnoitusarvoilla ajettujen tuotteiden löytämiseksi. Tulevaisuudessa järjestelmän avulla voidaan kartoittaa esimerkiksi tuotekohtaisia vaihteluvälejä. Samaa ratkaisua voidaan hyödyntää myös muilla OSST:tä käyttävillä linjoilla. Näihin kuuluvat kemiallinen kuparointi, liitinkultaus sekä ENIG. Tällä hetkellä datan hankintaratkaisuiden mahdollisuuksia heikentää kyvyttömyys yksilöidä aihiota erän ja tuotteen sisällä. Eräs ratkaisu tämän parantamiseksi on esitelty paneeli-ID, joka mahdollistaa paremman seurannan lisäksi esimerkiksi ajettavien ohjelmien automatisoinnin.

9 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli kartoittaa Aspocomp Group Oyj:llä sijaitsevan pulssikuparointilinjan nykytilannetta ja tutkia datan hankintamahdollisuuksia prosessin seurannan parantamiseksi. Samalla tarkoituksena oli löytää ratkaisuja, jotka ovat toteutettavissa myös muille tehtaalla sijaitseville prosessilinjoille.

Työssä tutustuttiin monikerrospiirilevyn valmistuksen päävaiheisiin, elektrolyyttiseen pinnoitukseen sekä erityisesti Aspocompin piirilevytehtaalla sijaitsevaan pulssipinnoituslinjaan. Linjan osalta käytiin läpi pinnoitusmenetelmää, prosessivaiheita, ohjausjärjestelmiä sekä pinnoitukseen vaikuttavia tekijöitä. Linjan nykytilanteesta kerättiin kattava aineisto, jonka avulla voitiin tarkastella tulppareikiin saavutettua pinnoitusta. Aineistossa huomatuun suureen vaihtelun johdosta päädyttiin ottamaan lisämittauksia useammasta eri tuotteen AD214906 erästä. Näiden mittausten avulla tutkittiin tuotteiden sisäisen vaihtelun lisäksi käytettävän mittausten menetelmän tarkkuutta. Erilaisten tilastollisten testien avulla vaihtelun todettiin suurimmaksi osaksi johtuvan vaihtelevista olosuhdetekijöistä tai väärin valituista pinnoitusohjelmista.

Työn loppupuolella pulssikuparointilinjalle suunniteltiin ja toteutettiin pilvipohjainen monitorointijärjestelmä, jonka avulla voidaan seurata linjalla ajettujen erien pinnoitukseen liittyviä parametrejä sekä näillä saavutettuja pinnoituksia. Samassa toteutettiin myös soveltuvuus selvitys Siemens valmistamalle CloudConnect 712:lle. Molemmat ratkaisut todettiin toimiviksi pulssikuparointilinjalla mahdollistaen tulevaisuudessa linjalle paremman seurattavuuden. Samalla käytetyt menetelmät ovat sovellettavissa myös useille muille Aspocomp Group Oyj:n tehtaalla sijaitseville prosessilinjoille.

Tulevaisuuden mahdollisina kehityskohteina pulssikuparointilinjalle pidettiin huuhteluveden johtokyvyn sekä ilma-agitaatioiden seuranta. Molemmat voidaan toteuttaa CloudConnect 712:hden, sekä rakennetun Azure-ympäristön avulla. Koko tuotannon kannalta vartenotettavana kehityskohteena mainittiin paneeli-ID, joka mahdollistaa esimerkiksi ahioiden yksilöinnin sekä ohjelmien valinnan automatisoinnin tuoden samalla lisää mahdollisuuksia datan hankintaratkaisuihin.

LÄHDELUETTELO

Aghenta, L. O. & Iqbal, M. T., 2019. Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thinger.IO and ESP32 Thing. *Electronics*, 8 (8), 822. <https://doi.org/10.3390/electronics8080822>

Alphonsus, E. R. & Abdullah, M. O., 2016. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable & sustainable energy reviews*, 60, s. 1185–1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>

Amudhevalli, R. & Sivakumar, T., 2021. IoT Based Smart Energy Metering System for Monitoring the Domestic Load Using PLC and SCADA. *Teoksessa: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1055 (1), 12154. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1055/1/012154>

Arifin, M., Kamarudin, Octowinandi, V. & Ria, R., 2019. Effect of Electroplating Current on Surface Morphology and Thickness of Plated-Through Hole (PTH) in Multilayer Printed Circuit Board (PCB). *Teoksessa: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 622 (1), 12026. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/622/1/012026>

Aspocomp, 2022. Koulutusportaali [verkkodokumentti]. Espoo: Aspocomp Group Oyj.

Bailey, D. & Wright, E., 2003. *Practical SCADA for Industry*. Elsevier, 288 s. ISBN 978-0-7506-5805-8

Chandrasekar, M. S. & Pushpavanam, M., 2008. Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications. *Electrochimica Acta*, 53 (8), s. 3313–3322. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.11.054>

Coombs, C. F., 2008. *Printed circuits handbook*. 6 painos. New York: McGraw-Hill, 1605 s. ISBN 978-0-07-146734-6

Kraft CPS Ltd, 2005. *CPS Reverse Pulse Plating System manual*.

JY, 2022. Several Basic Factors Affecting PCB Plating And Hole Filling Process [verkkodokumentti]. Dalian: Dalian JY Electronic Technology Co. Saatavissa: <https://www.jycircuitboard.com/news/several-basic-factors-affecting-pcb-plating-and-hole-filling-process-237.html> [viitattu: 10.10.2022].

Dineva, K., & Atanasova, T., 2022. Cloud Data-Driven Intelligent Monitoring System for Interactive Smart Farming. *Sensors*, 22 (17), 6566. <https://doi.org/10.3390/s22176566>

Electronicsnotes, 2022. What is Data Acquisition [verkkodokumentti]. Electronic Notes. Saatavissa: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/data-acquisition-daq/understanding-data-acquisition.php> [viitattu 05.11.2022].

Eurocircuits, 2022. Innerlayer imaging for multilayer PCB [verkkodokumentti]. Mechelen: Eurocircuits. Saatavissa: <https://www.eurocircuits.com/Innerlayer-imaging-for-multilayer-PCB/> [viitattu 19.12.2022].

Freund, R. J., & Wilson, W. J., 2003 *Statistical methods*. 2 painos. San Diego: Academic Press. ISBN 978-0-12-267651-2

Gavlas, A., Zwierzyna, J. & Koziorek, J., 2018. Possibilities of transfer process data from PLC to Cloud platforms based on IoT. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (6), s. 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.146>

Ge, W., Li, W., Li, R., Dong, Y., Zeng, Z., Cao, H., Yu, L., Wen, Z. & He, J., 2022. Ultra-Uniform Copper Deposition in High Aspect Ratio Plated through Holes via Pulse-Reverse Plating. *Coatings*, 12 (7), 995. <https://doi.org/10.3390/coatings12070995>

Huang, B.-C., Yang, C.-H., Lee, C.-Y., Hu, Y.-L., Hsu, C.-C. & Ho, C.-E., 2019. Effect of pulse-reverse plating on copper: Thermal mechanical properties and microstructure relationship. *Microelectronics Reliability*, 96, s. 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.04.004>

Sirviö H.-H., 2014. Juotteenestopinnoitusprosessin parametrien vaikutus pinnoituksen onnistumiseen [verkkodokumentti]. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201412032052> [viitattu 12.2.2023].

Karjalainen, L., 2010. Tilastotieteen perusteet. Ristiina: Pii-kirjat, 256 s. ISBN 978-952-9776-33-7

Kenny, S., Reents, B. & Zosel, J., 2005. Plating high aspect ratio PCBs [verkkodokumentti]. Printed circuit design & manufacture, 22(1), 22. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/229014375_Plating_high_aspect_ratio_PCBs [viitattu 20.8.2022].

Kaakinen, M. & Ellonen, N., 2022. Regressioanalyysi [verkkodokumentti]. Teoksessa: Kvantitatiivisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto. Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/regressio/analyysi/> [viitattu 15.09.2022.]

Nummenmaa, L., 2021. Tilastotieteen käsikirja. Helsinki: Tammi, 727 s. ISBN 978-952-04-0138-2

PAL, 2005. System operation manual.

Rencher, A. C., 2002. Methods of multivariate analysis. 2 painos. New York: John Wiley & Sons, 708 s. ISBN 978-0471418894

Setiawan, A., Sugeng, Koesoema, K. I., Bakhri, S. & Aditya, J., 2019. The SCADA system using PLC and HMI to improve the effectiveness and efficiency of production processes. Teoksessa: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 550 (1), 12008. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/550/1/012008>

Siemens, 2022a. CloudConnect 712 manual [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/960/109767960/att_988060/v1/BA_CC7_76.pdf [viitattu 5.12.2022].

Siemens, 2022b. Configuring of the CloudConnect 7 with Microsoft Azure [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/675/109766675/att_1018364/v1/109766675_CloudConnect_Azure_DOC_en_V20.pdf [viitattu: 5.12.2022].

Yan, X. & Su, X. G., 2009. Linear regression analysis: Theory and computing. Singapore: World Scientific Publishing, 350 s. ISBN 978-9812834102

Yung, K. C., Chan, K. C., Yue, T. M. & Yeung, K. F., 2004. The effect of waveform for pulse plating on copper plating distribution of microvia in PCB manufacture. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 23, s. 245–248. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1667-1>

Zhang, Y., An, M., Yang, P. & Zhang, J., 2021 Recent Advances in Electroplating of Through-Hole Copper Interconnection. Electrocatalysis, 12, s. 619–627. <https://doi.org/10.1007/s12678-021-00687-2>

Liite 1

Taulukko 1. Aspocomp Group Oyj:n piirilevytehtaalla käytettävät logiikat.

mitsubishi	4
fx3uc-32mt-lt / fx2n-10gm	1
l06cpu	1
q03udecpu	1
q06udehcpu	1
omron	8
cpm2c	1
nj101-9000 + nxecc203	1
nx1p2	1
nx-ecc203/nx1p2	1
sys cj1m cpu13	1
sysmag cj2m cpu32	1
sysmag cj2m cpu34	1
sysmag cj2m cpu12	1
panasonic	1
fbΣ-c28	1
rexroth	3
indracontrol l10	2
indracontrol l11	1
siemens logo	1
?12/24 rceo	1
siemens s5	2
95u	2
siemens s7-1200	3
2kpl cpu1212c & cpu 1512sp-1pn	2
cpu1217c	1
siemens s7-1500	4
cpu1511-1pn	3
cpu1511f	1
siemens s7-200	4
cpu224	1
cpu224 & cpu314-2DP	1
cpu224xp	1
cpu226	1
siemens s7-300	14
2x c7-624 + c7-623	1
cpu313c	1
cpu314 ifm	7
cpu314c-2dp	3
cpu315-2 dp	2
siemens s7-400	2
cpu315-2pn/dp	2
cpu416-3wn/dp	1
cpu414-2	1
vipa	5

cpu 017pn	1
cpu317se	4
wago	1
750-352	1