



SÄÄTÖTEKNIIKAN LABORATORIO

**Tilastollinen prosessinohjaus:
Pastanpainoprosessin tehdaskokeet**

Mika Pirrtimaa ja Kauko Leiviskä

Raportti B No 26, Joulukuu 2000

Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio
Raportti B No 26, Joulukuu 2000

Tilastollinen prosessinohjaus: Pastanpainoprosessin tehdaskokeet

Mika Pirttimaa ja Kauko Leiviskä

Tiivistelmä: Tämä raportti on projektin “SPC:n ja älykkäiden menetelmien soveltaminen elektroniikkateollisuudessa” kolmas osaraportti. Projektin tavoitteena on tutkia älykkäiden tietämysjärjestelmien ja SPC:n hyväksikäyttöä elektroniikan tuotannossa. Hankkeen rahoittaa Tekes ja siihen osallistuu neljä elektroniikkayritystä: Mikrolli Oy, Incap Electronics Oy, Jutron Oy ja Tellabs Oy. Projekti kuuluu ETX-ohjelmaan ja se on käynnistynyt keväällä 1998.

Tässä raportissa on esitetty teollisuuspartnereiden tehtailla tehtyjen laajojen pastanpainokokeiden pääasialliset tulokset ja niiden perusteella tehdyt päätelmät tilastollisen prosessinohjauksen soveltamisesta pastanpainon ohjaukseen. Kokeet tehtiin kesän ja syksyn aikana 1999 ja analysoitiin keväällä 2000. Raportissa käsitellään myös koetulosten perusteella esille tulleita prosessi- ja ohjausteknisiä parannusmahdollisuuksia ja älykkäiden menetelmien käyttökohteita pastanpainoprosessissa. Tämä raportti on aikaisemman projektin sisäisen raportin uudistettu painos.

Hakusanat: tilastollinen prosessinohjaus, elektroniikkateollisuus, laadunohjaus, pastanpaine

ISBN 951-42-5884-3
ISSN 1238-9404
ISBN 951-42-7533-0 (PDF)

Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio
PL 4300
FIN-90014 OULUN YLIOPISTO

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Pastanpainoprosessi	2
2.1	Prosessikuvaus	2
2.2	Pastanpainon tulokseen vaikuttavat tekijät	3
2.2.1	Työvälineet	3
2.2.2	Pastanpainon muuttujat	6
2.2.3	Ympäristötekijät	8
2.2.4	Pastanpainoon valitut materiaalit ja raaka-aineet	9
2.2.5	Työtavat	10
3	Koejärjestelyt ja tärkeimmät havainnot	12
3.1	Pastanpainon alustava seuranta: tavoitteet, toteutus ja havainnot	12
3.1.1	Seurannan toteutus ja tavoitteet	12
3.1.2	Painolaadun seuranta	12
3.1.3	Juotepastan painamiseen ja seurantaan käytetty laitteisto	13
3.1.4	Seurantaan valituista tuotteista	13
3.1.5	Seurannan aikana tehdyt havainnot	14
3.1.6	Seurannalla saavutetut hyödyt	18
3.2	Koesarjat	20
3.2.1	Tuotantolaitteistolla 1 ajetuista koesarjoista ja koejärjestelyistä	21
3.2.2	Tuotantolinjan 1 koesarjojen muuttujista ja valitusta koematriisista	24
3.2.3	Tuotantolinjan 1 koesarjoissa käytetyt muuttujat ja vakiot sekä niiden sijainti matriisissa ja kokeiden suoritusjärjestys	25
3.2.4	Tuotantolaitteistolla 2 ajetuista koesarjoista ja koejärjestelyistä	29
3.2.5	Tuotantolinjan 2 koematriisit ja muuttujat	31
3.3	Muuttujien vaikutusten analysointi	33
4	Koetulokset	35
4.1	Pastanpainon seurannan tulokset	35
4.2	Tuotantolaitteistolla 1 ajetut koesarjat	35
4.3	Tuotantolaitteistolla 2 ajetut koesarjat	35
5	Johtopäätökset	36
5.1	Muuttujien vaikutukset	36
6	Menetelmätekniinen yhteenveto	38
6.1	Yleistä tilastollisesta prosessin ohjauksesta	38
6.2	Lyhytsarjatuotantoon kehitetty SPC	40
6.3	SPC:n soveltamisesta pastanpainon seurantaan	41
6.4	Painolaadun mittaaminen ja seuranta SPC:n avulla	42
6.5	Pastanpainon seuranta ja uudet tuotteet	43
6.6	SPC:n käyttö pitkissä tuotantosarjoissa ja kauan jatkuvassa tuotannossa	43

6.7	Pastanpainon seurantaan soveltuvista Short-Run valvontakorteista	44
6.7.1	Z-W-valvontakortti	45
6.7.2	Short Run -kortti	46
6.8	Painolaadun seuranta pastakakkujen pinta-alan avulla	48
7	Älykkäät menetelmät pastanpainon seurannassa	49
8	Yhteenveto	51

Kirjallisuusluettelo

Liitteet

1 JOHDANTO

SPCELE-projektin tavoitteena oli tutkia SPC:n ja älykkäiden tietämysjärjestelmien hyväksikäyttöä elektroniikan valmistusprosesseissa. Päämääränä oli löytää eri osaprosessien jälkeen tuotteesta sen laatua kuvaavat parametrit sekä niihin soveltuvat mitaus- ja analyysimenetelmät. Hyödyntämällä älykkäitä tietämysjärjestelmiä ja SPC-tekniikkaa tuotantoprosessin reaaliaikaisessa ohjauksessa ja säädössä vähennettäisiin tuotantoprosessin tuotteeseen aiheuttamia laatupoikkeamia eli parannettaisiin tuotannon laatua. Aikataulu- ja resurssisyistä tutkimustyössä rajauduttiin pastanpainoprosessiin.

SPCELE-projektin testausosuudessa tutkittiin, onko pastanpainon laatutasoa mahdollista parantaa soveltamalla sen seurantaan ja ohjaukseen sekä tilastollisia että älykkäitä menetelmiä. Tilastollisilla menetelmillä varmennettaisiin prosessin hallinnassa olo ja älykkäiden menetelmien avulla ohjattaisiin painotulos poikkeamatilanteissa halutuksi. Painossa tapahtuu hitaita muutoksia stensiilin likaantuessa ja pastan vanhetessa ja lähtöoletuksena olikin, että muuttamalla prosessin muuttujia painojälkeä voitaisiin ohjata halutuksi säätämällä painokoneen parametrejä.

Painossa tapahtuvia muutoksia, niiden suuruutta ja aiheuttajia tutkittiin seuraamalla todellisen pintaliitoslinjan toimintaa ja siinä esiintyviä ongelmia. Seurannan, kirjallisuuden, artikkeleiden ja haastattelujen pohjalta tehtiin koesuunnitelma, jonka avulla selvitettiin painotulokseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden merkitystä painojälkeen kahdella tehdaslinjalla. Lopputuloksena on kooste painolaatuun vaikuttavista tekijöistä ja selvitys mahdollisuuksista ohjata ja tilastollisesti seurata painojälkeä.

Testauksessa keskityttiin niihin pintaliitoksen on-line-tuotantolinjoihin, joissa prosessilaitteet toimivat itsenäisesti ilman operaattoreiden jatkuvaa ohjausta. Käytössä olleiden tuotantolaitteiden automaatiotaso oli korkea ja ne edustivat modernia tuotantolinjaa hyvin. Painoseurannan ja koesarjojen aikana saatuja kokemuksia sekä pastanpainosta että SPC:n soveltamisesta sen ohjaukseen voidaan yleistää koskemaan nykyisiä tina-lyijypastaa käyttäviä pintaliitoslinjoja, ja vaikka juotepastojen koostumus lähitulevaisuudessa muuttuukin siirryttäessä lyijyttömiin pastoihin, pätevät samat rajoitukset ja vaatimukset pitkälti myös lyijyttömällä pastoilla tapahtuvaan painoon. Stensiilipainannon perusta säilyy myös tulevaisuudessa muutoksista huolimatta lähes muuttumattomana.

Vaikka tuotteet ja prosessilaitteet olisivat erilaisia, itse pastanpainoprosessi vaatimuksineen, rajoituksineen ja heikkouksineen on samanlainen ja siksi tehdyt kokeet, havainnot ja tulokset ovat yleistettävissä koskemaan pintaliitosprosesseja pastanpainon osalta laajalti. Tuotantoprosessin laitekannasta ja automaatiotasosta riippumatta pastanpainossa tehdyt virheet ja esiintyvät häiriöt ovat samankaltaisia ja pastaus joko hyvä- tai huonolaatuista. Erot painolaadussa syntyvät pienistä tekijöistä ja syyt niiden takana ovat kirjavat.

2 PASTANPAINOPROSESSI

Pastanpaino on pintaliitosprosessin ensimmäinen osaprosessi, se luo pohjan muiden tuotantovaiheiden onnistumiselle ja tuotteen pitkäikäisyydelle ja siinä tehtyjä virheitä on myöhemmin kallis ja hidas korjata. Alati pienenevä komponenttikoko, aikaisempaa tiheäjalkaisemmat fine-pitch-piirit ja yleiseen tuotantoon tulevat ultra-fine-pitch- ja μ BGA-piirit nostavat vaadittavan painolaadun minimitasoa. Heikkolaatuisen painojäljen korjaaminen on tulevaisuudessa entistä hankalampaa ja kalliimpaa. Samaan aikaan paineet tuottaa nopeammin, täsmällisemmin, entistä lyhyempinä tuotesarjoina ja suuremmalla volyyymilla nousevat. Kaiken kaikkiaan pastanpainon merkitys pintaliitosprosessin osana jatkaa kasvamistaan ja tulevaisuudessa se on yksinkertaisesti hallittava.

2.1 Prosessikuvaus

Pintaliitosprosessin alkupäässä on piirilevyjen purkaja, johon operaattori syöttää painoon menevät kortit. Yleensä sen ja painokoneen välissä on lyhyt kuljetin, joka toimii pienenä puskurina tuotteiden vaihdon ja piirilevyjen loppumisen välillä. Painokone vastaanottaa tuotteen kuljettimelta, pysäyttää sen painoalueella ja lukitsee sen paikoilleen. Sen jälkeen tuentapöytä nousee ylös ja tukialusta tai tukitapit tulevat kiinni piirilevyyn, joka on tuolloin lukittu ja tuettu. Painokoneen optinen paikannusjärjestelmä tarkastaa kohdistuspisteiden sijainnin ja asemoi stensiilin niiden suhteen. Asemoinnin jälkeen stensiilin avaukset ovat piirilevyn liitosalustojen päällä ja pastanpaino voi alkaa.

Painotilanteessa raakkeli vedetään stensiilin yläpintaa pitkin yli piirilevyn. Raakkelin edessä pyörivä pastamakkara rullaa pitkin stensiilin pintaa. Pasta täyttää tyhjä avaukset ja raakkelin terä leikkaa niiden päälle jäävän ylimääräisen pastan pois. Vedon jälkeen stensiili irroitetaan piirilevystä, jolloin avauksiin mennyt pasta irtoaa stensiilin seinästä ja jää piirilevyn liitosalustoille. Painettu kortti jatkaa painokoneesta kuljettimelle, käy mahdollisesti läpi painojäljen tarkastuksen ja etenee sen jälkeen ladontakoneelle.

Ladonnassa kortti kalustetaan eli komponentit ladotaan liitosalustoilleen. Ladontakone asemoi komponenttien liitospinnat ja piirilevyn liitosalustat kohdakkain. Aikaisemmin pastanpainossa liitosalustoille painettu pasta jää johdinpintojen väliin ja toimii ladonnan, piirilevyn kuljetuksen, ladonnan tarkastuksen ja sulatusjuottamisen aikana, aina juotteen jähmettymiseen saakka, komponentteja paikallaan pitävänä aineena.

Ladonnan jälkeen komponenttien asemoinnin onnistuminen tarkastetaan silmämääräisesti ja erityistä huomiota kiinnitetään etenkin isoihin monijalkaisiin komponentteihin, esimerkiksi QFP-208, ja muihin tunnetusti ongelmia aiheuttaviin komponentteihin. Tuolloin ladonnan jälkeä voidaan tarvittaessa parannella ja samalla asetella käsin koneladontaan sopimattomat komponentit.

Tarkastuksesta piirilevy jatkaa uuniin, jossa pastassa olevat nestemäiset aineet puhdistavat esilämmitysvyöhykkeissä sekä pastan metallipartikkeleiden että liitosalustan

pintaa oksideista. Juotteen lämpötila nostetaan lopulta hetkeksi sen sulamispisteen yläpuolelle. Juote sulaa ja jähmettyy muodostaen piirilevyn liitosalustan ja komponentin välille mekaanisesti kestävä ja sähköä hyvin johtavan liitoksen. Re-flow-uunin jälkeen piirilevyt siirtyvät kuljettimella joko suoraan seuraaviin prosessivaiheisiin tai otantaluonteiseen tarkastukseen.

2.2 Pastanpainon tulokseen vaikuttavat tekijät

Pastanpaino on erittäin monitasoinen tapahtuma ja siinä ovat vuorovaikutuksessa kompleksiset osaprosessit, joiden välillä on ristikkäisvaikutuksia (Ekere 91). Lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä on useita. Ne voidaan karkeasti jakaa viiteen erilliseen ryhmään; käytettäviin työvälineisiin, painossa valittavissa oleviin parametreihin, ympäristötekijöihin, työtapoihin ja käytössä oleviin raaka-aineisiin. Ryhmistä jokaisella on oma merkittävä roolinsa pastanpainon lopputuloksessa ja niiden sisällä on osia, joiden huomiointi ja hallitseminen on välttämätöntä.

2.2.1 Työvälineet

Painossa käytettävissä olevat laitteet ja työkalut vaikuttavat painon lopputulokseen ja ovat olennainen osa painoprosessia. Sen ytimen muodostavat painokone, tuenta, stensiili ja raakkeli. Niiden kaikkien osavaikutus on merkittävä ja alla on esitelty pastanpainon kannalta kunkin kriittiset tekijät:

2.2.1.1 Painokone

Painokoneen rakenne ja ominaisuudet vaikuttavat pastanpainon onnistumiseen:

- Painopintojen tasomaisuus: Riippumatta painokoneen automaatiotasosta keskeisimpiä tekijöitä painon onnistumisen kannalta ovat stensiilin alapinnan ja piirilevyn yläpinnan tasomaisuus ja samansuuntaisuus. Tasojen tulee olla samansuuntaiset ja säätämisen jälkeen niiden tulee myös pysyä säädöissään. Käytännössä koko painokoneen on oltava rakenteeltaan tukeva ja ennenkaikkea sen on pysyttävä mekaanisissa asetuksissaan.
- Painosekvenssi: Painotuloksen ja kokonaistuotannon kannalta tärkeitä ovat pastanpainokoneen mekaanisten liikkeiden tarkkuus, nopeus ja monipuolisuus.
- Painokoneen ohjelmointi: Käyttäjän kannalta tärkeitä ovat painosekvenssin ohjelmoinnin yksinkertaisuus, nopeus ja ohjelman vaihdon helppous.
- Monipuolisuus: Yleisesti kiinnitetään myös suurta huomiota painokoneen painoparametrien valintojen monipuolisuuteen eli säätöalueiden laajuuteen ja tarkkuuteen.

2.2.1.2 Stensiili

Käytössä oleva stensiili vaikuttaa oleellisesti pastanpainon laatuun ja piirilevylle painon jälkeen jäävät pastakakut ovat sen sormenjälki. Sen valintaan vaikuttavat monet tekijät, joista tärkeitä ovat mm. toimitusaika, tuotantosarjan oletettu pituus, hankinta-

hinta ja pienimpien avausten koko. Valmistusmenetelmä ja materiaali, eli se millä menetelmällä ja mistä metallista stensiili on tehty, vaikuttavat suoraan avausten seinämien sileyteen, niiden kulmaan ja reunojen rosoisuuteen ja sitä kautta painon lopputulokseen. Piirilevyjen kalustajalle kulloinkin optimaalinen yhdistelmä riippuu edellä mainituista tekijöistä. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että korkea laatu ja hinta liittyvät stensiilin valmistuksessa yhteen.

Alla on mainittu stensiilin ominaisuuksia, jotka käytännössä vaikuttavat sekä painotulokseen että valittuihin painoparametreihin.

- Stensiilin paksuus vaikuttaa periaatteessa suoraan liitosalustalle tulevan pastan määrään; mitä paksumpi stensiili sitä enemmän tavaraa. Paksuuden kasvattamista rajoittavat etenkin piirilevyn pienimmät liitosalustat, sillä avausten leveyden ja pinta-alan suhde siihen ei voi olla miten pieni tahansa. Sitä kuvataan niin sanottujen mittasuhdeluvun (aspect ratio) ja pinta-alojen suhdeluvun (area ratio) avulla ja ne asettavat sille omat rajoituksensa.

Mittasuhdeluku = avauksen leveys/stensiilin paksuus

Pinta-alojen suhdeluku = avauksen pinta-ala/avauksen seinämien pinta-ala

Yleensä vertailuluvuista käytetään vain jompaa kumpaa. Perinteisesti mittasuhdeluvun alarajaksi on suositeltu 1.5, mutta nykyisin alaraja voi olla jopa 1.0. Vastaavasti pinta-alojen suhdeluvulle aikaisempi alaraja on 0.66 ja nykyinen jopa 0.44 (Coleman).

Pastan irtoaminen stensiilistä heikkenee sen paksuuden kasvaessa. Toisaalta liitosalustalle jäävän pastan määrällä on myös ylärajansa, joka tulee ottaa huomioon avauskoko suunniteltaessa. Painoon valittu pasta asettaa oman rajoituksena stensiilin paksuudelle. Eri pastatyypin alttius ns. slumpaantumiseen eli lysähtämiseen vaihtelee suuresti. Taipumus siihen kasvaa pastakakun korkeuden kasvaessa ja siihen vaikuttaa juuri käytetyn stensiilin paksuus. Fine-pitch piirejä painettaessa paksuus on normaalisti 100–200 µm:n välillä. Myös stensiilin materiaalilla on vaikutusta, sillä eri metallit kestävät kulutusta ja raakkelin valsaavaa vaikutusta hyvin eri tavoin ja mitä ohuempi stensiili on, sitä herkemmin se muokautuu raakkelin alla.

- Avausten koko ja muoto suunnitellaan piirilevyn liitosalustojen pohjalta ja jätetään yleensä hieman niitä pienemmiksi. Suunniteltaessa avausten mittasuhteita ja muotoa tulisi etenkin mittasuhdeluvun ja avauksen pinta-alojen suhdeluvun asettamat rajoitukset ottaa huomioon, koska ne vaihtelevat hieman stensiilin valmistustavan mukaan. Samalla kannattaa välttää terävien kulmien syntymistä ja suosia niiden pyöristämistä, vaikka stensiilin valmistustapa voikin asettaa siihen omat rajoituksensa.
- Stensiilin kehystäminen: Tasomaisuus on yksi hyvän stensiilin edellytyksistä. Stensiilin kehyksien tulisi olla jämäkät ja niiden liitoskohtien mittansa pitävät kovasta ja pitkäaikaisesta käytöstä huolimatta. Painossa stensiili kuluu ja löystyy. Se ilmenee sen lerpunautumisena, joka puolestaan on kiinni niin valitusta materiaalis-

ta, kehyksen ja stensiilin kiinnitystavasta kuin käsittelytavoistakin kuten painon jälkeisestä pesusta ja painossa käytetystä raakkelipaineesta.

- Valmistusmenetelmä: Stensiilin valmistamiseen käytetään useita erilaisia menetelmiä ja niiden yhdistelmiä. Yleisimmät valmistustavat ovat etsaus (kemiallisesti syövyttämällä), laser (laser-säteellä polttaminen) ja kasvattaminen (elektrolyytisesti kasvattamalla). Eri valmistusmenetelmillä saadaan aikaan erilaiset avaukset. Etenkin avausten seinämien sileyys ja kulma (ns. taper) sekä reunojen muodot riippuvat valmistusmenetelmästä. Ne vaikuttavat pastan käyttäytymiseen sekä painamis- että irtoamisvaiheessa ja myös stensiilin alapinnalle avausten reunoille kehittyvän pastapursotteen (ns. smearin) syntymisnopeuteen ja määrään ja siten myös tarvittavaan pesuväliin (Markstein).
- Materiaali: Stensiilin valmistuksessa laatu, valmistustapa ja materiaali kulkevat käsikädessä; tietty valmistustapa suosii tiettyä materiaalia, vaikka toki valinnan varaakin on. Etenkin etsatuilla stensiileillä valittu raaka-aine vaikuttaa lopputulokseen ja käyttöikänsä. Esimerkiksi pronssi on helposti etsattava, mutta sen kulutuskestävyys on huono, kun taas ruostumattomasta teräksestä saadaan kulutusta kestäviä stensiilejä, joiden heikkoutena ovat karkeampiseinäiset avaukset. Molybdeenistä valmistetuilla etsatuilla stensiileillä seinämät ovat selvästi edellisiä sileämpiä, mutta hinta on vastaavasti korkeampi. Etsauksen lisäksi on vielä kaksi merkittävää stensiilien valmistustapaa; Laser-polttamalla valmistetaan stensiilejä yleensä joko teräksestä tai alloy 42:sta. Molemmilla materiaaleilla lopputulos on hyvä ja sitä voi edelleen parannella kiillottamalla avauksia elektronisesti. Kasvatamalla valmistetaan korkealuokkaisia stensiilejä, joiden avausten seinämät ovat laser-polttamalla tehtyjä sileämpiä (Markstein). Kasvatettujen stensiilien materiaali on nikkeli, josta siitäkkin on olemassa kahta eri kovuutta normaalia ja ns. kovanikkeliä, jonka on sanottu olevan paitsi kovempaa, myös jäykempää ja kulutusta kestävämpää.

2.2.1.3 Raakkeli

Juotepastan painossa on aiemmin käytetty lähinnä kumiraakkeleita ja metalliraakkelit ovat astuneet kuvaan vasta muutama vuosi sitten. Projektiin kuuluvissa yrityksissä ne on todettu käytössä helpommiksi ja kumiraakkeleista on juotepastan painossa luovuttu. Metalliraakkeleilla ei kuopaisuongelmaa esiinny, ellei terä ole poikkeuksellisen ohut, jolloin sen käyttäytyminen voi suurten avausten kohdalla muistuttaa kumiraakkeleita.

Raakkelin tärkeimmät ominaisuudet ovat seuraavat:

- Teräkulma: Normaalisti kulma on 45–60° ja etenkin kumiraakkeleilla sillä on haastattelujen perusteella vaikutusta lopulliseen painonlaatuun. Pasta välittää siihen vedonaikana syntyvät voimat avausten kautta myös stensiilin alla olevalle piirilevyille. Teräkulma voi siten olla tärkeä tekijä esimerkiksi painettaessa ohuita ja taipuisia piirilevyjä, joille tuennan rakentaminen on vaikeaa, sillä painotilanteessa pastaan kohdistuvat voimat, niiden suunta ja suuruus riippuvat sekä raakkelin kulmasta että painonopeudesta.

- **Materiaali:** Kumiraakkeilla materiaalien väliset erot olivat suuret ja ne vaikuttivat mm. raakkeiden kulumiseen ja painoparametrien valintoihin. Nykyisin käytettäessä metallirakkeleita erot tulevat lähinnä niiden pinnoitteista; on olemassa teflonpintaisia raakkeleita, joiden etuna on lähinnä pienempi stensiiliä kuluttava vaikutus ja pastan vähäisempi tarttuvuus. Metalliraakkeleiden kuluminen on käytännössä niin hidasta, ettei niiden käyttöillä ole suurta merkitystä.
- Pastaa leikkaavan kulman muoto, jonka vaikutus on suuri kumiraakkeilla (Okura). Nykyisen kokemuksen mukaan sen vaikutus metalliraakkeilla on vähäinen.
- Raakkeiden kovuus, paksuus ja jäykkyys: Kumiraakkeilla on useita eri kovuusluokkia ja kovuus on tärkeä huomioitava tekijä valittaessa paino-ohjelmaa. Metalliraakkeilla terän kovuseroilla ei ole ohjelman laadinnan kannalta merkitystä. Terän vahvuus vaikuttaa suoraan sen jäykkyyteen eli paksu raakkelin terä ei jousta niin paljon kuin ohut, jonka teräkulma muuttuu hieman paineen mukaan. Niin käy etenkin silloin, kun sen vapaa tueton etäisyys rungosta terän reunaan (ns. overhang) on suuri. Terän paksuus ja jäykkyys vaikuttavat kumi- ja metalliraakkeilla eri lailla ja toisella ne vaikuttavat kuopaisuherkkyyteen ja toisella teräkulmaan.

2.2.1.4 Tuenta

Olennaista tuennan rakentamisessa ovat sen helppous, nopeus ja toistettavuus. Toisaalta sen on pysyttävä samanlaisena ja muuttumattomana läpi tuotesarjan olipa sen pituus millainen tahansa. Tuennan tekemisessä kriittisiä tekijöitä ovat seuraavat:

- **Tukialustat:** On tuotteita, jotka vaativat erillistä tehostettua tuentaa sekä painossa että ladonnassa ja niille on usein valmistettu räätälöityjä tukialustoja. Käytön kannalta olennaista on niiden tukevuus, tasaisuus (etenkin kantavien kohtien) ja yleisesti koko työn tarkkuus.
- **Tuentasauvat:** Niiden on oltava pituusmitoiltaan samanlaisia. Tuennan rakentamisen on oltava toistettavissa ja sen edellytyksenä on tuentasauvojen identtisyys. Se on perusedellytys tasomaisuuden saavuttamisessa.
- **Yleinen tasomaisuusvaatimus:** Painossa olevien tasojen sekä stensiilin ja painokoneen piirilevyä tukevan rungon ja tuentapöydän, jolle tukisauvat tai alusta laskeetaan, on oltava samansuuntaisia. Mikäli tuentasauvat painetaan kiinni erilliseen tukitynyyn, on käytettävissä oltava yksinkertainen keino, jolla tappien muodostaman tukitason tasomaisuus voidaan helposti tarkastaa, eli on oltava varmistus sille, että tasamittaiset tuentasauvat ovat alustassa yhtä syvällä.

2.2.2 Pastanpainon muuttujat

Pastanpainossa on valittavana lukuisia määriä parametrejä. Lisäksi painokoneen ohjelman luonti mahdollistaa varsin kirjaviiden ajotapojen käytön, joissa vaikuttimina ovat koneen käyttäjien oma kokemus ja mieltymykset sekä prosessin itsensä asettamat rajat. Tapa painaa pastaa piirilevyllä vaihtelee niin operaattori-, painokone-, tuote- kuin tehdaskohtaisesti. Osaltaan käytössä olevasta laitekannasta riippuu, millaisia

muuttujia painajalla on valittavanaan. Painossa käytettävät raaka-aineet asettavat myös omat rajoituksensa parametrien valintaan. Huolimatta pastanpainossa olevasta monimuotoisuudesta, sen ongelma-alueet ovat yhteisiä ja valittavissa olevat muuttujat samat. Alla on lueteltu ne painoparametrit, jotka vaikuttavat keskeisesti pastanpainon lopputulokseen:

2.2.2.1 Paine

Se voima, jolla raakkelin terä tai painopää painaa stensiiliä, on pastanpainossa käytetty paine. Siitä käytetty yksikkö on [kg], joka kuvaa sitä, miten suuri massa vaadittaisiin synnyttämään sama raakkelia stensiiliä vasten painava voima. (Ymmärrettävyyden kannalta olisi kuitenkin parempi käyttää yksikkönä [kg/cm]. Silloin raakkeleiden leveyden poikkeavuudet (kapea vs. leveä) eivät aiheuttaisi väärintähtäyksiä.) Paineen suunta on kohtisuoraan stensiiliä vasten. Operaattoreiden mukaan se on pastanpainoprosessin tärkein muuttuja.

Paineen suuruus määräytyy kokemuksen ja painojäljen perusteella, jota arvioidaan useimmiten silmämääräisesti. Aloituspainetta valittaessa otetaan huomioon käytössä olevan raakkelin leveys. Rajoituksina pidetään alarajalla asfaltin syntymistä ja ylärajana kumiraakkeleita käytettäessä kuopimisen pitämistä kohtuullisena (painokokous).

2.2.2.2 Nopeus

Nopeus kuvaa raakkelin tai painopään etenemisnopeutta stensiilin pinnalla. Se on paineen ohella tärkein muuttuja pastanpainoprosessissa. Vaatimukset nopeuden suhteen tulevat yleensä tuotannosta ja mikäli tuote on nopea latoa ja sulatusjuottaa, halutaan pastanpainon nopeutta nostaa. Pastausvaihe ei saa olla pullonkaula ja juuri siksi painonopeus pidetään helpoilla tuotteilla mahdollisimman korkeana.

Painonopeudella on monia vaikutuksia pastan ominaisuuksiin. Pastan viskositeetti ja leikkausjännitys muuttuvat rasiustilanteissa ja siksi painolaatu vaihtelee todennäköisesti myös suhteessa painonopeuteen. Valmistajat ilmoittavat pastoilleen soveliaan nopeushaarukan, jonka sisällä ne toimivat halutulla tavalla.

2.2.2.3 Irtoamisnopeus

Se nopeus, jolla stensiili ja piirilevy irtoavat toisistaan pastauksen jälkeen on irtoamisnopeus. Mitä pienempi avaus sitä pienempi on käytössä oleva prosessi-ikkuna. Ultra-fine-pitch-luokassa kaikkien pastanpainon alaprosessien täytyy olla hallinnassa, erityisesti avausten tyhjennysvaiheiden.

Pastan avaukseen saamisen jälkeen nousevat muut tekijät kuin painokoneen asetukset tärkeiksi. Niitä ovat stensiilin osalta mm. paksuus, avausten seinämien karkeus, niiden kaltevuuskulma, avausten muoto ja koko. Pastan hyvän avauksesta irtoamisen edellytyksenä on, että sen adheesiovoimat stensiilin seinämiin ovat pienempiä kuin pastan koheesiovoimat ja samanaikaisesti adheesiovoimat liitosalustaan ovat suuremmat kuin avauksen seinämiin. Mitä pienempi avaus on, sitä suurempi on seinämien ja pastan sisäisten voimien rooli ja sitä vähäisempi on painovoiman vaikutus.

Irtoamisnopeus on kriittinen tekijä, koska se on ainoa hallittava muuttuja, joka vaikuttaa pastan irtoamiseen avauksesta liitosalustalle. Eli pastaa täynnä olevan avauksen

tyhjenemiseen painohetkellä voidaan vaikuttaa vain stensiilin irtoamisnopeuden kautta. Tosin on mainittava, että värinän käyttö voi edesauttaa pastan vapautumista avauksen seinämiltä ja siten vähentää tukkeutumisvaaraa (He).

2.2.2.4 Pesuohjelma

Pesun tarkoituksena on poistaa avausten kautta stensiilin alapinnalle pursuava pasta. Sen syntyyn vaikuttavat monet eri tekijät kuten liitosalustojen pinnoitteen paksuusvaihtelut ja piirilevyjen pinnan epätasaisuus, joihin taas vaikuttavat useat piirilevyjen valmistuksen osatekijät.

Stensiilin ajoaikainen pesu pitää sisällään pesuaineen annostelun, pesuvälin sekä kosteiden ja kuivien pyyhkäisyjen lukumäärän. Sen optimointi on painolaadun kannalta erittäin tärkeää. Sen valintaan vaikuttavat niin käytössä oleva pasta, stensiilin valmistus tapa kuin avauskokokin. Pesuohjelman laatii käytännössä pastanpainosta vastaava operaattori ja se tehdään pitkälti kokemuksen perusteella. Mahdolliset muutokset perustuvat yleensä painojäljen visuaaliseen seurantaan.

2.2.3 Ympäristötekijät

Juotepasta on metallipartikkeleiden ja nestemäisten aineiden seos, johon vaikuttavat painotilan olosuhteet ja etenkin silloin, kun avoin aika on pitkä, ne näyttelevät tärkeää osaa painon lopputuloksessa. Alla on lueteltu painon kannalta tärkeitä ympäristötekijöitä:

- Painotilan lämpötila: Pastan tiksotrooppiset ominaisuudet viskositeetti ja leikkausjännitys muuttuvat lämpötilan mukana, samoin sen tahmeus. Pastan kuivuminen kiihtyy lämpötilan noustessa eli se vaikuttaa myös avoimeen aikaan.
- Vallitseva ilmankosteus: Pastan vesipitoisuus nousee avoimen ajan kasvaessa ja sen muutosnopeus on riippuvainen ilmankosteudesta. Juotepastan vesipitoisuudella on vaikutusta sekä pastanpainoon että sulatusjuotokseen.
- Yleinen siisteys: Pöly ja piirilevyille tuleva lika voivat vaikuttaa painotulokseen ja niiden synnyttämien ongelmien tulisi näkyä viimeistään sulatusjuottamisen jälkeen. Ylimääräinen lika edesauttaa tinapallojen syntymistä.
- Painotilan ilmastointi: Pastan kevyet komponentit höyrystyvät merkittävässä määrin jo huoneen lämpötilassa ja pasta kuivaa sitä nopeammin mitä tehokkaammin painotilan ilma vaihtuu. Sillä on samansuuntainen kuivamista kiihdyttävä vaikutus kuin lämpötilan nostolla. Seurannaisvaikutuksena on lisäksi pastan lämpötilan laskeminen, sillä keveiden komponenttien höyrystymiseen tarvittava energia on peräisin pastamakkarasta.

Pastan kuivumista voi hidastaa pitämällä painokoneen kansi suljettuna, mutta olipa painopää avoin tai suljettu ei sitä voida kokonaan estää. Pastanpainossa stensiilille jää ohut silmälle näkymätön fluksikalvo, joka höyrystyy joko kokonaan tai osittain ennen seuraavaa painosykliä. Pasta kuivaa aina painossa ja tapahtumaa voidaan ainoastaan hidastaa pitämällä painokoneen ilmastointi pienenä.

2.2.4 Pastanpainoon valitut materiaalit ja raaka-aineet

Pastanpainon lopputulokseen vaikuttavat tietenkin siihen valitut materiaalit, ne joita työestetään ja ne, joille pastaa painetaan, eli kokonaisuutena kaikki valitut raaka-aineet. Keskeisimmät painotulokseen vaikuttavat tekijät ovat seuraavat:

- Juotepasta: Stensiilipainannan ja koko pintaliitoksen onnistumisen kannalta keskeisin elementti on juotepasta. Se on materiaalina homogeeninen ja kineettisesti vakaa juotepulverin, fluksin ja kantoaineen muodostama suspensio (Hwang). Reologisesti katsottuna se on erittäin kompleksinen korkean kiintoainepitoisuuden omaava keskiviskoosinen jatkuvan kermamaisen faasin muodostava liete. Sen kohtuullisen suuret metallipartikkelit pysyvät seoksen osana viskoosien suspensioaineiden tukemana. Juotepastan reologia on tärkeä, koska sen virtaus- ja muokautuvuusominaisuudet vaikuttavat painolaatuun ja painon jälkeiseen käyttäytymiseen, kuten tahmeuteen ja vajoamisherkkyyteen (Bao).

Pastan reologia pitää sisällään niin sen viskositeetin ja elastisuuden kuin tiksotrooppiset ominaisuudetkin. Viskositeetillä kuvataan aineen sisäistä kitkaa, sitä miten paljon aine vastustaa virtausta. Monilla nesteillä se pysyy rasiustilanteissa, lämpötilan ollessa muuttumaton, vakiona ja niistä käytetään nimitystä newtonmaisat aineet. Juotepastalla se on riippuvainen leikkausnopeudesta ja rasituksen kestosta; mitä korkeampi leikkausnopeus ja mitä pidempään se kestää, sitä matalampi viskositeetti. Siksi pasta luetaan ei-newtonmisiin, tiksotrooppisiin aineisiin. Tiksotrooppisuudella tarkoitetaan juuri rasiustilanteissa rasituksen voimakkuuden ja keston mukana laskevaa ja palautuvaa viskositeettia (Barnes). Pastan tiksotrooppista käyttäytymistä (pseudoplastisuutta) kuvaa sen tiksotrooppinen indeksi, Ti . Se ja viskositeetti kuvaavat parhaiten juotepastan käyttäytymistä painotilanteessa.

Pastan toimivuuteen ja käyttäytymiseen vaikuttavat myös sen metallipitoisuus, metallipartikkeleiden muoto ja raekokojakauma, avoinaika ja tahmeus (Morris, Okura, Hwang). Niiden on sovelluttava tuotantoprosessin, työkalujen ja tuotteiden asettamiin vaatimuksiin. Mm. pastan toimittajasta ja artikkelista riippuen suositukset pastan ja avauksen oikeasta tai riittävästä suhteesta vaihtelevat kolmesta viiteen. Yleensä puhutaan stensiilin lyhyimmän avausmitan ja pastan keskimääräisen raekoon välisestä suhteesta, jonka tulisi olla yli viiden. Hwang on todennut, että stensiilin paksuuden ja pastan raekoon välisen suhteen tulisi olla yli kolme.

Juotepastan käyttäytyminen erilaisissa lepo-, rasiustilanteissa riippuu kaikista edellä mainituista tekijöistä. Painettaessa erikokoisia pastakakkuja juuri ne ratkaisevat hyvin pitkälle, millainen on pastanpainon loppulaatu. Pastat voidaan luokitella niissä olevan fluksin, metallipartikkeleiden koostumuksen, viskositeetin ja partikkelikoon mukaisesti. Toisistaan suuresti poikkeaville tuotteille, joiden vaatimukset ovat erilaiset, onkin valmistettu hyvin erilaisia pastoja.

- Stensiilin pesuaineet: Stensiilin puhdistamiseen käytettyjen aineiden kriittisiä tekijöitä ovat niiden kyky liuottaa pastajäämiä, pintajännitys, leimahduspiste, haihtuvuus ja ärsyttävyyt. Tarjolla on useita kaupallisia stensiilin puhdistukseen suunniteltuja pesuaineita ja on monia pastanvalmistajia, jotka ovat räätälöineet sellaiset omille pastoilleen. Olennaista pesuaineessa on sen kyky liuottaa pastan

nestemäisiä osia, koska pastojen fluksien välillä on eroja eivätkä kaikki pesuaineet toimi kaikkien pastojen kanssa yhtä hyvin. Kaupallisissa pesuaineissa on toimivuuden lisäksi kiinnitetty huomiota myös turvallisuuteen, sillä liuottimien kanssa on aina olemassa myös syttymisvaara. Yleisesti kuitenkin suositaan edullisia liuotinpesuaineita kuten isopropanolia. Lopputuloksen laatu paranee, jos pesuaine sisältää useampia liuottimia, havainnollisena esimerkkinä voidaan pitää kaikille tuttua käsien pesua; jos käytettävissä on vain vettä tai saippuaa, tulos on huonompi kuin jos molemmat aineet ovat käytössä. Syynä on se, ettei yksittäinen liuotin liuota kaikkea. Liuottamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä puhdistamista (Clouthier).

- Stensiilin puhdistamiseen käytetty paperi: Käytön kannalta olennaista on sen imu-kyky, pölyämättömyys ja mekaaninen kestävyys. Esimerkiksi paperikuitujen katkeilusta ja monikerroksisten puhdistusrullien ja käsipapereiden paperikuitumuovikalvo rajapinnoilta irtoavien liimapartikkeleiden voi olettaa aiheuttavan vähäisiä tinapallo-ongelmia.
- Piirilevy: Pastanpainon kannalta piirilevyn liitosalustojen pinnoitemateriaali on tärkeä, sillä niiden tasomaisuus on pitkälle pinnoitteesta kiinni. Esimerkiksi tinalyijy-pintaist liitosalustat ovat aina epäsymmetrisiä ja esitinauksen määrä vaihtelee liitosalusta-, piirilevy- ja tuotantoeräkohtaisesti jonkin verran. HAL ja HASL prosesseissa SnPb-pinnoitteen paksuus vaihtelee 1–40 µm. Sen lisäksi pasta tarttune painotilanteessa toisille liitosalustamateriaaleille paremmin kuin toisille.

Painon kannalta piirilevyn tärkein tekijä on sen tasomaisuus. Se ei saisi olla kiero eikä käyrä. Ongelmia tulee esimerkiksi silloin, kun piirilevy on hivenen kupera. Silloin käy helposti niin, ettei tuenta saavuta piirilevyn pintaa sen keskiosissa. Vaikka piirilevyä suoristavat painotilanteessa sekä painokoneen klämpyt, tuenta että stensiili, voi sille jäädä alueita, joilla kontakti joko piirilevyn ja stensiilin tai raakkelin ja stensiilin väliltä puuttuu ja seurauksena on heikko painojälki (pastanpainokokous).

2.2.5 Työtavat

Painajan omat tottumukset muodostavat painoprosessin vaikeimmin mitattavan ja määriteltävän osan, koska hänen tekemisiään on vaikea esittää luotettavasti. On kuitenkin todettu, että operaattoreiden välillä esiintyy painolaadussa havaittavia eroja. Työvaiheet, joissa eroja voi syntyä, ovat seuraavat:

- Stensiilin ajonaikainen käsipesu: Herkimpinä kohtina pidetään pesuaineen annostelua, stensiilin pyyhkimistä ja valittua pesuväliä. Mikäli niissä on tehty yllälyöntejä, painon lopputulos on keho. Yleensä huonon painolaadun näkee jo silmällä, jolloin tarvittavan korjauksen voi tehdä välittömästi. Haastattelujen perusteella ongelmat ovat harvinaisia ja syntyvät vahingot vähäisiä.
- Pastan annostelu ja sekoitus: Se, miten paljon pastaa operaattori pitää stensiilillä, riippuu operaattorin mieltymyksistä; toiset haluavat lisätä pastaa harvemmin, jolloin kerta-annos on suurempi. Rajoittavina tekijöinä ovat yleensä stensiilin etu- ja takareunalla olevat avaukset, koska käytetyn pastan määrän tulee mahtua niiden

ja raakkelin väliin ongelmitta ennen ja jälkeen vetojen. Toisaalta pastan avoin aika voi kasvaa tarpeettoman suureksi, jos sitä lisätään yhdellä kerralla suuria määriä.

Pastan käyttöönottoa edeltää sen huolellinen sekoittaminen, jolloin sen pintaan nousseet keveämmät komponentit sekoittuvat osaksi raskaampaa suspensiota. Sen tarkoituksena on samalla notkistaa lepotilassa jäykistynyttä pastaa ja se on toistettava pitkien taukojen jälkeen pastan ominaisuuksien palauttamiseksi uudelleen. Toimenpidettä sanotaan myös virkistämiseksi. Viskoosina aineena pasta lämpenee sekoituksen aikana nopeasti, jopa 5°C vahaassa puolessa minuutissa (Ekere MC1-2). Toimenpiteen kesto ja teho vaihtelevat tekijäkohtaisesti ja siten myös sekoituksen lopputulos ja varsinaisen painon aloittamisessa olevan pastan tila.

- Piirilevyn asemointi: Tämä tarkoittaa kohdistuspisteiden koon ja sijainnin mittausta ja niiden valintaa piirilevyltä tilanteissa, joissa ne puuttuvat stensiililtä.
- Tuennan rakentaminen: Mahdollisuus ja tarve rakentaa piirilevylle tuenta vaihtelevat tuotteittain suuresti ja lisäksi sen rakennustapa vaihtelee operaattorikohtaisesti. Yksittäisen piirilevyn kohdalla voidaan käytännössä päätyä hyvin monenlaisiin tuentaratkaisuihin.
- Piirilevyjen käsittely: Käsien yleinen puhtaus liittyy yleisen siisteyden kanssa yhteen. Mitä vähemmän likaa sitä pienempi riski on siitä aiheutuviin ongelmiin. Molemmista aiheutuvia häiriöitä on oletettavasti kokonaisuuteen nähden vähän, mutta niiden välttäminen on varsin helppoa. Olennaista ovat oikeat käsittelytavat, jolloin kontakti sekä komponentteihin että piirilevyihin ei saastuta kriittisiä liitospintoja. Liitosalustojen koskettelu paljain sormin voi heikentää laatua jo painotilanteessa ja myös kumikäsineiden talkki voi tuottaa ongelmia. Todennäköisimmin viat ilmenevät vasta sulatusjuottamisen jälkeen. Sormenpäissä on aina hieman rasvaa ja muuta likaa, jota kontaktissa siirtyy kosketuspinnalle esimerkiksi liitosalustalle. Tulee myös muistaa, että juotepastassa olevat puhdistavat aineet eivät tehoa ihon rasvoihin.

3 KOEJÄRJESTELYT JA TÄRKEIMMÄT HAVAINNOT

3.1 Pastanpainon alustava seuranta: tavoitteet, toteutus ja havainnot

3.1.1 Seurannan toteutus ja tavoitteet

Pintaliitoksen seuranta tehtiin useammassa jaksossa kesällä 1999. Ensisijaisena tavoitteena oli seurata pintaliitoslinjan toimintaa käytännössä ja havainnoida sen ongelmatilanteita ja etsiä syitä tuotannossa toistuville ongelmille. Seurannan keskipisteenä oli pastanpaino ja siihen liittyvät toimenpiteet. Linjan toimintaan, rutiineihin ja ongelmiin perehtymisen lisäksi tavoitteena oli tehdä yksinkertaisia painolaadun mittauksia, joista saatava tieto olisi apuna määrittäessä tulevien koesarjojen sisältöä. Pohjatyo osoittautui tarpeelliseksi ja hedelmälliseksi.

3.1.2 Painolaadun seuranta

Alkuvaiheessa, tilanteessa jossa pastanpainosta ei ollut käytettävissä aikaisemmista painokerroista kerättyä dataa eikä prosessista ollut pastan määrästä tietoja keräävää mittalaitetta, oli painolaadusta saatava edes karkeaa mittaustietoa pelkkien aistinvaraisten havaintojen tueksi. Painojälkeä seurattiin punnitsemalla painettavat piirilevyt sekä ennen pastanpainoa että sen jälkeen. Painossa piirilevyille jääneen pastan määrä saatiin punnittujen massojen erotuksesta ja vaikka se oli mittaustapana karkea, se antoi jonkinlaisen käsityksen pastan kokonaismäärän vaihteluista. Suhteuttamalla saatuja tuloksia erilaisten piirilevyjen avausten lukumäärään ja kokoon sekä vertaamalla niiden välisiä käyttäytymiseroja ja yhteneväisyyksiä näköhavaintoihin, saattoi tehdä varovaisia johtopäätöksiä siitä, miten voimakkaasti ja mihin suuntaa erilaiset liitosalustat reagoivat painossa tapahtuviin rutiineihin ja muutoksiin.

3.1.2.1 Pastan määrän punnitsemisesta

Yhdelle piirilevyille tuli kahden peräkkäisen mittauksen saada sama arvo ennen kuin mittaustulos hyväksyttiin. Käytännössä se tapahtui seuraavasti: Piirilevy laskettiin varovasti yläkuppivaa'alle ja tasoittunut tulos esikirjattiin. Punnittu piirilevy nostettiin pois vaa'asta ja laskettiin sille uudelleen, näytön tuloksen annettiin asettua muutaman sekunnin ja se kirjattiin hyväksynnän jälkeen lopullisena tuloksena, mikäli se täytti kriteerit. Piirilevyn punnitus toistettiin painon jälkeen. Puntarin taaraus eli nollatason kalibrointi tehtiin siten, ettei siinä korjattua virhettä kirjautunut punnittaville piirilevyille. Tämän lisäksi aloitusvirheen nousu pyrittiin estämään taajalla taarauksella. Tosin on todettava, ettei vaa'an nollatason ryömintä ollut nopeaa ja siitä aiheutunut virhe nosti lähinnä piirilevyjen keskiarvoa. Koska painossa piirilevyille tulleen pastan määrä laskettiin erotuksena (paino ennen ja jälkeen pastauksen) ei nollatasovirheestä ollut suurta haittaa. Virhe oli sama molemmissa punnituksissa. Vaa'an hitaasta ryöminnästä aiheutuneet poikkeamat pastan määrässä olivat luokkaa $\pm 3 \mu\text{g}$. Suurimmat mittausrvirheitä aiheuttaneet tekijät olivat ilmavirrat ja niiden hetkellinen vaikutus oli merkittävä etenkin pinta-alaltaan suurikokoisilla piirilevyillä. Karkeimmillaan suurilla piirilevyillä ja mittaustarkkuuteen nähden kovassa vedossa oli kriteeri pakko nostaa $\pm 10 \mu\text{g}$:aan, jotta tulokset saattoi hyväksyttävästi kirjata. Juuri siksi

mittaustulosten hyväksyntää tuli edeltää kaksi peräkkäistä mittausta, joiden tuloksen tuli olla sama; normaali hyväksymiskriteeri oli $\pm 5 \mu\text{g}$.

3.1.3 Juotepastan painamiseen ja seurantaan käytetty laitteisto

Painokone: Painokoneena oli DEK 265 Lt täysin automaattinen in-line painokone. Kaikki painoparametrit olivat ohjelmoitavissa raakkelin paineesta ja nopeudesta aina pesusekvenssin vetoihin saakka. Operaattorin tehtävänä oli lähinnä varmistaa pastan riittävyys ja valita halutut painoparametrit ja syöttää kohdistuspisteiden sijaintitiedot.

Stensiilit: Stensiileiden materiaalit olivat teräs ja nikkeli. Avaukset oli terässtensiileihin tehty laserilla polttamalla ja nikkelistensiilit oli valmistettu kasvattamalla. Kaikki stensiilit olivat uudehkoja ja siksi myös kireitä, tasomaisia ja kulumattomia.

Raakkelit: Käytössä oli ainoastaan hyväkuntoisia metalliraakkeleita, joiden terän 'overhang' oli 15 mm ja teräkulma 60 astetta.

Pasta: No-clean-tyyppinen QFP-piirien painamiseen suunniteltu juotepasta, jolle valmistajan suosittelema pienin jalkaväli oli 0.4–0.5 mm. Sen raekokojakauma oli 22–45 μm , metallipitoisuus 90 m-% (massaprosenttia) ja partikkeleiden muoto oli pyöreä.

Puntari: Vaaka oli Mettler-merkkinen laboratorikäyttöön valmistettu tarkkuusvaaka. Sen tarkkuus oli $\pm 0.1 \mu\text{g}$, näytöllä suurin tarkkuus 1 μg , mitta-alue 0.0001–360 g (1 μg –360 g) ja se oli säädettäväjalkainen taarattava yläkuppivaaka.

3.1.4 Seurantaan valituista tuotteista

Painotarkkailuun hyväksyttiin käytännössä kaikki ne tuotannossa olleet piirilevyt, joiden reaaliaikainen punnitseminen oli mahdollista. Reaaliaikaisuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että jokainen painoon mennyt ja sieltä tullut piirilevy ehdittiin punnita ja yksilöidä. Se oli välttämätöntä kahdesta syystä: Ensiksi piirilevyjen ja tukialustojen väliset massaerot olivat useimmiten monta kertaluokkaa pastauksessa syntyvää muutosta suuremmat eli punnitsemalla pelkkää lopputuotetta ei olisi tiedetty prosessissa piirilevyille tulleen pastan määrää. Toiseksi prosessissa tehdyistä muutoksista, siinä mahdollisesti esiintyvistä häiriöistä ja siihen kiinteästi kuuluvista rutineista aiheutuvat heilahtelut pystyttäisiin liittämään luotettavasti juuri niiden tapahtumisaikana painossa olleeseen korttiin, sille jääneen pastan määrään ja muiden saman aikaisesti painettujen piirilevyjen välisiin vaihteluihin.

Pyrkimyksenä oli suosia niitä tuotteita, joilla oli suhteellisesti enemmän pieniä avauksia. Näin siksi, että pienten avausten yhteydessä esiintyi enemmän juotosongelmia. Perimätiedon mukaan ne johtuivat yleensä pastan vähäisestä määrästä. Niiden reagointi painoparametrien muutoksiin ja häiriöihin oli luultavimmin voimakkaampaa kuin muiden liitosalustojen. Toinen korttien seurantaan valituksi tulemistä suosiva ominaisuus oli niiden liitosalustojen suuri lukumäärä. Mitä enemmän piirilevyllä oli liitospintoja sitä enemmän sille tuli pastaa ja sitä pienemmäksi mahdolliset mittausrvirheistä johtuvat vääristymät jäivät. Kolmantena seurantaan ottamisen kriteerinä oli painettavien tuotesarjojen pituus; mitä pidempiä ne olivat sen parempi. Pitkissä tuotantosarjoissa saisi tuntumaa stensiilin likaantumiseen ja pastan vanhenemiseen.

Punnittavaksi valitut tuotteet muodostivat varsin kirjavan joukon: Toiset piirilevyt olivat kookkaita ja jäykkiä, toiset pieniä, ohuita ja joustavia. Muutama niistä käsiteltiin molemmin puolin ja ne vaativat tuentaa – yksi jopa omaa tukialustaa. Korttien liitosalustojen pinnoitus oli lähinnä tinalyijy- ja kultapintaista. Painossa ollut pasta oli muutamaa poikkeusta lukuunottamatta sama, jolloin myös kesän mittaan tehdyt korttikohdaiset mittaukset olivat keskenään vertailukelpoisia.

3.1.5 Seurannan aikana tehdyt havainnot

Seurannan alkaessa strategiana oli keskittyä lähinnä piirilevyille painetun pastan punnitsemiseen. Tavoitteena oli kirjata korttikohdainen pastamäärä ja seurata sen muutoksia aikasarjana, jolloin saataisiin käsitys painossa todennäköisesti ilmenevistä trendeistä. Oli ennakoitavissa, että stensiilin likaantumisen ja pastan vanhenemisestä johtuvat hitaat muutokset olisivat havaittavissa punnitsemalla kerätystä datasta.

Varsin pian kävi ilmi, että pastan määrä vaihteli peräkkäisten piirilevyjen välillä huomattavasti ja erot olivat jopa kymmeniä prosentteja. Näin tapahtui ilman painoparametrien muutoksia. Havainnon jälkeen seurantaan otettiin painoprosessin tauot, painoparametrit ja stensiilin pesuohjelma. Tehtyjen haastattelujen ja pastanpainokokouksen jäljiltä keskeisimpinä pidetyt painoparametrit – raakkelin paine ja nopeus – kuuluivat jo seurattavien tekijöiden joukkoon. Siitä huolimatta tarkkailtavien tekijöiden lista kasvoi kesän edetessä. Loppukesästä mukana olivat jo tehdastilan, painokoneen ja painossa olevan juotepastan lämpötilat. On tosin mainittava, ettei lämpötiloja huomioitu kaikkina seurantapäivinä, vaan mittauksia tehtiin lähinnä heinäkuun hellepäivinä, jolloin sekä tuotantotilojen että pastanpainokoneen lämpötilat nousivat normaalia korkeammiksi.

3.1.5.1 Prosessivaiheisiin liittyvät havainnot

- Stensiilin ajoaikainen pesu

Heti ensimmäisten mittausten jälkeen nousi esiin stensiilin pesun vaikutus piirilevyille jäävän pastan määrään. Pesun jälkeinen piirilevy sai vähemmän pastaa kuin sitä edeltävä. Häiriö ilmeni sekä kone- että käsipesun jälkeen. Notkahdus näytti olevan sitä voimakkaampi, mitä enemmän pesuainetta käytettiin. Syynä oli mitä ilmeisimmin stensiilin alapinnan pesuun tarkoitetun puhdistusaineen aiheuttama häiriö.

Pesuaineen vaikutukset lienevät moninaiset. Se todennäköisesti täyttää stensiilin avauksia nousemalla sen seinämille ja haihtuessaan pois se ottaa tarvitsemansa höyrystymisenergian avauksen seinämille jääneestä pastasta, jonka lämpötila tuolloin laskee. Se puolestaan muuttaa pastan viskositeettia ja tahmeutta (tackiness), jolloin seuraavalla vedolla avaukseen painetun pastan käyttäytyminen seinämällä olleen ja uuden pastamakkarasta tulleen pastan rajapinnalla muuttuu. Haihtuva pesuaine muuttaa lämpötilan lisäksi todennäköisesti myös seinämälle jääneen juotepastan pinnan koostumusta ja tietenkin vie osan avauksen tilavuudesta. Lopputuloksena on vähemmän pastaa liitosalustalla.

Stensiili puhdistettiin normaalipesua huolellisemmin noin 50 kortin jälkeen ja silloin notkahdus oli selvästi havaittavissa kaikilla piirilevytyypeillä. Sen suuruus vaihteli 10–20% ja heti pesun jälkeen oli piirilevyille jäävän pastan volyyymi alimmillaan. Ta-

vallisen pesun yhteydessä notkahdus oli selvästi tehopesua pienempi ollen tuotteesta ja pesuohjelmasta riippuen 3–10%.

Pesuaineen annostelusta voi tulla ongelmia myös niin sanotuilla automaattisilla pastanpainokoneilla, jolloin syynä on pesuohjelman kosteiden vetojen liika suosiminen. Yleensä on niin, että painokoneen pesuaineen annostelu on toimittajan tai valmistajan toimesta säädetty lähelle sopivaa annoskokoja, jolloin sen kaksinkertaistaminen ei enää tuo parannusta pesutulokseen. Käsipesussa ongelmat ovat usein suuremmat, mutta myös sen synnyttämät häiriöt ovat helposti minimoitavissa. Selvän parannuksen sen laatuun saa muuttamalla pesuaineen annostelun hallituksi ja ennalta sovituksi. Tämä tapahtuu esimerkiksi vaihtamalla pesuaineen kaatokannu suihkepulloon ja vakioimalla pesuliinalle annettavien suihkausten määrä, jolloin käsipesuliinalle saadaan toistuvasti kohtuullisen tarkasti sama määrä pesuainetta.

- Piirilevyllä jäävän pastan määrän värähtely painosuunnittain

Pesun vaikutuksen arviointia vaikeutti eräillä tuotteilla esiintynyt pastan määrän vaihtelu painosuunnittain. Se oli tuotekohtainen ominaisuus, jonka suuruus vaihteli painopäivittäin. Oli tuotteita, joilla sitä ei juuri havaittu ja taas niitä, joilla sitä ilmeni poikkeuksetta selvästi. Se näytti olevan voimakkaampaa tuoreella pastalla. Volyymin riippuminen painosuunnasta oli parhaiten havaittavissa pitkissä sarjoissa, joiden aikana se saattoi hetkeksi loppua, mutta palasi takaisin muodostaen tuloksista piirretylle kuvaajalle säännöllisen muotoisen sahalaitakuvion, jossa painosuuntien erot pysyivät samassa kokoluokassa.

- Painettujen piirilevyjen väliset viiveet

Toinen oletettua selvemmin esille noussut painolaatuun vaikuttava tekijä oli pastoitusta edeltävä viive. Pastan määrä piirilevyllä laski havaittavasti jo yli kymmenen minuutin pituisista tauoista ja mitä pidempiä ne olivat, sitä selvempi oli lasku. Pastan määrän lasku oli merkittävää yli 20 minuuttia kestäneiden taukojen jälkeen. Viiveensietokyvyllä ja painotaajuudella näytti olevan jonkinlainen yhteys. Tiheässä painannassa, jossa pasta pysyi vireänä lyhyen aikaa, näytti viiveensieto olevan hieman parempaa kuin niillä tuotteilla tai kerroilla, joilla paino oli verkkaista (painoväli noin 2–5 min). Viiveen ollessa luokkaa 30 minuuttia oli pastan volyyymi koko piirilevyllä laskenut keskimäärin noin 20%. Silmämääräisesti arvioituna muutokset olivat suurimmat pienimmillä QFP-piirien ja palakomponenttien avauksilla. Se oli odotettavissa, sillä niiden pinta-alojen suhdeluku eli $\text{area ratio} [= \text{avauksen pituus} \times \text{leveys} / \text{avauksen seinämäala}]$ on pienin. Mikäli pastassa ja painoparametreissa tapahtuisi muutoksia, niiden tulisi näkyä selvimmin juuri pienimmissä avauksissa.

- Lämpötilan vaikutus

Painopäivien välillä oli pieniä, mutta selviä tasoeroja ja mm. lämpötilan nousu nosti myös liitosalustalle jäävän pastan määrää. Volyymin keskiarvossa muutos oli 5%:n luokkaa ja ottaen huomioon muut vaihtelut ei sillä ollut suurta vaikutusta pastanpainon laatuun. Päiväkohtaiset tasoerot voivat johtua monista muista tekijöistä; pastaerien välillä on pieniä laatueroja, piirilevyjen esitinauksessa on laatueroja toimituserien välillä, painotaajuus vaihtelee jne. . .

- Tuotesarjojen alkuun liittyvät ongelmat

Päivästä ja vuorokauden ajasta riippumatta jäi pastan määrä sarjan alussa poikkeuksetta sen keskiarvoa heikommaksi pastan virkistämisen huolimatta. Aika, joka kuluu ensimmäisen ladotun piirilevyn tarkastukseen, on useimmiten yli kymmenen minuuttia ja näin pastanpainossa tulee liian pitkä viive. Käytännössä ne piirilevyt, jotka painetaan ennen ladonnan visuaalista tarkastusta ja ne kaksi kolme, jotka painetaan välittömästi sen jälkeen saavat vähemmän pastaa kuin normaalissa lyhytviiveisessä painossa olevat piirilevyt. Tuotteen vaihdon yhteydessä syntyvistä tauoista kärsii siten puolenkymmentä piirilevyä.

- Asemointiin liittyvät virheet ja niiden syyt

Painossa esiintyneet pastan siirtymät eli pastan painaminen ohi liitosalustan näyttivät liittyvän lähinnä kohdistuspisteiden asetuksessa ja piirilevyn tuennassa oleviin heikkouksiin, eivätkä painokoneessa käytettyihin parametreihin. Niillä ei ollut havaittavaa vaikutusta koko piirilevyllä tulleen pastan määrään. Mikäli tuenta oli ollut tasainen, olivat pastakakkujen muodot, korkeus ja pinta-ala, silmämääräisesti arvioituina samanlaisia, vaikka ne olivat liitosalustan sivussa.

Syyt kohdistusongelmien takana olivat kirjavat; yksi tekijä oli kohdistuspisteiden väärät kokoasetukset painokoneella ja toinen oli tuentaan ja tukialustoihin liittyvät heikkoudet. Piirilevyjen laatu tuntui joskus epäilyttävältä. Esimerkiksi yhdellä tuotteella kohdistuspisteiden koko ja jopa muoto vaihtelivat eri tuotantoerien välillä, jolloin syntyi tilanteita, joissa painokone keskitti kortin stensiilin suhteen virheellisesti, koska sille aiemmin syötetyt lähtötiedot olivat väärät. Vastaavasti toisella pienieräisellä tuotteella vaikutti siltä, että komponentin kolme sivua oli ladonnan jälkeen kohdallaan, mutta neljäs toistuvasti siirtynyt hivenen sivuun liitosalustaltaan. Syntyi vaikutelma, etteivät liitosalustat tai komponenttien jalat olleet aivan samanlaiset kaikilla sivustoilla. Tosin, mikäli pastaus on sopivasti liitosalustojen sivussa ja suuri komponentti vastaavasti kiertynyt sopivan epäkeskosti, on silmämääräisesti erittäin vaikea todeta poikkeaman johtuvan molemmista sekä pastauksesta että ladonnasta. Tällöin saadaan virheellinen käsitys virheestä piirilevyn valmistuksessa. Silmä harhauttaa katsojaa varsin helposti ja kyseessä taisi olla taittovirhe.

3.1.5.2 Prosessiparametreihin liittyvät havainnot ja kokemukset

- Raakkelin paineesta ja sen käytöstä

Paine on painajien mukaan keskeisin ja tärkein muuttuja. Sen tason valinta on ollut kirjava. Käytännössä sitä on vaihdeltu hyvin eri tavoin sekä yksittäisen tuotteen että erilaisten korttien ja ongelmatilanteiden suhteen varsin mielivaltaisen tuntuisesti.

Rajoituksina paineen valinnalle ovat olleet lähinnä sen riittävyys, ns. asfalttia ei ole saanut syntyä. Tämän lisäksi vanhastaan kumiraakkeiden käytön yhteydessä ollut kuopaisuongelma on jäänyt historiaan, mutta vaikuttaa yhä painajien työtavoissa. Korkeita paineita vältetään edelleen. Se saattaa olla myös aiheellista, sillä korkea vetopaine ja ohut metallinen raakkelin terä kuluttavat stensiilin pintaa kumiraakkelia nopeammin. Tämän lisäksi stensiilin materiaalista riippuen voi seurauksena olla sen

hidas valssautuminen, mikä ilmenee sen löystymisenä. Stensiili menettää tuolloin nopeammin tasomaisuutensa, joka on yksi hyvän painojäljen edellytyksistä.

Tuotannossa on toistuvasti tullut esille, että eri leveyksisiä piirilevyjä painetaan samalla leveällä raakkelilla. Seurauksena on, ettei asetettu paine ole ollut kaikille piirilevyille sama raakkelin leveyssuunnassa. Se on helppo todeta esimerkiksi asfaltin ilmestymisenä piirilevyn reunojen ulkopuolelle. Pitkään tuotannossa olleilla stensiileillä piirilevyn ääri viivat ovat ikäänkuin hahmoteltuina näkyvissä. Mikäli paine-eroa ei olisi, ei rajapintaakaan näkyisi. Stensiili joustaa piirilevyn loppuessa jonkin verran, vaikka se olisi silmämääräisesti kireä. Silloin paine on varsinaisella painoalueella suunniteltua korkeampi.

Oletus ennen koesarjoja: Periaatteessa paineen tulisi olla suhteellisesti sama niillä tuotteilla, joilla ei ole eroja avausten koon ja muodon, stensiilin valmistustavan tai käytettävän raakkelin suhteen. Eli pastoitettaessa keskenään samanlaisia liitosalustoja samanlaisella menetelmällä valmistetun stensiilin kanssa, jonka avaukset ja vahvuus ovat identtiset, tulisi painojäljen olla samanlaista samoilla parametreilla.

Kokeellisesti olisi selvitettävä paineen valinnan perusteet: Milloin tulisi käyttää mitään painetta ja onko oltava tuotekohtaisia eroja. Lisäksi olisi selvitettävä, miten paljon ja millä lailla paine vaikuttaa pastakakkuihin – niiden pinta-alaan ja korkeuteen ja siten kaikkein tärkeimpään eli kokonaistilavuuteen. Kiinnostavaa on myös pastan käyttäytymisen muuttuminen erilaisilla paineilla ja se, vaatiiko eri paineella painettu pastakakku myös erilaisen irtoamisnopeuden. Miten voimakkaita ovat avaukseen jäävän pastan volyymin muutokset erilaisilla paineilla? Korreloiko painotulos nopeuden ja paineen muutoksiin, jne. ?

- Raakkelin nopeudesta

Valitun nopeuden vaikutuksia ei aiemmin ole voitu mitata ja tarkastella kunnolla, sillä ilman tarkkaa pastan tarkastuslaitteistoa se ei ole mahdollista. Pastan viskositeetti ja leikkausjännitys muuttuvat nopeuden muuttuessa ja niillä pitäisi olla suora vaikutus sekä painojälkeen että raakkelin paineen vaatimuksiin. Joskus näkee painettavan jopa valmistajien suosituksia korkeammilla nopeuksilla. Silloin painojäljessä ja juotostuloksissa on oletettavissa muutoksia, joita ei silmällä havaitse.

Pastanpaino on ollut pintaliitosprosesseista se, joka joustaa ja on valmiina eri tuotantotilanteessa. Käytännössä ne tuotteet, joilla se on tuotannon kapeikko, ovat harvassa. Raakkelin nopeutta onkin tuotantotilanteessa vaihdeltu lähinnä painolaadun mukaan ja mikäli ongelmia on esiintynyt, se on paineen ohella koettu tärkeimmäksi muuttujaksi.

- Pastan määrästä stensiilillä

Painajien väliset erot pastan määrän käyttämisessä ovat huomattavat. Syyt eroihin jäivät kysyttäessä vaille selventävää vastausta. Vähäisen pastamäärän käyttö lisää tietenkin pastan loppumisen todennäköisyyttä. Muita vaikutuksia pastan määrästä, paljoudesta tai vähyydestä, ei tunnettu.

Pienen ja suuren pastamakkaran käyttäytymiserot saattavat aiheuttaa muutoksia painojälkeen. Suuressa makkarakassa pasta kuivaa suhteellisesti hitaammin, koska haihtuminen tapahtuu vain pastan pintakerroksista ja pastamakkaran kasvaessa pinta-ala/tilavuus-suhde pienenee. Pastan kevyet komponentit haihtuvat jo tuotantotilan lämpötiloissa (20–25°C) ja mitä pienempi on pastamakkara, sitä nopeammin pasta kuivaa ja hidastempoisessa painossa kuivumisen merkitys kasvaa. Toisaalta pastamakkaran ollessa suuri pastan lisäystaajuus on pienempi ja siten sen avoinaika kasvaa.

Pasta lämpenee painotilanteen aikana. Viskoosina aineena se muuttuu ja varastoi liike-energiaa lämpöenergiaksi joka vedon aikana. Painotilanteessa se rullaa ja hankaa stensiiliä ja raakkelinterää vasten ja lämpenee sekä vastaavasti jäähtyy taukojen aikana. Lämpötilan muutos ja tehdyn työn määrä riippuvat molemmat pastamakkaran koosta ja koska suurimmat muutokset lämpötilassa ovat raakkelin läheisyydessä, se voi näkyä painotuloksessa.

Pastamakkaran raakkelin etupuolelle vedon aikana synnyttämä paine kasvaa pastamäärän kasvaessa. Juotepastan tunkeutuminen avaukseen on tehokkaimmillaan noin 1 cm päässä raakkelin terästä. Siten on syytä olettaa sen määrällä olevan vaikutusta etenkin kriittisillä avauksilla, eli niillä, joiden mittasuhteluku ja pinta-alojen suhteluku ovat pienimmät.

Raakkelin paine on kohtisuorassa stensiiliin nähden aivan kuten pastamakkaran vastustus raakkeliä vastaan olipa teräkulma mikä tahansa. Nopeus, jolla raakkeli irtoaa stensiilistä, riippuu paitsi valitusta paineesta ja teräkulmasta myös pastamakkaran koosta. Käytännössä paino-olosuhteet vaihtelevat sekä keskeisimpien painoparametrien (paine ja nopeus) että pastan määrän mukaan. Tietoa pastan määrän vaikutuksista painolaatuun ei ole, mutta on kuitenkin syytä olettaa, ettei se ole tekijänä merkityksellönä.

- Havaintoja irtoamismatkasta

Stensiilin irtoamismatka voi olla liian lyhyt ja tuolloin myöhemmin piirilevystä irtoava osa eli yleensä kortin keskialue on edelleen kiinni piirilevyssä, vaikka pehmeä irtoamismatka on jo käytetty. Seurauksena on huomattavasti suurempi irtoamisnopeus piirilevyn keskialueella, joka voi aiheuttaa paikallisia ongelmia. Jos irtoamismatka on minimoitu pienelle irtoamisnopeudelle, saattaa se osoittautua liian lyhyeksi irtoamisnopeuden nostamisen myötä. Tuolloin voi ilmetä eroja hitaasti ja nopeasti irronneiden piirilevyjen välillä.

3.1.6 Seurannalla saavutetut hyödyt

- Punnitsemisella saavutetut kokemukset

Punnitseminen antoi selkeän kuvan pastan määrän muutoksista koko piirilevyn tasolla. Se oli myös halpa tapa seurata painoa ja antoi konkreettista tietoa pastan määrän vaihteluista, josta pystyi tekemään tilastollista analyysiä. Menetelmänä se oli edullinen, helppo ja luotettava.

Punnitsemisessa on omat heikkoutensa. Se ei erottele piirilevyllä tapahtuneiden muutosten suuruusluokkaa erilaisilla liitosalustoilla. Pienin yksikkö, jonka sillä voi havaita, on koko punninnassa ollut kappale eli vähintään yksittäinen piirilevy. Se on myös hidaskäyttö ja työläs tapa tehdä pidempää seurantaa, koska jonkun on tehtävä työ käsin. Lisäksi se vaatii punnitsijalta tarkkuutta tuloksen kirjaamisvaiheessa, koska ilman suojaseinämiä se on herkkä ilmavirtausten (ohikulkijat, veto, mittajaan hengitys ja ilmastointi) aiheuttamille virheille. Mitattavia kortteja on punnittava sekä ennen että jälkeen painon ja ylimääräinen käsittely aiheuttaa riskitilanteita pastoitetuille piirilevyille.

Punnitsemisen käyttö osoitti, että varsin yksinkertaisilla toimenpiteillä saadaan hyödyllistä tietoa prosessista. Aina ei tarvitse sijoittaa kalliisiin mittalaitteisiin, jotta prosessin tilasta saataisiin numeerista ja luotettavaa tietoa. Seurannassa tuli todistetuksi myös se tosiasia, ettei asioista ja niiden tilasta voi sanoa mitään varmaa, ellei niitä seurata tai mitata jollain tavoin. Prosessiseurannan tulokset on kiinnitettävä ympäristöönsä niin, että myös myöhemmin selviää, mitä on mitattu ja missä olosuhteissa. Kerätty tieto ilman asiayhteyttä olisi tässäkin tapauksessa ollut arvotonta.

- Pastanpainoseurannan hyödyt teollisuuskokeiden suunnittelulle

Seuranta tehtiin nimenomaan tutkijan oman tietämyksen ja kokemuksen lisäämiseksi ja tavoitteena oli saada opastusta myöhempien kokeiden suunnittelua varten. Siinä onnistuttiin hyvin. Seurannan päätyttyä oli hankittu karkea yleiskuva painossa vallitsevista vikatilanteista ja niiden mahdollisista syistä. Saavutettu kokemus oli hyödyksi suunniteltaessa koesarjoja tarkoille mittalaitteille.

Yleiskuvaksi jäi, että liitosalustoille jäävän pastan volyyymi näytti olevan enemmän kiinni prosessin viiveistä, tuennasta ja stensiilin pesussa käytetyn pesuaineen määrästä kuin muista painossa vaikuttavista tekijöistä kuten raakkelin paineesta ja vetonopeudesta.

Painossa jo piirilevytasolla esiintyvä kohina on merkittävää. Tämän vuoksi koesarjoissa olisi yksillä painoparametreilla painettava useita piirilevyjä, jotta niiden vaikutus painolaatuun saataisiin luotettavasti selville. Pitkiä viiveitä tulisi välttää, sillä ne vääristävät tuloksia, mikäli niitä esiintyisi liikaa yhdellä koe-erällä.

Pienet avaukset reagoivat voimakkaimmin häiriöihin ja todennäköisesti myös painoparametreissa tehtäviin muutoksiin ja siksi koesarjojen painopisteen tulisi olla niissä. Metalliraakkeleihin siirtyminen on tehnyt suurikokoisista avauksista ongelmattomia ja ne saivat pastaa silmämääräisesti arvioituna hyvin riippumatta viiveiden ja pesujen aiheuttamista häiriöistä. Siitä huolimatta niiden valinta koesarjoihin oli välttämätöntä, jotta saataisiin parempi ja tarkempi kuva myös niiden käyttäytymisestä erilaisissa olosuhteissa.

Avauksien suunnalla näytti olevan merkitystä ja kokeisiin tuli siksi valita raakkeleihin nähden sekä kohtisuoraan että poikittain olevia avauksia. Samalla painosuunnan ja pastan volyymin välisen riippuvuuden selvittämiseksi seurannassa olevia liitosalustoja tuli olla piirilevyn reunoilla, lähellä raakkelin lähtökohtaa, ja keskellä, jolloin etäisyys painamisen alkukohdista olisi sama molempiin painosuuntiin. Avausten muodon ja

koon tuli olla riittävän kirjava, jotta eri avausgeometrioiden vaikutus painojälkeen saataisiin selville.

Piirilevyn tuennan merkitys oli osoittautunut suureksi ja herkäksi tekijäksi. Koesarjoissa olisi painettava hyvin tuettua, suoraa ja mielellään vielä jäykkää korttia, jotta saataisiin varmuus painosuunnassa ilmenneiden erojen aiheuttajasta ts. riippuko se painokoneen parametreistä ja miten suuret erot ovat erilaisilla avauksilla. Tuennan olisi koesarjan aikana oltava samanlainen kaikille painetuille piirilevyille, jolloin ei syntyisi järjestelmän muuttamisesta aiheutuvia eroja mittaustuloksiin.

Koko piirilevyn punnitsemista olisi jatkettava, jotta saadut liitosalustakohtaiset tulokset olisivat kiinnitettävissä ja suhteutettavissa suurempaan kehykseen. Punnitus toimisi samalla aiemmin tehtyjen mittausten vertailukohtana, kiinnepisteenä, jota vasten tuloksia peilattaessa saataisi löytyä yhtäläisyyksiä tai eroja. Saadut kokemukset antoivat syyn olettaa, että painoparametreillä saavutetut muutokset koko piirilevyn tasolla olivat pienempiä kuin aiemmin oli oletettu. Koeajoissa olisi pyrittävä painamaan suuressa prosessi-ikkunassa, jotta parametrien vaikutukset saataisiin varmasti esiin.

Pastan tuoreudella ja vireydellä oli lopputulokseen suuri vaikutus. Vanhalla pastalla jäätettiin voluumeissa tuoreesta pastasta noin 20% jälkeen. Koesarjoihin tulisi käyttää pastaa, jonka käyttöaika oli tiedossa ja mieluiten se saisi olla tuoretta. Samalla pastan vanheneminen oli otettava huomioon koejärjestystä valittaessa.

Lyhyesti koesarjoissa olisi otettava huomioon seuraavat asiat:

- Stensiilin ajoaikainen pesuohjelma
- Stensiilin painossa oloaika
- Stensiilin valmistustapa
- Viiveet
- Värähtely painosuunnittain
- Avausten koko
- Avausten muoto
- Avausten suunta
- Avausten sijainti
- Tuenta
- Painossa oleva kohina
- Pastan avoinaika
- Pastan soveltuminen kyseiseen painantaan
- Painotilan lämpötilan vaihtelut
- Kaikki painoparametrit
- Pastakakkujen normaalia pienempi voluumi tuotantosarjan alussa.

3.2 Koesarjat

Pastanpainoa testattiin seurannan jälkeen kaikkiaan kolmella eri tuotantolaitteistolla, joissa jokaisessa lähestyttiin pastanpainon rajoja ja ongelmia hieman eri puolilta. Kahdessa ensimmäisessä testausarjassa, jotka toteutettiin tuotantolinjoilla 1 ja 2, kes-

kityttiin painoparametrien vaikutuksiin ja kolmannessa pastan loppumisen havaitsemiseen.

3.2.1 Tuotantolaitteistolla 1 ajetuista koesarjoista ja koejärjestelyistä

Koeajot ajettiin teollisuustuotantoon suunnitellulla laitteistolla kahden päivän aikana syksyllä 1999. Koesarjan suunnittelussa ja piirilevyn valinnassa otettiin huomioon seuraavassa lueteltuja asioita:

3.2.1.1 Vaatimukset koesarjoihin valitulle piirilevylle

- Piirilevyn ominaisuudet: Painettavan piirilevyn tuli olla mahdollisimman tasainen ja jäykkä. Tällöin saadaan käsitys pelkkien painoparametrien vaikutuksesta pastakakkujen korkeuteen, pinta-alaan ja tilavuuteen. Sille rakennettavan tuennan tulee olla niin tiheä kuin mahdollista, koska silloin aikaisemman kokemuksen perusteella minimoituisivat vaihtelua aiheuttavien tekijöiden kuten epätasaisen tuennan, tukialustojen ja piirilevyjen kierouden aikaansaamat häiriöt ja pystytäisiin pienellä koemäärällä saavuttamaan luotettavat toistettavissa olevat tulokset.
- Piirilevyn liitosalustoista ja stensiilin avauksista: Piirilevyllä tuli olla useita fine-pitch komponentteja ympäri painoaluetta, jotta painojäljen vaihteluista sen eri puolilla saataisiin luotettava kuva. Liitosalustoja tuli olla painosuuntaan nähden sekä poikittain että kohtisuoraan, jolloin saataisiin selville, millaiset erot niiden välille syntyvät eri painoparametreilla. Pienillä avauksilla myös painosuunnalla oli aiemmin havaittu olevan vaikutusta liitosalustalle jäävän pastan määrään ja niinkään stensiilin alapinnan likaantumiseen. Se otettiin huomioon yhtenä tekijänä valittaessa seurannan kohteita.

Edellisten lisäksi oli toivottavaa, että piirilevyllä olisi mahdollisimman monen muotoisia pienikokoisia avauksia. Tällöin saadaan selville, miten paljon erilaiset avausgeometriat reagoisivat parametrien muutoksiin; toisin sanoen, onko niiden välillä eroja suhteessa sekä raakkelin paineen ja pesuohjelman että stensiilin irtoamisnopeuden muutoksiin.

- Liitosalustojen määrästä ja suhteesta: Piirilevyn pienten liitosalustojen ja sille jäävän pastan kokonaismäärän tuli olla suuri, jotta myös punnitseminen antaisi luotettavan vertailukohdan aiemmin prosessiseurannassa tehdyille mittauksille. Kaikki koesarjoissa painetut kortit oli määrä punnita ja pastan kokonaismäärän vaihteluita verrata yksittäisten liitosalustojen vaihteluihin. Mitä enemmän pastaa piirilevylle tulisi, sitä pienemmiksi suhteelliset punnitusvirheet jäisivät ja sitä vertailukelpoisempia ne olisivat sekä yksittäisten pastakakkujen mittaustuloksiin että aiempaan pintaliitosseurantaan nähden.

3.2.1.2 Vaatimukset koesarjoihin valitulle stensiilille

Kokeissa tulisi käyttää mieluiten kasvatettua stensiiliä, koska sen seinämät ovat oleellisesti sileämpiä kuin esimerkiksi laserpolttamalla valmistettujen. Tällöin muun muassa pastan irtoaminen stensiilistä on todennäköisesti täydellisempää ja tasaisempaa kuin muilla tavoin valmistetuilla stensiileillä. Asialla olisi mahdollisesti merkitystä pitkien koesarjojen aikana, jolloin pastan ominaisuudet kuten viskositeetti

ja tahmeus muuttuvat ainakin hivenen. Ne saataisivat vaikuttaa koesarjan tuloksiin ja mikäli seinän vaikutus olisi suuri, jäisivät mahdolliset muutokset helpommin havaitsematta. Seinämien vaikutus haluttiin minimoida ja siksi halusimme additiivisen stensiilin. Toinen syy sellaisen suosimiseen oli niiden käytön kasvu projektiin osallistuvissa yrityksissä. Muita vaatimuksia olivat hyvä tasomaisuus ja lisäksi stensiilin tuli olla uudehko tai vähän käytetty.

3.2.1.3 Koesarjoihin hyväksytystä piirilevystä, stensiilistä ja avauksista

- Yksityiskohtia piirilevystä: Kokeisiin löydettiin piirilevy, joka täytti vaatimukset; sen tasomaisuus oli erinomainen ja lisäksi se oli todella jämäkkä. Sen liitosalustoille jäävän pastan määrä oli noin 1.5 g ja suurin osa niistä oli fine-pitch luokassa. Niitä oli monia erilaisia ja vielä ympäri piirilevyä sekä pitkittäin että poikittain painosuuntaan nähden. Piirilevy oli esitintu ja sen stensiili additiivinen.
- Yksityiskohtia stensiilistä: Avausten kulmat oli pyöristetty eli teräviä kulmia ei stensiilillä ollut lainkaan. Kaikki pitkulaiset fine-pitch-avaukset olivat nurkistaan pyöreitä. Suorien kulmien puuttumisen pitäisi vähentää tinapallojen ja pursotteen (ns. smearin) kehittymistä. Stensiili oli kyseiseen painantaan nähden paksuhko.
- Koesarjoihin valituista avauksista: Piirilevyltä seurantaan valittujen liitosalustojen kokosuhteet vaihtelivat selvästi ja suurimman ja pienimmän välinen pinta-alojen suhde oli yli 20. Tämän lisäksi pienimpiä liitosalustoja vastaavien avausten, niiden jotka olivat pinta-alaltaan samassa kokoluokassa, sivujen mittasuhteet (lyhyt sivu/pitkä sivu) liikkuivat 0.875–0.161 välillä eli ne olivat sekä kooltaan että muodoltaan hyvin erilaisia. Jos koolla ja geometrialla olisi suurta vaikutusta painolaadun, niin se pitäisi valituilla komponenteilla saada näkyviin. Pienin jalkaväli oli vain 0.5 mm, mutta lyhin avausleveys 0.254 mm. (kts. Taulukko 1)

Seurantaan valittiin avauksia läheltä piirilevyn reunaa, nurkista ja tietenkin sen keskialueelta. Juotepastan reologisista ominaisuuksista johtuen oli odotettavissa, että vaikutukset vetosuunnassa olisivat todennäköisesti selvimpiä juuri piirilevyn päissä ja vaatimattomimmat sen keskellä.

3.2.1.4 Tuotantolinjalla 1 pastanpainoon käytetyt laitteet ja välineet

- Painokone: Piirilevyjen pastaus tapahtui DEK-265 painokoneella ja parametrien asetukset ja muutokset tehtiin sen käyttöliittymän kautta. Niiden oletettiin olevan painotilanteessa ohjelmoinnin mukaiset, toisin sanoen niiden oikeellisuutta ei erikseen tarkistettu. Tuennassa käytettiin lähes piirilevyn kokoista tasavahvaa tuentaa.
- Stensiili: Stensiilin materiaali oli nikkeli ja se oli valmistettu kasvattamalla. Se oli erinomaisessa kunnossa eli kireä, tasomainen ja pinnaltaan kulumaton.
- Raakkelit: Käytössä oli kaksi hyväkuntoista metalliraakkeliä, joiden teräkulma oli 60 astetta.

Taulukko 1. Stensiililtä seurantaan valittujen avauksen pinta-alat komponenteittain.

Komponentit:	Avauksen pinta-ala [mm ²]:	Pinta-alojen suhdeluku	Mittasuhdeluku
komponentti1	~0.40	~0.72	~1.67
komponentti2	~0.58	~1.25	~4.68
komponentti3	~0.50	~1.00	~2.68
komponentti4	~4.30	-	-

3.2.1.5 Koesarjojen parametreille asetetut reunaehdot

Käytävissä oli kaksi pastaa, yksi piirilevy ja yksi pastanpainolaitteisto. Pastanpainoa piti testata yhtäaikaan sekä järkevissä että toisistaan selvästi poikkeavissa rajoissa. Painojäljen tuli ehdottomasti olla laadukasta läpi koesarjojen. Testattavien parametrien arvot valittiin yhteistyössä painajien kanssa siten, että ne toimisivat molemmilla pastoilla.

Tarkoituksena oli samalla selvittää, miten suuret erot olisivat painojäljessä painettaessa pastoja samoissa olosuhteissa samoilla parametreilla. Muuttujien oli siksi sovellettava molemmille pastoille. Tavoitteena oli tehdä kaikkiaan viisi erilaista koesarjaa, joista kaksi ensimmäistä pastalla 1 ja kolme viimeistä pastalla 2. Koesarja 1 olisi pastaa lukuunottamatta samanlainen kuin koesarja 5. Samoin koesarjat 2 ja 3 olisivat keskenään identtisiä, pastan ollessa ainoa ne toisistaan erottava tekijä. Koesarjassa neljä testattiin pastaa 2 muista koesarjoista poikkeavilla muuttujilla. (Taulukko 2)

Taulukko 2. Tuotantolinjalla1 käytettyjen pastojen tiedot.

Pastojen ominaisuudet: (valmistajien ilmoittamat)	Pasta 1	Pasta 2
Raekokojakauma:	25–45 µm	22–45 µm
Rakeiden muoto:	pyöreä	pyöreä
Metallipitoisuus:	90 m-%	90 m-%
Tiksotrooppinen indeksi:	0.75	0.58
Viskositeetti:	2000 Ps (Malcom)	1700 Ps (Malcom)
Suositus pienin fine-pitch:	0.4 mm	0.4–0.5 mm
Tahmeus testi:	38 g	yli 100 gf
Tyyppi:	No-Clean	No-Clean

3.2.1.6 Koesarjoihin valitut pastat:

Testeihin valittiin kaksi erilaista pastaa. Ne olivat saman tyyppisiä (tyyppi 3) no-clean pastoja ja raekokojakaumaltaan samanlaiset. Ne poikkesivat toisistaan avoimenajan, viskositeetin ja tiksotrooppisten ominaisuuksien osalta. Toinen oli muutaman vuoden markkinoilla ollut ja toinen uudehko. Pastat oli suunniteltu samanlaiseen painantaan, joten vertailu oli reilua ja järkevää.

3.2.1.7 Pastoitettujen piirilevyjen ja liitosalustojen seurantaan käytetyt mittalaitteet

Painolaatua seurattiin sekä punnitsemalla koko piirilevyille jääneen pastan massa ja pastantarkastuslaitteella, näiden lisäksi sitä seurattiin visuaalisesti operaattoreiden toimesta. Mittaustiedot analysoitiin tarkasti myöhemmässä vaiheessa. Yksityiskohtaiset mittalaitetiedot ovat alla:

- Tarkkuusvaaka: Punnitsemiseen käytettiin samantyyppistä yläkuppivaakaa kuin pastanpainon esiseurannassa. Vaakat olivat identtiset toiminnoiltaan; tarkkuus $\pm 0.1 \mu\text{g}$, ja näytöllä $1 \mu\text{g}$, mitta-alue $0.0001 \text{ g} - 360 \text{ g}$ ($1 \mu\text{g} - 360 \text{ g}$). Tuotantotilassa olevien virtausten aiheuttamat häiriöt olivat vain kertaluokkaa suuremmat.
- Pastantarkastulaite: Tuotantolinjalla oli Cyber Sentry 2000, joka kykenee mittaamaan yksittäisen pastakakun korkeuden, pinta-alan ja tilavuuden. Sen tekniset tiedot ovat seuraavat:

Tarkkuus ja toistettavuus pastakakun korkeussuunnassa:

Korkeuden osalta mittaustuloksen toistettavuudelle yksi sigma on $2 \mu\text{m}$ ja yleisesti toistettavuudelle NIST-jäljitettävyys standardin mukaan $1 \mu\text{m}$.

Laitteen tarkkuudeksi ilmoitetaan $5 \mu\text{m}$.

3.2.2 Tuotantolinjan 1 koesarjojen muuttujista ja valitusta koematriisista

Kokeiden pohjana käytettiin Taguchin kahdeksan kokeen seitsämän kaksitasoisen muuttujan matriisia. Valittavina ja harkittuina muuttujina olivat stensiilin pesuväli, pesuohjelma, raakkelin paine, raakkelin nopeus, stensiilin irtoamisnopeus, pesunopeus, irtoamismatka ja pastan määrä. Eri koesarjoihin pyrittiin löytämään hieman erikokoiset vakiot, jolloin voitaisiin arvioida myös niiden mahdollisesti aiheuttamia ta-soeroja vertailemalla koesarjoja keskenään.

- Stensiilin alapinnan pesu: Koesarjoja edeltäneessä painoseurannassa oli noussut esille muutamia voimakkaita lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä, joista yksi oli stensiilin alapinnan pesu. Tietona oli, että pesuaineen määrä, jonka absoluuttinen määrittäminen on käytännössä erittäin vaikeaa, on yksi kriittisistä tekijöistä. Se haluttiin yhdeksi tekijäksi ja sitä täydentämään haluttiin pesupään nopeus, joka voisi korreloida sekä pastauksen visuaalisen jäljen että liitosalustalle jäävän pastan absoluuttisen määrän kanssa. Pesuaineen liiasta määrästä oli jo kokemuksia, joten kokeissa keskityttiin mataliin pesuainemääriin. Aiemmin esiin noussut värähtelyominaisuuden mahdollinen ilmeneminen haluttiin minimoida valitsemalla stensiilin pesuväliksi 5 piirilevyä, jolloin mahdollinen pesun aiheuttama häiriö ei sekoittuisi painosuunnasta aiheutuvaan volyymin heilahteluun. Pesuvälin valinta on yksi merkittävistä ohjelmointiparametreista ja kokeissa haluttiin selvittää, miten sen kasvattaminen kaksinkertaiseksi vaikuttaa painojälkeen. Tämän vuoksi pesuväleinä olivat sekä 5 että 10 painettua piirilevyä.
- Irtoamisnopeuden ja irtoamismatkan vaikutukset: Irtoamisetäisyys valittiin mukaan, koska muutaman kerran esiseurannassa stensiilin irtoaminen ei ollut täydellistä ennen ns. hitaan vaiheen loppumista. Sille valittiin kaksi arvoa, joista lyhyemmällä stensiilin irtoaminen tapahtui varmasti matalammalla irtoamisnopeudella

ja mahdollisesti myös korkeammalla, mutta ei välttämättä joka kerta piirilevyn keskeltä. Irtoamisnopeus sai eri koesarjoissa kahdelle eri pastalle kaikkinsa neljä erilaista arvoa, joiden väliin jäivät useimmat käytössä olleista irtoamisnopeuksista.

- Paineen ja nopeuden vaikutukset: Koska tavoitteena oli painaa pastaa selvästi poikkeavilla parametreilla, jotka kuitenkin olisivat pastoille sopivia ja realistisia, olivat valinnat nopeuden ja paineen osalta helppoja ja yllätyksettömiä. Painonopeudelle käytettiin kolmea eri nopeutta ja yksittäisen koesarjan sisällä maksimisaan vain kahta. Pienin nopeus oli 20 mm/s ja suurin 70 mm/s. Paineen osalta valinnat olivat niinkään tavanomaiset; minimi oli 5 kg ja maksimi 9 kg. Minimipaineen tuli suuremmalla nopeudella ylittää juuri ja juuri irtoamisaine, jotta prosessi-ikkunasta saataisiin mahdollisimman suureksi.
- Pastan määrän ja avoimen ajan arviointi: Painossa käytetyn pastan määrän valinta perustui silmämääräiseen arvioon ja sen muodostaman pastamakkaran paksuutta muutettiin alatasolta ylätasolle painajien kokemuksen pohjalta. He sanoivat, mikä on paljon ja mikä vähän, eikä arviointiin käytetty absoluuttista mittaa. Määrällisesti “paljon” oli “vähäisen” verrattuna noin kolminkertainen. “Vähäisen” ehtona oli, ettei pasta saa loppua kesken ja “paljon” oli oltava enemmän kuin normaali-painannassa käytetty määrä. Avoimessa ajassa pitkän ja lyhyen välinen ero oli niinkään kokemukseen perustuva. Lyhyen avoimen ajan yhteydessä painoon otettiin tuoretta pastaa suoraan purkista ja sen tuli olla prosessissa alle neljä tuntia, kun taas pitkä avoin aika vaati yli neljän tunnin käyttöä ennen testeihin ottoa – pisimmillään pasta 1 oli ollut stensiilillä yli 12 tuntia tosin vähäisellä käytöllä.

Koematriisin perusmuoto on esitetty taulukossa 3. Yksittäisen koesarjan muuttujat sijoitetaan ortogonaalisen matriisin sarakkeisiin, tässä tapauksessa valittavana ovat sarakkeet 1–7. Koesarja koostuu kaikkiaan kahdeksasta (8) erillisestä koe-erästä. Eräkohtaisesti on katsottava kunkin muuttujan tasoasetukset, tässä tapauksessa niitä on vain kaksi joko taso 1 (1) tai taso 2 (2). Matriisissa 1 tarkoittaa muuttujan alemmaa koetasoa (taso 1) ja 2 sen ylempää tasoa (taso 2). Esimerkiksi paine on valittu kaksitasoiseksi muuttujaksi ja sen tasot ovat 5 kg (taso 1) ja 9 kg (taso 2), jos se sijoitetaan muuttujaksi ortogonaalisen matriisin sarakkeeseen 1 (katso taulukkoa 3), tuolloin sen arvo koe-erissä yhdestä neljään on 5 kg (taso 1) ja koe-erissä viidestä kahdeksaan 9 kg (taso 2). Tyhjiksi jääneitä sarakkeita käytetään hyväksi arvioitaessa tulosten tilastollista luotettavuutta.

3.2.3 Tuotantolinjan 1 koesarjoissa käytetyt muuttujat ja vakiot sekä niiden sijainti matriisissa ja kokeiden suoritusjärjestys

Tuotantolinjalla 1 tehtiin viisi koesarjaa, joita on seuraavassa merkitty koesarjoina 1.1–1.5. Koesarjan 1.1 vakiot, muuttujat ja niiden sijainti matriisissa sekä koe-sarjojen järjestys olivat Taulukoiden 4 ja 5 mukaiset.

Koesarjan 1 matriisi on sovellus edellä esitetystä yleisestä matriisista (taulukko 3), josta on yksittäisille parametreille käytetty sarakkeita 1 (paine) ja 2 (nopeus). Sarake 3 kuvaa niiden ristikkäisvaikutuksia.

Taulukko 3. Taguchin ortogonaalinen matriisi kaksitasoisille kahdeksan kokeen koesarjoille.

Erä	Sarake						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taulukko 4. Koesarjan 1.1 vakiot ja muuttujat.

Vakiot:	Muuttujat:
Irtoamisnopeus (0.1 mm/s)	Paine (5 ja 9 kg)
Irtoamismatka (1 mm)	Nopeus (20 ja 70 mm/s)
Pesunopeus (40 mm/s)	
Pesuhjelma (kuiva)	
Pesuväli (5 korttia)	
Avoinaika (pitkä)	
Pastan määrä (normaali)	
Pasta (pasta 1)	

Taulukko 5. Koesarjan 1.1 suoritusjärjestys.

Erä	Nopeus	Paine
1	20	5
2	20	5
3	20	9
4	20	9
5	70	5
6	70	5
7	70	9
8	70	9

Vastaavat arvot koesarjoille 1.2 ja 1.3 on esitetty taulukoissa 6 ja 7.

Taulukko 6. Koesarjojen 1.2 ja 1.3 vakiot, muuttujat ja niiden sijainti matriisissa sekä koesarjojen järjestys.

Vakiot:	Muuttujat:
Paine (7.4 kg)	Irtoamisnopeus (0.5 ja 1.0 mm/s)
Nopeus (50 mm/s)	Irtoamismatka (1.0 ja 3.0 mm)
Pesuohjelma (märkä/kuiva)	Pesunopeus (20 ja 60 mm/s)
Pesuväli (5 korttia)	Pastan määrä (vähän ja paljon)
Avoinaika (lyhyt)	
Pasta (pasta 1 [koesarjassa 2] ja pasta 2 [koesarjassa 3])	

Taulukko 7. Koesarjojen 1.2 ja 1.3 suoritusjärjestys.

Erä	Irt.nop	Irt. matka	Pesunop.	Pastan määrä
1	0.5	1	20	vähän
2	0.5	3	60	vähän
3	1	1	60	vähän
4	1	3	20	vähän
5	0.5	1	60	paljon
6	0.5	3	20	paljon
7	1	1	20	paljon
8	1	3	60	paljon

Koesarjojen 1.2 ja 1.3 matriisi on sovellus Taguchin 8*8-matriisista ja siitä on käytetty sarakkeita 1 (irtoamisnopeus), 2 (irtoamismatka), 4 (pesunopeus) ja 7 (pastan määrä).

Taulukko 8. Koesarjan 1.4 vakiot, muuttujat ja niiden sijainti matriisissa sekä koejärjestys.

Vakiot:	Muuttujat:
Nopeus (50 mm/s)	Paine (5 ja 9 kg)
Pesunopeus (40 mm/s)	Irtoamisnopeus (0.2 ja 1.3 mm/s)
Pesuväli (10 korttia)	Irtoamismatka (1.0 ja 3.0 mm)
Avoinaika (lyhyt)	Pesuohjelma (kuiva ja märkä/kuiva)
Pastan määrä (paljon)	
Pasta (pasta 2)	

Taulukko 9. Koesarjan 1.4 suoritusjärjestys.

Erä	Paine	Irt.nop.	Irt.matka	Pesu
1	5	0.2	1	kuiva
2	5	1.3	3	kuiva
3	9	0.2	3	kuiva
4	9	1.3	1	kuiva
5	5*	0.2	3	märkä/kuiva
6	5**	1.3	1	märkä/kuiva
7	9	0.2	1	märkä/kuiva
8	9	1.3	3	märkä/kuiva

* ja ** (Raakkelin paine oli hieman korkeampi kuin 5 kg. Erän 5 paine oli 6.2 kg ja 6:n paine oli 5.5 kg. Tällä pyrittiin välttämään asfaltin syntymistä.)

Koesarjan 4 matriisi on sovellus Taguchin 8*8-matriisista, josta on käytetty sarakkeita 4 (paine), 1 (irtoamisnopeus), 2 (irtoamismatka) ja 7 (pesu).

Taulukko 10. Koesarjan 1.5 vakiot, muuttujat ja niiden sijainti matriisissa sekä koejärjestys.

Vakiot:	Muuttujat:
Irtoamisnopeus (0.1 mm/s)	Paine (5 ja 9 kg)
Irtoamismatka (1 mm)	Nopeus (20 ja 70 mm/s)
Pesunopeus (40 mm/s)	
Pesuhjelma (kuiva)	
Pesuväli (5 korttia)	
Avoinaika (pitkä)	
Pastan määrä (normaali)	
Pasta (pasta 1)	

Taulukko 11. Koesarjan 1.5 suoritusjärjestys.

Erä	Nopeus	Paine
1	20	5
3	20	9
5	70	5
7	70	9

Koesarja 1.5 lyhennettiin ajanpuutteen vuoksi. Se on puolet koesarjan 1 matriisista, josta on käytetty sarakkeita 1 (paine), 2 (nopeus).

3.2.4 Tuotantolaitteistolla 2 ajetuista koesarjoista ja koejärjestelyistä

3.2.4.1 Yleistä tuotantolinjan 2 koeajoista

Koeajojen alkuperäisenä tarkoituksena oli ajaa kahta erilaista korttia, joilla olisi keskenään samoja fine-pitch piirejä ja joiden juotosalustojen pinnoite olisi erilainen. Ehdot korttien valinnassa olivat seuraavat; niiden tuli olla mahdollisimman samanlaiset sekä seurattavien komponenttien että fyysisten mittojen suhteen, jotta mittaustulosten vertailukelpoisuus säilyisi luotettavana. Siinä onnistuttiin hyvin, sillä koesarjoihin hyväksytyjen piirilevyjen ulkoiset mitat olivat painosuunnassa ja paksuudessa täsmälleen samat ja lisäksi tarkasteluun otettujen komponenttien sijoittelu oli saman tyyppinen ja niiden etäisyydet reuna-alueisiin olivat samaa luokkaa. Mahdolliset poikkeavat reunavaikutukset eivät olisi näin ollen tulosten tarkastelussa haittana ja painoparametrien vaikutus sekä komponentti- että pinnoitekohtaisesti olivat selvitettävissä suuremmalla luotettavuudella. Seurattavat komponentit olivat lähinnä suuri-kokoisia QFP-komponentteja (avaukset 1.1, 1.2, 2.1 ja 2.2) sekä yksi palakomponentti (avaukset 1.3 ja 2.3). Edellä mainittujen yhtäläisyyksien lisäksi molemmat stensiilit olivat paksuudeltaan, valmistustavaltaan ja avausten muodoiltaan (suorakulmioita) identtiset. Molemmilla korteilla käytettiin samoja raakkeleita, painokonetta, pastamerkkiä, pesuainetta ja paperia. Ainoat muutokset, jotka koejärjestelyissä tehtiin tulivat koeparametrien muuttamisesta. Muut häiriöt, kuten lämpötilan ja ilmankosteuden vaihtelut, olivat pieniä ja tuotantolaitoksessa esiintyviä prosessille luontaisia häiriöitä, joiden poistaminen on muutoinkin jos ei mahdotonta niin ainakin erittäin kallista.

Tavoitteena oli testata samoja keskeisiä muuttujia kuin aiemmin tuotantolinjalla 1 ja suurin piirtein samoilla arvoilla. Päämääränä oli välttää aiemmin tehtyjä virheitä niin testausohjelman laadinnassa kuin parametrien valinnassa. Koesarjassa 1 seurattiin samoja muuttujia kuin tuotantolaitteistolla 1, mutta niiden määrä pienennettiin neljästä kolmeen. Pohjana valinnalle olivat jo analysoidut tulokset, jotka antoivat syyn pitää tietyt muuttujat mukana ja jättää vastaavasti toisia vähemmän merkityksellisiä pois. Aiemmin tehdyistä virheistä oli myös opittu: Esimerkiksi painetta koskevat parametrit tarkastettiin edellisestä koekerrasta oppineena jo hyvissä ajoin ja pienempi 6 atmosfäärin paine oli riittävä molemmille raakkelin nopeuksille.

Painojäljen mittaamiseen käytettiin jälleen Cyberin SENTRY 2000 pastantarkastuslaitetta. Se kykenee mittaamaan tarkasti yksittäisen pastakakun korkeuden, pinta-alan ja tilavuuden. Laitteen tekemät mittaukset tallennettiin tarkimmassa mahdollisessa muodossa, jolloin mittaustulokset voitiin purkaa komponentin sijaintipaikkaa ja sen yksittäistä jalkaa myöten, eli niin yksityiskohtaisesti kuin se ylipäättään on mahdollista. Tarkastelun etuna oli se, että yksittäisen komponentin tietyn sijaintipaikan jalkojen saaman absoluuttisen pastamäärän keskiarvot, vaihteluväli ja hajonta voitiin laskea. Se oli välttämätöntä, koska aiemmat kokemukset olivat osoittaneet, että painotulos on riippuvainen ei vain painoparametreista, vaan myös komponentin sijainnista ja juotosliitosten suunnasta.

Käytännössä, tulosten tarkastelun nopeuttamiseksi, yksittäisen komponentin jokainen sijaintipaikka mitattiin kuin erillinen komponentti. Muutoin vaarana oli tiedon katoaminen. Mitä suurempi on pienin seurattava yksikkö sitä vaikeampaa on nähdä todellinen tilanne. Aiemmista mittauksista voitiin todeta, että pienillä komponenteilla vaih-

telu on suurta, ajoittain yksittäinen mittaustulos vaikutti toiseen nähden huolestuttavan erilaiselta, jopa epäuskottavalta. Esimerkiksi erään komponentin pastakakkujen tilavuusero kahden eri mittauskohdan välillä oli suurimmillaan jopa 50% suhteessa pienimpään ja fine-pitch komponenttien kahden eri lokaation pastakakkujen keskimääräiset tilavuudet poikkesivat suurimmillaan noin 15%. Erot tuntuvat liian suurilta.

Koesarjojen pohjana oli edelleen hyväksi havaittu Taguchin kahdeksan kokeen matriisi. Kussakin koesarjassa käytettiin tyhjiksi jääneitä sarakkeita koesarjojen tulosten merkittävyyden ja tilastollisen luotettavuuden määrittämiseen.

Tuotantolinjalla 2 pastanpainoon käytetyt laitteet ja välineet

- Painokone: Piirilevyjen pastaus tapahtui MPM 2000 painokoneella ja parametrien asetukset ja muutokset tehtiin sen käyttöliittymän kautta. Niiden oletettiin olevan painotilanteessa ohjelmoinnin mukaiset toisin sanoen niiden oikeellisuutta ei erikseen tarkistettu. Käytetty painokone on automaattinen on-line-painokone. Muut painon kannalta oleelliset tekijät olivat metallinen raakkeli, jonka teräkulma oli 60 astetta. Tuennassa käytettiin tuentasauvoja, joita oli harvassa, mutta piirilevy oli vastaavasti jäykkä.
- Stensiilit: Stensiilit olivat laserleikattuja ja elektronisesti hiottuja. Ne olivat erinomaisessa kunnossa eli kireitä, tasomaisia ja pinnaltaan kulumattomia. Avaukset olivat suorakulmioita.
- Raakkelit: Käytössä oli pari hyväkuntoisia metalliraakkeleita, joiden teräkulma oli 60 astetta. Ne olivat kuitenkin ohuita ja notkeita, jolloin teräkulma muuttui paineen mukaan jonkin verran.

Taulukossa 12 on esitetty koeajoissa käytettyjen pastojen ominaisuuksia ja Taulukossa 13 vastavasti stensiilin avauksia. Merkittävimmät erot korttien välillä olivat lähinnä juotosliitosalustojen pinnoitteessa, joka oli koesarjoissa 2.1 ja 2.2 käytetyllä piirilevyllä tina-lyijy ja koesarjan 2.3 piirilevyllä kulta-nikkeli.

Testikortit olivat tuotantokortteja ja testaus suoritettiin tuotantotilanteessa, mikä asetti omat rajoituksensa. Paino tapahtui ladontavetoisesti ja keskeytyksiä esiintyi siksi enemmän kuin edellisissä koeajoissa. Viiveiden aiheuttamat muutokset ja häiriöt painossa pyrittiin eliminoimaan pitämällä eräko ko kymmenessä piirilevyssä, jolloin yksittäisten korttien merkitys pieneni ja vastaavasti tulosten luotettavuus kasvoi.

Taulukko 12. Tuotantolinjalla 2 käytetyn juotepastan ominaisuudet.

Pastan ominaisuudet: (valmistajan ilmoittamat)	Pasta 3
Raekokojakauma:	22–45 µm
Rakeiden muoto:	pyöreä
Metallipitoisuus:	90 m-%
Tiksoerooppinen indeksi:	0.58
Viskositeetti:	1500 Ps (Malcom)
Suositus pienin fine-pitch:	0.4–0.5 mm
Tyyppi:	No-Clean

Taulukko 13. Stensiililtä seurantaan valittujen avausten pinta-alat komponenteittain.

Komponentit:	Avausten pinta-ala [mm ²]:	Pinta-alojen suhdeluku	Mittasuhdeluku
piirilevy 1			
avaus 1.1	~0.74	~1.05	~2.36
avaus 1.2	~1.26	~1.26	~2.76
avaus 1.3	~0.63	~1.55	~5.51
piirilevy 2			
avaus 2.1	~0.59	~0.89	~1.97
avaus 2.2	~1.05	~1.09	~2.36
avaus 2.3	~0.48	~1.35	~4.72

3.2.5 Tuotantolinjan 2 koematriisit ja muuttujat

Koesarjojen pohjana käytettiin edelleen Taguchin ortogonaalista OA8-matriisia kaksitasoisille koesarjoille, jonka perusmuoto on kuvattu edellä taulukossa 3.

3.2.5.1 Koesarja 2.1

Painettava kortti oli juotosalustoiltaan tinalyijypintainen. Painettava piirilevy oli kaksipuolinen ja sen toinen puoli oli jo kalustettu eli piirilevy oli tuettu. Tuenta oli melko harva ja vaikka kortti oli jäykkä, sillä on voinut olla pieni vaikutus painotuloksiin.

Koe oli kaksitasoinen kolmelle eri muuttujalle eikä muita vaikuttavia tekijöitä muutettu ajojen aikana.

Taulukko 14. Koesarjan 2.1 vakiot.

Vakiot:	Muuttujat:
Irtoamismatka (2.01 mm)	Paine (6–8 atm)
Vedonjälkeinen viive (2.0 s)	Nopeus (20–41 mm/s)
Raakkelin down stop (1.9 mm)	Irtoamisnopeus 1–3 mm/s
Pesuohjelma (märkä/ vakuumi/kuiva)	
Pesuväli (joka toinen kortti)	
Stensiilin värinä irtoamisvaiheessa päällä	
Avoinaika (lyhyt)	
Pastan määrä (normaali)	
Pasta (pasta 3)	

Parametrien sijoittuminen koematriisiin: Paine sarakkeessa yksi, nopeus sarakkeessa kaksi ja irtoamisnopeus sarakkeessa seitsemän. Nopeuden ja paineen vuorovaikutuksia kuvaa sarake kolme.

3.2.5.2 Koesarja 2.2

Tämä koe oli lähes identtinen koesarjan 2.1 kanssa. Painettava kortti oli sama samoin olivat seurattavat juotosalustat. Cyberin ohjelmaan ei koskettu. Ainoa muutos tehtiin vaihtamalla koesuunnittelumatriisiin sarakkeeseen 7 irtoamisnopeuden tilalle vedon jälkeinen viive.

Taulukko 15. Koesarjan 2.2 vakiot ja muuttujat.

Vakiot:	Muuttujat:
Irtoamismatka (2.01 mm)	Paine (5–7 atm)
Irtoamisnopeus (2.0 s)	Nopeus (20–41 mm/s)
Raakkelin down stop (1.9 mm)	Vedon jälkeinen viive (0–3 s)
Pesuohjelma (märkä/ vakuumi/kuiva)	
Pesuväli (joka toinen kortti)	
Stensiilin värinä irtoamisvaiheessa päällä	
Avoinaika (lyhyt)	
Pastan määrä (normaali)	
Pasta (pasta 3)	

Parametrien sijoittuminen koematriisiin: Paine sijoitettiin sarakkeeseen yksi, nopeus sarakkeeseen kaksi ja vedon jälkeinen viive sarakkeeseen seitsemän. Nopeuden ja paineen vuorovaikutuksia kuvaa sarake kolme.

3.2.5.3 Koesarja 2.3

Painettava kortti oli juotosalustoiltaan kultanikkelpintainen. Painettava piirilevy oli kaksipuolinen, mutta paino ja kalustus oli piirilevylle ensimmäinen. Tuenta oli erinomainen ja koska kortti oli lisäksi jäykkä, voidaan sen katsoa olleen kauttaaltaan kiinteällä alustalla.

Koe oli kaksitasoinen kolmelle eri muuttujalle, muita vaikuttavia tekijöitä ei ajojen aikana muutettu.

Taulukko 16. Koesarjan 2.3 vakiot ja muuttujat.

Vakiot:	Muuttujat:
Irtoamismatka (2.01 mm)	Paine (6–8 atm)
Vedonjälkeinen viive (2.0 s)	Nopeus (20–41 mm/s)
Raakkelin down stop (1.9 mm)	Irtoamisnopeus 1–3 mm/s
Pesuohjelma (märkä/ vakuumi/kuiva)	
Pesuväli (joka toinen kortti)	
Stensiilin värinä irtoamisvaiheessa päällä	
Avoinaika (lyhyt)	
Pastan määrä (normaali)	
Pasta (pasta 3)	

Parametrien sijoittuminen koematriisiin: Paine oli sarakkeessa yksi, nopeus sarakkeessa kaksi ja irtoamisnopeus sarakkeessa seitsemän. Nopeuden ja paineen vuorovaikutuksia kuvaa sarake kolme. Tämä koe oli muuttujiltaan identtinen koesarjan 1 kanssa. Erona siihen oli painettava kortti ja senkin osalta lähinnä sen pinnoite ja hivenen pienemmät stensiilin avaukset.

3.3 Muuttujien vaikutusten analysointi

Seuraavassa esitetty vaikutusten ja vuorovaikutusten arviointi perustuu edellä esitettyyn koesarjoissa käytettyyn ortogonaaliseen matriisiin. Yksinkertainen esimerkki valaissee menetelmää parhaiten.

Tarkastellaan koesarjaa, jossa muutettiin kahta tulosuuretta: nopeutta (A) ja painetta (B). Lähtösuureina tarkasteltiin korkeutta, pinta-alaa ja tilavuutta sekä näiden vaihteluvälejä. Taulukko 17 esittää kahdeksan kokeen koesuunnittelumatriisia, jossa muuttujien korkeampia ja matalampia arvoja on merkitty “+” tai “-“. Huomaa, että taulukko on muodostettu Taulukosta 3 korvaamalla arvot 1 ja 2 merkinnöillä – ja +.

Taulukko 17. Kahdeksan kokeen kaksitasoinen koesuunnitelma.

Erä	Sarake						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	+	+	+	+
3	-	+	+	-	-	+	+
4	-	+	+	+	+	-	-
5	+	-	+	-	+	-	+
6	+	-	+	+	-	+	-
7	+	+	-	-	+	+	-
8	+	+	-	+	-	-	+

Nyt kummankin tulosuureen vaikutusta voidaan arvioida sarakkeiden 1 (A) ja 2 (B) perusteella. Sarake 3 (-AB) antaa muuttujien vuorovaikutuksen negatiivisena.

Vaikutus lasketaan muodostamalla ensin kullekin sarakkeelle +- ja -tasojen tulosten summien erotus

$$\text{Summa} = \Sigma X^+ - \Sigma X^-$$

Vaikutus saadaan jakamalla summaa eri tasojen toistojen lukumäärällä matriisissa eli tässä tapauksessa neljällä

$$\text{Vaikutus} = \text{Summa}/4.$$

Vaikutuksen tilastollista merkittävyyttä tutkitaan yleensä t-testillä tapauksissa, joissa havaintojen lukumäärä on pieni. Testisuure saadaan tunnetusta yhtälöstä

$$|\bar{X}^+ - \bar{X}^-|^* = t_\alpha S \sqrt{\frac{1}{N^+} - \frac{1}{N^-}}$$

jossa t_α on t-jakauman haluttua todennäköisyyttä vastaava arvo. Seuraavassa on käytetty 90%:n todennäköisyyttä. S on koetulosten standardipoikkeama ja N on koekiden lukumäärä +- ja -tasoilla (=4).

Tässä tapauksessa standardipoikkeamaa voidaan arvioida koetulosten perusteella käyttämällä Taulukon 17 tapauksessa "vapaiksi" jääviä sarakkeita 4, 5, 6, 7; ts. sarakkeita, joita ei käytetä vaikutusten tai vuorovaikutusten arviointiin. Lasketaan ensin kustakin vapaaksi jäävästä sarakkeesta varianssin estimaatti yhdellä vapausasteella

$$S_i^2 = \text{Summa}_i^2 / 8$$

Laskemalla kaikkien neljän vapaan sarakkeen varianssien estimaattien keskiarvo varianssin estimaatti saadaan neljällä vapausasteella

$$S_{est}^2 = \sum S_i^2 / 4$$

Standardipoikkeama saadaan varianssin estimaatin neliöjuurena. Estimaatin laskenta-periaate määrää myös käytettävän t-arvon; ts. 90%:n todennäköisyyden ja neljän vapausasteen perusteella t_α on 1.53.

Tulosten tulokinnassa on huomattava, että kahden tulomuuttujan tapauksessa pystytään erottamaan muuttujien suorat vaikutukset ja niiden välinen vuorovaikutus. Sarakkeita jää myös varianssin estimointiin. Kun kokeissa tulomuuttujien lukumäärä nostetaan neljään, vuorovaikutusten arviointiin jää vain kolme saraketta. Neljällä muuttujalla on kuitenkin mahdollista olla kuusi vuorovaikutusta, joten niitä kaikkia ei voida näin pienellä koemäärällä yksikäsitteisesti määrittää. Neljän muuttujan tapauksessa on myös huomattava, että suorienkin vaikutusten määrittämiseen liittyy riski, jos kolmen tai neljän muuttujan välillä on vuorovaikutuksia.

4 KOETULOKSET

4.1 Pastanpainon seurannan tulokset

Esivalmisteluna tehdyn seurannan tuloksia ja johtopäätelmiä käsiteltiin jo aikaisemmin luvussa 3.1.

4.2 Tuotantolaitteistolla 1 ajetus koesarjat

Koesarjojen numeeriset tulokset on jätetty tämän raportin ulkopuolelle. Sen sijaan liitteessä 1 on tarkasteltu tutkittujen muuttujien vaikutuksia lähtösuureisiin (korkeus, tilavuus ja pinta-ala) kvalitatiivisesti eli tarkasteltu vaikutuksen suuntaa ja tilastollista merkitsevyyttä edellisessä luvussa esitettyjen kriteerien perusteella. Liitteessä on tarkasteltu koesarjoja 2, 3 ja 4 komponenttikohtaisesti lokaatioittain. Tutkittujen muuttujien vaikutukset on esitetty sekä liitosalustakohtaisina keskiarvoina että liitosalustojen korttikohtaisina hajontoina korkeudelle, pinta-alalle ja tilavuudelle. Liitetaulukoissa on esitetty myös summativista tieto siitä, kuinka monelle komponentille kukin muuttuja on ollut tilastollisesti merkitsevä, kuinka monessa tapauksessa sen vaikutus on ollut positiivinen/negatiivinen sekä kuinka monessa tapauksessa parametrin vaikutus on ollut kaikista vähäisin.

4.3 Tuotantolaitteistolla 2 ajetus koesarjat

Vastaavat tulokset tuotantolaitoksella 2 ajetuista koesarjoista 1, 2 ja 3 on esitetty Liitteessä 2.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Muuttujien vaikutukset

Tavoitteena tuotantolinjojen 1 ja 2 koesarjoissa oli hakea realistisesti toimivan pastanpainoprosessin rajoja ja määrittää saatujen tietojen avulla, miten paljon ja mihin suuntaan valituilla prosessiparametreilla voidaan painojälkeä ohjata. Kriteereinä olivat lähinnä tärkeimpinä painolaadun mittareina pidetyt pastakakkujen tilavuus ja pinta-ala, korkeustiedot laskettiin niiden rinnalla. Tulokset olivat yllättäviä. Tilastollisesti arvioituna aina merkittäviksi tulevaa parametriä ei löytynyt lainkaan. Tuloksista nousevat kyllä esiin raakkelin paineen, irtoamisnopeuden ja vetonopeuden toistuvasti samansuuntaiset vaikutukset, mutta laskettaessa tilastollista merkitsevyyttä erot jäävät liian heikoiksi.

Yksittäisten koesarjojen sisällä oli selviä osoituksia muuttujien yhdenmukaisesta vaikutuksesta painon lopputulokseen. Tuotantolinjalla 2 tehdyt parametrivalinnat olivat onnistuneemmat kuin tuotantolinjalla 1, kiitos kasvaneen kokemuksen ja aiemmin tehtyjen virheiden. Niistä saadut tulokset antavat mahdollisuuden todeta paineen, nopeuden ja irtoamisnopeuden olevan tärkeimmät painoparametrit. Yllättävää oli myös vedon jälkeisen viiven (down stop), eli raakkelin pysähtymisen ja stensiiliin irtoamisen alkamisen väliin jäävän ajan, osoittautuminen piirilevyllä jäävän pastan määrään vaikuttavaksi tekijäksi.

Korkeammalla paineella jäi liitosalustalle enemmän pastaa ja vastaavasti suuremmalla painonopeudella sen määrä laski. Erot olivat prosentteissa liikuttaessa paineen ylä- ja nopeuden alatasolta paineen ala- ja nopeuden ylätasolle suurimmillaan luokkaa 10%. Se on paljon. Tilanne oli kuitenkin keinotekoinen, sillä painoparametrit oli valittu siten, että pienellä paineella raakkeli pysyi juuri ja juuri kiinni stensiilissä. Verrattaessa kahden erilaisen realistisen muuttujaparin tuloksia, joista tässä edustaa tuotantolinjalla 2 ajatun koesarjan 1 paineen ja nopeuden alataso ja toista paineen ja nopeuden ylätasoa, jäävät erot keskiarvoissa merkityksettömiksi. Jos ns. matalaa painetta nostettiin kilon verran, ero pieneni samalla stensiilillä alle kolmen prosentin. Käytännössä operaattorit olisivat painaneet ainakin kiloa irtoamispainetta suuremmalla paineella. Eroja kuitenkin löytyy; piirilevyllä painettujen pastakakkujen tilavuuksien välinen hajonta on pienempää matalalla painonopeudella ja pienellä paineella painetuilla tuotteilla. Tässäkään tapauksessa vaikutussuunta on selvästi havaittavissa, mutta vain muutamia kertoja se oli tilastollisesti merkitsevä.

Tuotantolinjalla 1 ajettujen koeajojen tulokset olivat tasaisemmat ja saavutetut tasot erot olivat selvästi pienempiä. Yksittäisen komponentin kohdalla ainoan selvän poikkeuksen teki irtoamisnopeus koesarjassa 4. Ero valittujen tasojen välillä oli komponentilla 1 noin 10%:a. Komponentti oli koesarjan pienin ja siksi myös herkin sen vaikutuksille. Vaikutus oli voimakkaampi kuin millään muulla tekijällä kyseisissä koesarjoissa. Muuttujien valinnassa oli kyllä raavittu marginaaleja, sillä alatasolla irtoamisnopeus oli 0.1 mm/s, joka osoittautui myös tilastollisesti arvioituna liian pieneksi. Käytännössä kyseistä irtoamisnopeutta ei olisi käytetty, koska se oli tuotannolle liian hidas. Se kuitenkin todisti, että myös irtoamisnopeus voi olla liian pieni.

Koesarjat ovat osoittaneet sen, ettei parametrien muuttaminen ratkaisevasti vaikuta stensiilipainannassa liitosalustalle jäävän pastan määrään, ei ainakaan käytettäessä metalliraakkeita. Parametreillä ei voida merkittävästi liu'uttaa painojälkeä suuntaan eikä toiseen. Pastanpainoprosessi on helposti hallittavissa ja ongelmaton, ellei syylistytä selviin ylilyönteihin parametrejä valittaessa; Painojäljen saa huonoksi väärillä nopeus- ja painevalinnoilla, laiminlyömällä tuennan, heikolla tasomaisuudella (stensiili ↔ piirilevy), liian korkealla ja matalalla irtoamisnopeudella, liiallisella pesuaineen käytöllä, likaisella stensiilillä, liian harvalla pesuvälillä, kylmällä, vanhalla tai virkistämättömällä pastalla, liian lämpimällä pastalla tai liian suurella pastan raekoolla.

Pastanpainoprosessille on säilytetty huomattava osa pintaliitoksessa syntyvistä juotosvioista. Pienimmät arviot ovat 50% (Revelino) ja suurimmat lähes 90% (Buttars, Okura). Käytännössä pastan painon laatuun vaikutetaan jo paljon ennen pastanpainoa. Sellaiset tekijät kuin pasta, tuotantotapa, piirilevyjen laatu, stensiilin suunnittelu, tuenta jne... ovat painolaadun kannalta ainakinyhtä tärkeitä kuin sallituissa rajoissa pysyvät painoparametrit. Päätökset niistä on tehty jo paljon ennen varsinaista painotapahtumaa. Pastanpainon loppulaatu on ketju, joka alkaa stensiilin suunnittelusta ja päättyy sulatusjuottamiseen ja sen heikoin lenkki määrää sen laatutason.

6 MENETELMÄTEKNINEN YHTEENVETO

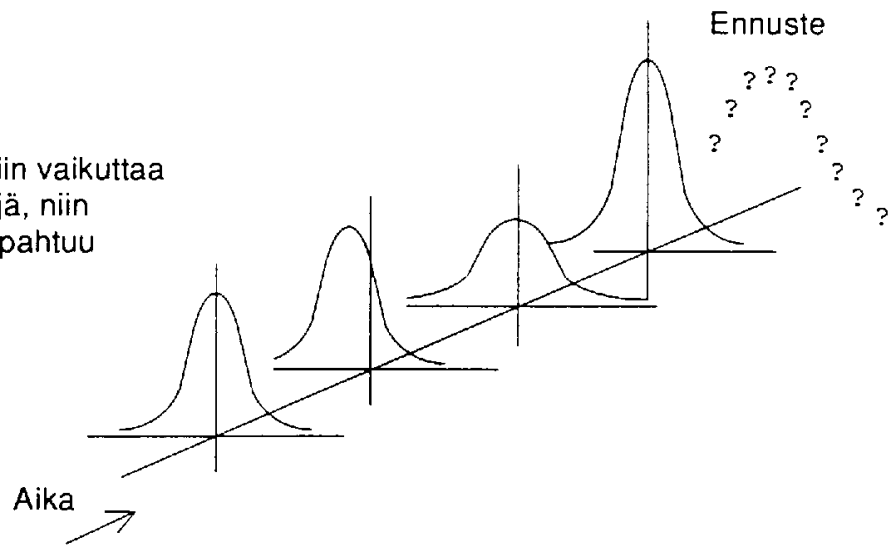
6.1 Yleistä tilastollisesta prosessin ohjauksesta

Tilastollinen prosessinohjaus, josta tutumpi puhekielessä käytetty termi on SPC (Statistical Process Control), sai alkunsa 1920-luvulla Yhdysvalloissa ja sen kehittäjä oli Walter A. Shewhart. Kehitystyön taustalla vaikutti tuttu ongelma: Tarkastusorganisaation tuli ylläpitää laatua ja he puuttuivat asiaan aina, kun tuote oli hylätty ja säätivät prosesseja, mutta se tuntui kuitenkin yhtä usein pahentavan häiriötä kuin parantavankin. Shewhart tutki laadun valvonnan tuloksia tilastollisesti ja havaitsi niiden käyttäytyvän normaalijakautuman mukaisesti eli prosessin tuotteista otetuilla mitoilla oli oma keskiarvo ja hajonta. Lisäksi hän huomasi, että laatuongelmat johtuivat usein prosessin liian suuresta vaihtelusta. Yksittäinen prosessi tuotti hallinnassa ollessaan tuotteita sille ominaisella luonnollisella hajonnalla. *Prosessi on hallinnassa, mikäli ainoa sen tulokseen vaikuttava tekijä on sen oma luonnollinen hajonta. Tällöin prosessiin ei vaikuta mikään systemaattinen häiriötekijä eli prosessin jakauma ei muutu ajan suhteen. Jos prosessiin taas vaikuttaa jokin häiriötekijä, niin jakaumassa tapahtuu muutoksia eikä ennustetta voida tehdä (Shewhart).* Elleivät tuotteet pystyneet niille asetettuihin vaatimuksiin, sai hallinnassa olevan prosessin säätäminen yksittäisen tuloksen perusteella aikaan vain lisää vaihtelua. Havainto oli sekä yksinkertainen että nerokas ja se mullisti laadunvalvonnan ja on SPC-toiminnan perusta.

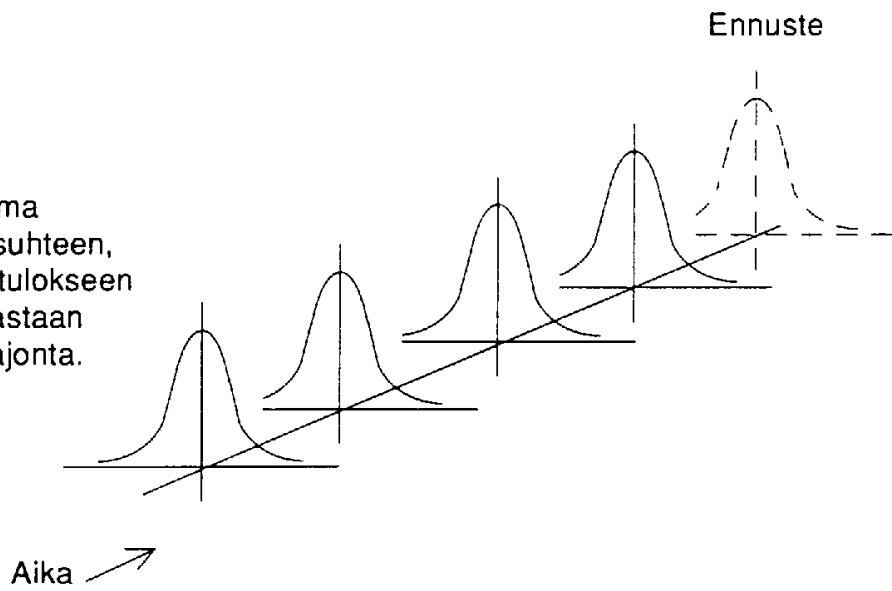
SPC:n tarkoituksena ei ole valvoa tuotteiden pysymistä spesifikaatioiden määräämien rajojen sisällä, vaan osoittaa, onko prosessi tilastollisesti hallinnassa ja havaita, jos siihen vaikuttaa jokin häiriö. (kts. kuva 1) Sen avulla muutokset ovat havaittavissa jo ennen kuin häiriö on niin vakava, että se aiheuttaa virheellistä tuotantoa. Se on siis myös ennakoivan kunnossapidon tehokas apuväline.

Prosessin vaihtelua aiheuttavia tekijöitä on kahdenlaisia: luonnollisia (common cause) ja erityisiä (assignable cause). Luonnollisista syistä aiheutuva hajonta johtuu sattumasta ja laitteiden rajallisesta tarkkuudesta. Erityiset syyt ovat häiriötekijöiden prosessiparametreissa aiheuttamia muutoksia. Häiriön syitä selvittäessä on tärkeää, että prosessivaiheiden historiatiedot ovat tallessa ja saatavilla. Niiden avulla prosessissa muuttunut seikka voidaan usein paikallistaa ja häiriön syy tunnistaa käymällä läpi prosessin vaiheet ajassa taaksepäin. Syyn selvittyä voidaan korjaustoimenpiteisiin ryhtyä ajoissa sekä varmistua siitä, että kaikki prosessissa valmistetut tuotteet ovat erittäin suurella todennäköisyydellä virheettömiä. SPC-toiminnassa tilastollinen tarkoittaa tietojen keräämistä, käsittelyä ja tulosten arviointia. Tilastolliset menetelmät tarjoavat mahdollisuuden arvioida riskejä kerättyjen tietojen perusteella ja ennustaa tulevia tuloksia.

Mikäli prosessiin vaikuttaa jokin häiriötekijä, niin jakaumassa tapahtuu muutoksia.

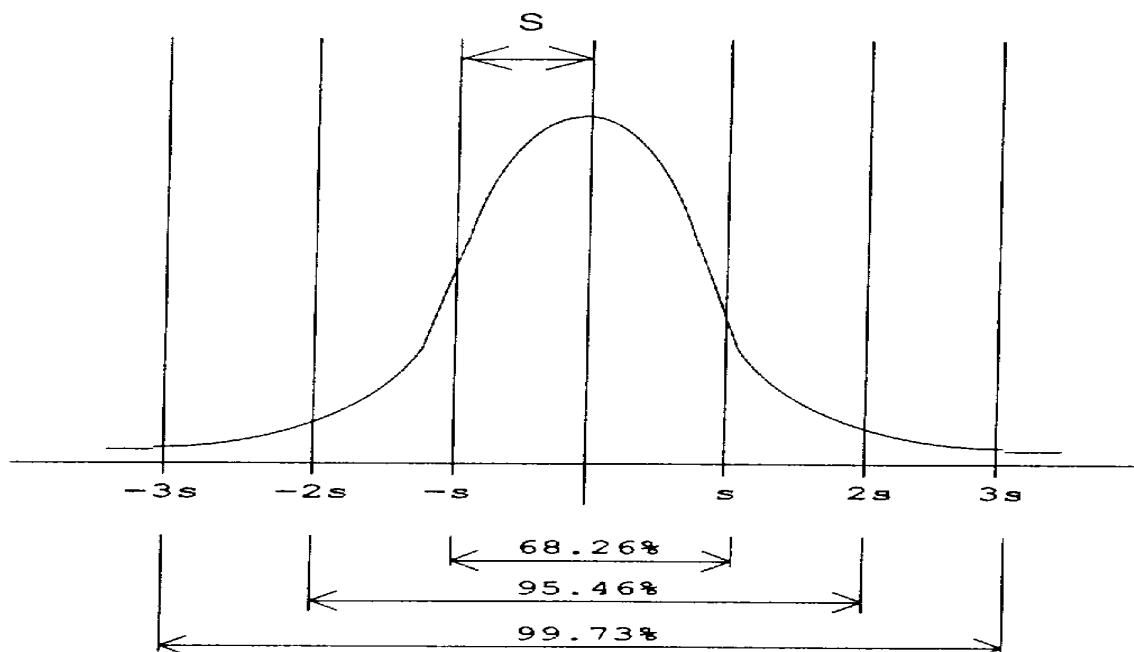


Normaalijakauma ei muutu ajan suhteen, kun prosessin tulokseen vaikuttaa ainoastaan luonnollinen hajonta.



Kuva 1. Hallitun ja hallitsemattoman prosessin käyttäytyminen ajan suhteen. (G. Järnefelt Tuoteprosessin tilastollinen valvonta SPC: s. 11).

Shewhart kehitti prosessin tilan seurantaan erityiset valvontakortit. Ne koostuvat tyypillisesti kolmesta osasta: hallinnollisesta, valvonta- ja tietojenkeruuosasta. Siihen kerätään prosessin näyte-eristä saatuja tietoja. Niistä lasketaan kulloinkin seurattavat tilastolliset tunnusluvut, joita ovat mm. keskiarvo, vaihteluväli ja hajonta, jotka sitten merkitään pisteinä valvonta-alueelle. Pisteet yhdistetään viivalla, joka muodostaa valvontakäyrän. Se saa liikkua sattumanvaraisesti valvontarajojen välissä, jotka Shewhart sijoitti kolmen sigman (keskihajonnan) päähän prosessin keskiarvosta (kts. Kuva 2), jolloin niiden ylitystä seuraava vikailmoitus esiintyy vain harvoin. Juuri siksi kolmen sigman rajat ovat niin tehokkaat toimintarajat. Eli tilanteissa, joissa valvontakäyrä pysyy valvontarajojen sisällä ja vaihtelee keskiviivan molemmilla puolilla sattumanvaraisesti, voidaan prosessin sanoa olevan vakaa. Kun prosessi ajautuu toimintarajojen ulkopuolelle, niin syynä on mitä ilmeisimmin erityisyys. Tuolloin on tärkeää löytää poikkeaman aiheuttaja ja poistaa se, jotta prosessi palautuisi takaisin hallintaan.



Kuva 2. Normaalijakauma ja keskihajonta. (Owen Mal, SPC and Continuous Improvement, IFS Publications/Springer-Verlag, 1989. 398 s.)

6.2 Lyhytsarjatuotantoon kehitetty SPC

Perinteinen SPC kehitettiin vastaamaan viime vuosisadan alkupuolella ja keskivaiheilla vallalla olleen tuotantotyypin tarpeita, eli sellaisten prosessien, joissa valmistettiin yhtä tuotetta samoilla spesifikaatioilla suuria määriä ja pitkiä aikoja. Sen lähestymistapa oli varsin jäykkä eikä se soveltunut kahdeksankymmentäluvulla yleistymisensä aloittaneeseen High-Mix-Low-Volume tyyppiseen tuotantoon. Se on kuitenkin tuotantotyyppi, joka on vallalla nykyisin myös elektroniikan sopimusvalmistajilla, eli heillä tuotekirjo on suuri ja valmistettavat erät lyhyitä. Niin sanottu lyhytsarjatuotantoprosessi vaatii joustavan ja luovan lähestymistavan. Alati pienenevät eräkoot asettavat kasvavia haasteita valmistukseen ja erä on saatava uuteen kohdearvoonsa entistä nopeammin mieluiten heti heti tuotannon alettua. Yhä useammin juuri se on menestyksen ja epäonnistumisen välinen ero. Lyhyen sarjan aikana ei virheitä ehdi korjata.

Ennen kaikkea valvontakorttien tulisi olla käyttökelpoisia ja soveltua sekä tuotannosta vastaavien insinöörien ja operaattoreiden että laadusta vastaavien tilastoihmisten ja ammattilaisten päivittäisiin tarpeisiin. Perinteiselle SPC:lle nykyiset sarjakoot ja tuotannon monimutkaistuminen ovat käyneet ylivoimaisen vaikeiksi: Perinteisesti valvontakortin laatija on tarvinut vähintään 15–25 mittapistettä tai alaryhmää, mutta nykyisin sellainen vaatimus rajaa SPC:n käytön pois. Jos valmistettavana on eräkohtaisesti vain kourallinen osia, ei perinteistä valvontakorttia ehtisi edes laatia ennen erän loppumista. Onneksi SPC:n evoluutio otti 80- ja 90-luvuilla merkittävän harppauksen eteenpäin, kun sen lyhytsarjatuotantoon soveltuvat ns. SR-valvontakortit (Short-Run-valvontakortit) ja seurantamenetelmät kehitettiin ja nostettiin päivänvalloon.

6.3 SPC:n soveltamisesta pastanpainon seurantaan

Yleisesti ottaen seurattaessa painojälkeä lyhyellä aikavälillä ja paikallisesti havaitaan sen olevan varsin normaalijakautunutta. Painojälki toteuttaa siten tilastollisen seurannan aloittamisen ja soveltamisen kannalta sen tärkeimmän perusvaatimuksen. Pastanpainon loppulaadulla on tosin pienet erityisominaisuutensa kuten myös koko tuotantoprosessilla, jotka on hyvä huomioida ennen valvontakortin valintaa: Painojälki vaihtelee hivenerien mm. tuotantosarjan pituuden, stensiilin likaantumisen ja valmistustavan, ajoaikaisen pesuohjelman, käytössä olevan juotepastan avoimenajan, painotilan lämpötilan, painossa tulevien viiveiden jne... mukaan. Näiden prosessissa tapahtuvien muutosten ja niiden aiheuttamien häiriöiden vaikutukset on hyvä huomioida jo ennalta. Ongelmia valvonnan järjestämisessä ja oikean valvontakortin valinnassa aiheuttavat edellisten lisäksi, etenkin sopimusvalmistajilla, lyhyet muutaman kortin mittaiset tuotantoerät, jotka saattavat toistua vain muutaman kerran vuodessa. Tuotannon valvonta perinteisen SPC:n avulla voi niiden kohdalla tuntua turhalta, sillä valvontakorttia ei näyttäisi saavan edes valmiiksi ennen erän loppumista tai sille ehtisi korkeintaan saada vain muutaman valvontapisteen ja alustavat valvontarajat.

Lyhytsarjatuotantoon on kehitetty useita valvontakortteja, joista monet soveltuvat myös pastanpainoon. Niiden käyttöönotto ei ehkä ole aivan yhtä mutkatonta kuin perinteisten korttien, mutta vaikeaksikaan sitä ei voi sanoa. Niiden avulla on mahdollista seurata esimerkiksi vain viiden tuotteen mittaista tuotantoerää. Periaatteessa rajoitusta eräkoolle ei ole. Hyödyt ovat ilmeiset; koska oikein laaditulla valvontakortilla voidaan valvoa itse tuotantoprosessia, vaikka peräkkäiset tuotesarjat olisivat perinteisiä menetelmiä sovellettaessa liian lyhyitä. Tuotantotilanteessa ongelmana saattaa olla esimerkiksi pastan vaihtoajan määrittäminen silloin, kun painossa on ollut useita pienieräisiä tuotteita. Yksittäisten tuotteiden antamien tietojen pohjalta se voi olla erittäin vaikeaa, mutta seuraamalla kaikkia painettuja piirilevyjä aikasarjana samalta valvontakortilta, eli yksittäiseltä kortilta, jolle on syötetty kaikkien päivän aikana tehtyjen tuotteiden spekseihinsä suhteutetut mittaustiedot, se onnistuu siinä, missä yhden tuotteen pitkältä aikasarjaltakin. Samalla voidaan vähentää piirilevyn eri puolilla olevien mahdollisesti jopa erikokoisten pastakakkujen tilaa kuvaavien valvontakorttien kokonaisuutta ja liittää niiden kaikkien tiedot muutamalle, vaikka vain yhdelle, valvontakortille. Etenkin operaattorin kannalta on helpompi, jos tuotantoprosessista saatava tieto on tulkittavissa yhdeltä valvontakortilta.

Pastanpainossa ilmenevät laatuvaihtelut syntyvät hyvin monenlaisista häiriöistä, joiden ilmestyminen ja poistuminen on yhtäältä sekä kirjavaa että ennalta arvaamatonta ja toisaalta hitaasti esiin nousevaa ja vaikeasti ennustettavaa. Siksi on perusteltua käyttää painolaadun seurantaan kahta eri tavoin prosessimuutoksiin reagoivaa valvontakorttia. Nopeita muutoksia painolaatuun aiheuttavat esimerkiksi juotepastan loppuminen ja pitkät viiveet painossa ja vastaavasti hitaita muutoksia aiheuttavat kasvava avoinaika ja stensiilin likaantuminen. Pastan loppuminen tapahtuu yleensä paikallisesti ja varoittamatta tai se on nähtävissä vain yhtä korttia aikaisemmin, jolloin muutaman liitosalustan kohdalta pastaus jää hieman vajaaksi loppuen heti seuraavan piirilevyn kohdalla. Pitkien hitaasti kehittyvien muutosten havaitsemisessa on parasta käyttää muutaman näyte-erän alaryhmäkokoja, jolloin esimerkiksi likaantumisen eteneminen ja pastan vanheneminen nousevat muun painossa esiintyvän kohinan alta esiin.

6.4 Painolaadun mittaaminen ja seuranta SPC:n avulla

Painojäljen seurannassa tulisi keskittyä pienimpiin avauksiin, koska ne ovat herkimät ja reagoivat voimakkaimmin muutoksiin. Kokemuksen mukaan yksittäinen liitosalusta kuvaa hyvin koko piirilevyn painojälkeä, sillä volyymin muutokset ja vaihtelut tapahtuvat koosta ja muodosta riippumatta samantapaisesti kaikilla pädeillä. Valvomalla useaa eripuolilla piirilevyä sijaitsevaa avausaluetta yhtäaikaan saadaan pastan loppumiset ja kehittyvät ongelmat nopeammin kiinni. Piirilevylle tulevan pastan painolaatu on kokemuksen mukaan tietyllä ajanhetkellä hyvin samanlainen ja paikalliset muutokset keskiarvoissa ovat tilastollisesti samaa kokoluokkaa. Kaikkia mahdollisia liitosalustoja sen eri puolilla ei näin ollen ole tarpeellista edes mitata. Painolaadusta saadaan tilastollinen varmuus jo muutamalla mittauksella ja käytännössä siihen riittää muutama huolella valittu liitosalusta eri lokaatioista. Näin säästetään sekä tarkastukseen menevää aikaa että tarkastuslaitteiston hankintakustannuksia. On suuri kiusaus ostaa tuotantolinjalle laatua nopeamman ja kalliimman tarkastuslaitteiston muodossa, jos on epävarma tuotantonsa laatutasosta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Pinta-ala kuvaa metalliraakkeilla painettaessa hyvin pastan kokonaisuusmäärää ja painojälkeä. Painolaadun seurannan kannalta on käytännössä sama, onko mitattavana suurena pädien pinta-ala vai tilavuus. Voi siis kohtuullisen pienellä virheriskillä olettaa, että jopa painokoneiden mukana tulevien stensiilin avausten pinta-alaa mittaavien optisten laitteiden antamia tietoja voi käyttää pastanpainon laadun arviointiin. Menetelmä kuvaa epäsuorasti pastakakkujen tilaa ja siinä on omat vähäiset heikkoutensa, mutta ne voidaan kiertää hyvällä painorutiinilla.

Tuotantoprosessin seurantaan tulisi liittää mahdollisimman vähäinen määrä valvontakortteja. Olisi kuitenkin hyvä, jos niitä olisi ainakin kaksi erilaista; toinen seuraisi pastanpainon tilaa kortti kortilta, jolloin nopeaa korjausta vaativat tilanteet kuten pastan loppuminen ja virheet tuennassa olisivat korjattavissa välittömästi ja toinen valvontakortti saisi olla alaryhmäkooltaan luokkaa 5–10, jolloin painossa hitaammin tapahtuvat muutokset olisivat havaittavissa paremmin, vaikka tuotannossa olevat sarjat vaihtuisivat. Näin siksi, että pastanpainoprosessissa on osia, jotka pysyvät painotilassa samoina tuotteiden ja tuennan vaihtuessa. Yksi tällaisista tekijöistä on pasta, joka kuivaa stensiilillä ollessaan. Toinen samanlainen on stensiilin avausten tukkeutuminen, joka etenee hiljalleen, mutta sen merkitys on huomattava. Molemmat tapahtumat etenevät kuitenkin sen verran hitaasti, ettei niillä ole yksittäisen kortin tai lyhyen tuo-

tantosarjan kannalta merkitystä. Ne tulee kuitenkin ottaa huomioon tilanteessa, jossa valvontarajojen lisäksi halutaan soveltaa ns. ajoaikaisia testejä, mutta niiden valinnan tulee olla varovaista.

Yhteen valvontakorttiin voi sujuvasti yhdistää useiden komponenttien ja lokaatioiden tulokset ilman, että siitä tulee tulkitsijan kannalta sekava. Käytännössä se tarkoittaa useiden satojen yksittäisten liitosalustojen yhtäaikaista seuranta. Hyöty on moninkertainen: valvontakortteja on yhtä tarkoitusta varten vain yksi kappale. Niistä toinen on reaaliaikainen ja sisältää tulokset mittaus mittaukselta ja toinen on alaryhmäkooltaan noin 3–10. Ne antavat yhdellä silmäyksellä kokonaiskuvan piirilevyille tulevan pastan määrästä. Kolmas etu on siinä, että kuvaajat voidaan esittää suurissa taulukoissa, jolloin ne näkyvät hyvin myös koko linjalle.

6.5 Pastanpainon seuranta ja uudet tuotteet

Koesarjoissa tuli jo esiin, ettei painoparametrien muuttamisella saavuteta merkittäviä laatueroja, jos painotilanne on muutoin hallinnassa ja parametrit järkevällä tasolla: Liitosalustalle jäävän pastan määrä on ennakoitavissa, jos avauksen mitat, stensiilin vahvuus ja valmistustapa ovat tiedossa ja juotepastan käyttäytyminen ennalta tunnettu. Uudenkin tuotteen painamisen tulokset ovat siten ennustettavissa ja mittaustulokset esitettävissä suoraan esilasketussa valvontakortissa. Kokemuksen mukaan, edellä mainittujen reunaehtojen ollessa voimassa, painojälki on samanlainen samoilla painoparametreilla, vaikka tuote, stensiili ja tuenta vaihtuisivat. Avausten seinämiin jäävän pastan määrä pysyy lähes vakiona samassa avauskokuoluokassa ja siten uuden tuotteen avauksille voidaan melko tarkasti laskea todennäköiset keskiarvot jo etukäteen. Tosin on muistutettava, että samoilla avauksilla eri puolella piirilevyä olevat poikkeamat keskiarvoissa ovat tilastollisesti merkittäviä (esim. keskellä vs. klämppeyunalla). Siksi olisi tärkeää käyttää keskuspainotteisia lähtötietoja ja mitata liitosalustoille jäävän pastan volyyymia piirilevyn keskialueelta. Lisäksi ennakkoon laskettujen valvontarajojen, mikäli niitä käytetään, on oltava aiemmin laskettuja väljemmät.

Koesarjoista ja prosessiseurannassa saatujen kokemusten pohjalta voidaan todeta, että painolaatu vaihtelee suurin piirtein samalla tavalla ja vielä samaan suuntaan erikokoisilla liitosalustoilla eripuolilla piirilevyä. Tästä seuraa se, että vaikka piirilevyllä olisi komponentteja, joiden painojäljestä ei ole alustavia mittaustuloksia, voidaan seurantaan ottaa sellaisia liitosalustoja, jollaisista on jo kokemusta ja luottaa niiden antamaan informaatioon. Näin siksi, että pasta käyttäytyy tunnetun liitosalustan naapurissa samalla tavalla, vaikka sen muoto olisikin erilainen. Jälleen poikkeuksena ovat pastan suorituskyvyn rajalla olevat avauskoot, joiden tilanne voi vaihdella dramaattisesti, vaikka ns. normaalien avauksen kanssa painossa ei mainittavia muutoksia olisi havaittavissa. Pieniä saman kokoisia avauksia löytynee kaikilta piirilevyiltä esimerkiksi 0603:n liitosalustoilta.

6.6 SPC:n käyttö pitkissä tuotantosarjoissa ja kauan jatkuvassa tuotannossa

Pitkässä useita kuukausia kestäneessä seurannassa saatuja tietoja voidaan hyödyntää stensiilin vanhenemisen ja kunnan määrittämiseen. Kovilla paineilla painettaessa

stensiilin pinta kuluu ja voi jopa valssautua vähitellen ohuemmaksi, jolloin painojälki todennäköisesti muuttuu hitaasti. Pitkäaikaisen seurannan avulla on mahdollista selvittää, heikkeneekö painojälki ja tuleeko stensiili mahdollisesti vaihtaa. Hyötyä saadaan siitä, että painolaadun paraneminen on konkreettisesti osoitettavissa eli pelkkien mielikuvien tueksi on esittää faktoja. Samalla saadaan käsitys oman prosessin kyvykkyydestä eli tiedetään, mihin se pystyy ja mitä osataan. Vähintään yhtä tärkeänä voidaan kuitenkin pitää niitä tietoja, joita saadaan tehtäessä muutoksia prosessiin. Verrattaessa uutta tilannetta vanhaan voidaan numeerisesti osoittaa, vaikuttiko tehty muutos ja mihin suuntaan.

Prosessin kehittämisessä tavoitteena on lähtökohtaa huomattavasti korkeampi taso, mutta suuren harppauksen sijasta sinne edetään yleensä pienin askelin. Tuotannon kehittämisessä vähäiset muutokset ovat helpommin toteutettavissa ja niiden hinta on suureen investointivaihtoehtoon nähden vähäinen. Soveltamalla tilastollista prosessin ohjausta oikein voidaan pienellä otannalla ja lyhyellä vasteella todeta, vievätkö otetut askeleet oikeaan suuntaan. Paremman laadun tavoittamiseen ei aina tarvita uutta tuotantolaitteistoa.

6.7 Pastanpainon seurantaan soveltuvista Short-Run valvontakorteista

Kuten aiemmin todettiin on pastanpainon seurantaan soveltuvia Short-Run valvontakortteja olemassa useita. Seuraavassa esitellään niistä kaksi. Samalla käydään läpi niiden käyttöönottoon liittyviä seikkoja ja esitellään niiden toimivuutta tuotantotilanteesta poimittujen esimerkkien avulla. Esimerkkejä korteista löytyy Liitteestä 3.

Seurantaan hyväksytyt ja valitut valvontakortit ovat Z-W-kortti ja ShortRun-xR-kortti. Niitä on käytetty pastakakkujen tilavuuden ja pinta-alan seurantaan. Materiaalina käytetty prosessidata on kerätty usean päivän aikana tuotantolinjalta 2. Mittalaitteena oli Cyber Sentry 2000. Tarkastelun kohteena ovat neljällä erilaisella piirilevyllä olleet erikokoiset komponentit, joiden pastakakkujen tilavuus ja pinta-ala on mitattu ja esitetty peräkkäisinä mittaustuloksina edellä mainituilla SR-korteilla. Seurattavat komponentit vaihtuivat tuotannossa olleen piirilevyn vaihtuessa, mutta valvontakortti pysyi samana.

Pastanpainon laatu vaihtelee yhden piirilevyn sisällä seurattaessa samanlaisille liitosalustoille tulevan juotepastan määrää. Eroja on niin kokonaismäärissä kuin pintaaloissa ja korkeuksissa. Toisiaan lähellä olevien liitosalustojen samankaltaisuus on kuitenkin suurta. Muutokset hajonnassa ja keskiarvoissa ovat paikallisesti pieniä verrattuna alueiden välisiin eroihin. Seuranta ja valvontaa suunniteltaessa se on hyvä huomioida. Toivottavaa olisi, ettei pastanpainon tilastolliseen seurantaan ryhdyttäisi ilman käytettävien menetelmien ja vaadittavien lainalaisuuksien hyvää tuntemusta.

Valvontakorteilla seurataan piirilevyjen pastausta sekä viiveiden kanssa että ilman. Viiveistä kärsineet piirilevyt on myöhemmin poistettu alkuperäisistä tuloksista ja jäljelle jääneistä korteista on piirretty valvontakäyrät sekä alkuperäisille "väljille" valvontarajoille että viiveettömistä tuotteista lasketuille uusille tiukempirajaisille valvontakorteille. Molemmista valvontakorttityypeistä on siten piirretty kolme versiota; yksi, jossa kaikki mittaustulokset ovat mukana, toinen, jonka rajat ovat alkuperäiset,

mutta viiveelliset kortit on poistettu ja kolmas, jossa valvontarajojen laskennassa ja kuvaajissa on käytetty vain ns. viiveettömiä pastauksia. Huomaa, että Liitteessä 3 Z- ja W- kuvaajat on selvyuden vuoksi piirretty eri sivuille. Verrattaessa suodatettuja ja suodattamattomia mittaustuloksia keskenään, voidaan konkreettisesti havaita viiveiden vaikutus pastanpainon lopputulokseen. Kortit ovat tuotannossa olleessa järjestyksessä.

6.7.1 Z-W-valvontakortti

Yhtä valvontakorttia kohden on tarkastelun kohteeksi valittu kaksi erilaista komponenttia jokaiselta tuotantoon tulleelta piirilevyiltä. Kuvaajissa on siis kaksi erillistä valvontakäyrää, jotka näyttävät saman piirilevyn kahden erilaisen komponentin pasta-kakkujen normalisoituja arvoja. Käyrät ovat Z1 ja Z2 ja peräkkäiset mittaustulokset ovat aikajärjestyksessä. Vastaavasti on esitetty myös W1 ja W2.

Z-W valvontakortin edut:

- kuvaajan antama tieto on reaaliaikaista
- soveltuu Short Run-tuotantoon
- mahdollistaa erilaisten liitosalustojen samanaikaisen seurannan
- soveltuu erilaisille tuotteille (seurattavilla tuotteilla saa olla eri keskiarvo ja hajonta)
- tuotesarjan pituudella ei ole alarajaa

Z-W valvontakortin huonot puolet:

- soveltuu huonosti trendien seurantaan

Z-osan laskenta

Aluksi lasketaan liitosalustakohtainen liikkuvan vaihteluvälin, mR , itseisarvo seuraavasti:

$$\text{Kaava 1} \quad mR = \sqrt{(x_i - x_{i+1})(x_i - x_{i+1})} \quad , \text{ missä } i=1,2,3,\dots$$

Yksittäisistä liikkuvan vaihteluvälin arvoista lasketaan tuotekohtainen keskiarvo mR_{KA} , eli tässä tapauksessa molemmat seurattavat liitosalustat saavat omat keskiarvot.

$$\text{Kaava 2} \quad \text{Sigma}(X) = mR_{KA}/d_2$$

d_2 on vakio jonka arvo riippuu vaihteluvälin laskentaan käytettyjen tulosten lukumäärästä n ja saa tässä tapauksessa arvon 1.128.

$$\text{Kaava 3} \quad Z_i = \frac{x_i - x_{KA}}{\text{Sigma}(X)}$$

Tässä tapauksessa voisi X_i :stä vähentää X_{KA} :n sijasta parametrin tavoitearvon, mikäli sellainen olisi olemassa.

Z-osan valvontakuvaajan valvontarajat ovat kiinteät: ylävalvontaraja on 3 ja alavalvontaraja -3. Valvontakortin keskiliinja on nolla.

W-osan laskenta:

Vaihteluväli tulee laskea normalisoiduista Z-osan arvoista. Yleisesti vaihteluväliä on kuvattu symbolilla W. Kortin tulokset on saatu laskemalla peräkkäisten Z-arvojen erotuksen itseisarvo:

$$\text{Kaava 4} \quad W_i = |Z_i - Z_{i-1}|$$

Ainoa valvontaraja W-osalle on ylävalvontaraja (UCL_W), joka saadaan kaavasta 5:

$$\text{Kaava 5} \quad UCL_W = d_2 + 3d_3$$

W-osan ylävalvontarajana on tässä tapauksessa 3.686 (= $d_2 + 3d_3$) ja keskilinja on d_2 eli 1.128.

Kuvaajien tulkitsijalle:

Katsottaessa kolmatta Z-W-valvontakorttia, jonka lähtödatasta on poistettu viiveestä kärsineet piirilevyt ja jonka valvontarajat ja normalisoidut väliarvot on laskettu niiden pohjalta uudelleen, on hyvä muistaa sen kuvaajien herkkyyden olevan selvästi suuremman kuin kahden aiemman. Se on suoraa seurausta viiveestä kärsineiden korttien poistamisesta, sillä samalla laskennassa olevien pastakakkujen tilavuuksien hajonta pieneni, mikä puolestaan kasvattaa Z-arvojen kokoa (kts. kaavat 1-3). Tämä puolestaan kasvattaa Z-arvojen pohjalta laskettavan vaihteluväliä kuvaavan W-arvon herkkyyttä (kts. kaava 4). Huolimatta kasvaneesta herkkyydestä kolmannen valvontakortin valvontakäyrät eivät leikkaa valvontarajoja kuin kahdesti. Tilanne on aivan erilainen alkuperäisistä mittaustuloksista lasketuilla valvontakorteilla.

6.7.2 Short Run $\bar{X}R$ -kortti

Tarkastelun kohteeksi on yhtä piirilevyä kohden valittu vain yksi komponentti. Estettä usean rinnakkaisen valvontakäyrän piirtämiseksi ei ole. Kortilla olevat peräkkäiset mittaustulokset ovat aikajärjestyksessä ja valvontakäyrän piirtoon on käytetty samoja komponentteja kuin edellä esitellyn Z-W-valvontakortin Z1-käyrän piirroksessa. Laskennassa on käytetty viiden piirilevyn alaryhmäkokoja, joten valvontakortti ei reagoi yhtä voimakkaasti yksittäisiin muutoksiin kuin Z-W-kortti.

Short Run $\bar{X}R$ valvontakortin edut:

- esittää graaffisessa muodossa usean tuotteen tai prosessin vaihtelun
- soveltuu hyvin trendien seurantaan
- soveltuu erinomaisesti Short Run-tuotantoon
- mahdollistaa helposti erilaisten liitosalustojen samanaikaisen seurannan
- soveltuu erilaisille tuotteille ja mittayksiköille (niillä saa olla eri mittayksikkö, keskiarvo ja hajonta)
- erottaa prosessin vaihtelun tuotteen omasta vaihtelusta
- erottaa vaihtelun keskiarvossa ja standardipoikkeamassa tapahtuvista muutoksista

SR- $\bar{X}R$ valvontakortin heikkouksia:

- negatiivisten ja yksiköttömien lukujen käyttö voi alkuun vaikuttaa sekavalta
- jokaiselle valvontakortille tulevalle tuotteelle ja ominaisuudelle täytyy laskea oma keskiarvon ja vaihteluvälin tavoitearvo ja hajonnan estimaatti erikseen
- luotettava valvontakortin analyysi vaatii tiedot, miten käytettyjen kohde-/nominaaliarvot on vähennetty

SR- $\bar{X}R$ -kortin \bar{X} -osan laskenta

Seuraavassa on esitetty kortin laskennassa apuna käytetyt kaavat. Laskut on suoritettu komponenttikohtaisesti (huomaa alaryhmäkoko 5):

$$\text{Kaava 6} \quad \bar{X}_i = \frac{(\sum_{r=1}^n X_r)}{n} = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} \right)$$

\bar{X}_i on mitattavan tekijän i alaryhmän keskiarvo, n on alaryhmän koko, joka tällä kertaa on 5 ja X_r on mitattavan tekijän yksittäisen mittauksen arvo.

$$\text{Kaava 7} \quad R_i = \bar{X}_i \text{ max} - \bar{X}_i \text{ min}$$

$\bar{X}_i \text{ min}$ on mitattavan tekijän i alaryhmän minimi ja $\bar{X}_i \text{ max}$ vastaavasti sen maksimi.

$$\text{Kaava 8} \quad \bar{X}_{iKA} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n}$$

missä \bar{X}_{iKA} on mitattavan tekijän i alaryhmän keskiarvo ja n on niiden kokonaislukumäärä.

$$\text{Kaava 9} \quad R_{iKA} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$$

Missä R_{iKA} on mitattavan tekijän i kaikkien vaihteluvälien keskiarvo

$$\text{Kaava 10} \quad SR - \bar{X} = \frac{\bar{X}_i - \bar{X}_{iKA}}{R_{iKA}}$$

missä \bar{X}_{iKA} on mitattavan tekijän i alaryhmän keskiarvo ja R_{iKA} on sen alaryhmien vaihteluvälien keskiarvo.

Kuvaajassa käytetyt valvontarajat ovat kiinteitä: Käytetyllä alaryhmäkoolla ylävalvontaraja on 0.577 ja alavalvontaraja -0.577.

SR-xR-kortin R-osan laskenta

Kortin tulokset on saatu jakamalla korttikohtainen vaihteluväli kaikkien korttien vaihteluvälin keskiarvolla. Käytetyllä alaryhmäkoolla ylävalvontaraja on 2.114.

kaava 11
$$SR - R = \frac{R_i}{R_{iKA}}$$

Kuvaajien tulkitsijalle

SR- $\bar{X}R$ valvontakäyristä on helpompi havaita keskiarvossa tapahtuvia siirtymiä verrataessa niitä Z-W-valvontakorttien vastaaviin. Alaryhmäkokoa kasvattamalla saadaan kohinasta aiheutuva vaihtelu pienemmäksi, jolloin tuotannosta saatava informaatio nousee paremmin esiin.

Vaikka yksittäiseen valvontapisteeseen laskettiinkin viiden kortin mittaustiedot, on valvontakäyrältä selvästi havaittavissa, miten viiveet heikentävät painolaatua. Ero viiveitä sisältävän ja viivettömän painojäljen välillä on huomattava. Korteilta näkyy selvästi, miten paljon lyhyillä painoviiveillä toimivan pastanpainoprosessin laatu on normaalia tuotantoprosessia parempi. Pastanpainoprosessin laatu nousee viiveiden poiston myötä hyvälle tasolle. Edellytyksenä tietenkin on muiden painotekijöiden hallinta.

6.8 Painolaadun seuranta pastakakkujen pinta-alan avulla

Alkuperäisestä kaikki mittaustulokset sisältävästä datasta on piirretty myös toiset valvontakortit, joiden valvontakäyrä kuvaa pastakakkujen tilavuuden sijasta pinta-alaa. Nämä kuvaajat on esitetty Liitteessä 4. Tarkoituksena on havainnollistaa sitä, miten hyvin ja luotettavasti pelkkää pinta-alaa mittaamalla voidaan arvioida pastanpainon laatua. Vertaamalla kuvaajia vastaavasta datasta tilavuudesta tehtyihin valvontakortteihin havaitsee, miten lähellä toisiaan ne ovat. Käytännössä pinta-alan mittaus on useimmissa tapauksissa riittävän tarkka tapa pastanpainon laadun valvontaan ainakin metalliraakkeilla painettaessa. Poikkeuksen voivat aiheuttaa seurannassa olleita pienemmät stensiilin avaukset, joiden pinta-alojen suhdeluvut ja mittasuhdeluvut ovat selvästi lähempänä minimisuosituksia tai pastojen raekoon ollessa lähempänä sille asetettuja rajoituksia joko avauskoon tai stensiilin vahvuuden suhteen. Tämä edellyttää jo virheellistä stensiilin suunnittelua tai väärän pastatyyppin valintaa eikä sellaista tilannetta saisi tietenkään tulla eteen.

7 ÄLYKKÄÄT MENETELMÄT PASTANPAINON SEURANNASSA

Seuraavassa on lueteltu joukko kohteita tai toimenpiteitä, joiden ohjaus, valvonta ja/tai toiminnan arviointi voisi tapahtua nykyistä automaatioastetta nostamalla. Useissa tapauksissa toteutukseen voisi käyttää älykkäitä menetelmiä; sumeaa logiikkaa tai neuroverkkoja.

1. Pesuvälin sopivuuden arviointi; ennen kaikkea, onko se liian pitkä. Suurin ongelma on, etteivät nykyiset painojäljen mittalaitteet anna informaatiota pastakakkujen muodoista, sen epätasaisuuksista, yksittäisistä tinapalloista jne... Niiden älykkääksi saaminen olisi todellinen läpimurto painolaadun mittaamisessa, koska tällä hetkellä tarvitaan rinnalle myös operaattorin oma havainto ja kokemus.

2. Pesuaineen määrän optimointi: lähinnä syötetäänkö sitä liikaa. (tämän ei pitäisi olla ongelma, koska se on varsin helppo todeta ja annostelun tulisi olla hallinnassa jo ilman seurantaa) Mikäli painolaadun voimakas heittelemine ja pesuväli synkronoivat, syy ongelman takana on melko varmasti pesuaineen annostelussa.

3. Pastan lisästarpeen ennakointi: Kortti kuluttaa pastaa keskimäärin n.n grammaa, joten esim. 50 kortin jälkeen sitä olisi lisättävä jäljellä olevien korttien vaatimäärä. Lisättävän pastan määrän ja ennen kaikkea sallitun minimin tulisi olla suurin piirtein vakio tai muutoin tunnettu, jolloin lisäsvälin voisi ottaa huomioon jo painokoneelle syötettävien tietojen kuten painettavien tuotteiden lukumäärän ollessa tunnettu. Käyttäjä ilmoittaisi, miten paljon pastaa hän laittaa stensiilille ja ohjelma laskisi, milloin olisi tarpeellista annostella lisää.

4. Pastan vanhenemisen arviointi: Ongelmana on päättää, milloin painossa ollut pasta kaipaa joko virkistystä tai vaihtoa kokonaan uuteen. Painojäljen heikkeneminen korreloi pastan vanhenemisen ja vaihtotarpeen kanssa. Arvioinnille olisi käyttöä etenkin, jos vanhaa pastaa käytetään uudelleen tai tuotesarjat ovat lyhyitä. Samalla tavalla kuin edellä ohjelma voisi seurata, onko käytetty pasta stensiilille soveltuva. Mikäli pastaa jää liikaa tai selvästi aiempaa enemmän kaikille seurannassa oleville liitosalustoille, syynä on todennäköisesti tarkoitettua pienirakeisempi pasta tai jokin stensiilin asemointiin liittyvä ongelma.

Toisaalta ohjelma voisi huomauttaa tuotteen vaihdon yhteydessä operaattoria myös pastan vaihdon tarpeellisuudesta. Erityisesti tähän olisi syytä, jos seuraavan valmistettavan piirilevyn avaukset olisivat vaativampia ja painojäljestä olisi jo kokemuspohjalta sanottavissa, ettei pasta toimisi aikaisempaa pienemmillä avauksilla.

5. Tauot ja SPC:n reagointi: Jos viivettä on normaalista poikkeava määrä vaikka noin 5–10 min, niin valvontarajojen rikkoontuminen johtuu lähinnä tauosta ja pienestä valvontarajojen ylittämisestä aiheutuva hälytykseen on tuolloin turha reagoida. Järjestelmä voisi siis tunnistaa painoviiveiden aiheuttamat häiriöt ja jättää lievät rikkomukset havaitsematta. (Parasta olisi tietenkin välttää pitkien painokatkojen syntyminen, koska ne ovat useimmiten valvontarajojen rikkomisten takana.)

6. Painoparametrien optimointi: Liian alhainen paine suhteessa nopeuteen (korkeus kasvaa ja pinta-ala laskee), tai liian korkea paine suhteessa nopeuteen tai tuentaan (pinta-ala kasvaa ja smear lisääntyy), liian suuri tai pieni irtoamisnopeus (pastan jääminen avauksiin irtoamisnopeuden ollessa liian suuren ja pastan venymisen/leviäminen jos se on liian pieni). Ongelma poistuu, jos tyydytään painamaan lähes vakioisilla parametreilla. Kuten jo aiemmin todettiin liitosalustalle jäävän pastan määrää ei ole järkevää yrittää ohjata muuttamalla keskeisiä painoparametreja. Parametreilla saadut erot ovat pieniä ja niillä saadut muutokset ovat noin $\pm 5\%$.

7. Lämpötilan huomioonottaminen: Jos hallin tai painokoneen lämpötila on korkea ($T \geq 30^\circ\text{C}$), pastaa tulee normaaliparametreilla enemmän, eli tuolloin painetta ja painonopeutta voisi laskea hieman normaalin alapuolella. Lämpötilan nousu nostaa pastaa, jolloin se täyttää avaukset helpommin. Hellepäivinä työtilan lämmitessä voidaan toimenpiteellä vähentää liian pastan riskiä hivenen.

8. Stensiilin puhdistuksen ajankohdan päättäminen; Älykäs järjestelmä voisi pastakakuista päätellä, milloin avauksiin jäävän pastan määrä on liian matala. Käytännössä raja voisi olla kiinteä eikä painajalla jäisi tuolloin mahdollisuutta soveltaa pesun ajankohtaa. Jos painettava sarja olisi loppuillaan ja harkintaa voisi käyttää, niin painoa voisi jatkaa erän loppuun. Mittaustulosten pohjalta täytettäisiin valvontakorttia, jonka alaryhmän koko olisi noin 10, ja sen tiedot toimitaisivat ohjelman päätöksenteon apuna. Ohjelma tunnistaisi tuotannossa olevat piirilevyt ja käyttäisi niihin ladonnassa kuluvan ajan tietoja pesuajankohdan arvioinnin yhtenä osana. Päätöksen teossa voidaan hyvin käyttää harkintaa, koska stensiilin pesutarpeen kehitys ei nykypastoilla ole nopeaa. Päätöksen teon kannalta olennaista olisi käyttää apuna tietoja ympäristöolosuhteista, käytössä olevasta pastasta ja painoparametreista ja muista tekijöistä.

9. Stensiilin pesuvälin ennalta arviointi. Tämä liittyy edelliseen, mutta lähestyy ongelmaa eri pohjalta. Jos sarjan pituus on pitkä, monta sataa korttia tai useita tunteja, olisi stensiilin likaantuminen arvioitavissa jo ennalta ja sen pesu yhdistettävissä henkilökunnan taukoihin.

10. Painojäljen osoittaessa selvää poikkeamaa aiempiin sarjoihin verrattuna voisi järjestelmä huomauttaa painajaa mahdollisesta ongelmasta esimerkiksi painon tavallista voimakkaammasta värähtelystä etenkin tietyn lokaation kohdalla, mikä viittaisi tuennan puuttumiseen. Tosin painon alkaessa voi ilmetä muitakin ongelmia; pasta voi olla virkistämätöntä, kylmää tai vanhaa, jolloin liitosalustalle jäävän pastan määrä on vähäistä. Kylmä pasta lämpenee muutaman painokerran jälkeen ja virkistämätön pasta virkoaa yleensä painon edetessä. Vanha pasta ei sensijaan toivu, vaan sen määrä jää vähäiseksi ja sen painosuuntaan reagointi on pienempää kuin tuoreen pastan.

8 YHTEENVETO

Tässä raportissa on tarkasteltu pastanpainossa tapahtuvia muutoksia, niiden suuruutta ja aiheuttajia seuraamalla todellisten pintaliitoslinjojen toimintaa ja siinä esiintyviä ongelmia. Seurannan, kirjallisuuden, artikkeleiden ja haastattelujen pohjalta tehtiin koesuunnitelma, jonka avulla selvitettiin painotulokseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden merkitystä painojälkeen kahdella tehdaslinjalla.

Pastanpainon lopputulokseen vaikuttavat tekijät voidaan karkeasti jakaa viiteen erilliseen ryhmään; käytettäviin työväliseisiin, painossa valittavissa oleviin parametreihin, ympäristötekijöihin, työtapoihin ja käytössä oleviin raaka-aineisiin. Ryhmistä jokaisella on oma merkittävä roolinsa pastanpainon lopputulokseen ja niiden sisällä on osia, joiden huomiointi ja hallitseminen on välttämätöntä. Tässä raportissa on esitelty lähinnä painoparametrien vaikutuksia.

Koesarjojen tulokset olivat yllättäviä. Tilastollisesti arvioituna aina merkittäviksi tulevaa parametriä ei löytynyt lainkaan. Tuloksista nousevat kyllä esiin raakkelin paineen, irtoamisnopeuden ja vetonopeuden toistuvasti samansuuntaiset vaikutukset, mutta laskettaessa tilastollista merkitsevyyttä vaikutukset jäävät pieniksi. Tuotantolinjalla 2 tehdyt kokeet osoittivat paineen, nopeuden ja irtoamisnopeuden olevan tärkeimmät painoparametrit. Yllättävää oli myös vedon jälkeisen viiven (down stop), eli raakkelin pysähtymisen ja stensiiliin irtoamisen alkamisen väliin jäävän ajan, osoittautuminen piirilevylle jäävän pastan määrään vaikuttavaksi tekijäksi.

Koesarjat osoittivat sen, ettei parametrien muuttaminen ratkaisevasti vaikuta stensiilipainannassa liitosalustalle jäävän pastan määrään, ei ainakaan käytettäessä metalliraakkeleita. Pastanpainoprosessi on helposti hallittavissa ja ongelmaton, ellei syyllisyyttä selviin ylilyönteihin parametreja valittaessa; Painojäljen saa huonoksi väärillä nopeus- ja painevalinnoilla, laiminlyömällä tuennan, heikolla tasomaisuudella, liian korkealla ja matalalla irtoamisnopeudella, liiallisella pesuaineen käytöllä, likaisella stensiilillä, liian harvalla pesuvälillä, kylmällä, vanhalla tai virkistämättömällä pastalla, liian lämpimällä pastalla tai liian suurella pastan raekoolla.

Pastanpainon seurantaan soveltuvia Short-Run valvontakortteja on useita. Tässä raportissa testattiin kahta: Z-W-korttia ja ShortRun-xR-korttia. Niitä käytettiin pastakakkujen tilavuuden ja pinta-alan seurantaan. Materiaalina käytetty prosessidata kerättiin usean päivän aikana tuotantolinjalta 2. Mittalaitteena oli Cyber Sentry 2000. Tarkastelun kohteena olivat neljällä erilaisella piirilevylle olleet erikokoiset komponentit, joiden pastakakkujen tilavuus ja pinta-ala mitattiin ja esitettiin peräkkäisinä mittaustuloksina edellä mainituilla SR-korteilla. Seurattavat komponentit vaihtuivat tuotannossa olleen piirilevyn vaihtuessa, mutta valvontakortti pysyi samana.