

Jussi Erkkilä

Tilastollinen laadunohjaus painovärituotannossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
30.4.2012

Tekijä(t) Otsikko	Jussi Erkkilä Tilastollinen laadunohjaus painovärituotannossa
Sivumäärä Aika	51 sivua + 2 liitettä 30.4.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Yliopettaja Veli-Matti Taavitsainen Laboratorioinsinööri Marko Tuppurainen
<p>Insinööri työ tehtiin Sun Chemical Oy:lle. Työn tarkoituksena oli tarkastella laadunvalvontarajoja ja laadunvalvontamenetelmiä tilastollisin menetelmin. Työssä keskityttiin tehtaalla valmistettaviin vesi- ja liuotinpohjaisiin fleksoväreihin sekä niiden laadunvalvontarajoihin ja -menetelmiin. Laadunvalvonnassa tehtävistä testeistä yleisin on viskositeetin mittausta, joka tehdään lähes kaikille valmistettaville tuotteille. Viskositeetin mittauksessa havaitaan myös eniten spesifikaatorajojen ylityksiä. Insinööri työ oli osa yrityksen Six Sigma laatujohtamisprosessia, joka käyttää toiminnassaan tilastollista laadunohjausta (SPC).</p> <p>Tutkimukseen valittiin tuotteita, joita tehtaalla valmistetaan useimmin. Tuotteiden laadunvalvonnasta saatu viskositeetin mittausdata analysoitiin Minitab 15 -tilasto-ohjelman avulla. Minitabin Capability Sixpack -työkalu konstruoi valmistusprosesseille valvontakortit ja suorituskylvyt, C_p ja C_{pk}, joiden avulla voidaan analysoida, onko tutkittava prosessi hallinnassa ja ovatko asetetut spesifikaatorajat tarkoituksenmukaisia. Tuotteiden laadunvalvontarajoja tai valmistusreseptejä muutettiin Minitabin tekemien analyysien perusteella. Tuotteisiin tehtyjen muutosten jälkeen tuotteiden läpäisyprosentti viskositeetin mittauksessa parani huomattavasti.</p> <p>Laadunvalvonnassa käytettyjä mittausten menetelmiä ja niiden suorituskäytäntöä tutkittiin Gage R&R -menetelmällä. Sen tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon laadunvalvonnassa havaitusta prosessin kokonaisvirheestä tulee itse laadunvalvonnan mittauksesta. Gage R&R -selvityksen perusteella mittausten menetelmä voidaan validoida käytettäväksi laadunvalvonnassa, jos sen osuus kokonaisvaihtelusta ei ole liian suuri.</p>	
Avainsanat	SPC, tilastollinen laadunohjaus, fleksoväri, painoväri, Gage R&R

Author(s) Title	Jussi Erkkilä Statistical process control in printing ink manufacturing
Number of Pages Date	51 pages + 2 appendices 30 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	
Instructors	Veli-Matti Taavitsainen, Principal Lecturer Marko Tuppurainen, Laboratory Engineer
<p>This project was made for Sun Chemical Ltd. The objective of this thesis project was to analyze quality control limits and methods by using statistical methods. This thesis focused on water- and solvent-based flexographic inks and quality control limits and methods for flexographic inks. The most common quality control method is viscosity testing. Viscosity is tested for almost every product. This thesis is a part of the company's Six Sigma quality management process and statistical process control (SPC) is an essential part of Six Sigma actions.</p> <p>The study included the most frequently produced products. The quality control data was analyzed using Minitab 15 statistical software. Minitab's Capability Sixpack tool constructs control charts and capability indices, C_p and C_{pk}, for the process. Control charts and capability indices can be used to determine if the process is under control and if the specification limits are reasonable. The quality control limits or manufacturing recipes were corrected according to Minitab analyses. After the corrections the "Right First Time" figure in viscosity testing got significantly higher.</p> <p>The quality control methods were studied using the Gage R&R method. The purpose of the Gage R&R is to determine what part of the detected overall variation is caused by the measurement system itself. On the basis of the Gage R&R study, it is possible to decide if the measurement system is good enough. If the variation coming from the measurement system is reasonable low, the method can be validated for quality control.</p>	
Keywords	Statistical process control, printing ink, Gage R&R

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tilastollinen prosessin valvonta	2
2.1	Prosessi	2
2.2	Prosessin luonnollinen vaihtelu	3
2.3	Ylilaatu	4
2.4	Tunnusluvut	4
2.4.1	Normaalijakauma	5
2.4.2	Keskiarvo	6
2.4.3	Hajonta	6
2.5	Valvontakortit	7
2.6	Valvontarajat UCL ja LCL	9
2.7	Histogrammit	10
2.8	Spesifikaatorajat USL ja LSL	11
2.9	Prosessin suorituskyky	12
2.10	Six Sigma laatujohtaminen	15
2.11	Minitab	16
3	Laadunvalvonta	17
3.1	Mittaaminen	17
3.2	Mittauksen oikeellisuus ja toistotarkkuus	18
3.3	Virheet	19
3.4	MSA	20
3.5	Gage R&R	21
4	Pakkauspainovärit	23
4.1	Fleksopainovärit ja fleksopainatus	23
4.2	Painovärien koostumus	24
4.3	Painovärien valmistusprosessi	26
5	Sun Chemical Oy	27
5.1	Painovärien valmistus Espoon tehtaalla	27
5.2	Painovärien laadunvalvonta	27
5.2.1	Perusteet	28

5.2.2	Mittausmenetelmät	28
5.2.3	Käytäntö	29
5.2.4	Laadunvalvonnan dokumentointi	30
6	Laadunvalvontarajojen tarkastelu	31
6.1	Datan keruu	31
6.2	Viskositeetin testaus	31
6.3	pH-testaus	35
6.4	Tuotteiden analysointi Minitab-ohjelmalla	35
6.4.1	Within ja overall	36
6.4.2	I Chart ja MR Chart	37
6.4.3	Last Observations	37
6.4.4	Capability Histogram	37
6.4.5	Normal Prob Plot	38
6.4.6	Capability Plot	38
6.5	Tuotteisiin tehdyt muutokset	39
6.5.1	Viskositeetti	39
6.5.2	pH	39
6.6	Viskositeetin ja pH:n mittausmenetelmien analysointi	39
7	Tulokset	43
7.1	Gage R&R -tulokset	43
7.2	Uuden datan keruu laadunvalvonnasta	45
7.3	Havaitut muutokset	46
8	Yhteenveto	48
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Korjatut tuotteet	
	Valvontarajojen ja estimaattien laskennassa käytettyjä vakioita	

1 Johdanto

Insinööriyö tehtiin Sun Chemical Oy:lle, joka on maailman johtava painoväriyhtiö. Yhtiö työllistää yli 8 000 työntekijää ympäri maailmaa. Vuonna 2010 oli myyntiä 3,5 miljardia dollaria.

Työn tarkoituksena oli Sun Chemicalin Espoon painoväritehtaan tuotannon tehostaminen tarkastelemalla tilastollisin menetelmin laadunvalvonnassa ja tuotannossa esiintyviä ongelmia. Työssä keskityttiin tehtaalla valmistettaviin vesi- ja liuotinpohjaisiin fleksoväreihin. Tehtaassa tapahtuva tuotanto alkaa raaka-aineiden hankkimisesta ja päättyy valmiin tuotteen lähettämiseen asiakkaalle. Jotta prosessi olisi mahdollisimman tehokas, olisi tämä aika pystyttävä pitämään mahdollisimman lyhyenä, kuitenkin niin, että lopputuotteiden laatu olisi asiakkaan näkökulmasta riittävä. Jokaiselle tehtaassa valmistettavalle painovärille on tuotekehitysvaiheessa luotu tietyt spesifikaatioarvot, jotka valmiin tuotteen tulee täyttää.

Työssä tarkastellaan tuotteita, joita tehtaassa tehdään paljon ja joiden valmistuksessa tai laadunvalvonnassa on havaittu ongelmakohtia. Näin ollen saadaan mahdollisimman suuri vaikutus keskimääräiseen läpimenoaikaan. Koska tehtaalla tehdään useita satoja erilaisia painovärejä vuodessa, useimpia painovärejä tehdään vain muutaman kerran vuodessa. Tämän kaltaisiin tuotantokohteisiin tilastollisten menetelmien soveltaminen voi olla haasteellista. Työssä tarkastellaan myös laadunvalvonnassa käytettäviä mitausmenetelmiä ja niiden luotettavuutta sekä näiden suhdetta tuotteiden hyväksymisrajoihin. Työn tilastollisiin analyyseihin käytettiin Minitab Inc. -yhtiön Minitab 15 -tilasto-ohjelmaa.

Tuotannon valmistavat tuotteet kulkevat lähes poikkeuksetta laboratorion kautta ennen kuin ne pakataan asiakkaille. Laboratoriossa tapahtuva laadunvalvonta on tärkeä osa tuotantoa. Tällä tavalla pystytään varmistamaan, että asiakkaat saavat spesifikaatioarajat täyttäviä tuotteita.

2 Tilastollinen prosessin valvonta

Statistical Process Control (SPC) eli tilastollinen prosessin valvonta on vakiintunut tapa seurata prosessia ja samalla toteuttaa myös tuotteen laadunvalvontaa tilastollisia menetelmiä käyttäen. Prosessin tuottamaa laatua ja sen suorituskykyä on tarpeellista seurata, jotta mahdollisiin poikkeaviin tilanteisiin voidaan puuttua, ennen kuin ne huonontavat laatua. Kaikkien prosessien tavoitteena on tuottaa tasaisesti riittävän laadukkaita tuotteita. Prosessin suorituskykyä voidaan seurata tilastollisesti luotettavilla menetelmillä. (Salomäki 1999, s. 146)

Tilastolliset menetelmät voivat olla hyödyllisiä koko tuotteen valmistusprosessia tarkasteltaessa. Tähän joukkoon lukeutuvat tuotekehitys, tuotannon vaihtelu, tuotannon vaihtelun analysointi, sekä tuotekehityksen ja tuotannon opastus. Näitä kaikkia tulee kehittää, jotta tuotteen vaihtelu pystyttäisiin eliminoimaan tai saataisiin pienentymään. (Montgomery 1997, s. 431)

2.1 Prosessi

Yksinkertaisesti prosessi tarkoittaa tapahtumien joukkoa, joilla on tarkoitus saada aikaan jokin lopputulos. Yleisimmin prosessin tavoitteena on saada aikaan lisäarvo asiakkaalle. Prosesseja on monia erilaisia, esimerkiksi tuotteiden valmistus, hankinta, laskutus ja palvelut. Jokainen prosessi tarvitsee syötteen ja siitä seuraa prosessin ulostulo. Syötteenä voi olla esimerkiksi materiaali, laite, informaatio tai ihminen. Kuvassa 1 on esitetty prosessin yksinkertainen periaate.



Kuva 1. Prosessin periaate. (Alwan 2000, s. 14)

Kaikissa prosesseissa on useita asioita, jotka vaikuttavat tuotteen ominaisuuksiin ja laatuun. Se, miten ne luokitellaan, on ensiarvoisen tärkeää. Usein on kyse siitä, että on muutama tärkeä asia, jotka aiheuttavat suuren osan virheistä ja jotka siten ne vaikuttavat enemmän laatuun. Sitten on suurempi joukko muita asioita, joiden kokonaisvaikutus laatuun ei ole niin merkittävä. (Kume 1998, s. 9–11)

Koska valmistusprosessit ovat dynaamisia ja jatkuvasti liikkeessä, ne vaativat ohjaamista. Olosuhteet muuttuvat jatkuvasti, johtuen ympäristön muutoksesta. Tämän tyyppiset muutokset aiheuttavat noin 1,5 sigman luontaisen kohinan normaalisti jakautuvaan prosessiin. Näihin muuttujiin sisältyvät esimerkiksi lämpötilan vaihtelu, operaattorin virheet ja raaka-aineiden vaihtelut. (Kear 1998, s. 14–15)

2.2 Prosessin luonnollinen vaihtelu

Prosesseissa on aina vaihtelua. Tämä vaihtelu tulisi tuntea, jotta voidaan määritellä valmistettavalle tuotteelle spesifikaatorajat. Nämä rajat eivät aina ole ehdottomia, jos tiedetään, että tuote voi toimia myös rajan ulkopuolella. Monet rajat ovat asetettu vain, koska raja täytyy vetää johonkin tai asiakas haluaa sen johonkin. Jos spesifikaatoraja ylittyy, voidaan tuote käsitellä seuraavilla tavoilla:

- tuote hyväksytään sellaisenaan
- tuote hyväksytään rajoituksin (sovitaan asiakkaan kanssa)
- tuote korjataan vaatimusten mukaiseksi
- poikkeama kompensoidaan muissa osissa
- tuote hylätään. (Salomäki 1999, s. 113)

Prosessiin syntyy luonnollista vaihtelua häiriösuureista. Tämänlaisia suureita ovat esimerkiksi työntekijän kädenliike, joka vaihtelee hetkestä toiseen, tai lämpötila. Myös esimerkiksi maalin viskositeetti voi maalaajalle olla häiriösuure. Yleisistä syistä tai sattunnaisista syistä aiheutuva luonnollinen vaihtelu koetaan prosessin kohinana. Se on luonnollinen osa kaikkia prosesseja. Prosessin kohina vaihtelee keskiarvonsa ympärillä. Kohinalle voidaan määritellä matemaattisesti kohtalaisen luotettavat rajat. Kohina on osa prosessia, mutta sitä voidaan pienentää kohdistamalla parannustoimenpiteitä pro-

sessin tai sen osatekijöihin. Yleensä tämä tarkoittaa toimintatapojen muutoksia tai investointeja, esimerkiksi parempiin raaka-aineisiin tai laitteisiin. (Salomäki 1999, s. 172–175)

Prosessissa esiintyvä äkillinen häiriö johtuu erityisestä syystä. Tämän tyyppinen häiriö näkyy yleensä selkeänä piikkinä. Erityisistä syistä johtuvien häiriöiden seurauksena ei prosessia kannata säätää. Häiriötekijöitä voivat olla esimerkiksi laitteiden kuluminen ja olosuhteiden muutokset. Sen sijaan häiriön syy on paikallistettava ja poistettava. Tämän jälkeen on jatkettava kuten ennenkin. Nämä syyt tulisi tunnistaa ja erotella, kun prosessia mitataan. (Salomäki 1999, s. 172–175)

Prosessia voidaan pitää vakaana, jos kaikki vaihtelu johtuu vain yleisistä syistä. Vakaa prosessi ei välttämättä tarkoita, että prosessi olisi suorituskykyinen. Prosessi on hallinnassa, jos sen vaihtelu on sille ominaista ja luontaisesti vaikuttavista syistä johtuvaa. (Salomäki 1999, s. 172–175)

2.3 Ylilaatu

Tilastollista laadunohjausta voidaan soveltaa moniin eri ongelmiin. Yksi merkittävä näistä on ylilaatu. Asiakkaan on vaikea nähdä ylilaadun haittoja, mutta siitä on suuri haitta tuotantoprosessin kannalta. Ideaalitulanteessa tuotannon pitäisi pystyä tekemään tasaista laatua, joka on asiakkaan näkökulmasta riittävää. Jos tuotanto ei tähän pysty ja tuotetta joudutaan korjaamaan paljon, kustannukset nousevat ja vaihe muodostuu ajallisesti pullonkaulaksi. Tämä voi johtaa tuotteen hinnan kasvuun tai toimitusaikojen ylityksiin. Kaikki laatuvaatimukset tulisi keskustella tuotannon, laadunvalvonnan ja asiakkaan kesken. (Salomäki 1999, s. 365)

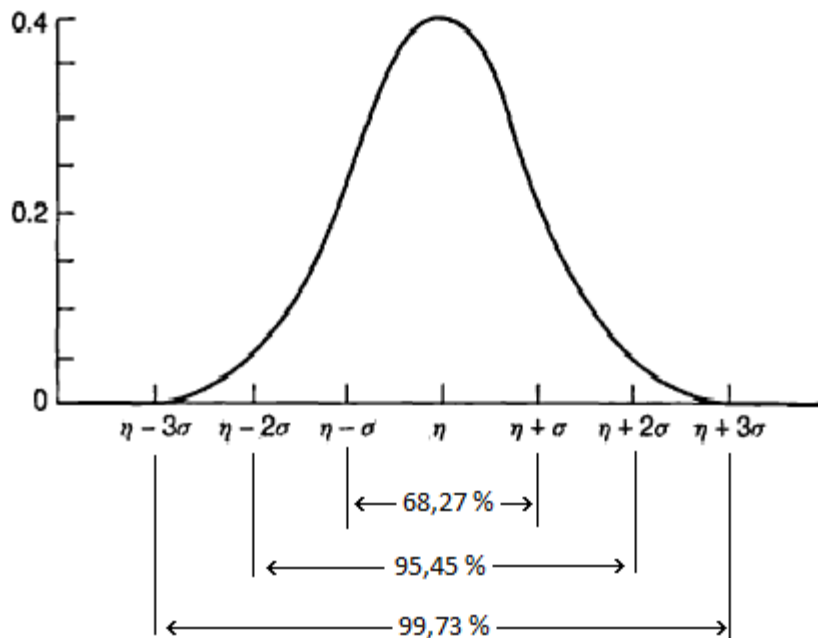
2.4 Tunnusluvut

Jotta pystytään käyttämään tilastollisia menetelmiä, on tärkeää tuntea keskeisiä tilastollisia suureita ja käsitteitä.

2.4.1 Normaalijakauma

Vaikka mitattaisiin samaa näytettä toistuvasti, tulokset eroaisivat toisistaan johtuen mittauksessa syntyvästä vaihtelusta. Tulokset kuitenkin keskittyvät symmetrisesti jonkin tietyn arvon ympärille. Arvot, jotka eroavat tästä estimoidusta keskiarvosta vain vähän, esiintyvät todennäköisemmin kuin estimaatista paljon eroavat arvot. Useimpien prosessien tuotokset seuraavat lähes normaalijakaumaa. (Box-Hunter 2005, s. 27)

Syy tähän on teoria, jota kutsutaan keskeiseksi raja-arvolauseeksi. Keskeinen raja-arvolause sanoo, että toisistaan riippumattomien satunnaisvirheiden summa noudattaa likimain normaalijakaumaa niin, että mitä enemmän satunnaismuuttujia on, sitä vähemmän summan jakauma poikkeaa normaalijakaumasta, kuitenkin niin, että satunnaismuuttujien hajonnat ovat samaa suuruusluokkaa. Satunnaismuuttujien jakaumien muodolla ei sen sijaan ole merkitystä. Käytännössä kaikkiin tapahtumiin, kuten mittauksiin ja prosesseihin, vaikuttaa aina useita eri satunnaismuuttujia. Tämän vuoksi useimpien mittauksien ja prosessien tuotokset ovat likimain normaalisti jakautuneita. Kuvassa 2 on esitetty normaalijakauman tiheysfunktio. (Alwan 2000, s.93)



Kuva 2. Normaalijakauman kuvaaja. (Alwan 2000, s. 87)

Kuvassa 2 nähdään samalla satunnaisluvun todennäköisyys saada arvo tietyn keskihajonnan kerrannaisen päähän estimoidusta keskiarvosta (Alwan 2000 s. 87).

2.4.2 Keskiarvo

Kun tutkitaan näytepisteiden joukkoa, tyypillisesti ensimmäinen mielenkiinnon kohde on arvo, joka edustaa pisteiden yleistä sijaintia. Koska useimmissa tapauksissa näytepisteiden arvot kasautuvat keskelle, kahden ääripään väliin, antaa keskipiste parhaan estimaatin koko näytepisteiden joukosta. Yleisimmin tähän käytetty tunnusluku on keskiarvo. Tilastollisessa laadunvalvonnassa keskiarvolla on useita sovelluskohteita. (Alwan 2000, s. 65)

Kun suuresta määrästä näytteitä estimoidaan näytteitä parhaiten edustavaa arvoa, se lasketaan mitattujen näytepisteiden keskiarvona. Samoin joukon keskihajontana pidetään pisteistä laskettua keskihajontaa. Todellisuudessa estimaatti, joka perustuu mitattuihin näytteisiin, sisältää aina virhettä. Mitä suurempi määrä näytteitä pystytään analysoimaan, sitä lähemmäksi on keskiarvon ja keskihajonnan estimaatit pääsevät todellista arvoa. (Alwan 2000, s. 91)

SPC:ssä joukon keskimääräistä arvoa kuvaamaan käytetään yleensä aritmeettista keskiarvoa. Käytännössä, jos näytteitä on paljon, näyte-erien keskiarvot ovat aina paremmin normaalijakautuneita kuin yksittäisten näytteiden arvot. Aritmeettinen keskiarvo saadaan laskemalla kaikki mittaustulokset yhteen ja jakamalla tämä mittaustulosten määrällä. (Salomäki 1999, s. 159)

2.4.3 Hajonta

Keskimääräistä arvoa kuvaavat tunnusluvut kertovat pisteiden yleisestä sijainnista, mutta ne eivät kerro, kuinka laajalle alueelle pisteet sijoittuvat. Yksinkertainen tapa kuvata tätä on käyttää vaihteluväliä (R , *range*). Vaihteluväli on yksinkertaisesti suurimman ja pienimmän arvon erotus. Kokonaisvaltaisempi menetelmä kuvata pisteiden hajontaa on käyttää keskihajontaa (*standard deviation*). Se on tunnetuin ja eniten käytetty menetelmä kuvata pistejoukon hajontaa. Keskihajonnan laskemiseen käytetään kaikkien näytepisteiden arvoja, ei pelkästään suurin ja pienintä. Keskihajonta lasketaan

näytepisteiden keskimääräisenä etäisyytenä näytepisteiden keskiarvosta. (Alwan 2000, s. 71)

Keskihajonnan paikalla voidaan myös käyttää vaihteluväleistä laskettuja keskihajonnan estimaatteja. Minitab 15 -ohjelma laskee lyhytaikaista suorituskykyä käyttämällä keskihajonnan estimaattia σ_{Within} , joka lasketaan kaavasta:

$$\sigma_{\text{Within}} = \frac{\overline{MR}}{d_2(2)} \quad (1)$$

MR = Peräkkäisten mittausten vaihteluvälien keskiarvo

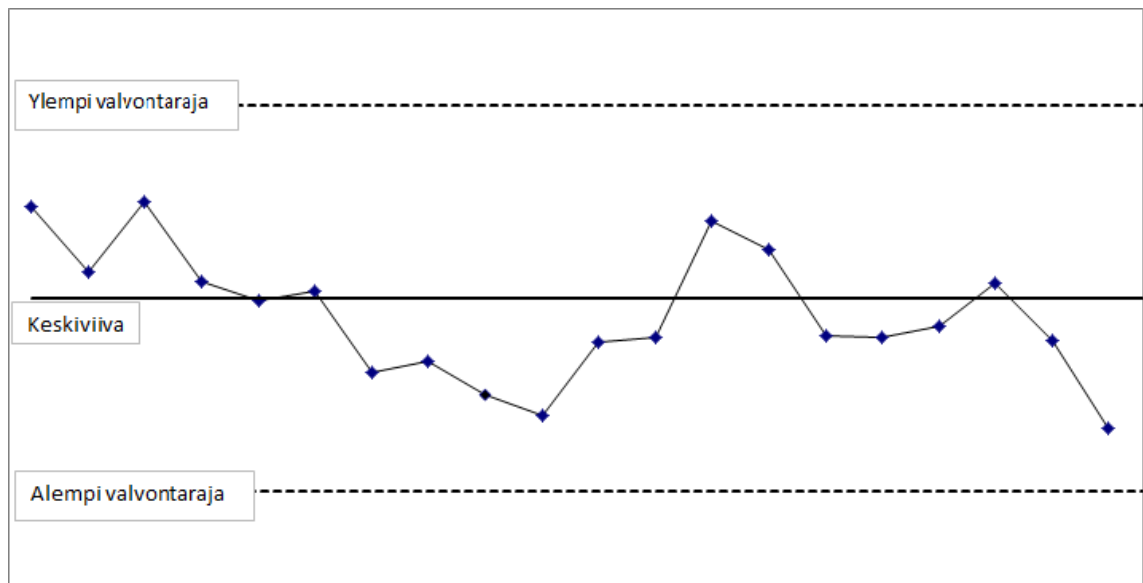
d_2 = valvontakorttien ja estimaattien laskennassa käytettävä vakio (Liite 2). (Minitab 15)

2.5 Valvontakortit

Tilastollinen laadunvalvonta käyttää yhtenä perustyökalunaan valvontakortteja. Valvontakorttien idea on yksinkertainen, mutta se on tehokas tapa kuvata prosessien suorituskykyä. Valvontakorttien kehittäjä oli Walter A. Shewhart, ja valvontakortteja kutsutaan myös nimellä *Shewhart Control Charts*. Valvontakorttien avulla voidaan seurata prosessin suorituskykyä ajan funktiona. Valvontakorttien tarkoituksena on erottaa prosessin eri syistä johtuvat vaihtelut toisistaan. Prosessien kokonaisvaihtelu on yleisten syiden ja erityisten syiden aiheuttaman vaihtelun summa. Valvontakortteja voidaan rakentaa saatavilla olevasta datasta myös jälkeenpäin, jolloin nähdään, onko prosessissa tapahtunut muutoksia. Valvontakorttien avulla pystytään esittämään prosessista kerätty tieto graafisesti, mikä helpottaa ja nopeuttaa tulkintaa. Niiden avulla pystytään lukemaan suuria määriä tietoa kohtuullisen nopeasti. (Alwan 2000, s. 230)

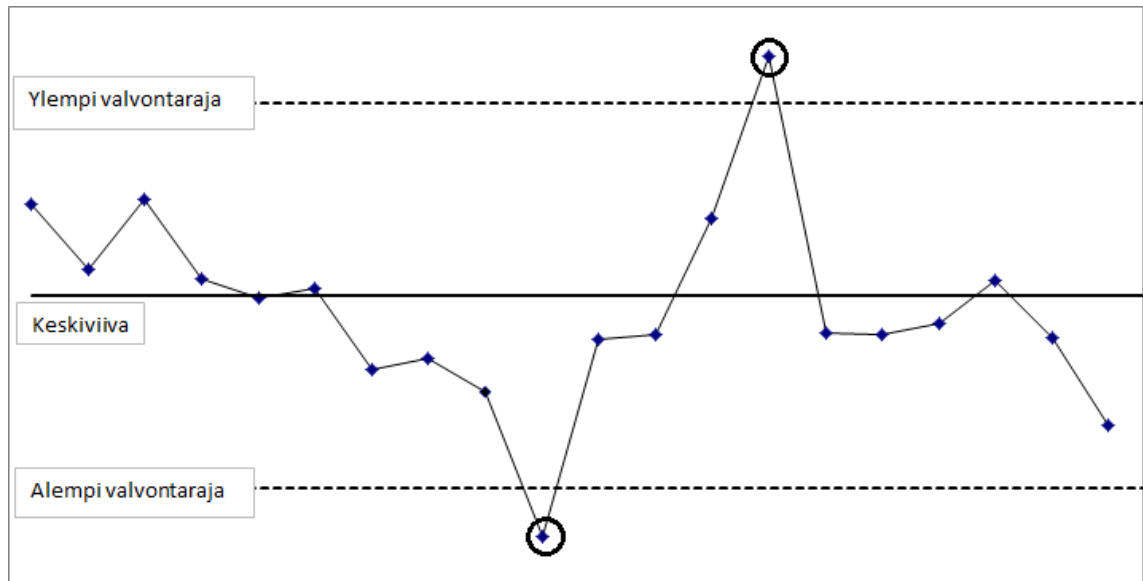
Valvontakorteissa on keskiviiva (CL, *Centerline*) sekä sen molemmin puolin kaksi valvontarajaa (UCL ja LCL). Keskiviivana käytetään prosessista kerätyn datan keskiarvoa. Valvontarajat esitellään myöhemmin. Prosessista havainnoidut arvot merkitään kortteihin pisteillä. Prosessin katsotaan olevan hallinnassa, jos kaikki siitä saadut arvot sijoit-

tuvat valvontarajojen sisään eikä niillä ole huomattavissa olevaa suuntausta. Kuvassa 3 nähdään esimerkki hallinnassa olevan prosessin valvontakortista. (Kume 1998, s. 92)



Kuva 3. Valvontakortti, jossa prosessi on hallinnassa.

Yllä esitetystä valvontakortista kaikki vaihtelu on yleisistä syistä johtuvaa vaihtelua. Tämän kaltaista vaihtelua esiintyy prosessissa, vaikka valmistus tapahtuu standardisoi-
tuja raaka-aineita ja menetelmiä käyttäen. Jos pisteitä jää valvontarajojen ulkopuolelle, katsotaan, että prosessi ei ole hallinnassa. Kuvassa 4 on valvontakortti prosessista, joka ei ole hallinnassa. Jotta prosessi saataisiin takaisin hallintaan, on tämänkaltaisen, erityisistä syistä johtuvan vaihtelun syyt selvitettävä ja korjattava. Valvontakortteja on useita erilaisia sekä jatkuville arvoille että epäjatkuville arvoille. Tässä työssä ei niitä käydä tämän tarkemmin läpi. (Kume 1998, s. 92)



Kuva 4. Valvontakortti – kaksi pistettä on valvontarajojen ulkopuolella. Prosessi ei ole hallinnassa.

2.6 Valvontarajat UCL ja LCL

Valvontarajojen ideana on asettaa ne siten, että prosessin voidaan katsoa olevan hallinnassa, jos kaikki prosessin tuotokset asettuvat näiden rajojen sisään. Valvontarajat sekoitetaan usein tuotteen spesifikaatio-rajoihin. UCL (*Upper Control Limit*) ja LCL (*Lower Control Limit*) määritellään prosessista kerätystä tiedosta. Kokemusperäisesti sopiviksi rajoiksi on määritelty niin sanotut kolmensigman rajat. Valvontarajat lasketaan prosessin keskiarvosta. Ylempi valvontaraja on keskiarvo plus kolme kertaa keskihajonta. Alempi valvontaraja on keskiarvo miinus kolme kertaa keskihajonta. Nämä rajat ovat valvontakorteissa yleisimmin käytetyt rajat. Normaalisti jakautunut satunnaismuuttuja osuu rajojen sisään 99,73 %:n todennäköisyydellä. Valvontarajoja laskettaessa on otettava huomioon, että prosessin on oltava normaalitilassa. Erityisistä syistä johtuvaa vaihtelua ei saa esiintyä prosessissa, kun valvontakorttia konstruoidaan. (Alwan 2000, s. 235)

Minitab 15 -tilasto-ohjelma laskee I-valvontakortissa käytetyt valvontarajat kaavoista:

$$UCL = \mu + 3 \cdot \sigma_{\text{Within}} \quad (2)$$

$$LCL = \mu - 3 \cdot \sigma_{\text{Within}} \quad (3)$$

μ = prosessista laskettu keskiarvo

σ_{Within} = prosessin estimoitu keskihajonta.

MR-valvontakortissa käytetyt valvontarajat lasketaan kaavoista:

$$UCL = D_4 \cdot \overline{MR} \quad (4)$$

$$LCL = D_3 \cdot \overline{MR} \quad (5)$$

D_4 = valvontakorttien ja estimaattien laskennassa käytettävä vakio

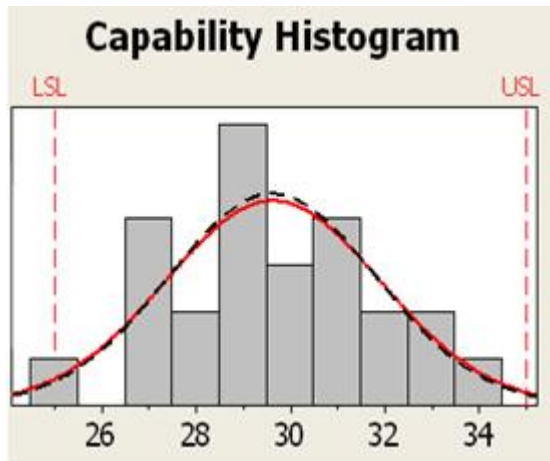
D_3 = valvontakorttien ja estimaattien laskennassa käytettävä vakio (Liite 2).

Kun liitteen 2 taulukosta haetaan D_4 - ja D_3 -lukuja, käytetään peräkkäisten mittausten vaihteluvälin näyte-erän kokona kahta. (Alwan 2000, s.319, Minitab 15)

2.7 Histogrammit

Eräs yksinkertainen ja helposti ymmärrettävissä oleva datan graafinen esitystapa on histogrammi. Histogrammin ideana on jakaa kerätyt datapisteet sopivan kokoisiksi joukoiksi ja katsoa, kuinka monta datapisteistä osuu kuhunkin joukkoon. Jos datapisteitä on paljon, pelkästä taulukosta on hyvin vaikea nähdä, miten pisteet ovat jakautuneet. Histogrammin avulla voidaan myös arvioida, noudattaako seurattava suure normaalijakaumaa, jos tutkittava pistejoukko on tarpeeksi suuri. (Alwan 2000, s. 32)

Kuvassa 5 nähdään histogrammi, jossa painoväriin viskositeetinmittauksen virtausajat ovat x-akselilla ja y-akseli kertoo kyseisen virtausajan esiintymiskerrat. Kuvassa on merkittynä myös tuotteen spesifikaatorajat sekä Minitab 15 -ohjelman laskema jakauma tuotteen virtausajoista.



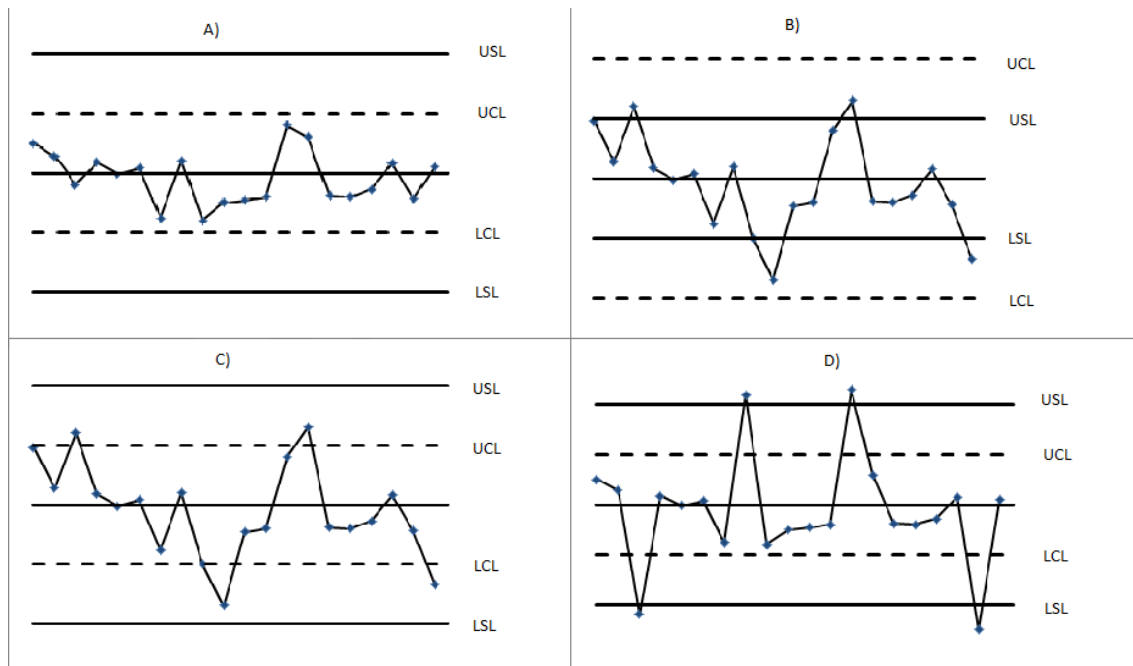
Kuva 5. Prosessin suorituskykyä kuvaava histogrammi.

2.8 Spesifikaatorajat USL ja LSL

USL (*Upper Specification Limit*) ja LSL (*Lower Specification Limit*) ovat tuotteen spesifikaatorajoja, eikä niitä tule sekoittaa valvontarajoihin. USL ja LSL ovat rajoja, jotka ovat asetettu tuotteelle, kun tuote on suunniteltu tuotekehityksessä. Näillä rajoilla pyritään vastaamaan asiakkaan odotuksiin ja vaatimuksiin. Tuotteen spesifikaatorajat edustavat hyväksyttävän tuotteen rajoja, kun valvontarajat edustavat prosessin todellista suorituskykyä. Kuvassa 6 tarkastellaan erilaisia valvontarajoja suhteessa spesifikaatorajoihin ja prosessin suorituskykyyn. Kuvan 6 A- ja B-prosessit ovat hallinnassa, eli pisteet ovat satunnaisesti sijoittuneet keskiviivan molemmin puolin eikä yksikään piste ole valvontarajojen ulkopuolella. Vaikka prosessi olisi hallinnassa, se ei välttämättä tuota spesifikaatorajojen mukaisia tuotteita. A-prosessi tuottaa spesifikaatorajojen mukaisia tuotteita, mutta B-prosessi ei. Sitä miten prosessi suoriutuu suhteessa spesifikaatorajoihin, kutsutaan prosessin kyvykkyudeksi (*capability*). Tässä tapauksessa prosessissa B vaadittaisiin muutoksia menettelytapoihin, jotta sen kyvykkyys paranisi ja voitaisiin tavoittaa sille asetetut spesifikaatio vaatimukset. (Alwan 2000, s. 240)

Kuvan 6 C-prosessi tuottaa asiakkaan näkökulmasta riittävää laatua, mutta prosessi ei ole hallinnassa. Koska prosessi ei ole hallinnassa, se voi pitkällä aikavälillä myös siirtyä tuottamaan spesifikaatorajojen ulkopuolella olevia tuotteita. Prosessi, joka ei ole hallinnassa, on aina selvä signaali ja prosessiin tulisi tehdä parannuksia. D-prosessi on huonoin näistä esimerkeistä. Se ei ole hallinnassa eikä se pysty vastaamaan asiakkaan

odotuksiin. Tämänlaisessa tapauksessa tulisi välittömästi saada prosessi hallintaan, löytämällä ja eliminoimalla vaihtelua aiheuttavat erityiset syyt. (Alwan 2000, s. 241)



Kuva 6. Valvontarajat suhteessa spesifikaatorajoihin. (Alwan 2000, s. 241)

2.9 Prosessin suorituskyky

Prosessin suorituskyvyllä mitataan prosessin kykyä tuottaa tuotteita, jotka ovat spesifikaatorajojen sisällä. Prosessin suorituskyvyn mittaamiseen on kehitetty ns. suorituskykykylukuja. Suorituskykykyluku vertaa prosessista ulostulevia tuotteita tuotteille asetettuihin spesifikaatorajoihin. Jos prosessi on suorituskykyinen, lähes kaikki tuotteet ovat spesifikaatorajojen sisällä. Käytössä on useita prosessin suorituskykyä kuvaavia suorituskykykylukuja. Niistä käytetyin C_p -luku, *Potential Capability Index*, ottaa huomioon pelkästään asetettujen spesifikaatorajojen laajuuden verrattuna prosessin tuotteiden keskihajontaan. Tämä luku kuvaa prosessin lyhytaikaista kyvykkyyttä. C_{pk} -luku, *Performance Capability Index*, ottaa tämän lisäksi huomioon myös spesifikaatorajojen keskittymisen, verrattuna tuotteiden keskihajontaan. Jos C_p ja C_{pk} ovat samoja, on prosessin tavoitearvo sama kuin prosessin keskiarvo. Jos C_p on isompi kuin C_{pk} , ei prosessi ole keskitetty. Suorituskykyluvut C_p ja C_{pk} voidaan laskea vain hallinnassa olevalle prosessille. (Salomäki 1999, s. 175, Montgomery 1997, s. 431, Franze 2011/2012)

C_p - ja C_{pk} -lukuja laskettaessa otetaan huomioon vain alaryhmien sisäiset keskihajonnat. Lukujen C_p ja C_{pk} laskemisessa käytettävä keskihajonta olettaa, että prosessi on normaalitilassa eikä erityisistä syistä johtuvaa vaihtelua ilmene. Jos halutaan selvittää prosessin todellinen suorituskyky, on käytettävä kirjallisuudessa vähemmän esiintyviä toimintakykylukuja P_p ja P_{pk} . Näiden laskennassa Minitab käyttää koko saatavilla olevasta datasta laskettua keskihajontaa. Tässä tapauksessa erityisyyttä voi esiintyä prosessissa. Eri suorituskyky-lukujen kohdalla voidaan puhua myös "*Short term*"- ja "*Long term*" - suorituskyvystä. Lyhytaikainen suorituskyky, C_p , on paremmin prosessia kuvaava, koska se sisältää todennäköisesti vähemmän erityisistä syistä johtuvaa vaihtelua, jolloin yksittäiset virheet näkyvät paremmin. Näitä suorituskykyindeksejä voidaan käyttää vain, jos datapisteiden määrä on tarpeeksi suuri. Yleisesti tarpeeksi suurena lukuna pidetään 50:tä datapistettä. Suorituskykyindeksit myös olettavat, että datapisteet ovat normaalisti jakautuneet. (Salomäki 1999, s. 175, Montgomery 1997, s. 431, Franze 2011/2012)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (6)$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right] \quad (7)$$

USL = ylempi spesifikaatoraja

LSL = alempi spesifikaatoraja

μ = prosessin keskiarvon estimaatti

σ = normaalitilassa toimivan prosessin keskihajonta tai keskihajonnan estimaatti. (Salomäki 1999, s. 175)

Kun tarkastellaan prosessin suorituskykylukuja, täytyy ottaa huomioon toimiala, jota tarkastellaan. Erityisiltä turvallisuuteen tai rakenteiden vahvuuteen liittyviltä prosesseilta voidaan vaatia parempia suorituskykylukuja, kuin prosesseilta, jotka virheen sattuesssa eivät vaaranna turvallisuutta. Suorituskykyluku C_p :lle suositellut miniarvot löytyvät taulukosta 1. (Montgomery 1997, s. 431)

Minitab 15 -ohjelma käyttää suorituskykylukuja laskettaessa prosessin keskihajontana kestihajonnan estimaattia, joka lasketaan kaavan 1 mukaan.

Taulukko 1. Suorituskykyindeksien suositellut minimiarvot. (Montgomery 1997, s. 431)

	Kaksipuolinen spesifikaatoraja	Yksipuolinen spesifikaatoraja
Vanha prosessi	1,33	1,25
Uusi prosessi	1,50	1,45
Turvallisuus, vahvuus tai muuten kriittinen tekijä, vanha prosessi	1,50	1,45
Turvallisuus, vahvuus tai muuten kriittinen tekijä, uusi prosessi	1,67	1,60

Prosessin kyvykkyys eli suorituskyky antaa monia etuja huonon suorituskyvyn omaavaan prosessiin nähden:

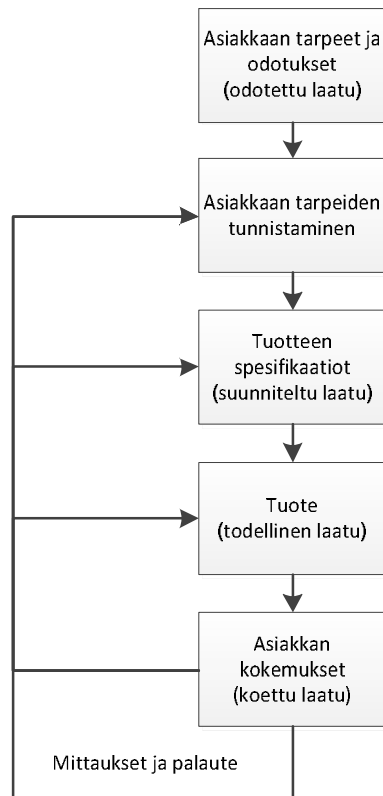
- Tuotteiden välillä on vähemmän vaihtelua ja se vähentää huonolaatuisten tuotteiden valmistamista.
- Tuotteiden laadun varmistamiseksi tarvitsee ottaa vähemmän näytteitä tuotteiden pienemmän vaihtelun vuoksi.
- Tuotteiden tarkkailun aiheuttamat kustannukset pienenevät, koska tiedetään prosessin kyvykkyydestä.
- Saadaan tehtyä prosessin suorituskyvystä yhä tarkempi analyysi, jonka perusteella voidaan tehdä varmempia päätöksiä tuotteiden toleranssien pienentämisen suhteen ja saantoa voidaan kasvattaa.
- Tulee vähemmän virheellisiä tuotteita, joiden korjaamiseen menee vähemmän aikaa ja työn tuottavuus kasvaa. (Griffith 1996, s. 127)

2.10 Six Sigma laatujohtaminen

Six Sigma on tilastotieteeseen perustuva työkalu, jota käytetään laatujohtamiseen. Menetelmän tarkoituksena on saada pienennettyä prosessin tuotteiden hajontaa, jolloin prosessia pystytään helpommin hallitsemaan. Kun prosessin hajonta on riittävän pieni, erityisistä syistä johtuvat virheet erottuvat paremmin. Tilastolliset menetelmät eivät pelkästään ole tärkeitä, kun tähdätään tehokkaan prosessin kehittämiseen. Niiden avulla saadaan yritysten johtajat mukaan tehokkuusajatteluun. General Electric, yksi maailman suurimmista yrityksistä, soveltaa yrityksessään Six Sigma -laatujohtamismenetelmää. General Electric myös edellyttää johtajiltaan monipuolista tilastollisten menetelmien ymmärrystä. Myös monet muut suuret yritykset käyttävät Six Sigma -laatujohtamismenetelmää ja edellyttävät sitä alihankkijoiltaan läpi toimitusketjun. (Alwan 2000, s. 22)

Six Sigma -menetelmä kehitettiin Motorolan toimesta 1980-luvun puolivälissä, koska se menetti markkinaosuuttaan puolijohdevalmistajana, japanilaisille kilpailijoille. Japanilaiset pystyivät tekemään samankaltaisia, laadukkaampia tuotteita halvemmalla. Vastauksena Motorola kehitti kunnianhimoisen suunnitelman pystyä systemaattisesti kehittämään prosesseja, jotka olisivat käytännössä virheettömiä. Six Sigma -nimitys tulee normaalijakaumasta. 99,999966 % normaalisti jakautuneista satunnaismuuttujista on kuuden keskihajonnan kerrannaisen sisällä keskiarvosta. Tämä tarkoittaa käytännössä, että miljoonasta tehdystä tuotteesta 3,4 ei täytä laatuvaatimuksia. (Alwan 2000, s. 575)

Six Sigma -laatujohtaminen on asiakaslähtöistä laatujohtamista. Asiakkaan odotukset ja tarpeet otetaan huomioon suunnittelussa, tuotannossa ja toimituksessa. Asiakkaan todellisia tarpeita ja odotuksia laadun suhteen voidaan kutsua odotetuksi laaduksi. Odotettu laatu on sitä, mitä asiakas haluaa saada tuotteelta. Valmistaja ottaa tuotannossa ja toimituksessa huomioon nämä tarpeet ja odotukset. Todellinen laatu on prosessista ulostuleva laatu. Käytännössä todellinen laatu voi olla erilaista kuin odotettu laatu, jos informaatio ei kulje eri osastojen välillä tarpeeksi hyvin. Kuva 7 esittää asiakaslähtöisen laadun parantamisen etenemisprosessia. (Evans 2011, s. 215)



Kuva 7. Asiakslähtöisen laadun parantamisen etenemisprosessi. (Evans 2011, s. 215)

2.11 Minitab

Minitab on kohtuullisen helppokäyttöinen ja tehokas tilasto-ohjelma, jota useat merkittävät yritykset käyttävät normaalitoiminnassaan. Se on hyväksytty ja käytössä yli 2000 yliopistossa. Minitab-tilasto-ohjelman omistaa Minitab Inc. Six Sigma -laatujohtamismenetelmää soveltavat yritykset käyttävät analyysiseissään usein Minitab-ohjelmaa. (Alwan 2000, s. VIII)

3 Laadunvalvonta

Ennen laadunvalvonnan aloittamista on tärkeää miettiä, miten tietoa kerätään ja mitä kerätylle tiedolle tehdään. Tiedon keräämisellä tulisi olla selvä tavoite. Laadunvalvon-
nassa tietojen keräämisen syyt ovat

- tuotantoprosessin hallinta ja tarkkailu
- tuotteiden ominaisuuksien analysointi
- tarkastus. (Kume 1998, s. 12)

Kun tiedot on kerätty asianmukaisesti, tulee niitä analysoida. Analysoinnissa väärään
johtopäätökseen voidaan kuitenkin ajautua myös, jos itse mittausmenetelmä on epä-
luotettava. Mittausmenetelmän epäluotettavuus voi johtua

- ihmisestä
- mittalaitteesta
- olosuhteista. (Kume 1998, s. 13)

3.1 Mittaaminen

Alun perin metrologia eli mittaamisen tiede tutki ainoastaan mitattavien objektien fysi-
kaalisia ominaisuuksia. Nykyään metrologia määrittellään laajasti käsittämään ihmisiä,
laitteita, tiloja, menetelmiä ja ohjeistuksia, joilla voidaan todeta mittaustulosten oikeel-
lisuus ja soveltuvuus. Mittaaminen on tärkeä osa yritysten kilpailukykyä. (Evans 2011,
s. 638)

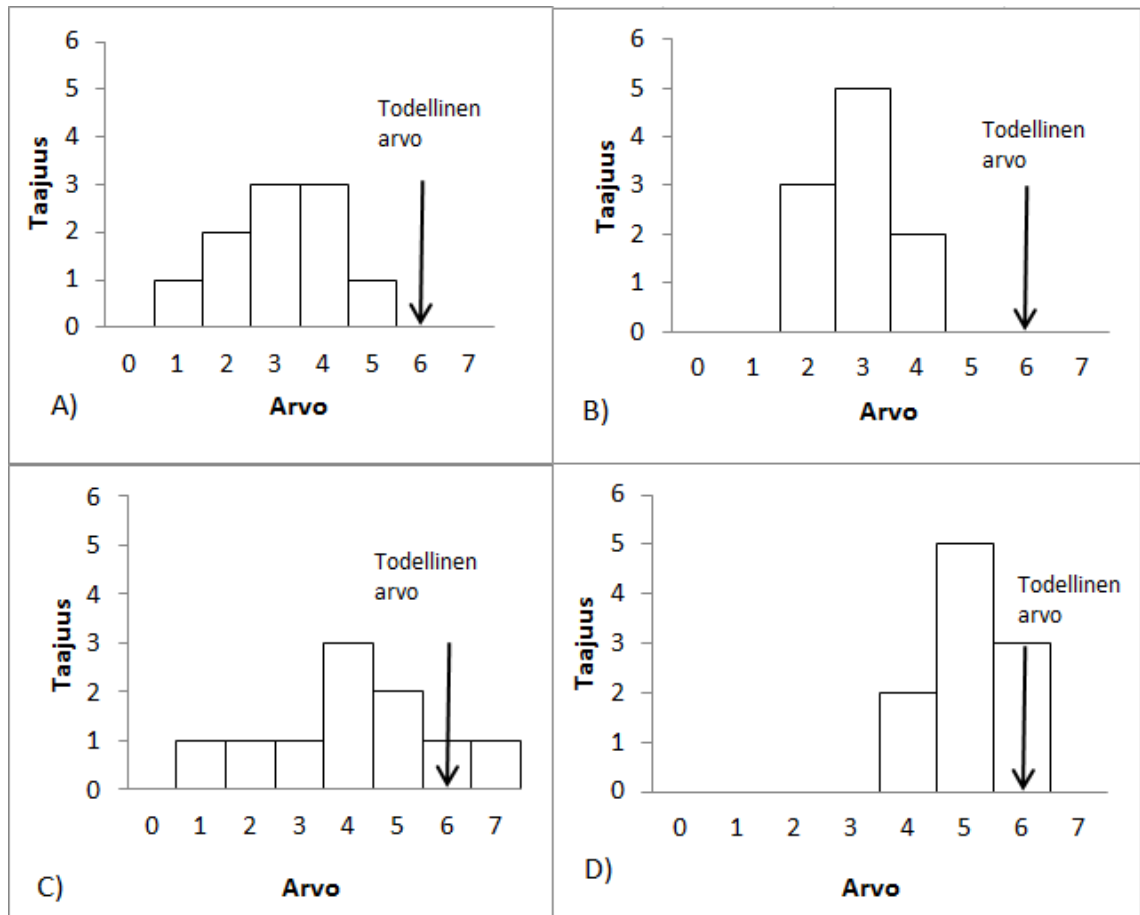
Prosessin vaihtelua selvitetään mittaamalla. Ongelmana on, että myös itse mittaaminen
on prosessi, joka sisältää virhettä. Virhe, joka havaitaan prosessia mittaamalla, sisältää
aina myös itse mittausprosessin vaihtelun. Mitä parempi on mittausprosessi, sitä pa-
rempi kuva saadaan mitattavasta prosessista. (Salomäki 1999, s. 117–119)

Jotta tuotteen ominaisuuksia voidaan arvioida tarkasti, on mittausmenetelmien oltava
luotettavia. Tuotteiden ominaisuuksia mitattaessa turvaudutaan yleensä sekä ihmisten
aisteihin ja jonkin mittalaitteen tai menetelmän antamaan informaatioon tuotteiden
ominaisuuksista. (Evans 2011, s. 637)

Nykypäivänä tavallisimmin käytetyt mittausmenetelmät jakautuvat kahteen eri luokkaan: matalan teknologian menetelmät ja korkean teknologian menetelmät. Matalan teknologian menetelmät ovat olleet käytössä jo pitkään, ja ne ovat tavallisesti mekaanisia. Korkean teknologian menetelmät kuvaavat laitteita, jotka hyödyntävät esimerkiksi elektroniikkaa, mikroprosessoreita, lasereita tai edistynyttä optiikkaa. (Evans 2011, s. 637)

3.2 Mittauksen oikeellisuus ja toistotarkkuus

Mittauksen oikeellisuus (*Accuracy*) määritellään mittauskohteen todellisen arvon ja mitatun arvon erotukseksi. Oikeellisuuden puute kertoo mittauksessa olevasta systemaattisesta virheestä, joka voi johtua huonosta kalibroinnista, mittalaitteen kulumisesta tai väärästä mittaustavasta. Mittauksen täsmällisyys, josta käytetään myös nimitystä toistotarkkuus (*Precision*), määritellään toistettavien mittausten välisenä erotuksen. Toistotarkkuus kertoo siis toistettavien mittausten hajonnan. Mittausmenetelmällä, jolla on pieni hajonta, on hyvä toistotarkkuus. Huono toistotarkkuus kertoo mittausmenetelmän sisältämästä satunnaisvaihtelusta. Satunnaisvaihtelu voi johtua menetelmän huonosta suunnittelusta tai huollon puutteesta. Kuvassa 8 on esitetty sisäisen ja ulkoisen tarkkuuden erot. (Evans 2011, s. 638–639)



Kuva 8. Mittaamisen oikeellisuus ja toistotarkkuus. (Evans 2011, s. 638–639)

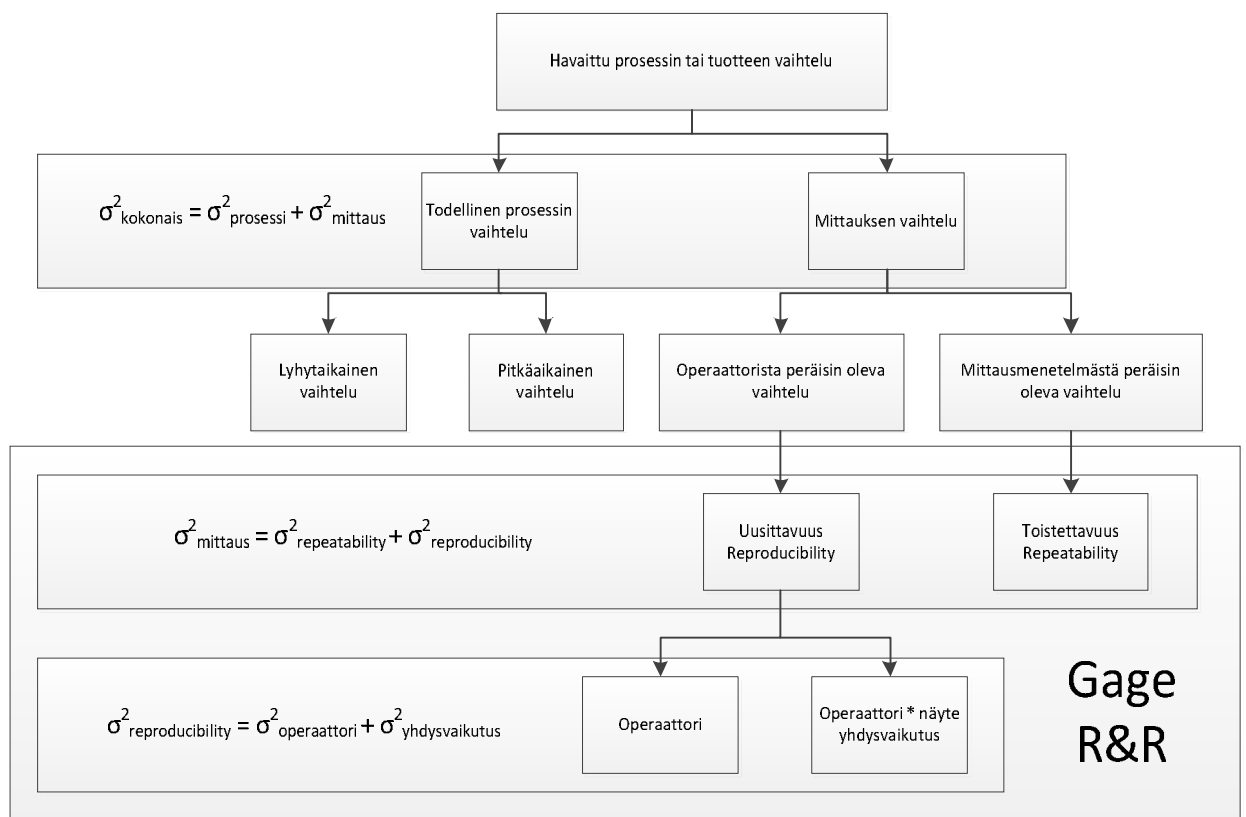
A-mittaus ei ole oikeellinen eikä täsmällinen. B on täsmällisempi kuin A, mutta ei oikeellinen. C on oikeellisempi kuin A, mutta ei niin täsmällinen. D on oikeellisempi kuin A ja B sekä täsmällisempi kuin C. (Evans 2011, s. 638–639)

3.3 Virheet

Huolimatta tilastollisten menetelmien luotettavuudesta on mahdollista, että tuloksia tulkitaan väärin. I-lajin virhe tehdään, jos laadunvalvonta hylkää erän, joka olisi todellisuudessa ollut spesifikaatorajojen sisällä. Myös jos prosessia säädetään, vaikka kyseessä olisi ulkoinen häiriö, puhutaan I-lajin virheestä. Tätä kutsutaan ylioijaukseksi. Ylioijauksesta seuraa turhia kustannuksia. II-lajin virhe aiheutuu, jos muutoksiin ei reagoida tai jos laadunvalvonta hyväksyy erän, joka ei täytä vaatimuksia. Alioijauksesta johtuvat virheet aiheuttavat asiakastyytymättömyyttä ja prosessissa olevan ongelman huomaamatonta kasvua. Molempia virheitä ei pystytä minimoimaan samanaikaisesti. (Salomäki 1999, s. 174)

3.4 MSA

Jotta edellisen kaltaisilta virheiltä vältyttäisiin, olisi tärkeä tietää, mikä on laadunvalvonnassa suoritettavien testien osuus kokonaisvirheeseen. MSA (*Measurement System Analysis*) eli mittausjärjestelmän analysointi tarjoaa tähän menetelmät. Käytännössä mittausjärjestelmän luotettavuus olisi hyvä tietää, ennen kuin tehdään arvioita itse prosessin kyvykkyydestä. Mittausjärjestelmän tutkimus kertoo prosentteina, kuinka paljon on mittausvirheen osuus kokonaisvaihtelusta. MSA:n avulla voidaan myös verrata kahta tai useampaa mittausmenetelmää keskenään tai kahta tai useampaa operaattoria keskenään. MSA:sta saatujen tietojen perusteella voidaan selvittää, tarvitaanko mittausmenetelmiin tai mittauksen suorittamiseen parannuksia. (Karjalainen 2002, s. 142) Kuvassa 9 nähdään mittauksen vaikutus prosessin vaihteluun.



Kuva 9. Mittausmenetelmän vaikutus havaittuun prosessin vaihteluun. (Karjalainen 2002, s. 142, Alwan 2000, s. 612)

3.5 Gage R&R

Termi Gage R&R (tai *Gauge R&R, Repeatability & Reproducibility*) tarkoittaa mittausjärjestelmän aiheuttaman virheen selvittämistä. Gage R&R -tutkimuksen päätavoitteena on selvittää mittausmenetelmän aiheuttama vaihtelu, jotta se voidaan erottaa tuotannosta johtuvasta vaihtelusta. Tutkimuksen avulla voidaan arvioida mittausmenetelmän suorituskykyä ja selvittää, mikä osa kokonaisvaihtelusta on peräisin mittauksesta ja mikä tuotannosta, kuten nähdään kuvassa 9. Siten voidaan myös selvittää, mikä todellisuudessa on prosessin suorituskyky, ilman mittauksen aiheuttamaa vaihtelua. (Alwan 2000, s. 611)

Kun halutaan saada mahdollisimman tarkka estimaatti mittausjärjestelmän virheelle, tarvitaan tietoa mahdollisista virhelähteistä. Toistettavuus (*Repeatability*) on vaihtelu, jota ilmenee, kun sama operaattori mittaa samaa näytettä useita kertoja. Tyypillisesti huono toistettavuus johtuu itse mittausmenetelmästä tai mittausjärjestelystä. Uusittavuus (*Reproducibility*) on vaihtelu, jota ilmenee, kun eri operaattorit mittaavat samaa näytettä. Huono uusittavuus johtuu yleensä koulutuksen tai mittausohjeiden puutteesta. Näiden vaihteluiden summa on mittausjärjestelmän kokonaisvaihtelu. (Alwan 2000, s. 612)

Gage R&R -tutkimuksen suunnitteluvaiheessa päätetään tutkimusparametreista: Kuinka monta operaattoria osallistuu tutkimukseen? Kuinka monta näytettä tutkitaan? Tekevätkö operaattorit toistoja ja kuinka monta? Kun tutkimukseen valitaan useampi kuin yksi operaattori ja operaattorit tekevät ainakin kaksi toistoa kustakin näytteestä, saadaan tietoa sekä uusittavuudesta että toistettavuudesta. Näin voidaan varsinaisesti puhua Gage R&R -tutkimuksesta. Kun näytteet tulevat prosessista ja useammasta tuotantoerästä, voidaan tutkimuksen perusteella myös selvittää tuotannon vaihtelu. (Alwan 2000, s. 612)

Gage R&R -tutkimus perustuu varianssikomponenttien laskemiseen. Mittauksien tilastollinen analyysi voidaan tehdä kahdella eri menetelmällä, varianssianalyysi (ANOVA) -menetelmällä tai vaihteluvälimenetelmällä (*Range method*). ANOVA on yleinen menetelmä mahdollisten virhelähteiden etsimiseen. Gage R&R -tutkimuksessa oletetaan, että tutkimukseen valittavat operaattorit ja näytteet ovat osa suuremmasta määrästä operaattoreita ja näytteitä eli tekijät ovat satunnaisia. Oletuksen tuloksena sopiva ANOVA-

malli on kahden faktorin ANOVA toistoin, jossa faktoreina operaattorit ja näytteet. Kun lasketaan varianssikomponentteja, on tiedettävä faktorien lukumäärä ja niiden keskinäiset suhteet. Menetelmä on tarkemmin esitetty esimerkiksi Stephen B. Vardemanin kirjassa *Statistics for Engineering Problem Solving*, 1994. (Alwan 2000, s. 612)

Vaihteluvälimenetelmä on menetelmä, joka perustuu yksinkertaisiin vaihteluväleihin perustuviin laskuihin. Yleisin heikkous vaihteluvälimenetelmässä on sen varianssianalyysimenetelmää vähemmän tehokas tapa käyttää saatua dataa. Vaihteluvälimenetelmässä otetaan huomioon pelkästään mittauspisteiden suurimmat ja pienimmät arvot, kun varianssianalyysimenetelmä käyttää koko datapisteiden joukkoa. (Alwan 2000, s. 612)

Molemmat menetelmät antavat useimmissa tapauksissa hyvin samansuuruisia tuloksia. On kuitenkin yksi tapaus, minkä vain varianssianalyysimenetelmä tunnistaa. ANOVA-tulosteessa yhtenä komponenttina esiintyy *interaction effect* eli operaattorin ja näytteen yhdysvaikutuskomponentti. Kyseinen komponentti ilmentää vaihtelua, joka tulee aina tietystä operaattori-näyteparista. Näin ollen eri kombinaatioparit tuovat oman teki-jänsä vaihteluun. Vaihteluvälimenetelmällä ei saada tämän tyyppistä virhettä esille, ja tällä menetelmällä saatu mittaussysteemin kokonaisvirheen estimaatti voi olla liian pieni. (Alwan 2000, s. 613)

4 Pakkauspainovärit

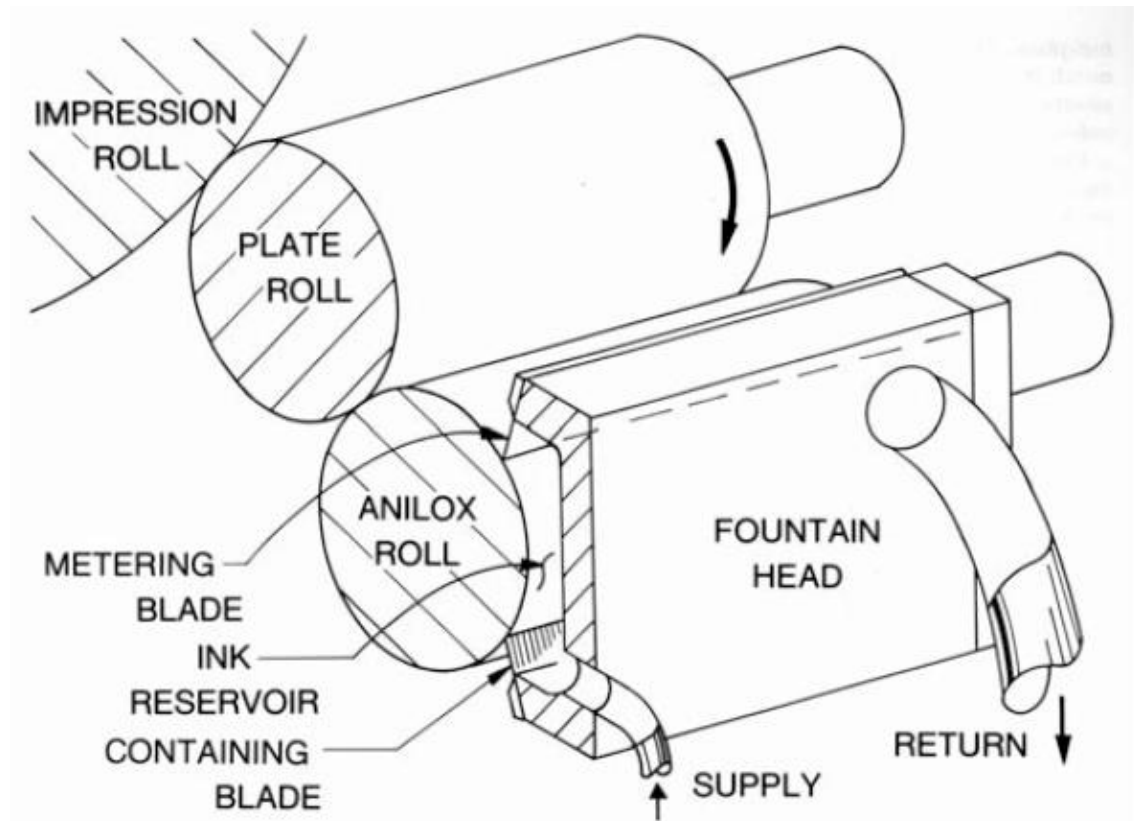
Pakkauspainovärit ovat värjättyjä pigmentoituja nestemäisiä tai pastamaisia värejä, jotka siirtävät halutun kuvan painolaatalta painettavalle pinnalle. Niitä käytetään pääasiallisesti välittämään jokin kuva tai teksti tai antamaan jonkinlainen koristeellinen tehosteominaisuus ja informatiivinen teksti (esim. tuoteseloste tai EAN-koodi) painetulle materiaalille. Pakkauspainovärejä voidaan käyttää monilla eri materiaaleilla papereilla, muovifilmeillä ja pahveilla. Lakat ja primerit ovat värittömiä pakkauspainovärejä. Lakkoja voidaan käyttää, kun halutaan antaa kiiltoa tai suojaavia ominaisuuksia jo painatetuille materiaaleille. Primereilla voidaan parantaa painettavan filmin ominaisuuksia, jotta itse painoväri istuu paremmin painettavalle materiaalille. Kaikille materiaaleille ei ole välttämättä mahdollista painaa ilman primeria. Painetun filmin paksuus on yleensä n. 1 – 3 µm, riippuen painomenetelmästä. Pakkauspainovärejä voidaan käyttää useilla eri menetelmillä, ja tässä työssä keskitytään fleksopainoväreihin. (Leach 1993, s. 5)

4.1 Fleksopainovärit ja fleksopainatus

Fleksopainossa käytetyt pakkauspainovärit ovat nestemäisiä. Nestemäisyys on tärkeää painoprosessin luonteen takia. Aniloxtelan kuppien on täytyttävä musteella nopeasti. (Leach 1993, s. 5)

Fleksopainatuksen etuna on, että sillä voidaan painattaa erilaisille materiaaleille. Fleksopainoon soveltuvat myös erilaiset painovärit. Fleksopaino on kohtuullisen yksinkertainen menetelmä. Fleksopainatuksella on alhaiset kustannukset ja pieni energiantarve. (Viluksela 2005)

Kuvassa 10 on esitettyä perusfleksopainoyksikkö. Värin syöttäminen aniloxtelaan tapahtuu ulkoisesta värisäiliöstä. Painoyksiköitä on myös muunlaisia. Joissain menetelmissä aniloxtela nostaa värin suoraan värikaukalosta ja raakeliterä poistaa ylimääräisen värin aniloxtelasta. (Viluksela 2005)



Kuva 10. Flexopainoyksikkö. (Viluksela 2005)

Flexopainolla voidaan painaa monille erilaisille pinnoille, joten menetelmää voidaan käyttää painettaessa useita erilaisia tuotteita, joista tärkeimpiä ovat

- aaltopahvipakkaukset
- joustopakkaukset (paperi + muovit)
- muovikalvot
- säkit, pussit, kassit (paperi + muovi)
- kertakäyttötuotteet.

Myös esimerkiksi kirjoja tai sanomalehtiä voidaan painaa flexopainomenetelmällä. (Viluksela 2005)

4.2 Painovärien koostumus

Painovärit koostuvat erilaisista komponenteista, jotka vaikuttavat painovärien painatusominaisuuksiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Painovärit ovat kiinteiden ja neste-mäisten aineiden muodostama suspensio. (Kemianteollisuus 2003, s. 178)

Pigmentit tai väriaineet antavat sävyn painovärille. Pigmentit ovat liukenemattomia ja kiteisiä aineita, jotka jauhetaan sideaineliuokseen. Niillä saadaan aikaan painojäljen visuaalinen vaikutelma eli väri ja valonkesto. Väriaineet liukenevat liuottimiin. Pigmentit ja väriaineet ovat kallein osa painoväriä. (Kemianteollisuus 2003, s. 179)

Perussideaine toimii pigmentin sidosaineena ja vaikuttaa painovärin tärkeimpiin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Sideaine pitää painovärin koossa painatusprosessissa. Sideaine määrää painovärissä pääasiassa käytettävät liuottimet. Perussideaine on värireseptin "selkäranka". (Sun Chemical 2011)

Modifioiva sideaine optimoi painovärin ominaisuuksia ja painettavuutta. Se vaikuttaa painovärin tarttuvuuteen. Modifioivan sideaineen valintaan vaikuttaa värissä käytettävä perussideaine. Modifioivan sideaineen avulla painoväri saadaan muunneltua sopivaksi eri painomateriaaleille. Modifioiva sideaine on painovärien teknologinen osa-alue. (Sun Chemical 2011)

Liutin liuottaa sideaineen ja mahdollistaa sideaineen ja pigmentin siirtyvyyden painomateriaalille. Sillä voidaan säädellä painovärin viskositeettia. Liutin vaikuttaa painatukseen laatuun ja toimii värisysteemin kuljettajana. Liutin vaikuttaa myös painovärin hajutasoon. Liuottimella voidaan nopeuttaa tai hidastaa painovärin kuivumista. Liuotin-pohjaisissa painoväreissä liuottimina käytetään orgaanisia liuottimia. Vesipohjaisissa painoväreissä liuottimina käytetään veden lisäksi myös orgaanisia liuottimia. (Kemianteollisuus 2003, s. 179)

Pehmitin tekee painoväristä muodostuvan värifilmin joustavaksi. Se myös edesauttaa painovärin filminmuodostuskykyä. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa painovärien erityisominaisuuksiin, esimerkiksi kitkaan ja naarmutuksen keston. Vesipohjaisilla painoväreillä käytetään lisäaineita myös pH:n säätöön. (Sun Chemical 2011)

Painovärin viskositeettiin vaikuttavat pääasiassa perussideaine ja siitä pigmentin kanssa valmistettava pigmenttipasta sekä liuottimet. Vesipohjaisilla tuotteilla pH:hon vaikuttavat pigmenttipastan pH, sideainevernissan pH ja pH:n säätöön käytettävät lisäaineet. (Kemianteollisuus 2003, s. 179, Sun Chemical 2011)

4.3 Painovärien valmistusprosessi

Painovärien valmistus lähtee pigmenttipastan valmistuksesta. Perussideaine liuotetaan liuottimeen, jolloin saadaan aikaiseksi vernissa. Pigmentti sekoitetaan tähän vernissaan tehokkaalla sekoittajalla, kunnes pigmenttihiukkaset ovat kostuneet. Tämän jälkeen saatu esidispersio ajetaan helmimylyssä tai kolmoisvalssikoneessa. Jauhatuksen avulla suspensiosta pyritään saamaan mahdollisimman homogeeninen. (Kemianteollisuus 2003, s. 179)

Toisessa vaiheessa painoväriin valmistetaan vernissa, johon sekoitetaan modifioiva sideaine, liuotin, pehmitin ja lisäaineet. Näin saatu vernissa sekoitetaan pigmenttipastan kanssa, jolloin saadaan valmista painoväriä. (Sun Chemical 2011)

5 Sun Chemical Oy

5.1 Painovärien valmistus Espoon tehtaalla

Painovärien valmistus Espoossa tähtää valmiiden tuotteiden lähettämiseen asiakkaille tai puolivalmisteiden tekemiseen yrityksen muille tehtailla. Valmistukseen käytetyt raaka-aineet tulevat raaka-ainetoimittajilta tai yrityksen muilta tehtailta. Oman haasteen tuotteiden valmistukseen tuo suuri valmistettavien tuotenimikkeiden määrä. Tarkasteltavalla ajanjaksolla tehtaassa valmistettiin 612 eri tuotetta. Valmistuksessa käytettävien raaka-aineiden määrä on useita satoja. Jo nämä yksistään aiheuttavat omat haasteensa painovärien valmistusprosessille. Koska tuotenimikkeitä on paljon, on tilastollisen prosessin ohjaamisen soveltaminen haasteellista. Useita tuotteita valmistetaan vain muutaman kerran vuodessa, joten tilastollisiin menetelmiin käytettävät otoskoot ovat liian pieniä. Toinen merkittävä tekijä on lämpötila. Tehtaan lämpötila kesän ja talven välillä vaihtelee, mikä vaikuttaa raaka-aineiden ja tuotteiden fysikaalisiin ominaisuuksiin.

5.2 Painovärien laadunvalvonta

Kun tuotteeseen on lisätty kaikki tarvittavat raaka-aineet ja sitä on sekoitettu riittävä aika, tuotannosta tuodaan näyte laboratorioon laadunvalvontaan. Näyte pyritään ottamaan sekoituksen aikana, jotta näyte edustaisi mahdollisimman hyvin koko erää.

Laadunvalvonnassa tuotteelle tehdään tuotteen kehitysvaiheessa määritellyt testit. Laadunvalvontatesteihin kuuluu sekä fysikaalisia ominaisuuksia mittaavia testejä että koevedoksista määritettyjä aistinvaraisia testejä. Yleisin testi, joka suoritetaan, on viskositeetin mittaaminen. Kun tuotekehitys valmistaa koe-erän uudesta tai muutetusta tuotteesta, sille kirjataan spesifikaatorajat. Kuitenkin kun tuotanto valmistaa tuotteen reseptin mukaan, nämä rajat voivat ylittyä, koska olosuhteet prosessissa ovat eri kuin laboratoriossa. Näiden säätäminen kohdalleen vaatisi useampia valmistuseriä tuotteesta. Monia tuotteita tehdään vain muutama erä tai liian harvoin, jotta tuote valmistusprosessi saataisiin vastaamaan odotettuja arvoja.

5.2.1 Perusteet

Jokainen testi, joka tuotteelle suoritetaan, kuluttaa aikaa. Jokaisesta suoritetusta testistä odotetaan saatavaksi jokin tieto tuotteen ominaisuuksista tai puutteista. Jos tuote ei läpäise testiä, siihen voidaan tehdä korjauksia. Korjausten avulla tuote saadaan vastaamaan haluttua laatua. Korjausten tekeminen kuluttaa aikaa. Jos tuotteeseen tulee korjaus, se viedään takaisin tuotantoon. Tämän ajan kyseinen laite ja työntekijä on jälleen sidottu kyseisen tuotteen tekemiseen. Korjausten jälkeen tuotteesta tulee uusi näyte laadunvalvontaan. Jos kaikki laadunvalvontatestit ovat hyväksytyjä, tuote voidaan pakata ja lähettää asiakkaalle.

5.2.2 Mittausmenetelmät

Mittausmenetelmä riippuu testistä ja siitä, minkälaista tietoa mittauksesta halutaan saada. Viskositeetin mittaukseen käytetään yleisimmin DIN4-viskokuppia. Tuotteelle mitataan virtausaika. Virtausaika on aika, joka kuluu siitä hetkestä, kun testattava tuote alkaa virrata viskokupin aukosta, siihen hetkeen asti, kunnes virtaan tulee katkos viskokupin aukon kohdalla. Virtausaika merkitään kokonaisina sekunteina, mikä aiheuttaa ongelmia tilastollisissa analyyseissä. Koska virtausajat ovat yleensä muutaman sekunnin sisällä, mutta ne merkitään kokonaisina sekunteina, virtausajat eivät yleensä noudata normaalijakaumaa. Kuvassa 11 nähdään viskositeetin mittausmenetelmä.



Kuva 11. Viskositeetin mittausjärjestely.

On huomioitava, että virtausajat voidaan määrittellä vain sellaisille tuotteille, joiden virtausominaisuudet ovat Newtonin lain mukaiset. (Sun Chemical Oy, laadunvalvonta 2010)

Virtausaika mitataan käyttäen sekuntikelloa. Tulokset kirjataan kokonaisiksi sekunneiksi pyöristettyinä. pH:n mittaamiseen käytetään sähkönjohtavuuteen perustuvaa pH-mittaria. pH-mittari kalibroidaan standardiliuoksilla joka aamu, ja sen elektrodi huuhdellaan jokaisen mittauksen jälkeen.

5.2.3 Käytäntö

Kun näyte saapuu laboratorioon, se täytyy temperoida mittauslämpötilaan. Sekä viskositeetin mittauksessa että pH:n mittauksessa käytetään 25 °C:n lämpötilaa. Tuotannossa voi sekoituksesta tai aineiden liukenemisestä johtuen tuotteen lämpötila nousta jopa 50 °C:seen. Lämpötilan säätö kuluttaa paljon aikaa ja voi aiheuttaa viivästymistä laadunvalvontaan. Lämpötila vaikuttaa tuotteen viskositeettiin ja pH:hon. Jos lämpötilaa ei säädetä tarkasti haluttuun, voi se aiheuttaa virhettä viskositeetin ja pH:n mittausarvoiksi.

hin. Lämpötilan hallinnan, johon kuuluvat näytteen lämpötila ja mittauslaitteiden lämpötila, arvellaan olevan suurin virhelähde viskositeetin mittauksessa.

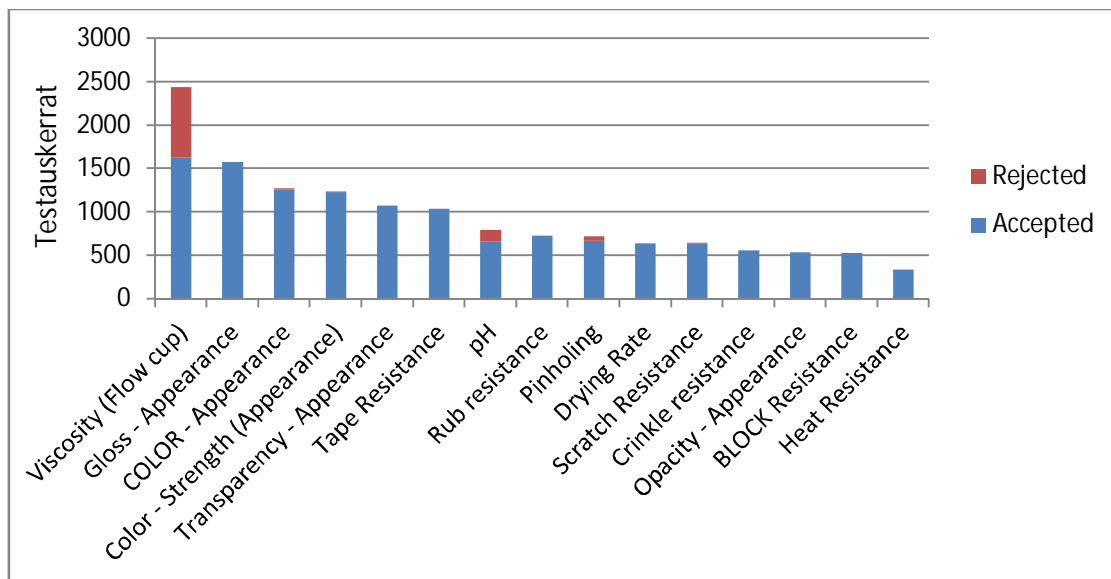
5.2.4 Laadunvalvonnan dokumentointi

Sun Chemical Oy:ssä on käytössä SAP ERP (Enterprise Resource Planning) -järjestelmä. Tämän toiminnanohjausjärjestelmän avulla voidaan hallita tilauksia, tuotantoa, varastoa, toimituksia ja raaka-aineita. Kaikki laadunvalvonnassa tehdyt testit ja niiden tulokset kirjataan järjestelmään. Tämän lisäksi jokaisella tuotteella on oma kansio, johon dokumentoidaan siitä tehdyt testit ja testivedokset.

6 Laadunvalvontarajojen tarkastelu

6.1 Datun keruu

Kaikki laadunvalvonnassa saadut arvot merkitään SAP-toiminnanohjausjärjestelmään laadunvalvonnan yhteydessä. SAP:iin merkitään kaikki mahdolliset korjaukset ja jokaisen korjauksen jälkeen muuttuneet arvot sekä viimeiset lopulliset hyväksymisarvot. SAP:sta voidaan siirtää tietoa Exceeliin, jolloin tiedon käsittely ja analysointi helpottuu. SAP:sta otettiin tietoa laadunvalvonnasta aikaväliltä 1.1.2011 - 9.6.2011. Kyseisenä aikana tehtiin laadunvalvonnassa 14787 laadunvalvontatestiä. Näistä 10659 tehtiin ensimmäistä kertaa laadunvalvontaan tuleville *first in* -näytteille. Kuvassa 12 nähdään eri testien suorituskerrat. Tässä kuvassa on mukana kaikki suoritettut testit, ei pelkästään ensimmäisen kerran laadunvalvontaan tuleville tuotteille suoritettut testit. Kuvasta nähdään, että viskositeetin mittaus on useimmiten suoritettava testi ja siinä on myös eniten hylkäämisiä. Toinen testi, missä tulee hylkääksiä, on pH:n mittaus.



Kuva 12. Hyväksymiset ja hylkäämiset eroteltuna tarkastusmenetelmien mukaan.

6.2 Viskositeetin testaus

Viskositeetin mittaus on siis laadunvalvonnassa useimmin suoritettava toimenpide. Se tehdään lähes kaikille vesi- ja liuotin-flexo-tuotteille. SAP:sta otettiin tietoa laadunvalvonnasta aikaväliltä 1.1.2011 - 9.6.2011. Kyseisenä aikana tehtiin laadunvalvonnassa

first in -viskositeetin mittaus 1896 tuote-erälle, joista 1225 näytettä oli spesifikaatio-rajien puitteissa (*Accepted*) ja 671 oli rajojen ulkopuolella (*Rejected*). Taulukossa 1 on esitetty nämä tulokset. Kaikki rajoista poikkeamiset eivät välttämättä vaatineet korjauksia. Ne voitiin hyväksyä erikoisluvalla, mikäli se oli sovittu asiakkaan kanssa. Myös tilanteessa, jossa ominaisuuden korjaaminen olisi kohtuuttoman vaikeaa ja korjaamisen hyöty tuotteen ominaisuuksille pieni, ne voitiin hyväksyä erikoisluvalla.

Taulukko 1. 1.1–9.6.2011 tehtyjen tuotteiden *first in* -viskositeetin mittauksen hyväksymiset (A) ja hylkäämiset (R).

	A	R	Total
Total	1225	671	1896
%	65 %	35 %	

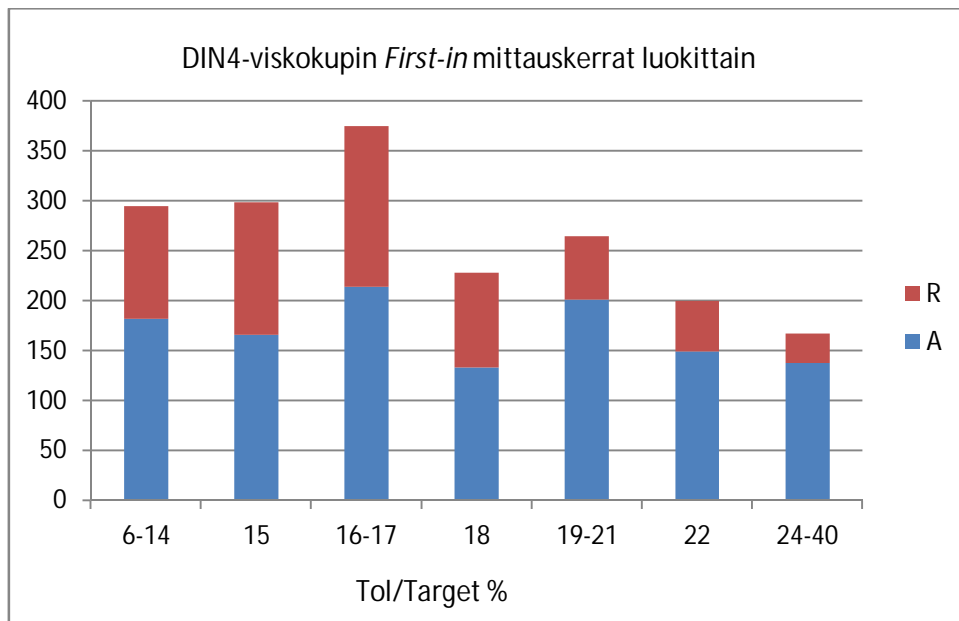
Jotta saataisiin kuva viskositeetin laadunvalvonnan nykytilasta, on tärkeä tutkia nykyisiä rajoja ja niiden toteutumismääriä. Koska viskositeetin mittauksessa käytetään virtausaikaa (s) ja se voi eri tuotteilla vaihdella suuresti, on otettava käyttöön suhteellinen toleranssi. Suhteellinen toleranssi saadaan, kun hyväksymisalue (USL-LSL) jaetaan tavoitearvolla (Target). Jotta tarkastelu olisi helpommin suoritettavissa, jaetaan eri suhteellisen toleranssin omaavat tuotteet luokkiin, joiden toteutumiskerrat ovat lähes samansuuruiset. Taulukossa 2 on esitetty toteutuneet luokat ja niiden hyväksymiset ja hylkäämiset.

Taulukko 2. Eri tuotteet jaettuna toleranssiluokittain.

Tolerance / Target - %	Accepted	A -%	Rejected	R -%	Total
6-14	182	62 %	113	38 %	295
15	166	56 %	133	44 %	299
16-17	214	57 %	161	43 %	375
18	133	58 %	95	42 %	228
19-21	201	76 %	64	24 %	265
22	149	75 %	51	26 %	200
24-40	138	83 %	29	17 %	167

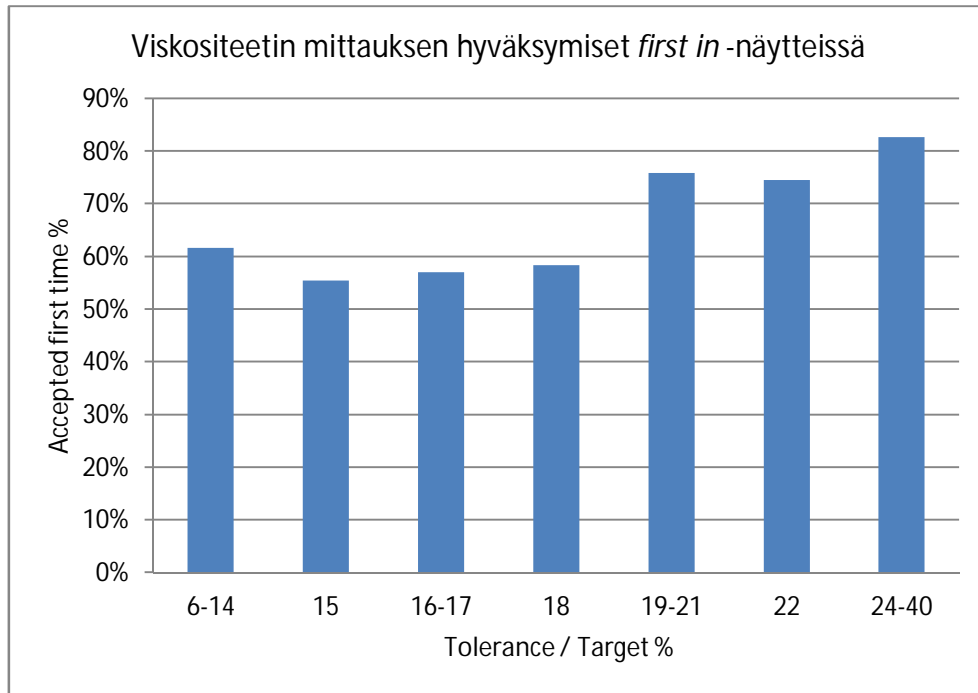
Luokkien tarkoituksena on kuvata, kuinka paljon toleranssialueen kasvu vaikuttaa tuotteen todennäköisyyteen tulla hyväksytyksi laadunvalvonnassa. Lähtökohtaisesti, mitä suurempi on suhteellinen toleranssi, sitä todennäköisemmin tuote hyväksytään. Luokittamisen tarkoituksena on myös havainnollistaa, että liian tiukat spesifikaatioajat aiheut-

tavat tuotteiden korjaamista. Kuvassa 13 on luokkien toteutumiskerrat esitettynä graafisesti.



Kuva 13. Viskositeetin mittauskerrat toleranssiluokittain.

Jotta saataisiin parempi kuva tuotteen hylkäämis- ja hyväksymismääristä kullakin suhteellisella toleranssilla, on sitä parempi tarkastella kuvaajasta, jossa kullekin ryhmälle tehdyt mittaukset on laitettu suhteelliseen kuvaajaan. Kuvassa 14 nähdään, kuinka paljon suhteellinen toleranssi vaikuttaa tuotteiden hyväksymisiin *first in* -näytteissä.



Kuva 14. Tuotteiden hyväksymiset *first in* -näytteissä toleranssiluokittain.

Aikavälillä 1.1. – 9.6.2011 oli tehtaassa tehty 612:ta erilaista tuotetta. Koska kaikkien tuotteiden käsittely olisi tässä työssä ollut liian suuritöistä, keskityttiin tarkastelemaan tuotteita, joiden korjaamisesta olisi suurin ajallinen hyöty. Useiden tuotteiden kohdalla tilastollista laadunohjausta vaikeuttaa myös, että niitä tehdään yksi tai kaksi erää vuodessa. Näin pieniin näytemääriin ei välttämättä ole tarkoituksenmukaista soveltaa tilastollista laadunohjausta, koska luotettavaa tilastoa ei voi rakentaa. Kerätystä materiaalista valittiin 54 tuotetta, mitä oli tehty useimmin ajanjakson aikana tai missä oli selvästi enemmän hylkäyksiä kuin hyväksymisiä. Nämä 54 tuotetta käsitti seurantajaksolla 575 *first in* -näytettä, joista 250 näytteen viskositeetti oli rajojen ulkopuolella. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Tarkasteluun valittujen tuotteiden keskimääräinen Tol/Target-% oli 19 % ja niiden hyväksymisprosentti *first in* -näytteille oli 57 %.

Taulukko 3. Projektiin valittujen tuotteiden hyväksymiset ja hylkäämiset viskositeetin mittauksessa.

	A	R	Total
Total	325	250	575
%	57 %	43 %	

6.3 pH-testaus

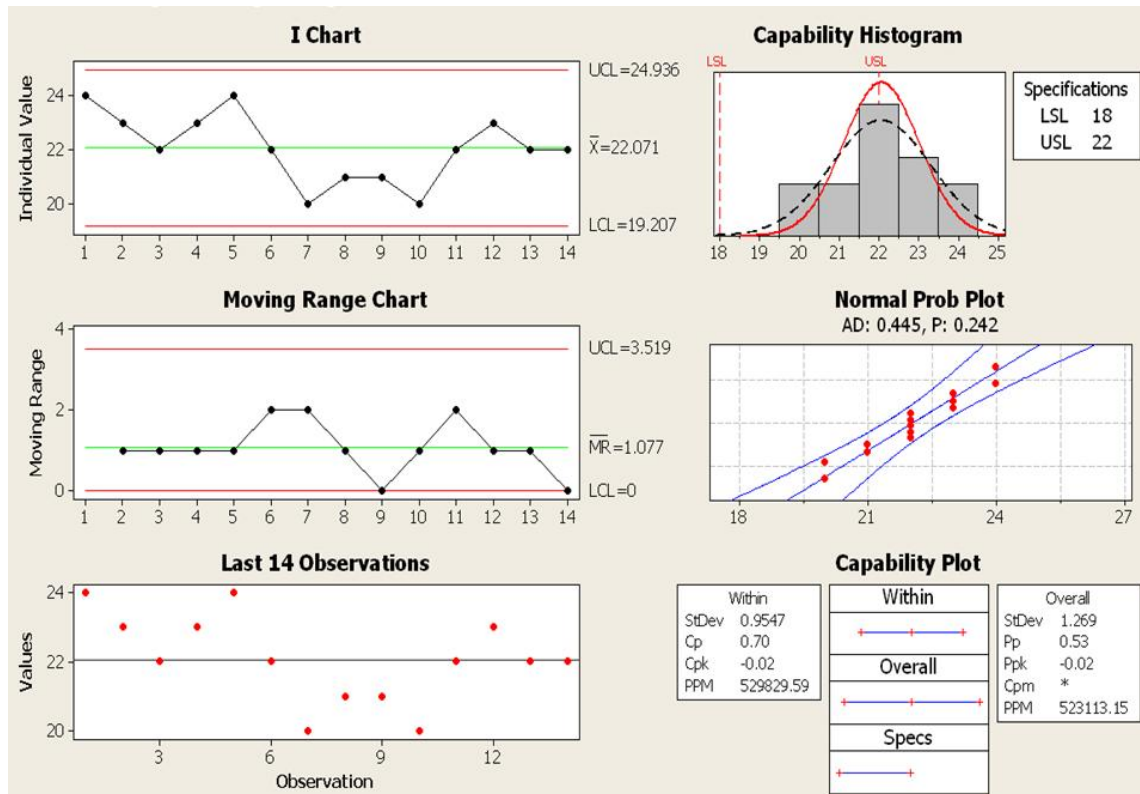
pH:n mittaus suoritetaan laadunvalvonnassa vain vesipohjaisille fleksopainoväreille. Sen käyttö on selvästi vähäisempää kuin viskositeetin testaamisen. Tarkastelujaksolla oli tehty 597 *first in* -pH-mittausta. Taulukossa 4 on esitetty näiden testausten hyväksymiset ja hylkäämiset.

Taulukko 4. pH:n mittaukset 1.1.2011 – 9.6.2011.

	A	R	Total
Total	493	104	597
%	83 %	17 %	

6.4 Tuotteiden analysointi Minitab-ohjelmalla

Tuotteiden analysointi toteutettiin Minitab-ohjelmalla, joka on tilastolliseen analysointiin ja laadunparantamiseen käytettävä ohjelma. Tuotteiden *first in* -mittaustulokset siirrettiin Excelistä Minitabiin. Minitab 15 -ohjelman *Capability Sixpack* -työkalu määrittää kullekin tuotteelle valvontakortit sekä valvontarajat. Minitab olettaa, että prosessi on normaalitilassa. Samalla työkalulla saadaan tieto myös prosessin kyvykkyydestä kyseisen tuotteen kohdalla. Kuvassa 15 nähdään Minitabin *Capability Sixpack* -työkalun raportti.



Kuva 15. Minitab 15: Process Capability Sixpack -raportti tuotteesta.

Minitab olettaa, että prosessista on poistettu jo kaikki erityisyyt. Tämä ei valitettavasti kaikkien tuotteiden kohdalla pidä paikkaansa. Jos prosessista ei ole poistettu kaikkia erityisiä syitä, tuotteen keskihajonta on liian suuri. Tässä tapauksessa Minitabin konstruoimat valvontarajat voivat olla monelle tuotteelle liian suuria. Kun analysointi tehdään käyttäen Process Capability Sixpackiä, pitää Minitabiin antaa tieto, ovatko kaikki mittaukset itsenäisiä eri tuote-eristä vai onko samasta tuotteesta otettu useampia näytteitä. Jos alaryhmiä on mukana useampi kuin yksi, tulee analyysiin mukaan myös alaryhmien sisäiset suhteet. (Minitab 15)

6.4.1 Within ja overall

Within-malli olettaa, että prosessi on normaalitilassa, eikä erityisistä syistä johtuvaa vaihtelua ilmene prosessissa. *Within*-mallia käytetään yleisesti, jos alaryhmässä on enemmän kuin yksi mittaus. Tällöin se laskee keskihajonnan, alaryhmien sisäisenä keskihajontana. Tästä käytetään nimitystä *short term variation*. Jos näytteissä alaryhmän koko on yksi, Minitab laskee *within*-mallin keskihajonnan kaavasta (1) käyttämällä d_2 arvona 1,128 (Liite 2). (Minitab 15)

Overall-malli ottaa huomioon kaiken ohjelmaan syötetyn datan prosessista laskiessaan prosessin hajontaa. Koska eri vuodenaikojen tuoma lämpötilojen vaihtelu vaikuttaa sekä valmistus- että mittaustuloksiin, keskityttiin kyseisessä tutkimuksessa seuraamaan prosessin lyhytaikaista suorituskykyä. (Franze 2011/2012)

6.4.2 I Chart ja MR Chart

I Chart eli *individual chart* näyttää yksittäiset mittaustulokset valvonta kortissa. Tämän avulla voidaan tutkia onko prosessi hallinnassa. Valvontakortin UCL- ja LCL-arvot ovat laskettu kaavoilla 2 ja 3, käyttäen *within*-mallin keskihajontaa. MR chart eli *moving range chart* näyttää peräkkäisten mittausten vaihteluvälit. Vaihteluvälien avulla voidaan seurata näyte-erien välistä vaihtelua. MR chart -kuvaajan valvontarajat lasketaan kaavoilla 4 ja 5. Koska tarkasteltavassa datassa alaryhmän koko on yksi eli jokainen mittaustulos edustaa yhtä tuotantoerää, Minitab käyttää automaattisesti I-MR-valvontakortti esitystä. (Minitab 15)

6.4.3 Last Observations

Jos näytepisteitä on paljon, *last Observations* -kuvaaja näyttää 25 viimeisimmän mittauksen arvot. Jos näytepisteitä on alle 25, se näyttää vain kaikki mittaustulokset. Kuvaajasta voidaan tarkastella pisteiden jakautumista prosessin keskiarvon ympärille. Kun pisteitä on paljon, saadaan *last Observations* -kuvaajasta tietoa, onko prosessissa tapahtunut muutoksia. (Minitab 15)

6.4.4 Capability Histogram

Capability histogramista voidaan arvioida tuotteen hajontaa ja mittaustulosten sijoittumista tuotteen spesifikaatio-rajoihin nähden. Minitab piirtää histogrammiin molempia malleja edustavat hajontaa kuvaavat kuvaajat. Parhaassa tapauksessa kuvaajat kulkevat päällekkäin, jolloin prosessin pitkäaikainen ja lyhytaikainen suorituskyky ovat samoja. Jos kuvaajat ovat muodoltaan erilaisia, on prosessin pitkäaikainen suorituskyky selvästi huonompi kuin lyhytaikainen suorituskyky. (Minitab 15, Franze 2011/2012)

6.4.5 Normal Prob Plot

Normaalijakauman todennäköisyyskuvan, *normal probability plot*, avulla voidaan arvioida, ovatko mittauspisteet jakautuneet normaalisti. Jos pisteet ovat normaalisti jakautuneita, ne ovat lähellä suoraa viivaa ja 95 %:n luottamusvälin viivojen sisällä. AD- ja P-arvoja käytetään mittauspisteiden jakautuneisuuden määrittämiseen. P-arvo ilmoittaa, kuinka hyvin kyseinen mittausdata seuraa normaalijakaumaa. Jos P-arvo on pienempi kuin annettu merkitsevyystaso (tässä $\alpha = 0,05$ eli 95 % luottamusväli), mittauspisteiden jakauma poikkeaa tilastollisesti merkitsevästi normaalijakaumasta. Sivulla 36 kuvan 15 tuotteen mittaustulokset ovat jokseenkin normaalisti jakautuneita. (Minitab 15)

6.4.6 Capability Plot

Suorituskykykuvaaja, *capability plot*, muodostuu kolmesta eri osasta: *within*, *overall* ja *specification intervall*. *Within*-kohdassa on esitetty *within*-mallilla laskettu prosessin hajonta. C_p - ja C_{pk} -luvut lasketaan kaavoista 6 ja 7. PPM, *parts per million*, kertoo, kuinka monta erää hylätään, jos prosessi toistetaan miljoona kertaa ja vain satunnaiset syyt vaikuttavat prosessiin. Kuvan 15 prosessin spesifikaatorajoja ei ole keskitetty, mutta prosessi tuottaa kohtuullisen tasalaatuista tuotetta. Sun Chemical -ohjeistuksen mukaan tavoite arvot C_p - ja C_{pk} -arvoille on $> 0,6$. (Minitab 15, Franze 2011/2012)

Overall-kohdassa lasketaan prosessin pitkäaikainen suorituskyky eli toimintakykyluvut P_p ja P_{pk} , käyttäen koko saatavana olevaa tietoa prosessista. StDev, *standard deviation*, on prosessin todellinen keskihajonta. PPM-arvo kertoo hylättyjen erien määrän, jos prosessia toistetaan miljoonaa kertaa. C_{pm} -arvoa ei käytetty analyyseissä ollenkaan. *Specification intervall* -kuvaaja vertaa eri mallien hajontaa prosessin spesifikaatorajoihin. Jos *within*- ja *overall*-kohtien arvot eroavat toisistaan merkittävästi, on syytä olettaa, että prosessi ei ole hallinnassa. Tarkemmin, *within*-malli jättää laskuistaan pois erityisistä syistä johtuvan vaihtelun, vaikka sitä esiintyy prosessissa. Koska kuvan 15 prosessissa C_p on selvästi suurempi kuin P_p , voidaan olettaa, että mukana on myös erityisistä syistä johtuvaa vaihtelua. (Minitab 15, Franze 2011/2012)

6.5 Tuotteisiin tehdyt muutokset

Minitabilla tehtyjen analyysien perusteella muokattiin tarkasteltavana olevia tuotteita. Tuotteet käytiin läpi laboratoriapäällikön kanssa ja niihin tehtiin tarvittavat korjaukset. Korjaukset tehtiin joko laadunvalvontarajoihin tai tuotteen valmistusreseptiin tai molempiin. Kaikkia tuotteita ei voitu korjata täysin Minitabin antamien suositusten mukaan, koska joissakin tuotteissa näyte-erien koko ei ollut tarpeeksi suuri. Jos tuotetta ei ollut tehty tarpeeksi monta kertaa tarkasteluajanjaksona, ei siihen ollut järkevää tehdä muutoksia. Muutokset olisivat voineet johtaa jopa tuotteen huonontumiseen. Joissain tietyissä tuotteissa oli jo ennestään tehty muutoksia, jos ne olivat jo aikaisemmin olleet usein rajojen ulkopuolella. Muutosten yhteydessä Tol/Target-%-tavoitearvoksi oli asetettu 30 %.

6.5.1 Viskositeetti

Tuotteisiin tehtiin muutokset 14.7 - 28.7.2011. Tuotteet käytiin läpi yksitellen, mikä on erittäin hidasta. Tuotteisiin tehtiin muutoksia sen mukaan, mikä on tuotannon, asiakkaan ja laadunvalvonnan kannalta tarkoituksenmukaisinta. Ennen muutoksia tuotteiden keskimääräinen Tol/Target-% oli 19 % ja muutoksien jälkeen se oli 25 %. Kaikki korjatut tuotteet ovat esitetty liitteessä 1.

6.5.2 pH

pH-rajojen tarkasteluun ei käytetty Minitab-ohjelmaa, vaan ne käytiin läpi Microsoft Excel -ohjelmalla. pH-rajat käytiin läpi tuoteryhmittäin ja niitä laajennettiin 0,2 yksikköä, jos katsottiin, että se ei vaikuta tuotteen ominaisuuksiin. Tutkimuksen puitteissa käytiin läpi suurimmat vesipohjaiset tuoteryhmät.

6.6 Viskositeetin ja pH:n mittausten menetelmien analysointi

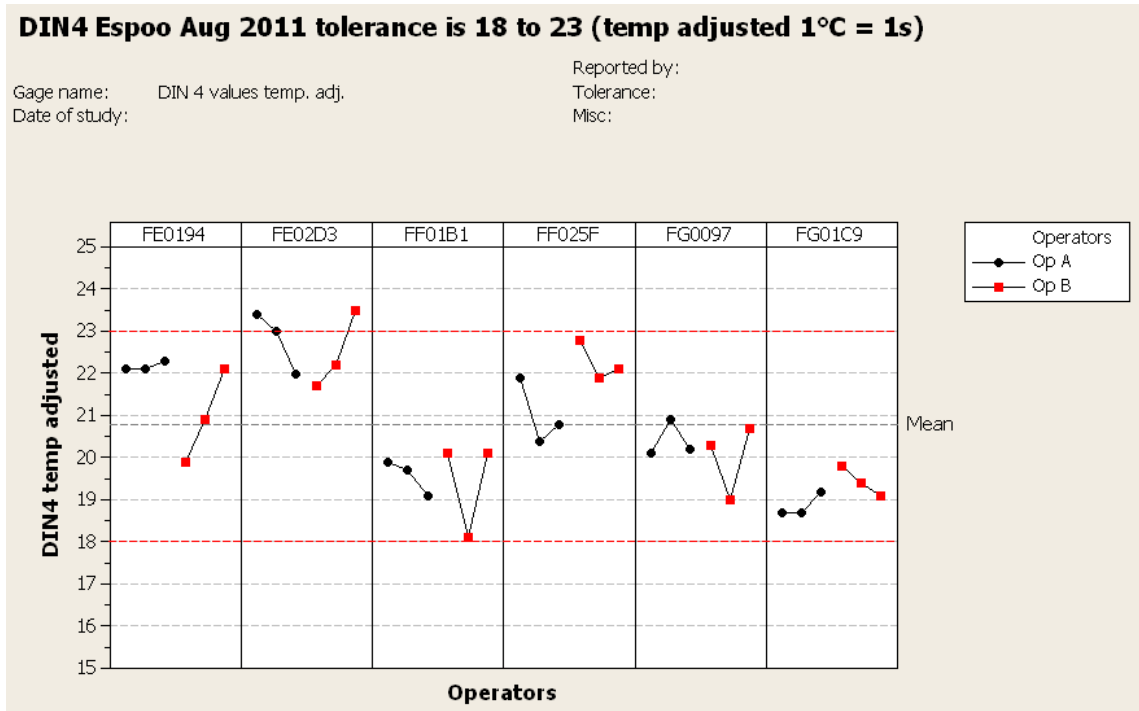
Sekä viskositeetin että pH:n mittaussysteemit analysoitiin Gage R&R -menetelmällä. Analysoinnin tarkoituksena oli määrittää, voidaanko käytössä olevilla menetelmillä seurata tuotannosta tulevien tuotteiden laatua vai tuleeko mittausten menetelmistä liian suuri osa prosessista havaitusta kokonaisvirheestä.

Testiin valittiin tuote, josta voitiin tehdä molempien mittausmenetelmien analysoinnit. Tuotetta otettiin tuotannosta kuudesta peräkkäisestä tuotantoerästä (*Parts*). Näytteet kerättiin, kun ne tulivat laadunvalvontaan ensimmäisen kerran, eli niihin ei ollut tehty korjauksia. Testiin valittiin kaksi operaattoria, jotka normaalisti tekevät laadunvalvonnan mittauksia. Molemmat operaattorit (Op A ja Op B) mittasivat kaikista kuudesta näyte-erästä pH:n, viskositeetin ja lämpötilan kolme kertaa kustakin. Molempiin testeihin tuli 36 mittausta. Näytteet satunnaistettiin ja annettiin operaattoreille mitattavaksi. Operaattorit eivät tiedäneet, mitkä näytteet olivat mistäkin tuotantoerästä. Taulukossa 5 nähdään mittausjärjestely ja operaattorien kirjaamat tulokset. Operaattorit mittasivat näytteet satunnaistetussa numerojärjestyksessä, joka taulukossa 5 ilmentää *run order*.

Taulukko 5. Gage R&R –testin mittausjärjestely ja mittaustulokset.

Parts	RunOrder	Operator	MSA DIN4s	Ink temp °C	MSA pH valu
FE0194	1	Op A	22,1	23,0	8,4
FE0194	5	Op B	19,9	23,0	8,4
FE0194	14	Op A	22,1	23,0	8,4
FE0194	21	Op B	20,9	23,0	8,4
FE0194	28	Op A	21,8	23,5	8,5
FE0194	32	Op B	21,6	23,5	8,4
FE02D3	9	Op A	23,9	22,5	8,5
FE02D3	10	Op A	23,5	22,5	8,5
FE02D3	13	Op B	22,7	22,0	8,5
FE02D3	18	Op B	23,2	22,0	8,5
FE02D3	29	Op A	21,5	23,5	8,6
FE02D3	36	Op B	23,0	23,5	8,5
FF01B1	2	Op A	19,9	23,0	8,3
FF01B1	4	Op B	20,1	23,0	8,4
FF01B1	12	Op A	20,2	22,5	8,3
FF01B1	16	Op A	19,1	23,0	8,3
FF01B1	17	Op B	19,1	22,0	8,4
FF01B1	20	Op B	20,1	23,0	8,3
FF025F	7	Op A	21,9	23,0	8,4
FF025F	19	Op B	22,8	23,0	8,3
FF025F	22	Op A	20,4	23,0	8,3
FF025F	23	Op A	20,8	23,0	8,3
FF025F	24	Op B	21,9	23,0	8,4
FF025F	35	Op B	21,6	23,5	8,4
FG0097	6	Op B	20,3	23,0	8,4
FG0097	11	Op A	20,6	22,5	8,4
FG0097	15	Op B	20,0	22,0	8,4
FG0097	25	Op B	20,2	23,5	8,4
FG0097	27	Op A	20,4	23,5	8,4
FG0097	34	Op A	19,7	23,5	8,4
FG01C9	3	Op A	18,7	23,0	8,4
FG01C9	8	Op B	19,8	23,0	8,4
FG01C9	26	Op A	18,7	23,0	8,4
FG01C9	30	Op B	18,9	23,5	8,4
FG01C9	31	Op A	18,7	23,5	8,4
FG01C9	33	Op B	18,6	23,5	8,4

Koska tuotteen lämpötilansäätö on nykyisillä menetelmillä hankalaa, arveltiin sen tuovan testiin liikaa vaihtelua. Tuotteet mitattiin siinä lämpötilassa, jossa ne laboratoriosäilytyksen jälkeen olivat. Tuotteiden mitatut viskositeetit korjattiin lämpötilaan 23 °C käyttäen 1 °C = - 1 s. Korjatut mittaustulokset tuotantoerittäin ja operaattoreittäin on esitetty kuvassa 16. (Franze 2011/2012)



Kuva 16. Viskositeetinmittauksen korjatut mittaustulokset.

7 Tulokset

7.1 Gage R&R -tulokset

Saadut mittaustulokset syötettiin Minitab-ohjelmaan. ANOVA-menetelmällä lasketut varianssikomponentit kerrotaan kertoimella 5,15, jolloin saadaan tutkimusvaihtelu *study variance*. Kerroin tulee normaalijakaumasta. Satunnaismuuttujien arvot sijaitsevat 99 %:n varmuudella sellaisen välin sisällä, jonka pituus on 5,15 kertaa keskihajonta. Samaa kerrointa käytetään myös muiden yritysten Gage R&R -tutkimuksissa. (Varde-
man 1994, s. 506) Kuvassa 17 nähdään pH-mittauksen Gage R&R -raportti.

```
Process tolerance = 0,6
Historical standard deviation = 0,12
```

Source	StdDev (SD)	Study Var (5,15 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0410510	0,211413	55,54	35,24
Repeatability	0,0372678	0,191929	50,42	31,99
Reproducibility	0,0172133	0,088648	23,29	14,77
Operators	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00
Operators*Parts	0,0172133	0,088648	23,29	14,77
Part-To-Part	0,0614636	0,316538	83,16	52,76
Total Variation	0,0739119	0,380646	100,00	63,44

Source	%Process (SV/Proc)
Total Gage R&R	34,21
Repeatability	31,06
Reproducibility	14,34
Operators	0,00
Operators*Parts	14,34
Part-To-Part	51,22
Total Variation	61,59

```
Number of Distinct Categories = 2
```

```
Gage R&R for pH value
```

Kuva 17. pH-mittauksen Gage R&R -raportti.

Kuvan 17 raportissa *StdDev* on varianssikomponentin neliöjuuri eli kunkin vaihtelua aiheuttavan tekijän keskihajonta. *Total Gage R&R* -komponentti saadaan kun *Repeatability* ja *Reproducibility* -komponentit summataan neliöllisesti. *Part-To-Part* on eri näyte-erien vaihtelu. Kun *Part-To-Part* ja *Total Gage R&R* summataan neliöllisesti, saadaan kokonaisvaihtelu *Total Variation*. "*%Tolerance*" on kunkin hajontaa aiheuttavan komponentin hajonta jaettuna prosessin toleranssilla (USL-LSL). "*%Process*" on kunkin

hajontaa aiheuttavan komponentin hajonta jaettuna prosessin pitkäaikaisella hajonnalla. Ideaalitulanteessa *Total Gage R&R* -komponentin tulisi olla vähemmän kuin 30 % sekä toleranssialueesta että prosessin pitkäaikaisesta hajonnasta. Jotta mittausmenetelmä voidaan hyväksyä osaksi laadunvalvontaa Sun Chemicalin ohjeistuksen mukaan, mittausmenetelmän aiheuttaman virheen (Total Gage R&R) osuus sekä toleranssialueesta että prosessin pitkäaikaisesta hajonnasta tulisi olla alle 40 %. Saatujen tulosten perusteella pH-mittausmenetelmä voitiin hyväksyä käytettäväksi laadunvalvonnassa. Mittausmenetelmän osuus prosessin pitkäaikaisesta vaihtelusta oli 34,21 % ja mittausmenetelmän aiheuttama vaihtelu suhteessa toleranssi rajoihin oli 35,24 %. (Franze 2011/2012)

Viskositeettimittauksen Gage R&R -tutkimuksen analysointi suoritettiin samoilla menetelmillä kuin pH-mittauksen analysointi. Viskositeetinmittauksen Gage R&R -raportti on kuvassa 18.

Process tolerance = 5

Historical standard deviation = 1,6

Source	StdDev (SD)	Study Var (5,15 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,73352	3,77764	45,99	75,55
Repeatability	0,63004	3,24468	39,50	64,89
Reproducibility	0,37565	1,93459	23,55	38,69
Operators	0,00000	0,00000	0,00	0,00
Operators*Parts	0,37565	1,93459	23,55	38,69
Part-To-Part	1,41641	7,29452	88,80	145,89
Total Variation	1,59508	8,21466	100,00	164,29

Source	%Process (SV/Proc)
Total Gage R&R	45,85
Repeatability	39,38
Reproducibility	23,48
Operators	0,00
Operators*Parts	23,48
Part-To-Part	88,53
Total Variation	99,69

Number of Distinct Categories = 2

Gage R&R for DIN4s

Kuva 18. Viskositeetinmittauksen Gage R&R –raportti.

Viskositeetin mittausta ei voitu nykyisillä toimintatavoilla hyväksyä osaksi laadunvalvontaa. Mittausmenetelmän aiheuttaman vaihtelun osuus sekä toleranssialueesta että prosessin pitkäaikaisesta hajonnasta oli yli 40 %. Viskositeetin mittaukseen oli tehtävä parannuksia, jotta vaihtelua saataisiin pienennettyä.

7.2 Uuden datan keruu laadunvalvonnasta

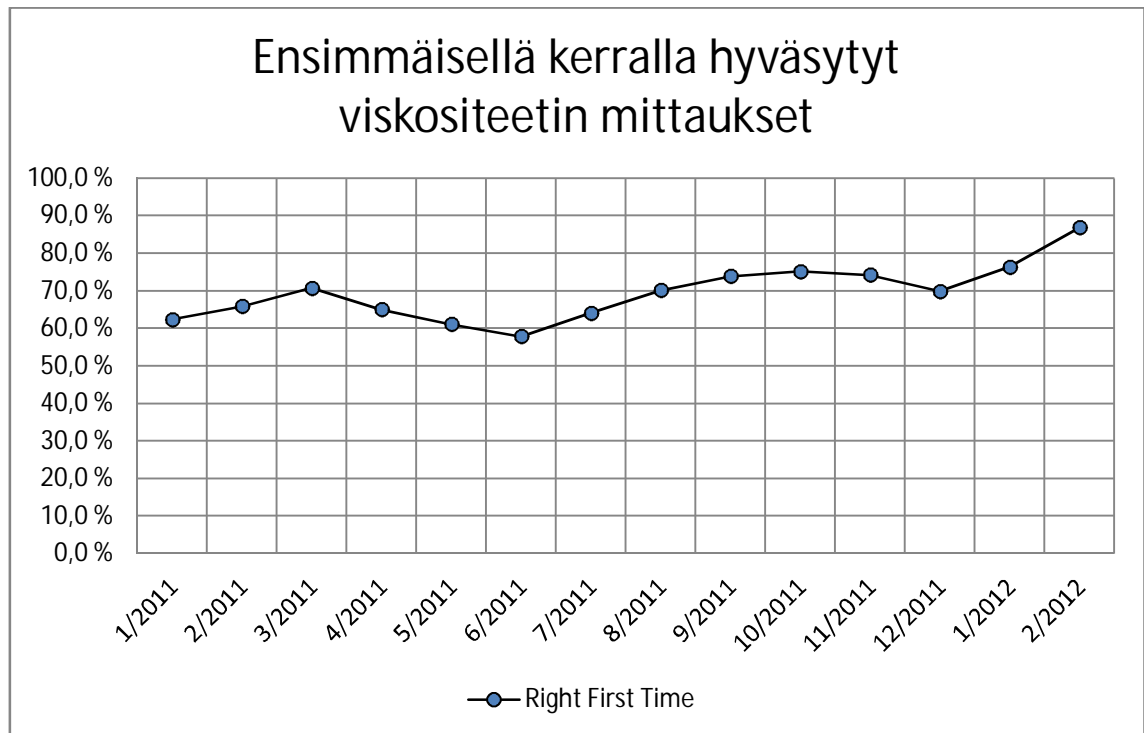
Kun muutokset resepteihin ja spesifikaatorajoihin oli tehty, tuotanto ja laadunvalvonta rupesivat noudattamaan näitä muutoksia valmistusresepteissä ja laadunvalvontarajoissa. Seurantajakson jälkeen toiminnanohjausjärjestelmästä kerättiin uudet tiedot 13.2.2012. Taulukossa 6 on esitetty fleksopainovärien kuukausittaiset läpäisyprosentit viskositeetin mittauksessa tuotteen tullessa ensimmäisen kerran laadunvalvontaan.

Taulukko 6. Viskositeetin mittauksen *Right First Time* kuukausittain.

Month	Accepted	Rejected	Total	Right First Time
1/2011	231	139	370	62,4 %
2/2011	236	122	358	65,9 %
3/2011	232	96	328	70,7 %
4/2011	259	139	398	65,1 %
5/2011	222	141	363	61,2 %
6/2011	191	139	330	57,9 %
7/2011	189	106	295	64,1 %
8/2011	200	85	285	70,2 %
9/2011	246	87	333	73,9 %
10/2011	273	90	363	75,2 %
11/2011	268	93	361	74,2 %
12/2011	195	84	279	69,9 %
1/2012	262	81	343	76,4 %
2/2012	113	17	130	86,9 %

7.3 Havaitut muutokset

Hyväksymisprosentti viskositeetinmittauksessa on kasvanut tehtyjen muutosten jälkeen. Kuvassa 19 on esitetty kuukausittaiset viskositeetin hyväksymiset laadunvalvonnassa aikavälillä 1/2011 - 2/2012. Kuvasta 20 nähdään että trendi on selvästi nouseva tuotteiden hyväksymisissä.



Kuva 19. Viskositeetin hyväksymiset *first in* -näytteissä.

Kun tarkastellaan tehtyjä tuotteita ajanjaksolla 9/2011-2/2012, eli muutosten jälkeen huomataan, että hyväksymisprosentti viskositeetin mittauksessa ensimmäistä kertaa laadunvalvontaan tulevilla tuotteilla on noussut 65 %:sta 75 %:iin. Kaikkien ajanjaksolla tehtyjen tuotteiden hyväksymiset ja hylkäämiset *first in* -näytteille on taulukossa 7.

Taulukko 7. Syyskuu 2011 - helmikuu 2012. Muutoksien jälkeen valmistetut kaikki tuotteet.

	Accepted	Rejected	Total
Total	1333	452	1785
%	75 %	25 %	

Samalla ajanjaksolla tehtyjen korjattujen tuotteiden hyväksymiset ja hylkäämiset *first in* -näytteille on taulukossa 8.

Taulukko 8. Syyskuu 2011 – helmikuu 2012. Muutoksien jälkeen valmistetut korjatut tuotteet.

	Accepted	Rejected	Total
Total	384	60	444
%	86 %	14 %	

Muutoksia ennen tuotteiden hyväksymisprosentti oli 57 % ja korjauksien jälkeen se on noussut 86 %:iin. Eli nousua on tullut lähes 30 prosenttiyksikköä. Tarkastelujaksojen aikana tuotteita oli tehty kohtuullisen sama määrä joten luvut ovat vertailukelpoisia. Joitakin korjattuja tuotteita ei ollut tehty enää muutoksien jälkeen.

pH-rajojen muutoksien jälkeen laadunvalvonnassa oli tehty 614 pH-mittausta aikavälillä syyskuu 2011 – helmikuu 2012. Näiden hyväksymis- ja hylkäysprosentit ovat esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. pH-mittauksen hyväksymis- ja hylkäysprosentit syyskuu 2011 – helmikuu 2012.

Accepted	Rejected	Total
535	79	614
87 %	13 %	

First in -pH-mittausten hyväksymisprosentti on kasvanut tarkastelu jaksolla 83 %:sta 87 %:iin eli nousua on tapahtunut 4 %-yksikköä.

8 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että tilastollisten menetelmien käyttö painovärituotannossa on haasteellista, koska valmistettavia tuotteita on paljon ja yksittäisen tuotteen valmistuskerrat voivat olla vähäisiä. Jatkuvasti vaihtuvat tuotenimikkeiden ja raaka-aineiden määrät vaikeuttavat tilastollista laadunohjausta. Monet tilastolliset työkalut edellyttävät, että datapisteitä on oltava paljon, jotta niiden antama tulos olisi luotettava.

Työn tarkoituksena oli Sun Chemicalin Espoon painoväritehtaan tuotannon tehostaminen tarkastelemalla tilastollisin menetelmin laadunvalvonnassa ja tuotannossa esiintyviä ongelmia. Työssä keskityttiin tehtaalla valmistettaviin vesi- ja liuotinpohjaisiin fleksoväreihin. Laadunvalvonnasta kerätyn tiedon perusteella käytiin läpi tuotteita, jolle joudutaan usein tekemään muutoksia laadunvalvonnassa. Työssä keskityttiin viskositeetin- ja pH-mittauksessa esiintyviin ongelmiin. Tarkastelun kohteena oli, ovatko tuotteille annetut spesifikaatorajat järkeviä ja oikein asetettuja sekä kuinka hyvin tuotanto pystyy vastaamaan tuotteille annettuihin spesifikaatorajoihin. Tuotteet käytiin läpi ja valmistusreseptiä tai laadunvalvontarajoja muutettiin, jos niissä ilmeni ongelmia.

Kun laadunvalvonnasta kerättyä dataa analysoitiin, huomattiin selvästi, että monissa tuotteissa laadunvalvontarajat olivat liian kapeat tai niitä ei oltu keskitetty oikein. Jos korjauksia tehdään paljon, aiheuttaa se viivästyksiä tuotantoon. Laadunvalvontarajoihin ja tuotteisiin tehdyt muutokset ovat parantaneet huomattavasti *first in* -näytteiden läpimenoprosenttia viskositeetin mittauksessa.

pH-mittauksissa ei tapahtunut yhtä merkittävää muutosta, mutta lähtökohta pH-mittauksissa ei myöskään ollut kovin heikko. Kun korjauksia tulee vähemmän, on tuotteiden keskimääräinen läpimenoaika selvästi nopeampi ja näin pystytään paremmin reagoimaan mahdollisiin muutoksiin tilauksissa ja toimituksissa.

Työssä tutkittiin myös kuinka hyvin käytössä olevilla mittausmenetelmillä voidaan mitata tuotteiden viskositeettia ja pH:ta. Mittaussysteemit tutkittiin Gage R&R -menetelmällä, jolla saadaan selville kuinka suuri osa kokonaisvirheestä tulee itse mittaussysteemistä. Jos itse mittausmenetelmä aiheuttaa liian suuren osan kokonaisvirheestä, ei sen avulla voida tutkia prosessin tuottamaa laatua. Laadunvalvonnan mit-

tausmenetelmistä voitiin validoida pH-mittaus, mutta viskositeetinmittaus ei täyttänyt vaatimuksia kyseisellä testauskerralla. Gage R&R -testi uusittiin keväällä 2012, jolloin mittausmenetelmästä tulevan virheen osuus kokonaisvirheestä oli sallituissa rajoissa ja menetelmä pystyttiin validoimaan.

Lähteet

Alwan, Layth C. 2000. Statistical Process Analysis. Boston: Irwin McGraw-Hill.

Box, George E. P. & Hunter, J. Stuart & Hunter, William G. 2005. Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery. 2nd edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Evans, James R. & Lindsay, William M. 2011. The management and control of quality. 8th edition. Mason, Ohio: South-Western Cengage Learning.

Franze, Klaus. 2011/2012. Business Improvement Project Manager, certified Black Belt. Sun Chemical Oy. Sähköpostikeskustelu.

Griffith, Gary K. 1996. Statistical process control methods for long and short runs. 2nd edition. Millwaukee: ASQ.

Karjalainen, Tanja & Karjalainen Eero E. 2002. Six Sigma – Uuden sukupolven johtamis- ja laatumenetelmä. Hollola: Quality Knowhow Karjalainen Oy.

Kear, Fred W. 1998. Statistical process control in manufacturing practice. New York: Marcel Dekker, Inc.

Kemianteollisuus. 2003. Toim. Riistama, Kyösti; Laitinen Jorma; Vuori Merja. Helsinki: Chemas Oy.

Kume, Hitoshi. 1998. Laadun parantamisen tilastolliset menetelmät. 2., korjattu painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Leach, Robert H. & Pierce, Ray J. 1993. The Printing Ink Manual. 5th edition. London: Chapman & Hall.

Minitab Inc. 2011. Minitab 15 – Statistical Software. State College: Pennsylvania, USA.

Montgomery, Douglas C. 1997. Introduction to statistical quality control. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Salomäki, Rauno. 1999. Suorituskykyiset prosessit – hyödynnä SPC. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Sun Chemical. 2010. Laadunvalvonta menetelmät–työohje. Sun Chemical Oy.

Sun Chemical. 2011. What Is An Ink. Koulutusmoniste. Sun Chemical Oy.

Vardeman, Stephen B. 1994. Statistics for engineering problem solving. Boston: PWS Publishing Company.

Viluksela, Pentti. 2005. Painotekniikka. Opetusmoniste. EVTEK-ammattikorkeakoulu.

Korjatut tuotteet

Korjattujen tuotteiden spesifikaatorajat, suhteellinen toleranssi, hyväksymiset, ehdotetut uudet spesifikaatorajat sekä Cp- ja Cpk-luvut. (Minitab 15)

Material Code	alataria	ylataria	Target	RT	A	R	Kaikki yhteensä	Cp	Cpk	New LSL	New USL	New Target	New RT
1	35	40	37,5	13%	12	15	27	0,28	0,01	32	40	36	22%
2	35	35	30	33%	25	5	25	0,73	0,68	25	35	30	33%
3	16	18	17	12%	18	1	19	1,13	0,18	15	18	16,5	18%
4	18	22	20	20%	4	14	18	0,58	-0,53	17	23	20	30%
5	14	18	16	25%	18	9	17	1,6	1,29	14	18	16	25%
6	22	25	23,5	13%	8	9	17	0,11	-0,18	21	27	24	25%
7	30	35	32,5	15%	8	9	17	0,26	0,13	27	35	31	26%
8	24	28	26	15%	11	6	17	0,57	-0,2	21	27	24	25%
9	25	30	27,5	18%	14	2	16	0,56	0,52	23	32	27,5	33%
10	18	22	20	20%	16	5	16	1,25	0,24	17	22	19,5	26%
11	16	18	17	12%	10	5	15	0,29	-0,08	15	19	17	24%
12	25	30	27,5	18%	10	5	15	0,19	0,02	25	32	28,5	25%
13	20	26	23	26%	15	7	15	1,75	0,62	19	25	22	27%
14	22	26	24	17%	7	7	14	0,36	-0,31	21	27	24	25%
15	30	35	32,5	15%	7	7	14	0,41	0,4	28	36	32	25%
16	18	22	20	20%	9	5	14	0,7	-0,02	18	23	20,5	24%
17	30	35	32,5	15%	2	11	13	0,38	-0,46	27	34	30,5	23%
18	25	35	30	33%	7	5	12	0,4	0,05	28	38	33	30%
19	20	22	21	10%	11	1	12	0,21	0,1	18	22	20	20%
20	18	22	20	20%	10	1	11	0,75	0,27	19	24	21,5	23%
21	25	30	27,5	18%	10	1	11	0,67	0,24	25	32	28,5	25%
22	18	22	20	20%	5	5	10	0,68	-0,34	16	21	18,5	27%
23	18	22	20	20%	10	5	10	0,85	0,42	18	23	20,5	24%
24	18	22	20	20%	10	10	10	0,68	0,47	18	23	20,5	24%
25	22	28	25	24%	10	4	10	0,85	0,37	20	27	23,5	30%
26	50	60	55	18%	5	4	9	0,65	-0,09	45	58	51,5	25%
27	30	35	32,5	15%	7	2	9	0,27	0,21	28	35	31,5	22%
28	30	35	32,5	15%	7	2	9	0,13	-0,06	30	37	33,5	21%
29	22	26	24	17%	1	7	8	0,48	-0,63	21	27	24	25%
30	23	27	25	16%	3	5	8	1,05	-0,39	20	26	23	26%
31	20	25	22,5	22%	3	5	8	0,33	-0,07	27	34	30,5	23%
32	30	35	32,5	15%	4	4	8	0,82	0,08	27	34	30,5	23%
33	22	26	24	17%	4	4	8	0,58	-0,44	21	27	24	25%
34	23	27	25	16%	1	6	7	0,64	-0,28	20	26	23	26%
35	20	25	22,5	22%	1	6	7	1,17	-0,31	18	24	21	29%
36	22	25	23,5	13%	1	6	7	0,13	-0,61	23	30	26,5	26%
37	25	30	27,5	18%	2	5	7	0,43	-0,17	23	30	26,5	26%
38	14	18	16	25%	2	5	7	0,24	-0,32	23	30	26,5	26%
39	23	27	25	16%	3	4	7	0,75	-0,16	23	27	25	16%
40	22	26	24	17%	3	4	7	0,19	-0,07	22	28	25	16%
41	22	26	24	17%	6	6	6	0,75	-0,81	20	26	23	26%
42	22	26	24	17%	6	6	6	0,63	-0,73	20	26	23	26%
43	35	40	37,5	13%	1	5	6	0,08	-0,53	34	42	38	21%
44	30	35	32,5	15%	1	5	6	0,25	-0,36	29	36	32,5	22%
45	23	27	25	16%	2	4	6	0,54	-0,31	21	26	23,5	21%
46	30	35	32,5	15%	2	4	6	0,23	0,03	28	36	32	25%
47	27	37	32	31%	2	4	6	0,94	-0,16	30	40	35	29%
48	25	30	27,5	18%	5	5	6	0,47	-0,83	24	32	28	29%
49	20	24	22	18%	5	5	5	1,5	-0,9	24	32	28	29%
50	30	35	32,5	15%	5	5	5	1,88	-5,41	28	35	31,5	22%
51	22	26	24	17%	5	5	5	0,27	-0,74	21	27	24	25%
52	23	27	25	16%	1	4	5	0,33	-0,37	23	30	26,5	26%
53	22	26	24	17%	1	4	5	0,27	-0,19	20	26	23	26%
54	20	30	25	40%	1	4	5	0,5	-0,38	24	34	29	34%

Valvontarajojen ja estimaattien laskennassa käytettyjä vakioita

Tilastollisissa analyyseissä käytettyjen vakioiden arvoja. (Alwan 2000, s.740)

Sample Size n	d_3	D_3	D_4	B_3	B_4	A_2	A_3	c_4	d_2
2	0.853	0.000	3.267	0.000	3.267	1.881	2.659	0.7979	1.128
3	0.888	0.000	2.574	0.000	2.568	1.023	1.954	0.8862	1.693
4	0.880	0.000	2.282	0.000	2.266	0.729	1.628	0.9213	2.059
5	0.864	0.000	2.114	0.000	2.089	0.577	1.427	0.9400	2.326
6	0.848	0.000	2.004	0.030	1.970	0.483	1.287	0.9515	2.534
7	0.833	0.076	1.924	0.118	1.882	0.419	1.182	0.9594	2.704
8	0.820	0.136	1.864	0.185	1.815	0.373	1.099	0.9650	2.847
9	0.808	0.184	1.816	0.239	1.761	0.337	1.032	0.9693	2.970
10	0.797	0.223	1.777	0.284	1.716	0.308	0.975	0.9727	3.078
11	0.787	0.256	1.744	0.321	1.679	0.285	0.927	0.9754	3.173
12	0.778	0.283	1.717	0.354	1.646	0.266	0.886	0.9776	3.258
13	0.770	0.307	1.693	0.382	1.618	0.249	0.850	0.9794	3.336
14	0.763	0.328	1.672	0.406	1.594	0.235	0.817	0.9810	3.407
15	0.756	0.347	1.653	0.428	1.572	0.223	0.789	0.9823	3.472
16	0.750	0.363	1.637	0.448	1.552	0.212	0.763	0.9835	3.532
17	0.744	0.378	1.622	0.466	1.534	0.203	0.739	0.9845	3.588
18	0.739	0.391	1.609	0.482	1.518	0.194	0.718	0.9854	3.640
19	0.734	0.404	1.597	0.497	1.503	0.187	0.698	0.9862	3.689
20	0.729	0.415	1.585	0.510	1.490	0.180	0.680	0.9869	3.735
21	0.724	0.425	1.575	0.523	1.477	0.173	0.663	0.9876	3.778
22	0.720	0.435	1.566	0.534	1.466	0.168	0.647	0.9882	3.819
23	0.716	0.443	1.557	0.545	1.455	0.162	0.633	0.9887	3.858
24	0.712	0.452	1.548	0.555	1.445	0.157	0.619	0.9892	3.895
25	0.708	0.459	1.541	0.565	1.435	0.153	0.606	0.9896	3.931