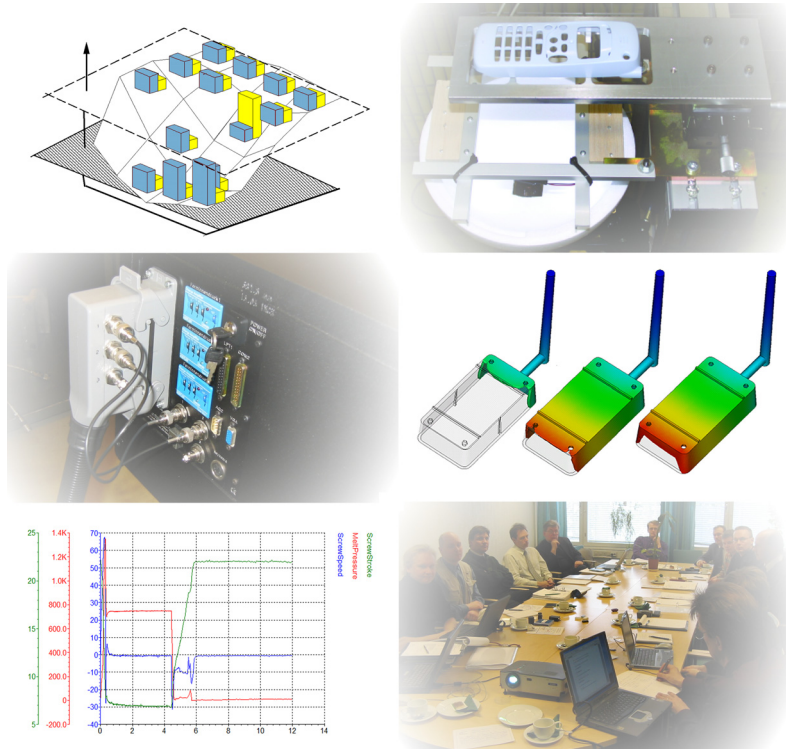


Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet älykkäät työkalut (IDEAL) 2002 - 2004

Projektin loppuraportti



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

J. Silén, M. Kylmä,
T. Latvakangas ja E. Välipakka

Tampereen teknillinen yliopisto,
Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorio



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

P. Koikkalainen, A. Lensu ja
M. Haranen

Jyväskylän yliopisto,
Data-analyysin laboratorio

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1 Alkusanat	3
2 Johdanto	5
2.1 Projektikonsortio.....	6
3 Projektin yleiskuvaus	8
3.1 Lähtökohta ja tavoitteet.....	8
3.2 Kokonaisjärjestelmän kuvaus.....	8
3.3 Teollisuudessa tehdyt koeajot.....	9
3.4 Keskeiset tulokset ja kehitettyä tekniikkaa	10
4 Data-analyysi ruiskuvalun apuna	11
4.1 Mihin data-analyysiä tarvitaan?.....	11
4.2 Mallinnus ja data-analyysi	12
4.3 Data-analyysin toteutus IDEAL -projektissa.....	13
5 Tiedonkeruu ruiskuvaluprosessissa.....	14
5.1 Tiedonkeruu ja sen hyödyt.....	14
5.2 Ruiskuvalukoneelta kerättävä tieto	14
5.3 Muotin sisäiset lämpötila- ja paineanturit	14
5.4 Tiedonkeruu ja koeajot TTY:llä	15
5.5 Käytännön kokemuksia	17
6 Konenäkö laadunmittauksessa.....	18
6.1 Kehitetty mittaussjärjestelmä	18
6.2 Saavutettu mittaustarkkuus.....	20
6.3 Muotoanalyysin soveltaminen	20
7 Koesuunnittelu ja laadunoptimointi	22
7.1 Tilastollinen laatukäsite	22
7.2 Laadunoptimointi käytännössä.....	23
7.3 Adaptiivinen koe ja laadunoptimointi.....	24
8 Tuotannon simulointi ja arviointi	25
9 Kappaleen laadun ja rakenteen välinen yhteys	26
10 Kappaleen laadun ennustaminen FEM -simuloinnin	27
10.1 FEM -simulointi ja ohjelmistot.....	27
10.2 Simuloinnin käyttö ja hyödyt.....	27
10.3 Kappaleen laadun ennustaminen	27
11 Case: Perlos Oy.....	28
11.1 Mittausjärjestelmän toimivuus teollisuusympäristössä	28
11.2 Konenäkömittauksen tarkkuus, mittojen ennustus ja laadun optimointi	29
11.3 Uudet koesuunnittelustrategiat	30
12 Johtopäätöksiä.....	32
12.1 Hyötyarvioita.....	33
12.2 Toimenpide-ehdotuksia	33
13 Kirjallisuutta	35

1 Alkusanat

Tämän päivän ruiskuvaluteollisuudelta vaaditaan enemmän kuin mihin perinteisessä kappaletavaruotannossa on totuttu, sillä toimiihan moderni ruiskuvaluyritys lähes aina alihankkijana laajemmassa liiketoimintaketjussa. Tämä puolestaan edellyttää toimintojen kehittämistä ulkopuolisen vaatimusten sanelemana. Liiketoiminnassa niin asiakkaan kuin yrityksen omat vaatimukset kohdistuvat sekä laatuun että tehokkuuteen ja mittarina on kansainvälinen kilpailukyky.

Tekesin teknologiaohjelmat RUL ja Pro Muovi toimivat merkittävinä ensiaskelina kohti tehokkaampaa ruiskuvalutoimintaa sekä kansainvälisesti kilpailukykyisempää liiketoimintaa alalla. Ruiskuvaluprosessin – samoin kuin siihen liittyvien sivuprosessien aina tiedonhallinnasta mittauksiin – toimivuuteen saatiin selkeitä parannuksia. Myös liiketoiminnallisuus kehittyi sekä yhteistyö tutkimuslaitosten ja teollisuuden välillä.

Päättynyt Pro Muovi -ohjelma jätti kuitenkin laaja-alaisuudestaan huolimatta useita avoimia kysymyksiä. Missä ruiskuvaluteollisuus nyt menee? Ollaanko lähelläkään optimaalista tilannetta? Voisiko teollisia prosesseja enää parantaa? Entä löytyisikö ruiskuvalutoimintaan uutta kehityspotentiaalia perinteisen muovitekniikan ulkopuolelta?

Edellä mainittuihin kysymyksiin vastauksen löytämiseksi kehitystoimintaa lähdettiin tietoisesti laajentamaan muovien perinteisen materiaalitekniikan ulkopuolelle. Olihan Pro Muovi -teknologiaohjelman Prosessin hallinta -osaprojekti antanut selkeitä viitteitä tästä tuomalla täysin uusia työkaluja, kuten neuroverkot, osaksi ruiskuvaluprosessia. Kuten tutkimus ja kehitystoiminnassa yleisesti, niin myös ruiskuvaluprosessien hallinnassa ajateltiin tarvittavan osaamista monelta, muovitekniikalle täysin vieraalta tieteenalalta.

Tilastollisen tietojenkäsittelyn rooli koettiin tässä suhteessa erityisen merkittäväksi. Sen odotettiin antavan keinot tehokkaiden

työkalujen kehittämiseen tuotantoprosessista kerättävän reaalisin datan pohjalta. Esimerkiksi uudet hahmontunnistuksen ja konenäön menetelmät tuotteiden laadunohjaukseen, automaattinen vikadiagnostiikka, tilastollinen prosessinohjaus jne. nähtiin potentiaalisina työkaluina lähitulevaisuudessa.

Edellä esitetyt kehitysmahdollisuudet hyvin tuntien syksyllä 2001 käynnistettiin keskustelut Kai Syrjälän ja Nokia Oyj:n aloitteesta Tekesin, Tampereen teknillisen korkeakoulun sekä Jyväskylän yliopiston kanssa mahdollisuuksista käynnistää kolmivuotinen kehitysprojekti suomalaisen ruiskuvaluteollisuuden kanssa. Tavoitteena tässä kehitystyössä olisi synnyttää ohjelmisto ja laitteisto, jonka avulla teollisten ruiskuvaluprosessien hallinta tehostuisi ja voitaisiin ottaa selkeä askel käytännössä kohti optimaalista ruiskuvaluprosessia. Numeeriseksi tavoitteeksi asetettiin 20 %:n tehokkuuden lisääntyminen, joka toteutuisi yritysten toiminnassa säästöinä mm. lyhentyvänä sykliaikana sekä pienentyvänä hukkatuotantona ja raaka-aineen käyttönä.

Näihin keskusteluihin ja tavoitteisiin perustuen 1.1.2002 alkaen käynnistettiin kolmivuotinen Tekes- ja yritysrahoitteinen tutkimusprojekti, Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet älykkäät työkalut, IDEAL. Sitä toteuttamaan koottiin laaja yhteistyökehys eturivin suomalaisista ruiskuvaluyrityksistä. Tavoitteena oli, että yhteistyökehys kattaisi yli 50 % suomalaisesta ruiskuvalutuotannosta. Aiempiin Tekes -projektiin verrattuna mukaan pyrittiin saamaan enemmän pk-yrityksiä elektroniikkateollisuudenkin ulkopuolelta. Tässä onnistuttiinkin ja mukaan projektiin lähti yhdeksän yritystä: Eimo Oyj (sittemmin Foxconn Oy), Ensto Oy (sittemmin Nypro CMS Oy), Inion Oy, Nokia Oyj, Oy Juho Jussila, Okartek Oy, Perlos Oyj, Plastone Oy ja Uponor Suomi Oy. Yhteistä näille kaikille yrityksille oli voimakas panostaminen kehitystoimintaan ja sitä kautta paremman kilpailuaseman saaminen kansainvälisillä markkinoilla.

IDEAL -projektin tutkimustyö tehtiin niin Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratoriossa ja Jyväskylän yliopiston Data-analyysin laboratoriossa. Projektin vastuullisena johtajana toimi TkL Jukka Silén (TTY) ja Jyväskylän yliopiston osuuden toteutuksesta vastasi TkT Pasi Koikkalainen.

Yritysten kirjon laajuus johti siihen, että niiden projektille asettamat tavoitteet erosivat toisistaan paljon. Siinä missä pidemmälle kehitystoiminnassaan edenneet yritykset tavoittelivat varsin pitkälle kehittyneitä laadunparannuksen työkaluja, niin toisille yrityksille tavoitteeksi riitti toimivan "asentajan Taguchin" luominen. Näiden kaikkien tavoitteiden täytyminen, samoin kuin varsin erilaisiin tarpeisiin vastaaminen, koettiin haasteelliseksi.

Palaute IDEAL -projektista ja sen tuloksista on ollut koko sen toteutuksen ajan rakentava ja positiivinen. Tulosten hyödyntäjiä ovat sen toteutuksessa mukana olleet yritykset - niin suuret kuin pienet. Tulokset on koettu lähes kokonaisuudessaan sekä yksittäisiä ruiskuvaluyrityksiä että koko maamme teollisuutta kehittäviksi. Syntynyt IMPA -ohjelmisto osoittautui toimivaksi ruiskuvaluprosessin optimoijaksi varsinkin suurten sarjojen tuotannossa. Niin ikään konenäköosaamisen kehittyminen ja vieminen entistä lähemmäksi tavallista ruis-

kuvaluprosessia ja sen laadunvalvontaa olivat merkittäviä projektimme tuloksia. Materiaalitutkimuksen puolella avattiin puolestaan uusi tutkimusalue, kun ruiskuvaluparametrien vaikutusta tuotteen mikrorakenteeseen ja ominaisuuksiin lähdettiin tutkimaan.

Intensiivisestä tutkimuksesta huolimatta myös kehitettävää jäi. Kaukaisena tavoitteena ollut mahdollisuus siirtyä ruiskuvalussa täysin miehittämättömään prosessinvalvontaan lähestyi, mutta jäi vielä haaveeksi. Samoin konenäön tutkimuksen koettiin vasta saaneen hyvän alun. Tämän ohella PK-yritykset jäivät kaipaamaan mm. "asentajan Taguchin" soveltamista arkipäivän teollisten prosessien laadunparantamiseen. Kehitys- ja tutkimustyö jatkuukin IDEAL -projektin jälkeen kaikilla näillä osa-alueilla.

Haluamme kiittää kaikkia IDEAL -projektiin osallistuneita yrityksiä sekä muita yhteistyökumppaneita. Erityisesti haluamme kiittää projektin käynnistämiseen vaikuttaneita ydinhenkilöitä, Kai Syrjälää (Nokia Oyj) sekä Margareetta Ollilaa ja Mika Sievi-Kortetta (Tekes). Myös projektin johtoryhmän jäsenet ansaitsevat suurkiitokset aktiivisesta mukana olostaan sekä tutkimusmyönteisestä asenteesta. Ilman teitä tutkimusprojektimme ei olisi saavuttanut sille asetettuja varsin haasteellisia tavoitteita.

Tampereella ja Jyväskylässä joulukuussa 2004

Jukka Silén
Tampereen teknillinen yliopisto

Pasi Koikkalainen
Jyväskylän yliopisto

2 Johdanto

Ruiskuvalun kehittämiseen suunnattu IDEAL -tutkimushanke toteutettiin vuosina 2002 - 2004 Tekesin ja yritysten rahoituksella. Hankkeen tavoitteena oli löytää teknisiä lähestymistapoja ruiskuvalutuotannon laadun, tehokkuuden ja joustavuuden kehittämiseen. Tavoite liittyy moderniin liiketoiminta-ajatukseen, jossa ruiskuvaluyritys toimii osana laajempaa kokonaisuutta ja joutuu sen vuoksi mukautumaan toimintaympäristön vaatimuksiin ja kansainväliseen kilpailuun. Käytännössä tämä edellyttää mm.

- tuotteiden ja tuotantoprosessien laadunarvioinnin kehittämistä,
- laatuun vaikuttavien tekijöiden identifiointia,
- laadun optimoinnin ja ohjauksen kehittämistä sekä
- tuotantoprosessien kehittämistä entistä mukautuvammiksi ja tehokkaammiksi.

Tässä suhteessa IDEAL ei ollut alan ensimmäinen eikä viimeinen hanke, sillä viime vuosina suomalainen ruiskuvaluteollisuus on kasvattanut tutkimus- ja tuotekehitystoimintaansa. Tekesin aiemmat teknologiaohjelmat RUL (Ruiskupuristustuotteen liiketoimintaketju) ja Pro Muovi ovat toimineet tässä suhteessa ensiaskeleina, joissa on saavutettu riittävä kypsyyden alan kotimaisen perusinformaation jakamiseen ja vastaanottamiseen eri yritysten välillä. IDEAL -hanke edusti askelta kohti seuraavaa vaihetta eli osaamisen nostoa kohti kansainvälisen tason tutkimusta ja tuotekehitystä yhteistyössä tutkimuslaitosten kanssa.

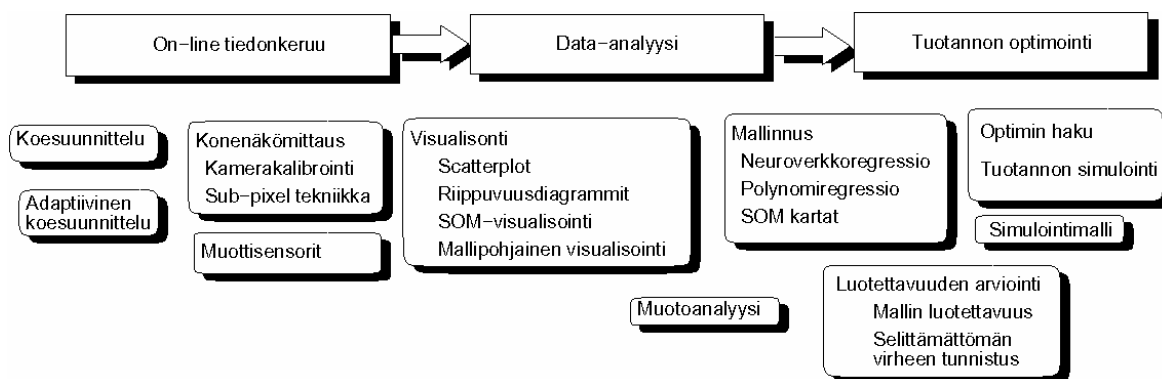
IDEAL -hankkeessa laadun ja joustavan tuotannon kehittämisen ongelma ymmärrettiin siten, että muoviteollisuuden T&K-toimintaa on laajennettava normaalin muovien materiaalitekniikan ulkopuolelle yhdistäen osaamista usealta eri tieteenalalta: materiaalitekniikasta, matematiikasta, tilastotieteestä ja tietotekniikasta. Käytännössä tämä toteutui kuvan 1 kaltaisina osatehtävinä ja niiden välisinä riippuvuuksina.

Hankkeen materiaaliteknisessä osuudessa tutkittiin ruiskuvaluprosessiparametrien vaikutusta kappaleen laatuominaisuuksiin ja mikrorakenteeseen. Tutkimusta varten suunniteltiin laatikkomainen koekappale ja suoritettiin tällä koeajoja. Tutkittavat materiaalit valittiin niin, että joukossa oli amorfinen, osakiteinen ja lujitettu materiaali. Koeajojen avulla pyrittiin tutkimaan laatuominaisuuksien, kuten mittatarkkuuden ja visuaalisen laadun, ennustettavuutta asetettujen prosessointiarvojen ja muotista mitattujen olosuhteiden (p , T) seurauksena. Kappaleiden laatuominaisuuksia pyrittiin ennustamaan myös FEM -simuloinnein käyttäen kaupallista ohjelmaa. Lisäksi tuotettujen kappaleiden rakennetta tarkasteltiin mikroskooppisin menetelmin pyrkien löytämään yhteyksiä kappaleen rakenteen ja prosessiolosuhteiden välille.

IDEAL -hankkeen toinen kokonaisuus liittyi tuotantoprosessin kehittämiseen reaalisien datan pohjalta. Projektissa kehitettiin uudentyyppisiä on-line -mittaukseen soveltuvia tiedonkeruun menetelmiä, esimerkiksi konenäköä hyödyntäviä järjestelmiä, ja kerätyn tiedon hyödyntämiseen tarvittavia data-analyysin työkaluja.



Kuva 1. Yhteenvedo projektin osatehtävistä ja niiden välisistä riippuvuuksista.



Kuva 2. Joustavan tuotannon komponentit IDEAL -projektin näkökulmasta.

Olennaista näissä on-line -mittauksissa ja niihin liittyvissä analyyseissä on, että mitattua dataa voidaan analysoida suoraan liukuhihnalta ja näin korvata perinteinen, hidas ja kallis laboratoriomittaus. Samalla mahdollisuudet tuotannon laadun arvioitiin, ohjaamiseen ja nopeisiin muutoksiin paranevat huomattavasti. Toisaalta mittauksia voidaan käyttää myös tuotannon laadun seurantaan, sillä konenäköjärjestelmä mahdollistaa kaikkien tuotettujen kappaleiden mittauksen reaaliajassa. Järjestelmän käytön eri vaiheet ja niitä tukevat laitteistojat ja ohjelmistokomponentit on esitetty kuvassa 2.

Menetelmiä testattiin käytännössä sekä laboratoriokokeiden että teollisuudessa tehtyjen koeajojen avulla. Kokeissa reaaliaikaista dataa kerättiin tarkoitusta varten kehitetyllä konenäkölaitteistolla sekä muotin lämpötila- ja paineantureilla. Keskeinen johtopäätös on, että reaaliaikainen dimensiomittaus on mahdollista ja sen avulla kerättyä tietoa voidaan käyttää koetulosten analysoinnissa ja optimaalisten ajoparametrien valinnassa.

2.1 Projektikonsortio

Tutkimusprojekti IDEAL toteutettiin suomalaisten teollisuusyritysten ja tutkimusyhteisöjen Tekes -rahoitteisena yhteishankkeena. Sen toteutuksen punaisena lankana oli erittäin kattava ja aktiivisesti toimiva yhteistyökehys, joka koottiin alan eturivin yrityksistä. Kehyksen tavoiteltiin edustavan yli 2/3 suomalaisesta ruiskuvalutuotannosta.

Käytännössä tämä kattavuus ylitettiin ja näin pystyttiin varmistamaan, että yrityksissä oleva varsin laaja käytännön osaaminen siirtyisi projektiin.

Projektiin osallistuivat sen toteutuksen aikana erilaisin panostuksin seuraavat ruiskuvalutuotantoa harjoittavat yritykset sekä niiden asiakasyritykset: Foxconn Oy (ent. Eimo Oyj), Inion Oy (vain 1. vuosi), Oy Juho Jussila, Nokia Oyj, Nypro CMS Oy (ent. CMS Industry Oy), Okartek Oy, Perlos Oyj, Plastone Oy ja Uponor Suomi Oy.

Tutkimustyön vastuullisena johtajana toimi kehityspäällikkö TKL Jukka Silén Tampereen teknillisestä yliopistosta. Tutkimustyö toteutettiin tutkijaryhmissä Jyväskylän yliopistossa (JyY) ja Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY).

Jyväskylän tutkimusryhmän johtajana toimi Data-analyysin laboratorion johtaja, TKT Pasi Koikkalainen. Tutkimustyön toteutuksesta vastasivat tutkijoina FT Anssi Lensu ja FM Michael Haranen. Ryhmän toiminnan tavoitteena oli suunnitella ja kehittää uusia työkaluja muovien ruiskuvaluprosessin laadunhallintaan ja toimintatapojen optimointiin sekä kehittää tuotantokäyttöön soveltuvia prototyypinohjelmistoja. Tutkimustyön ohella tavoitteena oli kehittää Suomen muoviteollisuuden yhteistyömuotoja tutkimuslaitosten kanssa. Perinteisten kvalitatiivisten toimintatapojen rinnalle pyrittiin löytämään uusia analyyttisiä, objektiiviseen informaatioon perustuvia toimintatapoja.

Tampereen tutkimusryhmä työskenteli Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratoriossa Jukka Silénin johdolla. Tutkijoina tässä ryhmässä olivat DI Mari Kylmälä, DI Timo Latvakangas ja DI Elina Välipakka. Ryhmä toi projektin toteutukseen ruiskuvalu- ja materiaalitekniikan osaamista sekä linkin yritysten ja tutkimuslaitosten välille. Ryhmän tavoitteena oli syventää olemassa olevaa ymmärrystä ruiskuvaluprosessista ja varsinkin ruiskuvalukappaleen laatuun vaikuttavista tekijöistä. Tutkimusryhmä myös testasi tässä projektissa Jyväskylän yliopistossa kehitettyjen kuin myös olemassa olevien kaupallisten tietotekniikan työkalujen sovellettavuutta ruiskuvalun prosessinhallintaan. Näin luotiin pohja ruiskuvaluprosessin entistä tehokkaammalle hallinnalle sekä hankkeen haasteellisten tavoitteiden saavuttamiselle.

Projektin johtoryhmän muodostivat yritysten, Tekesin ja tutkimuslaitosten edustajat Mikko Laitisen (Nokia Oyj) johdolla.

Johtoryhmän työskentelyyn osallistuivat:

Haapaniemi Jouni (Nypro CMS Oy)
Haranen Michael (JyY)
Havola Pekka (Turku Science Park Oy)
Kinnunen Ari (Foxconn Oy)
Koikkalainen Pasi (JyY)
Kylmälä Mari (TTY)
Laitinen Mikko (Nokia Oyj)
Latvakangas Timo (TTY)
Lehto Juha (Nypro CMS Oy)
Lensu Anssi (JyY)
Lindgren Totti (Inion Oy)
Nummelin Heikki (Okartek Oy)
Ollila Margareetta (Tekes)
Petänen Katja (Inion Oy)
Pylvänäinen Seppo (Plastone Oy)
Pääkkönen Esko J. (Perlos Oyj)
Savo Harri (Oy Juho-Jussila)
Seppä Timo (Foxconn Oy)
Sievi-Korte Mika (Tekes)
Silén Jukka (TTY)
Silvennoinen Mikko (Perlos Oyj)
Smahl Jarmo (Uponor Suomi Oy)
Syrjälä Kai (Nokia Oyj)
Välipakka Elina (TTY)

3 Projektin yleiskuvaus

3.1 Lähtökohta ja tavoitteet

IDEAL -projektin tavoitteet jaettiin kahteen erilliseen toisiaan tukevaan ryhmään. Näistä toinen tavoitteli yritysten liiketoiminnan kehittymistä ruiskuvaluprosessin kehittämisen kautta. Toinen tavoite oli luoda pohjaa pidempiaikaiselle, ruiskuvaluteollisuutta tukevalle kansainvälisen tason tutkimustoiminnalle yliopistoympäristössä.

Liiketoiminnan tehostumisen kannalta tavoitteena oli kehittää ruiskuvaluprosessin hallintaa uusien tietoteknisten työkaluin, jotka mahdollistaisivat lähitulevaisuudessa jopa 25 % tehokkuuden kasvattamisen ruiskuvalun kokonaistuottavuudessa. Tätä toiminnan tehostumista voitaisiin mitata mm. tuottavuuden kasvuna, sykliajan lyhentymisenä ja hukkatuotannon pienentymisenä.

Tämä tavoite oli tarkoitus saavuttaa

- kasvattamalla visuaalisen tarkastustoiminnan automaatiota,
- kehittämällä ruiskuvaluteollisuuden käyttöön konenäön työkaluja,
- prosessin sykliaikaa pienentämällä laadun siitä kärsimättä ja
- virheellisen tuotannon ja ramp-up aikojen minimoimisella.

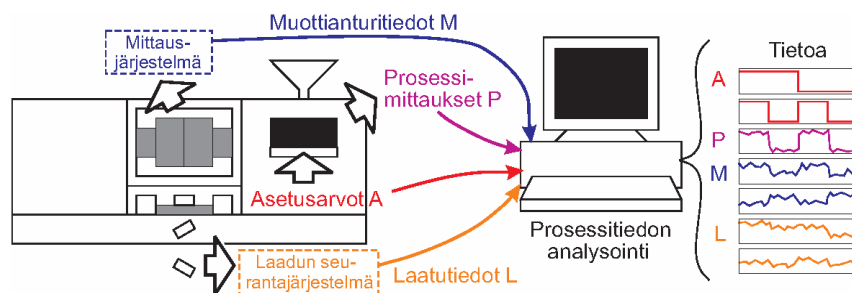
Projektissa kehitettiin ruiskuvaluteollisuuden käyttöön älykkäitä tilastollisia, neuroverkkopohjaisia prosessinhallinnan ja laadunparannuksen työkaluja. Työkaluissa haluttiin hyödyntää uusimpia hahmontunnistuksen, stokastisen geometrian, tietotekniikan ja informaatioteorian menetelmiä, joita ei ollut aiemmin käytetty alan kaupallisissa sovelluksissa. Tämän lähestymistä-

van mahdollisti nykyinen tietotekniikan ja tilastotieteen muutosvaihe, jossa perinteisten menetelmien rinnalle on kehittymässä uusi laskentaintensiivinen menetelmäkonaisuus, jonka osajia maailmalla on toistaiseksi vähän. Teoreettisuudestaan huolimatta menetelmien avulla haluttiin kehittää varsin käytännöllisiä ja helppokäyttöisiä työkaluja ruiskuvaluyritysten tarpeisiin, jolloin edellä mainittu 25 % tuotannon tehostaminen olisi realistinen tavoite.

Konkreettisella tasolla IDEAL -projektissa oli tavoitteena kehittää prototyyppiohjelmistoja ja -laitteistoja, joiden toimivuus ja käytännöllisyys testattaisiin sekä laboratorio-olosuhteissa että teollisuusympäristössä. Niin ikään tavoitteena oli syntyvien tulosten tuotteistaminen ja muuttaminen liiketoiminnaksi siten, että ensimmäinen kaupallinen versio laitteistosta syntyisi projektin kolmannen vuoden loppuun mennessä.

3.2 Kokonaisjärjestelmän kuvaus

Projektissa suunniteltu ja kehitetty data-analyyysijärjestelmä mahdollistaa ruiskuvaluprosessin seuraamisen, tuotannon asetusrvojen optimoinnin, ruiskuvaluprosessin simuloimisen ja prosessin tuotoksen laadunseurannan tuotantoajan aikana. Menetelmien käyttämiseksi tarvitaan suuri määrä sisällöltään hyvälaatuista tietoa, jota voidaan parhaiten kerätä sellaisella online-seurantajärjestelmällä, joka olisi kytketty ruiskuvalukoneeseen, muottiin kiinnitettyihin antureihin ja tuotettujen kappaleiden laatua mittaaviin järjestelmiin (kuva 3).



Kuva 3. Tietojen keruujärjestelmän kaavakuva. Tietoa kerätään koneen asetusrvoista, koneen sisäisestä tilasta, muottiin kytketyiltä antureilta ja tuotetuista kappaleista.

Käytännön kokeissa koneen ja muottiantu-
reiden tiedot kerättiin käyttäen kaupallisia
järjestelmiä: ruiskuvalukoneiden omia oh-
jelmistoja ja Continuous Quality Control
(CQC) -tiedonkeruujärjestelmää. CQC
-järjestelmä (valmistaja Dr. Gierth In-
genieurgesellschaft mbH) oli valmis koe-
ajojärjestelmä, joka kerää tiedon sekä
ruiskuvalukoneelta että muottiantureilta ja
käsittelee sen.

Tuotettujen kappaleiden laatumietoja kerät-
tiin konenäkökameraan perustuvalla itse
kehitettyllä mittausjärjestelmällä, optisilla
mittauskoneilla ja ihmistyönä tehdyllä pin-
nanlaadun tarkastuksella. Projektissa kehi-
tetyt laadunseurannan menetelmät olisivat
kuitenkin suoraan yhdistettävissä proses-
sin on-line -seurantajärjestelmään. Tär-
keintä silloin olisi se, että kaikki muutkin
tietoa keräävät järjestelmät ovat riittävän
nopeita, itsenäisesti (ilman ihmistyötä)
toimivia, prosessin kanssa synkronoidusti
eteneviä, kattavan määrän tietoa antavia
sekä tiedon keräämisen yhdelle tietoko-
neelle mahdollistavia.

Kun tietoa on kerätty paljon ja eri lähteistä,
tarvitaan sen taustalla olevien ilmiöiden
selvittämiseen monipuolinen data-
analyysiohjelmisto. Projektin yhteydessä
on toteutettu oma ohjelmisto, Injection
Molding Process Analysis (IMPA), jonka
menetelmätaustaa esitellään luvussa 4.
Ruiskuvalukoneen data-analyysin ja siihen
liittyvien menetelmien tarkempi käsittely on
esitetty projektissa tuotetuissa raporteissa.

3.3 Teollisuudessa tehdyt koeajot

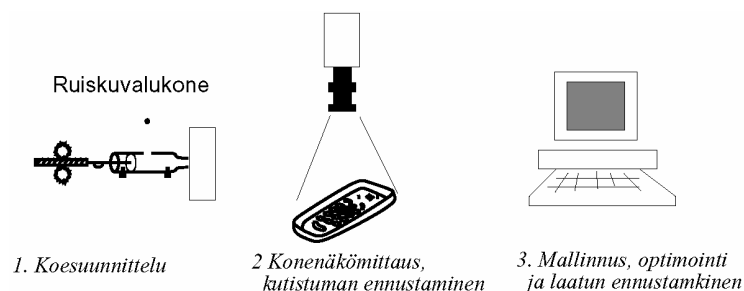
Kehitettyjä menetelmiä testattiin projektin
aikana sekä tutkimuslaboratoriossa että
teollisuusympäristössä. Projektin aikana
CQC -koeajo- ja tiedonkeruujärjestelmää

testattiin seuraavissa yrityksissä: Foxconn
Oy, Perlos Oyj ja Uponor Suomi Oy. Li-
säksi koeajoja suoritettiin myös Okartek
Oy:ssä.

Laajat teollisuusympäristössä tehdyt koe-
ajot suoritettiin kolmessa vaiheessa Perlos
Oyj:n Ylöjärven tehtaalla yrityksen R&D
-yksikön henkilöstön avustuksella. Koeajo-
jen yksityiskohdat ja tulokset on esitetty
erikseen luvussa 11, mutta tässä yhtey-
dessä esitetään lyhyesti koeajojen yleiset
ja yhteiset tavoitteet. Tarkoituksena oli
tutkia:

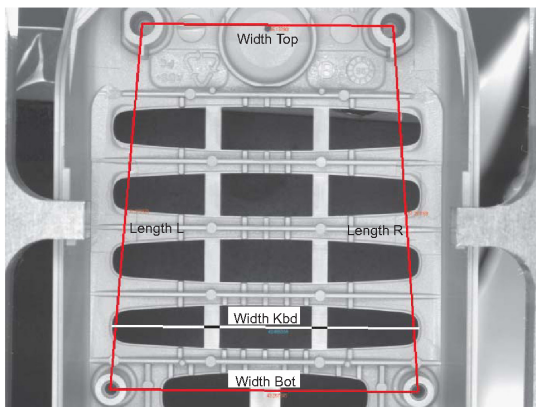
- Onko kehitetty konenäköön perustuva
mittausjärjestelmä riittävän toimiva ja
tarkka teollisuusympäristössä käytet-
täväksi?
- Voidaanko tilastollisiin mallinnusme-
netelmiin perustuviin laadun ennus-
tusmalleihin ja asetusarvojen opti-
moinnin tuloksiin luottaa?
- Voidaanko koesuunnittelua tehdä jo-
tenkin paremmin, jotta sen kokonais-
kustannuksia ja siihen kuluva aiaa
saataisiin pienennettyä?

Teollisuusympäristöstä ja on-line -käytöstä
johtuen koeajoja varten rakennettiin uutta
laitteistoa ja toteutettiin uusia ohjelmia
sekä oman mittausjärjestelmän että teolli-
suusrobotin yhteyteen. On-line -käyttö
vaatii myös sen, että kappaleiden jäähtymi-
sestä aiheutuvan kutistumisen määrää tuli
tutkia ja mallintaa. Koesuunnittelustrategi-
oiden kehittämiseksi toteutettiin kolme
kilpailevaa menetelmää, joita testattiin
ensin itse kehitetyn ruiskuvalukonetta si-
muloivan ohjelman avulla. Kuva 4 esittää
laadunseurantajärjestelmän kaavakuva ja
osoittaa tutkimuksellisesti haasteelliset
osuudet.



Kuva 4. Testijärjestelmän kaavakuva, johon on merkitty tutkimuksellisesti haastavat asiat kursivoituna (kolme numeroitua kohtaa)

Kun laboratoriotestien yhteydessä käytettiin yksinkertaista laatikon muotoista kappaletta, teollisuusympäristön testiin saimme käyttöön Nokia Oyj:n suostumuksella matkapuhelimen muovikuorien tuotantoon käytetyn muotin. Kyseisellä muotilla tuotettavat kuoret olivat sellaisia, että niistä voitiin hyvin määrittellä laadunseurannan kannalta mielekkäitä mittauskohteita. Yksi mitoista oli kahden eri näppäimen reunojen välinen etäisyys, muut neljä mittaa puolestaan olivat kuoren kiinnitykseen käytettävien ruuvitornien keskusten välisiä etäisyyksiä (katso kuva 5).



Kuva 5. Testauksessa käytetyn kappaleen kuva, johon on merkitty käytettävät mitat. Neljä mitoista oli samalla korkeudella olevien ruuvitornien keskipisteiden välisiä etäisyyksiä ja yksi oli näppäimistön leveyteen liittyvä mitta.

3.4 Keskeiset tulokset ja kehitettyä tekniikkaa

IDEAL -hanke oli tavoitteeltaan varsin kunnianhimoinen ja laaja-alainen, mikä näkyy myös erityyppisten tulosten laajana kirjona. Osa tuloksista on mitattavissa esimerkiksi dimensiomittojen toleranssien kautta, kun taas osa tuloksista on luonteeltaan havainto-tyyppistä eli ruiskuvaluprosessiin liittyvän asiantuntemuksen kasvua. Tämäntyyppiselle hankkeelle on myös luonnollista että eräissä osatehtävissä onnistuttiin paremmin kuin toisissa.

Seuraavassa on esitetty projektin aikana kehitettyä tekniikkaa:

Konenäköpohjainen on-line -mittausjärjestelmä mahdollistaa dimensiomittauksen suoraan liukuhihnalta korvaten hitaan laboriomittauksen. Mittausjärjestelmä hyödyntää uutta tekniikkaa, joka pystyy digitaalikameran pikselin 1/20 osan mitaustarkkuuteen. Suhteellisen halvalla (noin 2000 - 5000 €) järjestelmällä päästään kaupallisten, yli 100 000 € maksavien laboriomittalaitteiden tarkkuuteen. Järjestelmä sisältää mm. kalibrintilevyyn perustuvan linssivääristymien korjausmallin. Menetelmät ovat implementoitavissa älykameraan, jolloin tietokonetta ei välttämättä tarvita laaduntarkastuslinjalla.

Muotoanalyysi kehitettiin kappaleiden vääristymien analysoimiseksi. Sillä voidaan selvittää kappaleiden päävääristymien suunnat. Muotoanalyysi voidaan yhdistää koesuunnitteluun ja muuhun data-analyysiin, mikä mahdollistaa mm. vääristymien taustatekijöiden selvittämisen.

IMPA data-analyysiohjelmisto kehitettiin työkaluksi, jolla voidaan analysoida ruiskuvalusta kerättävää dataa, luoda koesuunnittelustrategioita sekä tehdä ennustusmalleja. Ohjelmisto sisältää mm. seuraavat ominaisuudet:

- kerätyn datan visualisointi eri tavoin
- mallinnus regressiomalleilla ja neuroverkoilla
- mallin ja muuttujien automaattinen valinta
- optimaalisten ajoparametrien haku
- ennustusvirheiden arviointi
- tuotannon simulointi

Ohjelmisto on vapaasti projektiin osallistuneiden yritysten käytettävissä.

Data-analyysin koulutuspaketti perehdyttää IMPA -ohjelmiston käyttöön ja tyyppillisen ruiskuvalusta kerätyn datan analysointiin.

4 Data-analyysi ruiskuvalun apuna

IDEAL -projektissa muovin ruiskuvalun kehittämismahdollisuuksia on selvitetty uusien tietoteknisten menetelmien, tilastollisen mallintamisen ja data-analyysin avulla. Tietotekniikan roolina on toteuttaa tiedonkeruu ja analysointi. Toteutuksen taustalla on joukko teoreettisia, tilastollisia malleja kuten esimerkiksi:

Malli asetusten vaikutuksesta laatumuuttujiin, joka tehdään koeajoista kerätyn tiedon perusteella. Tällä mallilla voidaan määrätä prosessin optimaaliset ajoarvot.

Malli kamerakalibrointiin, jolla muunnetaan digitaalisen kameralla otetun kuvan informaatio luotettaviksi mittauksiksi.

Malli jäähtymisen aiheuttamiin muodonmuutoksiin, jolla arvioidaan lämpimän kappaleen mittojen ja lämpötilajakauman pohjalta lopullisia, jäähtyneen kappaleen mittoja.

Malli tuotannon simulointiin, jolla voidaan kokeilla tuotantoa ja sen vaihtelua erityyppisillä asetusrvoilla tietokoneohjelman avulla ennen oikean tuotannon aloittamista.

Malli vikojen ennustamiseen muottianturien avulla, jossa esimerkiksi muottianturien avulla ennustetaan syntyvän kappaleen ominaisuuksia. Tätä voidaan soveltaa tuotannon häiriöiden havaitsemiseen ja viallisten kappaleiden karsintaan.

Malli kappaleiden muodonmuutoksista, jonka avulla voidaan tutkia mitä muodonmuutoksia prosessimuuttajat, kuten asetusrvot, aiheuttavat.

Mallin luotettavuuden ennustusmalli, jonka avulla edellä kuvattujen mallien antamille tuloksille voidaan määrätä varmuusrajat. Kun luotettavuusmallin ilmoittama epävarmuus lisätään simuloidun tuotannon vaihtelua kuvaaviin tekijöihin, saadaan esimerkiksi 99.9 % varmuus, että todellinen tuotanto on ainakin yhtä hyvää kuin simuloitu tuotanto.

Edellä kuvatun kaltainen mallintaminen pohjautuu tilastolliseen teoriaan. Teoriaa ja käytäntöä ei kuitenkaan ole mahdollista yhdistää ilman asiantuntijoiden päättelyä, mikä taas edellyttää datan analysointia.

4.1 Mihin data-analyysiä tarvitaan?

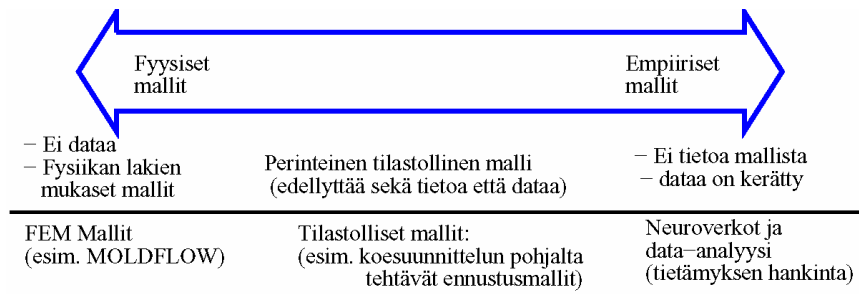
Data-analyysin tehtävänä on löytää reunaehdot ja käyttötavat, joilla tilastollisia malleja voidaan soveltaa reaali maailman dataan. Tämä on tärkeä, mutta vaativa tehtävä sillä teoreettiset mallit ovat harvoin suoraan sovellettavissa käytännön ongelmiin. Syitä tähän soveltamisen ongelmaan ovat mm.

- reaali maailman monimuotoisuus ja kompleksisuus,
- havaintoaineistossa olevat virheet ja puutteet,
- tiedon suuri määrä,
- tiedon hankala muoto tai rakenne, jolle ei ole valmiita ratkaisuja,
- tietämyksen puute tietojen taustalla olevasta ilmiöstä tai sen tekijöistä,
- tulosten luotettavuuden arvioinnin vaikeus ja
- inhimilliset ja laadulliset tekijät.

Ongelman ydin on, että mallin taustalla on vahvoja oletuksia, kuten tiedon virheettömyys tai tietyn jakauman mukainen käyttäytyminen. Käytännön data ei kuitenkaan vastaa näitä oletuksia vaan dataa on muokattava tai mallin rakennetta on sovittava käytettävissä olevalle datalle sopivaksi. Sen vuoksi mallintajan on tutkittava ja analysoitava dataansa. Erään määritelmän mukaan data-analyysin onkin prosessi, joka rakentaa relaation datan ja tietämyksen välille:

Data-analyysi = data + laskennallinen malli + laadullinen tieto (inhimillinen tieto)

Näkemyks sisältää ajatuksen, että jokaisen matemaattisen mallin takana on myös laadullista (inhimillistä, subjektiivista) tietoa, joka on osattava erottaa eksaktista tiedosta.



Kuva 6. Eräs näkemys mallintamisen kenttään.

4.2 Mallinnus ja data-analyysi

Muovien ruiskuvalun yhteydessä mallinnuksen kohteena on usein tuotteen tai tuotantoprosessin käyttäytyminen. Mallinnus voidaan tehdä joko tunnettuja matematiikan ja fysiikan lakeja hyödyntäen tai empiirisesti havaintoaineistoon sovitamalla, mitä on havainnollistettu kuvassa 6.

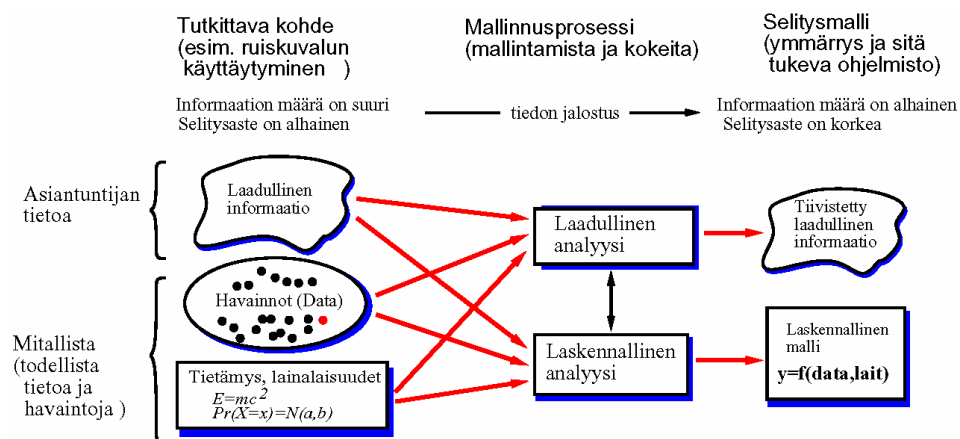
Tehtävä on samankaltainen numeeriselle mallintamiselle, esimerkiksi FEM tyyppiselle muovien virtaussimuloinnille, kuin myös tilastolliselle eli datan pohjalta tehdyille mallille. Tavoitteena on aina löytää ilmiölle paras mahdollinen approksimoiva malli, joka on monissa tapauksissa yksinkertaisin ja luotettavin selitys tutkittavasta ilmiöstä. Näin siksi, että monimutkaisia, mutta samalla erilaisia vastauksia antavia malleja voidaan tuottaa lähes loputtomasti. Monimutkaisen mallin luotettavuus onkin yleensä kyseenalainen.

Mallien soveltuvuus käytäntöön onkin aina selvittävää. Selvityksen tuloksena saattavat työn alussa tehdyt ennako-oletukset muuttua, mikä johtaa helposti uusiin kokei-

luihin ja oivalluksiin. Joissakin tapauksissa pelkkä mallinnusprosessi onkin tärkeämpi kuin ideaalinen lopputulos, jota ei kenties koskaan saavuteta. Mallinnusprosessi ja siihen liittyvä tiedon analysointi on tällöin vain systemaattinen tapa jatkuvaan toimintatapojen kehittämiseen.

Mallinnuksessa yhdistyy erityyppisten tietolähteiden vaikutus. Objektivistia tietoa ovat havainnot ja lainalaisuudet, joita käytetään laadullisen (kvalitatiivisen ja subjektiivisen) tietämyksen puitteissa.

Mallinnus voi myös johtaa useisiin vaihtoehtoihin malleihin, jotka selittävät kohteen eri tavoin ja ovat sovelluksen kannalta yhtä hyviä. Esimerkiksi joissain tapauksissa kappaleeseen syntyvää muodonmuutosta voisi ennustaa kahdella vaihtoehtoisella mallilla, joista toinen ennustaa muodonmuutosta jälkipaineen ja toinen muotin lämpötilan avulla. Kumpikaan malli ei välttämättä tunnista muodonmuutoksen todellista syntymekanismia, mikä ei ole välttämätöntä pelkän ennustustehtävän tapauksessa.



Kuva 7. Mallinnusprosessi yhdistää asiantuntijan ja faktat: datan ja tietämyksen.

4.3 Data-analyysin toteutus IDEAL -projektissa

Eräänä IDEAL -projektin tavoitteena oli helpottaa ruiskuvaluprosessin analysointia tietoteknisin työkaluin. Tavoitteen saavuttamiseksi koottiin keskeiset mallinnuksessa tarvittavat työkalut kompaktiksi IMPA (Injection Molding Process Analysis) -ohjelmistopaketti (kuva 8). Ohjelmiston suunnittelun kriteereit^ä olivat:

- yleiskäyttöisyys monentyyppisiin mallinnustehtäviin
- selkeys ja opettelu helppokäyttöisyys
- ruiskuvaluprosessin kokonaisuuden hallinta

Edellä kuvatut tavoitteet ovat osin ristiriitaisia sillä yleiskäyttöisyyttä ja helppokäyttöisyyttä ei aina ole mahdollista yhdistää. IMPA -ohjelmistossa lopputulokseen on pyritty ohjelmiston rakenteen huolellisella jäsentämisellä selkeisiin toimintarakenteisiin:

Case tiedon hallinta, jonka avulla kootaan joukko prosessin analysointiin liittyviä malleja ja dataa yhtenäiseksi kokonaisuudeksi.

Datan manipulointi, jonka avulla voidaan muokata, yhdistellä ja paloitella datajoukkoja kulloiseenkin käyttötarkoitukseen soveltuvaksi.

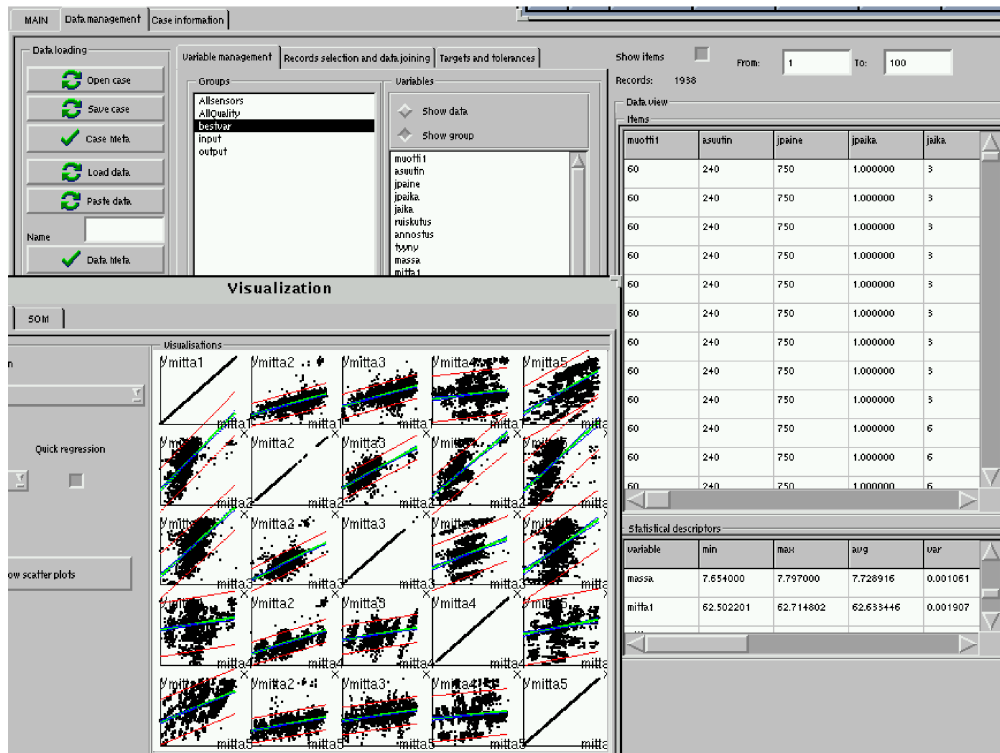
Datan visualisointi, joka tarjoaa perustyökalut ruiskuvalun datan tutkimiseen.

Mallinnus, joka kattaa sekä perinteiset lineaariset regressiomallit, että neuroverkkopohjaisen mallintamisen.

Simulointi, joka perustuu tuotannon tilastollisen käyttäytymisen mallintamiseen.

Koesuunnittelu, jolla voidaan laatia koesuunnitelma. Käytössä on myös adaptiivinen koesuunnitelma.

Ohjelmiston käyttöä on pyritty helpottamaan laatimalla yksityiskohtaisia ja selkeästi opastettuja toimintaproseduureja, joita noudattamalla voidaan suorittaa ruiskuvaluprosessin analysoinnissa tarvittavia toimenpiteitä: koesuunnittelua, mallin rakentamista ja johtopäätösten tekemistä.



Kuva 8. Eräs näkymä IMPA -ohjelmiston käyttöliittymään.

5 Tiedonkeruu ruiskuvaluprosessissa

5.1 Tiedonkeruu ja sen hyödyt

Tiedonkeruussa prosessista sananmukaisesti kerätään tietoa, esimerkiksi vallitsevista prosessiolosuhteista, prosessiin vaikuttavista tekijöistä ja syntyvän tuotannon laadusta. Tiedon keräämiseen tarvitaan aina jonkinlainen laitteisto. Laitteisto voi olla rakennettuna sisään itse prosessilaitteisiin tai se voi olla täysin erillinen, useasta kohteesta tietoa keräävä laitteisto. Tiedonkeruu voi tapahtua joko jatkuvana, reaaliaikaisena tiedonkeruuna tai näytteistämällä eli keräämällä tieto tietyin väliajoin.

Ruiskuvaluprosessissa tietoa voidaan kerätä esimerkiksi ruiskuvalukoneelta ja sen oheislaitteilta, prosessi- ja muottiantureilta ja prosessiin liitetyiltä mittausteilta. Tiedonkeruuta voidaan käyttää moniin tarkoituksiin.

Tiedonkeruun tärkeimpiä käyttökohteita tällä hetkellä ovat prosessinvalvonta ja laadunvarmistus. Prosessinvalvonnassa tietoa kerätään yleensä ruiskuvalukoneelta ja antureilta, ja kun tietty, käyttäjän määrittelemä raja-arvo ylittyy, saa käyttäjä hälytyksen. Moni ruiskuvalukoneen valmistaja tarjoaakin nykyisin omia valmiiksi integroitua tiedonkeruujärjestelmiään tällaiseen on-line valvontaan.

Laadunvarmistuksen osalta asiakkaat vaativat yhä useammin dokumentaatiota ja mitattua tietoa prosessien suorituskyvystä ja tuotteiden laadusta jo pelkästään laatu-järjestelmien asettamien vaatimusten takia. On myös sovelluksia, joissa toimittajan pitää pystyä jäljittämään jo markkinoilla olevat tuotteet aina prosessiin ja siellä vallinneisiin olosuhteisiin asti.

Tulevaisuudessa tiedonkeruun käyttö tulee olemaan jo enemmän myös prosessinohjauksen puolella eli ei pelkästään pyritä varmistamaan tuotettujen kappaleiden laatua, vaan pyritään ohjaamaan prosessia reaaliaikaisesti ja saavuttamaan koko ajan mahdollisimman laadukkaita tuotteita.

5.2 Ruiskuvalukoneelta kerättävä tieto

Itse ruiskuvalukoneelta voidaan kerätä lähes mitä tahansa koneen ohjaukseen, liikkeeseen tai mittaukseen perustuvaa tietoa. Tällaista tietoa ovat esimerkiksi koneen hydraulinen paine, ruuvien liikematka ja nopeus, muotin liikkeet ja koneen häiriötilat.

Kerätyt tiedot ovat yleensä analogisten tai digitaalisten signaalien muodossa eli niiden keräämiseen voidaan tarvita erillisiä tiedonkeruukortteja tai muuntimia. Nykyisin kuitenkin lähes kaikilla koneenvalmistajilla on ohjelmistot, joilla tiedonkeruu onnistuu ilman erillisiä laitteita. Näiden ohjelmistojen huono puoli on se, että ne ovat yleensä konekohtaisia eikä ohjelmiin saa välttämättä muita ulkopuolisia signaaleja, kuten anturidataa. Tällöin järjestelmiä pitäisi olla useampia. Myöskään kerätyn tiedon käsittely ei näissä ohjelmissa ole yleensä kovin helposti tehtävissä ja tiedon hyväksikäyttö voikin olla vaikeaa. Erillisissä, esimerkiksi laadunvarmistukseen suunnitelluissa ohjelmistoissa, tiedon käsittely, tallettaminen ja hyödyntäminen ovat usein helpompaa.

5.3 Muotin sisäiset lämpötila- ja paineanturit

Vaikka ruiskuvaluprosessia on mahdollista tutkia käyttäen muuttujina vain koneen asetusarvoja ja tuotetusta kappaleesta mitattuja laatutekijöitä, saadaan jatkuvan muottianturidatan avulla tarkempaa ja yleensä myös varmempaa tietoa prosessin toiminnasta ja mahdollisista virhetilanteista. Jatkuva anturitieto muotissa vaikuttavista olosuhteista ja niiden muutoksista tuotannon aikana antaa usein hyvän kuvan tuotettavan kappaleen ominaisuuksista jo ennen kuin se on poistunut muotista. Myös prosessin optimoinnissa muotista mitattua tietoa on helppo hyödyntää. Esimerkiksi optimaalisen vaihtopisteen eli ruiskutuksesta jälkipaineelle siirtymiskohdan saa tarkemmin selvitettyä muottipaineen muutoksesta kuin ruiskuvalukoneen hydraulikan painetasosta.

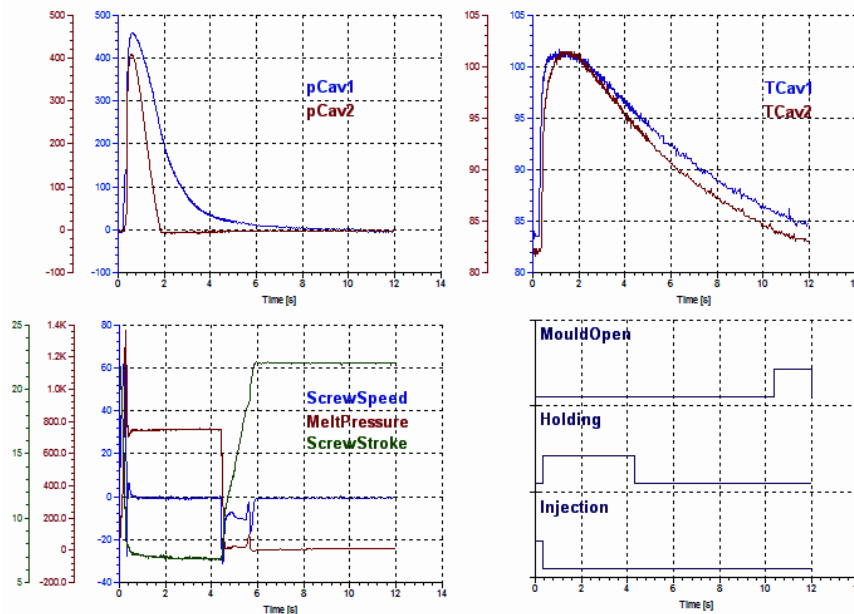
Muotinsisäisten paine- ja lämpötilantureiden avulla ruiskuvaluprosessiin on myös mahdollista kehittää reaaliaikainen laaduntarkkailujärjestelmä. Muutokset muottipesässä vaikuttavissa paine- ja lämpötilatasoissa paljastavat prosessissa tapahtuneen virheen, joka yleensä on jonkin asetusmuuttujan säätöarvon ylittyminen tai alittuminen. Kun laitteisto on ohjelmoitu tarkkailemaan prosessia, voidaan ennalta määritellyn toleranssirajan ylittäviä prosessiarvoja tulkita tuotettavan kappaleen laadun muutoksena. Muotin sisältä mitattava tieto on useissa tapauksissa tuotannon laadun kannalta oleellisempaa kuin ruiskuvalukoneen hydraulikasta tai osien liikkeistä mitattu.

5.4 Tiedonkeruu ja koeajot TTY:llä

IDEAL -projektin aikana suoritettiin lukuisia ruiskuvalukoeajoja Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) ja yrityksissä. Tavoitteena oli arvioida ja kehittää menetelmiä, jotka nopeuttavat uuden tuotteen tuotannon aloittamista ja parantavat tuotannon laatua. Koeajoissa muun muassa selvitettiin eri prosessointiasetusten vaikutusta tuotteen ominaisuuksiin sekä tutkittiin yksinkertaisten tilastollisten laskentamallien käyttöä ruiskuvaluprosessin kuvaamisessa. Ruiskuvaluprosessista laskettuja tilastolli-

sia malleja voidaan käyttää esimerkiksi prosessin optimoimiseen tai reaaliaikaisen laadunvalvonnan työkaluna. Koeajojen perusteella tutkittiin myös muottiin asennetuilta paine- ja lämpötilantureilta kerätyn tiedon hyödyntämistä prosessin tarkkailussa ja hallinnassa. Koeajoissa tutkittiin pääasiassa seuraavia materiaaleja: Cycloy C1000HF (ABS+PC) -seos, Valox 260 HPR PBT ja Zytel 70G30 HSL lasikuituluji-tettu PA66.

Muotin antureilta ja ruiskuvalukoneelta saatavien tietojen keräykseen ja käsitteilyyn käytettiin Continuous Quality Control (CQC) -laitteistoa (valmistaja Gierth & Wybitul Ingenieurgesellschaft mbH, nyky. Dr. Gierth Ingenieurgesellschaft mbH). Tämä Tampereen teknillisellä yliopistolla käytössä oleva laitteisto koostuu kahdesta osasta, ruiskuvalukoneeseen liitettävästä tiedonkeräyslaitteistosta ja kerätyn tiedon käsitteilyyn tarkoitettuun tietokoneohjelmistosta. Koeajon aikana CQC -tiedonkeräyslaite saa ruiskuvalukoneelta jatkuvaa tietoa prosessoinnin tapahtumista ja koneen tilasta. Lisäksi CQC -laitteisto tallentaa muotin antureilta saatavaa reaaliaikaista tietoa muottipesän sisällä vaikuttavasta lämpötilasta ja paineesta.



Kuva 9. Esimerkki ruiskuvaluprosessista kerättävästä tiedosta. Ylhäällä vasemmalla paineanturien signaalit ja ylhäällä oikealla lämpötila-antureiden signaalit. Alhaalla koneen signaalit, vasemmalla analogiset ruuvin nopeus, ruiskutuspainne ja ruuvin asema, oikealla digitaaliset muotin liike, jälkipaine ja ruiskutus.

Esimerkiksi TTY:n Fanuc Roboshot α 30C -ruiskuvalukoneesta CQC -laitteisto kerää jokaisesta tuotantosyklistä analogiset signaalit ruuvista mitatusta paineesta, ruuvin asemasta, ruuvin nopeudesta, muottipesän paineesta ja muottipesän lämpötilasta. Edellisten lisäksi laitteisto saa ruiskuvalukoneelta digitaalisen signaalin muotin avautumisesta ja sulkeutumisesta, ruisku- tuksen alkamisesta sekä jälkipainevaiheen alkamisesta (kuva 9).

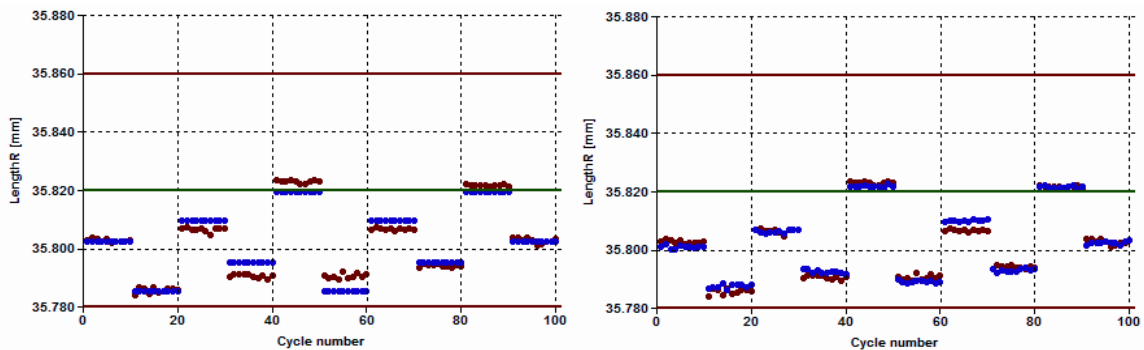
Eri prosessointiasetusyhdistelmiä testaa- van koeajon jälkeen CQC -laitteiston ke- räämä tieto tuotantosyklar aikana rekiste- röidyistä muuttujien arvoista siirretään CQC Office -tiedonkäsittelyohjelmaan. Myös tuotetut kappaleet mitataan ja arvos- tellaan valittujen laatutekijöiden osalta. Ohjelma laskee kerätystä tiedosta proses- sin toimintaa kuvaavia tunnuslukuja sekä luo regressiomalleja muuttujien välisistä vaikutussuhteista. Lasketut mallit kertovat kuinka esimerkiksi tietyn ruiskuvalukoneen asetusarvon muuttaminen vaikuttaa kap- paleen dimensioihin tai muihin laatutekijöi- hin. Tämän tiedon avulla prosessin opti- mointi nopeutuu ja helpottuu huomattavas- ti, koska nyt on mahdollista suoraan laskea, millä prosessointiasetusyhdistelmällä tuo- tetaan vaatimukset täyttäviä kappaleita.

Tilastollisten mallien avulla voidaan myös tarkastella todellisten, prosessista mitattu- jen arvojen korrelaatiota tuotannon laatuun. Esimerkiksi muutos sulan lämpötilassa voi kertoa muutoksesta tuotettavassa kappalaessa. Kun on selvitetty kuinka prosessin muuttuminen vaikuttaa tuotteeseen, voi-

daan tätä tietoa voidaan hyödyntää hel- posti automaattisessa laaduntarkkailussa. Laaduntarkkailulaitteistolle määritetään millä alueella sen tarkkailemat muuttujat sekä näistä lasketut arvot saavat liikkua, ilman että tuotannon laatu heikkenee

Koeajoissa havaitsimme muottiin integ- roiduilta paine- ja lämpötila-antureilta kerä- tyn tiedon erittäin tärkeäksi tekijäksi tutkit- taessa mahdollisuutta selittää kappaleen ominaisuuksissa esiintyviä eroavuuksia. Esimerkiksi Cycloy (ABS+PC) materiaalil- la muottipesässä vaikuttavasta painetasos- ta lasketut mallit pystyivät selittämään lähes kaiken kappaleen dimensioissa ha- vaitun hajonnan.

Suoritettujen testien perusteella lineaariset regressiomallit osoittautuivat toimivaksi menetelmäksi ruiskuvaluprosessin analy- soimisessa. Regressiomallit kykenivät ennustamaan hyvin tuotettavan kappaleen laatutekijöiden arvot sekä yksinkertaisella testikappaleella että oikean tuotteen koh- dalla. Toisaalta on huomattava, että koe- ajoissa muutettiin yleensä vain enintään neljää prosessointiasetusta, jolloin proses- sin toiminta on vielä melko yksinkertaisesti selitettävissä. Myöskään tuotetuissa kap- paleissa havaittavia visuaalisia virheitä ei tämän projektin puitteissa selitetty regres- siomallien avulla. Regressioanalyysi ei ole kovin hyvä menetelmä kuvaamaan katego- risesti tai kvalitatiivisesti arvosteltuja muut- tujia, kuten visuaalisesti tarkasteltuja pin- nanlaadun virheitä, mutta dimensioiden ennustamisessa se toimii hyvin.



Kuva 10. Esimerkki yhdelle kappaleen mitalle tehdyistä koeajoista ja koeajojen perusteella lasketuista ennusteista. Punaiset pisteet ovat koeajoissa tuotetuista kappaleista mitattuja mittoja, siniset ovat koeajojen perusteella tehtyjen mallien laskemia ennusteita. Vasemmalla ennusteet ovat laskettu asetettujen prosessiparametrien perusteella, oikealla ennusteiden laskemisessa on käytetty antureilta kerättyä tietoa.

5.5 Käytännön kokemuksia

Projektin aikana tuli esiin myös joitain ongelmia ruiskuvaluprosessin seurannassa CQC -järjestelmän avulla. Suurin ongelma on standardiliitäntöjen puuttuminen ruiskuvalukonetta ja tiedonkeräysyksikköä liitettäessä. Perusvarustelluissa ruiskuvalukoneissa ei yleensä ole valmiina signaalikortteja prosessinseurannassa tarvittavan datan keräykseen, vaan ne täytyy hankkia lisävarusteena. Kortit ovat melko kalliita sekä niiden asentamiseen ja kytkemiseen tarvitaan yleensä ammattimestä. Täysin automaattiseen prosessinhallintaan kuuluva paluukanava laadunvalvontalaitteistolta ruiskuvalukoneelle kaatuu toistaiseksi myös liitäntämahdollisuuksien puutteeseen ja käytössä olevien tekniikoiden kirjavuuteen.

CQC -laitteisto laskentamallien toimivuudesta huolimatta itse laitteisto on ollut toistaiseksi vielä hieman keskeneräinen. Var-

sinkin tiedonkeräysyksikön ohjelmisto on ollut hankalakäyttöinen ja vaatinut käyttäjältä asiantuntemusta. Viimeisimmän tiedon mukaan tähän on kuitenkin pian tulossa ratkaisu uuden kehitysversion myötä. Laitteiston korkea hankintahinta on myös tehokkaasti estänyt CQC -järjestelmän laajemman leviämisen ruiskuvaluteollisuuteen.

Vaikka saadut kokemukset muottiin asennettavista antureista olivat erittäin positiivisia, on antureiden sovittaminen varsinkin olemassa oleviin muotteihin usein hankalaa. Anturit vaativat oman tilansa jo ennestään ahtaasta ruiskuvalumuotista ja jättävät yleensä tuotteen pintaan jäljen. Anturivalmistajat ovat kuitenkin tuoneet markkinoille entistä pienempiä antureita, joista pienimpien lämpötila- ja paineantureiden mittauspään halkaisija on enää 1,5mm. Uusiin muotteihin näin pienikokoisia antureita on jo helppo sijoittaa, kunhan ne huomioidaan aikaisessa vaiheessa muottisuunnittelua.

6 Konenäkö laadunmittauksessa

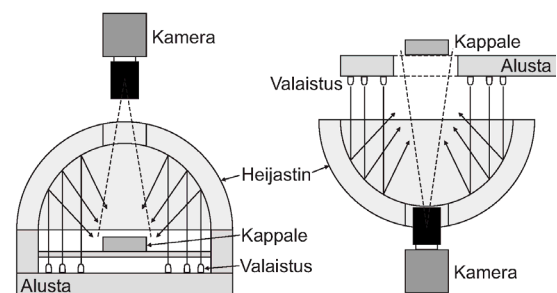
Konenäköjärjestelmiä ja kuvankäsittelyn menetelmiä (Jain 1989, Bovik et al. 2000, Conzalez and Woods 2002, Forsyth and Ponce 2003) voidaan käyttää ruiskuvalulla tuotettujen kappaleiden laadunvarmistukseen. Menetelmillä voidaan esimerkiksi mitata kohteiden välisiä etäisyyksiä, tutkia kappaleen muotoa ja etsiä pinta- ja värivirheitä. Kaksi ensimmäistä tehtävää, dimensiomittaus ja muotoanalyysi ovat melko hyvin määriteltyjä, sillä ne perustuvat ennalta määrättyjen kohdistuspisteiden hakemiseen kuvista. Kohdistuspisteet voidaan tämän jälkeen joko muuntaa reaali maailman sijainneiksi ja laskea mitat tai pisteiden keskinäisiä suhteita voidaan tulkita muotovääritysten löytämiseksi. Pinta- ja värivirheiden analysointiin taas ei ole olemassa yleiskäyttöistä strategiaa, vaan menetelmät joudutaan valitsemaan tapauskohtaisesti.

Kaikki edellä mainitut tehtävät edellyttävät, että kappaleen kuvausolosuhteet järjestetään sopiviksi. Valaistukselle asetettavat vaatimukset riippuvat osittain suoritettavasta tehtävästä. Hämärässä kuvattaessa joudutaan käyttämään suurempaa aukkoa tai pidempää valotusaikaa, jolloin yksityiskohtien tarkkuus huononee, sillä pitkä valotusaika altistaa kuvaustapahtuman myös tärinälle ja muille muutoksille. Myös valonlähteen valinnalla on merkitystä, koska normaalien vaihtovirralla toimivien loisteputki- tai hehkulamppujen valo välkkyv vaihtosähkön taajuudella, jolloin konenäkökameralla otettujen kuvien kirkkaus voi selkeästi vaihdella. Siksi konenäköjärjestelmissä käytetään usein tasavirralla toimivia LED-komponentteihin perustuvia valaisimia tai normaalia korkeammalla taajuudella toimivia loisteputkia.

6.1 Kehitetty mittausjärjestelmä

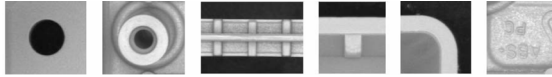
Kehitetty konenäköjärjestelmä (Lensu ja Koikkalainen 2004a) mahdollistaa kuvista havaittavien kohteiden välisten etäisyyksien mittaamisen ja kappaleen muotovirheiden identifioinnin. Järjestelmä perustuu yhden konenäkökameran ja kiinteäpoltto-

välisen linssin käyttöön, joten mittaaminen edellyttää, että kuvia otettaessa kappaleet ovat aina samassa asennossa ja samalla etäisyydellä kameran edessä. Lisäksi tarvitaan kalibrointikohde, jonka avulla voidaan kuvista löydetyt sijainnit muuntaa reaali maailman mitoiksi. Kalibroinnin avulla voidaan myös korjata linssivirheet ja muut kuvan vääristymät. Jyväskylässä kehitetyssä järjestelmässä käytetään LED-valoja, joiden valo johdetaan epäsuorasti kuvattavaan kappaleeseen. Epäsuoran valon käyttö vähentää valon heijastumista kappaleesta kameraan ja siten parantaa kuvainformaation laatua. Menetelmien testaustuksessa käytettyjen kuvausjärjestelyjen kaavakuvat on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Vaihtoehtoisia kuvausjärjestelyitä. Molemmilla valaistus on toteutettu LED-komponenteilla, jotka sijaitsevat kappaleen ympärillä ja joiden valo johdetaan epäsuorasti valoa sirottavan heijastimen kautta kappaleeseen. Itse kuvaus tehdään tämän pinnaltaan epätasaisen, puolipallon muotoisen heijastimen läpi.

Kappaleesta etsittävät kohteet ovat yleensä ympyräisiä tai reunamaisia, mutta myös vapaamuotoisia muusta kappaleesta erotuvia kohteita voidaan etsiä. Ympyräisten kohteiden tapauksessa ollaan tyypillisesti kiinnostuneita esim. reikien tai syvennysten välisistä etäisyyksistä tai niiden halkaisijoista. Reunoja taas käytetään tutkitessa kappaleen dimensioita, ripojen välisiä etäisyyksiä tai kappaleeseen tehtyjen aukkojen kokoa. Vapaamuotoisia kohteita voivat olla esimerkiksi kappaleen kulmat tai kappaleen pintaan tehdyt merkinnät. Eräitä tämänkaltaisia esimerkkejä kohdetyypeistä on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Kuvia tyypillisistä konenäkömittauksen kohteista: reikä, ruuvitorni, ripa, reuna, kulma ja merkintä.

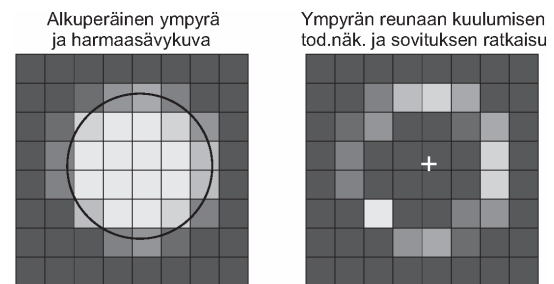
Vaikka etäisyyden määrittelyyn useimmiten käytetään vain tietynkaltaista kohdetta, voidaan kohdemäärittelyitä haluttaessa myös yhdistää, jolloin mittausta voi perustua rakenteeseen määrittelyyn, esimerkiksi "reunaan, joka on ruuvitornin yläpuolella".

Kohteiden sijaintien tarkassa määräämisessä voidaan käyttää avuksi kuvissa olevaa harmaasävyinformaatiota (katso esimerkki kuvasta 13). Näin saatava sijaintitarkkuus on selvästi parempi kuin yksittäisen pikselin leveys. Tällaisia menetelmiä kutsutaan ns. alipikseli- eli *subpixel*-tekniikoiksi. Toinen vaihtoehto tarkkuuden parantamiseen on ottaa kohteesta useita kuvia, konstruoida niiden perusteella alkuperäisiä kuvia tarkempi kuva ns. superresoluutiomenetelmällä (Chaudhuri et al. 2001, Park et al. 2003) ja määrittää kohteiden sijainnit tästä tarkasta kuvasta. Superresoluutiomenetelmät kuitenkin edellyttävät sitä, että kohde ei ole ihan samassa paikassa kameran edessä jokaista kuvaa otettaessa, mikä hankaloittaa niiden soveltamista. Toinen negatiivinen piirre on laskennallinen vaatavuus, mikä tekee superresoluutiomenetelmistä hitaita ja estää niiden käytön tuotantolinjalla. Näiden asioiden vuoksi toteutukseen valittiin harmaasävyinformaation perustuva sijaintien määrittäminen.

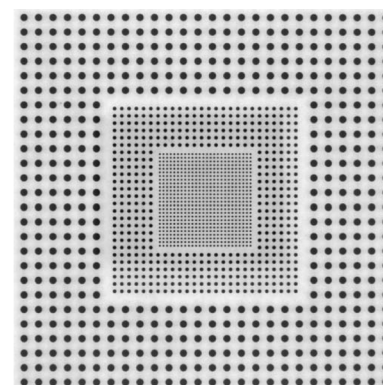
Kuvista havainnoitavien kohteiden reaali maailman sijaintien määräämiseen ja linsivirheiden korjaamiseen on testiajoissa käytetty Edmund Opticsin Grid Distortion Target -nimistä lasilevyä. Siinä on 50x50 mm alueella kooltaan kolmenlaisia ympyröitä hilan muodossa: reunoilla on halkaisijaltaan 1 mm ympyröitä 2 mm välein, niiden sisällä 0.5 mm ympyröitä 1 mm välein ja levyn keskellä 0.25 mm ympyröitä 0.5 mm välein (katso kuva 14). Kalibroinnin ajaksi levy sijoitetaan samalle etäisyydelle kamerasta kuin havainnoitavat kohteet, jolloin kappaleiden kuvista tehtävät havainnot on helppo muuntaa reaali maail-

man sijaintitiedoiksi. Suuria reaali maailman kohteita mitattaessa kalibrointilevyn voi korvata käyttämällä erillistä vähintään kolme kiintopistettä sisältävää kalibrointikohdetta.

Koska konenäkökameroissa käytettävä valoherkkä (CCD- tai CMOS-tyyppinen) tunnistinkenko ja signaalin analogiset siirtotiet aiheuttavat kuviin kohinaa, mittaustulokset eivät ole täysin samoja, vaikka sama kappale kuvattaisiin kaksi kertaa peräkkäin tekemättä mitään muutoksia kuvausjärjestelyyn. Kennon kohinan ja muiden häiriöiden vaikutusta voi kuitenkin vähentää ottamalla samasta kappaleesta useita kuvia samoissa olosuhteissa ja laskeamalla niistä kaikista määritellyt mitat. Tällä tavalla saadaan useita mittaustuloksia, joista voidaan lopulliseksi mittaustulokseksi valita mediaani tai laskea keskiarvo.



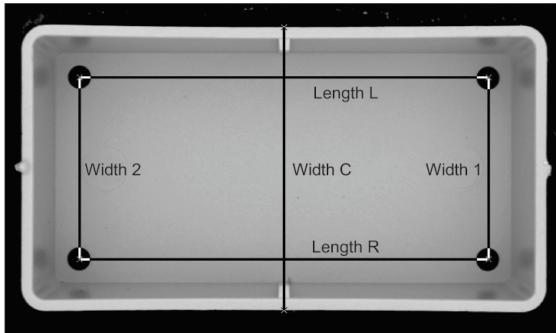
Kuva 13. Esimerkki kuvien harmaasävyinformaation perustuvasta sijainnin määrittämisestä: ympyrän keskipisteen haku parametriseen sovitusmenetelmän avulla. Menetelmä poimii ympyrän kehään kuuluvat kuvapisteet (x_i, y_i) laskien niille painot, w_i , sen mukaan, miten todennäköisesti ne kuuluvat ympyrän kehään, ja sovittaa niihin ympyrän yhtälön $r_0^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2$ minimoimalla funktiota $f(x_0, y_0, x_0) = \sum_i w_i | (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r_0^2 |$. Ratkaisuna saadaan keskipiste (x_0, y_0) ja säde r_0 .



Kuva 14. Kuva kalibrointilevystä, jossa on kolmenkokoisia ympyröitä hilan muodossa.

6.2 Saavutettu mittaustarkkuus

Järjestelmää on testattu sekä laboratorioissa että teollisuusympäristössä, ja mittaustarkkuudessa eli toistokokeen mittojen keskihajonnassa ei ollut ympäristöjen välillä merkittäviä eroja (katso taulukot 1 ja 3), jos otetaan huomioon mittojen suuruusluokat. Johtuen mittaustavasta tuloksissa on hajonnan lisäksi systemaattista virhettä, harhaa, mutta tämä virhetyyppi on kalibroituavissa pois, jos sama kappale mitataan myös jollain luotettavana pidetyllä referenssimittausjärjestelmällä. Harhaan voi olla useita syitä: kappaleen reunojen pyöristykset, kuvausperspektiivin vaikutus kuvan kulmissa oleviin kohteisiin, tulevan valon suunta ja varjot, värien merkitys eli valon eri aallonpituuksien erilainen taittuminen linseissä, ulkoisten olosuhteiden vaikutus mitattavaan kappaleeseen, kalibrointilevyn mahdolliset virheet, jne. Edellä mainituista syistä seuraa, että kahden erityyppisen mittaamenetelmän antamat tulokset poikkeavat toisistaan, ellei poikkeamaa korjata kalibroinnilla. Koska harha on aina kalibroituavissa pois, riippuu lopullinen mittaustarkkuus lähinnä selittämättömästä mittausten hajonnasta. Tämän vuoksi menetelmän kehitystyössä on keskitytty tulosten hajonnan minimointiin.



Kuva 15. Laboratoriokokeissa käytetyn testikappaleen kuva, johon on merkitty testauksessa käytettävät mitat ja niiden sijainnit.

Jyväskylän yliopistossa kehitettyä mittaustarkkuusjärjestelmää on testattu kuvan 15 testikappaleen viidellä mitalla käyttäen kahta mittaustapaa: yksittäismittausta ja toistomittausta. Yksittäismittaus tarkoittaa sitä, että kappaleesta otetaan vain yksi kuva ja siitä lasketaan kaikki mitat. Toistomittauksessa taas otetaan kappaleesta useita kuvia ja mittaustulos saadaan poimimalla erillisistä

kuvista saatujen tulosten ($n = 5$) mediaani. Keskihajonnan laskemiseksi saman kappaleen mittausta on toistettu 15 kertaa.

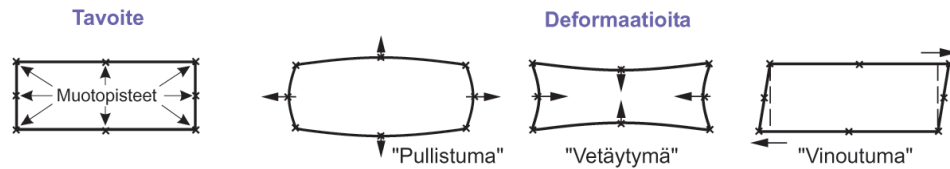
Sekä laboratoriossa että teollisuudessa tehtyjen koeajojen keskihajonta on aina parempi kuin 1/10-osa kameran yhden kuvapisteen koosta. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kohtuullisen edullisellakin kokenäkökameralla voidaan saavuttaa teollisuuskäyttöön riittäviä mittaustuloksia. Tai se voi tarkoittaa vastaavasti myös sitä, että hyvällä tarkkuuskameralla ja laadukkaalla optiikalla voidaan laboratorioolosuhteissa päästä kohtuullisen hyvään mittaustarkkuuteen. Yhteenveto tyypillisestä Jyväskylän järjestelmän mittatarkkuudesta on esitetty taulukossa 1. Tulos saavutettiin resoluutioltaan 1380×1035 -kuvapisteen kameralla.

	Yksittäismittaus	Toistomittaus
Width 1 (15.882)	± 0.00107	± 0.00094
Width 2 (15.907)	± 0.00216	± 0.00160
Width C (23.537)	± 0.00277	± 0.00125
Length L (35.769)	± 0.00387	± 0.00181
Length R (35.787)	± 0.00255	± 0.00163

Taulukko 1. Laatikkokappaleen mittaustulosten keskihajonta, mm, mitattuna noin 5×3.7 cm-kuva-alueelta 1380×1035 -resoluution kameralla.

6.3 Muotoanalyysin soveltaminen

Muotoanalyysin (Dryden and Mardia 2002) soveltamisesta muovituotteiden laadunseurantaan on kerrottu enemmän lähteessä (Haranen et al. 2004). Tässä luvussa esitetään sen perusidea ja joitakin käyttökohteita. Menetelmä perustuu kappaleista etsittyjen kohteiden, joita tässä yhteydessä kutsutaan muotopisteiksi, käyttöön. Löydetty muotopisteet muunnetaan ensin reaailmailman sijaintitiedoiksi mittaukseen käytettävän kalibrointimenetelmän avulla, jotta linssin virheet eivät vaikuttaisi tuloksiin. Tämän jälkeen pisteet muunnetaan kierto-, siirto- ja skaalainvarianttiin koordinaatistoon, jolloin jäljelle jäävä informaatio kertoo kappaleen muodosta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 16, jossa tavoitteena on saada aikaan suorakulmion muotoinen kappale. Muotoanalyysin idea on, että sillä voidaan tutkia kappaleiden jäähdytyksessä muodostuvia deformaatioita.



Kuva 16. Esimerkki kappaleen muodon vääristymisestä. Tavoitteena on suorakulmio, mutta tuotannon tuloksena voidaan saada reunoiltaan pyöristyneitä tai vinoutuneita kappaleita.

Kullekin tuotetulle kappaleelle voitaisiin tällöin laskea, minkä verran "pullistumaa", "vetäytymää" ja "vinoutumaa" niissä on havaittavissa.

Varsinainen muotoanalyysi eroaa esimerkiksi siinä, että muotovääristymien tyyppiä selvitetään aineiston perusteella pääkomponenttianalyysillä. Silloin deformaatiotyypistä tulee toistensa suhteen riippumattomia ja korreloimattomia, ja siten esimerkiksi "pullistuma" ja "vetäytymä" vääristymät eivät voi molemmat olla samassa analyysissä mukana, koska "pullistuma" saadaan "vetäytymän" vastalukuna. Kappaleiden pääkomponenteille saamia latautumisia voidaan käyttää samaan tapaan kuin mittoja tuotannon laadunseurannassa, jos muutama merkittävin vääristymäpääkomponentti huomioidaan ja vääristymättömän kappaleen latautumisarvoja käytetään tavoitearvoina. Niille tulisi määri-

tellä jonkinlaiset toleranssirajat, joita suurempia muodon vääristymisiä ko. suuntaan ei sallita.

Muotoanalyysiä voidaan käyttää myös muotovääristymien taustatekijöiden selvittämiseen. Jos ruiskuvalukoneella ajetaan koesuunnitelma ja tehdään tuotetuille kappaleille muotoanalyysi, voidaan muutamalle merkittävimmälle vääristymätyypille tehdä ennustusmallit koneen asetusarvojen funktiona, $L_{muoto} = f(A)$, missä L_{muoto} sisältää muotoanalyysin merkittävimpien pääkomponenttien latautumiset ja A sisältää asetusarvot. Tällaisen mallin avulla voidaan siis tutkia, mitkä asetusarvoista vaikuttavat mihinkin muotovääristymään ja miten voimakkaasti. Sen avulla voidaan myös hakea sellaiset asetusarvot, joilla saadaan mahdollisimman oikeanmuotoisia kappaleita, $A_{opt} = f^{-1}(L_{tavoite})$.

7 Koesuunnittelu ja laadunoptimointi

Koesuunnittelulla on ollut keskeinen rooli IDEAL -projektissa, kun tavoitteena on tuotannon laadun ja tehokkuuden parantaminen. Tämä on ilmeistä, sillä ruiskuvalun yhteydessä tehtävälle koesuunnittelulle voidaan määrätä kolme erityyppistä tavoitetta, joissa yhdistyvät koko projektin tavoitteet:

Tuotannon laadun optimointi, mikä voi tarkoittaa samanaikaisesti

- keskimääräisten dimensiomittojen viemistä kohti tavoitearvoja
- dimensiomittojen vaihtelun (hajonnan) minimoimista ja
- pintavikojen, imujen, ym. vikatyypin minimoimista.

Tuotannon tehokkuuden kasvattamista, mikä voi tarkoittaa

- sykliajan lyhentämistä tai
- hylättyjen kappaleiden määrän vähentämistä.

Kustannusten minimointia, mikä voi tarkoittaa

- koesuunniteluun kuluvan ajan lyhentämistä ja
- säästöä materiaali- ja laitteistokustannuksissa.

Kuten optimoinnissa yleensä tavoitteet ovat usein ristiriitaisia. Esimerkiksi, jos tuotannon laadusta ei tarvitse välittää, voidaan kustannuksia karsia ja tehokkuutta

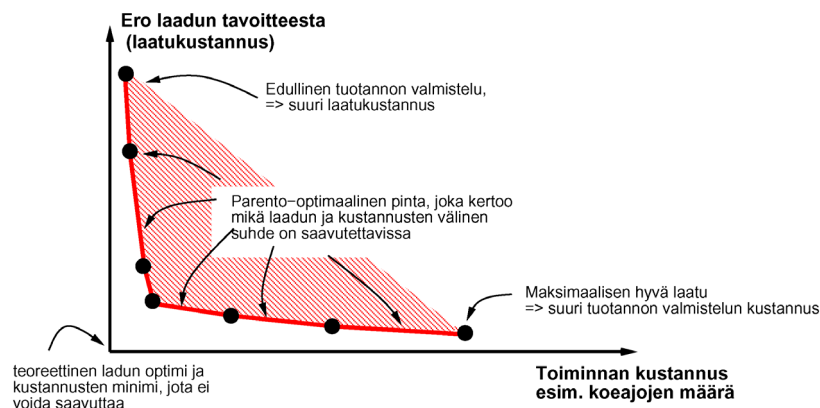
kasvattaa varsin helposti. Käytännössä joudutaankin etsimään menetelmiä, joilla saavutetaan riittävän hyvä kompromissi kustannusten ja laadun kriteerien välille, mitä on havainnollistettu kuvassa 17.

7.1 Tilastollinen laatukäsite

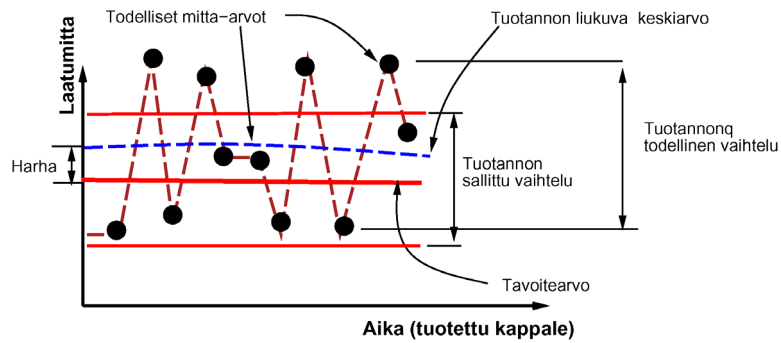
Tilastollisesta näkökulmasta tuotannon laatu voidaan jakaa jonkin mitattavan suureen, esimerkiksi dimensiomitan tai pintavikojen esiintymisosamäärän suhteen tekijään, keskimääräiseen harhaan ja satunnaisvaihteluun:

Laatu = Keskimääräinen ero tavoitteesta (harha) + satunnaisen vaihtelun määrä

Näiden välistä suhdetta on havainnollistettu kuvassa 18. Laatu optimoitaessa on pyrittävä löytämään samanaikaisesti tuotantotapa, jolloin laatua mittaava suure on keskimääräisesti mahdollisimman lähellä tavoitetta ja satunnaiselta vaihtelultaan mahdollisimman pieni. Käytännössä laadun taustalla on useita tekijöitä. Lopullinen tuotannosta mitattu vaihtelu on näiden tekijöiden summa. Esimerkiksi tuotannosta mitattu keskimääräinen laatuero (harha) voi koostua ruiskuvalukoneen asetusarvoista, kappaleen jäähtymisen aiheuttamista muutoksista ja mittausvirheistä. Samat tekijät voivat olla myös satunnaisvaihtelun taustalla.



Kuva 17. Monitavoiteoptimointi ruiskuvaluprosessin yhteydessä.

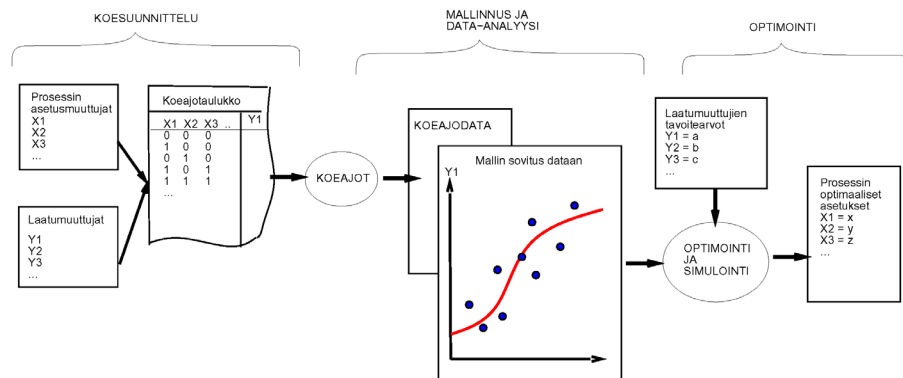


Kuva 18. Tuotannon laadun mittaaminen.

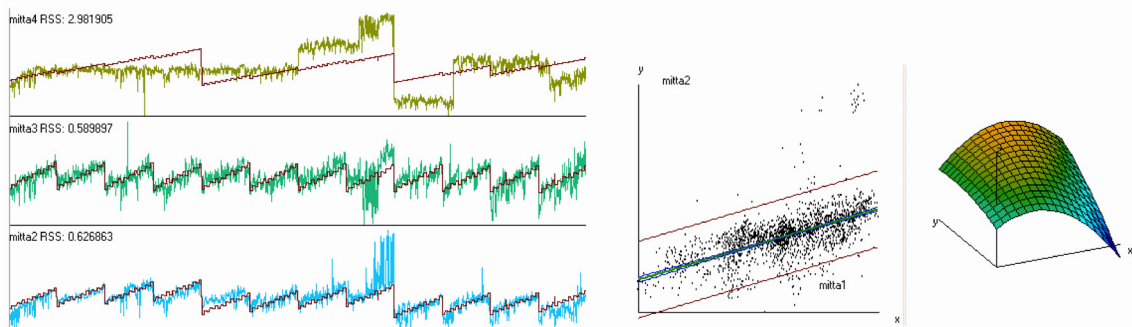
7.2 Laadunoptimointi käytännössä

IDEAL -projektissa laatua ja tehokkuutta optimoidaan käyttäen data-analyysin työkaluja. Parhaan laadun saavuttamiseksi voidaan asetusparametrien optimaaliset arvot etsiä hakualgoritmeilla. Menetelmien käyttö on tuettu toimintaketjuilla, joiden tarkoituksena on ohjeistaa prosessihenkilökuntaa.

IMPA -ohjelmiston avulla voidaan tehdä koeajotaulukkoja, sovittaa dataan erityyppisiä ennustusmalleja, sekä ryhmitellä dataa esim. itseorganisoituvan piirrekartan avulla. Ohjelman työkalut sisältävät useita datan havainnollistamisen työkaluja, joiden avulla voidaan tarkastella prosessiparametrien vaikutusta laatuun, dataan sovitettujen ennustusmallien hyvyttä (luotettavuus- ja ennustusrajoja) sekä visualisoida itseorganisoituvia piirrekarttoja ja simuloida tuotantoa.



Kuva 19. Yksi esimerkki data-analyysin toimintaketjusta: datan keruusta asetusparametrien mallintamiseen optimoinnin ja simuloinnin kautta.



Kuva 20. Esimerkit visualisoinnista. a) Prosessimuuttujien ja mallinnusteiden esitys viivadiagrammeina. b) Kahden muuttujan hajontakuviot ja regressiomallin sovitus dataan luotettavuusrajoineen. c) Laatumuuttujan vastepinta kahden asetusarvon funktiona.

7.3 Adaptiivinen koe ja laadunoptimointi

Uutena lähestymistapana koesuunnitteluun ja laadunoptimointiin kokeiltiin IDEAL-projektissa mahdollisuutta adaptiiviseen koesuunnitteluun. Tämän ideana on korvata ennalta suunniteltu koeajotaulukko tietokonealgoritmeilla, joka itsenäisesti määrää uudet koeajopisteet aiemmin kerätyn tiedon perusteella. Tavoitteena on tällöin sekä lyhentää koeajoihin kuluva aikaa että löytää parempia asetusrvoja kuin perinteisemmällä menetelmällä. Käytännössä tavoitteet saavutetaan helposti, jos adaptiivinen koesuunnittelu pystyy vastaamaan seuraaviin perinteisen koesuunnittelun ongelmiin.

Perinteinen koesuunnittelu olettaa, että prosessin tavoitearvot löytyvät koeajopisteiden määräämisen parametri-ikkunan sisäpuolella. Tämä voitaisiin tehdä ajamalla koeajoja prosessi-ikkunan ääriarvoissa, mutta käytännössä prosessi-ikkunan määräämiseen ei ole olemassa täysin luotettavaa menetelmää. Tämän seurauksena optimi voi olla valitun prosessi-ikkunan ulkopuolella tai prosessi-ikkuna voi olla liian iso.

Koesuunnittelun luotettavuus riippuu kerätyn hyvälaatuisen, laatua parhaiten ennustavan datan määrästä. Perinteisessä koesuunnittelussa, jossa kaikki koepisteet määrätään ennakolta, joudutaan keräämään myös sellaista tietoa, joka jälkikäsitellessä tulee osoittautumaan tarpeettomaksi.

Koesuunnittelun kustannukset ovat sitä suurempia, mitä enemmän dataa kerätään. Lisäksi eri asetusero-parametrien muutosten aikakustannukset poikkeavat toisistaan: esimerkiksi muotin lämpötilan asettuminen on hitaampaa kuin iskunopeuden. Perinteisessä koesuunnittelussa mahdollisuudet

tämäntyyppisten kustannusten minimointiin ovat rajalliset, sillä koko strategia on määrättävä ennakoon.

Käytännössä kaikkia edellä kuvattuja tehtäviä voidaan suorittaa tehokkaammin, jos koesuunnittelua tehdään vaiheittain toistamalla seuraavia vaiheita:

0. Alkusuunnitelma, jossa tehdään muutamia ennalta määrättyjä kokeita mahdollisimman tehokkaasti.

1. Analysoidaan data ja määrätään sen perusteella:

1.1 Asetusrvojen optimipiste ja luottamus tähän pisteeseen. Jos luottamus on tarpeeksi suuri, lopeta algoritmi.

1.2 Seuraavan kokeen piste siten, että se maksimoi tietoa optimista sekä sen luotettavuudesta, ja on kustannuksiltaan (asettumisajaltaan) mahdollisimman edullinen.

2. Tee uusi koe algoritmin määräämässä pisteessä ja palaa kohtaan 1.

Toistaiseksi adaptiivisten algoritmien kehitystyö on kesken. Ensimmäiset tulokset (katso luku 11.3), jotka perustuvat nopeasti toteutettuihin ad hoc -algoritmeihin ovat jo osoittaneet, että menetelmä on käytännössä toimiva ja perinteistä koesuunnittelua tehokkaampi.

Tulevaisuudessa algoritmeja on mahdollista kehittää kohti täysin automaattista koesuunnittelua, jossa tietokonealgoritmi määrää koepisteet, analysoi tuotetut kappaleet konenäkölaitteiston avulla ja ohjaa koneen asetuksia koesuunnitelman edetessä. Koneenkäyttäjän rooliksi jää tällöin järjestelmän valvonta, laadunoptimointiin liittyvä inhimillinen päätöksenteko ja mahdollisiin vikahälytyksiin reagoiminen. Suuria tekniisiä esteistä tämänkaltaiselle järjestelmälle ei ole olemassa.

8 Tuotannon simulointi ja arviointi

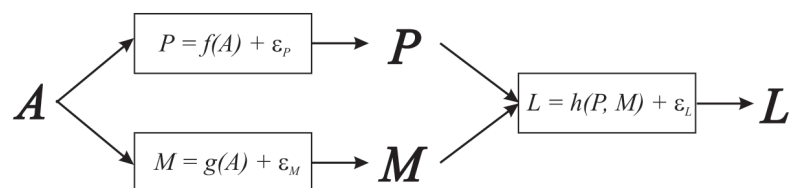
Tuotannon simuloinnin perusideana on tuottaa tietokoneella todellisen kaltaista ruiskuvalukoneen asetusarvojen avulla ohjattavaa mitta ja laatuinformaatiota, jossa on mukana tuotannon selittämätön hajonta. Tällainen datasimulaattori siis pyrkii ennustamaan sitä, minkälaista laatua, L , ruiskuvalukone tuottaisi, jos sen asetusarvot ovat A . Yksinkertaisimmillaan simulaattoria voisi ajatella laatutietojen ennustamalliksi, mutta pelkkä ennustamalli ei vielä riitä, sillä se ei kykene ennustamaan tuotettujen kappaleiden laadun vaihtelua. Laadun vaihtelun ennustus puuttuu valitettavan usein simulointiohjelmista.

Tilastolliset simulaattorit sisältävät myös mallin laatumuuttujien variansseille eli sille, miten paljon laatu vaihtelee kullakin asetusarvojen yhdistelmällä. Simulaattorimallia voidaan edelleen parantaa huomioimalla prosessin syy-seuraussuhteet, koska asetusarvot vaikuttavat ensisijaisesti prosessin sisäisiin mittauksiin P ja muottiantureilta saataviin mittausarvoihin M , jotka korreloivat asetusarvoja vahvemmin tuotettujen kappaleiden laadun kanssa. Siksi projektissa kehitetyssä simulaattorissa käytetään kaksivaiheista tilastollista mallia (kuva 21), $P = f(A) + \varepsilon_P$, $M = g(A) + \varepsilon_M$ ja $L = h(P, M) + \varepsilon_L$, missä A , P ja M ovat ase-

tusarvot ja ε_P , ε_M ja ε_L ovat prosessimittausten, muottianturimittausten ja laadun tuntemattomia satunnaisia häiriötekijöitä.

Jyväskylässä kehitetty simulointimalli muodostetaan havaintoaineiston perusteella, ja se mallintaa kerralla vain yhtä kappaleen tuotantoprosessia ja yhtä muottia. Mitään yleistyksiä toisiin kappaleisiin, joista ei ole koeajodataa, ei voida tehdä. Simulointimallien muodostaminen on suoraanvaivasta ennustamallien tekoa, kunhan riittävä määrä dataa käytännön prosessista on kerätty. Dataa prosessista tulisi kerätä kattavasti, jotta asetusarvojen väliset yhteisvaikutukset ja asetusarvojen mahdolliset epälineaariset vaikutukset prosessin tilaan ja edelleen laatuun voidaan selvittää.

Hajonnan määrän arviointi vaatii kattavaa prosessi-ikkunan näytteistämistä ja sitä, että jokaisessa koeajon pisteessä tuotetaan vähintään 10 kappaletta. Jos simulaattorimalli on huolellisesti muodostettu ja jos sitä ajetaan vain tunnetun prosessi-ikkunan sisällä, voi sen avulla ennustaa sitä, kuinka suuri osuus tuotannosta hylätäisiin tiettyjä mittojen toleranssirajoja käytettäessä. Mallia voi käyttää myös henkilöstön koulutuksessa apuvälineenä.



Kuva 21. Simulaattorin kaavakuva. Tilastollisella mallilla ennustetaan ensin prosessin sisäistä tilaa ja muottianturien antamia arvoja. Laadun ennustaminen tehdään prosessin tilan ja muottimittausarvojen perusteella.

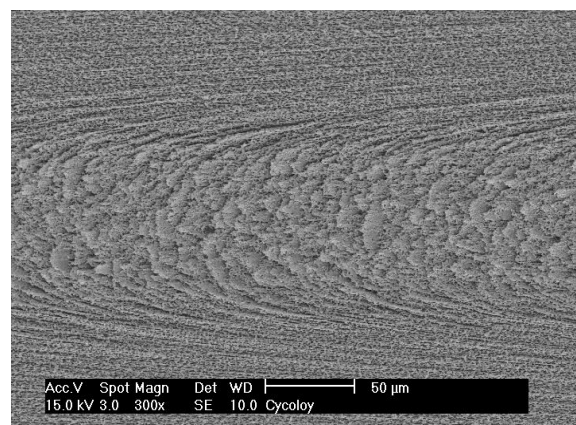
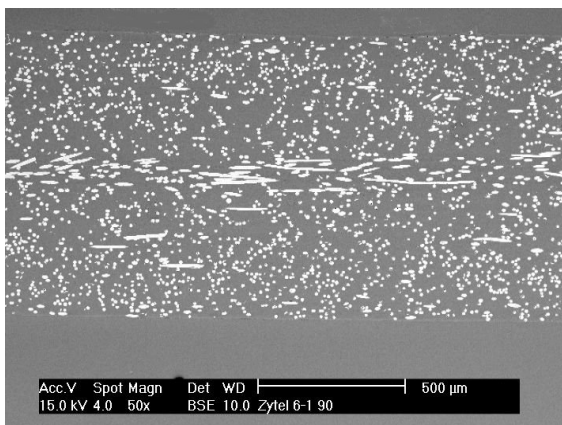
9 Kappaleen laadun ja rakenteen välinen yhteys

Ruiskuvalukappaleen anisotrooppinen kutistuminen ja siitä aiheutuva vääntyileminen on yleisesti tunnettu ilmiö ruiskuvaluteollisuudessa. Erityisenä ongelmana tämä koetaan korkeaa laatua vaativien tuotteiden kohdalla. Vaatimustason kasvessa ruiskuvalukappaleille asetetaan entistä enemmän vaatimuksia ja tästä johtuen laadusta on tullut yhä keskeisempi osa ruiskuvalutuotteiden kehitystyötä. Kutistuman ja vääntyilyn syntymekanismi ei ole yksiselitteinen, vaan taustalla vaikuttavat niin muovimateriaaliin kuin prosessointiin liittyvät seikat. Tästä syystä ruiskuvaluttavien kappaleiden prosessoinnin, rakenteen ja ominaisuuksien välisten riippuvuuksien tunteminen on entistä tärkeämpää. Tutkimalla mikrorakenteen ja prosessiolosuhteiden välistä yhteyttä on mahdollista nimetä ne parametrit, jotka vaikuttavat voimakkaimmin ruiskuvalukappaleen kutistumaan ja vääntyilyyn. IDEAL -projektin puitteissa selvitettiin rakennemuutoksia kahden morfologisesti erilaisen materiaalin osalta. Toinen materiaaleista oli kuituluji-tettu, osakiteinen muovi (PA66 Zytel) ja toinen vastaavasti amorfinen muoviseos (PC/ABS Cycoloy).

Rakennetutkimusta varten molemmista muoveista valettiin pieniä, avoimen laati-kon mallisia kappaleita, joiden mikrorakenteeseen pyrittiin tuomaan muutoksia käyt-

tämällä eri prosessiparametreja. Prosessi-parametreja muutettiin siten, että niitä vuorotellen laskettiin ja nostettiin materiaali-valmistajien antamiin suositusarvoihin nähden. Prosessiparametrien muutokset suoritettiin yhteensä kuudelle eri muuttujalle: ruiskutusnopeus, jälkipaine, jälkipaine-aika, jäähdytysaika, muotti- ja sylinterilämpötila. Prosessiparametrien muuttaminen aiheutti ruiskuvalukappaleissa muutoksia sekä painoon että dimensioihin ja vertaamalla prosessiparametrien aikaansaamia paino- ja mittamuutoksia, voitiin nimetä kappaleen kutistuman ja vääntyilyn kannalta merkittävimmät parametrit.

Kappaleiden mikrorakennetutkimukset suoritettiin pyyhkäisyelektronimikroskoopin avulla. Tarkastelut osoittivat, että kuituluji-tetun muovin kuidut orientoituivat hyvin säännönmukaisesti ja muodostivat kerroksellisen rakenteen: kappaleen keskiosassa kuidut orientoituivat ruiskutuksen vastaisesti ja pinnan läheisyydessä ruiskutuksen suuntaisesti. Amorfisten ruiskuvalukappaleiden mikrorakenteelliset erityispiirteet oli myös yhdistettävissä ruiskuvaluprosessin termomekaaniseen ympäristöön. Molempien materiaalien mikrorakennemuutokset olivat kuitenkin niin vähäisiä, ettei visuaalisen tarkastelun perusteella voitu tehdä suoria johtopäätöksiä mikrorakenteen ja kutistuman välisestä yhteydestä.



Kuva 22. Vasemmalla kuituluji-tetun PA-kappaleen mikrorakennetta. Pinta on kohtisuora ruiskutussuuntaan nähden. Kuidut orientoituvat kappaleen pinnassa ruiskutuksen suuntaisesti ja ja keskellä ruiskutusta vasten kohtisuorasti. Oikealla ruiskuvalutun (PC+ABS)-kappaleen mikrorakennetta. Rakenteesta on syövytetty ABS-komponentti pois, jolloin PC:n lamellimainen rakenne tulee selkeästi esille.

10 Kappaleen laadun ennustaminen FEM -simuloinnein

10.1 FEM -simulointi ja ohjelmistot

FEM -pohjainen (*finite element method*) simulointi eroaa monin tavoin muusta matemaattisesta ja tilastollisesta mallintamisesta, jota esitellyssä IDEAL -projektissa tehtiin. FEM -pohjainen simulointi perustuu fysiikan lainalaisuuksiin ja yhtälöihin, kun taas tilastollinen mallinnus perustuu prosessista tai ilmiöstä kerättyyn dataan.

Yleensä FEM -pohjainen simulointi toteutetaan valmiilla, kaupallisilla ohjelmilla. Ruiskuvalun simulointiin onkin olemassa useampia tällaisia ohjelmia, kuten Moldflow (Moldflow), Cadmould (Simcon) ja Moldex (Coretech). Ohjelmiin viedään tuotteesta tehty CAD-malli sekä valitaan prosessointiasetukset ja käytettävä materiaali, jonka jälkeen ohjelma suorittaa laskennan ja antaa tulokset. Ohjelmilla pystytään simuloimaan prosessin joka vaihetta täyttymisestä kappaleen jäähtymiseen. Perinteisen ruiskuvaluprosessin lisäksi ohjelmat sopivat myös muiden kuin kestopuovien simulointiin sekä joidenkin erikoisprosessien simulointiin.

10.2 Simuloinnin käyttö ja hyödyt

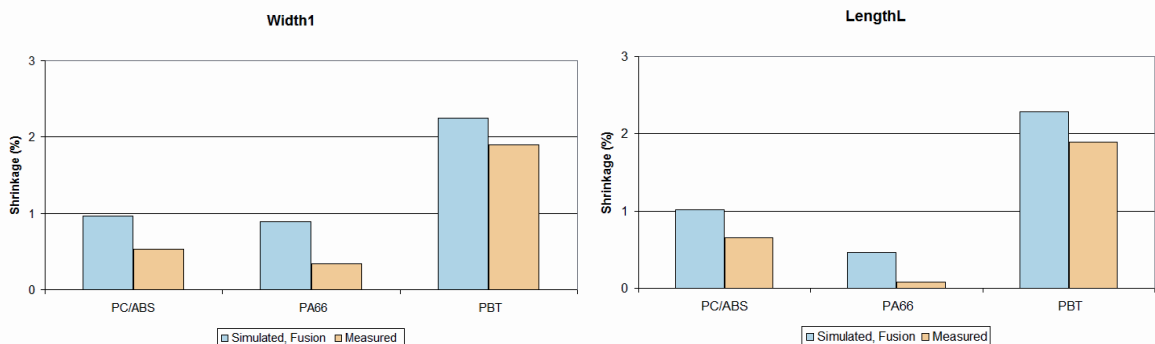
Simulointeja käytetään pääasiallisesti tuotteen ja muotin suunnittelussa ennen varsinaista tuotantoa, jolloin niistä saadaan myös suurin hyöty. Simuloinneilla voidaan mm. varmistaa kappaleen prosessoitavuus, tutkia kappaleen geometrian, prosessointi

parametrien ja materiaalien vaikutusta kappaleen täyttymiseen ja laatuun sekä suunnitella muotin rakennetta (ruiskutus- ja jäähdytyskanavistot).

Simuloinneilla pystytään saavuttamaan monia etuja: prototyyppien, koeajojen ja tarvittavien muottimuutosten määrä vähennee, suunnitteluajat nopeutuvat ja kustannukset laskevat. Lisäksi muottisuunnittelulla ja prosessointiparametrit optimoimalla prosessin sykliajat lyhenevät ja tuotteiden laatu kasvaa.

10.3 Kappaleen laadun ennustaminen

Projektin aikana tutkittiin simulointien kykyä ennustaa kappaleen laatua kaupallisella Moldflow Plastic Insight -ohjelmalla. Simuloinneilla pystytään ennustamaan kappaleen täyttymistä, kutistumia ja vääntymiä, mutta ei yleensä visuaalisia ongelmia, kuten kiilto-ongelmia. Kappaleen täyttymisen ja siihen liittyvät tekijät, kuten yhtymäsaumojen sijainnin, ohjelmat pystyvät ennustamaan hyvinkin tarkasti. Kappaleen kutistumien osalta simuloinneilla ei yleensä päästä vielä täysin tarkkoihin tuloksiin, mutta erot materiaalien välillä pystytään ennustamaan. Simulointitulosten hyvyys on myös hyvin pitkälle kiinni simuloinneissa käytettävästä materiaalityypistä ja sen tarkkuudesta. Näissä simuloinneissa materiaalityypistä ei mitattu erikseen, vaan käytössä oli simulointiohjelman ja/tai materiaalityypin tarjoama data.



Kuva 23. Simuloinneista saatujen tulosten (siniset pylväät) ja mitattujen kutistumien (oranssit pylväät) vertailu. Materiaaleina Cycology C1000HF (PC/ABS), Zytel 70G30 (PA66) ja Valox290HPR (PBT). Vasemmalla kutistuma kohtisuoraan virtausta, oikealla virtauksen suuntaisesti.

11 Case: Perlos Oy

Tässä luvussa esitetään touko-, syys- ja marraskuussa 2004 Perlos Oyj:n Ylöjärven tehtaalla suoritettujen koeajojen käytännön järjestelyt ja joitakin keskeisiä tuloksia. Tarkemmat tulokset löytyvät IDEAL-projektin Jyväskylän yliopiston koeajoreportista (Lensu ja Koikkalainen 2004b). Koeajot tehtiin kolmessa vaiheessa ja kullekin ajolle oli etukäteen asetettu selkeät tavoitteet (katso luku 3.3), jotka liittyivät pääosin on-line konenäkömittausjärjestelmän toimivuuteen ja sen mahdollistamiin uusiin sovelluksiin.

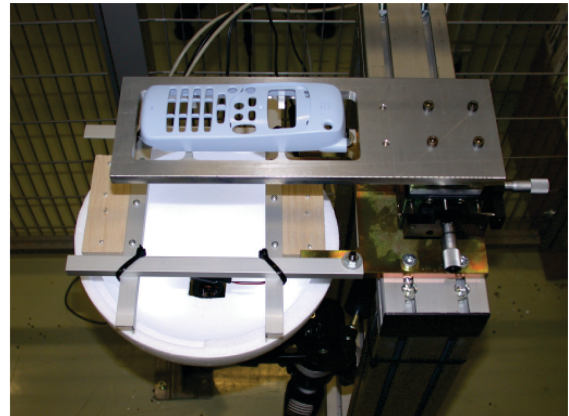
11.1 Mittausjärjestelmän toimivuus teollisuusympäristössä

Ensimmäisessä testiajossa tavoitteena oli kokeilla konenäköön perustuvan mittausjärjestelmän toimivuutta teollisuusympäristössä. Tarkoitus oli tutkia, saavutetaanko järjestelmällä riittävän pieni mittaustulosten keskihajonta tutkittaessa viittä mittaa (katso kuva 5). Materiaalina käytettiin ABS+PC:tä, Cycloy C1000HF. Koeajossa käytettiin ruiskuvalukoneen lisäksi teollisuusrobotia ja tietokonetta, joka otti järjestelmän käyttäjän ohjauksessa kuvia kappaleista ja laski niistä määritellyt mitat. Ajoa varten suunniteltiin ja toteutettiin kappaleiden kuvausalusta (katso kuva 24), LED-valaisinratkaisu, robotin ohjelmistoa ja kyseisen kappaleen mittaussäätely. Jos laitteisto ja perusohjelmisto olisivat olleet ennestään olemassa, olisi uuden tuotteen mittausmenetelmän suunnittelu ja käyttöönotto vienyt arviomme mukaan noin yhden työpäivän.

Ensimmäisessä koeajossa ajettiin konetta kolmilla eri asetusarvoilla kuvaten kappaleet heti niiden tultua ulos muotista. Tuotetut kappaleet mitattiin myös Perlos Oyj:n optisella Smartscope -mittauskoneella niiden jäähtymisen jälkeen ja tutkittiin oman konenäkömittauksen ja mittauskoneen antamien mittaustulosten välisiä eroja. Mittojen välillä oli etukäteen tiedossakin ollut kappaleiden jäähtymiseen liittyvän kutistumisen aiheuttama ero, harha, joka oli kullekin mitalle koko ajon yli tarkasteltuna suuruudeltaan miltei vakio. Jäähtymisen aiheuttama harha oli erilainen eri mi-

toille, mikä johtuneee ainakin osittain siitä, että kutistumista ei tapahdu aivan samalla tavalla eri kohdissa kappaletta. Lisäksi osa mitoista oli virtaussuunnassa ja osa sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Taulukossa 2 on esitetty mittojen ja harhojen mediaanit (eli järjestyksessä keskimäiset arvot) otettuna eri asetusparametreilla tehdyn kolmen ajon yli, joista näkee kunkin mitan ja vastaavan harhan suuruusluokan. Taulukon rivillä ”erojen vaihtelu” esitetään harhan osalta korjattujen mittojen erojen keskiarvo. Kyseessä ei siis ole toistokokeen keskihajontaa vastaava luku, koska tässä mitattava kappale vaihtuu koko ajan.



Kuva 24. Kuvausalusta, johon teollisuusroboti on tuonut kappaleen kuvattavaksi. Konenäkökamera on valkoisen styrox-muovisen kuvun alapuolella ja ottaa kuvia kuvun läpi. Kuvat vastaanottava tietokone on verkkoaidan ulkopuolella.

	Mitan mediaani	Harhan mediaani	Erojen vaihtelu
Width Top	35.136	0.0755	± 0.0046
Width Bot	43.211	0.0393	± 0.0042
Width Kbd	43.868	0.0458	± 0.0042
Length L	51.394	0.1249	± 0.0056
Length R	51.392	0.1174	± 0.0058

Taulukko 2. Testiajon mittojen mediaaniarvot, systemaattiset virheet eli harhat ja mittojen erojen vaihtelun keskiarvot. Yksikkönä taulukossa on mm.

11.2 Konenäkömittauksen tarkkuus, mittojen ennustus ja laadun optimointi

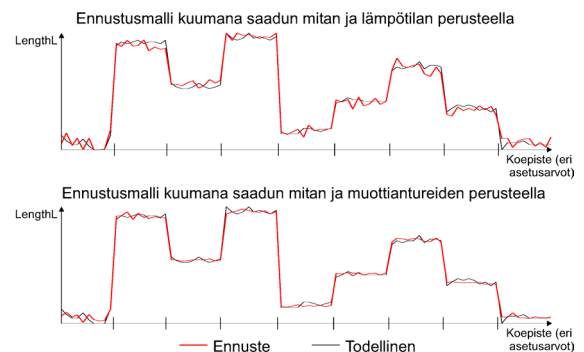
Toisen koeajon tarkoituksena oli tutkia konenäkömittausjärjestelmän tulosten hajonnan suuruutta, jäähtyneiden kappaleiden mittojen ennustamista kuumana mitattujen arvojen perusteella sekä laadun tilastollisten ennustusmallien hyvyttä. Ensimmäisen koeajon laitteistoa täydennettiin CQC -tiedonkeruujärjestelmällä, FLIR Flexcam -lämpökameralla sekä robotin ja PC:n välisellä ohjauskytkennällä. Muotin anturit oli kytketty CQC -järjestelmään. Lämpökameraa käytettiin kappaleiden keskimääräisen lämpötilan selvittämiseen välittömästi ennen mittauskuvausta (katso kuva 3). Robotin ja PC:n välinen ohjauskytkentä mahdollisti sen, että robotti saattoi käynnistää kuvan oton silloin, kun kappale oli valmiina lämpö- ja mittauskuvauspaikoilla.

Toistokoetta varten ruiskuvalukoneella tuotettu kappale tuli ensin jättää jäähtymään kuvauspaikalle yön ajaksi, jottei jäähtymisen aiheuttama kutistuminen vaikuttaisi tulokseen. Seuraavana päivänä robotti laitettiin toistamaan ketjua: otetaan kappale pois kuvauspaikalta, viedään se siihen takaisin, otetaan kuvat ja toistetaan tätä haluttu määrä kertoja. PC otti mittauskuvat aina, kun kappale oli mittauspaikalla. Toistokokeen tulos eli keskihajonnan määrä mittakohtaisesti eriteltynä on esitetty taulukossa 3. Nämä hajonnat edustavat Jyväskylässä kehitetyn mittausjärjestelmän mittauksarkkuutta teollisuusympäristössä. Lukujen tulkinta saadaan vertaamalla mitaushajontaa taulukon 2 absoluuttisiin mita-arvoihin (mitan mediaani).

	Keskihajonta
Width Top	± 0.0031
Width Bot	± 0.0026
Width Kbd	± 0.0037
Length L	± 0.0026
Length R	± 0.0028

Taulukko 3. Testiajon toistokokeen ($n=11$) mittojen keskihajonnat. Yksikkönä taulukossa on mm.

Työssä kehitettiin myös kutistumisen aiheuttaman harhan korjaamiseksi tilastollinen malli. Mallin määrittämiseksi tehtiin kappaleita kolmilla eri asetusarvoilla ja prosessin tasaannuttua yksi kappale otettiin tarkkailuun, jossa se mitattiin 10 minuutin aikajakson sisällä 20 sekunnin välein. Näistä testeistä havaittiin, että alkulämpötilan lisäksi kutistuman määrään vaikuttaa muitakin tekijöitä. Jos kappale on muotista ulos tullessaan erityisen kuumaa, tapahtuu kutistumista pääsääntöisesti enemmän kuin, jos kappaleen annettaisiin jäähtyä muotissa alhaisempaan lämpötilaan. Kuitenkin esim. korkea jälkipaine vähentää jälkikäteen tapahtuvan kutistuman määrää. Pelkkä lämpökamerakuvasta laskettu lämpötila tai muotin lämpötila-anturin lukuarvo ei aivan riitä kutistuman määrän laskentaan. Muotin paine- ja lämpötila-antureiden perusteella muodostettu tilastollinen malli toimii jo paremmin (katso kuva 25). Testissä todettiin lisäksi, että 10 minuutin kuluessa suurin osa kutistumisesta oli jo tapahtunut.



Kuva 25. Esimerkki kutistumien ennustamisesta. Jäähtyneen kappaleen mittaa Length L on yritetty ennustaa pelkän lämpötilan (yllä) ja kaikkien muottianturiarvojen perusteella (alla).

Laadun tilastollisten ennustusmallien tekemiseksi ja tuotannon asetusarvojen optimoimiseksi on ensin tehtävä koesuunnitelma (katso taulukko 4), joka ajetaan ruiskuvalukoneella läpi keräten kokeeseen liittyvistä kappaleista sekä prosessin tilaa että tuotettujen kappaleiden laatua kuvaavat tiedot. Sen jälkeen voidaan muodostaa joukko tilastollisia malleja, jotka kuvaavat sitä, miten eri laatutekijät riippuvat koneen asetusarvoista. Näitä malleja voidaan myös käyttää parhaiden asetusarvojen valintaan, kun käytettävissä on sopiva optimointimenetelmä.

Koeajon pohjalta tehtyjä ennustumalleja testattiin ajamalla tuotantoajo, joka oli ko-keeseen kuulumaton piste: muotti 67 °C, sula 274 °C ja jälkipaine 798 bar. Taulukossa 5 on mallien antamat mittojen en-nusteet ja todellisen tuotannon ($n = 10$) keskiarvot. Tilastolliset ennustumallit toi-mivat tässä yhteydessä riittävän hyvin.

Ryhmä	Muotti-lämpötila	Sulan lämpötila	Jälki-paine
1	50	255	400
2	50	265	800
3	50	275	600
4	60	275	800
5	60	265	400
6	60	255	600
7	70	255	800
8	70	265	600
9	70	275	400

Taulukko 4. Mittojen ennustuskokeen koesuunnitel-ma. Kaikki muut asetusparametrit pidettiin vakioina, ja kullakin asetuksilla kappaleita tuotettiin 10 kpl.

Mitta	Ennuste	Tuotannon ka
Width Top	35.142	35.1413
Width Bot	43.252	43.2521
Width Kbd	43.926	43.9254
Length L	51.468	51.4706
Length R	51.472	51.4749

Taulukko 5. Testiajon ennustutuloksen vertaus tuotantoajoon. Ennustesarakkeessa on ennustus-malleista saadut mitat koeajoon kuulumattomalle pisteelle ja Tuotannon ka kertoo tuotantoajon ($n = 10$) mittojen keskiarvot. Yksikkönä taulukossa on mm.

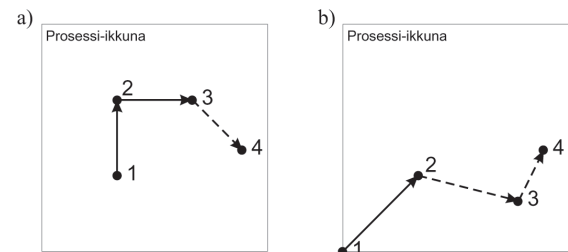
11.3 Uudet koesuunnittelustrategiat

Kolmannen koeajon yhteydessä tutkittiin vaihtoehtoista koeajostrategiaa, jossa koe-ajon seuraava piste riippuu aikaisemmista pisteistä kerätystä mittaustuloksista. Periaatteena on siis kerätä ensin hieman tietoa joistakin prosessi-ikkunan pisteistä, muodostaa kerätyn tiedon avulla tilastollinen malli asetusarvojen ja laadun välille, sekä poimia seuraava piste sieltä, missä ole-massa olevan tiedon ja mallin perusteella saataisiin parasta laatua. Optimaalinen piste ei välttämättä löydy ensimmäisellä muutosaskelella vaan joudutaan muodos-tamaan uusi malli kaiken kerätyn datan perusteella ja ajamaan seuraavia pisteitä.

Kuva 26 havainnollistaa tätä adaptiivista menettelytapaa.

Edellä kuvailtuja adaptiivisia menetelmiä testattiin sekä dataa tuottavalla simulaatto-riilla että käytännössä. Käytännön tes-tiajossa pyrittiin hakemaan ruiskuvaluko-neen optimaaliset ajoarvot neljälle para-metrille: sulan lämpötila, muotin lämpötila, jäähdytysaika ja jälkipaine, tilanteessa, jossa testauksessa käytetylle viidelle mital-le (katso kuva 5) oli määritelty tavoitearvot ja toleranssit. Taulukko 6 esittää nämä tavoitearvot, toleranssit ja kuvassa 27 ku-vailtujen adaptiivisten menetelmien löytä-mät parhaat ratkaisut sekä poikkeamien suuruudet. Tavoitearvot oli tarkoituksella määritelty siten, että niitä kaikkia ei ollut mahdollista saavuttaa samalla asetusarvo-jen yhdistelmällä.

Käytetyt menetelmät ovat toistaiseksi heu-ristisia hakumenetelmiä, mutta niissä on kuitenkin hyvää se, että tietoa kerätään runsaasti optimipisteen ympäristöstä. Täl-löin mittojen ennustumalleista tulee luot-tettavia ainakin juuri sen pisteen lähistöllä, missä konetta tullaan tuotannon yhteydes-sä ajamaan. Menetelmät myös vähentävät ajopisteiden määrää, jos niitä verrataan monitasoiseen täyskokeeseen.



Kuva 26. Kaksi esimerkkiä adaptiivisista koesuunnit-telustrategioista kahden asetusmuuttujan tapauk-sessa. Ennalta päätetyt askelet on merkitty kuviiin yhtenäisellä viivalla ja menetelmän valitsemat askelet katkoviivalla. a) Tapa 1, jossa ajetaan ensin pieni koe, jossa minimoidaan tarvittavat asetusten muu-tokset, mutta pyritään siihen, että asetusmuuttujien yhteisvaikutuksista saataisiin tietoa. Kolmen askelen mittaustietojen avulla muodostetaan malli $L = f(A)$ ja ratkaistaan siitä mahdollisimman optimaalista laatua L_{opt} tuottava asetusarvoyhdistelmä $A_{opt} = f^{-1}(L_{opt})$ neljänneksi ajopisteeksi. Sitten tehdään uusi malli ja valitaan uusi ajopiste, jne., kunnes ehdotettu piste alkaa pysyä samana. b) Tapa 2, jossa ajetaan vain kaksi pistettä ja tehdään malli. Mallin optimipiste A_{opt} ajetaan seuraavaksi, tehdään uusi malli, jne.

	Tavoite ± toleranssi	Tapa 1	Poikkeamat	Tapa 2	Poikkeamat
Width Top	35.27 ± 0.1 mm	35.220	0.050	35.232	0.038
Width Bot	43.23 ± 0.1 mm	43.233	0.003	43.229	0.001
Width Kbd	43.90 ± 0.1 mm	43.912	0.012	43.911	0.011
Length L	51.46 ± 0.1 mm	51.459	0.001	51.468	0.008
Length R	51.46 ± 0.1 mm	51.450	0.010	51.457	0.003
Summa			0.076		0.061

Taulukko 6. Adaptiivisten menetelmien testiajojen tavoitearvot, toleranssit ja saavutetut mittojen keskiarvot. Tapa 1 pyrki samaan aikaan minimoimaan myös prosessin hajontaa, joten sen optimipiste ei ollut sama kuin tavan 2, joka minimoi pelkästään poikkeamaa tavoitearvoista. Löydettyjä ratkaisuja parempia arvoja ei saavutettu muissakaan koeajoissa.

	Pisteiden lkm	Koeajon kesto
Normaali DoE	9	3h 40min
Adaptiivinen tapa 1	10	1h 30min
Adaptiivinen tapa 2	6	1h 27min

Taulukko 7. Adaptiivisten menetelmien testiajojen suoritus aika verrattuna tavalliseen yksinkertaiseen koesuunnitelmaan. Normaali DoE oli kolmen parametrin, muotin lämpötila, sulan lämpötila ja jälkipaine, koe, jossa kahdella ensimmäisellä parametrilla tehtiin 3-tasoinen täyskoe

Käytännössä lisäksi havaittiin, että kun adaptiiviset koeajotavat on suunniteltu minimoimaan sekä testipisteiden määrää että hitaasti muuttuvien lämpötilaparametrien muutostarvetta, aikaa säästyy merkittävästi. Taulukko 7 esittää samalla kappaleella tehtyjen koeajojen kestoajat, kun asetuservojen muutoksen jälkeen prosessin annettiin tasaantua muottilämpötilaa tarkkaillen.

Nämä ajot olivat oikeastaan vain ensimmäinen kyvykkyydesti, ja jatkossa menetelmiä tulee edelleen kehittää ja niiden hyvyyttä tulee testata muillakin kappaleilla. Muottiantureiden avulla voitaisiin myös siirtyä menetelmään, jossa laatua, L , ennustettaisiin muottiantureiden tunnusluvulla, M , ja näitä tunnuslukuja ennustettaisiin asetuservoilla, A . Tällöin prosessin tasoittumista ei välttämättä tarvitsisi odottaa vaan tietoa $M \rightarrow L$ -mallia varten voitaisiin kerätä myös silloin, kun kone on siirtymässä asetuservoyhdistelmästä toiseen. Lisäksi tässä testiajossa tavoitearvot määriteltiin kuumen kappaleen mittoina. Lopullisessa toteutuksessa tavoite määritellään tietysti jäähtyneiden kappaleiden mittojen avulla ja silloin tarvitaan yksi malli lisää, joka ennustaa mittojen kutistuman määrää. Tällöin mallien ketjuksi muodostuisi siis $A \rightarrow M \rightarrow L_{kuuma} \rightarrow L_{jäähtynyt}$.

12 Johtopäätöksiä

IDEAL -projektin kaltaisille tutkimushankkeille on tyypillistä, että ennalta määrättyjen tutkimustavoitteiden ohessa tutkijoiden ja muiden projektissa toimineiden henkilöiden parissa kehittyi entistä parempi ymmärrys tutkimusongelmasta. Muun työn ohessa syntyy uusia ideoita ja oivalluksia, jotka ovat joko heti hyödynnettävissä tai luovat pohjaa jatkotutkimuksille. IDEAL -tutkimushankkeessa tämän tyyppisiä huomioita ovat mm. seuraavat johtopäätökset:

Laboratoriomittauksen osalta havaittiin, että mittaus on erittäin altis inhimillisille mittausvirheille sekä ympäristömuutoksille (kosteus ja lämpötila). Virheitä paljastui verrattaessa mittaustuloksia konenäköpohjaiseen mittaukseen. Tämän vuoksi on suositeltavaa käyttää ainakin kahta riippumatonta mittausten menetelmää, silloin kun se on mahdollista.

Mittausmenetelmän tarkkuus riippuu monesta ennalta arvaamattomasta käytännön seikasta, kuten valaistuksesta, lämpötilasta, tai kappaleen kiinnityksestä. Alkuvaiheessa mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa varsin helposti, mikä edellyttää luotettavaa tapaa mittauksen hajonnan arviointiin. Käytännössä tämä tehdään toistamalla kappaleen mittaus useaan otteeseen, mielellään siten, että mittaaaja ei tiedä mittaavansa samoja kappaleita uudelleen. Kun hajonta on selvillä, pyritään eri osavaiheiden toistoilla etsimään hajonnan keskeiset tekijät, esimerkiksi toistamalla kappaleen kiinnitystä ja sen jälkeen tehtävää mittausta.

Laboratoriomittauksen ja konenäkömittauksen hajonta, eli saavutettavissa oleva mittaustarkkuus, on samaa luokkaa. Reaaliaikainen konenäkömittaus on siten todettu käyttökelpoiseksi ratkaisuksi. Toisaalta eri mittaustavat ovat toisiinsa suhteen harhaisia, joten luotettava mittaustapahtuma edellyttää mittauksen yhteydessä tehtävää kalibrointia asiakkaan luottamaan mittaan.

Ruiskuvalukoneen stabiloituminen asetusarvoihin on muottianturien mukaan paljon hitaampaa, kuin koneen omien mittausten mukaan. Tämä saattaa olla merkittävä virhelähde koesuunnittelussa ja datan

analysoinnissa, sillä keskeneräisen stabiloitumisen aikana kerätyt mitta-arvot eivät vastaa oletettuja ajoparametreja.

Lopputuotteen dimensioita voidaan ennustaa melko luotettavasti muottiantureilla, esimerkiksi paine- ja lämpötila-antureilta saatavalla informaatiolla. On kuitenkin epäselvää missä määrin anturien arvoja voidaan hyödyntää prosessin optimoinnissa ja koesuunnittelun apuna, sillä tämän tyyppinen toiminta edellyttää, että asetuservojen vaikutus muotista mitattuun tietoon on hyvin tunnettua ja halutut anturilukemat voidaan todellakin saavuttaa asetusarvoja muuttamalla. Luontevinta anturitietojen käyttö prosessin ohjauksessa onkin tuotantoajossa, jolloin anturitiedon avulla pyritään pitämään prosessi täsmälleen samassa toimipisteessä. Tällöin oletetaan, että muutokset anturimittauksissa ovat suhteellisen pieniä ja määrättyjen asetuservojen kasvattava tai vähentävä vaikutus anturimittauksiin kyseisessä, kiinnitetyssä toimintapisteessä on tunnettu.

Viallisia kappaleita voidaan karsia anturimittauksen tai konenäkömittauksen perusteella. Viat, jotka ovat seurausta esimerkiksi kappaleen huonosta kontaktista muottiin tai koneen hetkellisestä toimintahäiriöstä, näkyvät yleensä selvinä muutoksina mittauksissa.

Tuotantoa voidaan seurata anturimittauksien tai konenäön perusteella. Esimerkiksi on mahdollista määrätä tuotannon tilastollinen laatu ja valvoa sen tavoitteiden toteutumista. IDEAL -projektissa aihetta ei ole kuitenkaan selvitetty todellisten teollisten tuotantosarjojen yhteydessä.

Koesuunnittelun ja data-analyysin avulla voidaan tehdä tarkka simulointimalli, joka ennustaa lopputuotteen dimensiot asetusparametrien funktiona. Mallin simuloimaan tuotantoon saadaan toteutettua teollisuusympäristön kaltainen hajonta, mikä mahdollistaa simulaattorin käytön osana tuotannonsuunnittelun päätöksentekoa.

Automaattinen (adaptiivinen) koesuunnittelu ja ajoparametrien haku on todettu mahdolliseksi, kun se toteutetaan on-line ko-

nenäkömittauksen, muotin anturoinnin ja adaptiivisen tietokonemallin avulla. Ensimmäisissä teollisissa kokeissa pystyttiin koeajoon kuluvaan lyhentämään noin puoleen entisestä.

Lopputuotteen mittojen ennuste on summa useasta tekijästä:

- mittauksen (esim. on-line) harha ja hajonta
- ennustusmallin harha, luotettavuus ja jäännösvirhe
- jäähtymisen aiheuttama muutos ja jäähtymisen ennustusvirhe
- muut selittämättömät muutokset esim. kappaleiden kuljetuksen aikana

Siis on-line mittauksen tavoitteet on asetettava huomattavasti tiukemmiksi kuin mitä lopputuotteen kriteerit edellyttävät.

12.1 Hyötyarvioita

Selkeää arviota suhteessa tavoitteeseen, esimerkiksi mahdollisuuteen tuotannon tehostamiseksi 25 %:lla, on vaikeaa antaa sillä saatava hyöty riippuu monesta seikasta. Parhaimmillaan projektin edut tulevat esille, kun tuotannolle asetetaan erityisvaatimuksia. Olettaen, että konenäköjärjestelmän hankintakustannukset laitteiston osalta ovat alle 10 000 euroa ja järjestelmän virittämiseen uudelle tuotantokappaleelle kuluu yksi päivä, voidaan olettaa, että järjestelmä on kannattava ainakin seuraavissa tapauksissa.

Suuret tuotantoerät, jolloin pienikin on-line laadunohjauksella saavutettu hyöty, joka kertautuu kappalemäärän mukaan, on rahallisesti merkittävä. Tällöin laitteistojen investointikustannukset saadaan nopeasti takaisin.

Joustava tuotanto, jossa koeajot ja laboratoriomittaukset muodostavat keskeisen kustannuksen. Tuotantoa voidaan tehostaa esimerkiksi on-line konenäkömittauksin tai varustamalla muotti anturein, hyödyntäen näin saatua on-line informaatiota järjestelmän virittämiseen.

Tiukentuneet toleranssivaatimukset, joihin voidaan vastata analysoimalla tarkemmin vaihtelua aiheuttavia tekijöitä. Esimerkiksi työvuorojen vaihtuessa, eri materiaalierissä tai koneen kylmäkäynnistyksen jälkeen saattaa mittoihin tulla muutoksia. Tämän

vaihtelun tunnistaminen ja eliminoiminen on mahdollista tuotannon yhteydessä tehtävin konenäkömittauksin.

Nopea uuden tuotannon suunnittelu, jota voidaan systematisoida data-analyysin ja mallinnuksen työvälineiden avulla. Tämä edellyttää työvaiheiden jatkuvaa edelleenkehittämistä standardoimalla koejärjestelyjä, mittaustekniikkoja ja analysointitapoja.

Henkilöstön joustavuus erityyppisiin tehtäviin, jota on mahdollista edistää koulutuksella, käyttäen ruiskuvaluprosessin tilastollista simulointia ja data-analyysin työkaluja.

Mittauksiin liittyvät erityisvaatimukset, joita ei voida toteuttaa perinteisin menetelmin. Kysymykseen tulevat tällöin esimerkiksi erikoisen muotoiset kappaleet, tietäntyyppiset pinnanlaadun mittaukset, jne.

12.2 Toimenpide-ehdotuksia

Suomalainen muoviteollisuus on tilanteessa, jossa tuotannon ja toimintatapojen suhteen tehtävät päätökset ovat erittäin merkittäviä. Kuten monella muullakin teollisuuden alalla, helppojen vaihtoehtojen aika alkaa olla ohi. Tuotannossa on erikoistuttava joko vaativiin ja korkeaa osaamista vaativiin tuotteisiin, suuren automaation kautta saatavaan tehokkuuteen tai marginaalisiin erikoistuotteisiin.

Tuotannon kehittäminen edellyttää lähes aina osaamistason nostamista ja lisäinformaation hankintaa. Tarvittava tieto on sekä kirjatietoa että tarkempaa käsitystä muovin ja ruiskuvalukoneen käyttäytymisestä tuotannon aikana. Kirjatieto ja alan tutkimuksen nykytila tulee yritysten käyttöön helpoimmin tiivistämällä yhteistyötä tutkimuslaitosten kanssa, osallistumalla alan kansainvälisiin tiedekonferensseihin sekä kehittämällä omaa tutkimus- ja tuotekehitystoimintaa. Materiaali- ja prosessikohtaista tietoa taas voidaan hankkia tutkimuksen ja kokeiden kautta. Esimerkiksi IDEAL-projektissa tehty elektronimikroskooppikuvien materiaalitutkimus edustaa alaa, jota voidaan käyttää myös uusien tuotteiden suunnittelun yhteydessä. Tästä on esimerkkejä esimerkiksi metalli- tai lentokoneteollisuudesta, missä mikrorakenteiden automaattinen analysointi on tuotu osaksi suunnitteluprosessia.

Lähempänä tämän päivän käytäntöä sekä ensimmäinen askel ruiskuvalun tuotannon optimointiin ja automatisoituun laadunohjaukseen on hyvälaatuisen on-line tyyppisen datan hankinta ruiskuvalukoneelta. Tässä suhteessa IDEAL -hanke edustaa merkittävää edistystä, sillä projektissa kehitetty konenäköpohjainen laadunmittaus ja muotin anturointi ovat vasta tulossa alan teollisuuden käyttöön. Seuraava askel on mittausmenetelmien käyttöönoton helpottaminen, standardointi ja mittausapojen laajentaminen yhä monimuotoisempiin sovelluksiin. Samalla on syytä liittää kerätyn tiedon hyödyntäminen osaksi prosessin automaattista ohjausta, esimerkiksi hyödyntäen alan eurooppalaista standardia ohjaustiedon välittämiseksi tietokoneelta ruiskuvalukoneelle.

Seuraavassa nämä tulevaisuuden kehitystoimintaa luotaavat ajatukset on työstetty listaksi toimenpide-ehdotuksia.

1. Ruiskuvaluteollisuuden ja tutkimuslaitosten välille on pyrittävä muodostamaan jatkuva keskusteluyhteys, jossa tietoa välittyy molempiin suuntiin. Tavoitteena on ohjata tutkimusta käytännön suuntaan sekä saada teollisuus ymmärtämään tutkimuksen tarjoamia mahdollisuuksia. Teollisuuden näkökulmasta tähän liittyy kaksi tärkeää näkökulmaa: osaamisen jatkuvuus ja laaja-alaisuus. On olennaista, että teollisuudella on käytettävissä kokeneita tutkijoita, joiden ei tarvitse opetella ruiskuvaluun liittyviä perusasioita alusta alkaen, mutta samalla tutkijoiden olisi pystyttävä tarjoamaan uusia näkemyksiä laajalta tutkimuksen kentältä. Tässä suhteen parhaita toimintamuotoja ovat erityyppiset tutkimushankkeet ja opinnäytetyöt, joihin osallistuu samanaikaisesti useita ruiskuvaluyrityksiä ja tutkimuslaitoksia.

2. Ruiskuvalun tutkimukselle ja sen parissa tehtävälle työlle on saatava pysyvä tietopankki ja luotava edellytykset aiemmissa projekteissa kehitettyjen menetelmien siirtoon uusille hankkeille. Näin siksi, että pyörää ei tule keksiä uudestaan, vaan uusien tutkimushankkeiden on syytä rakentua jo aiemmin hankitun tiedon päälle. Esimerkiksi IDEAL -projektissa konenäköjärjestelmien eteen tehty työ on sellaiseen hyödynnettävissä tulevaisuuden hankkeissa. Tulevaisuuden hankkeissa kannattaa

edetä esimerkiksi konenäön hyödyntämiseen pintavikojen tunnistamisessa, pikemminkin kuin rakentamalla jo toimivaksi todettu dimensionmittaus uudestaan.

3. Ruiskuvaluyritysten kannattaa ottaa prosessin mittausten suunnittelu ja hyödyntäminen kiinteäksi osaksi tuotannollista toimintaa. Pitkällä tähtäimellä konenäköpohjaisen mittausaseman ja siihen liittyvän analysointiohjelmiston ylläpito ei tule kovinkaan kalliiksi, mutta sen edut ja mahdolliset hyödyntämiskohteet kertautuvat käytökokemuksen karttumisen myötä.

4. Koetulosten järjestelmällinen hallinta ja dokumentointi yritysten sisällä on järjestettävä huolellisemmin. Minimivaatimuksena on yhtenäismuotoinen ja helposti käsiteltävä koeajotietokanta, johon tallennetaan jokaisen koeajon keskeiset tekijät, tulokset ja johtopäätökset. Samanlainen tietokanta on syytä rakentaa myös tutkimus ja kehityshankkeiden osalta, lähtien hankkeiden suunnittelusta Onkin valitettavan yleistä, että saman yrityksen eri paikkakunnilla sijaitsevissa tuotantolaitoksissa tehdään toisistaan tietämättä samantyyppisiä tutkimushankkeita. Ongelma tosin koskettaa muoviteollisuutta laajemmin koko teollista sektoria.

5. Tutkimuksen on laajennuttava Suomen ulkopuolelle, jotta sitä voidaan verrata alan kansainväliseen tasoon. Teollisuuden on myös vaadittava kansainvälisyyttä tutkimuksen suorittajilta.

13 Kirjallisuutta

Bovik, A. (ed.) *Handbook of Image and Video Processing*. Academic Press, San Diego, CA, 2000.

Chaudhuri, S. (ed.) *Super-Resolution Imaging*. Kluwer Academic Publishing, Norwell, MA, 2001.

Dryden, I. and Mardia, K. *Statistical Shape Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1998.

Forsyth, D. and Ponce, J. *Computer Vision - A Modern Approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.

Gonzalez, R. and Woods, R. *Digital Image Processing, Second Edition*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

Haranen, M., Lensu, A., and Koikkalainen, P. *Application of Shape Analysis to Gray Scale Images Taken of Plastic Parts*. Technical Report LDA-04-02. Publications of the Laboratory of Data Analysis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2004.

Jain, A. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

Koikkalainen, P. *Data-analyysi ruiskuvalun palveluksessa*. Technical Report LDA-04-04. Publications of the Laboratory of Data Analysis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2004a.

Koikkalainen, P. *Koesuunnittelusta laadunseurantaan - ruiskuvalutuotannon laadunoptimointi*. Technical Report LDA-04-05. Publications of the Laboratory of Data Analysis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2004b.

Lensu, A. and Koikkalainen, P. *Machine Vision Based Measurement Methods for Quality Assurance in Injection Molding Industry*. Technical Report LDA-04-01. Publications of the Laboratory of Data Analysis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2004a.

Lensu, A. and Koikkalainen, P. *IDEAL-projektin koeajoraportti* (in Finnish). Technical Report LDA-04-03. Publications of the Laboratory of Data Analysis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, 2004b.

Park, S., Park, M., and Kang, M. *Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview*. IEEE Signal Processing Magazine, May, 2003. Pages 21-36.