



RUISKUVALUMUOTIN PAINEANTURIDATAN VERIFIOINTI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2023

Jani Turunen

Tarkastajat: Professori Timo Kärki

Tekniikan Tohtori Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Jani Turunen

RUISKUVALUMUOTIN PAINEANTURIDATAN VERIFIOINTI

Konetekniikan diplomityö

2023

69 sivua, 33 kuvaa, 4 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Kärki ja Tekniikan Tohtori Marko Hyvärinen

Avainsanat: paineanturi, ruiskuvalu, korrelaatio

Ruiskuvalukomponenttien valmistuksessa vaatimukset komponenttien laadun ja hinnan suhteen kasvavat koko ajan. Ruiskuvalukomponenttien valmistuksessa vaaditaan nykyisin monimutkaisempien tuotemuotojen lisäksi myös tehokkaampaa tuotantoa. Laadun parantaminen tarjoaa yhden keinon ruiskuvalukomponenttien tuotannolliselle tehostamiselle. Muottipesän paineseurannalla pystytään seuraamaan koko ruiskuvaluprosessin aikainen tapahtumaketju. Paineanturimittaus prosessin aikana antaa reaaliaikaisen tuloksen valmistettavasta kappaleesta ja näin ollen parantaa prosessia poikkeavien tuotteiden poistoa tai reagointiin prosessin korjaamiseksi. Paineanturin avulla suoritettavan mittauksen suorittaminen prosessin aikana vähentää hylättäviä tuotteita, jotka huomataan vasta ei-reaaliaikaisessa seurannassa.

Tässä työssä tutkittiin ruiskuvalumuottiin asennetun paineanturidatan antaman mittaennusteen korrelaatiota todelliseen mittaustulokseen. Tutkimukset suoritettiin kirjallisuuskatsauksen ja teoreettisen tutkimuksen perusteella sekä käytännön avulla suorittamalla komponenteille validointiin liittyviä ajoja sekä mittauksia. Laitteet, komponentit, prosessit ja mittausvälineet olivat validoituja.

Tämän työn tarkoitus on kuvata ruiskuvalumuotin paineanturin antama tieto ja myöskin tarkkuus, johon päästään käyttämällä anturia, jonka mittauspää on suoraan muottipesän sisällä. Työssä tarkastellaan anturin asennuspaikan merkitystä paineanturidatan suhteen, paineanturin tuottamien tulosten tarkkuuksia sekä luotettavuutta yhdistettynä muovikappaleen mittaustuloksiin.

ABSTRACT

Lappeenranta– Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Jani Turunen

PRESSURE SENSOR VERIFICATION IN INJECTION MOLDING

Master's thesis

2023

69 pages, 33 figures, 4 tables and 7 appendices

Examiners: Professor Timo Kärki and Doctor of Science Marko Hyvärinen

Keywords: Pressure sensor, injection molding, correlation

In the manufacture of injection molded components, the requirement regarding the quality and price of the components is increasing all the time. In the production of injection molded components, more complex shapes are increasingly required as well as more efficient production. Improving quality is one way to improve the production efficiency. With the pressure monitoring of the mold cavity, it is possible to monitor the entire chain of events during the injection molding process. By using the pressure sensor measurement during the process, it's possible to get a real-time result of the manufactured piece and improve the possibility to remove abnormal products or give possibility to the correct the process if dimensions of product are not inside of tolerances. In this thesis, the correlation between the pressure sensor prediction and measured dimensions was investigated. The studies were made based on a literature review and theoretical research with the help of practice by performing parts of validation runs. All used components, processes and equipment's, including measurement devices, were validated. Predictive measurement during the production decreases the scrap which usually is found in nonrealtime measurements.

The purpose of this work is to describe the information provided by the pressure sensor of the injection molding mold and the accuracy that can be achieved by using a sensor which is directly inside the injection mold cavity. This thesis work examines the importance of the sensor installation and location in relation to the pressure sensor data. The accuracy of the results produced by the pressure sensor, and the reliability combined with the measurement results of the plastic component.

ALKUSANAT

Diplomityö toteutettiin yhteistyössä Kontiolahden Lehmossa sijaitsevan Phillips Medisizen kanssa. Yrityksen henkilöstön osaaminen ja tietotaito oli tämän työn taustan kannalta erittäin suuressa roolissa, erityisesti kiitos Marko Järviölle, Tarmo Appelgrenille, Kimmo Kurville, Pekka Korhoselle, Pertti Komulle, Teemu Hiltuselle ja Asko Hirvoselle, jotka oman osa-alueen ammattilaisina mahdollistivat tämän työn onnistumisen.

Iso kiitos omalle perheelle joustavuudesta ja tuesta opiskeluihin. Avopuolisolleni Helille, että tämän työn sekä koko opiskelu oli mahdollista perhearjessa LUT:ssa. Pojilleni Jimille sekä Joelille, jotka omilla touhuillaan taas antoivat vastapainoa opiskeluille ja siirsivät ajatukset opiskeluiden ulkopuolelle.

Lyhenteet

ABS Akrylibutadieenistyreeni

CAD Computer Aided Design

DOE Design of Experiments

PMMA Polymetyylimetakrylaatti

POM Polyasetaatti

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Alkusanat

Lyhenteet

1.	Johdanto.....	9
1.1.	Tutkimuksen taustaa.....	9
1.2.	Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset.....	9
1.3.	Työn rajaukset.....	10
1.4.	Työn tavoitteet	10
1.5.	Tutkimuksen teoria.....	10
1.5.1.	Ruiskuvaluprosessi	11
1.5.2.	Ruiskuvalujakso.....	13
1.5.3.	Ruiskuvalujakson vaiheet	14
1.5.4.	Vaihtopiste	15
1.5.5.	Paineanturin sijoituskohdan vaikutus ruiskuvalumuotissa	18
1.5.6.	Muottilämpö.....	19
1.5.7.	Sulalämpötila	21
1.5.8.	Jälkipaine ja jälkipaineaika.....	21
1.5.9.	Ruiskutusaine ja ruiskutusnopeus	21
1.5.10.	Jäähdytysaika	22
1.5.11.	Muotin symmetria	22
1.5.12.	Ruiskuvaletun kappaleen kutistuma.....	22
1.5.13.	Optimaaliset parametrit	22
1.5.14.	Regressioanalyysi ja korrelaatioanalyysi	27
1.5.15.	Korrelaatiokerroin	28
2.	Materiaalit ja menetelmät	33
2.1.	Materiaali	33
2.2.	Ruiskuvalukone.....	33

2.3. Ruiskuvalumuotti	34
2.4. Anturi ja sen oheislaitteet.....	35
2.5. Mittalaitteet	36
2.6. Tutkimuksen toteutus	37
3. Tulokset	40
4. Tulosten tarkastelu.....	53
5. Johtopäätökset	57
Lähteet	61

Liitteet

Liite 1. QU Inner Body tuotepiirustus

Liite 2. Mittaustulokset QU Inner Body U300SC_847953272

Liite 3. Kistler mittausdata QU Inner Body U300SC_847953272

Liite 4. Korrelaatio mittauksen laskelmat PCD 0943-01

Liite 5. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-11

Liite 6. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-29

Liite 7. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-36

1. Johdanto

Muovikomponenttien sarjatuotantoon kustannustehokkaasti ja laadukkaasti on yhtenä vaihtoehtona ruiskuvalu. Nykyisen laatu- ja kustannustehokkuuden vaatimuksena on tarvetta kehittää perinteistä ruiskuvaluprosessia niin, että joko jaksoaika saadaan lyhennettyä tai laatua parannettua. Jaksoajan lyhennys vaatii jäähtytyksen nopeuttamista ja sitä kautta parannusta ruiskuvalumuotin rakenteeseen ja mahdollisesti myös materiaaliin. Laadun parantamisella voidaan parantaa koneelta saatavia laadukkaita tuotteita ja sitä kautta maksimoida kustannustehokkuutta. Hylätyt muovituotteet hävitetään yleensä käyttämällä ne energian tuottamiseen niihin soveltuvissa laitoksissa, joka kuitenkin tuottaa kuluja valmistavalle yritykselle. Ympäristönkin kannalta on parempi ratkaisu saada valmistettua muovituotteet niin, että virheellisiä tuotteita, joita joudutaan jatkokäsittämään ja kuljettamaan tulee mahdollisimman vähän.

1.1. Tutkimuksen taustaa

Phillips-Medsize on muovikomponenttien ja erityisesti laitteiden sekä niiden osien huippuosaja. Phillips-Medsize on Perloksesta irtautunut yritys, jonka juuret yltävät ruiskuvalukoneilla tehtävään muoviteollisuuteen aina 1970-luvulle saakka. Phillips-Medsize on osa Koch Industries -konserniin kuuluvaa Molexia. Emoyhtiö Molexilla on yli 40 000 työntekijää lähes 20 maassa. (Phillips-Medsize 2022)

1.2. Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää ruiskuvalumuotin muottipesässä olevan paineanturin antaman tiedon korrelaatio ohjelmiston antamiin mittaennustuksiin sekä mittaustuloksiin. Korrelaation tulosta voidaan hyödyntää paineanturidatan raja-arvojen määrittämisessä niin, että tulevaisuudessa prosessia voidaan myös ohjata tuotannon aikana reaaliaikaisesti. Työn kokeellisessa osiossa suoritetaan ruiskuvalukoneella ajoja

optimoiduilla parametreillä, mitataan tuotteet käyttäen apuna skannaavaa mittausta ja analysoidaan tulokset.

Tutkimuskysymykset, joihin tämä työ vastaa:

- miten hyvin ohjelmiston antamien mittaustulosten ennustus toteutuu todellisen mittaustuloksen suhteen paineanturidatan antaman ennusteen perusteella

1.3. Työn rajaukset

Tästä diplomityöstä on rajattu Phillips-Medisizen, jonka tuotteeseen kokeellinen osuus työstä kohdistuu, asiakkaan nimi, tuotetiedot sekä taloudelliset tiedot tuotannon osalta. Lisäksi on rajattu pois laatupäätökset, joista lopullinen vastuu on Phillips-Medisizen laatuosastolla. Diplomityössä saa olla mukana laatupäätöksiin johtavien laskelmien tulokset sekä työssä saa olla mukana myös komponenttien nimet, jos niistä ei selviä suoraan asiakkaan nimi. Tässä diplomityössä saa olla mukana myös paineantureiden sekä niihin liittyvien oheislaitteiden toimittajan nimi sekä hinnat.

1.4. Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on antaa tutkimuksen avulla Phillips-Medisizelle tuloksia, joiden perusteella voidaan parantaa ja tehostaa ruiskuvalutuotantoa. Tutkimustulos antaa pohjaa ja mahdollistaa kehitystä ruiskuvaluprosessin reaaliaikaiseen ohjaamiseen sekä laatupäätöksen tekemiseen. Työn tavoite on saada korrelaatio paineanturidatan luotettavuudesta ruiskuvaluprosessissa

1.5. Tutkimuksen teoria

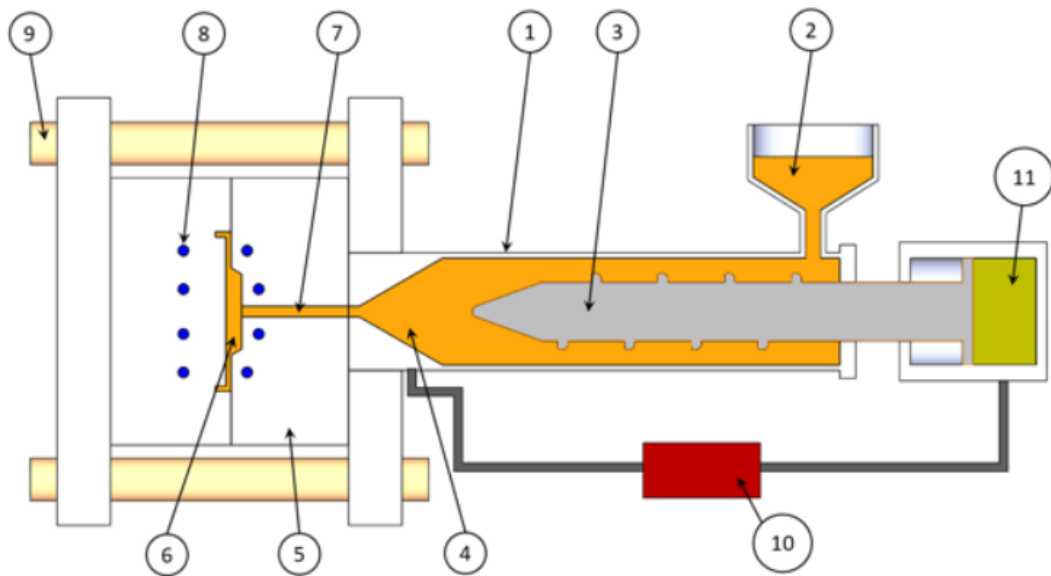
Tähän osioon on kuvattu ruiskuvalumuotin pesäpaineeseen liittyvän korrelaation teoriaa sekä kirjallisuuskatsausta tukemaan tutkimuksen teoriaa sekä tuloksia.

1.5.1. Ruiskuvaluprosessi

Tässä kappaleessa kuvataan ruiskuvaluprosessi lyhyesti pääpiirteittäin. Muovituotteen valmistuksessa raaka-aine tulee raaka-aineen valmistajalta muovigranulaattina (Kuva 1). Muovigranulaatit kuljetetaan, yleensä painovoiman avulla, granulaattisuppilon (Kuva 2 (2)) kautta sulatussylinderille (Kuva 2 (1)), jossa muovi plastisoidaan sulaksi, ja ruiskutetaan muottiin (Kuva 2 (5)) käyttäen apuna ruuvia (Kuva 2 (3)) ja joko hydraulista tai sähköistä yksikköä (Kuva 2 (11)), jonka tarkoitus on mekaanisen voiman välitys ruuville. Ruuvin tehtävä on annostella syötettävän muovin määrä nokan (Kuva 2 (4)) kautta muottiin (Kuva 2 (5)) ja siellä lopullisen muodon muovaavaan osaan eli muottipesään (Kuva 2 (6)). Muotin osat ovat muottipesän lisäksi: syöttökanava (Kuva 2 (7)), jäähdytyskanavat (Kuva 2 (8)) ja ulostyöntöyksikkö (Kuva 2 (9)). Ruiskuvalutapahtumaa ohjataan ohjausyksikön kautta (Kuva 2 (10)).



Kuva 1. Muovigranulaatti (JLLORENS TECHNOLOGY 2019).

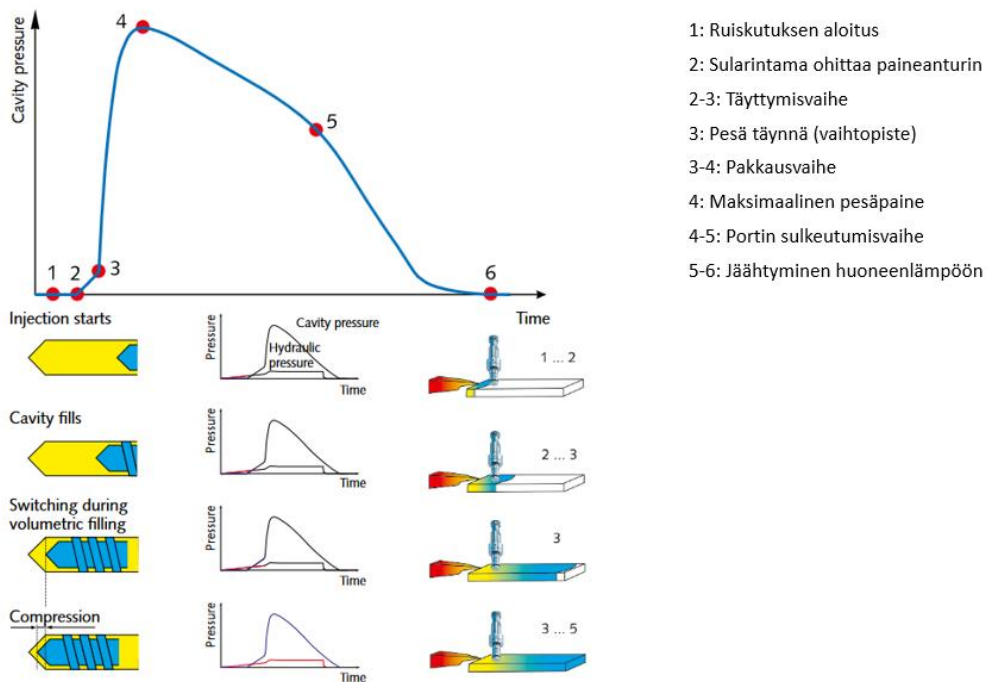


Kuva 2. Ruiskuvalukoneen toiminnan periaatekuva (Dassault systemes).

Ruiskuvalumuotin pesäpaine liitetään läheisesti ruiskuvaletun kappaleen laatuun ja sitä käytetään myös prosessin monitorointiin sekä laadun parantamisen parametrinä. Korrelaatio muovin sularintaman sekä paineen välillä ruiskuvalumuotin pesän eri kohdissa voidaan suorittaa paineanturoinnilla ja tätä kautta lisätä tuottavuutta. Ensimmäiseksi ruiskupuristuksen optimaaliset parametrijohdistelmät selvitetään, jotta voidaan tutkia eri pesien välistä yhteyttä sularintaman ja pesäpaineiden välillä. Eri paikkaan asennetut paineanturit antavat mittaustulokset muotin eri osista. Jos muotti on kuumakanavamuotti, anturointi voidaan suorittaa kuumakanavaan siinä tapauksessa, että kuumakanavan halkaisija on yhtä suuri tai suurempi kuin ruiskuvalettavan kappaleen suurin paksuus. Paineanturista saatava mittaustulos on yhtä luotettava kuin pesän sisältä mitattu arvo. Tulokseen vaikuttaa vahvasti muotin lämpötila, jota voidaan käyttää prosessin ohjausparametrinä. Pesäpaineen profiili jäähtymisvaiheessa on läheisesti yhteydessä ruiskuvalukomponentin muodon tarkkuuteen ja siksi avaintekijä määritettäessä prosessin seurantaohjausta.

Paineprofiili ruiskuvalumuotin pesän sisältä antaa kokonaisvaltaisen tiedon pesän täyttymisestä, paineesta, pakkautumisesta sekä jäähtymisvaiheesta. Muotin pesäpaine on liitettävissä läheisesti ruiskuvalukomponentin painoon, kristallisoitumiseen, purseeseen, kutistumaan sekä vääntymään. Seuraamalla ja antamalla rajat painetoleranssille voidaan

todeta tuotteen laatu pelkästään paineanturidatan perusteella. Ruiskuvalumuotin pesäpaine voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen (Kuva 3): täyttymisvaihe, jälkipaine, pakkautuminen ja jäähdytys. Ruiskuvalupesän painekäyrässä on nähtävissä kolme selkeää aluetta: täyttymisen loppu eli vaihtopiste, maksimaalinen pesäpaine ja portin jähmettyminen. (Kistler Instrumente AG 2022.)



- 1: Ruiskutuksen aloitus
- 2: Sularintama ohittaa paineanturin
- 2-3: Täyttymisvaihe
- 3: Pesä täynnä (vaihtopiste)
- 3-4: Pakkausvaihe
- 4: Maksimaalinen pesäpaine
- 4-5: Portin sulkeutumisvaihe
- 5-6: Jäähtyminen huoneenlämpöön

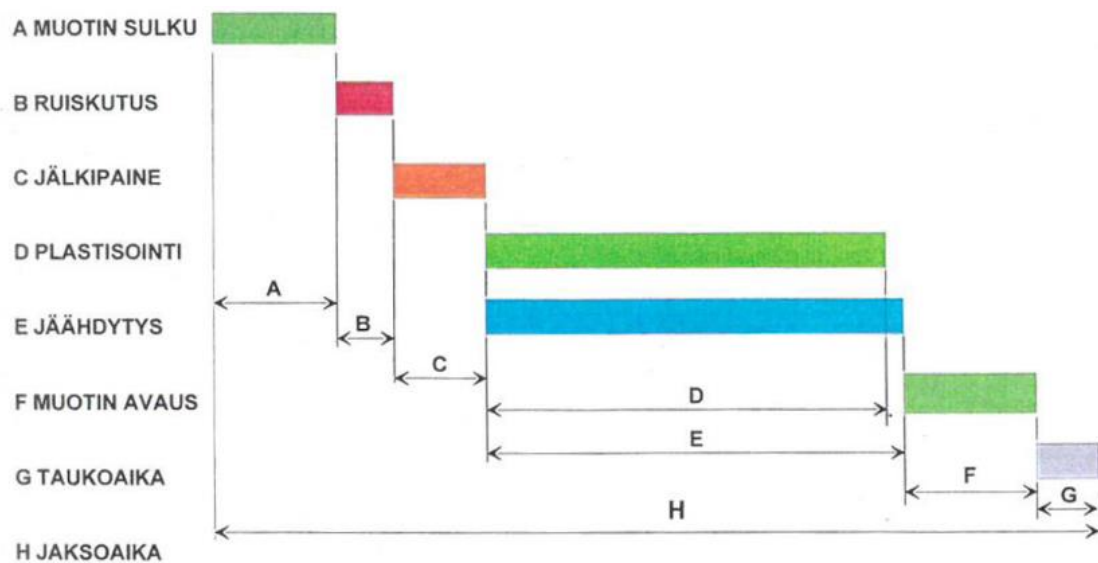
Kuva 3. Ruiskuvalupesän painekäyrä

1.5.2. Ruiskuvalujakso

Ruiskuvaluprosessin kontrolloinnilla on suuri vaikutus tuotteen laatuun; pinnanlaatuun, geometriseen muotoon ja raaka-aineen ominaisuuksiin (mekaaninen ja kemiallinen kestävyys). Huonolla ruiskuvaluprosessilla voidaan tuotettava kappale pilata, vaikka ruiskuvalutyökalut olisivat muuten kunnossa. (Järvelä, et al. 2000.)

1.5.3. Ruiskuvalujakson vaiheet

Ruiskuvalujakson vaiheet seuraavat toisiaan ja osa vaiheista tapahtuu myös osittain limittäin. Karkeasti ruiskuvalujakso voidaan jakaa kolmeen jaksoon: muotin sulkeminen, muotin täytyminen ja muotin avaus, jonka aikana myös kappaleen pukkaus pois muotista tapahtuu. Ruiskuvalutapahtuma kuvattu vaiheittain alla olevassa kuvassa (Kuva 4). (Järvelä, et al. 2000)



Kuva 4. Jaksoajan jakautuminen ruiskuvalun eri vaiheissa (Järvelä, et al. 2000.)

- A. Muotin sulkeminen: Muotti suljetaan, muotin sulkupainetta monitoroidaan, muottisululle on asetettu muottisulun varmistuspaineen rajat muotin vaurioitumisen estämiseksi.
- B. Ruiskutus: Muotti suljettu, plastisoitu muovisula ruiskutetaan muottipesään ruiskutusyksikön nokan kautta (Kuva 2), ruiskutusyksikön ollessa muotissa kiinni. Muottipesä ruiskutetaan tässä vaiheessa noin 95%:sti täyteen.
- C. Jälkipaine: Ruiskutusvaihetta seuraa jälkipaine. Muottipesän tilavuus, joka ruiskutusvaiheen aikana on jäänyt täyttämättä, täytetään tässä vaiheessa. Jälkipaineen avulla kompensoidaan myös muovin kutistumasta johtuva tilavuuden pieneneminen tuotettavassa kappaleessa lopullisen mittatarkkuuden saavuttamiseksi.

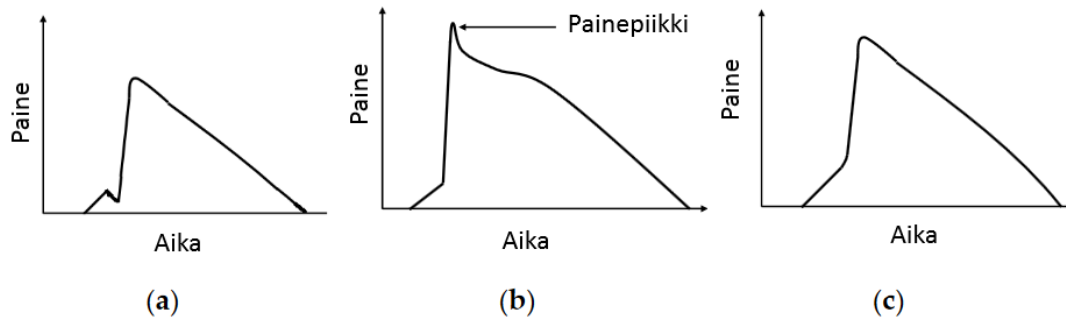
- D. Annostus ja plastisointi: Ruiskuvalukone plastisoi uuden annoksen sylinterissä ruiskutettavaksi (Kuva 2). Kuten (Kuva 4) voidaan nähdä, plastisointivaihe tapahtuu samaan aikaan jäähdytysjakson aikana.
- E. Jäähdytys: Jäähdytysaika on hallitseva parametri ruiskuvalukappaleen jaksoajassa. Muovisulan jäähtyminen alkaa heti kylmemmän muottipinnan kosketuksesta, mutta varsinainen jäähdytysaika alkaa jälkipainevaiheen päätyttyä.
- F. Muotin avaus ja kappaleen ulostyöntö: Muotti avautuu, kun tuote on jäähtynyt tarpeeksi, että muodonmuutosta ei enää tapahdu ulostyöntövaiheen yhteydessä tai sen jälkeen. Kappaleen ulostyöntö voi alkaa jo muotin avautumisen aikana, jos tuotteen ominaisuudet ja jäähtyminen ovat riittävällä tasolla.
- G. Tauko aika: Tauko aika tarvitaan, jos tuote ei irtoa muotista yhdellä pukkauskerralla vaan tarvitaan useampia pukkauksia tai tuotetta jäähdytetään vielä muottipesässä. (Järvelä, et al. 2000.)

Tässä työssä käsiteltävä vaihtopiste tapahtuu kuvan 4 vaiheiden B ja C aikana, kun ruiskutusvaiheesta siirrytään jälkipaineaikaan, sitä kutsutaan vaihtopisteeksi. Vaihtopiste kuvataan myös ruiskutusvaiheen siirtymisestä pakkausvaiheeseen, jossa jälkipaineella täytetään eli pakataan muottipesää tilavuuden täyttämiseksi, kuten kuvan 4 kohdassa C on kuvattu. Optimaalisessa painekäyrässä vaihtopiste sijoittuu (Kuva 3) mukaisesti.

1.5.4. Vaihtopiste

Vaihtopisteen vaikutus on tutkitusti todettu vaikuttavan tuotteen laatuun erittäin ratkaisevasti. Jos vaihtopiste aika on liian aikaisin, tuotteessa voi esiintyä vajautta, imujälkeä ja vääntymistä, (Kuva 5 (a)). Myöhäinen vaihtopiste aika aiheuttaa ylitäyttymistä ja paineipiikin muottipesään aiheuttaen tuotteeseen jälkijännityksiä, kalvoa tai jopa vakavia muodonmuutoksia tuotteelle ja muotille (Kuva 5. Vaihtopisteajan vaikutus muottipesän painekäyrään. Oikea vaihtopiste aika tuottaa täydellisen muottipesän täyttymisen sekä

riittävän jälkipaineen, jotta tuote on laadultaan paras mahdollinen. Muottipesän painekäyrä on tuolloin sulava ja tasainen kuten, (kuva 5 (c) on nähtävissä. (Chen, et al. 2019.)



Kuva 5. Vaihtopisteajan vaikutus muottipesän painekäyrään (Chen, et al. 2019.)

Muottipesän painekäyrän profiili ja sen toistettavuus vaikuttavat selvästi tuotetun kappaleen laatuun, erityisesti sen massan mittatarkkuuteen, mekaaniseen käyttäytymiseen sekä pinnan laatuun. Muottipaineprofilia voidaan siis hyödyntää ruiskuvaluprosessin ohjauksessa prosessin aikana. (Chen, et al. 2019.)

Vaihtopisteen ohjaukseen vaikuttavat tekijät ovat:

1. ruiskutusaika
2. ruuvien sijainti
3. hydraulinen paine
4. nokan paine
5. pesäpaine

1. Ruiskutusajan vaikutus vaihtopisteeseen: lämpötila vaikuttaa sulan viskositeettiin, joka vaikuttaa ruuvien pyörimisnopeuteen. Suurempi viskositeetti kasvattaa vastusta ruuvien pyörimiselle ja hidastaa plastisoidun materiaalin ruiskuttamista muottiin ja vaikuttaa sitä kautta ruiskutusaikaan. Pienemmän viskositeetin vastus ruuvien pyörintänopeuteen vaikuttaa ruiskutukseen niin, että muottipesä voi ylitäytyä. Ruiskutusaika ei näin ollen ole tehokas tapa vaihtopisteen ohjaukseen.

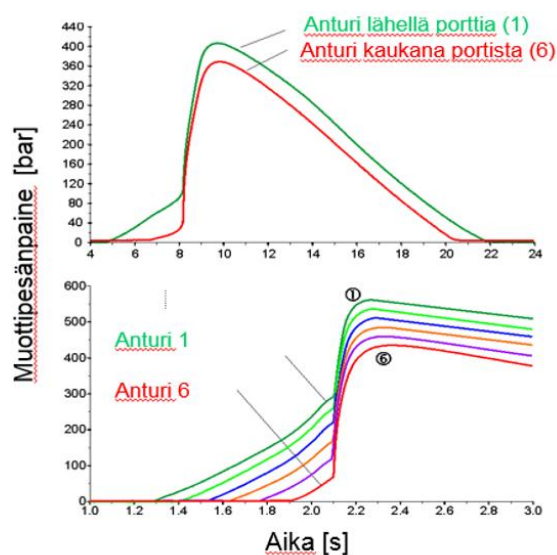
2. Ruuvien sijainnin vaikutus vaihtopisteeseen: ruuvien sijainnin vaikuttamisella vaihtopisteeseen on se etu, että siihen ei vaikuta lämpötila tai viskositeetti. Ruuvien sijainnin avulla voidaan kontrolloida muottipesän täyttymistä muovisulan tilavuuden perusteella. Esimerkiksi vuotava nokka voi kuitenkin aiheuttaa alitäyttymistä, kun vaihtopistettä ohjataan ruuvien sijainnilla. Pienissä komponenteissa ruuvien sijainnin mittaaminen voi vaikuttaa täyttymisen tarkkuuteen joko yli- tai alitäyttymisellä riippuen käytettävän ruuvien koosta ja laitteiston tarkkuudesta.
3. Hydraulisen paineen vaikutus vaihtopisteeseen: muovisulan pakkaaminen muottipesään tulee olla balanssissa ruiskuvalukoneen hydraulisen paineen kanssa, joka ohjaa ruuvien toimintaa. Hydrauliikkapaineen kasvu ruiskutuksen aikana pitäisi pystyä huomaamaan vaihtopisteen ajoituksen säätelyssä. Se voidaan huomata ruuvien kärjestä mitatusta paineesta verrattuna valukanavan alemmaan paineeseen. Kun hydrauliikan paineenkasvu havaitaan, pakkausvaihe on jo käynnissä. Tästä syystä hydrauliikkapaineen valvonta ei ole tehokas keino vaihtopisteen ohjaamiseksi.
4. Nokan paineen vaikutus vaihtopisteeseen: nokan paine tai ruiskutusaine tarkoittaa muovisulan painetta nokassa. Nokan paineen mittaustuloksen käyttö vaihtopisteen ohjauksessa on suositeltavaa. Menetelmässä on kuitenkin huonotkin puolensa, esimerkiksi anturin rikkoutuminen sellaisessa ympäristössä tapahtuu helposti.
5. Muottipesäpaineen vaikutus vaihtopisteeseen: muottipesän painekäyrä tarjoaa enemmän tietoa kuin nokan tai hydrauliikkapaineen mittaaminen. Nokan anturin mittaaminen tapahtuu koko ajan muovisulasta, kun taas muottipesän mittaaminen tapahtuu jäähtymisen aikanakin ja antaa paremman tuloksen lopullisesta tuloksesta. Vaihtopiste voidaan määrittää kahdella tavalla, joko silloin kun pesä on täynnä, (Kuva 3 (3)) tai kun maksimaalinen pesäpaine on saavutettu, (Kuva 4 (4)). Molemmilla menetelmillä voidaan välttää yli- ja alitäyttyminen muottipesässä. Kuitenkin, jos seurataan muottipesän täyttymistä kohdassa ennen pakkausvaihetta, ei tiedetä lopullista muottipesän painetta. Muottipesän maksimaalisen paineen seuranta antaa tiedon paremmin prosessin hallinnan kannalta. (Huang 2007.)

1.5.5. Paineanturin sijoituskohdan vaikutus ruiskuvalumuotissa

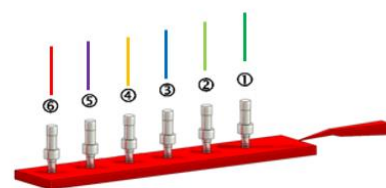
Paineanturin sijainti ruiskuvalumuotinpesässä on todella tärkeä tutkia ja suunnitella yhdessä muotin kehitysprosessin kanssa. Artikkelissa **“Correlation between runner pressure and cavity pressure within injection mold”** Kuo-Ming Tsai ja Jun-Kai Lan (Tsai 2015.) ovat tutkineet paineanturin sijoituskohdan vaikutusta ruiskuvalumuotissa. Paineanturin sijoitukseen vaikuttaa useita tekijöitä kuten valettavan kappaleen materiaalivahvuus, ruiskutuspaiste ja kappaleen muoto.

Anturin sijoituksen vaikutukset olivat nähtävissä tuloksissa niin, että pesä jossa anturi oli kauempana portista (Kuva 6), paineanturin tulokset olivat pienempiä. (Mustafa, et al. 2009, s. 3219-3221.)

Paineanturin sijainti muottipesässä vaikuttaa paineanturidatan profiiliin; lähempänä ruiskutusporttia olevan anturin paineenkasvu alkaa aikaisemmin kuin siinä tapauksessa, että anturi sijoitetaan edemmäksi portista. Myös paineprofiilin huippukohdassa on eroavaisuutta niin, että lähempänä porttia olevan anturin painehuippu on korkeammalla kuin silloin, jos anturi on sijoitettu kauemmaksi portista. (Mustafa, et al. 2009, s.3221.)



Esimerkki anturointi muotissa



Kuva 6. Paineanturin sijainnin vaikutus portista (Laatikainen 2022)

Paineen mittaus läheltä porttia antaa maksimi paineen pesästä. Paineanturidata näyttää sijoituskohdista parhaiten jälkipaineen, jos kappale on paksuin kuten yleensä tältä kohdalta. Tällä menetelmällä voidaan vaikuttaa parhaiten imujen ja mittavaihteluiden kontrollointiin. Ruiskuvalutuotteen prosessia voidaan ohjata parhaiten anturin sijoituksella mahdollisimman lähelle ruiskutus pistettä. (Tsai 2015, s.278.; Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

Sulavirtauksen loppuosaan sijoitetulla anturilla voidaan kontrolloida muovituotteen täyttymistä parhaiten. Ruiskuvalutuotteen maksimipaine voidaan mitata sijoittamalla paineanturi sulavirtauksen loppuosaan ja sitä kautta ruiskuvalutuotteen lopullisen mittaustuloksen ennustamisen suhteen paras paikka. (Tsai 2015, s.278.) Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

1.5.6. Muottilämpö

Myös paineanturin sijoituksen merkitystä muottilämmön vaikutuksesta muovituotteen laatuun on korostettu. Luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi anturin paikka on suunniteltava tarkasti. Tutkimuksessa anturit on sijoitettu neljäpesäiseen muottiin niin, että kolmessa pesässä se on sijoitettu yhden kolmasosan päähän valukanavasta ja yhteen pesään valukanavan vastapuolelle. Tutkimuksessa eri anturisijainnin sijoittelulla oli tarkoitus tutkia niiden vaikutusta muottipesän paineeseen. (Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

Tutkijoiden kuten Liu ja Mamat mukaan, yksi kriittisimmistä parametreista muovituotteen laadun kannalta on muottilämpötila. (Liu & Manzione, 1996, s.1-9; Mamat, et al. 1995, s.1511-1520.) Liu havaitsi, että kun muotin lämpötilaa nostettiin, tuotteen laatu saattoi heikentyä. Vastaavasti Mamatin tutkimuksen johtopäätös oli päinvastainen. Jotta voidaan rajata muotin todellinen lämpötilan vaikutus tuotteen laatuun, erityisesti kutistumiseen ja syklisyyteen, tuotteiden perusteelliset mittaukset on syytä suorittaa. Muovisulan lämpötilalla on iso vaikutus muotin lämpötilaan, joka on huomioitava myös prosessinohjauksessa. (Mustafa, et al. 2009, s.3221.)

Kokeelliset tulokset osoittavat, että lopulliseen mittalaatuun, kuten kutistumiin y- ja x-suunnassa ja syklisyyteen, vaikuttavat muottipesän paine sekä muotin lämpötila muotin täyttövaiheessa. Tutkimus osoittaa myös, että muottilämpötilan sekä paineen vaikutus ei ole tasaista tuotteen jokaisessa kohdassa. On mahdotonta mitata lämpötiloja ja painetta

jokaisesta kohdasta muottipesää. Yleisesti saatava tulos lämpötilasta ja muottipaineesta antaa riittävän tuloksen kappaleen laadun kannalta. Tutkimuksessa on selvästi havaittavissa tuotteen laadun osalta, että syklisyys sekä kutistumat y- ja x- suunnassa kasvavat, kun muottipesän painetta ja lämpötilaa lasketaan. Lisäksi muotin lämpötilan vaikutus syklisyyden osalta tarkkuuteen tulee selvemmäksi, kun muottipesän paine kasvaa. Laadukkaampien tuotteiden valmistuksessa kutistumaa tuotteessa tulee vähentää. Tutkimus osoittaa, että optimaalisen muottipaineen ja lämpötilan avulla kutistumaa voidaan vähentää jopa 50%. (Mustafa, et al. 2009, s.3223.)

Muovisulan lämpötilan kasvatus kasvattaa myös painetta pesässä, joka on nähtävissä paineanturin datassa (Mustafa, et al. 2009, s.3221). Tämä on syytä huomioida paineanturi dataa tutkittaessa tai käytettäessä paineanturi dataa prosessin ohjauksessa.

Monipesäisen muotin anturoinnissa yksi tärkeä huomio on, että vaikka muotin geometria tuotteen muotojen osalta on symmetrinen, paineanturin antamat tulokset voivat vaihdella, jos juoksukanavan ja porttien yhdenmukaisuus ei ole tasapainossa eri pesien välillä. Vaikka pesien välillä on eroa paine datan numeraalisessa muodossa, painekäyrä noudattaa samaa profiilia kaikkien pesien osalta. (Mustafa, et al. 2009, s.3220.)

Anturin asennuskorkeudella on myös tulosten kannalta iso merkitys. Liian matalalle asennettu anturi aiheuttaa virheellistä tulosta muovisulan jäähtymisen vuoksi aikaisemmin kuin muualla mitatuissa pisteissä. Paineanturin asennuspaikka sekä asennuskorkeus vaikuttivat paineanturikäyrän profiiliin. Mitä lähempänä anturi sijaitsee valukanavan alkupäätä, sitä suurempi ainevahvuus tulee olla koska silloin paineanturitulokset korreloivat pesästä saatavaan paineanturitulokseen. (Tsai 2015, s.278.)

Tutkimusten perusteella yksi kriittisimmistä parametreista ruiskuvaletun osan kohdalta on muottilämpötila. Tutkimuksissa on kuitenkin ristiriitaisuuksia, sillä osassa muottilämpötilan nostolla ruiskuvalettavan osan laatu heikentyi, kun taas osassa tutkimuksia parantui. Jotta muottilämmön todellinen vaikutus tuotteen laatuun voidaan rajata, on kappaleiden lopullinen kutistuma ja syklisyys tutkittava ja mitattava tarkemmin. (Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

Hallitseva tekijä muotin lämpötilaan on sulalämpötila. Muotin lämpötilan nousu ja lasku seuraa samaa mallia riippumatta alkuolosuhteista. Tämä malli auttaa parantamaan tuotteen

laadun ennustettavuutta ja ohjattavuutta ruiskuvaluprosessin aikana. (Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

1.5.7. Sulalämpötila

Nostamalla sulalämpötilaa $185^{\circ}\text{C} \Rightarrow 200^{\circ}\text{C}$, muottipesän paine kasvoi lämpötilan noston mukaisesti. Sulalämpötilan nosto vaikuttaa valettavan materiaalin valunopeuteen kasvattavasti ja sitä kautta muottipesän paineeseen. Jälkipaineen vaikutus muotin lämpötilaan on pienempi kuin sulalämpötilan (Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

1.5.8. Jälkipaine ja jälkipaineaika

Oikea jälkipaine ja jälkipaineaika vähentää muovituotteen kutistumaa, jolloin lopulliset mitat ovat lähempänä muottipesän mittoja. Sisäiset jännitykset sekä vääntymät tulevat kuitenkin ilmiöinä kasvatetusta jälkipaineesta. (Hassan 2012, s.3223.)

Vahva yhteys ruiskuvalukanavasta ja muottipesästä saatavilla tuloksilla on muiden parametrien osalta, paitsi jälkipaineajan suhteen. Valukanavan paineanturin tuloksia voidaan siis käyttää luotettavasti ruiskuvalukomponentin laaduntarkkailuun muottipesän sijasta. (Tsai 2015, s.273-284.)

1.5.9. Ruiskutusaine ja ruiskutusnopeus

Ruiskutusaine, ruiskutusnopeus ja jälkipaine toimivat ruiskuvalukanavasta tehtyyn mittaukseen painemittaukseen yhtä hyvin kuin itse pesästä tehtyyn mittaukseen, jos paineanturin sijoituksessa on huomioitu materiaalin paksuus verrattuna valukanavan paksuuteen (Tsai 2015, s.277-278).

1.5.10. Jäähdytysaika

Jäähdytysaika on yksi tärkeimmistä parametreista ruiskuvaluprosessissa. Se on aika, jolloin muovimateriaali jäähtyy sulasta kiinteään muotoon ja se voidaan poistaa muotista. Jäähdytysajalla on suuri vaikutus tuotteen kutistumaan. On tutkittu, että jopa 95 prosenttia tuotteen kutistumasta tapahtuu muotissa ja loppu 5 prosenttia tapahtuu 30 päivän aikana valmistuksesta. (Bryce 1996.)

1.5.11. Muotin symmetria

Kaikissa pesissä paineanturin tulokset olivat hieman erilaiset. Saadut tulokset kuitenkin noudattivat samaa kaarta pesäkohtaisesti prosessiparametrien muutoksien aikana. Muottipesien geometrian ollessa symmetriset, erot tulevat luultavasti valukanavien ja portin välisistä eroista, jotka eivät ole symmetrisiä. (Mustafa, et al. 2009, s.3219-3221.)

1.5.12. Ruiskuvaletun kappaleen kutistuma

Ruiskuvalukappaleen kutistuma on ruiskuvaletun kappaleen mitta mitattuna ruiskuvaluprosessin jälkeen, kun kappale on jäähtynyt huoneenlämpöön ja erotus mittaustuloksesta, kun kappale on ollut 48 tuntia huoneenlämmössä. Kutistuma on usean eri ominaisuuden kuten kappaleen muodon, materiaalin työkalun ja prosessin vaikutuksesta muodostuva kokonaisuus. Kutistuma on syytä huomioida ruiskuvalukappaleen lopullisten mittojen arvioinnissa. (Fisher 2013.)

1.5.13. Optimaaliset parametrit

DOE (Design Of Experiments)

Prosessin seuraaminen ja tunteminen on todella tärkeässä roolissa tuotannon kehittämisessä. Prosessiparametrien muutosten vaikutukset tuotteelle on tärkeää tuntea, että voidaan tuottaa laadukkaita tuotteita. Jokaisen yksittäisen parametrin muutos pitäisi testata muutoksen

vaikutuksen todentamiseksi. DOE:ssa voidaan matemaattisella mallilla vähentää testiajoja tutkimalla eri prosessiparametrien vaikutusta yhdistelmänä. Prosessille kriittisten parametrien tunnistaminen vähentää tutkittavien muuttujien tutkittavaa määrää. Tutkittavia parametrejä voidaan lähestyä kahdella tapaa; paras arvaus -lähestymistavalla tai yksi muuttuja kerrallaan -lähestymisellä. Paras arvaus -menetelmässä on huonona puolena se, että optimaalisen tuloksen löytäminen ja arvaaminen voi viedä pitkän ajan ja useita arvauksia. Yksi muuttuja kerrallaan -menetelmässä huonona puolena on se, että se ei huomio muiden muuttujien vaikutusta prosessissa. Oikea lähestymistapa on tutkia muutoksia yhdistelemällä, jossa tutkitaan kaikkia valittuja muuttujia yhdessä. (Montgomery 2013, s.3-5.)

Käyttämällä DOE menetelmää voidaan prosessia optimoida helpommin ja vähemmällä testauksen määrällä. DOE:n avulla voidaan tuotannon toimivuus saattaa luotettavammalle tasolle, pienentää tuotteenvalmistuskuluja sekä lyhentää tuotteen suunnittelu- ja kehitysaikaa. DOE toimii työkaluna myös markkinoinnissa, markkinatutkimuksessa sekä yleisesti liiketoiminnassa. (Montgomery 2013, s.8.)

DOE tutkimuksen toteutus

DOE tutkimus toteutetaan Montgomery ja Colemanin mukaan (Montgomery 2013),
Taulukko 1 DOE ohjenuora:

1. “Ongelman tunnistaminen ja ilmaiseminen (Ennakkosuunnitteluvaihe)
2. Vaikuttavien muuttujien valinta (Ennakkosuunnitteluvaihe)
3. Tekijöiden, tasojen ja vaihteluvälin valinta
4. Kokeen määrittäminen (Choice of experimental design)
5. Tutkimuksen suoritus
6. Tulosten analysointi
7. Päätelmät ja suositukset”

Taulukko 1 DOE ohjenuora (Montgomery 2013.)

1. Ongelman tunnistaminen ja ilmaiseminen. Tämä ilmeiseltä tuntuva seikka on usein vaikeasti ymmärrettävissä, eikä ole helppo välttämättä esittää selkeästi tutkittavaa ongelmaa. Tutkittavan ongelman selkeä ilmaisu edistää olennaisen tutkittavan ilmiön ja lopputuloksen ymmärtämistä. On tärkeää pitää mielessä tutkimuksen tavoite, sillä useat eri tekijät vaikuttavat tutkimuksen lopputulokseen. Siitä syystä on hyvä lukita vähäisemmin vaikuttavat tekijät tutkimusta tehdessä. (Montgomery 2013.)
 - a. Tekijäseulonta: kun järjestelmä tai prosessi on uusi, on tärkeää oppia mitkä tekijät vaikuttavat eniten tutkittavaan ongelmaan. Vaikuttavimmat tekijät valitaan tarkempaan analysointiin ja tutkittavaan ongelmaan valitaan. Vähemmän vaikuttavat pyritään pitämään muuttumattomina tutkimusta suoritettaessa. Näin vältetään turhaa resurssien tuhlausta. (Montgomery 2013.)
 - b. Optimointi: kun tärkeät, eniten tutkittavaan ongelmaan liittyvät parametrit on tunnistettu, siirrytään seuraavaan vaiheeseen eli optimointiin. Optimoinnissa haetaan optimaaliset arvot, joilla saavutetaan paras mahdollinen tulos tutkittavan ongelman suhteen. (Montgomery 2013.)
 - c. Vahvistus: vahvistuskokeella vahvistetaan teorian tai aikaisemman kokemuksen perustella saatujen tulosten paikkansapitävyys. Esimerkiksi raaka-aineen vaihdossa halvempaan materiaaliin, vahvistetaan tuotteelle tärkeiden ominaisuuksien yhtäläisyys aikaisemmin käytettyyn raaka-aineeseen. (Montgomery 2013.)
 - d. Havainnot/löydöt (Discovery): tutkimuksessa, tutkijat pyrkivät määrittelemään, mitä tapahtui ja mitä tulokset tarkoittavat. Esimerkiksi mistä tulosten vaihtelut johtuvat tai mikä parametriyhdistelmä tuo parhaimman tai tehokkaimman tuloksen. (Montgomery 2013.)
 - e. Kestävyys: tutkimuksissa käsitellään yleensä kysymyksiä, joissa ollaan kiinnostuneita muuttujien rajoista, joissa tulokset ovat vielä hyväksytyissä rajoissa. Rajojen määrittelyllä voidaan määritellä prosessi-ikkuna, jonka rajojen sisällä prosessi toimii halutulla tavalla. (Montgomery 2013.)

2. Vaikuttavien muuttujien valinta. Perustuen kokemukseen tai teoriaan, tutkimuksen suorittajan tulee olla täysin varma vaikuttavien muuttujien valinnasta. Vaikuttavien muuttujien vaikutus tutkimuksen lopputulokseen on todella suuri. Väärillä muuttujilla tutkimuksen tulos on virheellinen tai heikko. Tutkijoiden on päätettävä, miten tuloksia mitataan. Mittausjärjestelmän kyky vaikuttaa lopputuloksen tarkkuuteen. (Montgomery 2013.)
3. Tekijöiden, tasojen ja vaihteluvälin valinta. Taulukko 1 DOE ohjenuoran (Taulukko 1) mukaisista kohdista 2. ja 3. tehdään samanaikaisesti tai voidaan tehdä myös päinvastaisessa järjestyksessä. Vaikuttavia tekijöitä prosessin suorituskäytössä tutkiessaan tutkija voi huomata tekijöitä, jotka ovat joko vaikuttavia tai häiritseviä. Vaikuttavat tekijät ovat niitä tekijöitä, joita tutkija haluaa muuttaa tutkimuksen tarkastelussa. Häiritsevät tekijät ovat tekijöitä, jotka ovat tutkimuksessa vähemmän kiinnostavia tuloksen suhteen ja siitä syystä nämä tekijät yleensä pyritään lukitsemaan eli pidetään mahdollisimman samana tutkimuksen aikana. Lukittujen tekijöiden vaikutusten oletetaan olevan vaikutukseltaan pieniä lopputulokseen. Toisaalta häiritseviällä voi olla suuria vaikutuksia, jotka on otettava huomioon. Häiritseviä voidaan luokitella hallittaviksi, hallitsemattomiksi tai häiritseviksi. Hallittavat häiritsevät tekijät ovat tutkijan asetettavissa, kuten esimerkiksi eri raaka-aine-erät. Jos häiritsevä on kokeessa hallitsematon, mutta mitattavissa, voidaan sen vaikutusta kompensoida käyttämällä apuna esimerkiksi kovarianssianalyysiä. Häiritsevä on tekijä, joka vaihtelee luonnollisesti ja hallitsemattomasti. Häiritsevän vaikutusta pyritään pienentämään mahdollisuuksien mukaan niin pieneksi kuin mahdollista. Tätä toimenpidettä kutsutaan yleensä prosessin kestävyystutkimukseksi (robustness study or a robust design problem). Kun tutkija on valinnut vaikuttavat tekijät, joita muutetaan, on valittava tietyt tasot, joilla ajot suoritetaan. On myös pohdittava, miten näitä tekijöitä halutaan ohjata halutuilla arvoilla ja miten niitä mitataan. Tutkijan on päätettävä kunkin muuttujan kiinnostava alue sekä kuinka monella tasolla muuttujaa käytetään. Tätä tietoa varten tulee olla prosessituntemusta sekä teoreettista tuntemusta. Yleensä kokeen alussa muuttujat tai prosessiparametrit kannattaa pitää lukumääräisesti pienenä ja tutkittava parametri-ikkuna laajana, joka pienentyy, kun tutkimuksessa selviää eniten vaikuttavat tekijät. (Montgomery 2013.)

4. Kokeen määrittäminen. Kun yllä mainitut toimenpiteet on tehty hyvin ja huolella, tämä vaihe on suhteellisen helppo. Määrittämisessä suoritetaan otoskoon huomioiminen ja soveltuvan ajojärjestyksen valinta kokeelliselle kokeelle. Tarjolla on useita tilastollisia ohjelmistoja, joissa tutkija syöttää ohjelmistoon tekijöiden, tasojen ja vaihteluvälien tiedot, joiden perusteella ohjelmisto laskee ja suosittelee suoritettavien kokeen mallin tai malleja. (Montgomery 2013.)
5. Tutkimuksen suoritus. Tutkimusta suoritettaessa on tärkeää varmistaa tutkittavien parametrien oikea asetus. Tässä vaiheessa virheellisesti asetettu parametri voi tuhota koko kokeen validiuden. On suositeltavaa tehdä muutamia koeajoja, joissa todennetaan prosessin toimivuus, mittauksen luotettavuus ynnä muut sellaiset seikat, jotka vaikuttavat tutkimuksen tulosten tarkkuuteen. (Montgomery 2013.)
6. Tulosten analysointi. Aineiston analysointiin tulisi käyttää tilastollisia menetelmiä, jotta tulokset ja johtopäätökset ovat luonteeltaan objektiivisia eikä tuomitsevia. Jos koe on suunniteltu ja suoritettu oikein, tilastolliset menetelmät eivät ole monimutkaisia. Ohjelmistot antavat yleensä yksinkertaisia graafisia menetelmiä analysointiin ja tulkintaan tutkimuksen tuloksista. Grafiikat esittävät kokeista empiirisen mallin eli yhtälön, joka on johdettu tiedoista ja jotka ilmaisevat vasteen ja suunniteltujen tekijöiden välistä suhdetta. (Montgomery 2013.)
7. Päätelmät ja suositukset. Kun tiedot on analysoitu, tutkijan tulee tehdä käytännön johtopäätökset tuloksista ja suositella käytettäviä arvoja. (Montgomery 2013.) Graafiset menetelmät ovat hyvä keino esitellä tuloksia muille. On myös hyvä suorittaa seuranta-ajot tai koeajot valituille arvoille varmistamisen vuoksi. (Mason, et al. 2003.)

Taguchi -menetelmä

Tutkittaessa paineanturin tuloksia muottipesässä, prosessi kannattaa aloittaa optimoimalla prosessiparametrit optimaaliseksi. Tähän on tarjolla useita menetelmiä, joista yksi yleisimmin käytetty on Taguchi -menetelmä. Taguchi -menetelmässä käytetään eri parametrejä kuten sulalämpötila, ruiskutusaine, vaihtopiste, jäähtytysaika, jälkipaineaika, jälkipaine, muotin lämpötila ja ruiskutusnopeus. Kun näistä parametreistä on selvitetty

optimaaliset arvot, niiden muutosten vaikutusta tutkitaan yksi parametrimuutos kerrallaan. (Tsai 2015, s.276-277.)

1.5.14. Regressioanalyysi ja korrelaatioanalyysi

Regressioanalyysi ja korrelaatioanalyysi ovat kokeellisen tutkimuksen menetelmiä, joilla kahden tai useamman muuttujan välisiä yhteyksiä tutkitaan. Regressioanalyysissä on selitettävä muuttuja tai riippuva muuttuja y ja yksi tai useampi selittäjä tai riippumaton muuttuja x . Esimerkiksi, jos energian kulutus omakotitalossa vuorokauden aikana on y , sisälämpötilan ja ulkolämpötilan välisen erotuksen keskiarvo on x_1 ja keskimääräinen tuulen nopeus vuorokauden aikana x_2 . Näiden muuttujien y - ja x - suhteen tehdään toisiaan vastaavia havaintoja ja sovitetaan lineaariseen regressiomalliin (linear regression model). Tutkimuksen malli voi tällöin olla muotoa $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$, jossa y on energiakulutuksen muuttuja ja x_1 ja x_2 on lämpötilaero ja tuulen nopeus. $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ ovat mallin parametrikertoimia, joille lasketaan arvot havainnoista niin, että funktio vastaa havainnointiaineistoa mahdollisimman hyvin. Yksi tavallisimmista tavoista laskea parametrien arvot on käyttää pienimmän neliösumman keinoa (method of least squares). (Laininen 2000, s.61-62.)

Jos tutkittavien muuttujien riippuvuus on epälineaarista, voidaan ensimmäisen asteen polynomin sijaan käyttää täydellistä toisen asteen polynomia $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2$. Se että tarvitaanko toisen asteen polynomia, selviää käytännön sovituksella havaintoihin. (Laininen 2000, s.61-62.)

Ensimmäisen asteen polynomi ja toisen asteen polynomi on regressioanalyysissä lineaarisia malleja (linear model). Mallia sanotaan lineaariseksi, jos se on lineaarinen parametrien suhteen. (Laininen 2000, s.61.)

β -parametrejä sanotaan lineaarisessa mallissa regressiokertoimiksi (regression coefficient). Nimitykset selitettävä y ja selittäjät x_1, x_2 tulevat siitä, että regressioanalyysin tehtävä on selittää havainnointiaineistossa esiintyvistä y -arvojen vaihtelusta mahdollisimman suuri määrä x -muuttujien arvoilla esiintyvillä muutoksilla. (Laininen 2000, s.61-62.)

Satunnaisvaihtelua esiintyy aina havaintoaineistossa. Havaittavien suureiden y ja x ei voida ajatella olevan täydellistä funktionaalista yhteyttä. Tilastollinen malli (statistical model) on realistisempi, se ottaa huomioon satunnaisvaihtelun. (Laininen 2000, s.61-62.)

Usean muuttujan regressioanalyysissä on useita selitettäviä x -muuttujia ja tehtävänä on löytää niistä sellaiset, joista muodostuu lineaarinen funktio ja jotka selittävät y -muuttujan arvojen vaihtelun parhaiten. Ongelman ratkaisu tapahtuu yleensä kokeilemalla ja vertailemalla erilaisia malleja. Tilastolliset ohjelmistot sisältävät sellaisia regressio-ohjelmia, joilla mallien vertailu voidaan suorittaa. (Laininen 2000, s.61-62.)

1.5.15. Korrelaatiokerroin

Jos tutkimuksen hajontakuviossa ei ilmene mitään säännönmukaisuutta, on turhaa tutkia asiaa tilastomatematiikan perusmenetelmillä. Jos hajontakuviossa on säännönmukaisuutta, on mahdollista tutkia tarkemmin muuttujien välistä yhteyttä laskemalla korrelaatiokerroin (coefficient of correlation). Korrelaatiokerroin on tilastollinen tunnusluku, jota käytetään hyväksi tilastoanalyysissä. (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.233.)

Korrelaatiokertoimella mitataan muuttujien välisen yhteyden voimakkuutta. Korrelaatiokertoimia on useita mitta-asteikoiden huomioimisen vuoksi. Yleisimmin käytetyt korrelaatiokertoimet ovat Pearsonin (korrelaatiokerroin) ja Spearmanin (järjestyskorrelaatiokerroin). (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.233.)

Pearsonin korrelaatiokerroin

Pearsonin korrelaatiokerroin (Pearson's correlation coefficient) on yleisimmin käytetty korrelaatiokerroin.

Tutkimusaineisto koostuu lukupareista $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots, (x_n, y_n)$, joissa n on havaintoparien eli tapausten tai kokeiden määrä, x_1 muuttuja X arvo ja y_1 on vastaavan muuttujan Y arvo. Muuttujat on mitattu välimatka- tai suhdeasteikolla, muuttujien x ja y välinen Pearsonin korrelaatiokerroin r on:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (1)$$

x_i = muuttuja x i havaintoarvo

\bar{x} = x_i -arvojen keskiarvo

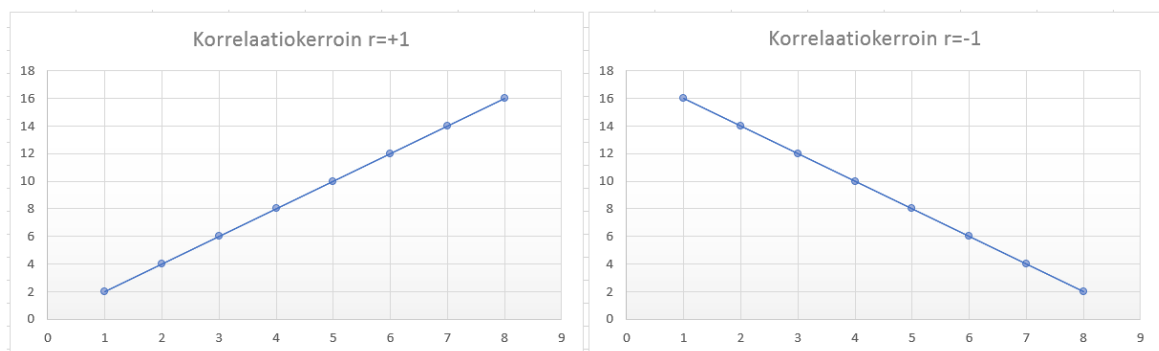
y_i = muuttujan y i havaintoarvo

\bar{y} = y_i -arvojen keskiarvo

Korrelaatiokertoimen ominaisuuksia

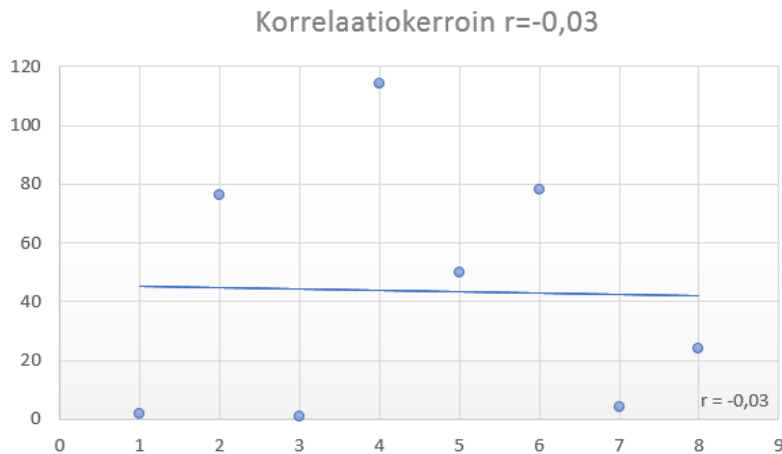
Korrelaatiokertoimen ominaisuuksia Holopainen ja Pulkkinen mukaan (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.233-235):

1. "Pearsonin korrelaatiokerroin r mittaa vain lineaarista yhteyttä.
2. Korrelaatiokerroin r on aina -1:n ja +1:n välillä oleva reaaliluku: $-1 \leq r \leq +1$.
3. Korrelaatiokerroin +1 saavutetaan, kun hajontakuvion kaikki pisteet sijaitsevat samalla nousevalla suoralla ja -1 saavutetaan kun kaikki pisteet sijaitsevat samalla laskevalla suoralla (Kuva 7. Korrelaatiokertoimet suoralla).



Kuva 7. Korrelaatiokertoimet suoralla

4. Mitä lähempänä korrelaatiokertoimen itsearvo on lukua 1, sitä vahvempi on muuttujien välinen lineaarinen yhteys.
5. Jos muuttujat ovat riippumattomia, muuttujien välinen korrelaatiokerroin on likimäärin nolla. Esimerkiksi korrelaatio lähellä nollaa (Kuva 8).



Kuva 8. Korrelaatiokerroin lähellä nollaa

6. Vaikka korrelaatiokerroin olisi nolla, muuttujat eivät ole välttämättä riippumattomia. Muuttujien välillä voi olla muunlaista yhteyttä, vaikka muuttujien yhteys ei ole lineaarista.
7. Korrelaatiokertoimella ei ole mittayksikköä, ja sen arvo on riippumaton muuttujien mittayksiköistä. Korrelaatiokertoimen arvo ei myöskään muutu, vaikka muuttujan x tai muuttujan y tai molempien arvot kerrotaan (tai jaetaan) mielivaltaisella positiivisella vakiolla.
8. Korrelaatiokertoimen arvo on sama, vaikka x :n ja y :n arvot vaihtavat paikkaa.
9. Korrelaatiokerroin on herkkä poikkeaville arvoille (outlier). Erityisesti pienissä aineistoissa yksikin toisista selvästi poikkeava arvo voi suuresti vaikuttaa korrelaatiokertoimen arvoon.”

Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin

“Pearsonin korrelaatiokerrointa käytettäessä molempien muuttujien mitta-asteikkojen on oltava vähintään välimatka-asteikkoja” (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.234). Ellei tämä ehto ole voimassa, Pearsonin korrelaatiokerrointa ei voida käyttää muuttujien välisen yhteyden voimakkuuden mittaamiseen. Tällaisten tapausten varalle on kehitetty muita muuttujien välistä yhteyttä kuvaavia mittoja. Yksi niistä on Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin (Spearman’s coefficient of rank correlation), jolla on monia

samoja piirteitä kuin Pearsonin korrelaatiokertoimella.” (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.234.)

Muuttujaparien x ja y havaintoarvojen muuttujat $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots, (x_n, y_n)$, n on havaintoparien eli tapausten tai kokeiden määrä, x_1 muuttuja x arvo ja y_1 on vastaavan muuttujan y arvo. Muuttujat ovat järjestysasteikolla, muuttujien x ja y välinen Spearmanin korrelaatiokerroin r_s on:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot (\sum_{i=1}^n d_i^2)}{n(n^2-1)} \quad (2)$$

d_i = i:nnen havaintoparin järjestyslukujen erotus

n = havaintoparien määrä

Järjestyskorrelaatiokertoimeen ei liity mitään mittayksikköä ja sen arvo on aina välillä $[-1,1]$ (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.239-240.)

Korrelaatiokertoimen merkitsevyys

Korrelaatiokertoimen arvo poikkeaa yleensä nollassa. Tutkimuksen peruskysymyksiä on, milloin poikkeama nollassa on niin suuri, ettei sitä voida katsoa pelkästään satunnaisista syistä johtuvaksi. Korrelaatiokertoimen arvo selvitetään testaamalla esimerkiksi käyttämällä apuna tilasto-ohjelmistoa. Ohjelmisto antaa suoraan korrelaatiokertoimen testauksen kriittisen p -arvon, joka vastaa annettua riskitasoa ja otoskokoa. P -arvo on erehtymisriski, kun nollahypoteesi hylätään. Pearsonin korrelaatiokertoimen testauksen edellyttää:

- molemmat muuttujat noudattavat ainakin likimäärin normaalijakaumaa
- tapaukset muodostavat satunnaisotoksen perusjoukosta
- muuttujien saamat arvot yhden tapauksen osalta ovat riippumattomia muuttujien saamista arvoista muiden tapausten osalta.

Jos hajontakuviot antaa aiheita epäillä, ettei muuttujien välinen yhteys ole suoraviivainen, korrelaatiokertoimen testaus ei välttämättä anna totuudenmukaista kuvaa muuttujien välisestä yhteydestä. (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.242.)

Korrelaatiokertoimen testaamisessa testin nollahypoteesinä on se, että Pearsonin korrelaatiokerroin on nolla ($r = 0$). Tämä vastaa tilannetta, jossa muuttujat ovat toisistaan lineaarisesti riippumattomia. Testisuurena käytetään lauseketta:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

Jossa n on näytemäärä ja r Pearsonin korrelaatiokerroin.

Testisuureen saamaa arvoa verrataan t-jakauman taulukon arvoon, kun vapausasteita (degrees of freedom) f tai df on $n-2$ ja tehdään lopuksi johtopäätös. (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.242-245.)

Testisuureen t avulla voidaan laskea eri muuttujien vaikutusta regressiomalliin. Esimerkiksi miten operaattorin toiminta vaikuttaa mittaustulokseen. Operaattorin vaikutusta mittaustuloksen toistettavuuteen mitataan yleensä Gage Repeatability & Reproducibility eli Gage R&R-analyysillä.

Selityskerroin R^2

Mallin luotettavuuden arviontiin on yhtenä keinona laskea selityskerroin tai selitysaste (coefficient of determination) R^2 , joka mittaa selitettävän muuttujan vaihtelua mallissa. Selityskerroin mittaa mallin kykyä kuvata selitettävän muuttujan vaihtelua. Mallin hyvyys vaikuttaa vahvasti tulokseen. (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.232-233.)

Selityskerroin yhden muuttujan tapauksessa on:

$$R^2 = r^2 \cdot 100\% \quad (4)$$

R^2 arvo ilmaisee prosenttiluvun, jonka selitettävän muuttujan x vaihtelusta voidaan selittää selittävän muuttujan y vaihtelusta x :n avulla. Alhainen selityskerroin kertoo, että mallissa on muitakin tulokseen vaikuttavia muuttujia x :n suhteen kuin y . Korkea selityskerroin kertoo muuttuja x :n suurimman osan y :n vaihtelusta, joka on merkki mallin hyvydestä. (Holopainen & Pulkkinen 2002, s.233.)

2. Materiaalit ja menetelmät

Tutkimuksessa käytetyt materiaalit olivat vastaanottotarkastettuja ja validoituja lääkinnällisten laitteiden valmistukseen hyväksytyjä materiaaleja. Menetelmät ja laitteet olivat materiaalien tavoin validoituja ja lääkinnällisten laitteiden valmistukseen hyväksytyjä.

2.1. Materiaali

Korrelaatioanalyysi tässä työssä on tehty tuotteelle, jonka materiaalina on käytetty Polyasettaattia (POM).

Polyasettaatti on tekninen, osakiteinen kestopuovi, jonka tiheys suurimpia kestopuoveista, noin $1,4\text{g/cm}^3$. POM soveltuu erittäin hyvin teknisten tarkkuustuotteiden valmistukseen. Sitä työestetään pääsääntöisesti ruiskuvalamalla. POM on modifioitavissa käyttökohteen mukaan lujittamalla, värjäämällä ja seostamalla tarpeen mukaan. Materiaalina se soveltuu käytettäväksi hammaspyöriin, vaihteistoihin, laakereihin, pumppujen osiin, sähkökomponentteihin, venttiileihin, saniteettikalusteiden vedenalaisiin osiin, vetoketjuihin, kampoihin, kyniin ja aerosolipakkauksiin. (Järvelä, et al. 2000, s.27.)

2.2. Ruiskuvalukone

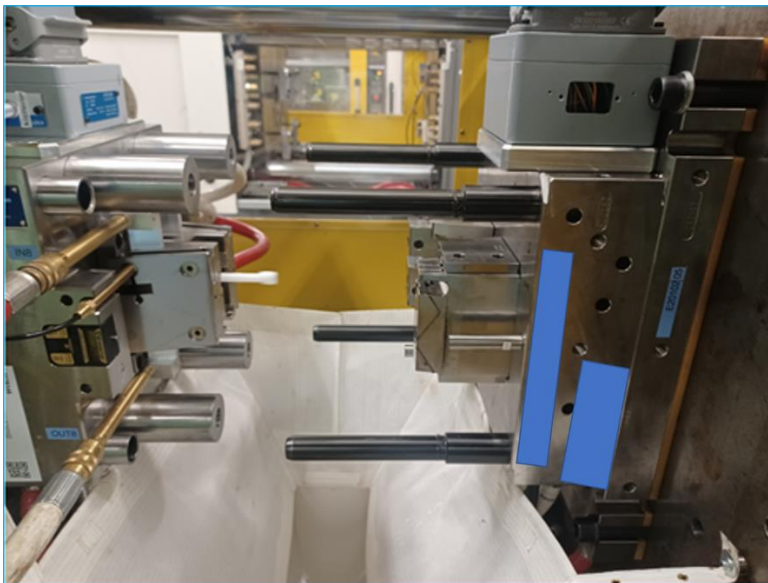
Tässä työssä käytetty ruiskuvalukone oli (Kuva 9) Fanuc Roboshot S-2000i150B.



Kuva 9. Fanuc ROBOSHOT S-2000i150B ruiskuvalukone (Alibaba 2022).

2.3. Ruiskuvalumuotti

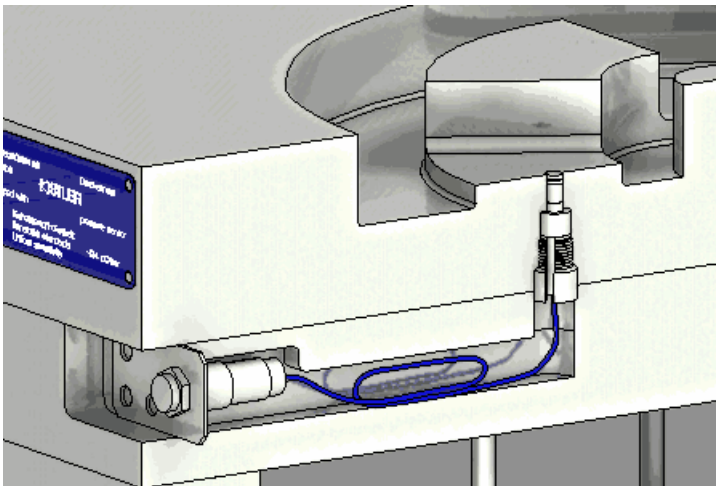
Ruiskuvalumuotti (Kuva 10) oli yksipesäinen sarjatuotantomuotti. Muotti oli validoitu täyttämään kaikki tuotteelle sekä muotille asetetut laatu- ja toiminnalliset vaatimukset. Käytetty paineanturi oli Kistler, tyypiltään suora. Anturin sijoitus muottipesässä mahdollisimman lähellä viimeiseksi täyttyvää pistettä.



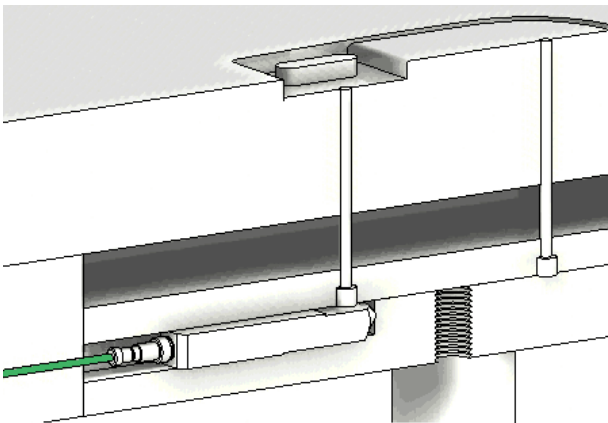
Kuva 10. Tutkimuksessa käytetty ruiskuvalumuotti

2.4. Anturi ja sen oheislaitteet

Ruiskuvalumuottiin asennettava anturi voi olla tyypiltään suora tai epäsuora. Suoralla anturilla tarkoitetaan anturia, jonka mittauspää on suoraan muotin sisällä (Kuva 11) ja epäsuoralla (Kuva 12) tarkoitetaan anturia, joka mittaa paineen pukkaustapin tai välitystapin välityksellä.



Kuva 11. Suoran mittauksen anturi (Laatikainen 2022)

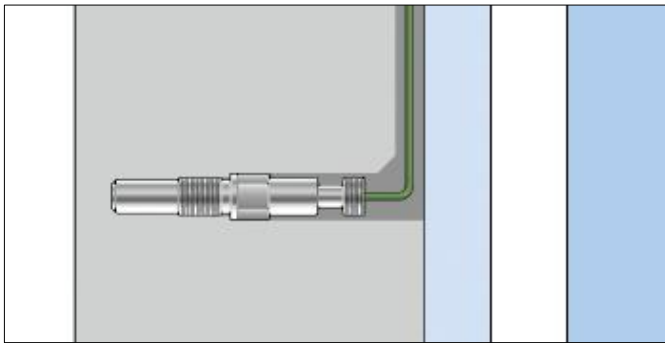


Kuva 12. Epäsuora mittauksen anturi (Laatikainen 2022)

Molemmissa anturin asennustyypeissä on omat hyvät sekä huonot puolensa. Suoran mittauksen anturin etuina on hyvin tarkka mittaustulos, anturin kärki voidaan koneistaa haluttuun muotoon ja anturin tukeva asennus. Huonoina puolina suoran mittauksen antureilla on muotin koneistus ja anturin paikoitus vanhoihin tai monimutkaisiin muotteihin

voi olla vaikeaa. Epäsuoran mittauksen antureiden etuna on helpompi asennettavuus kuin suoran mittauksen antureilla. Haittoina voi olla virheet anturin mittaustuloksissa pukkaustapin tai välitystapin taipumisesta, kulumisesta tai likaisuudesta johtuen. Virhe voi olla väliltä 5–15%. Anturin asennuspaikka oltava erittäin tarkasti valittu, koska pukkaustapin tai välitystapin kitka voi vaikuttaa mittaustuloksiin.

Markkinoilla on myös tarjolla kosketusvapaita antureita (Kuva 13), joiden etuna on, ettei valettavaan kappaleeseen jää mittausturista tai siihen liittyvästä pukkaustapista tai välitystapista jälkeä. Mittaus tapahtuu paineen mittauksella muottipesään kohdistuvasta paineesta. Kosketusvapaan anturin tulos on ruiskuvaluprosessin mittauksessa epätarkin.

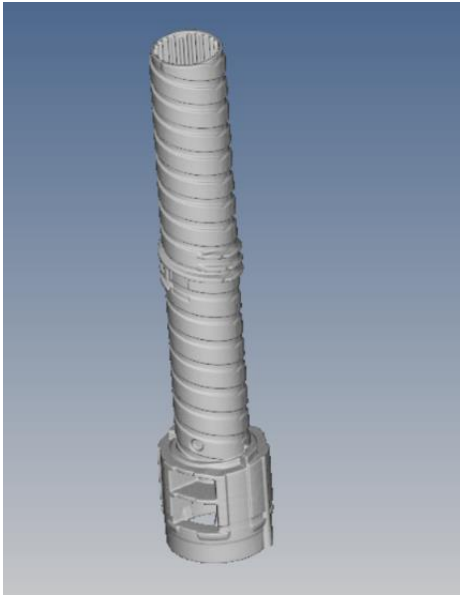


Kuva 13. Kosketusvapaa mittaus muottipesästä (Laatikainen 2022)

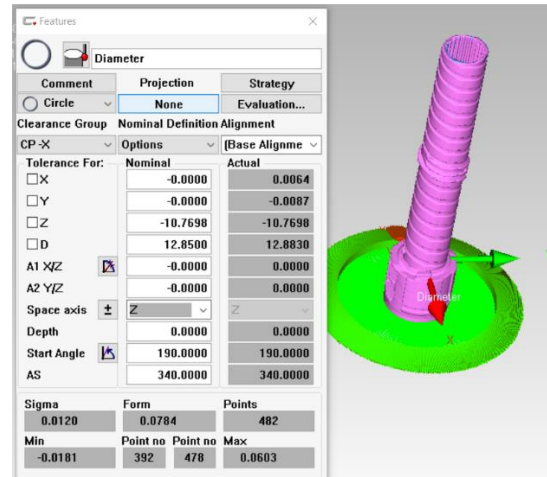
2.5. Mittalaitteet

Tämän diplomityön mittaukset on suoritettu Phillips-Medisizen mittauslaboratoriossa, olosuhteet on kontrolloidut ja valvotut. Mittauksien suorittajat olivat koulutettuja operaattoreita niin käytettävälle mittalaitteelle niin kuin myös tuotteelle. Operaattorin koulutukset dokumentoidaan kirjallisesti ja niitä valvotaan säännöllisesti.

Mittalaite Zeiss Metrotom 800, jolla mittaukset on suoritettu tämän diplomityön tuloksiin. Menetelmä mittauksessa on tietokonetomografia CT-skannaus (Computer Tomography). CT-skannaus kykenee tuottamaan täydellisen 3D mallin (Kuva 14), josta jokaisen kohdan mittaustulos on luettavissa (Kuva 15). CT-skannauksen mittaustarkkuus on mikrometrien luokassa. Tarkkuus on riippuvainen monestakin tekijästä esimerkiksi jigistä, operaattorista ja resoluutiosta.



Kuva 14. CT -skannattu Inner Body



Kuva 15. halkaisijamitta 0943-07 Inner Body

2.6. Tutkimuksen toteutus

Paineanturidatan korrelaation tutkimisen aluksi pidettiin palaveri, jossa yhteistyössä Phillips-Medisizen kanssa mietittiin ensimmäiseksi tutkimukseen soveltuva tuote. Tuotteen valintaa vaikutti toiseksi muotin paineanturointi sekä antureiden sijainti ruiskuvalumuotissa tulosten näkökulmasta. Kolmanneksi mietittiin tuotteen fyysiset muodot. Mitä pidemmästä tuotteesta on kyse sitä paremmin mittaerot tulevat esille. Neljänneksi kartoitettiin mittaustapa tarkimman mahdollisen tulosten saavuttamiseksi.

Tuotteenvalinnan jälkeen Phillips-Medisizen asiantuntijat määrittivät kriittiset DOE parametrit, jotka vaikuttavat eniten kyseisen tuotteen ruiskuvaluprosessiin. DOE -ajo suoritettiin ja toteutuneet CT -skannatut mittaustulokset syötettiin Kistlerin Stasa QC ohjelmistoon, jonka perusteella Kistler Stasa QC predict pystyy suorittamaan laskelmat toteutuneiden prosessiparametrien perusteella tuotteen mitoiksi (Kuva 16).

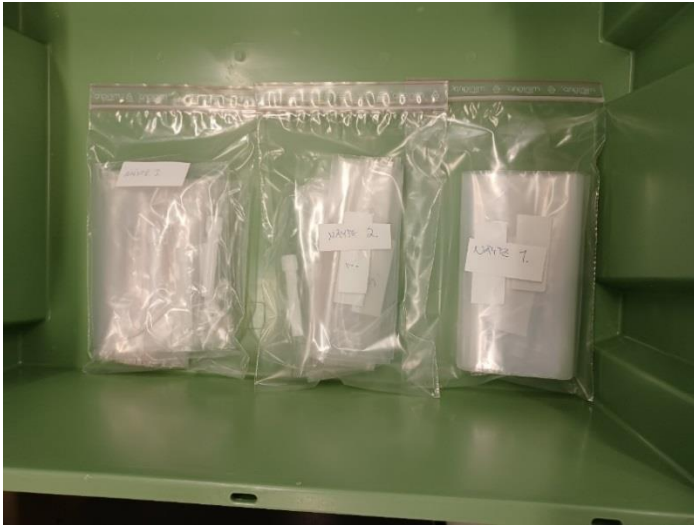
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Q2.1	DEC,	name	PCD 015	Halkaisij	Halkaisij	Pituus 015-36	
2	*	*	unit	mm	mm	mm	mm	
3	*	*	Cavity	1	1	1	1	
4	*	*	type	continuo	continuo	continuo	continuous	
5	*	*	attributes	NULL	NULL	NULL	NULL	
6	*	*	UpperTol	68,69	8,67	7,26	38,1	
7	*	*	TargetValu	68,65	8,6	7,2	37,98	
8	*	*	LowerTol	68,61	8,53	7,14	37,86	
9	signalfile	experiment-n	use?	value	value	value	value	
10	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_1_1_1.mis	1	yes	68,6668	8,6573	7,1847	38,0073	
11	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_1_2_2.mi	1	yes	68,6626	8,6577	7,187	38,0005	
12	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_1_3_3.mi	1	yes	68,663	8,659	7,1865	37,9989	
13	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_1_4_4.mi	1	yes	68,6628	8,658	7,1857	38,0037	
14	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_1_5_5.mi	1	yes	68,6705	8,6582	7,1839	38,0071	
15	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_2_1_1.mi	2	yes	68,6119	8,6532	7,1906	37,9688	
16	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_2_2_2.m	2	yes	68,612	8,6539	7,1914	37,9675	
17	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_2_3_3.m	2	yes	68,6148	8,6546	7,1913	37,972	
18	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_2_4_4.m	2	yes	68,6137	8,6545	7,1909	37,9693	
19	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_2_5_5.m	2	yes	68,6155	8,6533	7,1888	37,9751	
20	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_3_1_1.mi	3	yes	68,758	8,6742	7,1792	38,0534	
21	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_3_2_2.m	3	yes	68,7595	8,673	7,181	38,0542	
22	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_3_3_3.m	3	yes	68,7592	8,6725	7,1762	38,055	
23	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_3_4_4.m	3	yes	68,7581	8,674	7,1781	38,0534	
24	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_3_5_5.m	3	yes	68,7618	8,6741	7,1786	38,0594	
25	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_4_1_1.mi	4	yes	68,8495	8,6788	7,2067	38,1048	
26	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_4_2_2.m	4	yes	68,8497	8,6762	7,2085	38,1035	
27	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_4_3_3.m	4	yes	68,854	8,6757	7,2068	38,0978	
28	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_4_4_4.m	4	yes	68,8523	8,6764	7,2071	38,1056	
29	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_4_5_5.m	4	yes	68,8594	8,6796	7,2081	38,11	
30	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_5_1_1.mi	5	yes	68,4238	8,6413	7,1381	37,8491	
31	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_5_2_2.m	5	yes	68,4289	8,6392	7,1377	37,8545	
32	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_5_3_3.m	5	yes	68,4336	8,6404	7,1377	37,8605	
33	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_5_4_4.m	5	yes	68,4364	8,6401	7,1397	37,8602	
34	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_5_5_5.m	5	yes	68,4364	8,6401	7,1397	37,8602	
35	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_6_1_1.mi	6	yes	68,5262	8,6473	7,1799	37,9173	
36	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_6_2_2.m	6	yes	68,5333	8,645	7,1803	37,9243	
37	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_6_3_3.m	6	yes	68,5352	8,6477	7,181	37,9271	
38	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_6_4_4.m	6	yes	68,53	8,6479	7,1816	37,9249	
39	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_6_5_5.m	6	yes	68,5319	8,6472	7,18	37,9282	
40	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_7_1_1.mi	7	yes	68,7079	8,6634	7,1648	38,0255	
41	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_7_2_2.m	7	yes	68,7089	8,6617	7,166	38,0216	
42	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_7_3_3.m	7	yes	68,6983	8,6639	7,165	38,0264	
43	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_7_4_4.m	7	yes	68,7045	8,6615	7,1652	38,0273	
44	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_7_5_5.m	7	yes	68,7058	8,6619	7,1653	38,03	
45	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_8_1_1.mi	8	yes	68,7606	8,6712	7,2014	38,0618	
46	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_8_2_2.m	8	yes	68,769	8,6699	7,205	38,0571	
47	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_8_3_3.m	8	yes	68,7688	8,6692	7,2014	38,0585	
48	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_8_4_4.m	8	yes	68,7688	8,67	7,2005	38,0618	
49	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_8_5_5.m	8	yes	68,77	8,6699	7,2026	38,0627	
50	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_9_1_1.mi	9	yes	68,672	8,6564	7,186	37,9992	
51	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_9_2_2.m	9	yes	68,6695	8,6567	7,1852	38,0009	
52	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_9_3_3.m	9	yes	68,6753	8,6584	7,1834	37,9957	
53	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_9_4_4.m	9	yes	68,666	8,6577	7,1862	37,9996	
54	DoE_Q Inner Body Pre 5_1_9_5_5.m	9	yes	68,6758	8,6573	7,1839	37,9993	

Kuva 16. Kistler QC Stasa syötetyt mittaustulokset DOE -ajosta

Paineanturidatan koeajo suoritettiin suunnitelman mukaisesti niin, että tuloksia saadaan vertailtavaksi 45 kappaletta. Prosessiparametreista muottilämpöä, jälkipainetta ja jäähdytysaikaa muutettiin, niin että mittaustulokset Kistler Stasa QC:ssä ovat:

- Toleranssialueen minimissä yhdeksän kappaletta
- Toleranssialueen maksimissa yhdeksän kappaletta
- Toleranssialueen nominaalissa yhdeksän kappaletta
- Toleranssialueen maksimin yläpuolella yhdeksän kappaletta
- Toleranssialueen minimin alapuolella yhdeksän kappaletta

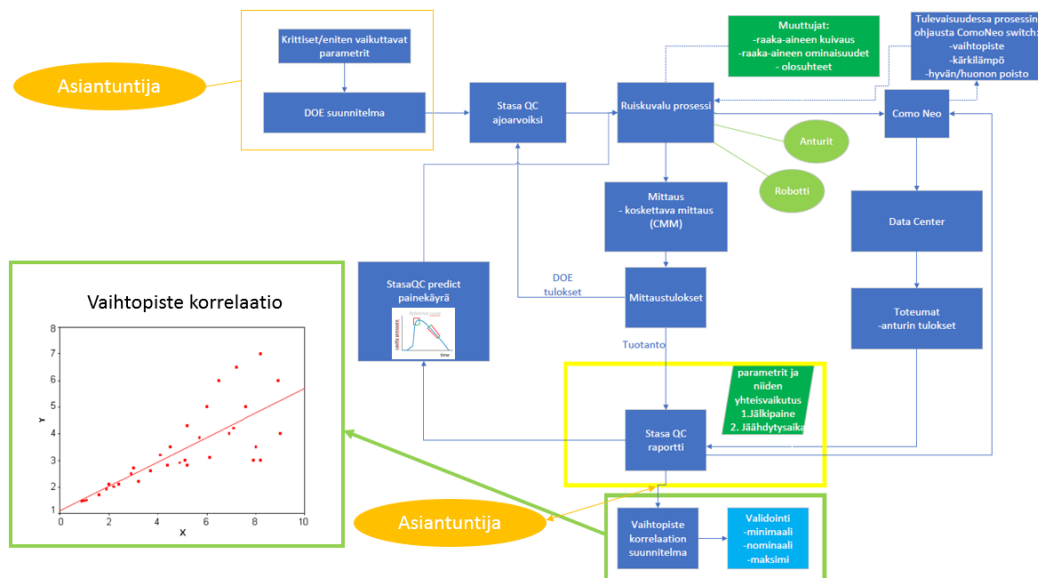
Paineanturidatan koeajon tuotteet (Kuva 17) numeroitiin yksilöimiseksi. Yksilöidyt tuotteet voitiin yhdistää Kistlerin antaman ennusteisiin, verrattavaksi todelliseen mittaustulokseen.



Kuva 17. Paineanturidatan korreloinnin näytteiden yksilöinti

Yksilöidyille koeajokappaleille suoritettiin mittaukset käyttäen mittausvälineenä Zeiss Metrotom 800 CT -skanneria.

Tutkimuksen jatkotoimenpiteenä suunniteltiin myös vaihtopisteen korrelaation tutkimista (Kuva 18), joka kuitenkin jätettiin myöhemmän tutkimuksen kohteeksi.



Kuva 18. Paineanturidatan korrelaatio tutkimuksen kaavio

Tutkimuksen mittausdata tutkittiin ja korrelaation toteamiseen laskutoimenpiteet ja kuvaajat laskettiin käyttäen apuna Excel -ohjelmistoa.

3. Tulokset

DOE toteutettiin kriittisten prosessiparametrien eli muuttujien, jotka vaikuttavat eniten tuotteen mittoihin mukaan. Muuttujat olivat: muotin lämpötila, jälkipaine ja jäähtytysaika. Muuttujien raja-arvot perustuivat käytettävän materiaalin suositeltuihin parametreihin sekä kokemukseen, joka oli saatu jo aikaisemmin suoritetuista koeajoista. DOE matriisein laskennassa käytetyt arvot on lueteltu alla olevassa taulukossa (Taulukko 2).

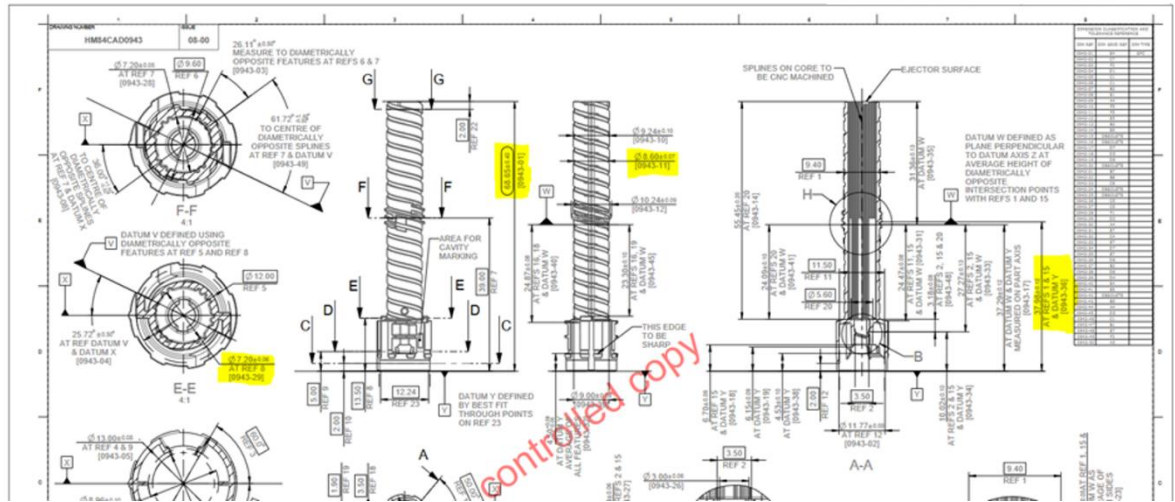
Taulukko 2. DOE matriisin optimointi parametrit ja raja arvot

Prosessi parametri	Minimi arvo	Maksimi arvo	Nousu
Muottilämpö	80°C	90°C	1
Jälkipaine	600bar	1250bar	50
Jäähtytysaika	2s.	8s.	0,5
Ruiskutusnopeus	40mm/s	100mm/s	10

Mittapositionien valinta DOE:

- 1) Pituusmitta PCD 0943-01, $(68,65 \pm 0,4)$, prosessiparametrien muutokset vaikuttavat herkimmin kappaleen kokonaismittaan.
- 2) Halkaisija 0943-11, $(8,60 \pm 0,07)$
- 3) Halkaisija 0943-29 $(7,20 \pm 0,06)$
- 4) Pituusmitta 0943-36, $(37,98 \pm 0,12)$

Korrelaatiotutkimukseen käytetyt mitat korostettuna keltaisella (Kuva 19). Alkuperäisen tuotepiirustuksen valvottu kopio, Liite 1.



Kuva 19. Inner Body mitat

Mittapositionit on valittu sen perusteella, mitkä vaikuttavat eniten prosessin vaihteluun sekä mitattavuuden perusteella.

DOE ajoarvot (Taulukko 3). DOE-ajossa suoritettiin yhdeksän eri parametrikombinaatiota. Taulukossa rivi yksi ja yhdeksän parametrit samat, jolla testataan prosessin stabiiliutta, sen miten hyvin prosessi toistaa itseään, vaikka välillä on tehty muutoksi prosessiparametreihin.

Taulukko 3. DOE ajoparametrit

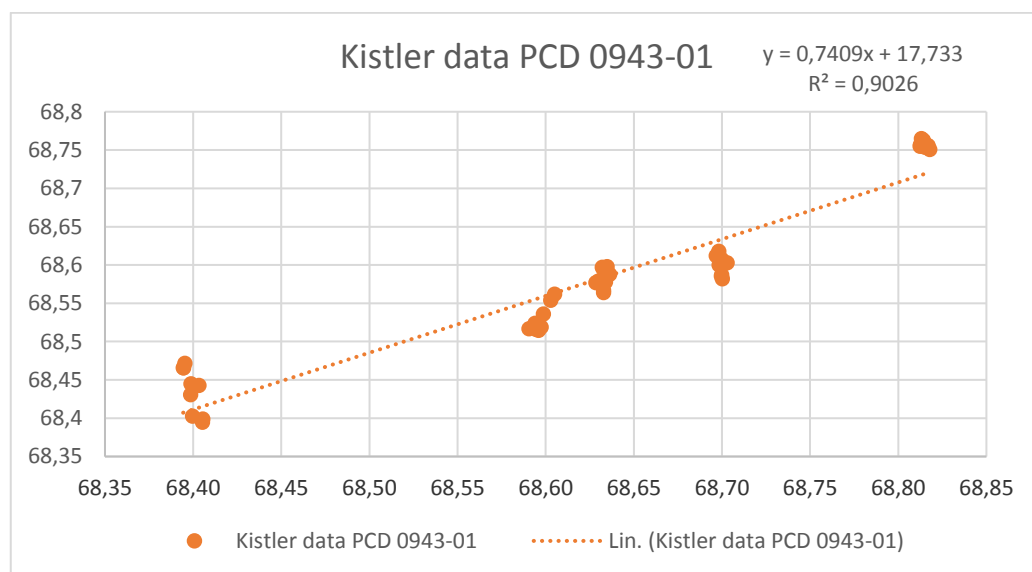
Koe numero	Iskulukumäärä	Muottilämpötila [°C]	Pitopaine [bar]	Jäähdytysaika [s]	Ruiskutusnopeus [mm/s]
1	5	85	950	5	70
2	5	80	600	8	100
3	5	80	1250	2	40
4	5	80	1250	8	100
5	5	90	600	2	100
6	5	90	600	8	40
7	5	90	1250	2	100
8	5	90	1250	8	40
9	5	85	950	5	70

Mittaustulokset ja korrelaatiokertoimet:

Pituusmitta PCD 0943-01 (Kuva 19), $(68,65 \pm 0,4)$. Mitta, jonka tuloksissa arvioitiin näkyvän selvimmin prosessin korrelaation kyvykkyys. Pituusmitta PCD 0943-01 on valittu tutkimukseen siitä syystä, että kokonaismitta antaa yleensä parhaiten kuvan prosessin kyvykkyudesta, toistaa itseään ja jossa selvimmin näkyy tulosten eroavaisuus. Mittaustuloksissa tämä mitta oli esitetty muodossa PCD 015-01.

Korrelaatiokerroin pituusmitassa PCD 0943-01 $r = 0,95$, joka on vahvan korrelaation tulos kuten (Kuva 20) voidaan todeta. Laskutoimitukseen käytetyt arvot, Liite 4. Korrelaatio mittauksen laskelmat PCD 0943-01:

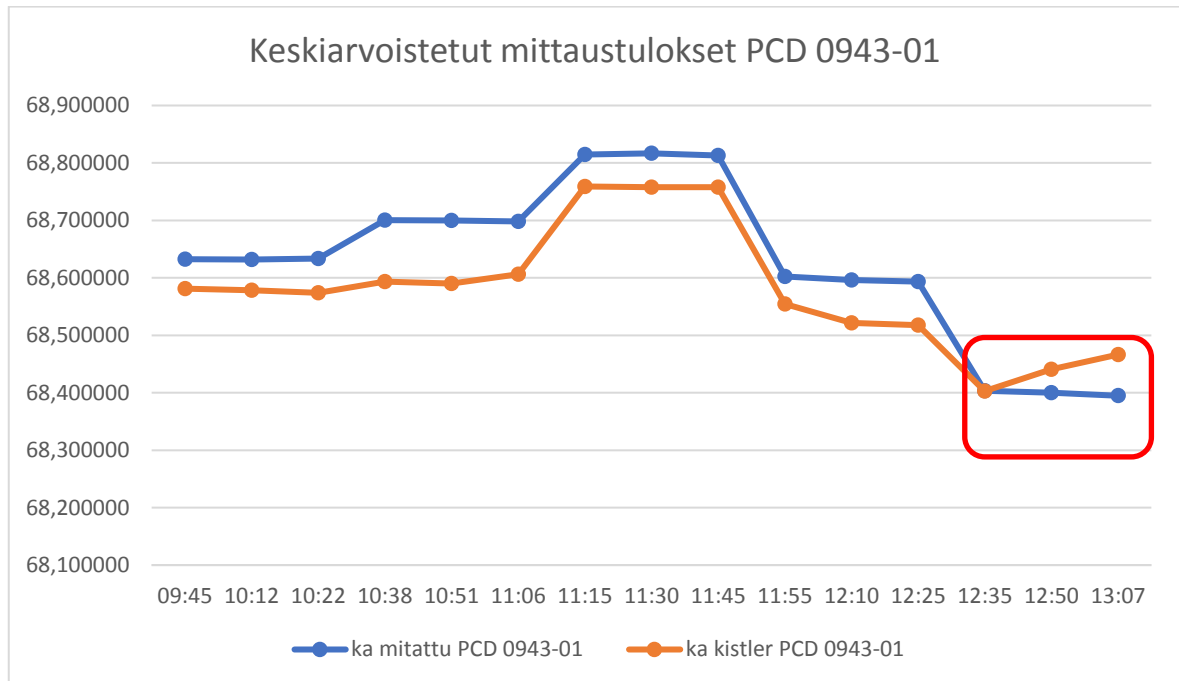
$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum(y_i - \bar{y})^2]}} = 0,95002962 \quad (1)$$



Kuva 20. PCD 0943-01 korrelaatiokuvaaja

Todelliset mittaustulokset vaihtelevat 0,048mm ja 0,11mm väliltä ja trendi oli tässä tutkimuksessa yleensä, että CT-skannatut mitat ovat suurempia kuin Kistlerin ennustamat arvot. Poikkeuksen tekee tässä tutkimuksessa, kuvaajan lopulla, toleranssin alarajan ulkopuolelle tarkoituksella ruiskuvaletut kappaleet. Alla olevan kuvan 21 punaisella

laatikolla merkattujen tulosten eroavaisuus on nollan ja 0,071mm väliltä niin, että Kistlerin antamat mitta-arviot ovat suurempia.

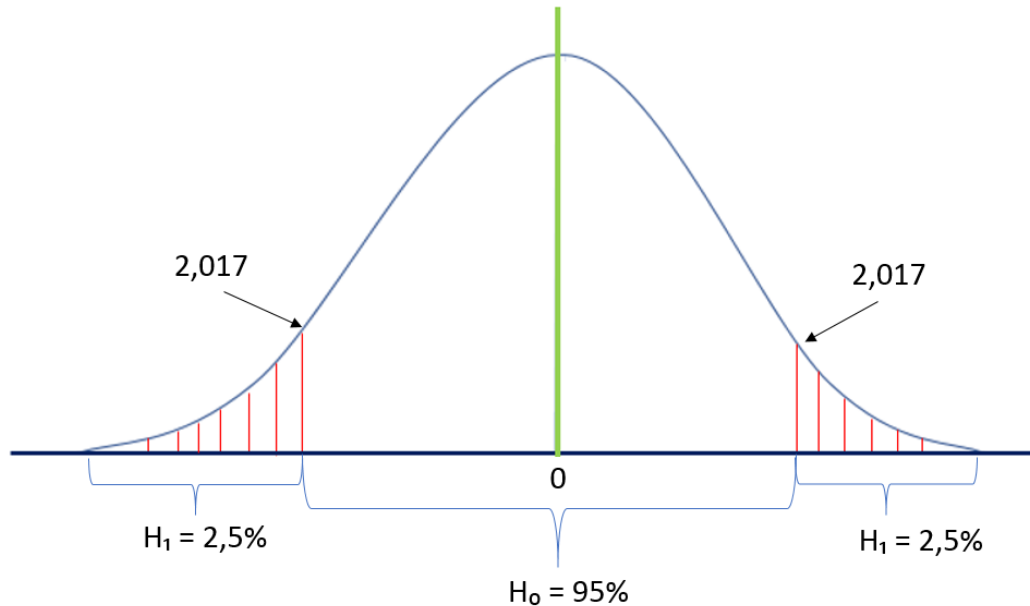


Kuva 21. Pituusmitan keskiarvoistetut mittaustulokset

Regressiomallin selitysosuuden arvo R^2 on 0,9026 (Kuva 20), jonka perusteella voidaan todeta, että selittävät muuttujat pystyvät selittämään 90% selitettävän muuttujan vaihtelusta. Loppu 10% vaatisi tarkempaa tutkimusta, kuten esimerkiksi, mikä on mittausoperaattorin vaikutus tulokseen, mittajigin tarkkuus tai vaikkapa kutistuma-ajan vaikutus. Kaikille noille yllä mainituille 10%:n sisällä oleville muuttujille olisi mahdollista laskea testisuure t-arvo ja sen perusteella selvittää mistä tuo 10%:n poikkeama johtuu.

$$\text{Testisuure PCD 0943-01: } t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,95\sqrt{45-2}}{\sqrt{1-0,95^2}} = 19,957 \quad (3)$$

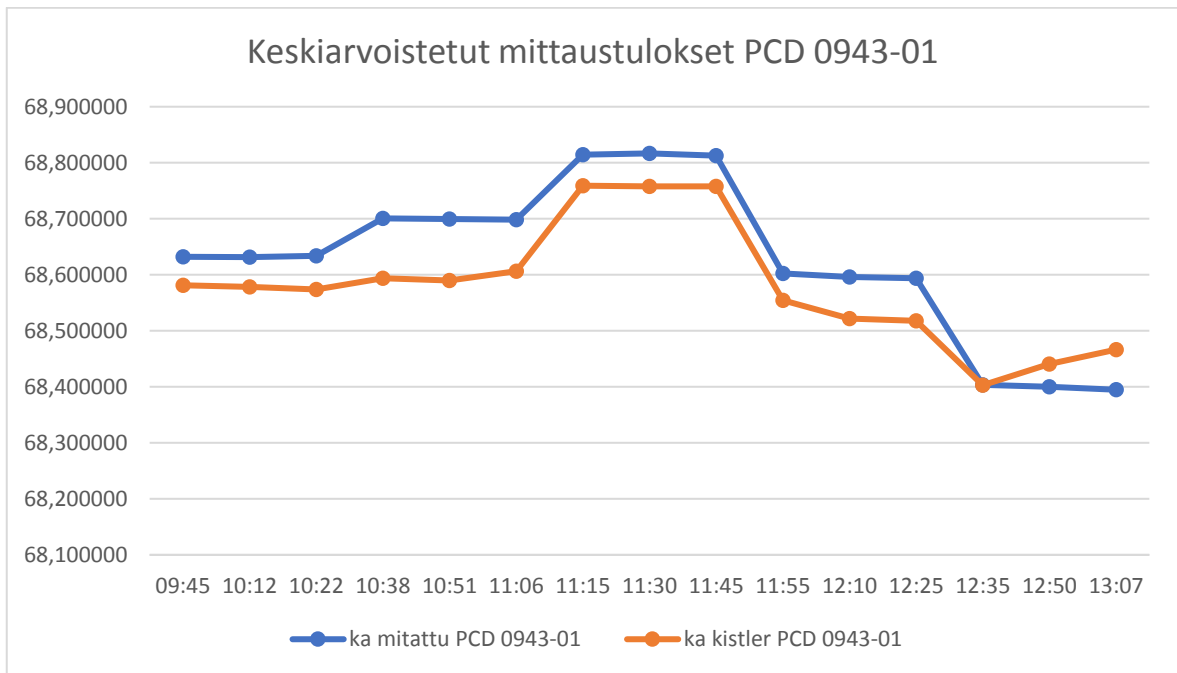
Testisuureen saamaa arvoa verrataan t-jakauman kuvaajaan (Kuva 22):



Kuva 22. T-jakauma kuvaaja

T jakauma kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että testisuure t on suurempi kuin H_1 raja-arvo 2,017, jolloin voidaan päätellä, H_0 hylätään ja hyväksytään H_1 . Kistler mitta-anturin datalla on suurempi kuin 95% korrelaatio todelliseen mittaustulokseen.

Keskiarvoistettujen mittaustulosten sekä keskiarvoistettujen Kistler paineanturidatojen välisessä vertailussa (Kuva 23) näkyy myös vahva korrelaatio. Todelliset mittaustulokset ovat pääsääntöisesti muutaman sadasosamillin suurempia, kuin Kistlerin antamat tulokset. Keskiarvo mittaustulosten eroavaisuuteen on 0,0486mm. Mittaustulosten eroavaisuus voi riippua käytettävien mittavälineiden tarkkuudesta, mittaavan henkilön toiminnasta, materiaalin ominaisuuksista, paineanturin todellisesta tarkkuudesta sekä monesta muusta muuttujasta, kuten esimerkiksi olosuhteista.

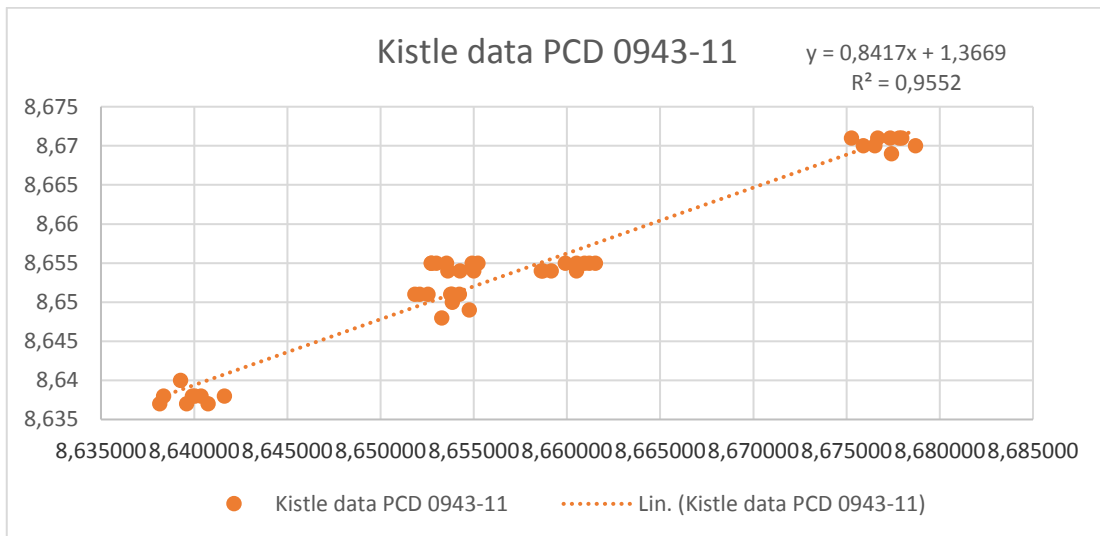


Kuva 23. Keskiarvoistettujen PCD 0943-01 mittaustulosten kuvaaja

Halkaisija 0943–11 (Kuva 19), korrelaatiokerroin on 0,977, joka on todella vahvan korrelaation tulos. Mitan PCD 015-11 kohdalla korrelaatio 0,977 on niin lähellä täydellistä korrelaatiota yksi, että voidaan päätellä Kistlerin ennustaman mittaustuloksen olevan lähes täydellistä. Laskennassa käytetyt mittaustulokset, Liite 5. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-11

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum(y_i - \bar{y})^2]}} = 0,9773531 \quad (1)$$

Halkaisijamitassa PCD 0943-11 regressiomallin selitettävyyys (Kuva 24) R^2 on 0,9552, eli selittävät muuttujat pystyvät selittämään 95,5% selitettävän muuttujan vaihtelusta. Kuten (Kuva 25) osoittaa tulosten välillä on todella pieni ero ja tulosten erotus on väliltä 0,0005mm 0,0069mm.

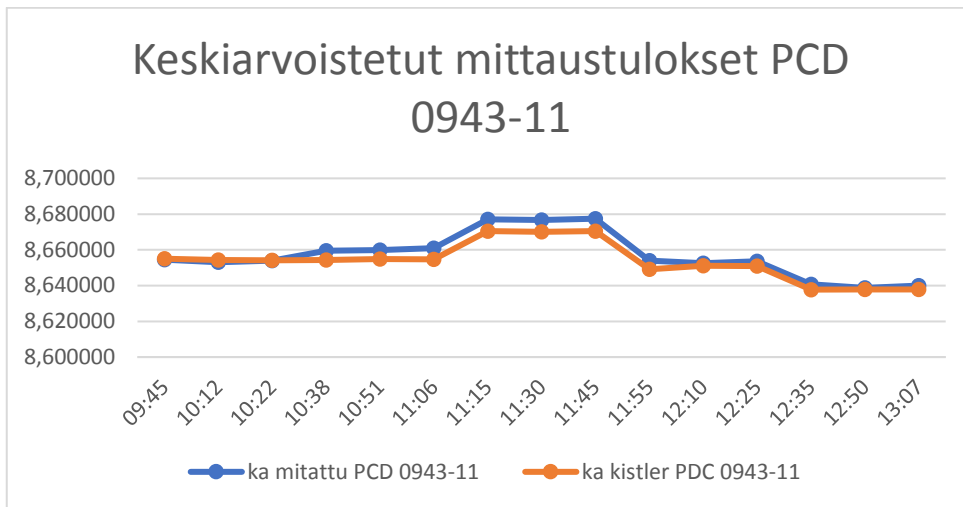


Kuva 24. PCD 0943-11 korrelaatiokuvaaja

$$\text{Testisuure PCD 0943-11: } t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,977\sqrt{45-2}}{\sqrt{1-0,977^2}} = 11,9005 \quad (3)$$

T-jakauma kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että testisuure $t = 11,9$ on suurempi, kuin H_1 raja-arvo 2,017 jolloin voidaan päätellä, että H_0 hylätään ja hyväksytään H_1 . Kistler mitta-anturin datalla on suurempi kuin 95%:n korrelaatio todelliseen mittaustulokseen.

Keskiarvoistettujen tulosten kuvaajassa (Kuva 25) on nähtävissä vahva korrelaatio sekä sama trendi kuin mitassa PCD 0943-01. Keskiarvoistettujen tulosten erotus on keskiarvoltaan 0,0033mm, joka on tuloksena melkein vastaava kuin Kistlerin tulokset.

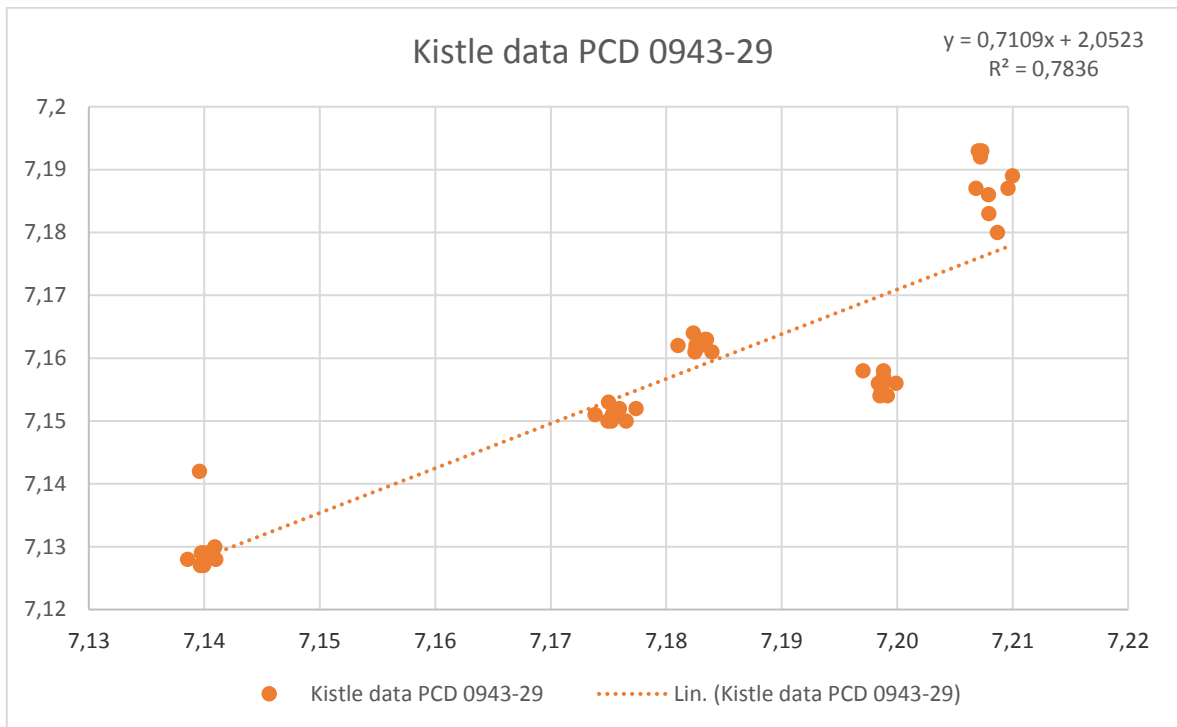


Kuva 25. Keskiarvoistettujen PCD 0943-11 mittaustulosten kuvaaja

Halkaisijamitta PCD 0943-29, korrelaatio kerroin on 0,885 (Kuva 26). Korrelaatiokerroin 0,885 kertoo melkein 90% korrelaatiosta Kistlerin ja todellisen mittaustulosten välillä. Laskennassa käytetyt arvot, Liite 5. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-11

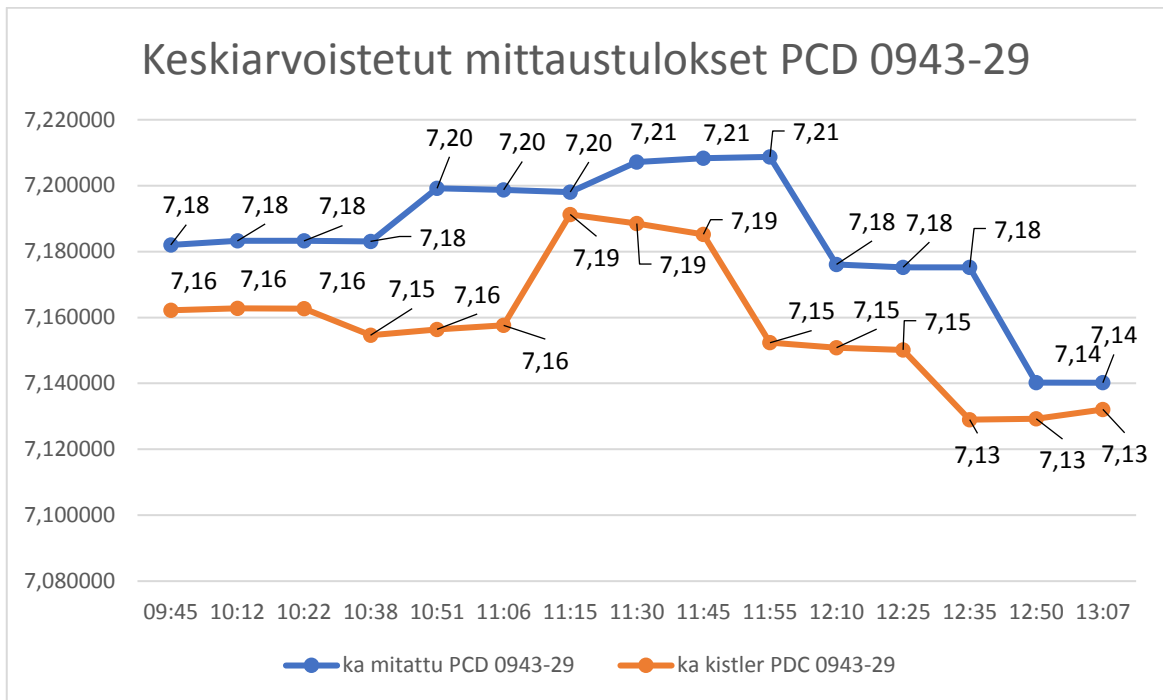
$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum(y_i - \bar{y})^2]}} = 0,885194 \quad (1)$$

Halkaisijamitassa PCD 0943-29 regressiomallin selitettävyys R^2 on 0,7836 (Kuva 26), eli selittävät muuttujat pystyvät selittämään 78,36% selitettävän muuttujan vaihtelusta. Selityskerroin R^2 0,7836 mittapositionissa PCD 0943-29 vastaa hyvin aikaisempia tuloksia, koska selitettävyysaste on melkein 80%. Suurin eroavaisuus selitettävyysasteeseen tulee (Kuva 28) punaisella laatikolla merkitystä alueesta. Eroavaisuus ei ole kuin muutaman sadasosamillin luokkaa, mutta trendi on sillä alueella muihin tuloksiin nähden poikkeava.

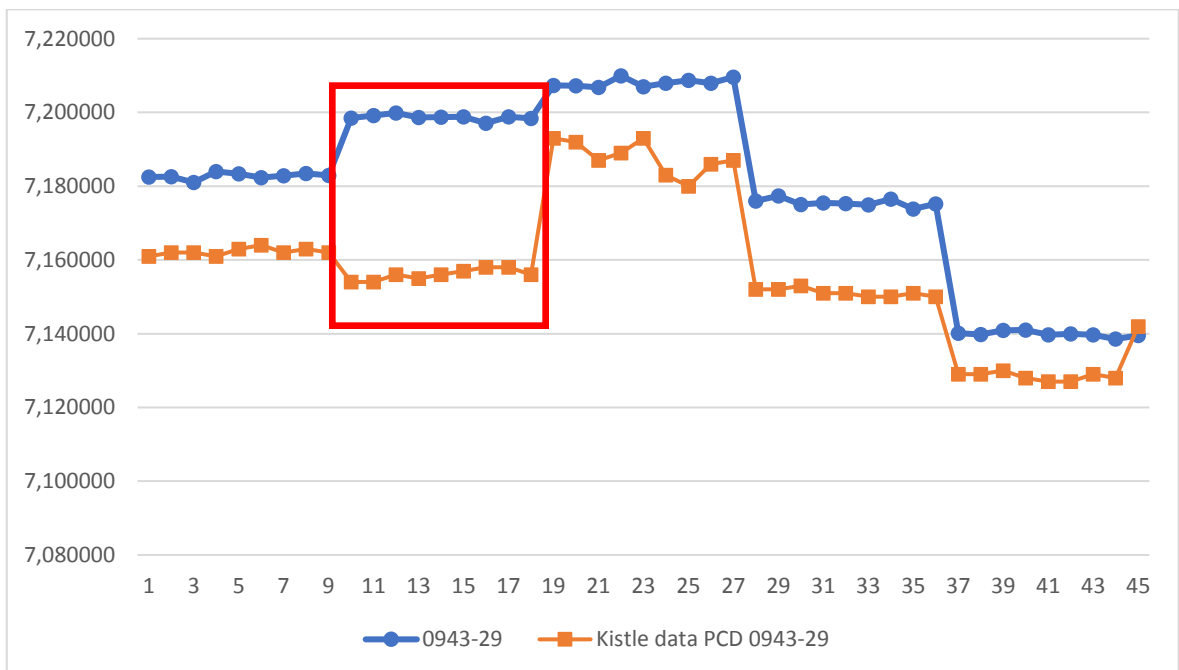


Kuva 26. PCD 0943-29 korrelaatiokuvaaja

Keskiarvoistettujen mittaustulosten analysoinnissa (Kuva 27) on havaittavissa poikkeavuus prosessin vaiheessa, jossa prosessissa on pyritty ajamaan tuote toleranssialueen maksimi mitalle. Kuvaajan suunta ei ole samansuuntainen kuin kaikissa muissa tuloksissa. Erotus kuitenkin on vain noin 0,04mm, joten kyseessä ei ole mikään suuri erotus muovituotteen tuloksissa. Kuvaajan eroavaisuus tulee paremmin selville kuvaajassa (Kuva 28), jossa on käytetty mittaustuloksia ilman keskiarvoistusta.



Kuva 27. Keskiarvoistettujen PCD 0943-29 mittaustulosten kuvaaja

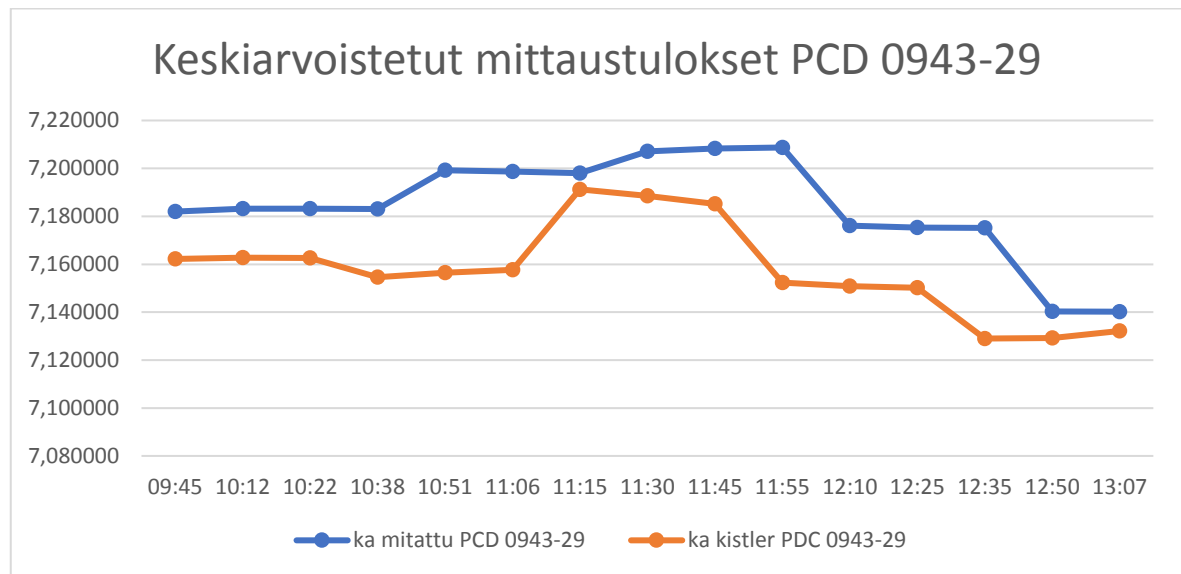


Kuva 28. Mittadata kuvaaja PCD 0943-29 ilman keskiarvoistusta

$$\text{Testisuure PCD 0943-29: } t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,885\sqrt{45-2}}{\sqrt{1-0,885^2}} = 11,9005$$

T-jakauma kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että testisuure $t = 4,31$ on suurempi, kuin H_1 raja arvo 2,017 jolloin voidaan päätellä, että H_0 hylätään ja hyväksytään H_1 . Kistler mittanturin datalla on suurempi kuin 95% korrelaatio todelliseen mittaustulokseen.

Keskiarvoistettujen tulosten kuvaajassa (Kuva 29) on nähtävissä vahva korrelaatio mitassa PCD 0943-29. Keskiarvoistettujen tulosten erotus on keskiarvoltaan 0,026mm.

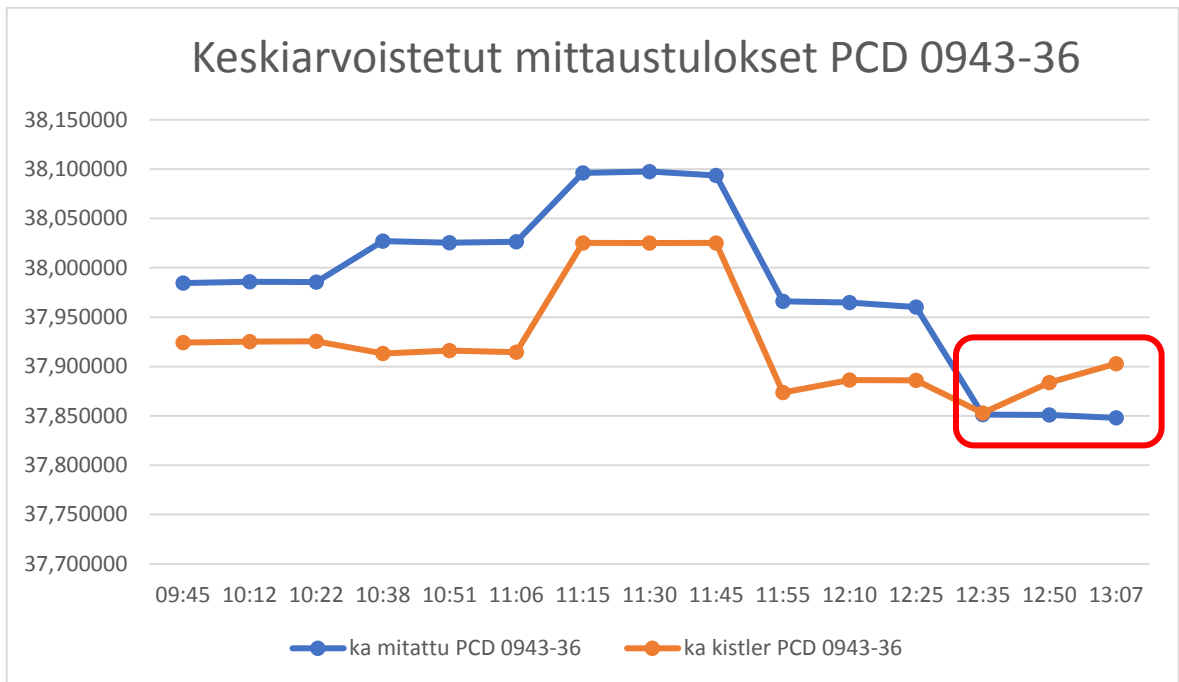


Kuva 29. Keskiarvoistettujen PCD 0943-29 mittaustulosten kuvaaja

Halkaisijamitta PCD 0943-36 (Kuva 19), korrelaatio kerroin on 0,81278. Korrelaatiokerroin 0,81278 kertoo noin 81% korrelaatiosta Kistlerin ja todellisen mittaustulosten välillä. Keskiarvoistettujen tulosten perusteella voidaan päätellä prosessin tulosten seuraavan hyvin todellisia mittaustuloksia. Laskennassa käytetyt mittaustulokset, Liite 7. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-36

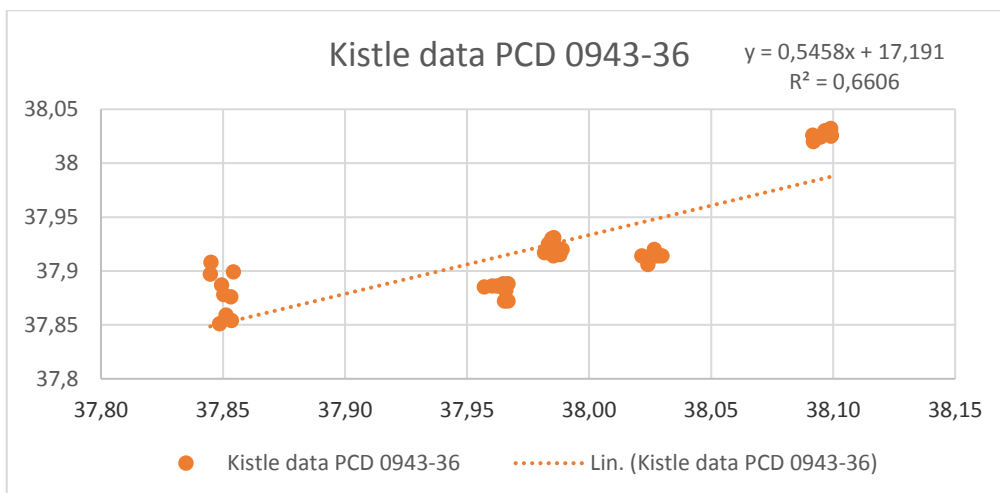
$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum(y_i - \bar{y})^2]}} = 0,81278 \quad (1)$$

Keskiarvoistetut mittaustulokset PCD 0943-36 (Kuva 30) häntäpäässä on havaittavissa samanlainen trendi tuloksissa, kuin PCD 0943-01 kokonaismitassa (Kuva 30Kuva 21). Kistlerin mittaennusteen ja todellisen mittaustulosten välillä erotus on 0,0018mm – 0,1095mm.



Kuva 30. Halkaisijamitan PCD 0943-36 keskiarvoistettu kuvaaja

Halkaisijamitassa PCD 0943-36 regressiomallin selitettävyys R^2 on 0,6606 (Kuva 31), eli selittävät muuttujat pystyvät selittämään 66,06% selitettävän muuttujan vaihtelusta. Erotus keskiarvoistettujen mittaustulosten ja Kistler ennusteen välillä on 0,033mm – 0,117mm. Selitettävyysasteen alhaisempi prosenttiluku näkyy (Kuva 31) alkupäässä olevien pisteiden hajonnassa.

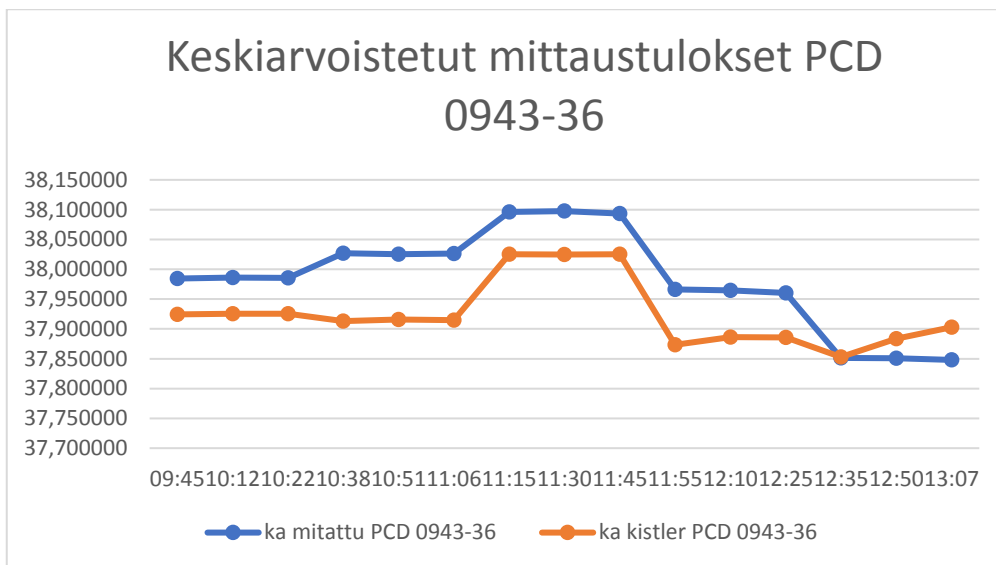


Kuva 31. PCD 0943-36 korrelaatiokuvaaja

$$\text{Testisuure PCD 0943-36: } t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,81278\sqrt{45-2}}{\sqrt{1-0,81278^2}} = 9,148666 \quad (3)$$

T jakauma kuvaajan perusteella voidaan päätellä, että testisuure $t = 9,149$ on suurempi kuin H_1 raja arvo $2,017$, jolloin voidaan päätellä, että H_0 hylätään ja hyväksytään H_1 . Kistlerin mitta-anturin datalla on suurempi kuin 95% korrelaatio todelliseen mittaustulokseen.

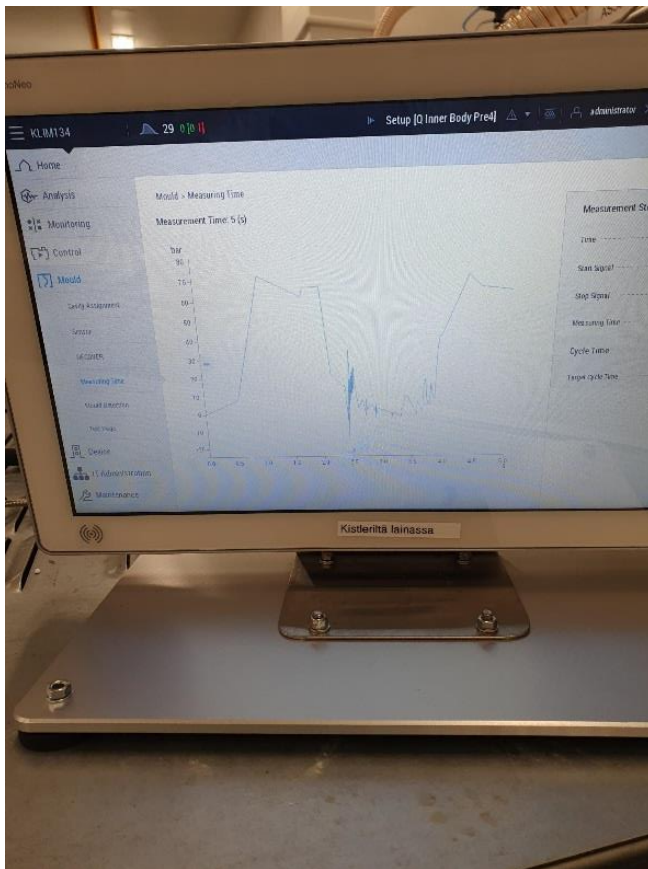
Keskiarvoistettujen tulosten kuvaajassa (Kuva 32) on nähtävissä vahva korrelaatio mitassa PCD 0943-36. Keskiarvoistettujen tulosten erotus on keskiarvoltaan $0,0589\text{mm}$.



Kuva 32. Keskiarvoistettujen PCD 0943-36 mittojen kuvaaja

4. Tulosten tarkastelu

Ruiskuvalumuotin paineanturointi antaa todistettavasti luotettavaa dataa, joka korreloituu todelliseen mittaustulokseen. Paineantureiden sijoitukseen pitää jo suunnitteluvaiheessa käyttää aikaa ja analysoida tuotteen täytyminen käyttäen apuna mold flow -ohjelmistoja. Antureiden asennukseen kannattaa paneutua huolella ja muotit pitää valmistaa niin, että paineanturin toimittajan ohjeistus asennuksessa toteutuu. Väärin valmistettu kiinnitys tai väärin asennettu anturi antaa helposti väärää tulosta (Kuva 33), koska anturin mittaama painemuutos on niin pieni, että pienetkin virheet näkyvät tuloksissa. Tämän diplomityön aikana esimerkiksi anturin asennuksessa ei aluksi ollut riittäviä välyksiä ja tuloksia tuli jo muotin sulkeutumisesta ennen ruiskuvaluprosessia.



Kuva 33. Virheellinen paineanturidata

Paineanturin sijoituksen suunnittelulla muottipesään on erittäin iso rooli. Lähempänä ruiskutuspiestettä olevalla anturilla voidaan kontrolloida prosessia paremmin, koska mittaustulokset saadaan aikaisemmin kuin viimeiseen ruiskutuspiesteeseen sijoitetulta anturilta. Viimeisen täyttymisen pisteeseen sijoitetulla anturilla kuitenkin voidaan saavuttaa tarkempi mittaustulos tuotteen lopullisen mittaustuloksen osalta, kuten myös tutkimuksessaan Kuo-Ming Tsai ja Jun-Kai Lan sekä Kurt'o Mustafa, Kamber Saban, Kaynak Yusuf, Atakok Gurcan ja Girit Oguz ovat todenneet (Tsai 2015) (Mustafa, et al. 2009). Anturointi olisi hyvä suunnitella muottiin jo tuotteen suunnitteluvaiheessa ja huomioida antureiden kiinnityksen ohjeistus ruiskuvalumuottien valmistukseen. Ruiskuvalumuoteissa käytettävät pietsosähköiset anturit ovat todella herkkiä ja vääränlainen kiinnitys tai sijoitus muottipesässä voi johtaa todella helposti väärin mittaustuloksiin. Jo pelkkä muovisulasta johtuva virtaus väärin asennetussa anturissa, välykset tai anturin sijoituskorkeus aiheuttaa virheellistä mittaustulosta (Tsai 2015).

Oikein sijoitetut ja asennetut anturit antavat todella tarkkaa tulosta prosessista sekä tuotteen lopullisesta mitasta. Paineanturidatan ja todellisen mittaustuloksen eroissa on hyvin pieni eroavaisuus, joka tulee monen muun muuttujan tuloksena. Kutistumisaika, olosuhteet ja operaattorien toiminta ovat muutamia esimerkkejä. Materiaalin ominaisuuksilla on myös suuri merkitys tuotteen lopullisiin mittoihin ja muotoihin. Näitä seurataan yleensä eri testien avulla, joista sulaindeksi on yksi esimerkki.

DOE-ajon onnistumisella on iso merkitys lopullisiin tuloksiin, koska siitä mitattujen mittaustulosten perusteella Kistler pystyy tekemään ennusteen tulevista mittoista. DOE-parametrit on syytä valikoida huolella ja niiden valitsemiseen prosessin tuntemus on avain asemassa. Tuntemattoman prosessin suhteen on mahdollista, että DOE:n joutuu uusimaan useampaan kertaan, jos prosessille kriittisiä parametrejä ei tiedetä.

DOE:ssa käytettävät arvot perustuvat materiaalin suositeltuihin parametreihin sekä kokemukseen prosessista. Muottilämpö, pitopaine, jäähdytysnopeus sekä ruiskutusnopeus olivat tässä diplomityössä käytetyille tekniselle muoville, polyasetaatille, kokemuksen perusteella valitut DOE-parametrit. DOE:n stabiilisuus eli prosessin palautuminen muutoksista suoritettiin niin, että ensimmäiseksi käytetyt arvot uusittiin kaikkien DOE-testien jälkeen uudelleen. Tämän avulla nähtiin, onko tuloksilla suuri eroavaisuus jolloin, voitaisiin todeta prosessin olevan epävakaa. DOE-mittaukset suoritettiin CT-skannauksella aivan kuten lopullisetkin korrelaatiokokeessa käytetyt mittaustulokset. DOE-mittaustulokset

syötetään Kistler QC predict -ohjelmistolle, joka analysoi ne käytettäväksi prosessin ennustamiseen.

Korrelaatio tutkimus paineanturi datan ja todellisen mittaustuloksen välillä analysoitiin empiirisin menetelmin käyttäen apuna Excel -ohjelmistoa. Korrelaation todentamisella oli tavoitteena selvittää paineanturi datan käyttökelpoisuus laatupäätöksien sekä ruiskuvaluprosessin ohjauksen suhteen. Saadut tulokset olivat uskottavia ja niiden hyödyntäminen mahdollista. Korrelaatio noudatti samaa trendiä kuvaajien avulla suoritetuissa analyyseissä.

Paineanturin kiinnityksen suhteen oli aluksi haasteita, tulokset eivät olleet uskottavia ja siitä syystä muutoksia ruiskuvalumuottiin vaadittiin useamman kerran. Paineanturin virheellinen kiinnitys antaa vääristyneitä tuloksia ja jopa muotin sulkupaine on nähtävissä anturi datasta ilman muovisulan ruiskutusta muottiin. Paineanturin asennuskorkeudellakin on tärkeä rooli oikeanlaisen mittaustuloksen saavuttamiseksi (Tsai 2015).

Korrelaatiotutkimukseen oli alun perin tarkoitus ottaa mukaan vaihtopisteeseen liittyvä tutkimus, joka jätettiin pois tämän diplomityön ensisijaisten tuloksien saamiseksi järkevällä aikataululla. Ehdotus tämän vaihtopisteen korrelaation tutkimukseen löytyy kappaleesta viisi: Johtopäätökset. Empiirinen tutkimus suoritettiin ainoastaan Kistler laitteiston antamalle mitta ennusteelle ja todelliselle mittaustulokselle.

Tutkimuksessa voitiin todeta mittaustulosten ja paineanturi datan välillä vahva korrelaatio. Mittausjärjestelyt tämän tutkimuksen osalta eivät vastaa todellista tuotannon aikaista mittausta, koska tuotannon aikainen mittaus mitatuille mittapositioneille suoritetaan mittakellolla ja tehdyssä tutkimuksessa mittaus suoritettiin käyttäen apuna CT-skannausta. CT-skannaus tosin antaa tarkemman mittaustuloksen, kuin mittakellolla suoritettu mittaus operaattorien toimesta.

Ruiskuvaletuiden kappaleiden yksilöinnissä ja niiden liittämiseksi mittaustulokseen olisi ollut hyvä huomioda, että jaksoaika yhdelle valmistettavalle tuotteelle on noin seitsemän sekuntia. Tästä syystä samalle minuutille Kistlerin antamia mittaus ennusteita pystyi tulemaan kahdeksan kappaletta. Todellisia mittauksia CT-skannerilla suoritettiin kolme kappaletta aina sille minuutille, jolloin ruiskuvaletut kappaleet on kerätty ja yksilöity. CT-skannattuja tuloksia verrattiin Kistlerin mitta ennusteeseen niin, että keskiarvoistamalla

tuloksia pystyttiin kohdentamaan tulokset paremmin kyseiseen todelliseen mittaustulokseen. Keskiarvoistaminen myös poistaa niin kutsuttua kohinaa tuloksista.

Todellinen mittaustulos korreloi todella hyvin paineanturilta tulevaan tulokseen (Chen, et al. 2019; Mustafa, et al. 2009), vaikka tuloksissa näkyy pieni siirtymä tulosten välillä. Siirtymää on mahdollista pienentää lisätutkimusten avulla, suurempi määrä korrelaatio tuloksia auttaa siirtymän tutkimuksessa.

Tutkitun korrelaation tulosten tarkkuus on verrattavissa muiden vastaavia tutkimuksien tuloksiin. Tutkimuksessa paineanturin tulokset noudattavat samansuuntaisia tuloksia, joita muut tutkijat ovat havainneet paineanturin sijoituksen suhteen (Tsai 2015; Mustafa, et al. 2009), oikeaoppiseen asennukseen (Tsai 2015), paineanturilta saatavaan painekuvaajaan (Chen, et al. 2019; Hassan 2012; Huang, 2007; Laatikainen, 2022).

Vaikka tulokset kertovat vahvasta korrelaatiosta paineanturin ja todellisen mittaustuloksen välillä, on ruiskuvalettavan muovituotteen valmistuksessa todella paljon eri muuttujia, joiden vaikutus voi tuloksiin vaikuttaa. Olosuhteet, materiaalin valmistus ja käsittely, käytetyt prosessiparametrit sekä monet muut tekijät vaikuttavat muovituotteen lopulliseen mittaan ja voi sitä kautta vaikuttaa jonkun verran paineanturilta saatuun ennusteeseen sekä lopullisen mittaustuloksen korrelaatioon. Tutkimalla tarkemmin esimerkiksi kutistumista ajan funktiona näitä muuttujia voidaan ennustaa ja huomioida paremmin.

5. Johtopäätökset

Oikein asennettu paineanturidata on todella tarkkaa ja sitä pystytään käyttämään sellaisenaan laatupäätösten tekoon. Oikealla sijoituksella paineanturidataa voidaan hyödyntää prosessin ohjaukseen, tuottamaan laadukkaampia tuotteita sekä vähentämään virheellisten tuotteiden määrää. Sijoittamalla kaksi anturia muottipesään, toinen lähellä ruiskutus pistettä ja toinen muotin viimeisen täyttymispisteen lähelle, voidaan saavuttaa tilanne, jossa prosessia voidaan ohjata paremman laadun saavuttamiseksi sekä tuotteen lopullisen mitan luotettavaan arviointiin. Ruiskuvalumuotin paineanturoinnilla saavutetaan selvästi oikein käytettynä kustannussäästöjä laadukkaampien tuotteiden muodossa ja sitä kautta vähentämällä virheellisesti romutettavia tuotteita.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta Kistlerin paineanturoinnin tuottaman tuloksen olevan todella luotettavaa. Korrelaatio paineanturidatan ja todellisen mittaustuloksen välillä on vahva ja siitä on selkeästi nähtävä samansuuntainen trendi prosessiparametrien muutosten myötä. Mittaustulosten ja paineanturidatan välisen muutaman sadasosamillin eroavaisuutta on mahdollista kompensoida lisädatan avulla. On kuitenkin todettava, että muovituotteen ruiskuvalamalla valmistetussa kappaleessa on niin monta vaikuttavaa tekijää, että tuhannesosien tarkkuuteen paineanturin antamalla tuloksella on mahdotonta päästä. Ruiskuvaluprosessin vaihteluun vaikuttavat monet eri tekijät. Materiaalin valmistuksen (muovigranulaatti) sekä monen muun tekijän vaikutukset, kuten esimerkiksi olosuhteet. Ruiskuvaletut tuotteet kutistuvat myös ajan funktiona. Kaikki nämä edellä mainitut seikat vaikuttavat korrelaatioon todellisen mittaustuloksen kanssa.

Paineantureiden käyttö ruiskuvaluprosessissa antaa myös sivutuotteena tietoa, jota voidaan hyödyntää myös työkalun ongelmien sekä huoltojen apuna. Paineikäyrille voidaan asettaa raja-arvoja, joista poikkeaminen aiheuttaa hälytyksen. Tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi työkalun likaantumisen seurannassa. Likaantuminen voi aiheuttaa muotin toiminnassa poikkeavuutta, jonka seurauksena tuotteet voivat olla epäkurantteja.

Operaattoreiden välistä eroa tutkitaan Gage RR mittauksilla. Mittausjigiin sekä mittalaitteiden tarkkuudet on määritetty tarkasti tuotantoprosessin aikaiseen mittaamiseen. Tässä työssä mitatut tuotteet mitataan tuotannon aikana mittakellolla ja tähän työhön suoritettut mittaukset on suoritettu CT-skannerilla, jonka vuoksi operaattoreiden Gage R&R

tuloksia ei ole huomioitu. Tässä työssä suoritettut mittaukset CT-skannerilla eivät vaatineet myöskään mittausjigiä, joten senkään vaikuttamaa mittaustarkkuutta ei huomioitu. Tuloksissa Kistlerin ja todellisen mittaustulosten välillä on muutaman sadasosamillin eroavaisuus. Tulosten trendi on sama todellisen mittaustuloksen ja Kistlerin ennustuksen välillä, eli jos Kistlerin ennustamaa mittaustulosta muutettaisiin systemaattisesti muutamalla sadasosa millillä, niin virheet olisivat niin pieniä, että ne voitaisiin analysoida kohinaksi.

Korrelaatiotutkimuksen mittaustulokset kerättiin niin, että Kistlerin mittausdataa kerättiin koko koeajon ajalta ja analysointiin käytettiin kerättyjen 45 kappaleen ajalta saadut tulokset. Tässä tutkielmassa tuloksia ei pystytty kohdentamaan juuri siihen yksilöityyn tuotteeseen, joka valmistettiin ruiskuvalukoneelta mittaukseen. Vaikka mitattavat tuotteet numeroitiin, ruiskuvaluprosessi on niin nopea, että samalle minuutille voi tulla useampi kuin kolme kappaletta, jotka kerättiin tietyltä minuutilta. Kistlerin tuottamia tuloksia oli jopa neljästä kahdeksaan, jonka vuoksi keskiarvoistaminen oli tässä tutkimuksessa keino virheiden minimoimiseen. Näin ollen yksilöityyn tuotteeseen ei voitu yhdistää Kistlerin mittausdataa sekä todelliseen mittaustulosta kappaleiden välillä tarkasti. Tulokset oli mahdollista kuitenkin seuloa kappaleista niin, että ne vastaavat erittäin hyvin todellisia mittaustuloksia. Tästä syystä, korrelaation analysointiin on käytetty keskiarvoistettuja tuloksia virheellisten arvojen minimoimiseksi. Keskiarvoistaminen myös suodattaa niin kutsuttua kohinaa pois tuloksista. Esimerkiksi jokin yksittäinen poikkeama mittaustuloksissa, joka voi tulla esimerkiksi huonosti asetetusta tuotteesta mittajigiin, ei vaikuta niin suuresti lopulliseen tulokseen sekä analysointiin.

Tulevia jatkotutkimuksia aiheesta olisi esimerkiksi vaihtopisteen korrelaation tutkimus. Paineanturin sijoitus olisi silloin hyvä olla lähellä ruiskutus pistettä, jotta prossesidataa paineanturille tulisi ruiskutusjakson aikana mahdollisimman aikaisin (Tsai 2015) (Chen, et al., 2019). Tämä tutkimus antaisi vahvistusta prosessin aikaiseen valvontaan, jonka avulla tuotteen laadullista valvontaa olisi mahdollista luotettavasti lisätä. Jo nyt tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta Kistlerin paineantureista saatavan datan olevan niin tarkkaa, että oikein asennettuja ja oikein toimivana niiden tuottama tulos on mahdollista käyttää ruiskuvaluprosessissa laatu päätöksen tekemiseen.

Vaihtopisteen korrelaation tutkimuksen voisi suorittaa, vaikka tutkimalla ruiskuvalukoneen normaalin matkaohjatun vaihtopisteen tuloksia paineohjattuun vaihtopisteeseen. Normaalisissa matkaohjatuissa vaihtopisteissä ruiskuvalukappaleen prosessiin ei vaikuteta enää vaihtopisteen kohdassa (Kuva 3) kohdat kaksi ja kolme. Paineohjauksella toteutetussa prosessissa tuotteen lopullisiin mittoihin olisi mahdollista vaikuttaa yllä mainituilla kohdilla vaihtopisteessä. Tutkimus olisi mahdollista toteuttaa ruiskuvalumateriaalin ominaisuuksia hyödyntämällä, esimerkiksi käyttämällä kuivaamatonta muovigranulaattia sekä kuivattua muovigranulaattia. Tutkimuksen voisi toteuttaa esimerkiksi alla olevan taulukon mukaisesti:

Taulukko 4. Vaihtopiste korrelaation tutkimus

Vaihtopisteen korrelaatio tutkimus		Normaali matkaohjattu vaihtopiste. Kappaleita	Paineohjattu vaihtopiste. Kappaleita
Kuivaamaton muovigranulaatti	Mittatoleranssin minimi	20	20
	Mittatoleranssin nominaali	20	20
	Mittatoleranssin maksimi	20	20
Kuivattu muovigranulaatti	Mittatoleranssin minimi	20	20
	Mittatoleranssin nominaali	20	20
	Mittatoleranssin maksimi	20	20

Korrelaation muitten vaikuttavien tekijöiden vaikutus olisi mielenkiintoinen tutkimus, jos tulokset eivät korrelaation suhteen ole riittäviä. Myös tämän tutkimuksen halkaisijamitoissa havaittujen hännässä olevien tulosten poikkeavuus olisi yksi mielenkiintoinen tutkimuksen kohde.

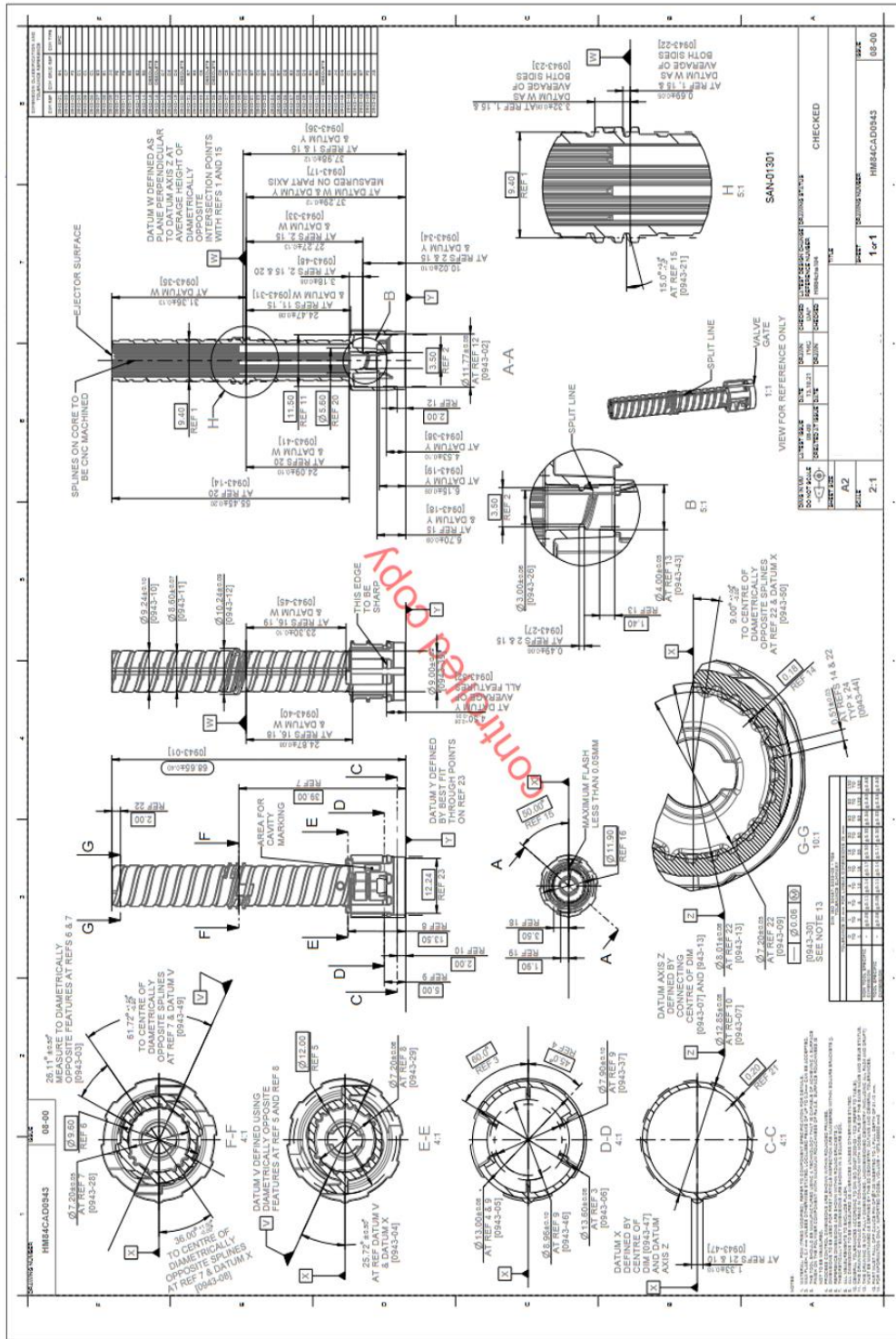
Yllä olevista tutkimuksista vaihtopisteen korrelaation tutkimus olisi tulevaisuuden kannalta merkittävin. Ruiskuvaluprosessin laadun parantaminen voitaisiin toteuttaa tuon kautta ja sen tutkimuksen tuloksilla olisi varmasti yritykselle taloudellisesti iso merkitys. Tutkimuksen tulokset osoittavat laitteistojen olevan kykeneväisiä tuottamaan laadullisesti erittäin hyviä tuotteita, joissa vaihtelua ei suuremmin esiinny. Vaihtopisteen paineohjauksen hyödyntäminen varmistaisi kappalemittojen nominaalisessa pysymistä. Jos prosessissa ilmenee jotain muutosta, paineohjaus pystyy kompensoimaan jo ennestään laadukasta prosessia. Laadukkaiden mittatoleranssien sisällä olevien tuotteiden määrä kasvaisi tuotantoprosessissa.

Lähteet

- Alibaba 2022. *Alibaba.com* . Noudettu osoitteesta https://www.alibaba.com/product-detail/Used-Fanuc-ROBOTSHOT-S-2000i150B-electric_62248471682.html [viitattu 02.06.2022]
- Bryce, D. 1996. *Plastic Injection Molding, Volume I - Manufacturing Process Fundamentals*. Society of Manufacturing Engineers. s.47
- Chen, J.-Y.;Liu, C.-Y.;& Huang, M.-S. (2019). Tie-Bar Elongation Based Filling-To-Packing Switchover Control and Prediction of Injection Molding Quality. *Polymers*;Basel Vol.11, (7) s.1168.
- Collins, C. (1999). Monitoring cavity pressure perfects injection molding. *Assembly automation*; MCB UP Ltd, Vol.19, (3) s.197-202.
- Dassault systemes. What Is Plastic Injection Molding? Waltman, Massachusetts, United States. Noudettu osoitteesta https://help.solidworks.com/2020/english/swplastics/c_plastic_injection_molding.htm [Viitattu 02.06.2022]
- Fisher, J. 2013. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. (2nd Edition). Elsevier; Oxford Great Britain, s.9
- Hassan, H. 2012. An Experimental Work on the Effect of Injection Molding Parameters on the Cavity Pressure and Product Weight. *International journal of advanced manufacturing technology*, (67) s.675–686.
- Holopainen, M.;& Pulkkinen, P. (2002). *Tilastolliset menetelmät*. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit OY s.232-245
- Huang, M.-S. (2007). Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding. *Material Prosessing Technology*, Vol. 183 (2-3) s.419-424.

- JLLORENS TECHNOLOGY. (2019). *JLLORENS TECHNOLOGY HOMEPAGE*. Noudettu osoitteesta <http://jllorens-technology.com/project/pvc/> [viitattu 17.10.2022]
- Järvelä, P.; Syrjälä, K.; & Vastela, M. (2000). *Ruiskuvalu*. Tampere: Plastdata Oy. s.27-47
- Kistler Instrumente AG. (2022). *Cavity pressure*. Noudettu osoitteesta <https://www.kistler.com/files/document/500-378e.pdf> [viitattu 27.02.2022]
- Laatikainen, J. (27. Huhtikuu 2022). Kistler paineanturi esitys.
- Laininen, P. (2000). *Tilastollisen analyysin perusteet*. Helsinki: Hakapaino Oy. s.61-62
- Liu, C.; & Manzione, L. (1996). Process Studies in Precision Injection Molding. I: Process Parameters and Precision. *Polymer engineering and science*. Vol.36 (1) s.1-9.
- Mamat, A.; Trochu, T.; & Sanscharin, B. (1995). Analysis of shrinkage by dual kriging for filled and unfilled polypropylene molded parts. *Polymer engineering and science*. Vol.35 (19) s.1511-1520.
- Mason, R. L.; Gunst, R. F.; & Hess, J. L. (2003.). *Statistical Design and Analysis of Experiments - With Applications to Engineering and Science*. s.194
- Montgomery, D. (2013.). *Design and Analysis of Experiments (8th Edition)*. Arizona: knovel. s.3-21
- Mustafa, K.; Saban, K.; Yusuf, K.; Gurcan, A.; & Oguz, G. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials & Design*, Vol.30 (8) s.3217-3224.
- Phillips-Medisize. (4. Toukokuu 2022). *Phillips-Medisize kotisivu/Tarinamme*. Noudettu osoitteesta <https://www.phillipsmedisize.fi/meidan-tarina/>
- Tsai, K.-M. a.-K. (2015). "Correlation Between Runner Pressure and Cavity Pressure Within Injection Mold." *International journal of advanced manufacturing technology*. (79) s.273–284.
- ZEISS. (2022). *ZEISS home page*. Noudettu osoitteesta <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html#brochuredownload> [Viitattu: 20.11.2022]

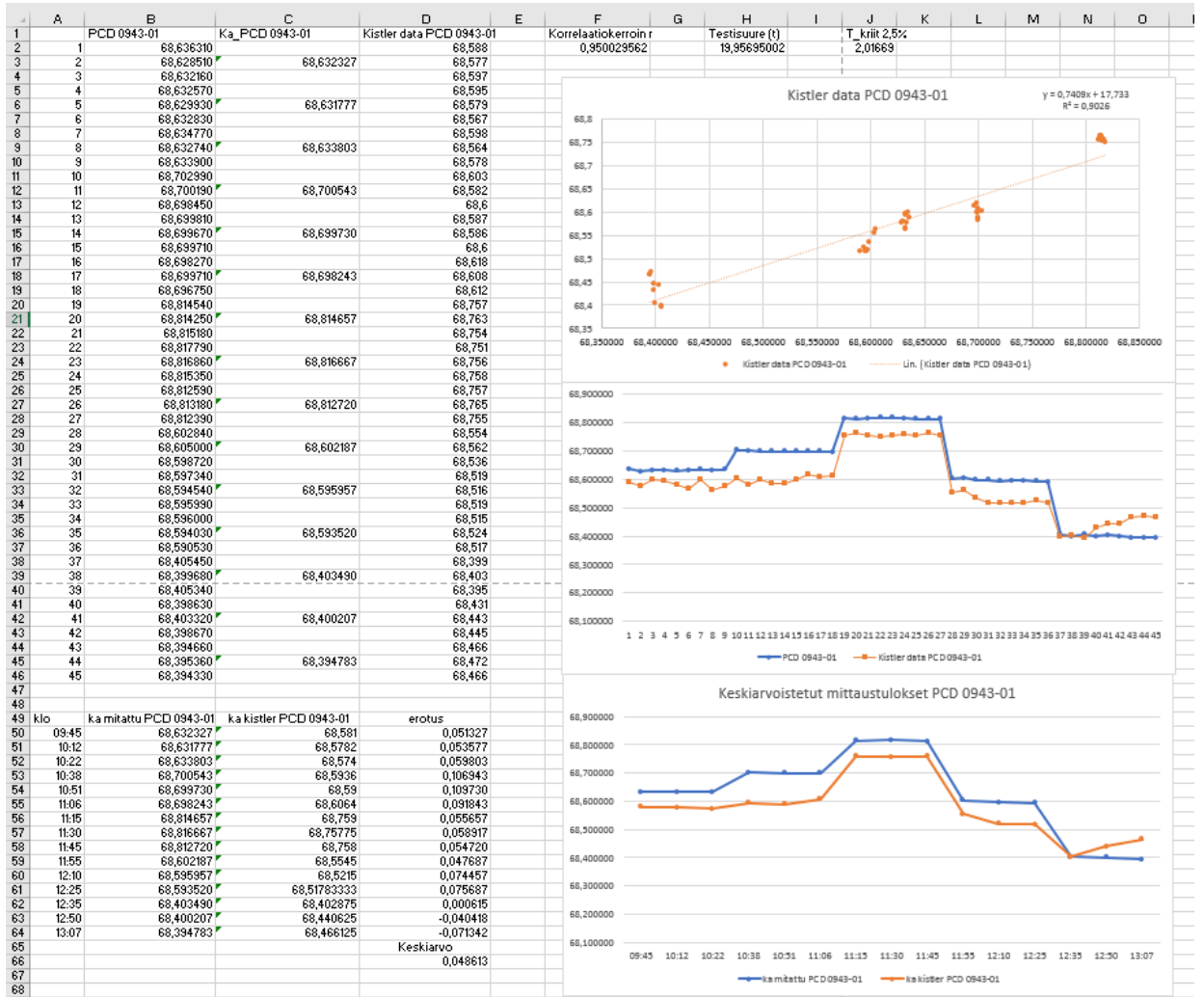
Liite 1 Inner Body tuotepiirustus



Copy of the original

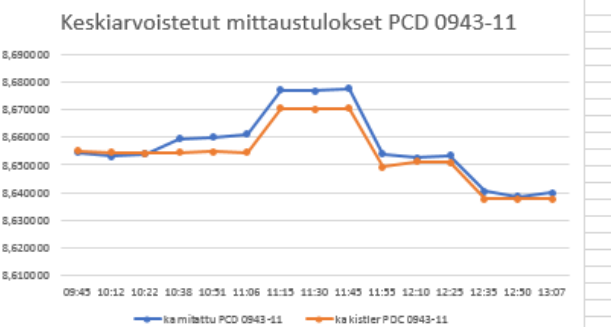
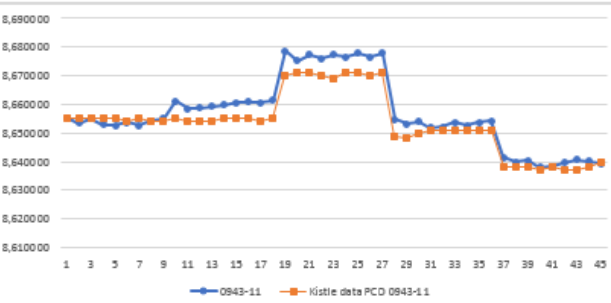
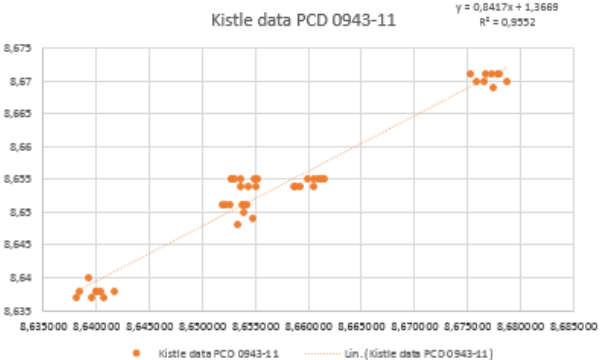
38	Ho 11:30	20209301063004	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.751	68.751	20209301063004	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.022
39		20209301063018	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.756	68.756	20209301063018	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.933	7.933	mm	37.862	38.099	mm	38.024
40		20209301063032	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.766	68.766	20209301063032	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.079
41		20209301063046	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.758	68.758	20209301063046	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.025
42	Ho 11:45	20209301064512	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.757	68.757	20209301064512	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.028
43		20209301064526	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.765	68.765	20209301064526	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.027
44		20209301064540	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.795	68.795	20209301064540	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.026
45		20209301064554	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.795	68.795	20209301064554	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	38.026
46	Ho 11:55	20209301065012	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.554	68.554	20209301065012	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.972
47		20209301065026	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.566	68.566	20209301065026	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.965
48		20209301065040	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.562	68.562	20209301065040	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.972
49		20209301065054	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.552	68.552	20209301065054	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.976
50		20209301065068	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.557	68.557	20209301065068	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.974
51		20209301065082	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.536	68.536	20209301065082	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.982
52	Ho 12:10	20209301069005	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.519	68.519	20209301069005	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.988
53		20209301069019	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.528	68.528	20209301069019	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.983
54		20209301069033	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.516	68.516	20209301069033	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.988
55		20209301069047	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.52	68.52	20209301069047	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.987
56		20209301069061	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.527	68.527	20209301069061	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.985
57		20209301069075	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.519	68.519	20209301069075	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.986
58	Ho 12:25	20209301069518	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.516	68.516	20209301069518	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.986
59		20209301069532	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.528	68.528	20209301069532	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.988
60		20209301069546	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.507	68.507	20209301069546	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.991
61		20209301069560	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.516	68.516	20209301069560	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.985
62		20209301069574	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.516	68.516	20209301069574	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.987
63		20209301069588	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.517	68.517	20209301069588	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.986
64	Ho 12:35	20209301069602	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.399	68.399	20209301069602	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.954
65		20209301069616	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.405	68.405	20209301069616	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.951
66		20209301069630	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.398	68.398	20209301069630	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.953
67		20209301069644	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.403	68.403	20209301069644	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.951
68		20209301069658	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.408	68.408	20209301069658	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.955
69		20209301069672	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.405	68.405	20209301069672	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.95
70		20209301069686	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.406	68.406	20209301069686	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.95
71	Ho 12:50	20209301069650	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.395	68.395	20209301069650	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.959
72		20209301069664	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.431	68.431	20209301069664	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.987
73		20209301069678	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.443	68.443	20209301069678	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.98
74		20209301069692	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.44	68.44	20209301069692	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.9
75		20209301069706	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.443	68.443	20209301069706	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.976
76		20209301069720	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.442	68.442	20209301069720	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.982
77		20209301069734	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.435	68.435	20209301069734	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.982
78		20209301069748	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.446	68.446	20209301069748	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.974
79		20209301069762	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.445	68.445	20209301069762	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.978
80	Ho 13:07	20209301007014	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.466	68.466	20209301007014	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.989
81		20209301007028	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.463	68.463	20209301007028	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.9
82		20209301007042	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.466	68.466	20209301007042	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.989
83		20209301007056	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.472	68.472	20209301007056	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.987
84		20209301007070	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.467	68.467	20209301007070	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.9
85		20209301007084	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.462	68.462	20209301007084	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.92
86		20209301007098	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.467	68.467	20209301007098	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.989
87		20209301007112	PCD 05-01	68.254	69.047	mm	68.466	68.466	20209301007112	Halkasia 05-29	7.41	7.259	mm	7.889	7.889	mm	37.862	38.099	mm	37.968

Liite 4. Korrelaatio mittauksen laskelmat PCD 0943-01



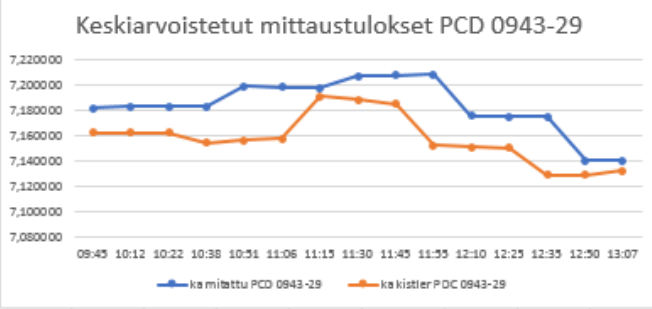
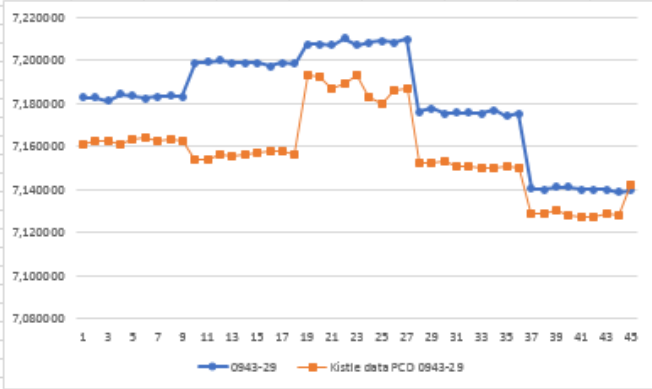
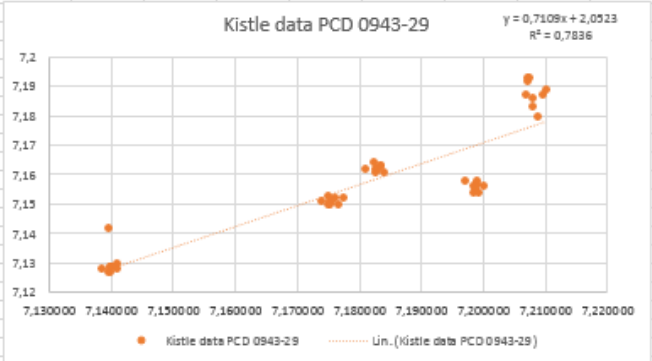
Liite 5. Korrelaatio mittauksen laskelmat PCD 0943-11

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0943-11	Ka_PCD 0943-11	Kistler data PCD 0943-11			Korrelaatio		Testisuure (t)		T_kriit 2,5%				
2	8,655219		8,655		09:45	0,9773531		11,90049804		2,01669				
3	8,653533	8,654555	8,655											
4	8,654913		8,655											
5	8,652983		8,655		10:12									
6	8,652710	8,653103	8,655											
7	8,653615		8,654											
8	8,652736		8,655		10:22									
9	8,654263	8,654000	8,654											
10	8,655001		8,654											
11	8,661189		8,655		10:38									
12	8,658615	8,659503	8,654											
13	8,658706		8,654											
14	8,659156		8,654		10:51									
15	8,659917	8,659864	8,655											
16	8,660518		8,655											
17	8,660938		8,655		11:06									
18	8,660518	8,660993	8,654											
19	8,661524		8,655											
20	8,678697		8,67		11:15									
21	8,675254	8,677095	8,671											
22	8,677334		8,671											
23	8,675894		8,67		11:30									
24	8,677400	8,676652	8,669											
25	8,676663		8,671											
26	8,677814		8,671		11:45									
27	8,676512	8,677428	8,67											
28	8,677958		8,671											
29	8,654759		8,649		11:55									
30	8,653285	8,653966	8,648											
31	8,653855		8,65											
32	8,651846		8,651		12:10									
33	8,652101	8,652570	8,651											
34	8,653762		8,651											
35	8,652540		8,651		12:25									
36	8,653834	8,653532	8,651											
37	8,654222		8,651											
38	8,641620		8,638		12:35									
39	8,639900	8,640627	8,638											
40	8,640362		8,638											
41	8,638150		8,637		12:50									
42	8,638363	8,638705	8,638											
43	8,639601		8,637											
44	8,640750		8,637		13:07									
45	8,640034	8,640015	8,638											
46	8,639260		8,64											
47														
48														
49	klo	ka mitattu PCD 0943	ka kistler PDC 0943-11	Erotus										
50	09:45	8,654555	8,655	-0,000445										
51	10:12	8,653103	8,6544	-0,001297										
52	10:22	8,654000	8,654166667	-0,000167										
53	10:38	8,659503	8,6544	0,005103										
54	10:51	8,659864	8,6548	0,005064										
55	11:06	8,660993	8,6546	0,006393										
56	11:15	8,677095	8,6705	0,006595										
57	11:30	8,676652	8,67	0,006652										
58	11:45	8,677428	8,6705	0,006928										
59	11:55	8,653966	8,649166667	0,004800										
60	12:10	8,652570	8,651166667	0,001403										
61	12:25	8,653532	8,650833333	0,002699										
62	12:35	8,640627	8,63775	0,002877										
63	12:50	8,638705	8,637875	0,000830										
64	13:07	8,640015	8,637875	0,002140										
65				Keskiarvo										
66				0,003305										
67														



Liite 6. Korrelaatio mittausten laskelmat PCD 0943-29

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	0943-29	Ka_PCD 0943-2	Kistler data PCD 0943-29			Korrelaatio		Testisuure (t)		T_kriit 2,5%			
2	7,182497		7,161	09:45		0,88519		4,31361		2,016692			
3	7,182564	7,182024	7,162										
4	7,181010		7,162										
5	7,183945		7,161	10:12									
6	7,183384	7,183225	7,163										
7	7,182346		7,164										
8	7,182852		7,162	10:22									
9	7,183488	7,183095	7,163										
10	7,182946		7,162										
11	7,198508		7,154	10:38									
12	7,199152	7,199189	7,154										
13	7,199907		7,156										
14	7,198630		7,155	10:51									
15	7,198760	7,198737	7,156										
16	7,198821		7,157										
17	7,197053		7,158	11:06									
18	7,198821	7,198078	7,158										
19	7,198359		7,156										
20	7,207326		7,193	11:15									
21	7,207221	7,207122	7,192										
22	7,206818		7,187										
23	7,209971		7,189	11:30									
24	7,207007	7,208306	7,193										
25	7,207939		7,183										
26	7,208678		7,18	11:45									
27	7,207899	7,208725	7,186										
28	7,209598		7,187										
29	7,175952		7,152	11:55									
30	7,177373	7,176108	7,152										
31	7,174998		7,153										
32	7,175488		7,151	12:10									
33	7,175323	7,175253	7,151										
34	7,174948		7,15										
35	7,176526		7,15	12:25									
36	7,173845	7,175203	7,151										
37	7,175239		7,15										
38	7,140164		7,129	12:35									
39	7,139786	7,140284	7,129										
40	7,140902		7,13										
41	7,140998		7,128	12:50									
42	7,139673	7,140200	7,127										
43	7,139930		7,127										
44	7,139738		7,129	13:07									
45	7,138538	7,139283	7,128										
46	7,139573		7,142										
47													
48													
49	klo	ka mitattu PCD	ka kistler PDC 0943-29	erotus									
50	09:45	7,182024	7,162166667	0,019857									
51	10:12	7,183225	7,1628	0,020425									
52	10:22	7,183225	7,162666667	0,020558									
53	10:38	7,183095	7,1546	0,028495									
54	10:51	7,199189	7,1564	0,042789									
55	11:06	7,198737	7,1576	0,041137									
56	11:15	7,198078	7,19125	0,006828									
57	11:30	7,207122	7,1885	0,018622									
58	11:45	7,208306	7,18525	0,023056									
59	11:55	7,208725	7,152333333	0,056392									
60	12:10	7,176108	7,150833333	0,025274									
61	12:25	7,175253	7,150166667	0,025086									
62	12:35	7,175203	7,129	0,046203									
63	12:50	7,140284	7,12925	0,011034									
64	13:07	7,140200	7,132125	0,008075									
65				keskiarvo									
66				0,026255									



Liite 7. Korrelaatio mittauksen laskelmat PCD 0943-36

