

Miikka Viljanen

TUULILASIN MUOTOILUN TUOTANTO- PROSESSIN KEHITTÄMINEN

Tekniikka ja luonnontieteet
Diplomityö
Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

Miikka Viljanen: Tuulilasin muotoilun tuotantoprosessin kehittäminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Johtamisen ja tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2019
Tarkastajat: Professori Marko Seppänen ja professori Erkki Levänen

Työn tavoitteena oli kehittää ajoneuvolasiteollisuudessa toimivan yrityksen tuulilasin muotoilun tuotantoprosessia. Työssä selvitettiin, miten eri elementit vaikuttavat reunajännitysten muodostumiseen ja miten tuotantoprosessia kehittämällä tuulilasin ominaisuudet voivat parantua. Yritys oli saanut reklamaatioita siitä, että heidän tuulilasinsa hajoavat asiakkailla itsekseen ja tämän oletettiin johtuvan hallitsemattomista reunajännityksistä, jotka syntyvät tuulilasin muotoilun eli taivutusprosessin jäähdytysvaiheessa. Parantuneen jäähdytysprosessin ansiosta yrityksen tuoteturvallisuus paranee, sen palvelukyky nousee ja tuotelaatu paranee.

Työn tutkimusasetelmaksi muodostui kokeellinen tutkimus, koska työssä pyrittiin selvittämään erilaisten muuttujien vaikutusta lopputulokseen. Työn aineisto kerättiin tutkimusasetelmasta johtuen koesuunnittelu-menetelmällä ja koeajoja suoritettiin yhteensä neljä. Kolmessa ensimmäisessä koeajossa tutkittiin ilmavirtojen ohjaajia pienelle ja isolle tuulilasille ja viimeisessä koeajossa tutkittiin puhallustehoja samoille tuulilaseille. Koeajoilla tutkittiin, millä elementeillä saavutetaan paras jäähdytysprosessi ja miten paljon erilaisemmin reunajännitykset muodostuvat erikokoisiin tuulilaseihin. Työ rajattiin ainoastaan yhdelle kammionunille ja kahdelle tuulilasille.

Työn tärkeimpänä tuloksena löydettiin yksi ilmavirran ohjain, joka oli selvästi parempi kuin muut koeajoissa mukana olleet viisi erilaista ilmavirran ohjainta. Lisäksi selvisi, että erikokoisten lasien reunajännitysten muodostumisissa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja. Parhaalle ilmavirran ohjaimelle määritettiin optimipuhallusteho molemmille tuulilaseille, koska kyseinen ilmavirran ohjain on selvästi erilaisempi kuin tehtaan yleisimmat ilmavirran ohjaimet. Puhallustehojen määrittämisen jälkeen isolle ja pienelle tuulilasille määritettiin optimijäähdytysmenetelmä ja tämä myös todettiin tilastollisten menetelmien avulla.

Tämän työn perusteella kohdeyritykselle määritettiin kuusi toimenpidesuositusta ja kolme jatkokehitysidea. Näistä tärkein toimenpidesuositus on työn tulosten implementointi tutkimuksen kohdeuunille ja tulevaisuudessa nykyisten kammionunien jäähdytysmenetelmän päivittäminen tämän työn tuloksien perusteella.

Avainsanat: tuulilasi, kehittäminen, prosessinohjaus, mittaus, keskihajonta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Miikka Viljanen: Improvement of windscreen bending production process
Master of Science thesis
Tampere University
Master of Science in Management and Information Technology
December 2019
Examiners: Professor Marko Seppänen and professor Erkki Levänen

The aim of the master's thesis was to improve a windscreen shaping manufacturing process for a company in the automotive glass industry. The thesis investigated how different elements influence the formation of edge tension and how the windscreen properties can be improved by developing the production process. The company had received complaints that their windcreens were breaking down on their own and this was believed to be due to the uncontrolled edge tensions that occur during the cooling of the windscreen shape, the bending process. The improved cooling process improves the company's product safety, service capabilities and product quality.

The research approach of the master's thesis became experimental research, because the aim was to find out the influence of different variables on the end result. Due to the research approach, the material was collected using design of experiments method and total of four test runs were performed. The first three tests tested the airflow controllers for the small and large windcreens and the last one tested the blowing power for the same windcreens. During the test run, it was investigated which elements achieve the best cooling process and how much differently the edge tensions are formed in different sized windcreens. The master's thesis was limited to one box furnace and two windcreens.

The main result of the work was the discovery of one airflow controller, which was clearly better than the other five airflow controllers involved in the trial run. In addition, it was found that there were no statistically significant differences in the formation of edge tensions in different sized glasses. For the best airflow controller, the optimum blowing power was determined for both windcreens, since that airflow controller is clearly different from most common airflow controllers in the factory. After the determination of the blowing power, the optimum cooling method was determined for the large and small windcreens and this was also determined by statistical methods.

Based on this master's thesis, six recommendations for action and three further development ideas were identified for the target company. The most important of these is the implementation of the result of the work on the target box furnace of the study and, in the future, the updating of the existing box furnaces cooling method based on the results of this master's thesis.

Keywords: windscreen, improvement, process control, measurement, standard deviation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Edessäni olevasta diplomityöstä tuli lopulta haastavampi projekti kuin mitä osasin aluksi kuvitella. Siihen vaikutti osaltaan se, että tämä työ oli minulle hyppy tuntemattomaan eli lasiteollisuuteen. Teollisuuden alana se on uniikki, joten prosessien tunteminen diplomityön vaativalla tasolla vei aikaa enemmän kuin kuvittelin. Minulle syntyi ammattikorkeakoulun loppupuolella ajatus maisteriopinnoista, koska halusin haastaa itseäni vielä enemmän oppimaan uusia asioita tuotantoympäristöstä ja päätös hakea lukemaan tuotantotaloutta Tampereen teknilliseen yliopistoon (nykyinen Tampereen yliopisto) osoit-tautuikin todella hyväksi ratkaisuksi. Vaikka tämä aika on ollut raskasta, niin silti en ole päivääkään katunut jatko-opiskeluun lähtemistä. Koulu on tarjonnut haasteita, mutta samalla on se on myös antanut todella paljon oppia tulevaisuuteen.

Haluan esittää kiitokset tuotantotalouden professori Marko Seppäselle siitä, että ohjauk-sesi ansiosta työstäni tuli parempi mitä osasin kuvitella ja annoit asiantuntevia kom-mentteja projektin aikana aina kun niitä tarvitsin. Kiitos myös materiaalitekniikan pro-fessori Erkki Leväselle siitä, että toisena tarkastajana ja eri alan asiantuntijana työni on entistä monipuolisempi. Kiitokset myös kaikille opettajilleni, jotka olen matkani aikana kohdannut. Kiitos myös kaikille niille työkavereilleni, joita olen tämän projektin osalta kuormittanut.

Menestyä ei voi koskaan yksin. Erityiskiitos kuuluu avopuolisolleni, joka on pitänyt ko-tiamme pystyssä, kun olen arki-iltaisoin ja viikonloppuisin ollut opintojeni parissa. Suuri kiitos kuuluu myös koulukavereilleni, jotka ovat kulkeneet tämän matkan kanssani aina ammattikorkeakoulusta lähtien. Ilman teidän apua ja tukea en nyt kirjoittaisi alkusanoja, koska opintoni olisivat ainakin vielä kesken. Kiitos myös perheelleni ja kavereille tues-tanne matkani aikana ja siitä, että olette vielä ympärilläni vaikka minulla ei ole ollut teille tarpeeksi aikaa viime vuosina.

Raumalla, 15.12.2019

Miikka Viljanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	6
1.1 Työn tausta	7
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset	7
1.3 Työn rakenne	9
2. LASIN TUOTANTOPROSESSIN KEHITTÄMINEN	11
2.1 Lasin määritelmä	11
2.1.1 Mitä lasi on?	12
2.1.2 Lasin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	13
2.1.3 Lasin valmistuksen prosessi ja kohdeyrityksen tuotantoprosessi ..	14
2.2 Analyysityökalut kehittämissuorituksen tukena	16
2.2.1 Kehitystoiminnan toteutus ja oikeiden laatutyökalujen valinta	17
2.2.2 Syy-seuraus -kaavio alkuanalyysinä	20
2.2.3 Histogrammit mittaustulosten luokittelijana	21
2.2.4 Tilastollinen prosessinohjaus	22
2.2.5 Mittausepävarmuus	25
2.3 Six Sigma -työkalut	26
2.3.1 Six sigma ja normaalijakauma	27
2.3.2 DMAIC -menetelmä	30
2.3.3 DOE -koesuunnittelu	33
2.3.4 Menetelmien vertailu	36
3. AINEISTON KUVAUS JA TYÖN TUTKIMUSASETELMA	38
3.1 Kohdeyrityksen esittely ja lasin taivutusprosessin kuvaus	38
3.2 Työn tutkimusasetelma	41
3.3 Kohdeprosessin kehityksen lähtökohta	42
3.4 Laseista tehtävät mittaukset	48
3.5 Alkumittaukset prosessin nykytilan kartoittamiseksi	51
3.6 Tutkimuksen suorittaminen	57
3.6.1 Parametrisuunnittelu	57
3.6.2 Koesuunnittelun lähtökohdat ja koeajojen 1-3 suorittaminen	60
3.6.3 Koeajo 4 optimaalisen jäähdytysmenetelmän löytämiseksi	63
4. TULOKSET	66
4.1 Koeajot 1-3 ilmavirtojen muodostajien merkityksen selvittäjänä	66
4.1.1 Koeajon 1 tulokset	68
4.1.2 Koeajon 2 tulokset	74
4.1.3 Koeajon 3 tulokset	79
4.2 Koeajo 4 puhallustehojen merkityksen selvittäjänä	85
4.3 Päätelmiä koeajojen tuloksista	92

4.4 Tuloksien todentaminen tilastollisilla menetelmillä.....	95
5. YHTEENVETO.....	101
5.1 Tulokset ja havainnot	101
5.2 Tutkimuksen suositukset ja jatkokehitysideat	106
5.3 Työn arviointi ja rajoitteet	109
LÄHTEET	111

1. JOHDANTO

Prosessi on sarja toistuvia tehtäviä, joiden päämääränä on tuottaa lisäarvoa yrityksen asiakkaille ja muille sidosryhmille (Lecklin 2006, s. 123). Kaiken tavoitteellisen tekemisen voidaan katsoa tapahtuvan prosesseissa. Nykypäivän laadunkehitystyön perustana pidetään prosessiajattelua, jossa tarkastelussa on tuotteen tekemiseen liittyvä kokonaisuus kaikkine osatekijöineen. Prosessiin kuuluu aina osatekijöitä, joita ovat esimerkiksi ihminen, materiaali, kone, menetelmä, tieto ja ympäristö. Muutokset yhdessäkin näistä osatekijöistä heijastuvat koko prosessiin, joten prosessin kehittämisessä tulee huomioida kaikki osatekijät tasapuolisesti. Prosessin toimivuutta mitataan erilaisilla mittareilla, koska mittaus antaa tietoa prosessin säätämiseen ja kehittämiseen. (Salomäki 2003, s. 114-117)

Yritysten pitää jatkuvasti parantaa omaa tuotantoprosessiaan, jotta se on kilpailukykyinen myös tulevaisuudessa. Kiristynyt kilpailutilanne ja kehittynyt teknologia takaavat sen, että paikallaan oleva yritys putoaa nopeasti pois omilta markkinoiltaan. Prosessin parantamisen ansiosta asiakas saa parempia tuotteita, josta seurauksena on muun muassa asiakassuhteen syveneminen ja kustannustehokkuus omassa toiminnassa. Prosessin kehittäminen on yrityksen olemassa olon pysymisen vuoksi välttämätöntä ja siksi siihen on kehitetty monenlaisia työkaluja. Lintula (2005) listaa kehittämiselle kolme keskeistä lähtökohtaa: Kehittämisen lähtökohtana tulee olla asiakkaalle tuotettava hyöty, asiakas-tyytyväisyyttä ja tuloksia voi parantaa vain valitsemalla mihin asioihin käytettävissä olevat paikat käytetään tekemällä asiat fiksusti ja kolmantena lähtökohtana on parantaa toimintaa jatkuvasti kaikilla organisaation tasoilla.

Prosessia voi kehittää monin eri tavoin ja prosessin kehittämiseen on tehty monia erilaisia työkaluja. Eri yritykset käyttävät erilaisia työkaluja jatkuvaan parantamiseen, mutta useimmat työkalut linkittyvät yleisempien prosessin kehittämisen osa-alueisiin, joita ovat: Total Quality Management, Six Sigma, Business Process Re-engineering ja Operational Excellence (Sokovic *et al.* 2010). Näitä osa-alueita yhdistämällä saa erilaisia tulokulmia prosessin kehittämiseen, koska yksi osa-alue katsoo asioita vain yhdestä näkökulmasta.

Tämä työ tehdään ajoneuvolasiteollisuudessa olevalle yritykselle, mutta tässä työssä ei keskitytä itse lasinvalmistamisen tuotantoprosessiin vaan lasin jatkojalostuksen tuotantoprosessiin, koska raakalasi tulevat tehtaalle valmiina toimittajalta. Työssä kehitetään lasin taivutusprosessia ja tavoitteena on saada kestävämpiä lasia asiakkaille. Tämän ansiosta asiakas saa enemmän lisäarvoa yrityksen toiminnasta, koska lopputuotteen turvallisuus paranee. Valmistavalle yritykselle suurimpia hyötyjä ovat muun muassa paremmat asiakassuhteet, parantunut palvelukyky ja vähentyneiden reklamaatioiden määrä. Reklamaatioiden vähentymisellä on positiivisia vaikutuksia yrityksen toimintaan: aikaa ei kulu virheitä etsiessä ja tuotannon kapasiteetti pystytään kohdistamaan kokonaisuudessaan tuleville tilauksille. Silloin myös toiminta on kustannustehokkaampaa, kun samaa asiaa ei tarvitse tehdä kahdesti peräkkäin vain siitä syystä, että ensimmäinen kerta epäonnistui huonon prosessin takia. Lasit eivät välttämättä hajoa aina loppuasiakkaal-

la, vaan ne voivat hajota myös esimerkiksi omalla tuotantolinjalla aiheuttaen vaaratilanteita. Näin ollen myös yrityksen oma sisäinen tuotantoprosessi hyötyy työstä, koska tämä työ pyrkii saamaan lasista kestävämpiä.

1.1 Työn tausta

Yritys on saanut reklamaatioita siitä, että heidän toimittamansa lasit hajoavat asiakkailta jo ennen lasin asentamista autoon. Reklamaatioita on tullut kaiken kokoisista lasista, mutta tämän työn keskiössä on yksi tuote, josta on tullut erityisen paljon reklamaatioita. Kyseessä on tapauksia, joissa lasi ei ole saanut havaittuja kolhuja ja lasi näyttää silmämääräisesti tarkasteltuna normaalilta. Silloin syy löytyy lasin rakenteesta ja siitä, miten se on muuttunut taivuttamisprosessissa. Yksi syy, joka voi aiheuttaa lasin hajoamista ilman mitään kolhuja ovat reunajännitykset. Jos lasi on jäädytetty liian nopeasti tai jos jokin kohta lasista on saanut enemmän puhallusilmaa kuin sen olisi kuulunut saada, silloin siihen paikkaan muodostuu jännitystä, joka on joko veto- tai puristusjännitystä. Lasin hajoaminen on aina suuri turvallisuusriski ja sen takia reunajännitysten pitää olla kunnossa. Yleisesti ottaen kohdeyrityksessä monissa tuotteissa reunajännitykset ovat kunnossa, mutta joskus esimerkiksi kammiouunin asetuksia muutetaan jonkun muun ongelman takia ja sen seurauksena lopputuotteisiin voi muodostua huonoja reunajännityksiä.

Jos lasi hajoaa esimerkiksi kuljetuksen aikana asiakkaalle, niin silloin kaikki sen eteen tehty työ on turhaa. Tämän takia tulee varmistaa oma tuotantoprosessi sellaiseksi, ettei yksikään lasi hajoaisi liian alhaisten tai korkeiden reunajännitysten takia. Taivutusprosessia tulee kehittää niin, että huonot reunajännitykset saadaan pois. Tämä työ pyrkii löytämään syytä sille, mistä tekijöistä huono reunajännitys syntyy. Työssä tutkitaan ja pyritään parantamaan tuulilasin kestävyyttä reunajännitysten muodostumisten kautta kokeilemalla erilaisia reunajännityksiä muodostavia mekanismeja. Tämä tapahtuu erilaisilla puhallusmenetelmien kokeiluilla, jonka jälkeen koelaseihin tehdään erilaisia mittauksia, kuten esimerkiksi reunajännitysmittaukset. Tuloksien analysointiin pyritään käyttämään tilastollisia menetelmiä ja laatutyökaluja. Reunajännitysmittausten avulla saadaan heti varmistus sille, miten koeajoissa on onnistuttu ja sen avulla on parempi suunnitella seuraavaa koeajoa. Työn avulla pyritään saamaan selville ja määrittelemään optimointi jäädytystapa, jonka kautta saadaan parannettua lasin taivutusprosessia niin, että lasin kestävyys paranee. Kohdeyrityksessä on monta kammiouunia, joista jokainen tehtaassa oleva kammiouuni käyttäytyy eri tavalla, mutta tässä työssä määriteltyjen optimimenetelmien kautta on helpompi lähteä hakemaan myös muista kammiouuneista perusasetuksia jäähdytykselle. Monessa kammiouunissa ne ovat jo hallinnassa, mutta tämän tutkimuksen avulla voidaan varmistua optimijäähdytysmenetelmistä. Sen jälkeen näihin menetelmiin voidaan luottaa ja niitä voidaan käyttää hyväksi myös muissa kammiouuneissa ilman epäilyksiä niiden luotettavuudesta.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Työlle on asetettu kaksi tutkimuskysymystä:

- 1) Miten kehittää taivutusprosessia nykyistä tasapainoisemmaksi ja virheetömäksi?
- 2) Miten eri elementit vaikuttavat reunajännitysten muodostumisiin ja miten ne toimivat erikokoisiin lasihin?

Ensimmäisellä tutkimuskysymyksellä pyritään siihen, että vakaamman taivutusprosessin ansiosta asiakkaan kokemat lasin rikkoutumiset saadaan vähentymään ja sen avulla reklamaatioiden ja takuiden määrä saadaan alenemaan. Tämä tutkimuskysymys pyrkii saamaan prosessin keskiarvon paremmin hallintaan ja mittaustulosten keskihajontaa pienemmäksi.

Toisella tutkimuskysymyksellä tarkoitetaan sitä, että saataisiin selville miten iso merkitys milläkin eri elementillä on jäähdytysprosessissa. Kun tähän löydetään vastaus, niin silloin myös tietoisuus jäähdytysprosessista kasvaa tehtaalla, joten tulevaisuudessa oletettavasti reunajännitysreklamaatiot vähenevät myös muilla tuotteilla. Nykyinen toimintatapa on muodostunut yksittäisistä kokeista, jotka on suoritettu aina tietyille kammiouunille. Tämä toimintatapa vie aikaa enemmän kuin se, että olisi määritelty erikoisille laseille peruselementit, joista lähdetään tekemään pieniä muutoksia kammiouunin ja tuotekoon mukaan. Työn avulla siis pyritään ymmärtämään prosessitasolla erilaisen jäähdytysprosessin vaikutusta erikokoisiin laseihin. Kun uutta tuotetta aletaan tuottaa johonkin kammiouuniin, niin silloin jäähdytykset säädetään sopiviksi lähinnä kokeiden kautta. Jos olisi jonkinlainen käsitys siitä, että mitkä ovat tärkeimmät elementit jäähdytysprosessissa niin silloin jäähdytysten optimointi uudella tuotteella on helpompaa ja se säästää aikaa.

Toisella tutkimuskysymyksellä tarkoitetaan myös sitä, että minkälainen vaikutus milläkin jäähdytykseen liittyvillä elementillä on jäähdytysprosessissa ja miten paljon erilaisemmin reunajännitys muodostuu erikokoisiin laseihin. Yksi tällainen elementti on sirotinpelti ja niiden vaikutus lasiin muodostuviin puristus- ja vetojännityksiin. Sirotinpelti on pellistä tehty sopivalla tavalla muotoiltu puhallusilman "ohjaaja", joten sirotinpellin muoto vaikuttaa uunin ilmavirtoihin. Kammiouunin seinässä on neljä puhallusputkea, joiden jokaisen putken päähän on asennettu sirotinpelti. Sirotinpellit ovat aina keskenään samanmuotoisia jokaisessa uunissa. Niitä on käytössä tehtaalla muutamia eri malleja, mutta yrityksessä ei ole oikein selvillä miten erilaiset mallit vaikuttavat reunajännityksiin. Tämä työ on onnistunut, jos kaikille tutkittaville laseille pystytään osoittamaan paras sirotinpelti tilastojen perusteella. Esimerkiksi mikä sirotinpelti tuo pienimmän vaihtelun mittauksiin. Voi olla myös, että kaikki sirotinpellit käyttäytyvät samanlaisesti eikä niiden muodolla ole merkitystä reunajännitysten muodostumisiin. Koeajoista saaduilla tuloksilla pystytään mittaamaan työn onnistuminen ja esimerkiksi vuoden kuluttua voidaan katsoa, miten paljon kohdeyritykselle on tullut reklamaatioita lasin hajoamisista ainakin työssä oleville tuotteille.

Kohdeyrityksessä on kahta eri uunityyppiä: sarjauunit ja kammiouunit. Työstä on rajattu sarjauunit kokonaan pois ja kammiouuneista tutkitaan vain yhtä kammiouunia. Jokainen kammiouuni käyttäytyy eri tavalla ja näin ollen jokainen kammiouuni tulisi tutkia omalla projektinaan. Tarkasteltavan kammiouunin valinta perustuu siihen, että tämän uunin tuotteista on yritykselle tullut lukuisia reklamaatioita lasien hajoamisesta. Tälle työlle on rajattu vain kolme tuotetta, joiden avulla tutkitaan onko lasikoolla merkitystä reunajännitysten muodostumisiin. Tässä työssä tutkittavien lasit ovat nimetty seuraavasti: pieni, keskisuuri ja iso. Ison lasin mitat on noin 1700 mm x 2700 mm ja pienin lasi on noin 1600 mm x 2050 mm. Pinta-ala isolla lasilla on noin 4,6 m² ja pienen lasin pinta-ala on noin 3,4 m². Kaikki kolme valikoitua tuotetta on valittu myös tuotteen vuosivolyymien mukaan. Työssä tutkitaan aluksi pientä ja isoa lasia, jonka jälkeen päätetään otetaanko työhön mukaan keskisuuri lasi. Jos ison ja pienen lasin tuloksissa ei ole mer-

kittäviä eroja, niin silloin keskisuurta lasia ei kannata tutkia ja käytettävissä oleva aika voidaan käyttää jonkin muun asian tutkimiseen. Työstä on rajattu pois myös lasin paikoitus muotilla, mutta se tulee silti huomioida tuloksia tulkittaessa ja ymmärtää, miten se vaikuttaa jäähdytykseen. Lasin paikoitus muotilla vaikuttaa siihen, miten lasi on kohdistettu esimerkiksi vastuksille tai jäähdytyspuhalluksille. Lasin paikoitus muotilla määrittellään siinä vaiheessa kun tuotetta aletaan tuotannollistamaan ja mittoja säädetään sen jälkeen vain tarvittaessa esimerkiksi ongelmien takia. Tutkimuksessa käytetään niitä mittoja kohdistamisessa kuin yleensäkin normaali tuotannossa käytetään. Myös lasin taivutustyyli on rajattu pois, koska lasi taivutetaan taivutuskortin mukaan. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi lasin lämpötiloja. Taivutuskortissa on parhaimmat työtavat juuri tälle tuotteelle, joten sen muuttaminen ei ole olennaista tämän työn kannalta.

1.3 Työn rakenne

Tämä raportti on jaettu viiteen eri pääotsikkoon. Ensimmäinen luku kertoo työn taustasta ja siinä on perusteluita sille, että miksi tällainen työ tehdään. Lisäksi siinä määritellään työn tavoitteet ja rajaukset. Toinen luku on kirjallisuuskatsaus kaikkiin niihin asioihin, joita tässä työssä käsitellään. Se jakaantuu kolmeen osa-alueeseen: lasin määrittelmä yleisellä tasolla, analyysityökalut kehittämisprosessin tukena ja Six Sigma -työkalut. Kirjallisuuskatsauksen aluksi on yleistä tietoa lasista, koska työssä materiaalina käytetään lasia. Siinä osiossa käydään läpi myös hieman lasin erilaisia ominaisuuksia ja lopuksi avataan tasolasiprosessi sekä kohdeyrityksen tuotantoprosessi yleisesti, jotta ymmärretään missä ympäristössä työskennellään. Näiden tekstien avulla saadaan myös käsitys siitä, millaista ainetta työssä käsitellään. Kirjallisuuskatsauksen toisessa osiossa käsitellään työssä käytettäviä analyysityökaluja, kuten syy-seuraus -kaaviota ja histogrammia. Siinä osiossa käydään läpi myös kehitystoiminnan toteutusta ja mitä on tilastollinen prosessinohjaus. Tämän osion päättää mittausepävarmuus, koska mittaaminen on olennainen osa työn tuloksia ja huonolla mittaamisella voidaan pilata hyvätkin tulokset. Tämän luvun viimeinen osio esittelee Six Sigma -menetelmää ja mikä on normaali-jakauma. Tässä käydään läpi kaksi Six Sigma -työkalua, jota työssä käytetään: DMAIC -menetelmä ja DOE -koesuunnittelu. DMAIC -menetelmä on upotettu työhön monen otsikon alle siihen paikkaan, mihin kyseinen vaihe liittyy. DOE -koesuunnittelun periaatteita noudattaen on toteutettu tutkimuksen koeajot, joiden perusteella tehdään johtopäätökset. Tämän luvun lopuksi vertaillaan näitä kahta työkalua.

Kolmannen luvun asiat liittyvät tutkimuksen suorittamiseen käytännössä. Aluksi siinä esitellään kohdeyritys ja sen jälkeen lasin taivutusprosessi tarkemmin, jotta lukija saa kuvan minkälaisista prosessista tässä työssä kehitetään. Tämän jälkeen käydään läpi työn tutkimusasetelmaa ja mitä se tarkoittaa työn kannalta. Sen jälkeen analysoidaan kehitettävän prosessin nykytilannetta syy-seuraus -kaavion avulla, josta johdetaan myöhemmin koesuunnittelun muuttajat. Tämän jälkeen käydään läpi kaikki ne mittaukset, joita tässä tutkimuksessa suoritetaan. Luvussa 3.5 kerrotaan tutkimuksen alkumittauksista, että mitä tuloksia ne antoivat ja miten alkumittaukset suoritettiin. Tämän jälkeen seuraavassa alaluvussa käydään läpi itse tutkimuksen suorittamista, jossa suunnitellaan koeajot. Siinä määritellään myös koesuunnittelun lähtökohdat ja parametrisuunnittelu. Tutkimus on jaettu kahteen koeajoteemaan, jossa koeajot 1-3 suoritetaan ensin ja niiden tulosten perusteella on päätetty, että mitä koeajossa 4 tutkitaan. Lukijan kannattaa lukea tulokset neljännestä luvusta ennen koeajo 4:n lukua, koska ne ovat vaikuttaneet siihen, mitä asiaa viimeisessä koeajossa on tutkittu. Kolmas luku on työn kannalta kaikkein oleellisin asia, koska siinä tehdään itse käytännön tutkimusta.

Neljännessä luvussa on esitetty kaikki työn tulokset siten, että luvussa 4.1 on koeajojen 1-3 tulokset. Näissä koeajoissa haetaan laajempaa ymmärrystä sille, mikä on sirotinpellien rooli reunajännitysten muodostumisissa. Koeajossa 4 haetaan kaikkein optimaalista jäähdytysmenetelmää, jonka tulokset ovat luvussa 4.2. Koeajoissa 1-3 pyritään ymmärtämään eri tekijöiden vaikutus reunajännityksiin ja koeajossa 4 taas pyritään hakemaan mahdollisimman paras puhallusmenetelmä perustuen kolmesta ensimmäisestä koeajosta saatuun tietoon. Näiden jälkeen luvussa 4.3 tuodaan esille päätelmiä koeajojen tuloksista. Neljännen luvun viimeisessä osiossa pyritään tuomaan päätelmille myös tilastollista pohjaa ja sitä kautta saamaan varmuus siitä, että johtopäätökset tuloksista ovat oikeat.

Viides ja viimeinen luku on tutkimuksen yhteenveto -luku. Se on jaettu kolmeen osioon siten, että ensimmäisessä alaluvussa on tiivistetysti tutkimuksen tulokset ja niiden perusteella tehdyt havainnot. Sen jälkeen käsitellään tämän tutkimuksen suosituksia, eli mitä toimenpiteitä tämän tutkimuksen tuloksena kannattaisi kohdeyrityksessä tehdä ja lisäksi on annettu muutama jatkokehitysidea. Kolmannessa alaluvussa on hieman työn arviointia sekä mitä haasteita ja rajoitteita tässä projektissa oli. Lopussa on vielä lähde-
luettelo.

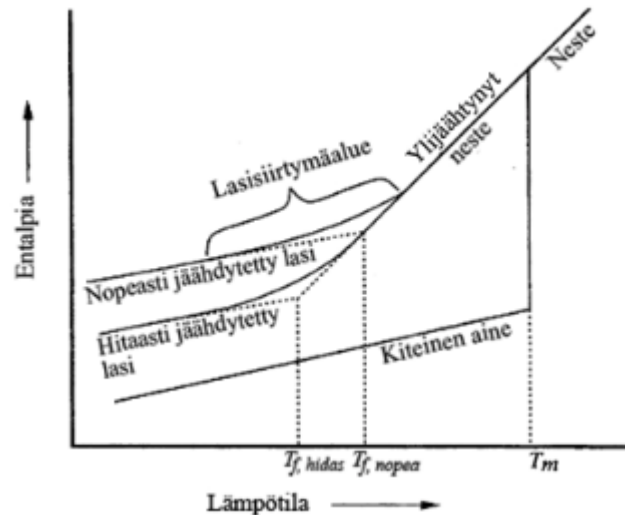
2. LASIN TUOTANTOPROSESSIN KEHITTÄMINEN

Tässä luvussa tehdään kirjallisuuskatsaus työn pääkäsitteisiin. Tarkoitus ei ole käydä lasinvalmistuksesta läpi kaikkia yksityiskohtia, koska tämä työ ei liity itse lasin valmistamiseen vaan lasin muotoiluun eli taivutukseen. Lasin taivutuksessa tulee kuitenkin ottaa huomioon erilaisia tekijöitä, joten sen takia alkuun on hyvä käydä läpi perustietoja lasista. Sen jälkeen käydään läpi analyysityökaluja, joita työssä käytetään. Niitä on tilastollinen prosessinohjaus ja kaksi laatutyökalua. Viimeinen teoreettinen asia käsittelee Six Sigman DMAIC -menetelmää ja DOE -koesuunnittelua, koska ne ovat vahvasti esillä koko työssä.

2.1 Lasin määritelmä

Lasi on amorfinen aine, eli sillä ei ole säännöllistä kiderakennetta. Lasilla ei ole säännöllistä kiderakennetta, koska lasisulan jäähtytyksessä sen viskositeetti kasvaa tietyllä lämpötila-alueella niin nopeasti, ettei sen ainesosat ehdi asettua kiderakennemuodon edellyttämään järjestykseen. Muutokset nestemäisestä olomuodosta kiinteään tapahtuvat laajalla lämpötila-alueella, jossa molekyylien liikkuvuus heikkenee vaiheittain lämpötilan aletessa, kunnes aine saavuttaa kiinteän olomuodon. Tätä muutosaluetta hyödynnetään useissa lasin käsittelyprosesseissa (Rainamo & Riikonen 1999, s. 3). Lasi on huoneenlämmössä kiinteässä olomuodossa, mutta kun sitä lämmitetään se muuttuu muotoaan pehmeämmäksi. Tämä johtuu siitä, että lasin rakenne ei ole niin kiteinen verrattuna muihin kiinteisiin aineisiin. Tämän takia lasi on erilainen materiaali verrattuna muihin materiaaleihin. (Kolb & Kolb 1979, s. 604)

Shelbyn (2005, s. 21) mukaan kaikilla laseilla on kaksi yhteistä ominaisuutta. Lasi on amorfinen aine, koska sen atomeilla ei ole pitkän kantaman järjestystä. Toinen yhteinen ominaisuus on, että kaikilla laseilla on tietty lämpötila-alue, jolloin tapahtuu muutos lasiksi eli lasisiirtymä. Kuvassa 1 on esitetty lasin olomuodon käyttäytymistä. Kuvassa T_m on piste, jossa lasi sulaa eli se on sulamislämpötila. Lasinsiirtymäalue eli muutos lasiksi muodostuu kiteisen aineen keskiosassa.



Kuva 1. Lasin muutoskäyttäytyminen (Shelby 2005, s. 22)

Lasiksi kutsutaan sellaisia aineita, joita on saatu erilaisia epäorgaanisia aineita yhdistämällä. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi silikaatit tai niiden seoksia. Epäorgaaniset aineet on sekoitettu keskenään ja sitten massa on sulatettu. Kun massan annetaan jäähtyä, niin sen sulate ei ole palautunut alkuperäiseen kiteiseen olomuotoon, vaan se on jäänyt jähmeäksi liuokseksi. (Pihkala 2019)

2.1.1 Mitä lasi on?

Lasi on kovaa ja läpinäkyvää ainetta, jonka tärkeimmät raaka-aineet ovat hiekka, kalkki ja sooda. Lasissa käytetään näiden lisäksi myös muita raaka-aineita, joiden osuus lasista on tyypillisesti seuraava (Pilkington 2019):

– Hiekka	59 %
– Sooda	18 %
– Dolomiitti	15 %
– Kalkkikivi	4 %
– Nefeliini	3 %
– Sulfaatti	1 %

Koska lasilla on homogeenisesti järjestäytymätön molekyyli rakenne, sen ansiosta lasi läpäisee valoa ja aurinkoenergiaa. Tämä tekee lasista erityislaatuisen verrattuna muihin materiaaleihin, koska sen läpi näkee. (Pilkington lasifakta 2012)

Lasia voidaan valmistaa eri menetelmillä. Riippumatta siitä, millä menetelmällä lasia valmistetaan, siinä käytettävät komponentit ovat aina samat: lasinmuodostajat, stabilisaattorit, selkeyttämisaineet, liuottajat ja väriaineet. Sama yhdiste voidaan luokitella eri luokkiin riippuen niiden käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi arseenioksidi voi olla joko lasinmuodostaja tai selkeyttämisaine riippuen siitä, mihin tarkoitukseen se on lisätty (Shelby 2005, s. 28). Tärkein komponentti on aina lasinmuodostaja, sillä nimensä mukaan se muodostaa lasin verkkorakenteen. Yksi yleisimpiä lasinmuodostajia on piidioksidi (SiO_2) eli kvartsihiekkä ja sitä on käytetty eniten myös kaupallisesti lasin muodostajista. (Shelby 2005, s. 28-29)

Lasi on huono lämmönjohde. Tämän takia se täytyy jäähdyttää hitaasti vaihe kerrallaan. Jos lasi jäähdytetään liian nopeasti, silloin sen lämpötila laskee lasimassassa epätasaisesti ja lasiin jää jännitystiloja, kuten reunajännityksiä. Jos lasiin jää jännitystiloja, silloin vähäinenkin ulkopuolinen voima saattaa purkaa näitä jännityksiä, joka näkyy fyysisesti lasin särkyminenä. Lasi voi särkyä silloin jopa räjähdysmäisesti. (Pihkala 2019)

Jokainen yritys pyrkii tekemään omia tuotteitaan mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tämän takia esimerkiksi eri tuotteita voidaan sekoittaa keskenään, koska jokin toinen materiaali on kalliimpi kuin jokin toinen ja näin tuotteesta saadaan mahdollisimman kustannustehokas. Jos lasi valmistettaisiin pelkästä hiekasta, niin silloin sen kustannukset olisivat liian suuret normaaliläsitavaroitten valmistamiseen. Tämä johtuu hiekan eli piidioksidin korkeasta sulamislämpötilasta, joka on n. 1700 °C. Tästä syystä mukaan sekoitetaan liuottajia, jotka alentavat hiekan sulamiseen tarvittavaa lämpötilaa. Yleisin liuottaja on natriumkarbonaatti eli sooda. (Shelby 2005, 29)

2.1.2 Lasin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Jokaisella aineella on omat fysikaaliset, mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Tähän lukuun on koottu niitä ominaisuuksia lasista, jotka ovat tärkeässä osassa tämän työn kannalta. Lasin mekaanisen käyttäytymisen perusta on sen muodostuminen hapen ja piin lujien kovalenttisten sidoksien muodostamaa molekyyliverkostoa. Lasin rakenne on homogeenisesti isotrooppinen (Sutela 2019).

Kovuus

Lasi on kovaa materiaalia, sillä Mohsin kovuusasteikolla se saa arvoksi 7. Mohsin asteikko on yleisesti käytetty asteikko mineraalien kovuuden tunnustamisessa. Friedrich Mohs kokosi v. 1822 kymmenen mineraalia, jotka ovat helposti saatavilla. Niistä hän järjesti ne siihen järjestykseen, missä ne naarmuttivat toisiaan. Pehmein mineraali (talkki) saa arvon 1 ja kovin mineraali (timantti) saa arvon 10. Mohsin asteikkoa tulkittaessa on hyvä pitää mielessä, että kyseinen asteikko ei ilmaise mineraalin todellista kovuutta, vaan sillä vertaillaan tutkittavaa mineraalia muihin mineraaleihin. (Turunen 2019)

Lasi on todella luja puristusjännityksen kannalta, joten lasi rikkoontuu ainoastaan vetojännityksen voimasta. Lasiin syntyy vetojännitystä, kun lasin keskialue lämpiää nopeammin kuin reuna-alue. Tällöin siis lasin keskiosa laajenee reunoja nopeammin. Lasi kestää paremmin lyhytaikaisia kuormia kuin pitkäaikaisia kuormia. Lasista saadaan normaalia kovempaa lämpökarkaisemalla lasia, jolloin lasin kovuus nousee jopa 4-5 kertaiseksi verrattuna ei-karkaistuun lasiin. (Sutela 2019)

Kimmokerroin

Kimmokerroin kuvaa sitä, miten paljon materiaali taipuu tai venyy kun sitä kuormitetaan. Kimmokerroin lasketaan siten, että kimmokerroin sijoitetaan taipuman kaavaan jakajaksi. Tästä seuraa, että mitä suurempi on kimmokertoimen arvo, niin sitä vähemmän materiaali taipuu. Lasin kimmokerroin on 72 GPa ja esimerkiksi alumiinilla se on samaa luokkaa. Vertailuksi luonnonkumin kimmokerroin on 0,05 GPa ja timantin kimmokerroin on todella suuri, noin 1100 GPa. (Kolehmainen 2019)

Lasi hajoaa aina yllättäen, sillä sen rikkoontumista ei voi normaaliolosuhteissa ennakoida. Lasin jännitys-venymä -funktiossa ei esiinny lainkaan myötöä eikä hystereesiä ja pitkäaikaisesti kuormitettuna lasiin ei synny venymää lainkaan. (Sutela 2019)

Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa energiaa, jonka kappale luovuttaa tai ottaa vastaan. Suure kertoo, miten paljon lämpöenergiaa materiaaliin sitoutuu massaa ja lämpötilaeroa kohti. Se riippuu kappaleen massasta, lämpötilan suuruudesta ja kappaleen materiaalista. Ominaislämpökapasiteetti on jokaiselle aineelle ominainen piirre. Nesteiden ja kiinteiden aineiden ominaislämpökapasiteetti ei juuri riipu paineesta, mutta se riippuu hieinan lämpötilasta. Esimerkiksi vedellä on huomattavan suuri ominaislämpökapasiteetti ja sen arvo on $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. (Lehto *et al.* 2009, s. 116-117)

Lasin ominaislämpökapasiteetti on varsin pieni, sillä se on $0,84 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. Esimerkiksi alumiinin ominaislämpökapasiteetti on $0,9 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ja raudan on vastaava luku on $0,45 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. Kumin ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti suurempi ja sen vastaava suure on $2,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$. (Karkela *et al.* 2007, s. 72-77).

Pituuden lämpölaajeneminen

Kappaleet laajenevat tai kutistuvat silloin kun ympäristön lämpötila muuttuu. Lämpölaajeneminen on makroskooppinen ilmiö, koska aineen absorboidessa energiaa lämmön muodossa aineen tilavuus yleensä kasvaa. Esimerkiksi kaasujen tilavuus kasvaa nopeammin kuin nesteiden tai kiinteiden aineiden, koska kaasun rakennehiukkaset pääsevät liikkumaan vapaammin kuin nesteiden tai kiinteiden aineiden rakenneosat. Lämpölaajeneminen johtuu aineen rakenneosasten satunnaisten liikkeiden kasvulla. Kun lämpötila kasvaa, silloin aineen atomit värähtelevät laajemmalla alueella tasapainoasemansa ympärillä. Silloin niiden keskimääräinen etäisyys muista atomeista kasvaa. Vastaavasti taas kappaleen jäähtyessä rakenneosasten atomien värähtely vähenee ja keskimääräinen pituus pienenee. Jos kappaleen alkuperäinen pituus l_0 ja lämpötilan kasvusta johtuva uusi pituus l , silloin pituuden muutos on $l - l_0$ (Lehto *et al.* 2009, s. 60-61). Lasin lämpölaajeneminen näkyy tässä työssä silloin kun lasit tulevat kammiouunista. Silloin lasi pienee muotillaan vielä jäähdytysprosessin jälkeen.

2.1.3 Lasin valmistuksen prosessi ja kohdeyrityksen tuotantoprosessi

Työssä keskitytään lasin muotoilu- eli taivutusprosessin parantamiseen. Kohdeyritykselle tulee raakalasi valmiina tehtaalle, joten lasia siellä ei varsinaisesti tehdä vaan sitä jatkojalostetaan. Ennen kohdeyrityksen prosessinkuvausta on hyvä käydä läpi yleisesti kuinka lasi valmistetaan, jotta ymmärretään erot lasin jalostuksessa ja lasin valmistuksessa.

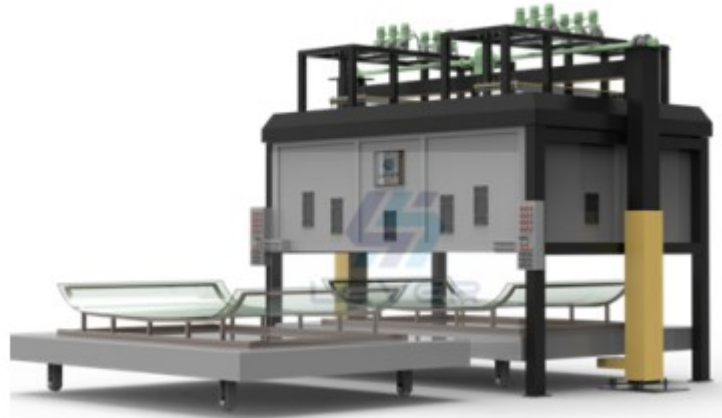
Lasin valmistaminen voidaan jakaa tuotantoprosessinsa mukaan neljään eri tuotantomuotoon: talous- ja taidelasituotanto, pakkauslasituotanto, tasolasituotanto ja lasikuitutuotanto. Lasin valmistus on nykyään hyvin pitkälle automatisoitu pois lukien taidelasituotanto. Tässä luvussa käsitellään vain tasolasituotantoa (float glass), koska se on teollisuudessa eniten käytetty lasin valmistusmenetelmä. Se on käytetyin lasityyppi maailmassa ja se on yleisin lasityyppi, jotka jatkojalostetaan lopputuotteeksi. (Pihkala 2019)

Tasolasiproessin keksi Sir Alastair Pilkington vuonna 1952. Taso-lasille tehdään useita lisäkäsittelyjä eli jatkojalostuksia ennen kuin se myydään loppuasiakkaalle, joka asentaa lasin esimerkiksi ajoneuvoon tai rakennuksiin. Aluksi tasolasimenetelmällä voitiin valmistaa vain 6,0 mm paksua lasia, mutta nykyään lasin paksuus vaihtelee välillä 0,4 mm-25 mm. Tasolasiproessi alkaa siitä, kun sekoitetut raaka-aineet (muun muassa hiekka, sooda, dolomiitti) sulatetaan uunissa. Tämän jälkeen sula lasimassa, joka on noin 1000 °C astetta kaadetaan uunista jatkuvasti matalan sulan tinakerroksen päälle. Lasi jää kelmumaan tinakerroksen päälle ja näin ollen se leviää tasaiseksi kerrokseksi. Lasin kerrospaksuus määräytyy sen mukaan, kuinka nopeasti jähmetettyä lasia vedetään pois tinan päältä. Tämän jälkeen lasi jäädytetään ja leikataan. Kaikki tämä tapahtuu samalla tuotantolinjalla. Lopuksi lasi pestään ja sen laatu tarkistetaan (Pilkington 2019). Lasin leikkuulämpötila on noin 60 °C astetta, sillä lasi jäädytetään sitä ennen noin kaksi tuntia jäädytystunneliuunissa, jossa lasi liikkuu hitaasti eteenpäin. Lasin lämpötila laskee jäädytysvaiheessa 500 °C asteesta huoneenlämpöön. Paksut lasit vaativat vielä enemmän aikaa jäädytykseen. Jäädytyksen jälkeen lasi leikataan niihin mittoihin, joihin asiakas on sen halunnut. Leikkuun jälkeen lasille suoritetaan reuna- ja pintahionta. Tämän jälkeen lasit pakataan nippuihin ja toimitetaan asiakkaille. (Pihkala 2019)

Tasolasi jaetaan joko karkaistuun lasiin tai laminoituun lasiin. Työn kohdeyritys valmistaa laminoitua lasia. Karkaistu lasi valmistetaan vähintään 4,0 mm lasista. Lasi kuumennetaan uunissa lähelle pehmenemislämpötilaa, joka on noin 630 °C astetta. Tämän jälkeen lasiin kohdistetaan äkillinen jäädyttävä paineilmasuihkutus lasin molempiin pintoihin. Pintajäädytyksen ideana on synnyttää lasiin puristavia pintajännityksiä, jotka lisäävät lasin lujuutta. Karkaistun lasin iskunkestävyys on noin 6-8 kertainen tavalliseen ikkunalasiin verrattuna. Jos lasi hajoaa jostakin kovasta iskusta, lasista ei muodostu teräväsärmäisiä sirpaleita, vaan siitä tulee kauttaaltaan pieniä pyöreäreunaisia rakeita. Karkaistua lasia käytetään esimerkiksi autojen sivu- tai takaikkunana ja julkisivulaseina kuten ovissa tai portaissa. Laminaattilasi valmistetaan yleensä kahdesta lasista, jonka väliin on laitettu muovikalvo. Laminaattilasi rikkoontuu vain erittäin voimakkaasta iskusta, mutta siitä ei irtoa sirpaleita, vaan muovikalvo sitoo ne ja estää lasinsirpaleiden leviämisen. Tämän takia lasia kutsutaan myös turvalasiksi. Lujuutensa ja turvallisuutensa ansiosta laminaattilasia käytetään ajoneuvojen etulasina tai hissikuilujen lasiseinämiin. (Pihkala 2019)

Tasolasimenetelmä perustuu vain yhteen tuotantolinjaan. Jatkojalostusprosessissa on usein enemmän tuotantolinjoja, koska eri tuotteet vaativat erilaisia asioita. Kohdeyrityksen tuotanto koostuu neljästä osa-alueesta: leikkuu, taivutus, laminointi ja lopputarkastus. Tehtaalle tulevat raakalaset standardikokoisina suoraan paketissa, josta ne nostetaan leikkuulinjalle. Yhden lasin paksuus on yleensä noin 3,0-4,0 mm. Leikkuussa lasit leikataan haluttuun kokoon, jonka jälkeen sen reunat hiotaan ja lasi pestään. Sen jälkeen lasi menee silkkipainoon, jossa toiseen lasiin painetaan ulkoreunoille mustat reunukset. Silkkipainokuvion on asiakas itse valinnut. Laseja on päällekkäin kaksi lasia, joiden väliin laitetaan ohut pölykerros, jottei lasit naarmuta toisiaan. Toinen lasi on hieman lyhkäisempi kuin toinen lasi, koska taivutuksessa sisälasin pitää olla lyhyempi, jotta lasien reunat ovat samalla tasolla. Silkkipaino tehdään vain toiseen lasiin. Silkkipainon jälkeen robotti kuljettaa lasit kärrylle ja ne ohjataan taivuttamoa kohti. Kun yritys valmistaa satoja laseja päivässä, niin kammiouneja täytyy olla monta, koska niissä voidaan taivuttaa vain yhtä lasia kerrallaan. Poikkeus on sarjauunit, joissa laseja menee perätysten kymmenen kappaletta. Jokainen kammiouuni on erilainen ja yhdessä kammiouunissa

tehdään yleensä vain muutamia eri tuotteita, koska jokainen tuote on erilainen ja näin ollen se vaatii erilaiset olosuhteet. Kuvassa 2 on mallinnus kammiouunista. Yhdessä kammiouunissa on käytössä kaksi vaunua, eli aina kun toinen lasi jäähtyy muotilla kammiouunin ulkopuolella niin toisen lasin voi laittaa taipumaan. Silloin kuvassa uunin sisäpuolella oleva lasi nousee niin ylös, ettei lasia näe muualta kuin kammiouunin sisäpuolella olevista pienistä ikkunoista. Taivutusaika riippuu lasin muodosta ja koosta, mutta taivutuslämpötila on usein suhteellisen sama. Lasi vaihtaa olomuotoaan 550 °C asteessa ja 580 °C asteessa leikkuun jännitykset häviävät ja lasiin muodostuu taivuttamon jännitykset. Itse lopputaivutus tehdään noin 610 °C asteessa. Lopputaivutus on aina tuotekohtainen ja jokainen tuote täytyy taivuttaa omalla tavallaan. Kun lasi on taivutettu, aloitetaan porrasmainen jäähdyttäminen kammiouunissa. Jos tämän osion tekee liian nopeasti, silloin lasiin syntyy huonoja reunajännityksiä ja lasit voivat hajota itsekseen. Juuri tähän prosessinvaiheeseen tämä työ keskittyy. Kun lasi on jäähdytetty kammiouunissa tarpeeksi kauan, sen jälkeen lasin annetaan vielä jäähtyä kammiouunin ulkopuolella muotilla, sillä lasi on vielä tässä vaiheessa niin kuuma, ettei siihen voi koskea. Kun lasi on jäähtynyt, sen jälkeen siitä tehdään tarvittavat mittaukset ja lasi laitetaan pukille, josta se siirretään laminointiin.



Kuva 2. Tämä työ tehdään kammiouunissa, jossa on kaksi vaunua käytössä (China suppliers 2019)

Taivuttamon jälkeen taivutettu lasi siirtyy laminointiin. Siellä lasin väliin laitetaan muovinen PVB-kalvo, jonka paksuus on alle 1,0 mm. Ennen kalvon laittamista lasien väliin lasi puhdistetaan sisäpuolelta, ettei sinne jää mitään likaa ja pölyä. Kun kalvo on laitettu lasiparin väliin, se on niin harmaa ettei lasista näe mitenkään läpi. Kalvo sulatetaan lasien väliin kovassa paineessa ja lämpötilassa. Tämä vaihe kestää noin kolme tuntia. Kun tämä vaihe on tehty, sen jälkeen lasit voidaan siirtää lopputarkastukseen. Siellä tarkistetaan lasin laatu ja lasiin kiinnitetään esimerkiksi kaistavahdin paikkoja. Tämä kaikki riippuu siitä mitä asiakas haluaa. Lopputarkastus laittaa lasin laatikkoon, josta se menee valmistuotevarastoon ja sieltä se aikanaan lähtee loppuasiakkaalle.

2.2 Analyysityökalut kehittämissprosessin tukena

Pysyäkseen mukana jatkuvasti muuttuvassa kilpailutilanteessa menestyvän yrityksen on käytettävä hyväksi ne tilanteet joista yritys voi löytää kehittämismahdollisuuksia. Yri-

tyksen täytyy saada organisaatio ja toiminta sille tasolle, että se pystyy nämä tilanteet hyödyntämään. Tätä tavoitetta kutsutaan nimellä Jatkuva Parantaminen (Continuous Improvement). Se ei ole varsinainen laatutyökalu, vaan se on tapa toimia ja hyödyntää erilaisia laatutyökaluja. Jatkuva parantamisen tausta on siinä, että laatu ei ole itseisarvo ja jatkuva kehitys ei lopu koskaan. Yrityksen pitää pystyä valmistamaan koko ajan entistä laadukkaampia tuotteita asiakastyytyväisyyden ylläpitämiseksi ja markkinaosuuksien säilyttämiseksi. Myös laadun ylläpito ja varmistus ovat yhtä tärkeässä osassa menestyvissä yrityksissä. (Salomäki 2003, s. 46)

Laatutyökaluja on kehitetty monia erilaisia ja jokaisella niistä on oma käyttökohteensa. Laatutyökalut ovat yksi laatujohtamisen osa-alue, joka antaa konkreettisesti työkaluja siihen, miten parantaa esimerkiksi oman prosessin- tai tuotteen laatua. Laatujohtaminen eli TQM (Total Quality Management) on yksi merkittävimmistä filosofioista teollisuudessa. Laatujohtaminen pyrkii parantamaan niin tuotteen, palvelun kuin prosessin laatua yhdessä tuottavuuden ja kustannuskilpailukyvyn kanssa. Laatujohtamisen kulmakiviä ovat asiakaslähtöisyys ja jatkuva parantaminen. Jatkuva parantaminen nähdään osana organisaation jäsenten toimintaa ja sen keskeisenä toimintatapana on ongelmien ennaltaehkäisy, jottei niitä pääse syntymään. (Hannukainen *et al.* 2006, s. 31-32)

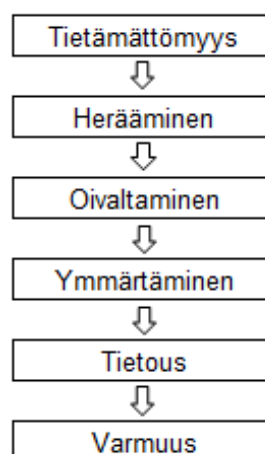
2.2.1 Kehitystoiminnan toteutus ja oikeiden laatutyökalujen valinta

Kehitystoiminta pyrkii aina saamaan aikaan jotain uutta tai parempaa jollekin osa-alueelle. Kehitys voi olla pientä tai isoa, mutta silti itse kehitystoiminta vaatii aina suunnitelmallisuutta. Mitä merkittävämpää ja suurempaa asiakokonaisuutta on kehittämässä, sitä tärkeämmäksi tulee suunnitelman laatiminen ja siinä pysyminen. Suunnitelmallisuus takaa resurssien tehokkaan käytön ja ohjauksen. Suunnitelmallisuuden ansiosta myös koko toiminta on varmempaa ja siinä on vähemmän tiedostamattomia riskejä, jotka voivat vaarantaa jopa koko projektin. Kehitystoiminta alkaa aina ongelman tunnistamisella. Ongelma voi olla etukäteen tiedossa tai se voi tulla vastaan. Jos ongelma on etukäteen tiedossa, silloin sitä pystytään paremmin suunnittelemaan, koska aikaa on käytössä enemmän. Toisaalta taas jos ongelma tulee yllättäen vastaan, silloin etuna on se, että ongelmaan päästään heti konkreettisesti käsiksi. Molemmissa tapauksissa ei voida tietää etukäteen, minkälaisia ongelmia tulee vielä eteen tulevaisuudessa. Esimerkiksi kehitystyön aikana voi tulla yllättäen vastaan sellaisia kehitettäviä asioita, jotka on joskus katsottu olevan kunnossa. Lisäksi kehitystyö usein tuo esille uusia kehityskohteita, kun asiaan perehtyessä siitä alkaa löytämään sellaisia asioita, joita ei olla tajuttu miettiä ennen. (Salomäki 2003, s. 86-87)

Kehitystoiminta lähtee liikkeelle tunnistamalla parannettava prosessi. Kun prosessi on tunnistettu, sen jälkeen tehdään päätös parannettavasta prosessista. Yrityksissä on jatkuvasti menossa paljon erilaisia kehitystoimenpiteitä, joten silloin pitää priorisoida asioita eli missä järjestyksessä asioita kehitetään. Lähes poikkeuksetta tärkeysjärjestyksessä ovat ensimmäisenä ne hankkeet, jotka ovat tärkeitä asiakastyytyväisyyden, organisaation toiminnan ja tuotannon kannalta tai jos hankkeella on vaikutus moneen eri asiaan. Kehittämiskohteen valinta usein perustellaan esimerkiksi asiakaspalautteen tai asiakastietojärjestelmän kautta, erilaisilla analyyseillä tai vaikkapa tarkistuslistojen tai mittauskorttien avulla. Erilaisille menetelmille on yhtenäistä visuaalisuus, sillä kuvaus auttaa asian ymmärtämisessä ja dokumentoinnissa. (Laatuakatemia 2019)

Ongelmia sisältävän prosessin laatu ei parane, jos vain yritetään tehdä työ aikaisempaa paremmin eikä sille tehdä mitään kehitystoimenpiteitä. Tällä tavalla saadaan ehkä tulokset paremmiksi hetkellisesti, mutta se johtuu prosessin normaalista vaihtelusta ja hetken kuluttua palataan taas vanhalle tasolle. Jos laatua halutaan parantaa tavoitteellisesti, silloin tarvitaan uutta tietoa ja erilaisia työkaluja. Usein apuja tarvitaan myös prosessin ulkopuolelta, jotta tilanne nähdään tavallaan laatikon ulkopuolelta. Usein kehittämistoiminnan ongelma on, että ongelmat hyväksytään, koska ne ovat osa prosessia ja näin on toimittu ennenkin. Paras tapa aloittaa laatutyö on valita sille tavoite ja viitekehys jostakin omista tai asiakkaan ongelmista. Näin asia tutkitaan paremmin, kun ongelma on konkreettinen. Tässä kohtaa pitää pohtia sitä, onko prosessi todella tunnistettu. Näkyvien ongelmien lisäksi usein on piilossa turhaa työtä ja muita kehityskohteita. Nämä pitää saada ensin kuntoon, sillä jos siirrytään heti hieman edistyneempään prosessin kehittämiseen, kuten tilastolliseen prosessin kehittämiseen, niin silloin tämä turha työ tulee mukaan prosessinohjaukseen ja silloin mitataan sellaisia asioita, joita ei pitäisi mitata lainkaan. (Salomäki 2003, s. 89)

Kehitystoiminnassa on nähtävissä kuusi erilaista vaihetta (Kuva 3). Jokainen kehitystoiminta alkaa tietämättömyydestä. Silloin ei tunneta prosessin ongelmia ja suorituskykyä, koska ei ole olemassa mitään mittareita millä mitata prosessia. Ongelmasta saattaa olla aavistus, mutta sitä selitetään huonolla onnella. Toinen vaihe on herääminen. Se tapahtuu silloin, kun prosessin omistaja asettaa ensimmäiset tavoitteet ja huomataan, että niihin ei päästä. Seuraava vaihe on oivaltaminen, jossa on jo löydetty joitakin keinoja suoristusten vaihtelun pienentämiseksi ja yksittäisten häiriöiden poistamiseksi. Silloin on löydetty keinot hallita prosessia, jolloin sen ohjattavuus ja ennustettavuus paranevat. Seuraava vaihe on ymmärtäminen, eli ymmärretään prosessin syy-seuraus -yhteys. Silloin prosessia voidaan ohjata yhä parempiin suorituksiin ja hyvä tulos syntyy ohjauksen eikä sattuman kautta. Tietous on viides vaihe ja tässä vaiheessa hallittu prosessi pystyy vastaamaan asetettuihin tavoitteisiin ja prosessin suorituskyvystä sekä reunaehdoista ollaan tietoisia. Viimeinen vaihe, varmuus pyrkii tiukentamaan vaatimuksia tavoitteenaan parempi prosessin hallinta ja pienentämään vaihtelua. Silloin voidaan olla varmoja menestymisestä. (Salomäki 2003, s. 91-92)



Kuva 3. Kehitystoiminnan vaiheet (Salomäki 2003, s. 91-92)

Laatutyökalujen ongelma ei ole niiden saatavuus, vaan niiden tehokas käyttö. Laatutyökalujen asiantuntijaksi on huomattavasti helpompi tulla kuin oppia käyttämään niitä tehokkaasti. Mihinkään ongelmatilanteeseen ei ole olemassa yhtä oikeata kehittämistapaa

tai -välinettä. Laatutyökalun valinnassa ratkaisevia asioita ovat tavoite, käytettävissä oleva tietotaito, aikataulu, kustannukset ja yrityskulttuuri. Usein yrityksillä on organisaatiokulttuurissa omat laatutyökalut, jotka on joskus päätetty ja sitten näitä työkaluja käytetään aina. Yrityksen oma laatutyökalu valikoima pohjautuu usein sen omista tarpeista ja osaamisesta. Alkuvaiheessa on hyvä valita helppoja ja nopeakäyttöisiä työkaluja, joilla on helppo päästä liikkeelle. Vähitellen työkalupakkiin kannattaa lisätä monimutkaisempia laatutyökaluja, jotta kehitys ei pysähdy. Kun prosessi on ensin tutkittu ja säädetty laadun perustyökaluilla, sen jälkeen tiedon saaminen hankaloituu kun tietoa ja hyötyä on yhä vaikeampi saada. Silloin tulee ottaa käyttöön monimutkaisempia laatutyökaluja. Laatutyökalujen käyttö pyrkii aina laadun parantamiseen ja kustannusten pienentämiseen. Niiden käytöllä olisi helppo tavoitella osaoptimointia, mutta se ei kuulu oikeanlaiseen kehitystoimintaan. Tilastollisten menetelmien käytön hyvä puoli on siinä, että ne kertovat rehellisesti ja suoraan miten asiat on. (Salomäki 2003, s. 337-338)

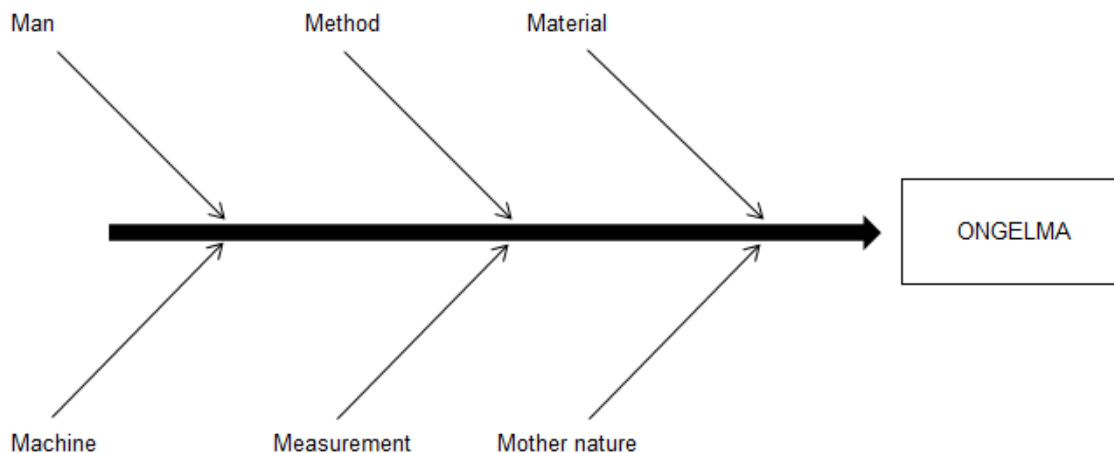
Laatutyökalut voidaan jakaa (Salomäki 2003, s. 338) seitsemään laatutyökaluryhmään:

- histogrammit
- syy-seuraus -analyysit
- pareto-kuvaajat
- valvontakortit
- tarkastuskortit
- kuviot ja käyrät
- hajontakaaviot

Joissakin aineistoissa joukkoon on lisätty kahdeksantena koesuunnittelu (Salomäki 2003, s 339), jota käytetään myös tässä työssä. Käyrillä tarkoitetaan erilaisia graafisia esityksiä, kuten aikasarjoja. Käyrät on joissakin luetteloissa korvattu vuokaavioilla. Monissa laatutyökaluissa on korostettu sitä, että tuloksista pitäisi piirtää jonkinnäköinen kuvaaja, vaikka valvontarajoja ei laskettaisinkaan. Kuvaaja kertoo yhdellä kuvalla nopeasti yleiskuvan tilanteesta.

2.2.2 Syy-seuraus -kaavio alkuanalyysinä

Kaoru Ishikawa (1915-1989) on kuuluisin japanilainen tiedemies laatujohtamisen osa-alueella. Hän on kehittänyt syy-seuraus -kaavion (Kuva 4), jota kutsutaan myös nimellä Ishikawa diagram. Suomeksi tätä kutsutaan myös nimellä kalanruotokuvio sen rakenteen ulkonäön takia. Menetelmän tavoitteena on löytää ongelmalle tai ulostulolle mahdollisimman monta syytä. Kalanruotokuvio näin ollen organisoii ja tunnistaa keskeisimmät syyt, jotka vaikuttavat johonkin ongelmaan tai ulostuloon. Usein tässä mallissa ulostulo on jokin ongelma, jota lähdetään selvittämään. (Stefanovic *et al.* 2014)



Kuva 4. Syy-seuraus -kaavion rakenne (T. Karjalainen 2007)

Ensimmäinen askel on ongelman määrittely, jonka jälkeen pyritään tunnistamaan mahdolliset syyt. Tämän jälkeen päätetään, minkälainen kalanruoto halutaan muodostaa (Stefanovic *et al.* 2014). Jos ongelma koskee tuotantoympäristöä, silloin usein valitaan niin sanottu 6 M -rakenne. Toinen vaihtoehto on 4 M -rakenne, jota käytetään yleensä palveluyrityksissä. 6 M -rakenne muodostuu seuraavista osista (T. Karjalainen 2007):

- Menetelmä (Methods)
- Henkilö (Man)
- Laite (Machine)
- Materiaali (Materials)
- Mittaus (Measurement)
- Ympäristö (Mother Nature)

Rakenteen luomisen jälkeen alkaa kalanruotokuvion täyttö. Ideointi voi tapahtua esimerkiksi aivoriihitekniikalla, jossa mahdollisia ongelman aiheuttajia lisätään kuvioon sen enempää niitä miettimättä. Myöhemmin pohditaan, mikä mahdollisista aiheuttajista voisi olla juurisyy käsissä olevaan ongelmaan. Jos ideointivaihe on haastavaa, silloin voi apuna käyttää erilaisia kysymyksiä: Miksi? Mitä? Missä? Koska? Kuinka? Ideoinnin jälkeen alkaa purkuvaihe, jossa kirjatut syyt jaotellaan kolmeen eri ryhmään: 1) Yli-viivataan ne, jotka voidaan todeta merkityksettömiksi tai joiden vaikutus on tiedossa, 2) Kehystetään ne, joilla arvioidaan olevan vaikutusta ongelmaan, 3) Ilman merkintöjä jäävät ne, joiden vaikutuksesta ei voida olla varmoja. Kaikki, jotka jäivät vailla merkintöjä, tutkitaan seuraavaksi, että onko ne kehystettävä vai voiko ne yliviivata. (Salomäki 2003, s. 347)

Kun kaikki syyt on jaoteltu, valitaan kehystetyistä syistä ne, joita aletaan tutkia tarkemmin. Tämän jälkeen valitaan tutkimusmenetelmä. Jos tutkittavat syyt ovat ristiriidassa keskenään, silloin on harkittava esimerkiksi koesuunnittelun käyttöä. Tutkimuksen aikana dokumentoidaan löydökset, jotta niihin voidaan palata ja seuraavalla kerralla niistä voidaan saada apua. Tämän jälkeen kerätään tutkimuksen tulokset yhteen ja valitaan parhaat ratkaisut prosessin kehittämiseksi, jonka jälkeen toteutetaan toimenpiteet. Viimeinen vaihe on tulosten varmistaminen ja dokumentoiminen. (Salomäki 2003, s. 347)

2.2.3 Histogrammit mittaustulosten luokittelijana

Pareto -periaate ja histogrammi ovat kaksi eniten käytettyä laatumenetelmää. Pareto -menetelmä muodostaa luokitellun datan (esim. virhe) perusteella analyysin, kun taas histogrammissa muutetaan muuttuja luokkamuuttujaksi (esim. pituus tai aika) (E. Karjalainen 2007). Histogrammi tuo yhteen kuvaan mittaustulokset luokiteltuna. Se laaditaan mittaustuloksista, joita tulisi olla paljon. Paljon tarkoittaa tässä tapauksessa yli 50 mittaustulosta. Mitä enemmän on mittaustuloksia, niin sitä paremmin histogrammista on nähtävissä mitä jakaumaa se noudattaa. Histogrammin mittaustulokset on jaettu erilaisiin luokkiin. Luokkamäärä tarkoittaa niiden luokkien lukumäärää, johon kaikki tulokset mahtuvat. Luokkajaon välissä voi olla tyhjiäkin luokkia. Oikean luokkamäärän löytäminen voi olla joskus vaikeaa, joten siihen on kehitetty lyhyt nyrkkisääntö:

$z = \sqrt{n}$, jossa z = luokkien määrä ja n = havaintojen määrä.

Kun luokkajako on päätetty, seuraavaksi mittaustulokset jaetaan luokkiin, joista piirretään pylväsdiagrammit. (Salomäki 2003, s. 341-342)

Kun histogrammi on muodostettu, niin seuraavaksi on edessä sen tulkitseminen. Ensimmäiseksi kiinnitetään huomiota siihen, että minkä muotoinen histogrammi on. Tämä antaa kuvan siitä, mitä jakaumaa data noudattaa. Histogrammin perusteella voidaan nähdä yhdestä kuvasta, miten mittaustulokset asettuvat muuhun dataan. Onko mittaustuloksilla paljon hajontaa? Mihin keskiarvo sijoittuu? Mitkä ovat toleranssirajat? Onko ulkopuolisia arvoja? Histogrammi ei laske arvoja, vaan näyttää yhdessä kuvassa selkeästi yleiskuvan minkä tyyppistä dataa on käytettävissä. (E. Karjalainen 2007)

Seuraavalla sivulla kuvassa 5 esitetään kolme erilaista histogrammia. Siitä havainnollistuu hyvin, miten mittaustulosten lisäys vaikuttaa histogrammin muotoon. Viimeisessä histogrammista näkee jo selvästi, mitä jakaumaa mittaustulokset noudattavat. Toisaalta taas ensimmäisestä kuvasta nähdään, että pienillä mittaustuloksilla voi olla syntymässä kaksihuippuinen jakauma, joka olisi tässä tapauksessa väärä tulkinta. Keskimmäisestä kuvasta voidaan tehdä jo johtopäätöksiä, mutta aivan varma johtopäätöksestä ei voida olla.



Kuva 5. Kolme erilaista histogrammia, joissa eri määrä mittauksia (Salomäki 2003, s. 187-188)

2.2.4 Tilastollinen prosessinohjaus

Tuotantoprosessin laatua ja suorituskykyä valvotaan, jotta havaitaan normaalista poikkeavat tilanteet ennen kuin huono laatu aiheuttaa jotain isompia ongelmia. Yksi keino tähän on tilastolliset menetelmät. Tilastollisina menetelminä voidaan pitää sellaisia menetelmiä, joissa havaintoja käsitellään joukkona, eikä päätöksiä tehdä vain yhden havainnon perusteella. Prosessin keskimääräinen suoritus verrattuna tuotteille asettamiin spesifikaatioihin kuvaa prosessin suorituskykyä. Prosessin tavoitteena on aina valmistaa hyvälaatuista tuotetta häiriöttömästi ja tehokkaasti. Prosessin voi läpäistä aina joko sama tuote tai eri tuote, mutta prosessin suorituskyky ei ole riippuvainen tuotteesta, jota valmistetaan, vaan suorituskyvyn tulisi pysyä vakiona. (Salomäki 2003, s. 166)

Havaintoaineiston tarkastelua voidaan kutsua nimellä tilastollinen tutkimus. Yksinkertaisuudessaan sen tarkoituksena on muodostaa selkeä mielikuva havaintoaineistosta, siinä esiintyvistä säännönmukaisuuksista ja sen vaihteluista. Tämä lisää tietämystä ilmiön tarkasteluun. Tarkastelu tapahtuu käytännössä siten, että kuvaillaan havaintoaineiston eri piirteitä ja niistä muodostetaan matemaattinen malli. Tilastolliset menetelmät ovat perusta aineistosta tehtäville johtopäätöksille ja aineiston analyttiselle tarkastelulle. Hyvin suoritettussa tutkimuksessa on sekä kuvailevaa että analyttistä tarkastelua. Niitä ei pidä nähdä kahtena erillisenä tutkimuksena vaan toisiaan täydentävinä tutkimuksina. (Grönroos 2003, s. 5)

Tilastolliset menetelmät koostuvat neljästä erilaisesta tilastonaineiston keräämis-, käsittely-, analysointi- ja päättelymenetelmästä. Jokaisella vaiheella on merkityksensä luotettavan tilastollisen tutkimuksen aikaansaamiseksi. Kaikki menetelmät yhdessä vaikuttavat siihen, millaisiin johtopäätöksiin tutkimuksen lopussa tullaan. On hyvä muistaa, että keräämismenetelmät muodostuvat erilaisista otantamenetelmistä, jossa otokset eivät edusta koko perusjoukkoa. Näin ollen otokset eivät edusta perusjoukkoaan täydellisesti. Tämän takia tilastolliseen tutkimukseen voi muodostua virheitä, jotka pyritään minimoimaan ottamalla satunnaisoton perusjoukosta aina samanlaisesti. (Manninen & Ylen 2001, s. 1)

Tilastollinen prosessinohjaus eli SPC (Statistical Process Control) tarkoittaa tilastollista prosessin valvontaa tilastollisia menetelmiä soveltaen. Tilastollinen prosessinohjaus tarkoittaa kaikkia niitä menetelmiä, joilla saadaan tilastollista pohjaa prosessin ohjaamiseen ja siihen liittyvään päätöksentekoon. Tilastolliset työkalut antavat luotettavaa ja todistettavaa aineistoa, joten niiden perusteella on helpompi tehdä päätöksiä kuin esimerkiksi laadullisen tutkimuksen perusteella. Tilastollisen menetelmän yksi tärkeimmistä asioista on näyte-erän koko, joka on yleensä pieni verrattuna normaaliin tuotantomäärään. Tilastotieteen keinoin tästä pienestä näyte-erästä voidaan muodostaa erilaisia matemaattisia malleja, joiden avulla voidaan ennakoita ja arvioida prosessin käyttäytymistä. (Salomäki 2003, s. 167)

Tilastollinen prosessinohjaus on Walter A. Shewhartin oppeihin perustuva menettelytapa, joka luotiin jo 1920-luvulla. Sitä alettiin kuitenkin käyttää vasta 1980-luvulla, kun W. Edwards Deming alkoi opettaa tilastollisuuteen liittyvää laatujohtamista ja yritysjohto alkoi kiinnostua laadunparannuksesta laadunvarmistuksen sijaa. Vasta silloin tilastollinen prosessinohjaus alkoi saamaan kannatusta länsimaissa. Hidas kehitys johtuu siitä, että tuolloin vielä keskityttiin lähinnä laadunvarmistukseen eikä laadunparantaminen kuulunut yritysjohtoon vastuualueelle. Tilastollinen ajattelu muodostaa ihmiselämässä uuden ajattelutavan, jonka avulla on mahdollista kehittää prosesseista entistä parempia. (E. Karjalainen & T. Karjalainen 1999, s. 10)

Tilastollinen ajattelu voidaan nähdä kolmena keskeisenä periaatteena (E. Karjalainen & T. Karjalainen 1999, s. 10):

- kaikki työ jota tehdään on sarja keskenään sidoksissa olevia prosesseja
- kaikki prosessit ovat vaihtelevia
- vaihtelun pienentäminen parantaa prosessin laatua ilman, että tuhoaa jotakin muuta

Taulukko 1. Perinteisen laadunvalvonnan ja SPC:n kapean tulkinnat eroavaisuudet (Salomäki 2003, s. 169)

Perinteisen tuotelaadunvalvonnan vaiheet	SPC:n vaiheet (kapea tulkinta)
1. Mittaaminen 2. Mittaustulosten vertaaminen asetettuun toleranssiin 3. Tuotteiden lajittelu: hyväksytty, korjattava ja hylätty tuote	1. Mittaaminen 2. Mittaustulosten vertaaminen asetettuun toleranssiin 3. Tuotteiden lajittelu: hyväksytty, korjattava ja hylätty tuote 4. Usean mittaustuloksen yhdistäminen valvontakortin avulla 5. Prosessin suorituskyvyn määrittely 6. Kehitystoimenpiteiden käynnistäminen

SPC tutkii prosessin tilaa ja siinä pyritään selvittämään, onko hajonta peräisin luonnollisesta ilmiöstä vai vaikuttaako prosessiin jokin poikkeava häiriö eli erityinen syy. Luonnollinen ilmiö tarkoittaa jotakin yleistä syytä, jota nimitetään kohinaksi. Tilastollisessa prosessinohjauksessa pyritään aina keskittymään yleisiin hajontaa aiheuttaviin tekijöihin ja erityssyyt pyritään poistamaan aina mahdollisimman nopeasti. Prosessissa on aina vaihtelua, joka johtuu yleisistä- ja erityisistä syistä. Vaihtelusta 94-98 % johtuu yleisistä syistä, joka voi olla esimerkiksi maalin viskositeetti tai työntekijän käden liikeradan muutos. Molempia vaihtelun syitä voidaan pienentää parantamalla laitteita, käyttämällä parempia materiaaleja tai tekemällä erilaisia kokeita esimerkiksi DOE -koesuunnittelun avulla. Kaksi tuotetta tai tuoteominaisuutta ei ole milloinkaan samanlaisia, vaan niiden välillä on aina vaihtelua. Prosessin ohjauksessa onkin tärkeintä ymmärtää ulostulon vaihtelun merkitys ja se, että vaihtelua on aina olemassa. Vaihtelua on esimerkiksi erilaiset tuoteominaisuudet ja mittaustulokset sekä mittaustulosten erilaiset vaihtelun lähteet: mittaaja, ympäristö tai mittausmenetelmä. Koska vaihtelua on kaikkialla, vaihtelun ymmärtäminen on todellista viisautta. Tästä syystä vaihtelun tutkiminen, ymmärtäminen ja hallitseminen on oppimista ja viisautta. Vaihtelussa on paljon tietoa, mutta tiedon

kaivaminen vaihtelusta on paljon haastavampaa kuin itse vaihtelun havaitseminen. (E. Karjalainen & T. Karjalainen 1999, s. 10-14)

Tilastollisessa prosessinohjauksessa pitää tuntea tilastotieteen peruskäsitteet, jotta ymmärtää asiat oikein. Tutkimus kohdistuu usein johonkin reaali maailman ilmiöön, johon liittyy tutkimuskohteiden joukko eli perusjoukko. Toinen nimitys perusjoukolle on populaatio. Perusjoukko voi muodostua esimerkiksi jostakin tietystä henkilöiden joukosta tai se voi muodostua esimerkiksi tietynlaisista tapahtumista tietyllä aikavälillä. Populaatio muodostuu alkioista, joten alkio on perusjoukon jäsen. Alkiota voidaan kutsua myös nimellä tilastoyksikkö, populaatioyksikkö tai havaintoyksikkö. Alkiosta ei tarkastella kaikkea mahdollista, vaan siitä tarkastellaan vain tiettyjä ominaisuuksia, jotka riippuvat siitä mitä kokeilla haetaan ja sen jälkeen näitä ominaisuuksia mitataan. (Grönroos 2003, s. 4)

Keskihajonta on matemaattinen tunnusluku, joka ilmaisee tulosten leviämisen keskiarvonsa molemmin puolin. Jos esimerkiksi keskihajonta on suuri, silloin tulokset hajaantuvat laajemmalle alueelle. Usein koko perusjoukkoa ei voida mitata, jolloin joudutaan tyytymään rajalliseen määrään mittauksia. Silloin lasketaan otoskeskihajonta, joka vastaa perusjoukosta otettujen alkioiden eli otosten keskihajontaa. Myös otoskeskiarvo tulee usein kyseeseen, koska koko perusjoukon keskiarvoa ei voida laskea. Otoskeskiarvo lasketaan samanlaisesti kuin keskiarvo sillä erotuksella, että kyseessä on vain otoksesta laskettavat mittaustulokset. (Salomäki 2003, s. 179-180)

Valvontakortit ovat yksi tärkeimmistä asioista SPC:n käytöstä. On olemassa monia eri käytäntöjä tuotanto- ja palveluprosessissa, miten niitä voidaan hyödyntää. Wheeler (1997, s. 21) on luokitellut valvontakortit viiteen eri luokkaan niiden käyttötavan mukaan:

- Raporttivalvontakortit
- Säättövalvontakortit
- Kokeiluvalvontakortit
- Seurantavalvontakortit
- Jatkuvan parantamisen valvontakortit

Raporttivalvontakortit keräävät tietoa miten asiat ovat toteutuneet. Tätä korttia ei siis käytetä reaaliajassa prosessien parantamiseen. Niiden avulla pystytään myös varmistamaan, että asiat ovat tapahtuneet tai vastaavasti nähdään, jos jokin asia ei ole tapahtunut. Tämä on usein ensimmäinen kortti, joka laaditaan prosessista. Säättövalvontakortti on graafisessa muodossa ja sen avulla kuvataan mittaustuloksia ja keskiarvoja. Sitä käytetään prosessin säätämiseen, mutta siinä ei huomioida valvontarajoja, joten näin ollen erityisyyt jäävät havainnoimatta. Tällä kortilla on tavoitteena yhdenmukaistaa prosessia, mutta se voi johtaa helposti prosessin ylisääteilyyn ja näin ollen se ei ole paras valvontakortti prosessin kehittämiseen. Kokeilukorttia käytetään silloin, kun analysoidaan aineistoa, joka on kerätty ennen ja jälkeen pienen kokeen. Kortti helpottaa kokeen vaihtusten selvittämistä ja antaa tietoa prosessin vaihtelusta, mutta se ei ole niin tehokas kuin kehittyneimmät analysointimenetelmät ja koesuunnittelut. Korttia on helppo tulkita ja käyttää. (Wheeler 1997, s. 21)

Seurantavalvontakortteja käytetään useampaa korttia samaan aikaan tarkoituksenaan selvittää erilaisia riippuvuuksia. Kortteja käytetään samaan aikaan siksi, että tällä pyritään löytämään juuri ne oikeat ominaisuudet, joilla voi parantaa prosessia. Korttien ver-

tailu keskenään myös auttaa löytämään oikeat ominaisuudet. Usean kortin käytöllä voidaan myös etsiä sopivaa vaihtoehtoa pysyvän kortin löytämiseksi. Viimeinen valvontakortti, jatkuvan parantamisen valvontakortit on tarkoitettu pitkäaikaiseen ja säännölliseen käyttöön. Korttien avulla seurataan prosessin tärkeimpiä muuttujia ja toimiessaan niiden avulla prosessista havaitaan luotettavasti prosessin muutokset ja erityisyyt. (Wheeler 1997, s. 21)

2.2.5 Mittausepävarmuus

Aina kun mitataan jotain asiaa, silloin on syytä huomioida mittausepävarmuus, sillä se on aina läsnä. Mittaamisen ongelma on, että vaikka mitattaisiin kuinka tarkalla menetelmällä jotain asiaa, niin tarkallakin menetelmällä saadaan tietää vain likiarvo mittauskohteesta. Myös mittausprosessissa on vaihtelua, aivan kuten tuotantoprosessissakin. Tämän takia on tärkeää pyrkiä saamaan mahdollisimman hyvä mittausjärjestelmän suorituskyky, sillä sen avulla saadaan luotettavampi ja todellisempi kuva mitatusta kohteesta. Mittausprosessin suorituskyvyn ja mittausepävarmuuden selvittämiseksi paras keino on toistaa samojen näytteiden mittauksia useita kertoja, koska samasta näytteestä pitäisi tulla aina sama tulos samalla mittaajalla. Mittausjärjestelmä saattaa olla myös niin huonossa kunnossa, että se antaa vääriä mittatuloksia ja tämän takia mittauksiin tulee vaihtelua. Mittatulos saattaa näin antaa prosessista paremman kuvan kuin mitä se todellisuudessa on. (Salomäki 2003, s. 133-134)

Mittarin hyvyttä voidaan arvioida monella tapaa. Kolme tärkeintä hyvyysarviointia on mittarin relevanssi, reliabiliteetti ja validiteetti. Kun nämä ovat kunnossa, niin pystytään mittariin luottamaan paremmin. Relevanssi tarkoittaa, että mitataan yrityksen kannalta oikeita asioita, eli siis ei mitata mitään turhaa vaan mitataan yritykselle tärkeitä asioita. Relevanssi mittari tuottaa yritykselle olennaista tietoa, jonka avulla pystytään tekemään oikeita kehitystoimenpiteitä prosessille. Reliabiliteetti tarkoittaa, että mittari tuottaa tarkkaa ja luotettavaa informaatiota kehityskohteesta. Reliabiliteetti on silloin hyvä, jos sama mittaaja saa samat tulokset jokaisella kerralla. Reliabiliteettia voidaan parantaa esimerkiksi menetelmän tutkimisella, harjoittelulla tai tasalaatuisuuden kehittämällä. Validiteetti tarkoittaa sitä, että mittari kuvaa juuri sitä asiaa mitä sen halutaan kuvaavan. Eli mittari antaa todellista tietoa asiasta, jota halutaan selvittää. Validiteetti on huomioita etenkin silloin, jos käytetään epäsuoria mittausmenetelmiä. Hyvä mittari on myös helposti ymmärrettävissä mitä mittari tarkoittaa. Mittarin ymmärtämistä voidaan edesauttaa esimerkiksi ohjeiden tekemisellä. Mittari on turha, jos kukaan ei sitä ymmärrä. Mittareilla pitää olla myös pitkän aikavälin näkökulma, koska jos ne katsovat asioita vain lyhyellä aikavälillä, niin silloin voidaan mennä toiminnassa pahasti harhaan. Mittareiden päätehtävä on saada aikaan tuloksia, mutta niiden pitää myös antaa tilaa toimia erilaisilla tavoilla. (Suomala *et al.* 2011, s. 195-196).

Mittalaitteen epävarmuutta voi vähentää eri tavoin. Yksi tapa siihen on kalibroida mittari säännöllisin väliajoin. Kalibroinnissa mittalaitteen näyttämää tulosta verrataan mittanormaaliin eli tunnettuun perusmittaan. Mittalaite kalibroidaan aina ensimmäisellä kerralla. Kalibrointia ei voi tehdä kuka vaan, vaan vain valtuutettu kalibrointilaboratorio voi tehdä sen. Tämä takaa sen, että kalibroinnista saa virallisen kalibrointitodistuksen ja näin ollen kalibrointiprosessia voidaan pitää luotettavana ja tasapuolisena muihin kalibrointeihin verrattaessa. Esimerkiksi jos on hankkimassa uutta mittaria, silloin ei tarvitse pohtia sitä, onko mittari kalibroitu oikein. Kalibrointitodistuksessa ilmoitetaan pienin mittausepävarmuusarvo, joka kalibroinnissa on saatu. Kalibroinnin mittausepävarmuus

ei tarkoita käytännön mittaustapahtuman epävarmuutta, joka tulee huomioida kalibrointitodistuksia tutkiessa. (Salomäki 2003, s. 155)

Mittaamisessa on erilaisten muuttujien lisäksi olemassa myös yksi paha ansa. Esimerkiksi uudelleen mittaaminen. Uudelleen mittaaminen tarkoittaa seuraavaa tilannetta (Salomäki 2003, s. 157):

1. Mittatulos osoittaa, että prosessissa on ongelmia tai tuote on hylättävä
2. Mittaaja haluaa varmistua tilanteesta ja päättää mitata saman asian uudelleen ottamalla toisen mittatuloksen
3. Uusi mittatulos näyttää hyväksyttävän tuloksen, joten voidaan uskoa prosessin olevan kunnossa
4. Toinen mittaustulos kumoaa ensimmäisen mittaustuloksen ja jatketaan työtä kuten ennenkin

Tässä tapauksessa oletettiin, että mittaustulos johtuu jostakin muuttujasta ja siten siinä on mittausvaihtelua. Voi kuitenkin olla, että mittari näytti juuri oikeaa ja uudelleen mitaus oli virhe. Jos esimerkiksi 10 % tuotteista ei täytä vaatimuksia, niin silloin keskimääräisesti joka 10. tuote on viallinen ja silloin tulee hylättävä tulos. Kun otetaan uudelleen mitaus, on jälleen 10 % mahdollisuus saada viallinen tuote. Näin ollen mahdollisuus saada kaksi kertaa peräkkäin viallinen tuote on $10\% / 10\%$ eli 1 %. Vielä pahempi tilanne on, jos prosessissa onkin vain 0,5 % eli 1/200 virheellisiä tuotteita. Jos tässä tapauksessa otettaisiin uusintamittaus, on toisen mittauksen viallisen tuotteen todennäköisyys sama 1/200 eli todennäköisesti mittatulos on hyvä. Mahdollisuus kahteen peräkkäiseen virheeseen on tuolloin $(1/200) * (1/200)$ eli 1/40 000. Tämä vaatii jo melkoista onnea, että tulee kaksi huonoa mittatulosta peräkkäin. Sinnikäs laadunvalvoja voi ottaa vielä kolmannenkin mittauksen, kun ei usko mittatulokseen ja näin ollen mittatulos näyttää lähes varmasti hyväksyttävää tuotetta. Molemmissa tapauksissa mittatulos osoitti ensin hylättävää mittatulosta eli prosessin virhettä, mutta uudelleen mittaamalla saatiin hyväksyttävä tulos ja näin ollen oletetaan, että prosessissa on kaikki kunnossa ja jatketaan toimintaa kuten normaalistikin. (Salomäki 2003, s. 157-158)

Mittaus- ja havainnointivirheet voidaan ajatella muodostuvan useasta komponentista. Erilaisia virhelähteitä ovat esimerkiksi keskittymisen puute, väsymys, huolimattomuus, huonot valaistusolosuhteet tai epätarkat mittalaitteet. Erilaiset virhelähteet muodostuvat toisistaan riippumattomasti. Virheen määrää kuvaava muuttuja on siis summamuuttuja, jossa virheen kokonaismäärä muodostuu useista toisistaan riippumattomista tekijöistä. Eli mittatulos on todellinen arvo + mittausvirheen arvo. Havaittu mittatulos siis käsitellään todellisen arvon ja virheen arvon summaksi. (Manninen & Ylen 2001, s. 20-21)

2.3 Six Sigma -työkalut

Six Sigman tavoitteena on pienentää prosessin vaihtelua. Six Sigmassa hyödynnetään tilastollista ajattelua ja tilastollisia menetelmiä. Tässä menetelmässä päätöksenteko pohjautuu prosessista kerätystä datasta. Sen ydinajatuksena on, että vaihtelun pienentäminen vähentää prosessissa hukkaa, jonka seurauksena yrityksen kapasiteetti kasvaa. Toisin päin ajateltuna vaihtelu aiheuttaa virheitä, virheet aiheuttaa vikoja ja viat aiheuttavat hukkaa. Six Sigmassa vaihtelun pienentäminen tapahtuu tutkimalla prosessin syyseuraus -suhteita ja sen perusteella tekemällä onnistuneita muutoksia prosessin ulostuloon vaikuttaviin tekijöihin. Six Sigmassa on käytettävissä erilaisia työkaluja, joista tässä työssä niistä käytetään kahta: DMAIC -ongelmanratkaisumenetelmä ja DOE -

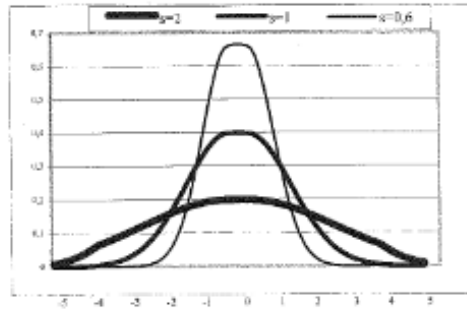
koesuunnittelu. DMAIC on järjestelmällinen tapa ratkaista jokin ongelma ja DOE - koesuunnittelu pyrkii löytämään tärkeimmät vaihtelun lähteet. (Six Sigma 2019)

2.3.1 Six sigma ja normaalijakauma

Sigma (σ) on kreikkalainen kirjain ja sitä käytetään tilastotieteessä keskihajonnan symbolina. Keskihajonta yksinään ei esitä konkreettista näkökulmaa prosessin virheiden määrästä, vaan keskihajonnasta on rinnastettu Sigma-taso. Siinä vertaillaan virheiden suhteellista määrää miljoonasta virheen mahdollisuudesta. Six Sigmassa on olemassa eri tasoja ja taso kertoo, kuinka paljon mitatun kohteen tulos vaihtelee ja kuinka hyvin mitattu tulos pysyy kontrollialueella. Jokainen prosessi voi aiheuttaa vikoja tai virheitä asiakkaan näkökulmasta. Virhe voi liittyä esimerkiksi tuotteen palveluun tai ajankohtaisuuteen. Kun virhe on määritelty, sen jälkeen voidaan käyttää Six Sigma tekniikoita hyväksi virheettömyyden vähentämiseksi. (Keller 2011)

Monet psyykkiset ja fyysiset ominaisuudet noudattavat normaalijakaumaa. Ominaisuudet, joiden voidaan ajatella olevan monien tekijöiden määräämiä, ovat taipuvaisia jakautumaan normaalisti. Esimerkiksi ihmisen pituus on fyysinen suorituskyky ovat ominaisuuksia, jotka ovat moninaisten geneettisten ja ympäristötekijöiden määräämiä, jolloin ne jakautuvat normaalijakautuman muotoisesti. Toisaalta kaikki tämän tyyppiset muutujat eivät noudata normaalijakaumaa. Esimerkiksi ihmisen paino ei noudata normaalijakaumaa, vaikka se on monien tekijöiden määräämä ominaisuus. Tämä johtuu siitä, että ihmisen painoon vaikuttaa yksi tekijä, jolla on muihin nähden varsin voimakas vaikutus ja tämä tekijä on ravinto. (Manninen & Ylen 2001, s. 21)

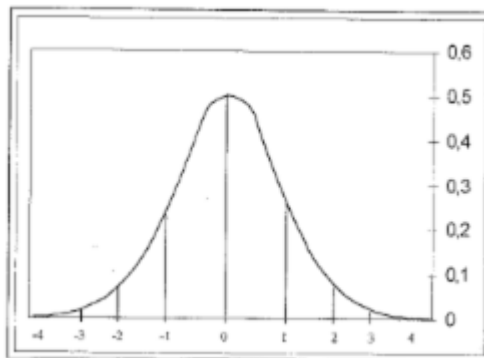
Normaalijakauma on johdettu jo 1700-luvulla. Käyrää on kutsuttu myös nimellä Gaussin käyrä ja nimi tulee sen keksijän nimestä, joka on Carl Friedrich Gauss. Jakauman ydin on siinä, että todella pienten ja todella suuren arvojen määrä ja todennäköisyys on pieni, mutta keskimääräisten havaintojen määrä on iso. Käyrä on aina symmetrinen keskiarvonsa suhteen ja otoskoon hajonta vaikuttaa käyrän muotoon (Kuva 6). Käyrän symmetrisyyden ansiosta normaalijakaumassa on erinomaisia ominaisuuksia. Yksi parhaista ominaisuuksista on se, että harvinaisen tapahtuman todennäköisyys on helppo laskea ns. häntätodennäköisyytenä. Normaalijakauman kokonaistodennäköisyys on aina 1, eli käyrän ja x-akselin välinen pinta-ala on aina 1. Kun käyrällä siirrytään vasemmalta oikealle, normaalijakauman keskiarvon kohdalla on ohitettu tasan puolet todennäköisyysmassasta. Näin ollen keskiarvo on siis aina kuvion keskellä. (Metsämuuronen 2002, s. 22-23)



Kuva 6. Kolme erinäköistä normaalijakaumaa erilaisella hajonnalla (Metsämuuronen 2002, s. 23)

Toinen normaalijakauman erinomaisista piirteistä on se, että jos muuttujien arvot normeerataan eli standardisoidaan, saadaan käyrän muodoksi normaalijakauma ja näin ollen sen arvot ovat vertailukelpoisia minkä vaan muun normeeratun muuttujan kanssa. Tällöin normaalijakaumasta tulee standardisoitu normaalijakauma (Kuva 7), jonka keskiarvo μ on 0 ja hajonta σ on 1. Standardisointi tapahtuu seuraavalla kaavalla:

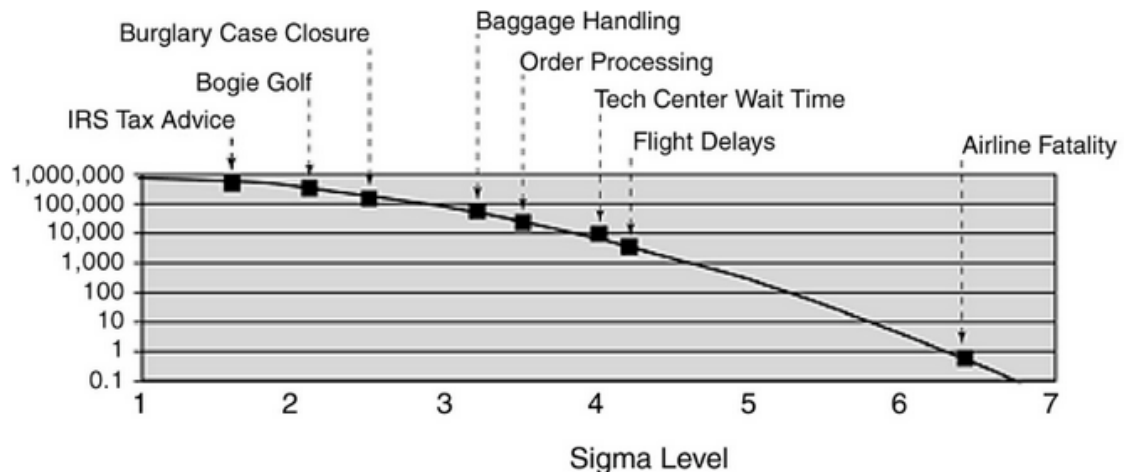
$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$, jossa X on satunnaismuuttujan arvo, μ on otoskeskiarvo ja σ on hajonta. (Metsämuuronen 2002, s. 24)



Kuva 7. Standardisoitu normaalijakauma (Metsämuuronen 2002, s. 24)

Kuuden sigman laatu taso on niin kova taso, ettei siihen ole maailmassa päässyt käytännössä kuin lentokoneyhtiöt. Kuusi sigmaa tarkoittaa, että tuotteessa saa olla enintään kaksi virhettä miljardista kappaleesta. Six Sigma prosesseissa on yleinen hyväksymisraja 3,4 virhettä miljoonaa tuotetta kohti. Tätä mittaria kutsutaan nimellä DPMO (defects per million opportunities). Mistä tämä ero 3,4:n ja 6:n sigman välillä sitten tulee? Kun Motorola kehitti Six Sigman laatu järjestelmää, silloin insinööri Bill Smith, jota pidetään Six Sigman isänä huomasi, että sisäiset arviot eivät ennustaneet ulkoisia vikoja. Sen sijaan ulkoisten virheiden tasot olivat jatkuvasti korkeampia. Smith perusteli tuolloin, että pitkän aikavälin muutos $1,5\sigma$ prosessin keskiarvossa selittäisi tuon eron. Tuon muutoksen aiheuttaa esimerkiksi luonnollinen kuluminen tai valmistusmenetelmä. Tämän takia Motorola määritteli Six Sigma prosessin sellaiseksi, että pitkällä aikavälillä virhetaajuus 3,4 DPMO vastaa $4,5\sigma$:n keskihajontaa. Edellä mainittu 3,4 DPMO $4,5\sigma$:n tasolla tulee siitä, että kyseiseen Sigma-tasoon 4,5 kuuluu 99,9996602 % koko populaatiosta, eli sen DPMO on $3,398 \approx 3,4$. Tästä määritelmästä on tullut standardimääritelmä niin tuotekuinkin palvelualoilla. Mikä tahansa prosessivirhesuhde voidaan muuttaa arvoon σ . Kuvassa 8 on esitelty erilaisten yritysten ja toimialojen sigmatasoa. On huomioitava, että y-

akseli - joka kuvaa DPMO:ta - on logaritmisesti skaalattu. Kun Sigma-taso kasvaa, silloin virheiden määrä per miljoona vähenee eksponentiaalisesti. Esimerkiksi siirtyessään 3σ -alueelta 4σ -alueelle DPMO putoaa 67 000 virheestä 6500 virheeseen ja 5σ -alueella virheitä on enää 200 kappaletta miljoonaa mahdollisuutta kohti. Useimmat yritykset toimivat 3σ - 4σ -alueella niiden julkaisemien virhemäärien perusteella. Jo tämän sigma-tason yrityksissä on käytössä kokonaisvaltaiset TQM -ohjelmat. Yritykset, jotka operoivat 2σ - 3σ -alueella eivät voi olla kannattavia kovinkaan pitkään, joten tällä alueella ovat usein esimerkiksi erilaiset monopolit tai valtion virastot. (Keller 2011)



Kuva 8. Erilaisten toimintojen sigma-tasoa (Keller 2011)

Normaalijakaumaa voidaan pitää yleisimpänä jatkuvista jakaumista. Näin ollen normaalijakauma on hyvin keskeisessä asemassa tilastotieteessä, sillä monet empiiriset muuttujat ja testisuureet noudattavat normaalijakaumaa. Otoskeskiarvo X voidaan käsittää satunnaismuuttujaksi, jonka arvot vaihtelevat μ :n ympärillä kun otantaprosessia toistetaan. Kun $X = \mu$, silloin normaalijakauman tiheysfunktio saavuttaa maksimiarvonsa eli lakipisteensä. Jos muuttuja X noudattaa normaalijakaumaa parametrein μ ja σ^2 , silloin käytetään merkintätapaa $X \sim N(\mu, \sigma^2)$. Toisena parametrina on nimenomaan σ^2 eikä keskiahajonta σ , koska usean muuttujan normaalijakauman tapauksessa toinen parametri on kovarianssimatriisi, jonka yksiulotteinen vastine taas on varianssi. Matemaattinen perustelu normaalijakaumalle tulee keskeisestä raja-arvolauseesta (central limit theorem). Olkoot X_i :t ($i=1, \dots, k$) toisistaan riippumattomia muuttujia, jolloin näiden muuttujien summa on:

$$X_{\text{sum}} = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_k$$

Tässä tapauksessa jakauma lähestyy normaalijakaumaa, kun yhteenlaskettavien lukumäärä k kasvaa rajatta. Jos yhteenlaskettavia on vähintään 30, silloin voidaan sanoa, että X_{sum} :n jakauma riittävän lähellä normaalijakaumaa. Jos taas X_i :t ovat tasajakaumaa noudattavia muuttujia, riittää normaalijakauman saavuttamiseksi paljon pienempi yhteenlaskettavien lukumäärä, esimerkiksi 10. Yleisesti ottaen siis jos X_i -muuttujien jakaumat ovat tuntemattomia, niin $X_{\text{sum}} \sim N(\mu, \sigma^2)$, kun $k > 30$. (Manninen & Ylen 2001, s. 20-22)

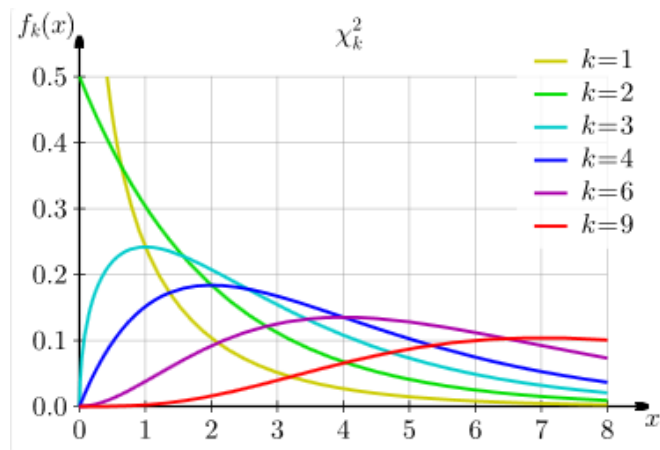
Ongelmana useissa reaali maailman tutkimuksissa on yleensä se, että niissä on mittauslukumääriä liian vähän. Jos mittauslukumääriä ei ole tarpeeksi (esimerkiksi ylempänä mainittua 30:tä), niin silloin tilastollisten analyysimenetelmien perusoletukset eivät ole

voimassa. Tämä johtuu siitä, että silloin on käsissä sen verran vähän mittaustuloksia ja sen perusteella ei voida tehdä johtopäätöstä jakauman tyypistä tai sen muodosta. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty niin sanottuja ei-parametrisiä menetelmiä, jotka toimivat hyvin silloin kun aineisto on pieni tai aineisto on järjestyksasteikkomuodossa. Yksi näistä menetelmistä on nimeltään Kruskal-Wallis testi, joka on käyttökelpoinen etenkin silloin, kun aineisto ei ole normaalijakauman näköinen ja aineistoa on vähän. Siinä testataan useamman kuin kahden riippumattoman otoksen välistä merkitsevyyttä. Se on vähän kuin varianssitesti, mutta sen kohdalla ei tarvitse tehdä normaalijakauma-oletusta ja tämä testi sopii erinomaisesti mielipideasteikolle. (Taanila 2013)

Kruskal-Wallis alussa määritellään hypoteesi H_0 : k riippumattomasta otoksesta ovat peräisin identtisistä populaatioista. Menetelmässä yhdistetään kaikki otokset, jonka jälkeen ne järjestetään kasvavaan järjestykseen. Menetelmä noudattaa χ^2 -jakaumaa (Kuva 9). χ^2 -jakaumassa on eri vapausasteita. Mitä enemmän on vapausasteita, sitä pienempi on sen tiheysfunktio. Kun otoksen i järjestykselukujen summa satunnaismuuttuja R_i , silloin testin tilastollinen tunnusluku on:

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

Ensiksi lasketaan testisuure yllä olevalla kaavalla tai tietokoneohjelmalla. Sen jälkeen tutkitaan, onko testisuure kriittisellä alueella ja jos se on siellä, niin silloin H_0 hylätään. Kriittisen alue on merkitsevyytaso, joka on usein 0,05. Tuloksen tulkittaminen ja siitä johtopäätösten tekeminen on käytännössä vain tulkintaa ja usein tulkinta jätetäänkin lukijalle ilmoittaen vain laskun tulos. (Walpole *et al.* 2012, s. 668-669).



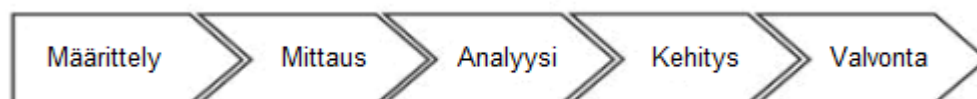
Kuva 9. χ^2 -jakauman tiheysfunktio erilaisilla satunnaisotosten lukumäärillä (Taanila 2019)

2.3.2 DMAIC -menetelmä

Six Sigman työkaluja ja operatiivista tehokkuutta sovelletaan useimmiten DMAIC -mallin avulla (Kuva 10). Six Sigma on systemaattista prosessin kehittämistä ja tämän tyyppinen toiminta vaatii aina jonkin toimintamallin, koska jos kehitystä tehdään ilman suunnitelmaa, niin silloin mennään usein harhaan johtuen kehityskohteen monimutkaisuudesta. DMAIC -malli perustuu ajatukseen, että jos et pysty määrittelemään prosessia, silloin sitä ei voi mitata. Prosessia ei pystytä myöskään kehittämään, jos sitä ei voi mitata. DMAIC -malli näyttää lineaariselta ja tarkasti määritetyltä toimintamallilta, mutta on

hyvä muistaa, että parhaat tulokset DMAIC -malli tuo saadaan silloin, kun prosessi on joustava (Sokovic *et al.* 2010). DMAIC -malli koostuu viidestä eri vaiheesta (Keller 2011):

1. Määrittely (Define)
2. Mittaus (Measure)
3. Analyysi (Analyze)
4. Kehitys (Improve)
5. Valvonta (Control)



Kuva 10. DMAIC -mallin vaiheet (Sokovic *et al.* 2010)

Projektimaista kehittämistä vaativia kehittämiskohteita voidaan tunnistaa kahta eri reittiä: osana organisaation suunnitteluprosessia tai päivittäisen tekemisen kautta. Organisaation suunnitteluprosessi tunnistaa parannusta vaativat kohteet etuajassa tai yritys haluaa nostaa jonkin prosessin suorituskykyä. Toinen reitti on, että kehittämiskohde havaitaan päivittäisessä johtamisessa, joka tulee esille esimerkiksi aika-, laatu- tai kustannusongelmina ja asiaan liittyvät juurisyyt pitää poistaa, jotta ongelmat häviävät. (Lintula 2015)

Määrittely

DMAIC -toimintamalli lähtee aina liikkeelle määrittelyvaiheessa. Tätä vaihetta on edeltänyt tilanne, jossa kehityskohde on jo tunnistettu. Määrittelyvaiheella on kolme päätaivoitetta: projektin määrittely, prosessin määrittely ja tiimin muodostaminen. (Keller 2011)

Projektin avainkohdat on dokumentoitu projektin perustamiskirjaan, johon määritellään projektin kannalta olennaisia asioita: Projektin tarkoitus eli havaittu ongelma, tavoitteet, laajuus, jäsenten roolit ja vastualueet. Perustuskirja tarjoaa keinon hallita ja valvoa projektia. Perustuskirjaa vertaillaan lopuksi lopputuloksiin, kun määritellään onko projektissa onnistuttu. Määrittelyvaihe alkaa ongelman määrittelyllä ja sille etsitään perusteita esimerkiksi liiketoiminnallisesta näkökulmasta. Määrittelyvaiheessa määritellään myös projektin aikataulu ja mahdolliset virstanpylväät. Ensimmäisessä vaiheessa määritellään myös kaikki asianosaiset projektiin liittyen. Määrittelyvaiheen jälkeen määritellään itse prosessi korkealla tasolla, joka tarjoaa vain laajan katsauksen prosessista ja siitä puuttuu vielä pienimmät yksityiskohdat. Tässä vaiheessa keskitytään prosessin sisä- ja ulostuloihin, tuloksiin sekä asianosaisiin. Tämän kartoituksen tarkoituksena on auttaa itse projektin määrittelyä ja projektiryhmän määrittelyä. Prosessin määrittelyssä hyviä työkaluja ovat erilaiset kaaviot, prosessikartat ja SIPOC -analyysi, joka on työkalu prosessin panosten, tuotosten ja asianosaisten tunnistamiseen. (Keller 2011)

Tiimin muodostamista ei tule koskaan väheksyä, sillä ryhmän osaaminen ja toimivuus ovat avaintekijöitä projektin onnistumisen kannalta. Projektiryhmässä tulisi olla osaamista jokaisesta organisaatioyksiköstä, joka on osa kehitettävää tuotantoprosessia. Tiimissä tulisi olla myös mahdollisimman paljon eri roolin edustajia, jotta tiimi yhdessä pääsee haluttuun lopputulokseen. (Keller 2011)

Mittaus

Tämän vaiheen alussa projekti on määritelty ja sen tuotantoprosessi on kuvattu korkealla tasolla. Tätä vaihetta ei kannata aliarvioida, sillä mitä paremmin tässä vaiheessa onnistutaan, sitä parempi on todennäköisesti projektin lopputulos. Jos tässä vaiheessa jää joku tärkeä asia huomioimatta, se voi kostautua myöhemmin pahasti. Tässä vaiheessa tuotantoprosessi määritellään hyvin yksityiskohtaisella tasolla, jotta ymmärretään kaikki siihen vaikuttavat toiminnot. Prosessin määrittelyssä hyviä työkaluja ovat ylempänä mainitut prosessikartat, erilaiset kaaviot ja histogrammit. Yksityiskohtaisen määrittelyn lisäksi tässä vaiheessa suoritetaan mittaus, joten tässä vaiheessa määritellään myös mittausmenetelmät ja mittaustekniikat. Myös tuloksien yksiköitä on hyvä miettiä, jotta tuloksia voisi vertailla keskenään. Mittausjärjestelmän analyysi on tulosten kannalta olennaista, sillä huonoilla tuloksilla tehdään vain huonoja johtopäätöksiä. Mittareiden tunnistamisen jälkeen suoritetaan mittaus, jossa dataa kerätään olemassa olevasta tuotantoprosessista. Datan keräys koostuu otoksista ja mittaustuloksia pyritään saamaan mahdollisimman paljon, jotta tuloksiin saadaan luotettavuutta. Mittatulokset kannattaa koostaa jatkoa varten esimerkiksi taulukkoon, josta niitä on helpompi analysoida. (Keller 2011)

Analyysi

Tämän vaiheen tavoitteena on löytää mitatusta datasta poikkeamat ja niihin vaikuttavat juurisyyt, joihin kehittämistoimenpiteet kannattaa kohdistaa. Tässä vaiheessa tulee välttää sohimista jokaiseen suuntaan, sillä rajalliset kehitysresurssit tulee kohdistaa täsmällisesti oikeisiin toimenpiteisiin, joilla on suuri vaikutus ongelmakohtaan ja joita tekemällä saadaan pysyviä parannuksia. Kun analysointi tehdään mitatun datan perusteella, silloin tosiasiat ovat helpommin perusteltavissa, joka vähentäne muutosvastarintaa huomattavasti. (Lintula 2016)

Analyysivaiheessa tulee ottaa huomioon, että mittatulokset voivat kärsiä ajoittaisesta hajonnasta, joka ei välttämättä johdu itse mitattavasta prosessista. Tätä voidaan välttää esimerkiksi siten, että jaetaan mittaukset eri päiville tai eri tuotteille. Projektiryhmän tulee analyysivaiheessa havaita ja tunnistaa prosessin heikoimmat kohdat, joita voi miettiä esimerkiksi syy-seuraus -kaaviolla. Kun heikoimmat kohdat on tunnistettu, voidaan aloittaa kehitystoimenpiteiden vertailu keskenään ja sen jälkeen päättää, mitkä ehdotukset ovat parhaimpia. (Keller 2011)

Kehitys

Moni innokas kehittäjä hyppää usein suoraan tähän vaiheeseen, koska ongelmat ja niiden syyt ovat muka tiedossa. Mutta kun asiaan syvenny tarkemmin, silloin tulee havaittua ehkä jopa jotain yllättävää prosessista ja edellä mainittujen vaiheiden läpikäyminen tarkoittaa sitä, että kun kehitysvaiheessa projektiryhmällä on edessä analyysivaiheessa tunnistetut ratkaisuehdotukset, niin asiaa on tutkittu niin paljon, että tunnistetut ratkaisuvaihtoehdot ovat oikeita. Ratkaisuvaihtoehdoista on tavoitteena muodostaa konkreettisia ja pysyviä prosessimuutoksia, jotka pyrkivät parempaan tuotantotoimintaan. Jos näitä valintoja tehdään hätäillen, silloin voidaan olla väärällä polulla. On hyvä muistaa, että kuvitellut parannustoimenpiteet voivat jopa huonontaa prosessia huonommaksi, joten kaikkien vaiheiden läpikäyminen on suotavaa. On erilaisia keinoja saada muutoksia

aikaan ja esimerkiksi koeajot ja sitä kautta prosessisäästöjen hakeminen on yksi keino, mutta se on usein kallis vaihtoehto. Taloudellisimpia vaihtoehtoja on esimerkiksi simulointi, jossa tietokoneen avulla simuloidaan prosessia vaikkapa Microsoft Excelin avulla. Simuloinnissa muutetaan avainmuuttujien arvoja ja katsotaan miten ne vaikuttavat kokonaisprosessiin. Tämä vie myös aikaa paljon vähemmän kuin koeajot, jos esimerkiksi Excelille on jo rakennettu simulointityökaluja. Simuloinnin tärkeimpiä tehtäviä on muutoksen vaikutuksen tutkiminen ilman riskiä, kustannuksia ja aikaa sekä se opettaa yrityksen henkilöstölle, että miten prosessi käyttäytyy. (Keller 2011)

Valvonta

Valvontavaihe alkaa silloin, kun muutos on otettu käyttöön ja se on standardisoitu osana päivittäistä toimintaa. Muutos vaatii aina valvontaa, koska uuden prosessin myötä voi tulla esille jotain sellaista, joita ei ole tarkasta määrittelystä huolimatta huomattu projektin aikana. Jos prosessia ei valvo muutoksen jälkeen, tällaiset asiat voivat pilata koko projektin. Niinpä kehityskohteen toimintaa on valvottava jatkuvasti. Valvonnalle kannattaa asettaa jotain tunnuslukuja, jota vasten on helpompi analysoida, onko muutos onnistunut. Valvonta-vaiheelle kannattaa varata riittävästi aikaa, koska muutos voi viedä aikaa yllättävän paljon. On hyvä muistaa, että yleensä muutos vaatii prosessihenkilöiltä paljon, koska he voivat joutua muuttamaan omia toimintatapojaan. (Keller 2011)

Valvontavaiheeseen kuuluu myös projektin dokumentointi ja arviointi. Projektin tulokset tulee dokumentoida projektiraporttiin, joka sisältää seuraavia asioita (Keller 2011):

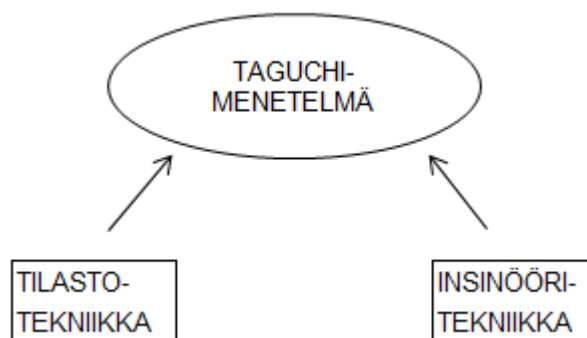
- Projektin perustuskirja
- Yhteenveto jokaisesta vaiheesta, jossa on tavoitteet ja tulokset
- Kerätty raaka-data ja datasta tehdyt analyysit aikajärjestyksessä
- Projektin vaatimat menoerät, kuten väliaikaisesti menetetty kapasiteetti tai materiaalikulut
- Projektin tuloksena syntyneet säästöt siihen asti sekä arvio vaikutuksista lähivuosille
- Prosessin nykytila ja valvontasuunnitelma (Control plan)
- Suositukset tuleville kehitysprojekteille, jotka liittyvät kyseiseen prosessiin
- Suositukset tuleville johtajille, jotka perustuvat kyseisen projektin aikana opittuihin asioihin

2.3.3 DOE -koesuunnittelu

DOE -koesuunnittelun lyhenne tulee englanninkielisestä sanasta Design of Experiments, joka tarkoittaa suomeksi koesuunnittelua. Se on menetelmä, jonka avulla voi tehokkaasti tutkia syy-seuraussuhdetta prosessien eri muuttujien (x) ja ulostulon (y) välillä. Koesuunnittelu pyrkii löytämään prosessista tärkeimmät vaihtelun lähteet ja se pyrkii selvittämään tekijöiden välisiä keskinäisvaikutuksia. Usein prosessintutkimuksessa tarkastellaan, miten prosessin muuttujat vaikuttavat ulostuloon. Koesuunnittelussa sen sijaan tietoisesti muutetaan prosessimuuttujia ja asetetaan niille arvoja, jonka jälkeen tutkitaan miten ne vaikuttivat ulostuloon. Kokeet tarjoavat yhdellä testiajolla huomattavan määrän informaatiota tutkittavasta asiasta ja se mahdollistaa myös syy-seuraussuhteen määrittämisen. Koesuunnittelun kokeet perustuvat nimensä mukaisesti suunnitelmiin, eli

etukäteen suunnitellaan miten prosessia ja systeemiä muutetaan koeajojen aikana. (T. Karjalainen 2007)

Koesuunnittelu on lähtöisin jo 1920-luvulta, kun englantilainen tilastotieteilijä Ronald A. Fischer tutki viljojen satoisuutta samalla pyrkien parantamaan niiden tehokkuutta. Ensimmäisiä käyttöalueita maatalouden lisäksi oli lääketiede. Nykyään koesuunnittelua käytetään paljon erityisesti teollisuudessa. Suomessa koesuunnittelun käyttö on lähtenyt Taguchi -menetelmästä, jota sovelletaan erilaisiin prosesseihin (T. Karjalainen 2007). Taguchi on kuuluisa japanilainen laatuinsinööri, joka kirjoitti ensimmäisen koesuunnittelukirjan vuonna 1957. Vuonna 1962 hän kirjoitti vielä toisen version kirjastaan ja vuonna 1976 Taguchi julkaisi nykyisen version kirjastaan koesuunnittelu. Tämän jälkeen koesuunnittelu on vuosien saatossa pysynyt rakenteeltaan samanlaisena. Taguchi -menetelmä (Kuva 11) yhdistää tilastotekniikan ja insinööritekniikan. (E. Karjalainen 1990, s. 11-12)



Kuva 11. Taguchi-menetelmän lähtökohdat (E. Karjalainen 1990, s. 12)

Koesuunnittelu voidaan jakaa neljään eri tyyppiseen kokeeseen. Ne ovat: yksimuuttujakokeet, haravointikokeet, karakterisointikokeet ja optimointikokeet. Monessa tilanteessa jo pelkkä haravointikoe on riittävä, sillä ne ovat paljon tehokkaampia kokeita kuin perinteinen yksi tekijä kerrallaan muuttamistekniikat. Tehokkuudella tarkoitetaan sitä, että voi suorittaa suuren määrän kokeita pienellä määrällä erilaisia testiajoja. Haravointikokeet ovat nimensä mukaisesti isojen linjojen hakemista. Optimointikokeet tulevat kysymykseen, kun halutaan hakea prosessista optimia toimintakohtaa ja tarvitaan monimutkaisia optimointikokeita. Koesuunnittelulla pyritään hakemaan vastauksia seuraaviin kysymyksiin (T. Karjalainen 2007):

- Mitkä ovat prosessin avaintekijät, jotka vaikuttavat ulostuloon?
- Mitkä ovat ne prosessin asetukset, joilla saadaan optimaalinen laatu, kustannus ja nopeus aikaiseksi?
- Miten saan dataa, jonka avulla voi selvittää kyseiset asetukset?
- Mitkä ovat prosessin päätekijät ja keskinäisvaikutukset?
- Mitkä ovat ne asetukset, joilla prosessin ulostulo vaihtelee mahdollisimman vähän?

Ennen koeajoja kokeet on suunniteltava huolellisesti. Parametrisuunnittelu on menetelmän tärkein ja oleellisin osa, joten se tulee tehdä huolella. Parametrisuunnittelun tavoitteena on määrittää ne tekijät, joita kokeissa käytetään (esimerkiksi mitat, materiaalit, oletusarvot) ja näiden tekijöiden ominaisarvot. Näitä kutsutaan suunnittelutekijöiksi. Tavoitteena on valita ominaisarvot siten, että saavutetaan prosessin maksimaalinen suo-

ritustaso ja samalla minimoidaan häiriötekijät ja kustannukset. Parametrisuunnittelun lähtökohta on määrittää suunnittelutekijät ja häiriötekijät ja käsitellä niitä erillisinä. (E. Karjalainen 1990, s. 45)

Parametrit voidaan luokitella neljään eri ryhmään: signaalitekijät, ohjaustekijät, skaalaus- eli tasotekijät ja häiriö- eli kohinatekijät. Signaalitekijät ovat tekijöitä, jotka operattori voi asettaa halutessaan prosessista tietyn ulostulon. Tällainen on esimerkiksi ohjauskulma auton ohjausmekanismissa. Ohjaustekijät ovat tuotteen parametrin arvoja, jotka kokeen suunnittelija on antanut. Jokainen ohjaustekijä voi saada useampia arvoja ja suunnittelijan vastuulla on parhaan tason määrittäminen. Skaalaus eli tasotekijät ovat ohjaustekijöiden erikoistapauksia. Niillä voidaan säätää haluttu funktio signaalitekijät ja ulostulon välille, esimerkiksi autossa ohjauksen välityssuhde on tällainen tekijä. Häiriö- eli kohinatekijä poikkeaa muista tekijöistä siten, että niitä ei voida ohjata. Ne vaikuttavat ulostuloon ja niiden taso vaihtelee riippuen tuotteesta tai olosuhteista. Häiriöt voidaan vielä jakaa kolmeen luokkaan: ulkoiset häiriöt, tuotteen häiriöt ja sisäiset häiriöt. Ulkoisilla häiriöillä tarkoitetaan esimerkiksi lämpötilaa ja pölyä. Tuotteen häiriöt tarkoittavat sitä, että kahta samanlaista tuotetta ei voida valmistaa eli jokainen tuote on uniikki. Sisäisillä häiriöillä tarkoitetaan vanhenemista, eli esimerkiksi kun tuote myydään sen ominaisuudet ovat tavoitearvossaan, mutta ajan myötä ne heikkenee. (E. Karjalainen 1990, s. 48)

Koesuunnittelun ydin on ajan säästäminen, joka taas vähentää esimerkiksi kustannuksia. Perinteisesti yrityksissä asioita tutkitaan klassisella koemenetelmällä, jossa muutetaan vain yhtä muuttujaa kerrallaan. Otetaan esimerkiksi kolme konetta A, B ja C, joissa on kaksiasentoisia kytkimiä eli asennot 1 ja 2. Kun halutaan tutkia kaikki mahdollisuudet, silloin kokeiden kokonaismääräksi tulee kahdeksan koetta + kaikki kombinaatiot. Jos muuttujia on esimerkiksi 10, silloin kokeiden lukumääräksi tulee 20 kappaletta. Lisäksi tällä tyylillä on yksi heikkous: koe ei takaa tulosten toistettavuutta. Tämän takia esimerkiksi prototyyppi usein toimii, mutta tuotantolaitte ei. Tämän ongelman ratkaisemiseksi Taguchi keksi ortogonaalimatriisit. (E. Karjalainen 1990, s. 52-54)

Ennen ortogonaalimatriisit piti hakea kirjoista, joka oli työlästä. Sen takia koesuunnittelua ei käytetty teollisuudessa hirveästi ennen tietokoneita, koska se oli hidasta ja työlästä. Nykyään matriisien luominen ja analysointi on paljon helpompaa, koska siihen on kehitetty tietokoneohjelmia. Yksi tällaisista on Minitab, joka tarjoaa suuren määrän eri koematriiseita ja mahdollistaa samanaikaisesti jopa 47 tekijän tutkimisen yhtäaikaaisesti. Tämän lisäksi Minitabilla voi mallintaa ja hakea optimaaliset arvot tekijöille, jotta pääsee haluttuun lopputulokseen. (T. Karjalainen 2007)

Ortogonaalimatriisit on keksitty jo 1880 -luvulla ranskalaisen Jacques Hadamardin toimesta. Koesuunnittelussa ortogonaalisuus merkitsee tasapainoista ja eriteltävissä olevaa koetta. Kokeesta kerätään tietoa, joiden ei haluta sekoittuvan keskenään. Ortogonaalimatriisien etuina on muun muassa kyky käsitellä suurta määrää muuttujia pienellä määrällä kokeita. Esimerkiksi jos pitää testata 13:a tekijän vaikutusta kolmessa tasossa, silloin vaaditaan kaikkien kombinaatioiden testiin 13^3 koetta eli 1 594 322 koetta. Ortogonaalimatriisia käytettäessä selvittää 27:llä kokeella. Kaikkein tärkein syy näiden käytölle on se, että kokeet ovat toistettavia ja siten ne ovat myös luotettavia. (E. Karjalainen 1990, s. 54-55)

KOENUMERO	TEKIJÄ							KOETULOS
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8

Kuva 12. Koesuunnitelma seitsemälle tekijälle eli L_8 ortogonaalimatriisi (E. Karjalainen 1990, s. 57)

Kuvassa 12 on L_8 ortogonaalimatriisi. Kokeessa tehdään kahdeksan erilaista koetta, joista tulee kaikista kahdeksan erilaista tulosta. Tekijöitä on seitsemän kappaletta ja jokaisella tekijällä on annettu kaksi eri parametria. Esimerkiksi tekijä A:n parametriksi on tässä määritelty lisäkalkin määrä ja sen arvoiksi on annettu $A1=5\%$ (uusi) ja $A2=1\%$ (vanha). Tällä tavalla kaikille tekijöille on annettu parametrit. Tekijöiden kaikkien vaihtoehtojen mahdollisuudet pystytään koesuunnittelussa tutkimaan kahdeksalla eri kokeella. Jos muutettaisiin vain yhtä muuttujaa kerralla, silloin kokeiden lukumääräksi tulisi 2^7 eli 127 koetta. Kun kokeet on tehty ortogonaalimatriisin mukaisessa järjestyksessä, silloin voidaan laskea koetulosten avulla yhden tekijän vaikutus esimerkiksi siten, että kuinka paljon virheellisiä tuotteita tämä kyseinen tekijä tuottaa. Tekijän A1 vaikutus saadaan tästä ortogonaalimatriisista laskukaavalla $1/4 \cdot (Y1+Y2+Y3+Y4)$. Näin voidaan selvittää jokaisen tekijän vaikutus virheellisten tuotteiden määrään. Tätä menetelmää kutsutaan vastataulukoksi. Muita tulosten analysointimenetelmiä ovat esimerkiksi havainnointimenetelmä, sarakemenetelmä, ANOVA, keskiarvokäyrät tai rankingmenetelmät. Viimeistään tulosten analysoinnissa on hyvä käyttää Minitabia. (E. Karjalainen 1990, s. 56-58, s. 72)

2.3.4 Menetelmien vertailu

DMAIC -menetelmä ja DOE -koesuunnittelu ovat kaksi erilaista tapaa lähestyä ratkaisemaan ongelmaa. DOE -koesuunnittelu voidaan ajatella olevan enemmän erilaisten koeajojen järjestelyä ja itse suorittamista, kun taas DMAIC -menetelmä on kokonaisvaltainen kehitysmenetelmä, jossa keskitytään laajemmalla näkökulmalla itse ongelmaan. Voidaan ajatella, että DOE -koesuunnittelu on yksi työkalu DMAIC -menetelmään. DOE -koesuunnittelu on käytännön suorittamista DMAIC -menetelmän mittausvaiheeseen. Ilman DMAIC -menetelmää voi tutkimus lähteä väärille urille, kun aluksi ei määritetä tarkasti esimerkiksi prosessia. DOE -koesuunnittelu ja DMAIC -menetelmä yhdistettynä tuovat mahdollisimman laajan näkemyksen prosessiin ja sitä kautta saadaan irti paras mahdollinen lopputulos.

DMAIC -menetelmä ja DOE -koemenetelmä täydentävät toisiaan, koska DOE -koesuunnittelussa keskitytään enemmän suorittamisvaiheeseen ja DMAIC -menetelmässä nähdään kaikki vaiheet tasa-arvoisina. DOE -koesuunnittelua voi käyttää mittausvaiheessa optimaalisten arvojen löytämiseen tai varmistusajoon, jotta tiedetään asetettujen optimiarvojen toimivan myös enemmän kuin yhdessä koeajossa. Joka tapauksessa DMAIC -menetelmän mittausvaiheessa täytyisi käyttää jotakin työkaluja, koska

ilman suunnitelmaa on mahdoton kehittää toimintaa johdonmukaisesti. Usein DOE - koesuunnittelu onkin asianmukainen työkalu mittausvaiheeseen. Voidaan sanoa, että tutkimusta ei kannata tehdä vain yhdellä menetelmällä vaan yhdistää erilaisia työkaluja ja löytää niistä vahvuudet, jotta prosessinkehityksestä saadaan mahdollisimman luotettava ja haluttu lopputulos.

3. AINEISTON KUVAUS JA TYÖN TUTKIMUS-ASETELMA

Kolmannessa luvussa käydään läpi lasin taivutusprosessia, tutkimusasetelmaa ja prosessin nykytilaa, jonka tarkoitus on antaa syvällisempää tietoa niistä asioista, joita tässä työssä käsitellään. Salassapitovelvollisuuden takia työssä ei esitetä mitään tarkempia tietoja esimerkiksi lasimuoteista tai valokuvia kammiouuneista. Tämän jälkeen luvussa 3.4 määritellään koeajot, joiden perusteella tulee seuraavaan lukuun tutkimuksen tulokset. Lopuksi tässä luvussa kerrotaan alkumittausten tuloksista. Kolmanteen lukuun sisältyy myös DMAIC -menetelmän kaksi ensimmäistä vaihetta, jotka ovat määrittely- ja mittaussvaihe.

3.1 Kohdeyrityksen esittely ja lasin taivutusprosessin kuvaus

Kohdeyritys on noin 270 henkilön tehdas Suomessa. Yritys valmistaa vain laminoituja turvalaseja, joiden käyttökohteita ovat linja-autot, maatalouskoneet, klassikkoautot ja junat. Yrityksellä on historiaa 70-vuotta ja se on osa maailmanlaajuisia lasialan konsernia. Tehtaan tuotteet viedään pääasiassa Eurooppaan ja sen asiakaskunta onkin Suomessa marginaalinen. Organisaation tuotanto toimii pääasiassa asiakasohjautuvana prosessina, mutta joitakin tuotteita tehdään myös varastoon. Ajoneuvoteollisuudessa kysyntä vaihtelee vuodessa paljon, joten kysynnän hallinnan takia joitakin tuotteita tehdään valmiiksi varastoon.

Yrityksellä on muutama tuhat erilaista tuotevariaatiota, sillä lasista saa tehtyä paljon erilaisia versioita vaihtelemalla kalvojen määrää, muuttamalla silkkipainoa tai liimaamalla siihen erilaisia kiinnikkeitä ja pidikkeitä. Työ tehdään taivuttamossa, jonka prosessin kannalta tuotteen versiolla ei ole niin väliä. Tuotteen "perusrunko" on hyvin pitkälti sama ja eroavaisuudet tuovat edellä mainitut asiat. Mutta silti taivuttamossa on satoja erilaisia tuotteita, joille kaikille on omat muotit ja omat taivutuskortit. Tuotannon voidaan sanoa olevan ketterää tuotantoa, sillä valmistuskoot yhdellä erällä vaihtelevat yhdestä lasista noin muutama kymmeneen lasiin. Tämä on yksi yrityksen vahvuuksista, sillä se pystyy toteuttamaan asiakaskohtaista tuotantoa juuri tarpeen mukaisella eräkoolla. Seuraavaksi käydään läpi lasin taivutusprosessi kammiouunilla. Kuvassa 13 on esitetty taivutusprosessin pääpiirteet prosessikaaviona lasin taivuttajan näkökulmasta. Sarjauunien taivutusprosessia ei käydä läpi, koska sarjauunit on rajattu tämän työn ulkopuolelle.



Kuva 13. Lasin taivutusprosessi tiivistettynä

Lasin taivutusprosessi alkaa siitä, kun lasikärriä tuodaan kammiouunille. Kammiouuneja on kohdeyrityksessä melkein 20 ja lähes jokaisessa kammiouunissa on kaksi vaunua. Vaunut ovat vuorotellen uunissa sisällä ja toisessa vaunussa sillä aikaa jäähtyy toinen lasi, jonka jälkeen se lastataan suoralla lasilla. Tämä vaunu on aina laitettu valmiiksi siihen mennessä, kun toinen vaunu tulee pois uunista, joten uunin sisällä on aina lasi taipumassa. Lasikärriä on siis taivuttamossa samaa aikaa lähes 40 kappaletta, joissa jokaisessa on laseja tuotteesta riippuen noin kymmenen. Kammioiden hyvä puoli on siinä, että sen voi "sulkea" aika helposti verrattuna isoon koneeseen (kuten paperikone) tai sarjauuniin, joita on tehtaassa kolme kappaletta.

Taivuttaja nostaa nosturilla suoran lasiparin muotille, joka on vähintään jokaisen sarjan alussa huollettu. Muotissa on kaikkia erilaisia kikkoja ja "virityksiä", mutta niitä ei tässä työssä salassapitosyistä avata sen enempää. Suoran lasin paikoitus muotille on todella tarkkaa työtä ja lasi mitataan joka kerta millimetrilleen oikeaan kohtaan. Yksi syy tähän on lasin jäähtyminen, sillä muotti on metallia ja metalli sitoo lämpöä enemmän kuin lasi. Laseja taivutetaan kaksi kerrallaan, joten alimmaisen lasin jäähtymiseen vaikuttaa se, kuinka kaukana lasin ulkoreuna on muotin reunasta. Huonosti jäähtyneeseen lasiin muodostuu jännityksiä, jotka ovat joko veto- tai puristusjännityksiä. Näiden kuuluu olla tasapainossa tai muuten lasi voi rikkoontua itsekseen ilman mitään rikkoontumakohtaa. Näiden kahden lasin eli lasiparin väliin laitetaan seuraavassa osastossa väliin kalvo. Jos lasi on väärin mitoitettu muotille, silloin se voi esimerkiksi tippua muotilta ja lasi menee rouskuun. Tämän jälkeen vaunu ajetaan uuniin, jossa on lukuisia vastuksia lasia lämmittämässä. Vastukset ovat päällä tuotteesta riippuen hieman erilaisesti. Myös muotissa on lisävastukset antamassa lämpöä kaarille, koska ne taipuvat eniten. Kammiouunilla kestää tuotteesta riippuen n. 15-30 minuuttia, kun lasi saavuttaa noin 550 °C. Tätä aikaa kutsutaan esilämmitykseksi. Sen jälkeen alkaa itse taivutusosa, jolloin lasia voi joutua kepittämään. Kepittäminen tarkoittaa sitä, että taivutuskepillä (metallinen, jossa on jokin suoja päässä) painetaan lasia kiinni muottiin. Etenkin lasin päädyt nousevat irti muotista. Kammiouunissa on useimmiten kaksi kepitysluukkuja per puoli eli neljä kepitysluukkuja yhteensä. Lasi on valmis tuotteesta riippuen hieman yli 600 °C. Lämpötilat ovat lasikohtaisia ja jokainen lasi taivutetaan oman taivutuskortin mukaan. Toiset lasit ovat helpompia tehdä kuin toiset ja vaikeita laseja pyritään koko ajan kehittämään paremmiksi. Pääperiaate on, että lasi lämmössä muotoutuu muotin mukaisesti ja sitä voi joutua painelemaan kepillä jostakin kohtaa, jotta lasin reunat pysyvät kiinni. Jotkut tuotteet vaativat kaksi taivuttajaa ja jotkut jopa kolmekin, joten välillä taivuttajat menevät auttamaan naapuriuunia sillä välin kun oma lasi lämpenee uunissa esilämmityksessä.

Tämän jälkeen itse lasin taivutus on ohi ja vaunu "otetaan alas". Silloin alkaa lasin jäädyttäminen ja tätä prosessinvaihetta tämä työ nimenomaan tutkii. Jäähdytysilma otetaan tehtaalta sisältä ja se tulee neljästä eri putkesta uuniin sisään (Kuva 14). Putket sijaitsevat symmetrisesti lasiin nähden. Koska uunissa on tuolloin noin 600 °C lämmintä, niin tehdasilma jäädyttää lasia tarpeeksi. Jäähdytysputkien päässä on sirotinpeltejä, joita tässä työssä tutkitaan. Sirotinpellit ohjaavat mallista riippuen jäähdytysilmaa erilaisesti, joka sitten vaikuttaa lasin jännityksiin. Jos ilma menee suoraan lasiin, silloin lasi hajoaa varmasti jännitysten takia itsekseen. Sen takia sirotinpellit ovat avainasemassa jännitysten muodostumisessa, sillä ne ohjaavat ilmaa. Joissakin uuneissa on seinäpuhallusten lisäksi myös pohjapuhallukset. Vaunu laskee portaittain alas kammiouunista ja näitä vaihteita on viisi. Jäähdytysaskeleet on määritelty koneelle ja ne on aina vakioita, mutta niitä pystyy tarpeen tullessa muuttamaan. Lasin lämpötila kammiouunista tullessaan on vielä noin 300 °C, joten lasi jäähtyy vielä muotilla kymmeniä minutteja ennen sen käsittelyä. Tässä vaiheessa kammiouunin toinen vaunu on lastattu suoralla lasilla, joka laitetaan uuniin sisään muutaman minuutin kuluttua. Kun tämä lasi on taivutettu valmiiksi ja "otettu alas", silloin taivuttaja siirtyy toiselle puolelle ja nostaa taivutetun lasin kaatokärrylle, josta se kuljetetaan tuotteen jigille mittaukseen. Tuotteesta mitataan kammiouunilla muun muassa koko ja muoto, jotka asiakas on hyväksynyt. Asiakasvaatimuksien mukainen lasi laitetaan pukkiin. Tämän jälkeen taivuttaja nostaa uuden suoran lasin muotille ja mittaa sen ja seuraavaksi se laitetaan uuniin ja siitä alkaa sama taivutusprosessi.



Kuva 14. Kuvassa harmaa alue on lasipari, johon lasiin kohdistuva jäähdytysilma tulee kammiouuniin lasin päädyissä sijaitsevista neljästä putkesta

Lasin jäädyttämisessä 600 °C - 550 °C on usein kriittisin lämpötila-alue ja sillä alueella lasi tulisi jäädyttää hitaasti. Ihanteellinen lasin jäädyttämisnopeus on 20 °C/min, mutta sitä on usein vaikea saavuttaa tuotannossa. Lasia saa kuitenkin enintään jäädyttää 60 °C/min, sillä nopeampi jäädytys muodostaa lasiin todennäköisemmin pinta- ja reunajännityksiä. Muotin rakenteella voidaan hieman vaikuttaa siihen, että miten jäähdytysilma kohdistuu lasille, mutta suurin vaikuttaja jäähdytysilman kohdistajalle on uunin ilmavirta. Uunin ilmavirta tulisi olla uunissa siten, että lasin keskusta jäähtyy viimeiseksi. Liian nopea jäädytys muodostaa lasiparin väliin lasivälin, johon sitten myöhemmin voi tulla kuplaa klaavauksen jälkeen. Yleensä puhutaan, että jos taivuttamossa lasiväli on suurempi kuin 0,3-0,5 mm niin silloin on riski, että tuotteeseen tulee kuplaa. Lasiväli johtuu siitä, että ulompi lasi jäähtyy hitaammin kuin sisempi lasi, koska ulompi lasi on kosketuksissa metalliin, joka on lämmin. Kuplainen tuote voidaan usein kuplakorjata jos kupla sijaitsee lasin reunassa. Jos kupla on keskellä lasia, silloin sitä ei pystytä korjaamaan ja lasi päättyy roskiin. Aina välttämättä reunakuplaakaan ei pystytä korjaamaan, joten taivuttamon yksi kriittisimmistä osa-alueista on myös oikeat lasivälit. On

hyvä muistaa, että kuplakorjaukseen menevä lasi vie tehtaan kapasiteettia turhaan, koska silloin sama työ tehdään kaksi kertaa.

Tässä työssä mitataan laseista reunajännitykset, jolloin puhutaan veto- ja puristusjännityksestä. Puristusjännityksen tulee olla aina korkeampi kuin vetojännitys. Usein puhutaan, että hyvä suhde näille on silloin kun vetojännitys on puolet puristusjännityksestä. Vetojännitys ei saa missään nimessä ulottua lasin reunaan asti, sillä silloin lasi voi särkyä todella helposti. Tämän takia lasin mitoitus muotilla on tärkeä ja kriittinen toimenpide. Lasin kuuluu tulla ainakin 5 mm yli muotin suorana. Lasin reunassa kuuluu olla reunapuristusta, joihin vaikuttaa lasin lämpötila, jäähdytysnopeus, muotin rakenne ja lasin paksuus. Reunajännitysten yksikkö on Pascal ja tässä asiayhteydessä puhutaan aina megapascalista (MPa). Hyvän ja kestävä lasin vetojännitys on < 6 MPa ja puristusjännitys on > 8 MPa.

3.2 Työn tutkimusasetelma

Tutkimusasetelma on suunniteltu ja toteutunut tapa, jolla kerätään tutkimusaineistoa. Se perustuu tutkijan ideoihin siitä, millaisilla aineiston keruun ja analysoinnin operaatioilla tutkimusongelma halutaan ratkaista. Samaa tutkimusaihetta voidaan tutkia periaatteessa erilaisilla asetelmilla, mutta tutkimusongelma määrää hyvin pitkälti sen, millä asetelmalla tutkimusta lähdetään tekemään. (Ruonavaara 2011)

Tutkimustoiminta voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: Empiirinen tutkimus ja teoreettinen tutkimus. Empiirinen tutkimus taas voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: Kvantitatiiviset tutkimukset ja kvalitatiiviset tutkimukset. Tutkimukset poikkeavat toisistaan aineistonkeruumenetelmien eroavaisuudella. Kvantitatiivisen tutkimuksen perinteiset aineistonkeruumenetelmät on erilaiset lomakekyselyt, Internet-kyselyt, systemaattinen havainnointi tai kokeelliset tutkimukset. Kvalitatiiviset tutkimukset perustuvat henkilökohtaisiin haastatteluihin, ryhmähaastatteluihin tai johonkin valmiiseen aineistoon tai dokumentteihin. Tutkimuksien oleellisimmat erot ovat siinä, että kvantitatiivinen (määrällinen) vastaa usein kysymyksiin mikä, missä, paljon tai kuinka usein. Otos on usein numeerisesti suuri ja ilmiö kuvataan numeerisen tiedon pohjalta. Kvalitatiivinen (laadullinen) taas pyrkii vastaamaan kysymyksiin miksi, miten ja millainen. Otos on tässä menetelmässä usein suppea johtuen siitä, että tietoa voi olla vaikea saada tai siitä on vaikea tehdä johtopäätöksiä. Tässä ilmiötä kuvataan niin sanotun pehmeän tiedon pohjalta, joka on tullut esimerkiksi haastattelujen kautta. (Heikkilä 2014)

Kvantitatiivinen tutkimus voidaan jakaa kolmeen tutkimustyyppiin (Heikkilä 2014):

- Kartoittava eli eksploratiivinen tutkimus
- Kuvaileva eli deskriptiivinen tutkimus
- Selittävä eli kausaalinen tutkimus

Kartoittavaa tutkimusta käytetään usein esitutkimuksena ja sen avulla pyritään selvittämään jonkin tutkittavan ilmiön selittäviä tekijöitä tai erilaisia vastausluokituksia tutkimuslomakkeen kysymyksiin (Heikkilä 2014). Tällä asetelmalla voidaan kartoittaa tutkimattomia tiedon alueita, joilta ei ole paljon tuloksia ja teoriaa (Ruonavaara 2011). Kuvaileva tutkimus on empiirisen tutkimuksen perusmuoto. Se liittyy osana lähes jokaiseen kvantitatiiviseen tutkimukseen ja se voi olla jonkin muun tutkimuksen pohjana. Kuvaileva tutkimus vaatii aina laajan aineiston (Heikkilä 2014). Tämän tutkimuksen

tarkoituksena on tuottaa jostakin tutkittavasta ilmiöstä pätevä yleiskuva (Ruonavaara 2011). Viimeisen eli selittävän tutkimuksen avulla pyritään selvittämään ilmiöiden välisiä syy- ja seuraussuhteita. Tässä pyritään selvittämään muuttujien välisiä riippuvuuksia. Kokeellinen tutkimus on yksi selittävän tutkimuksen erityismuoto ja siinä tutkitaan jonkin tekijän vaikutusta kontrolloiduissa olosuhteissa (Heikkilä 2014). Kun kuvaileva tutkimus vastaa kysymyksiin mitä tai miten, selittävä tutkimus pyrkii löytämään vastauksen kysymykseen miksi. Kontrolloidun olosuhteen tavoite on eliminoida kaikki ulkopuoliset tekijät, jotta mikään ei häiritsisi ilmiön tutkimista. Tämä vaatii hypoteeseja siitä, mitkä tekijät eli muuttujat vaikuttavat selitettävään ilmiöön. Selittävää tutkimusta ei voi tehdä, jos ei ole mahdollisuutta numeerisiin muuttujiin. Tutkimus alkaa alkutilanteen kartoituksella ja alkumittauksilla, jonka jälkeen tulee tutkimusvaihe (suoritetaan kokeita) ja sitten lopputilanne. Täytyy muistaa, että olosuhteiden vakioiminen ei ole mahdollista muualla kuin laboratorio -olosuhteissa, joten tässäkin työssä on tärkeä muistaa, että taustalla on aina vaikuttavia asioita vaikka ne kuinka yrittää eliminoida pois (Ruonavaara 2011).

Tämän työn tutkimusasetelma on kokeellinen tutkimus, koska tässä pyritään selvittämään erilaisten muuttujien vaikutuksia toisiinsa ja se tapahtuu käytännössä koeajojen kautta. Tutkimuksessa tutkitaan tekijöitä eli muuttujia ja tarkoitus on eliminoida mahdollisimman hyvin muut tekijät pois. Tutkimus pyrkii löytämään muun muassa jonkin syyn sille, miksi jokin sirotinpelti käyttäytyy toiseen lasiin erilaisemmin kuin johonkin toiseen lasiin. Kvantitatiivisen tutkimuksen lähtökohta on numeerinen tieto ja tässä johdopäätökset tehdään juuri numeroiden kautta. Laseista mitataan veto- ja puristusjännityksiä ja niistä koostetaan erilaisia kuvaajia, joiden avulla pyritään löytämään parhaimmat ratkaisut. Tässä tutkimuksessa ei varsinaisesti suoriteta perinteistä haastattelutoimintaa, mutta kammionuunin henkilökunnan kanssa käydään tietojen vaihtoja suullisin menetelmin tutkimuksen aikana. Heiltä on myös kysellään erilaisia asioita, mutta ei haastattelutyyppisesti vaan keskustelutyyppisesti.

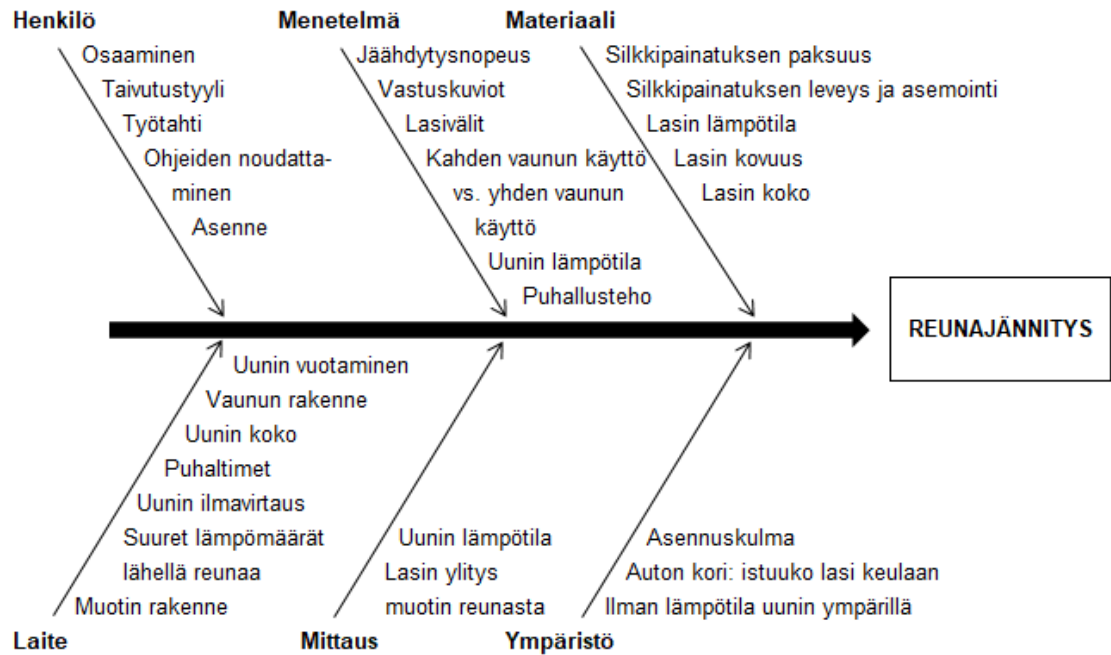
Tutkimusta tehdessä tutkijan täytyy pitää koko ajan mielessä, että asiantunteva aineiston käsittely ei pelasta tutkimusta, jos itse tutkimus on huonosti suunniteltu. Tämän takia tässä tutkimuksessa on uhrattu paljon aikaa koeajojen suunnittelulle ja parametrien määrittämiselle. Hyvä suunnitelma nostaa todennäköisyyttä luotettavalle tutkimukselle. Luotettavan tutkimuksen tunnusmerkkejä ovat (Heikkilä 2014):

- Selkeästi määritelty perusjoukko
- Harkiten valittu otantamenetelmä
- Sopiva tiedonkeruumenetelmä
- Selkeä ja tarkkaan rajattu tutkimusongelma
- Tilastollisten menetelmien hallinta
- Objektiivinen ja selkeä raportti

3.3 Kohdeprosessin kehityksen lähtökohta

Prosessin kehitys lähtee liikkeelle tavallisesti ongelmasta. Ongelmia voi lähteä ratkaisemaan kahdella tapaa: hosuen tai tarkkaan miettimillä erilaisia syitä, mistä ongelma johtuu. Syy-seuraus -kaavio on tähän hyvä laatutyökalu, sillä sen avulla tulee mietittyä asioita paljon laajemmin, koska työkalussa on kuusi erilaista aihepiiriä. Kun miettii näihin kuuteen erityyppiseen aihepiiriin muutamia eri syitä, silloin ollaan melko todennäköisesti ongelman ytimessä ja sen kautta löydetään juurisyyt ongelmalle. Tässä työssä

tutkitaan reunajännitysten muodostumista, joten syy-seuraus -kaavioon laitetaan ongelmaksi reunajännitys. Kaavio on laadittu tätä työtä varten siltä pohjalta, että mitkä asiat vaikuttavat reunajännitysten syntyyn, koska siitä voi johtaa seuraavaksi sen, millä tavalla kyseinen tekijä aiheuttaa ongelmia tai mikä sen rooli on reunajännitysten muodostumisessa. Kuvassa 15 on tehty syy-seuraus -kaavio reunajännitysten muodostumisista ja kuvan jälkeen se käydään läpi kohta kohdalta. Reunajännityksen syntyminen johtuu kaikista kuudesta eri tekijästä, joten mitään tekijää ei voi aliarvioida.



Kuva 15. Reunajännitykseen vaikuttajat tekijät

Henkilö eli taivuttaja vaikuttaa reunajännitysten syntymiseen osaamisen, taivutustyylin, työtahdin, ohjeiden noudattamisen ja asenteen perusteella. Osaamisella tarkoitetaan sitä, että taivuttaja tietää mitä tekee. Tämä kuulostaa yksinkertaiselta, mutta jos taivuttaja ei tiedä mitä tekee ja hän tekee vääriä asioita tietämättään, niin silloin voi syntyä huonoja reunajännityksiä. Jos osaamista ei huomioida, niin silloin voidaan keskittyä väärin asioihin, sillä jos muutetaan esimerkiksi asetuksia ja huono reunajännitys johtuukin osaamisesta, niin silloin muutetaan vääriä asioita. Taivutustyyli tarkoittaa sitä, että vaikka jokaisella lasilla on oma taivutuskortti, niin valitettavasti varsinkin kokeneemmilla taivuttajilla on luontaista hiukan soveltaa omia juttuja. Tämä taas voi johtaa siihen, että asioita ei tehdä kuten pitää ja sen takia tulee ongelmia. Yleensä kun asioita tehdään tavalla joka on hyväksi koettu, niin siitä seuraa hyvä tuote. Työtahti liittyy siihen, että normaalitilanteessa uunissa on koko ajan lasi. Jos työtahti on laiska jostakin syystä, niin silloin uuni pääsee jäähtymään lasien välissä ja lähtötilanne taivutukselle on erilainen kuin normaalitilanteessa. Ohjeiden noudattaminen liittyy siihen, että niissä on oikeat työtavat, jotka on joskus hyväksi koettu. Nämä työtavat on varmistettu siten, että laboratoriossa on mitattu laseista kaikki mahdollinen, joten ohjeiden mukaan tekeminen tarkoittaa usein hyvää tuotetta. Kun ohjeita ei noudateta, silloin toiminta lähtee yleensä väärille urille ja tuloksena voi olla huonoja laseja. Asenne on yksi tekijä mikä voi vaikuttaa ohjeiden noudattamiseen ja muutenkin töissä olemiseen ja sitä kautta lasien laatuun.

Menetelmä on prosessin kehityksen kannalta yksi mielenkiintoisimmista osa-alueista laitteen kanssa. Menetelmä tarkoittaa tapaa työskennellä ja mihin asioihin siinä voidaan vaikuttaa. Tässä osiossa on asioita todella paljon ja niitä kaikkia ei voi mitenkään tutkia tässä työssä. Menetelmän kautta reunajännityksiin voidaan vaikuttaa lähes yhtä paljon kuin laitteen kautta. Menetelmään liittyy seuraavat asiat: jäähdytysnopeus, vastuskuviot, lasivälit, kahden vaunun käyttö, puhallusteho ja uunin lämpötila. Näitä asioita on jo käyty läpi luvussa 3.1. Jäähdytysnopeudella tarkoitetaan jäähdytysaskelien kestoa, sillä jos askeleet asetetaan pieniksi minuuttimääräisesti, silloin jäähdytysnopeus kasvaa eli tuotetta jäähdytetään nopeammin. Jäähdytysaskelien saa muutettua ajallisesti tai sitten kuinka monta senttimetriä yksi askellus on. Lasin jäähdytys kuuluu olla alussa hidasta, mutta alle 500 °C lasia voidaan jäähdyttää nopeammin. Silloin puhutaan 50-100 °C/minuutti. Lasin jäähdytysnopeuden analysoitaessa täytyy huomioida, että mikä vaikutus askelilla on, kun lasi on kuitenkin 200-300 °C kun se tulee ulos uunista. Reunajännityksen muodostuvat jäähdytyksen alkuvaiheessa, joten loppujäähdytyksellä ei ole enää niin isoa merkitystä. Vastuskuviot vaikuttavat reunajännityksiin siten, että jos jokin paikka on todella kuuma, sitä pitäisi silloin jäähdyttää enemmän kuin kylmempää paikkaa. Jos jäähdytys on tasainen kyseiselle kohdalle, silloin lasin rakenne on erilainen kylmästä ja lämpimästä kohtaa, joten se voi aiheuttaa reunajännityksiä. Vastuskuviot ovat vakiot ja niitä muutetaan useasti vain silloin jos on jotain tuoteongelmia. Vastuskuviot tehdään lähes poikkeuksetta tuotteen laatuspesifikaatioiden perusteella sellaiseksi, että päästään asiakasvaatimuksiin ja niitä määritettäessä ei mietitä kovinkaan paljon jäähdytystä. Sitä mietitään oikeastaan silloin, kun on reunajännitysten kanssa ongelmia. Lasivälit muodostuvat menetelmän kautta, koska nopean jäähdytyksen seurauksena voi tulla lasivälejä, jotka aiheuttavat seuraavassa osastossa ongelmia. Lasiväli syntyy, kun päällimmäinen eli lyhyempi lasi jäähtyy nopeammin kuin alimmainen eli pitkä lasi. Pitkä lasi jäähtyy hitaammin, koska se on kosketuksissa rautaiseen muottiin, joka sitoo lämpöä. Lasivälit ovat kuplien takia myös siitä pahoja tapauksia, että taivutuksessa lasipari on muodostanut parin juuri niin kuin se on taivutuksessa jäänyt. Kun laminoinnissa lasipari irrotetaan ja laitetaan takaisin kiinni, voi olla että lasiparin kohdistus ei ole sama kuin se oli taivuttamossa. Näin ollen lasiparin väliin voi jäädä myös silloin lasiväliä. Lasi liikkuu usein taivutuksessa, joten jos lasipari laminoinnissa liitetään täysin erilaisesti kuin mitä se taivuttamossa oli, silloin todennäköisesti tulee kuplaa mikä johtuu ristiliitoksesta eikä jäähdytyksestä. Tällöin tulisi kehittää taivuttamista siten, ettei lasipari liikkuisi taivutuksen aikana eikä jäähdytystä muuttamalla. Kahden uunin käyttö vs. yhden uunin käyttö menetelmänä tarkoittaa sitä, että kun käytetään kahta vaunua niin kammio-uuni on koko ajan käytössä ja se ei pääse kylmenemään missään vaiheessa. Yhdellä vaunulla tehdään "kylmempiä lähtöjä", jolloin jokin tuote voi käyttäytyä erilaisemmin kuin silloin kun sitä tehtäisi jatkuvasti tasaisena virtauksena. Uunin lämpötila menetelmänä tarkoittaa sitä, että missä lämpötilassa lasia taivutetaan. Usein tämä tekijä ei vaikuta jäähdytykseen, koska lämpötila määräytyy sen mukaan että lasi taipuu. Tämä on kuitenkin hyvä huomioida, sillä korkea lämpötila vaatii enemmän jäähdytysaikaa. Puhallusteholla tarkoitetaan sitä, että kuinka kovaa ilmavirta tulee puhallusputkista. Tämä vaikuttaa reunajännityksiin ja lasiväleihin, koska puhallus kohdistuu käytännössä päällimmäiseen eli lyhkäisempään lasiin. Jos puhallusteho on iso, silloin lyhyempi lasi jäähtyy paljon nopeammin kuin pitkä lasi, joten lasien väliin syntyy lasivälejä.

Materiaali viittaa sellaisiin asioihin, joista itse tuote koostuu. Tässä tutkimuksessa materiaali on suora lasi, jota taivutetaan. Tutkimuksessa reunajännityksiin vaikuttavat materiaalista silkkipainatuksen paksuus, sen leveys ja asemointi sekä lasin lämpötila ja lasin kovuus. Jokaisessa lasissa on silkkipainatus, joka tehdään leikkuun jälkeen silkkipaina-

tuksessa. Silkkipainatus on se musta alue, joka on tuulilasin reunoissa ympäri lasia. Ennen kammiouunია se lähtee pois pelkällä vedellä todella helposti ja kammiouunissa se palaa kiinni lasiin silloin, kun kammiouunin lämpötila on hieman alle 600 °C. Silkkipainatuksen paksuus pitäisi olla vakio joka tuotteessa, mutta siinä voi olla eroja. Se vaikuttaa reunajännityksiin siten, että paksumpi kohta muodostaa lasiin kuumemman kohdan kuin mitä ohuempi kohta. Tämä taas vaikuttaa jäähdytykseen siten, että kuumempi kohta ei jäähdy samanlaisesti kuin kylmempi kohta. Myös silkkipainatuksen leveys vaikuttaa samanlaisesti kuin paksuus, sillä mitä leveämpi alue silkkipainatusta on, niin sitä isompi alue on kuumempi. Yleisesti ottaen myös silkkipainovärit heikentävät lasin jännitystä noin puoleen normaalista arvosta. Myös silkkipainoraita on herkempi murtumille, jos painoalueelle on syntynyt taivutuksessa vetojännitystä. Silkkipainatuksen aseointi vaikuttaa reunajännityksiin edellä mainitusta syystä. Tämän takia lasissa on normaalisti ns. kirkas alue joka puolella lasia reunassa, jotta reunoille saadaan tarpeeksi hyvät reunajännitykset. Kirkas alue on vain muutama millimetri. Jos kirkas aluetta ei ole, silloin jännitys on puolet pienempi kuin sen kuuluisi olla ja silloin tulee iso riski sille, että lasi hajoaa. Lasin lämpötila tässä yhteydessä tarkoittaa sitä, että minkä lämpöinen lasi on kun se menee uuniin. Tähän vaikuttaa esimerkiksi vuodenaika ja taivuttamon lämpötila. Tämä asioida on tutkimuksessa hyvä huomioida, mutta siihen on vaikea vaikuttaa ja sen merkitys on pieni, koska puhutaan kuitenkin kymmenistä asteista ja kammiouunissa lasi on sadoissa asteissa. Lasin kovuus tarkoittaa sitä, miten lasi käyttäytyy kammiouunissa. Kovempi lasi käyttäytyy uunissa erilaisemmin kuin pehmeä lasi, joka taas voi johtaa asetusten muuttamiseen, jonka takia taas reunajännityksen voivat kärsiä. Lasin kovuuteen ei voi mitenkään vaikuttaa tässä työssä ja siinä voi olla heitellyä. Sen tuotantoprosessi on kuvattu luvussa 2. Lasin kovuus tulee kuitenkin huomioida, sillä välillä on tilanteita, jolloin lasi on kovempaa ja se ei käyttäydy normaalisti. Jos tätä erikoistilannetta ei tiedosta ja tunnista, silloin koesuunnittelun tulokset eivät ole luotettavia. Lasin koko on myös yksi tekijä reunajännityksissä, koska erikokoiset lasit ovat eri paikassa uunia ja siten ne saavat jäähdytysilmaa erilaisesti. Näin ollen lasin koko pitää ottaa aina huomioon.

Laitteella on reunajännityksiin iso merkitys. Tässä työssä on nostettu esiin seuraavat asiat: muotin rakenne, suuret lämpö määrät lähellä reunaa, uunin ilmavirtaus, puhaltimet, uunin koko ja vaunun rakenne. Muotin rakenne on tekijä, jota lähdetään usein ensimmäiseksi muokkaamaan silloin kun on ongelmia reunajännitysten kanssa. Tässä työssä ei avata enempää muotin rakennetta salassapitosyistä, mutta muotin rakenteella pystytään vaikuttamaan asioihin. Suuret painomäärät lähellä reunaa vaikuttaa reunajännityksiin siten, että usein ne ovat metallia ja siten ne sitovat lämpöä ja niillä kestää jäähtyä kauan ja samalla ne "hohkaavat" lämpöä lasille. Tämä asia liittyy kanssa muottitekniisiin asioihin. Uunin ilmavirtaus ja puhaltimet liittyvät toisiinsa ja niitä tämä työ tutkii. Uunin ilmavirta riippuu sirotinpelleistä, jotka asennetaan (Kuva 14) kammiouunin sisälle putken päähän, josta ilma tulee. Salassapitosyistä myös näiden sirotinpeltien muotoja ja mittoja ei julkisteta ja niistä puhutaan vain numeroilla. Pääpiirteittäin erilaiset sirotinpellit ovat erikokoisia ja ne on muotoiltu erilaisesti. Sirotinpeltien rakenne määrää, miten ilma kiertää uunissa ja mihin suuntaan se lähtee putken päästä. Uunin kokoon ei tässä työssä voi vaikuttaa, mutta se on hyvä huomioida tulevaisuudessa kun tehdään tämän tutkimuksen perusteella valintoja esimerkiksi sirotinpelteihin. Vaunun rakenne myös vaikuttaa hieman reunajäähdytyksiin, mutta niitäkään ei voida salassapitosyistä avata sen enempää tässä työssä. Kaikki asiat, joita ei tässä avata salassapitosyistä ovat sellaisia, joita kuitenkin itse tutkimuksessa mietitään tarkasti. Uunin vuotaminen vaikuttaa reunajännityksiin siten, että jos uuni vuotaa jostakin reunaa ilmaa pois, silloin se kaikki

ilma on pois lasin jäähdyttämisestä. Tämä tarkoittaa, ettei se jäähdy varsinkaan alussa niin paljon kuin pitäisi, jolloin lasiin voi muodostua reunajännityksiä.

Mittaus-osioon on tunnistettu kalanruodossa kaksi asiaa: Lasin ylitys muotin reunasta ja uunin lämpötila. Lasin ylitys muotin reunasta on avattu luvussa 3.1, mutta sen merkitys voi olla jossakin tapauksissa todella suuri. Jos lasin reuna on lähellä muotin reunaa, niin silloin tämä paikka jäähtyy hitaasti koko ajan, koska siinä on metallia lähellä. Tämän seurauksena siihen voi muodostua reunajännityksiä ja koska se kohta on lasin reunassa, niin silloin se on erittäin kriittinen kohta murtumille. Uunin lämpötila tässä kohtaa tarkoittaa sitä, että välttämättä tietokoneen antama lukema ei ole uunin todellinen lämpötila. Ero todellisen ja tietokoneen näyttämän lämpötilan välillä saadaan selville esimerkiksi dataloggerin kautta. Se laitetaan kammiouuniin mukaan ja se mittaa uunin lämpötilaa. Tämä lämpötilaero tulee ongelmaksi silloin, kun tutkimuksen tuloksia mietitään johonkin toiseen kammiouuniin, sillä sen todellinen lämpötila voi olla taas eri kuin työn kohteen uuni. Tämän takia jos jokin asia toimii tässä tutkimuksessa, se ei välttämättä toimi naapuriuunissa sen takia, koska lämpötiloissa voi olla eroja. Jos lämpötiloissa on eroja, silloin esimerkiksi jäähdytysaskeleet menevät erilaisesti.

Ympäristöllä tarkoitetaan asioita, joihin ei yleensä voida vaikuttaa ainakaan kovinkaan helposti. Tähän tutkimukseen on nostettu kolme asiaa ympäristöstä: Ilman lämpötila uunin ympärillä, istuuko lasi auton keulaan ja lasin asennuskulma. Ehdottomasti isoin tekijä näistä on ilman lämpötila uunin ympärillä, koska jäähdytysilma otetaan suoraan uunin ympäriltä. Varsinkin kesähelteillä se on huomattavasti (noin 40 °C) lämpimämpää kuin talvipakkasilla. Tässä työssä asiaan ei voida vaikuttaa, mutta on hyvä tiedostaa, että ilma uunin ympärillä on "keskitasoa", koska työ tehdään syksyllä. Silloin ilma ei ole kaikista kuuminta, mutta ei myöskään kaikista kylmintä. Lasin asentamiseen liittyy auton kori, että istuuko lasi auton keulaan ja asennuskulma. Varsinkin jos jännitykset eivät ole aivan priimatasoa, silloin näiden tekijöiden kautta lasit voivat hajoa. Tämän takia olisi tärkeä löytää sellaiset menetelmät ja keinot, että lasin jännitykset olisivat mahdollisimman hyviä joka puolella lasia.

DMAIC -menetelmän ensimmäinen vaihe kuuluu tähän lukuun. Määrittelyvaihe (Define) tulisi tehdä aina kehitysprojektin alussa, jotta projekti pysyy oikeilla raiteilla. Oikeastaan tätä vaihetta on käyty läpi jo aikaisemmin tässä työssä monessa eri kohtaa. Kehityskohde on tunnistettu ja se on prosessin parantaminen siten, että saataisiin parempi ja luotettavampi jäähdytysprosessi. Yksi projektin tavoite on myös tuottaa tietämystä jäähdytyksiin liittyvistä asioista ja tätä tietämystä olisi tarkoitus käyttää myöhemmin hyväksi tehtaassa. Sitä voi käyttää hyväksi esimerkiksi sellaisessa tilanteessa, että tehtaalle tulisi uusi kammiouuni tai jos on jotain ongelmia jossakin tuotteessa reunajännitysten kanssa, niin tämän tutkimuksen avulla saataisiin ongelmat ratkaistua. Myös prosessi on määritetty luvussa 3.1. Määrittelyvaiheeseen kuuluu myös tiimin määrittely. Tämän tutkimuksen vetäjänä toimii tutkimuksen kirjoittaja, joka on päivätyössään töissä kohdeyrityksessä prosessinkehittäjänä. Näin ollen vetäjä on päivittäin tekemisissä tavuttamon kanssa ja siltä osin esimerkiksi koeajojen valvonnan ja ohjeistuksen pitäisi toimia hyvin. Projekti sitoo eri sidosryhmiä ympäri tehdasta, joista tärkeimmät sidosryhmät ovat tuotannosuunnittelu ja muotoilutiimi. Työssä tarvitaan myös laboratorion henkilökuntaa ja tietoa asioista on hankittu ympäri tehdasta niin toimihenkilöiltä kuin työntekijöiltäkin. Tuotannosuunnittelu on sen takia avainasemassa, että heidän kanssaan täytyy sopia yhteistyössä siitä, milloin koeajoja suoritetaan. Tässä haasteena on se, että kohdeuunilla on tuote, jota toimitetaan paljon ja koeajot ottaa aina pois tehtaasta ka-

pasiteetista. Mutta jos kehitystoimintaa ei tehdä, sen näkee varmasti tulevaisuudessa, joten tuotantoajan uhraaminen siihen on kuin laittaisi rahaa pankkiin tulevaisuuden varalle. Muotoilutiimillä tarkoitetaan ihmisiä, jotka on tekemisissä muottien kanssa eli jotka vastaavat tuotekehityksestä. He tekevät sirotinpellit tähän työhön, koska niitä ei ole missään hyllyssä valmiina. Projektitiimiin kuuluvat lisäksi lasintaivuttajat, joita tämä työ koskee. Taivuttajien kanssa tulee käydä keskusteluja siitä mitä nyt ollaan tekemässä, miksi sitä tehdään ja miten se tehdään, jotta koeajot sujuisivat paremmin. Myös ymmärrys tekemisestä nostaa heidän motivaatiota tutkimusta kohtaan, josta seurauksena on taas hyvä asenne ja onnistuminen on todennäköisempää. Määrittelyvaiheeseen kuuluu myös ongelman kuvaus, työn tavoitteet ja laajuus. Nämä asiat on käyty läpi 1. luvussa.

Tämä tutkimus tehdään lähtökohtaisesti kolmelle erikokoiselle lasille, jotta ymmärrettään lasin koon merkitys jännitysten muodostumisiin. Aluksi tutkitaan pientä ja isoa lasia ja jos niiden tuloksissa ei keskenään ole selkeää eroa, niin silloin ei tutkita enää kolmatta lasia vaan se aika käytetään jonkin muun asian tutkimiseen. Kolmesta lasista yksi lasi on erityinen, sillä siitä tuotteesta tämä toimeksianto on tullut. Tässä tutkimuksessa tätä lasia kutsutaan nimellä lasi 1. Tuotetta tehdään tehtaalla päivittäin, mutta salassapitosyistä esimerkiksi sen kuvaa ei voida julkaista. Ennen alkumittauksia perehdyttiin juuri tämän tuotteen historiaan tehtaan laboratorion arkiston kautta. Siellä on viimeisen kymmenen vuoden ajalta kaikki mittaukset, joita tuotteisiin tehdään. Hyvän arkistointirakenteen ansiosta kyseinen tuote löytyi helposti. Yrityksellä on ollut ongelmia tämän tuotteen hajoamisen kanssa aikaisemmin, mutta sen jälkeen (vuotta ei voida kertoa) mittatulokset näyttävät hyviltä ja kaikki on lasissa kunnossa. Mittapöytäkirjassa on numeroiden lisäksi värikoodit punainen, keltainen ja vihreä kertoen nopeasti onko mitattu mittauspiste kunnossa. Punainen tarkoittaa alle toleranssirajan, keltainen on toleranssirajalla ja vihreä on hyvä tulos. 2018 loppuvuodesta on muutamia mittapöytäkirjoja, joissa juuri sirotinpellien kohtaa on keltaista ja punaista. Näissä tapauksissa vetojännitys on ollut yli sallitun. Myöhemmin tämän syyksi selvisi, että sirotinpelti on ollut vinnossa. Tämä todistaa vain sen, miten avainasemassa sirotinpellit ovat jäähtymisen kanssa. Jos ne ei ole kunnossa, silloin ei kannata miettiäkään mitään muuta asiaa reunajännityksiin liittyen. Kun tämä ongelma huomattiin niin mittatulokset näyttävät taas paremmilta. Kuitenkin tämän vuoden alkupuolella mitatuissa lasissa on ollut yläreunassa vielä keltaista joka mittapisteesä yhtenä kuukautena ja kahdessa tuloksessa keväältä on sirotinpellien kohtaa näyttänyt, ettei lasi ole kunnossa. Tämä osoittaa sen, että tälle työlle on tarvetta ja myös sen, että prosessissa on normaalia vaihtelua.

Tutkimuksen pientä lasia kutsutaan työssä nimellä lasi 2. Se on suhteellisen uusi tuote ja sen vuosivolyymi on todella paljon alhaisempi kuin tutkimuksen päätuotteen. Tämä tuote on työssä vain sen takia, että se edustaa pientä lasia lasikoon puolesta ja se on helppo lasi tehdä. Tuote on lanseerattu muutama vuosi sitten ja siitä ei löytynyt mittadataa laboratorion arkistosta kuin kahdesta mittauksesta. Tämän tutkimuksen avulla myös tästä tuotteesta saadaan tietoa enemmän. Tuotteen mittaustulokset lanseerausvaiheessa olivat olleet hyvät, mutta raaputustestiä tämä lasi ei ollut läpäissyt. Sen jälkeen lasin jäähtymisprosessiin on tehty muutoksia ja noin vuosi sitten mitatussa lasissa raaputustesti oli kunnossa ja samalla reunajännitykset olivat kunnossa. Voidaan siis todeta, että pienen otannan perusteella lasi 2:n historiassa ei ole ollut mitään poikkeavia asioita.

Laboratorion arkisto ei kerro sitä, millä tavalla mittatulokset ovat tulleet. Eli esimerkiksi onko lasit tehty ohjeet mukaan tai onko toinen vaunu ollut käytössä. Ne antavat vain hyvän yleiskuvan prosessin nykytilanteesta, mutta niihin ei tule verrata tämän tutkimuk-

sen tuloksia. Sen takia pitää suorittaa alkumittaukset juuri tähän tuotteeseen, jotta ymmärretään missä oikeasti mennään nykytilanteessa, kun tehdään lasi ohjeiden mukaisesti ja samalla tavalla kuin tutkimuksessakin tullaan tekemään. Niistä saadaan jokin alkutieto ja voi olla hyvin, että prosessin nykytilanne on kunnossa. Tutkimuksen yksi tehtävähän oli tutkita sirotinpeltien ja lasin koon merkitystä reunajännitysten muodostumiseen. Mutta jos prosessi ei ole kunnossa alkumittausten perusteella, se olisi hieno virstanpylväs tälle tutkimukselle, kun tämän tiedon perusteella kyseinen prosessi saataisiin kuntoon. Mittatulokset tulevat mittarista, jota ihminen lukee omalla silmällään. Tämän takia on äärimmäisen tärkeää, että alkumittaukset suorittaa sama henkilö kuin koeajojen mittaukset, jotta mittaus tehdään "samalla otteella". Tässä mittaustekniikassa on iso riski mittausepävarmuuden kanssa, mutta siihen on rakennettu sellainen asteikko, joka muuttaa mittaustuloksen mega pascalleiksi. Se vähentää mittausepävarmuutta, koska kyseinen mittatulos ei ole "niin kriittinen", kun se vielä skaalataan ja muutetaan mega pascalleiksi.

3.4 Laseista tehtävät mittaukset

Tutkimuksen perustana on erilaiset mittaukset, koska ne kertovat miten hyvin koeajoissa on onnistuttu. Tulosten avulla tehdään johtopäätöksiä siitä, mikä sirotinpelti toimii parhaiten missäkin lasikoossa. Tämän takia mittausten tulee olla luotettavia ja mittauksia tulee tehdä erilaisista asioista, jotta saadaan kokonaiskuva mikä toimii ja mikä ei. Esimerkiksi jos reunajännitysmittauksissa tulokset näyttää hyviltä, mutta tuotteessa on isot lasivälit, niin silloin ei olla onnistuttu, koska lasiväli aiheuttaa laminoinnissa todennäköisesti kuplaa. Tämän takia mitataan mahdollisimman paljon erilaisia asioita, koska pitää nähdä lasin kokonaisuus eikä vain oman osastoa ajatellen. Mahdollisimman tarkan kokonaiskuvan saavuttamiseksi koelaseihin tehdään seuraavia mittauksia:

- Reunajännitysmittaus (puristus- ja vetojännitys)
- Raaputustesti
- Polarisatiotaulu
- Lasivälit uunilla
- Lasin ylitys muotin reunasta
- Uunin katkaisulämpötila
- Esilämmityksen ja taivutuksen aika (minuutti)

Kolme ensimmäistä mittausta on niin sanottuja päämittauksia ja ne liittyvät kaikki reunajännityksiin. Neljä viimeistä mittausta ovat sellaisia, että tuloksia tulkittaessa myös nämä tulee huomioida. Ne tuo moniulotteisuutta asioihin ja ovat niin sanottuja tukimittauksia. Jos tukimittaukset ovat kunnossa ja päämittaukset ovat kunnossa, silloin voidaan tehdä johtopäätöksiä prosessista. Mutta jos tukimittaukset eivät ole kunnossa, niin silloin ei voida ainakaan tehdä suoria johtopäätöksiä päämittauksista. Tukimittaukset ovat asioita, jotka pitää ymmärtää tulosten ja päämittausten taustalla ja niistä voi hakea erityisyyttä esimerkiksi huonoille tuloksille yhden lasin kohdalla.

Reunajännitysmittaukset ovat mittausten kaikkein työläin vaihe, mutta samalla se antaa eniten vastauksia siihen, että onko koeajossa onnistuttu. Sen perusteella tiedetään, miten reunajännitykset ovat muodostuneet laseihin. Reunajännitysmittauksessa lasista mitataan 18 eri mittauspistettä (Kuva 16), joista jokaisesta mittapistestä mitataan veto- ja puristusjännitys. Mittaus tapahtuu Sharples S69 -nimisellä mittarilla. Haasteena mittarissa on se, että ihmisen silmä tekee tulkinnan siitä mikä on oikea arvo. Mittausmene-

telmä perustuu lasin reunasta mitattavien lasien sisäisten jännitysten ja lasin yleisen laadun suhteeseen. Mittarissa on vihreähköllä suotimella varustettu linssi, jolla lasin reunan läheisyydessä olevia interferenssiraitoja voidaan mitata. Vetojännitys haetaan siten, että mittarin "kiekkoa" pyörittämällä vasemmalle haetaan ruutuun mahdollisimman tasainen alue ja sitten kirjataan lukema paperille. Puristusjännitys taas vastaavasti haetaan siten, että vetojännityksen kohdalta aletaan pyörittämään kiekkoa oikeaan suuntaan niin kauan, kunnes tasaisen alueen alaviiva ylittää lasin reunan ja siinä vaiheessa luku kirjataan paperille.

Lukema muutetaan megapascaliksi, koska kiekon luvulla ei vielä saada megapascalleita. Kaavassa 180° tulee mittarin kiekosta, koska yksi mittarin kierros on kyseinen lukema. Koska kaavassa lasin paksuus on nimittäjässä, niin mitä paksumpi lasi on, sitä pienempiä arvoja kaavan kautta saadaan. Kaava on:

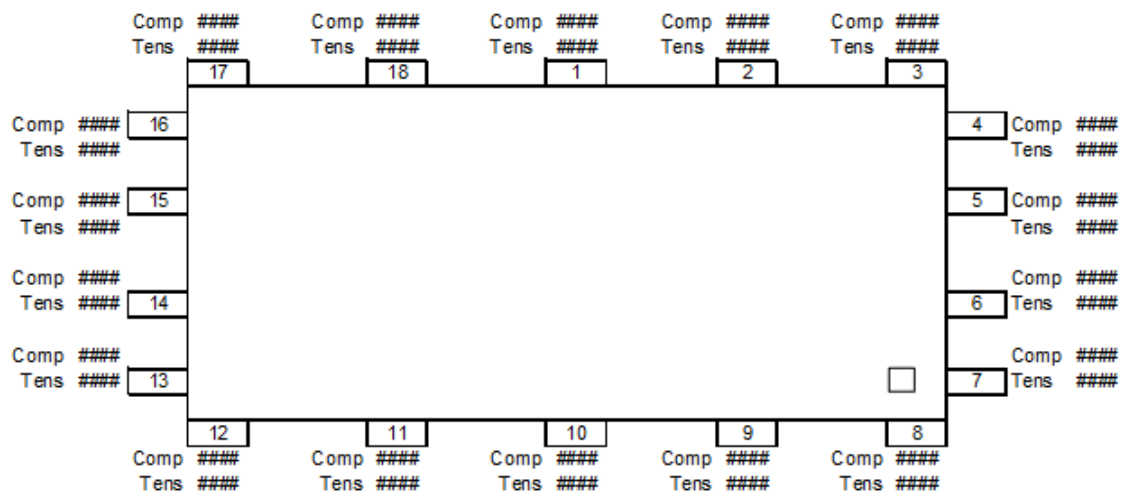
$$\theta = \frac{\alpha \theta}{180^\circ * d * c} = \text{MPa, jossa}$$

α = valon aallonpituus, joka on kyseisessä laitteessa 514 nm (vakio)

θ = mitattu lukema mittarista

d = mitattujen lasien paksuus yhteensä (mm)

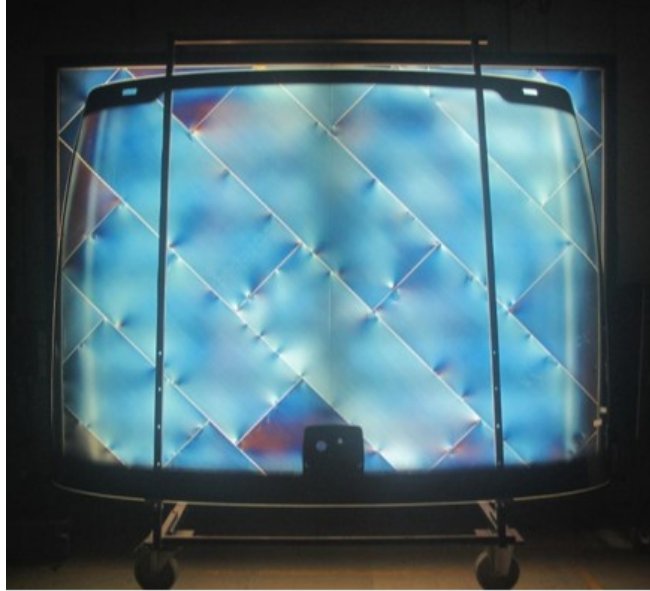
c = lasin jännitys vakio, joka on 2,705.



Kuva 16. Reunajännitysmittauksen mittapisteeet

Raaputustesti tehdään kaikille lasille. Siinä lasiin tehdään viiltoja lähes jokaiselle mittapisteelle siten, että aina edetään yksi sivu kerrallaan. Jokaisen sivun pitää kestää kolme minuuttia raaputuksen aiheuttaman viillon, jotta tulos on hyväksytty. Viillot tehdään noin millimetri lasin reunasta keskelle päin siten, että viillon pituus on noin 30 senttimetriä. Jos lasissa on hyvät reunajännitykset, niin silloin se kestää raaputukset eikä hajoa. Mutta jos reunajännitykset ovat huonoja, niin silloin lasi hajoaa. Tämä tuo mittausvarmuutta myös reunajännitysmittauksiin, koska nämä kaksi ovat usein linjassa. Raaputustestin tulos on aina "ok" tai "no ok", joten siinä ei ole tulkinnanvaraa. Jos reunajännitykset näyttävät hyviltä ja lasit eivät kestä raaputusta, silloin on syytä miettiä, että onko reunajännitykset mitattu oikealla tavalla.

Lasi raaputetaan vasta sen jälkeen, kun se on visuaalisesti tarkistettu polarisaatiotaululla. Polarisaatiotaulu (Kuva 17) kertoo visuaalisesti sen, miten jännitykset ovat muodostuneet lasiin. Tässä lasi nostetaan valotaulun eteen ja lasia katsotaan polarisaatiolinssin läpi. Se näyttää lasin huonot kohdat punaisiksi jos reunajännitykset eivät ole kunnossa, joten myös tämä mittaus tuo varmuutta reunajännityksiin. Kun nämä kaikki kolme mitausta on kunnossa, niin silloin voidaan pitää reunajännityksiä hyvinä.



Kuva 17. Lasi polarisaatiotaululla (kyseinen lasi ei ole mukana tässä tutkimuksessa)

Päämittausten jälkeen tarkastellaan tukimittauksia, koska ne voivat selittää esimerkiksi huonoja tuloksia. Tukimittauksia tulkitaan vasta päämittausten pohjalta siitä näkökulmasta, että nämä arvot ovat tuoneet hyvät tai huonot tulokset. Lasiväli uunilla (mm) on siitä erikoistapaus, että kaikki muu voi olla hyvin paitsi tämä. Koska isot lasivälit aiheuttavat kuplaa jatkoprosessissa, niin vaikka kaikki tulokset ovat hyviä niin isojen lasivälien takia ei tällaista toimintatapaa voida ottaa käyttöön. Tämä tarkoittaa juuri sitä, että nähdään asioita monesta eri kulmasta. Kuvassa 18 on tilanne, jossa lasi on muotilla jäähtymässä ja tästä asetelmasta tässä tutkimuksessa mitataan lasivälit ja lasin ylitys muotin reunasta. Lasiväli mitataan lasivälimittarilla neljästä kohtaa lasia siten, että mitauskohdat ovat joka lasissa samat. Lasin ala- ja yläreunassa on kaksi mittauspistettä kaikissa mittauksissa. Mittauskohdat ovat esimerkiksi jokainen kulma tai jokin kohta, jonka saa muotista helposti katsottua samaksi ja seuraava lasi tulee varmasti mitattua samasta kohtaa. Lasin ylitys muotin reunasta (mm) mitataan myös, koska lasi voi liikkua taivutuksessa ja sen takia tulokset voivat olla erilaiset. Ne mitataan samasta kohdasta kuin lasivälit, mutta neljän kohdan lisäksi ne mitataan myös yhdestä kohtaa molemmista lasin päädyistä. Tällä pyritään ehkäisemään seuraavanlainen tilanne: muut mittaustulokset ovat hyviä, mutta yksi mittaustulos on huono vaikka se on tehty samaa aikaa muiden lasien kanssa. Lasin ylitys muotin reunasta -mittauksesta selviääkin, että lasi on liikkunut taivutuksessa erityisen paljon jostakin syystä muihin lasihin verrattuna ja tästä johtuu huono mittaustulos. Tästä saadaan niin sanottu erityisyys huonolle lasille, jota ei tarvitse sen jälkeen ihmetellä sen enempää. Lasi voi liikkua taivutuksessa esimerkiksi siitä syystä, että lasia kepitettäessä ote on livennyt tai lasia ei olla kepitetty ohjeen mukaan.



Kuva 18. Lasi muotilla jäähtymässä (kuva ei ole kohdeyrityksestä) (Karisola 2016)

Uunin lämpötila liittyy siihen, että milloin lasin taivutusvaihe on lopetettu. Tälläkin voi olla eroja ja tällä pyritään siihen, että kaikkien samanlaisten lasien taivutus lopetettaisiin samaa aikaa. Näin ollen reunajännitykset muodostuisivat samanlaisesti ja olisivat siten vertailukelpoisia. Lämpötila katsotaan tietokoneen ruudusta. Alkumittauksiin otetaan mukaan datalogger, koska uunin tietokoneen lämpötila ei välttämättä ole todellinen lämpötila. Tämän mittauksen tavoite on se, että kun näitä tuloksia käytetään myöhemmin hyväksi, niin tiedetään dataloggerin avulla mikä on ollut uunin todellinen lämpötila. Siitä voidaan tehdä johtopäätöksiä siihen, miten hyvin uunin lämpötila pitää paikkaansa. Dataloggeria ei oteta koeajoihin mukaan, koska siinä on jo muutenkin niin paljon mitaamista. Alkumittausten perusteella saadaan tieto uunin perustasosta ja sitä käytetään hyväksi muualla tutkimuksessa. Lisäksi mitataan esilämmityksen ja taivutuksen aika minuuteissa. Tämän tavoitteena on se, että saadaan tietoa miten paljon kylmä lähtö vaikuttaa lasin jännityksiin. Kylmä lähtö voi normaalissa tuotantotilanteessa tulla esimerkiksi silloin, kun muotti on hajonnut toiselta puolelta uunia tai taivuttaja on ollut ruoka-
tauolla. Oikeastaan tämä mittaus ei vaikuta johtopäätöksiin siihen, ollaanko koeajoissa onnistuttu. Tämän mittauksen tarkoitus on saada syvempää ymmärrystä esimerkiksi kahden vaunun käytöstä.

3.5 Alkumittaukset prosessin nykytilan kartoittamiseksi

Ennen varsinaisia koeajoja suoritettiin alkumittaukset. Alkumittaukset ovat samalla hyvä kenraaliharjoitus itse koeajoille, koska toiminta läpi alkumittausten on samanlaista kuin varsinaisissa koeajoissa. Alkumittauksista saatiin myös uutta tietoa esimerkiksi siitä, miten lasin lämpötila käyttäytyy. Alkumittauksissa mitattiin yhteensä neljä lasia ja kaikki lasit jäähdytettiin nykyisten uunissa olevien sirotinpeltien kanssa (sirotinpelti 1) ja lasina käytettiin tutkimuksen päälasi eli lasi 1:stä. Alkumittaukset tehtiin vain lasi 1:lle, koska se on tutkimuksen päälasi. Kaikki lasit myös taivutti sama henkilö ja uunia käytettiin kyseisenä päivänä molemmilta puolilta eli siinä oli käytössä kaksi vaunua.

Alkumittauksissa oli suunnitellusti mukana myös datalogger. Jokaisessa lasissa oli dataloggerista kiinni kaksi anturia, jotka molemmat asennettiin keskelle lasia yläreunaan ja alareunaan. Anturit olivat noin 10 cm päässä lasin pinnasta, koska tällä haluttiin mitata uunin todellista lämpötilaa eikä lasin lämpötilaa. Kammiouunin lämpötila katsotaan normaalisti pyrometristä tietokoneelta. Tämä voi kuitenkin heittää uunin normaalista lämpötilasta, vaikka pyrometrejä kalibroidaan säännöllisesti. Datalogger oli alkumitta-

uksissa sen takia mukana, että nähdään uunin todellinen lämpötila, koska dataloggerin lämpötilat ovat vertailukelpoisia muihin kammiouuneihin. Tämä mittaus tehtiin sen takia, että jatkossa tätä työtä vertailtaessa muihin kammiouuneihin ollaan tietoisia siitä, mikä on ollut uunin todellinen lämpötila. Usein kun tehtaassa tehdään kehitystoimintaa kammiouuneihin, niin silloin on mukana aina datalogger ainakin aluksi. Pyrometrin lukema voi heitellä viikkojen sisällä, joten datalogger tuo varmuuden uunin lämpötilaan. Pyrometri näytti kaikissa mittauksissa lasin katkaisulämpötilaksi noin 592 °C. Katkaisulämpötila on se lämpötila, milloin taivutus lopetetaan ja lasi otetaan alas ja siitä alkaa jäähdytysprosessi. Datalogger näytti katkaisulämpötilaksi noin 575 °C, joten lämpötilaeroa näiden kahden mittauksen välille syntyi noin 17 °C. Tällä tiedolla ei varsinaisesti tehdä tässä tutkimuksessa mitään, mutta jatkoa varten on hyvä tiedostaa, että uunin todellinen lämpötila katkaisuhetkellä oli 575 °C. Tuo lämpötila on ylä- ja alareunan lämpötilojen keskiarvo. Yläreunan lämpötila oli hieman enemmän kuin alareunan ja syy löytyi vastuskuvioista. Niissä on enemmän virtaa lasin yläreunassa kuin alareunassa. Näistä kahdesta arvosta otettiin sen takia keskiarvo, että pyrometri sijaitsee keskellä uunia. Alkumittauksista saatiin se tieto dataloggerin avulla kuin mitä haluttiin, joten sitä ei oteta enää mukaan varsinaisiin koeajoihin.

Dataloggeria seuraamalla saatiin myös käytännön tietoa lasin lämpötilakäyttäytymisestä. Jäähdytysvaiheen alkaessa uuni jäähdyi todella paljon nopeammin kuin lasi ensimmäiset viisi minuuttia. Lasi sitoo siis lämpöä kauan. Lasin tullessa ulos kammiouunista sen lämpötila oli noin 300 °C. Kun vaunu on ollut noin 5 minuuttia ulkona uunista, laitettiin anturit kiinni lasiin, jotta siitä saa silloisen lasin todellisen lämpötilan. Lämpötila oli tuolloin 70 °C. Eli kun lasin lämpötila alkaa olemaan alle 300 °C, sen jälkeen sen jäähtyminen alkaa nopeutua.

Neljästä lasista mitattiin tehtaassa laboratoriossa veto- ja puristusjännitys kuvan 16 mukaisesti 18:sta eri mittauspisteestä. Tämän jälkeen kaikkien neljän lasin mittapisteet yhdistettiin, koska silloin saadaan parempi yleiskuva prosessista. Näin voidaan tehdä, koska kaikki neljä lasia on taivutettu samalla tavalla ja siten tulokset ovat vertailukelpoisia. Jos vertaa vain yhtä lasia kerrallaan, silloin vaihtelu voi tehdä sen, että tulee tehtyä vääriä tulkintoja prosessista. Laseja on neljä kappaletta, jolloin mittauspisteitä tulee yhteensä 72 kappaletta. Koska laseista mitataan puristus- ja vetojännitys, niin saadaan kaksi erilaista kuvaajaa tuloksista.

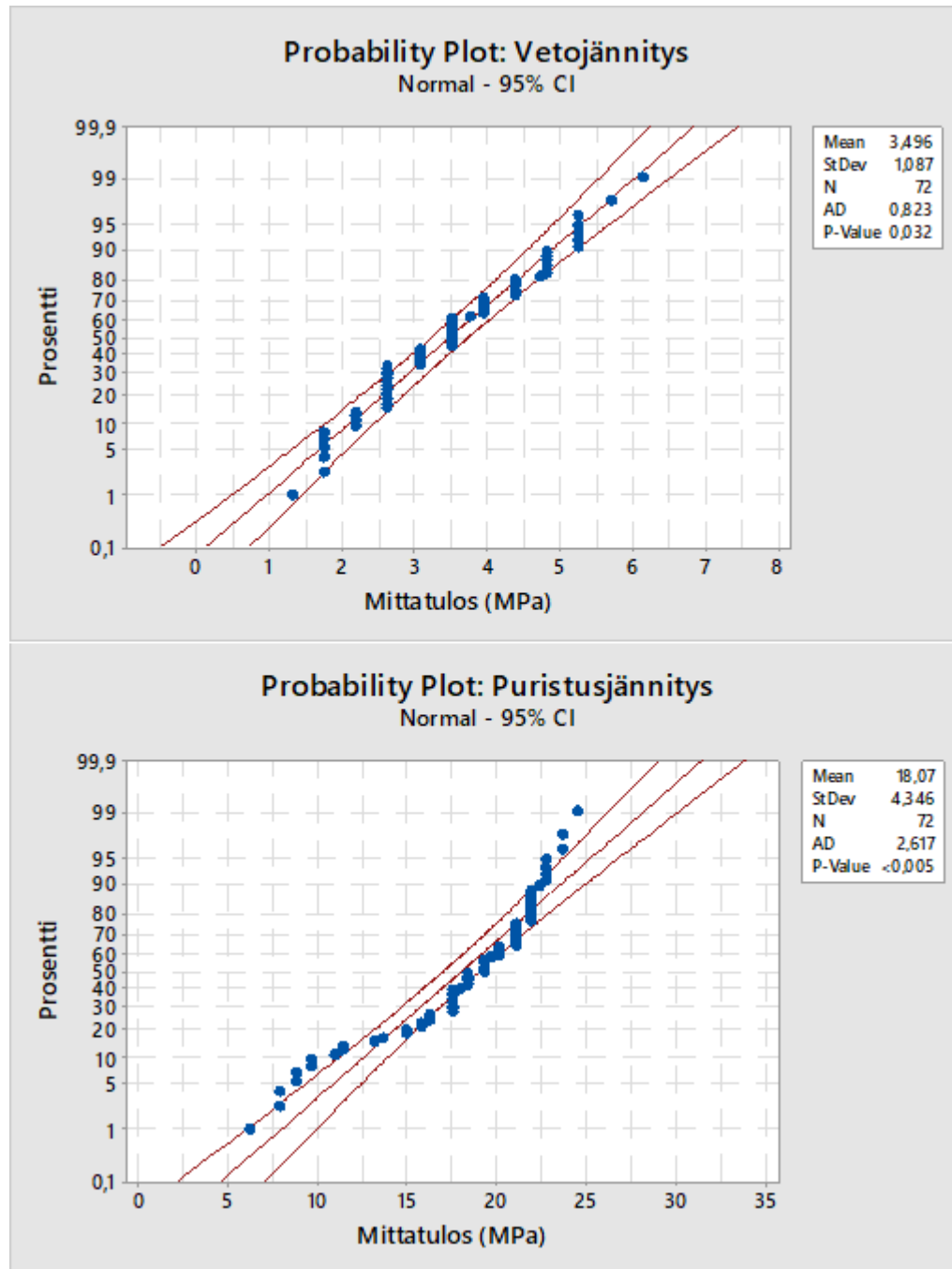
Aluksi kuitenkin pitää katsoa, onko data normaalijakautunut eli voiko siihen soveltaa normaalijakaumakuviota. Tämän voi tehdä monella tavalla ja tässä tutkimuksessa se on tehty Minitabin avulla. Minitab on tietokoneohjelma, joka on maailmassa yksi käytetyimmistä tilastollisista ohjelmistoista. Kuvassa 19 on tehty jakauman normaalisuuden testaus Minitabin avulla (Probability Plot). Testin tarkoituksena on katsoa, että noudattaako data normaalijakaumaa. Kuvassa on jokainen mitattu mittapiste sinisenä pisteinä ja punaiset viivat esittävät tuloksien hajontaa. Visuaalisesti tarkasteltuna puristusjännityksen tulokset ovat enemmän levällään kuin vetojännityksen tulokset. Mitä enemmän mittapisteet ovat punaisten viivojen sisäpuolella, niin sitä todennäköisemmin jakauma noudattaa normaalijakaumaa. Minitabin jakauman oletus perustuu p-arvon tulkintaan, joka näkyy kuvassa oikeassa yläreunassa kohdassa 'P-Value'. P-arvo perustuu tilastolliseen riskitasoon, joka on usein 5 %. P-arvo tarkoittaa todennäköisyyttä sille, että tulokset noudattavat normaalijakaumaa, eli toisin sanoen mitä suurempi on p-arvo, niin sitä todennäköisemmin mittatulokset noudattavat normaalijakaumaa. Jos arvo on suurempi

kuin 0.05, niin silloin lähes poikkeuksetta datan todetaan noudattavan normaalijakaumaa.

Alkumittausten tuloksista vetojännitys saa p-arvon 0,032 ja puristusjännityksen p-arvo on <0,005.

Puristusjännityksen p-arvo on niin pieni, että tilastollisesti tutkittuna on selvää ettei tämä data noudata normaalijakaumaa. Puristusjännityksen mittatulokset ovat kuvion alaja yläpäässä niin levällään, ettei se voi noudattaa normaalijakaumaa ja lisäksi keskiarvosta katsottuna tulokset eivät ole tasapainossa keskiarvon ylä- ja alapuolella. Puristusjännitys on saanut neljä arvoa, jotka ovat alle kahdeksan MPa:n ja siten nämä arvot ovat joko keltaisella tai punaisella. Lasista nämä kohdat ovat juuri sirotinpellin kohtaa, joten alkumittausten perusteella voisi todeta, ettei nykyiset sirotinpellit ole parhaat mahdolliset. Jos nämä neljä huonoa mittaustulosta poistaa, niin silloin jakauma saa p-arvon 0.009, joka on ainakin puolet parempi kuin alkuperäinen lukema, mutta silti vielä liian pieni todetakseen datan noudattavan normaalijakaumaa.

Vetojännityksen p-arvo on 0,032, joka on jo huomattavasti lähempänä 5 % merkitsevyysrajaa. Todennäköisesti tämä jakauma noudattaisi normaalijakaumaa, jos otanta olisi hieman suurempi. Toisaalta jos jokainen mittauspiste olisi ollut esimerkiksi muutaman millimetrin eri paikassa kuin nykyinen mittapiste, niin silloin data voisi noudattaa normaalijakaumaa myös tällä otannalla. Tämän eron huomaa myös visuaalisesti, koska kuvassa 19 näyttää siltä, että jakauma noudattaisi normaalijakaumaa, koska mittapisteen ovat punaisten viivojen sisäpuolella kahta poikkeusta lukuun ottamatta.



Kuva 19. Veto- ja puristusjännityksen normaalisuuden testaus Minitabilla

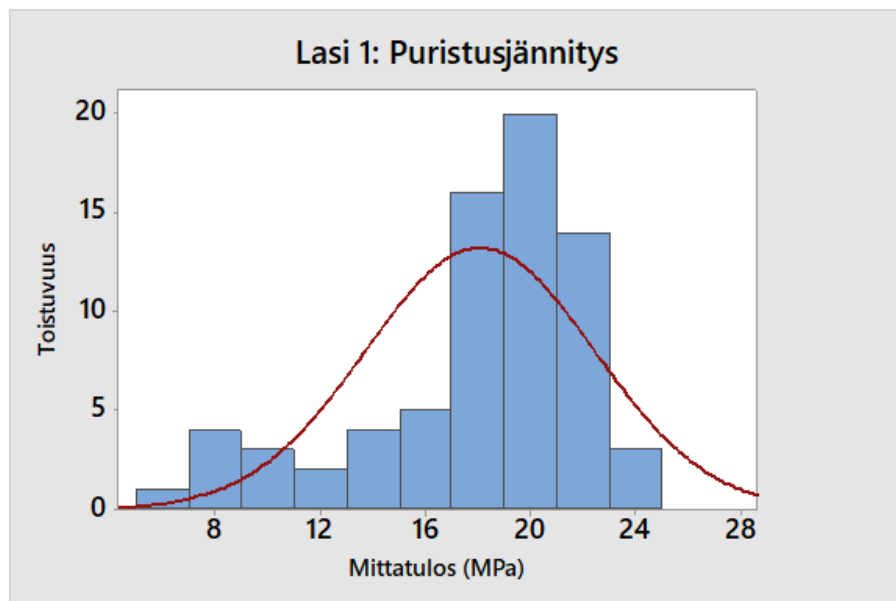
Dataan voidaan soveltaa normaalijakauman periaatteita vain silloin, kun se noudattaa normaalijakaumaa. Kuvassa 20 ja 21 on puristus- ja vetojännityksen histogrammit, joihin on lisätty normaalijakauman kuvio hahmottamaan tilannetta. Puristus- ja vetojännityksen toleransseihin on tehty mittapöytäkirjaan värikoodaus (Taulukko 2), jotta siitä nähdään selkeämmin onko lasit toleranssissa.

Taulukko 2. Puristus- ja vetojännityksen toleranssirajat (MPa) ja tuloksien luokittelu

Puristusjännitys		Vetojännitys	
> 8	vihreä	< 6	vihreä
$8 > x > 7$	keltainen	$6 < x < 7$	keltainen
< 7	punainen	> 7	punainen

Jos puristusjännitys on yli 8 MPa niin yleisesti voidaan todeta, että puristusjännitys on hyvä. Jos taas vetojännitys on alle 6 MPa, silloin voidaan yleisesti todeta, että vetojännitys on hyvä. Puristusjännityksessä haetaan mahdollisimman isoa lukua ja vetojännityksessä haetaan mahdollisimman pientä lukua.

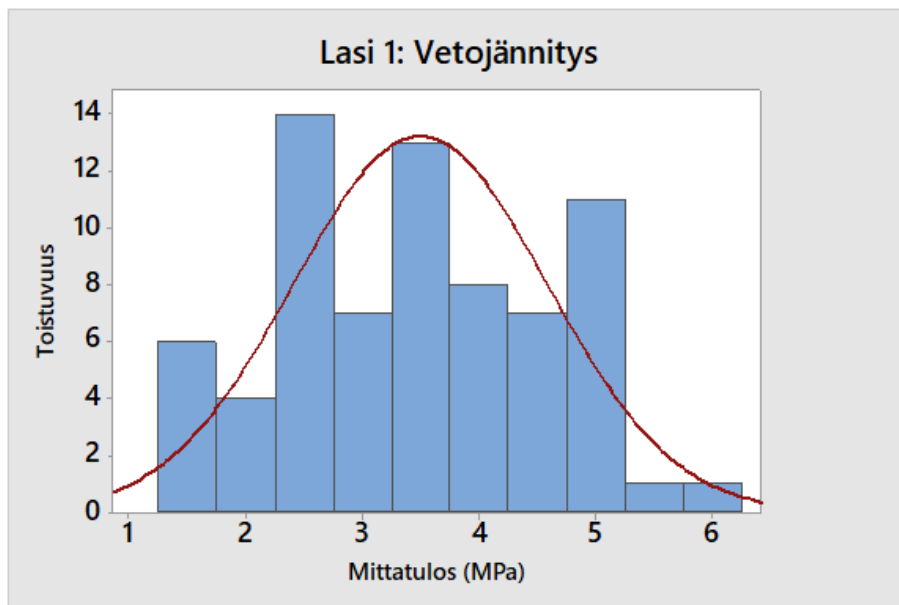
Puristusjännityksen mittatulokset (Kuva 20) osoittavat, että jakauma on siirtynyt hieman oikealle ja pienistä arvoista on tullut paljon vaihtelua. Jotta ymmärretään mikä aiheuttaa tämän vaihtelun pienemmissä arvoissa, tulee tutkia kaikkien lasien mittapisteeet erikseen ja etsiä sieltä syitä huonolle puristusjännitykselle joissakin laseissa. Tässä kohtaa on hyvä huomata, että suurin osa mittauksista on toleranssirajoista reilusti yli eli isossa kuvassa puristusjännitykset ovat kunnossa. Pienet mittatulokset tulevat lasin oikeasta reunasta (edestä päin katsottuna) ja kaikissa neljässä lasissa oli kyseisessä kohtaa lasissa alhaiset puristusjännitykset. Suurin osa menee vielä toleranssirajoissa vihreäksi, mutta siellä on myös muutama keltainen mittatulos ja jopa yksi punainen mittatulos. Pieniä arvoja (alle 10 MPa) ei ole tullut kuin lasin oikeasta reunasta ja sama kohta tulee esille kaikista laseista, joten siellä on selvä ero vaikkakin suurin osa mittatuloksista on vihreää. Mittapöytäkirjoista käy ilmi myös se, että vasemman puolen puristusjännitykset osuvat keskiarvon 18 MPa tienoille. Näin ollen oikean reunan tulokset eroavat selvästi vasemmasta reunasta. Tämä on yksi asia, johon tämän tutkimuksen avulla pyritään löytämään vastaus: Miksi reunojen välillä on eroavaisuutta, vaikka mekanismit ovat samat. Lasin oikea reuna aiheuttaa myös näihin tuloksiin enemmän vaihtelua kuin vetojännityksen tulokset.



Kuva 20. Puristusjännityksen mittatulokset alkumittauksissa

Vetojännityksen tulokset (Kuva 21) ovat tasaisempia, mutta toisaalta ne ovat jakaantuneet enemmän kuin puristusjännityksen tulokset. Jos puristusjännityksen tulokset ovat pääosin yhdessä "ryppäessä" lukuun ottamatta lasin oikeaa reunaa, niin vetojännityksen tulokset ovat tasaisemmin jakautuneet. Vetojännityksen osalta tärkein huomio on se, että yksikään arvo ei ole yli toleranssien eli kaikki arvot ovat hyviä. Vain yhdessä lasissa oli yksi mittapiste keltaisella, mutta siihen on löydetty erityisyyttä. Kyseinen lasi meni uunissa liian pieneksi asiakastoleransseista eli lasi ei olisi mennyt asiakkaalle, joten jäähdytykset eivät ole puhaltaneet lasiin normaalisti ja tämän takia kyseisestä paikasta

on mennyt yksi arvo keltaiselle. Lasi kuitenkin päätettiin ottaa laboratorioon mittauksiin, koska sille voitiin tehdä raaputustesti yhtään hyvää lasia uhraamatta. Lasi kesti raaputustestin, joka on hyvä asia.



Kuva 21. Vetojännityksen mittatulokset alkumittauksissa

Alkumittauksen lasista yksi lasi raaputettiin ja lasi kesti sen. Sama lasi laitettiin myös polarisaatiotaululle ja siitä ei ilmennyt mitään kohtaa, joka olisi punaisempi kuin muut kohdat. Alkumittauksen perusteella voidaan todeta, että prosessin nykytila on pääosin kunnossa. Ainut huono asia on lasin oikean reunan puristusjännitys, mutta on huomattava, että kyseisen reunan mittaustulokset ovat silti vielä suurin osa toleransseissa. Kokonaisuutta ajatellen reunojen mittaustulosten suuri ero ei ole hyvä asia. Alkumittauksissa lasihin tehtiin taivuttamossa myös kaikki samat tukimittaukset kuin mitä tehdään itse koeajoissakin. Lasivälit mitattiin neljästä eri kohtaa muotin perusteella siten, että mittauskohdat ovat kaikissa lasissa samat. Kaikki lasivälit olivat 0 mm, mikä on todella hyvä asia. Kyseisessä taivutusprosessissa ei lasia kehitetä mittauskohdista, joten todennäköisesti tässä lasissa ei tule olemaan lasivälejä nykyprosessin sirotinpelleillä. Lasin ylitys muotista oli myös johdonmukainen lukuun ottamatta yhtä epäonnistunutta lasia. Kaksi lasia ei liikkunut yhtään ja yksi lasi liikkui 2 mm yhdestä kohtaa, millä ei ole vielä merkitystä lasin jäähtymisen kanssa. Dataloggerin tulokset on käyty läpi aikaisemmin läpi tarkemmin, mutta uunin ja pyrometrin ero on 17 °C ja todellinen lasin katkaisulämpötila on 575 °C. Myös esilämmitystä ja taivutusaikaa mitattiin sekuntikellolla, jotta saadaan ymmärrystä onko sillä eroa, ajetaanko lasi kylmään uuniin vai ei. Esilämmitysaika oli kolmessa lasissa 13-14 minuuttia, mutta yhdessä lasissa aika oli 12,5 minuuttia. Ajallisesti lyhyin esilämmitys johtuu siitä, että lasi laitettiin uuniin sisään lähes samantien kuin toinen vaunu tuli sieltä ulos. Eli tässä lasissa uuni oli valmiiksi hieman lämpimämpi kuin muissa lasissa. Kuitenkaan tällä ei ainakaan yhden otoksen perusteella ole vaikutusta lasin puristus- tai vetojännityksiin tai lasin katkaisulämpötilaan, sillä se oli samaa luokkaa kuin muissakin. Taivutusvaihe kesti kaikissa vaiheissa saman verran ja se vei aikaa jokaisessa lasissa 15 minuuttia. Esilämmitys ja taivutusvaihe vei aikaa yhteensä 30 minuuttia ja tähän kun lisää jäähtymisen, niin yksi lasi on uunissa noin 45-50 minuuttia. Alkumittauksen perusteella saatiin selville uunin nykytaso, johon on hyvä lähteä vertailemaan koeajojen tuloksia.

Alkumittausten yksi tärkeimmistä oivalluksista oli se, että varsinaiset koeajot vaativat oman taivuttajan kyseiselle uunille. Kohdeuunin rivistössä on kolme uunia ja jokaisessa uunissa on kaksi vaunua. Usein tilanne on sama kuin alkumittauksissakin, että uunirivistössä on töissä kaksi henkilöä eli yksi henkilö hoitaa kolmea vaunua. Tämä tuo sen haasteen, että lasin taivutus pitää porrastaa sopivaksi, jotta taivuttaja ehtii taivuttaa jokaisen lasin. Jos kaikki vaunut laitetaan samaan aikaan uuniin, niin silloin ei ehdi mitenkään taivuttamaan kaikkia laseja. Juuri tämä porrastus vei turhaa aikaa alkumittauksissa, koska taivuttaja oli taivuttamassa lasia toisella uunilla. Tämä vaikuttaa myös siihen, miten kauan esilämmitys kestää, koska jos uunilla on oma taivuttaja, niin silloin vaunu on koko ajan uunissa sisällä eikä synny sellaisia tilanteita kuin nyt, että porrastuksen takia uunissa on molemmat vaunut ulkona. Lisäksi juuri kohdeuuni on se "ylimääräinen uuni", jossa rivistön kaksi taivuttajaa käyvät tekemässä lasia. Tästä syntyy tilanne, että uunin A-puolella tekee lasia eri henkilö kuin B-puolella, koska molemmat taivuttajat ottavat tästä uunista yhden vaunun. Jos koeajoissa ei ole omaa taivuttajaa tällä uunilla, niin silloin koeajoissa on myös kaksi taivuttajaa. Tämän takia ja koeajojen yleisen sujuvuuden takia uunille otetaan kolmas taivuttaja, joka taivuttaa laseja vain tässä uunissa.

3.6 Tutkimuksen suorittaminen

DMAIC:n toinen vaihe eli mittaus (Measure) kuuluu lukuun 3.6, koska koko luku käsittelee asioita, jotka liittyvät myös mittauksiin. Mittausvaiheeseen kuuluu nimensä mukaisesti mittausmenetelmän- ja tekniikoiden esittely. Mittausvaiheeseen kuuluu myös syy-seuraus -kaavio (Kuva 15), koska siinä tulee esille kaikki ne oleellimmat tekijät, jotka vaikuttavat reunajännityksiin. Oleellimmat asiat nostetaan syy-seuraus -kaaviosta esiin muuttujiksi, jonka jälkeen aletaan pohtia mitä muuttujia vakioidaan ja mitä muuttujia tutkitaan. Kaikkia muuttujia ei voida tarkastella, koska silloin tutkimuksen koko kasvaa liian isoksi. Jo pelkästään esimerkiksi kahden muuttujan kokeissa on paljon tutkittavaa varsinkin silloin, kun halutaan kokeiden toistomäärä tarpeeksi suureksi.

3.6.1 Parametrisuunnittelu

Tutkimuksen suorittamista ohjaa työlle asetettu tutkimusasetelma ja sille asetettu tavoite. Tässä tapauksessa tutkimusasetelman kautta lähdetään suorittamaan tutkimusta koesuunnittelun kautta. Tavoitteena on ymmärtää reunajännitysten muodostumista. Tässä työssä reunajännitysten muodostumista pyritään ymmärtämään lasin koon ja sirotinpellien avulla, eli miten nämä kaksi muuttujaa vaikuttavat reunajännityksiin. Tuleeko eri sirotinpelleistä miten paljon erilaisia tuloksia? Mikä sirotinpelti toimii pienelle lasille ja mikä toimii isolle lasille?

Parametrisuunnittelu on menetelmän tärkein ja oleellisin osa, joten se tulee tehdä huolella. Tämän vaiheen tavoitteena on löytää ne tekijät, joita myöhemmin suoritettavissa koeajoissa käytetään. Näitä muuttujia kutsutaan suunnittelutekijöiksi. Tässä vaiheessa määritellään myös häiriötekijät, eli tekijät jotka voivat haitata oikean tuloksen saamista. Tällaisissa tutkimuksissa nämä tekijät halutaan vakioida, jotta ne ei pääse vaikuttamaan lopputulokseen. Jos näitä tekijöitä ei vakioi, silloin lopputulos ei ole syntynyt juuri niistä parametreista joita haetaan ja tulokset voivat olla vääristyneitä. Usein paras tapa lähteä etsimään parametreja on syy-seuraus -kaavion perusteella (Kuva 15), koska siihen

on kirjoitettu asioita, joista syntyy haluttu ongelma. Tässäkin tapauksessa parametreja lähdettiin etsimään syy-seuraus -kaaviosta. Kaaviosta tunnistettiin seuraavat muuttujat, joilla ajatellaan olevan olennainen vaikutus reunajännitysten esiintymiseen ja siten ne tulee huomioida tutkimuksessa:

- taivutustyyli (Henkilö)
- jäähdytysnopeus (Menetelmä)
- puhallusteho (Menetelmä)
- lasin koko (Materiaali)
- uunin ilmavirtaus (Laitte)
- lasin ylitus muotin reunasta (Mittaus)

Muut tekijät ovat sellaisia, että ne vaikuttavat reunajännityksiin sen verran vähemmän, ettei niitä tutkita tässä tutkimuksessa. Esimerkiksi muotin rakennetta on työlästä lähteä muuttamaan ja sitä ei kannata lähteä muuttamaan yhden tutkimuksen takia. Samoin esimerkiksi uunin koko on tämän tutkimuksen ajan vakio. Myös vastuskuvioita ei lähdetä muuttamaan, koska muuten lasin asiakastoleranssit todennäköisesti kärsivät. Ne asiat, joita ei mainittu syy-seuraus -kaaviosta olennaisiksi tekijöiksi ovat sellaisia, ettei normaalissa tuotantotilanteessa taivuttaja niihin koske. Esimerkiksi tällaisia asioita ovat virtakuviot tai silkkipainatuksen paksuus. Olennaisiksi asioiksi nostetut asiat ovat taas sellaisia, että jos ei tee töitä ohjeen mukaisesti niin silloin nämä muuttujat voivat olla erilaisia ja siten tulokset ovat erilaisia.

Kuudesta tunnistetusta muuttujasta pitää vakioida joitain muuttujia, jotta pystytään tutkimaan haluttuja muuttujia ilman häiriöitä. Tässä tutkimuksessa tutkitaan seuraavia muuttujia: Lasin koko ja uunin ilmavirtaus. Uunin ilmavirtaus tarkoittaa sirotinpellejä, jotka ohjaavat puhallusilmaa uuniin. Näiden kahden muuttujan avulla saadaan tietää, miten lasin koko ja sirotinpeltien rakenne vaikuttavat lasin reunoille muodostuviin reunajännityksiin. Kiinnostavin kysymys on: Antaako sama sirotinpelti aivan erilaiset lukemat isolle ja pienelle lasille? Onko niiden rakenteella edes merkitystä? Näille kahdelle tutkittavalle arvolle annetaan seuraavaksi arvot. Lähtökohtaisesti koeajot suoritetaan kolmella lasilla, mutta koeajojen aluksi on vain kaksi lasia. Tämä siksi, että jos käykin ilmi, että lasin koko ei vaikuta reunajännityksiin, niin silloin on turha tutkia keskikokoista lasia. Tämä säästää huomattavasti aikaa ja silloin jäljelle jäävä aika voidaan käyttää esimerkiksi kokeen toistomäärien nostamiseen. Jos taas huomataan selvästi, että lasin koolla on merkitystä, niin silloin tutkimukseen otetaan vielä kolmas lasi. Lasit jaetaan tutkimuksessa seuraavasti: Lasi 1 (iso lasi), Lasi 2 (pieni lasi) ja Lasi 3 (keskikokoinen lasi). Lasi 1:n ja lasi 2:n mitat on annettu luvussa 1.2 ja lasi 3:n mitat on näiden kahden mitan välistä. Alussa tutkitaan tutkimuksen "päälasi" eli lasia, josta on tullut reklamaatioita. Toinen lasi on tutkimukseen valittu pieni lasi. "Päälasi" on lasi 1 ja pieni lasi on Lasi 2. "Päälasi" vastaa myös kooltaan suhteellisen isoa lasia, joten tässä tutkimuksessa se edustaa lasikategorian isoa lasia.

Toinen tutkittava muuttuja on uunin ilmavirtaus eli sirotinpellit. Niiden kuvia ei voida laittaa tähän tutkimukseen salassapitosyistä, mutta ne ovat rakenteeltaan erilaisia. Ne asennetaan puhallusputkien päähän (Kuva 14) ja niitä on uunissa samaa aikaan neljä kappaletta. Kaikki neljä kappaletta ovat aina keskenään samanlaisia. Sirotinpeltejä kutsutaan tässä tutkimuksessa numeroilla 1-6. Miten nuo sirotinpellit on valittu? Numero 1 on normaali sirotinpelti, joka on uunissa kiinni eli se on luonnollinen valinta. Sen avulla saadaan tietää niin sanotusti uunin perustasosta paljon enemmän. Sirotinpellit 2-4 ovat

sellaisia, joita on tehtaalla käytössä muissa uuneissa. Tämä sen takia, että jos tämän tutkimuksen ansiosta pitää muihin uuneihin vaihtaa sirotinpeltejä, niin nämä sirotinpellit ovat tuttuja ja tiedetään miten ne ohjaa ilmaa. Samalla voidaan hieman haarukoida sitä, onko näistä kolmesta sirotinpellistä jokin erityinen eli onko se muita parempi. Tehtaan muut sirotinpellit ovat niin erilaisia keskenään, että niitä ei tähän työhön kannata ottaa. Lisäksi niitä ei ole samanlaisena edes kahdessa uunissa, joten niitä ei kannata silloin tutkia. Tällaisia malleja on käytössä kaikista vanhemmissa kammiouuneissa, joten niitä tuskin tullaan enää koskaan uusiin uuneihin asentamaan. Kaksi viimeistä sirotinpeltiä on keksitty "out of the box" -tyyppisesti, eli niitä ei ole tehtaalla käytössä. Sirotinpelti numero 5 on jotain sellaista, millaista tehtaalla ei ole lainkaan käytössä. Se tulee olemaan tämän tutkimuksen mielenkiintoisin sirotinpelti, koska jos se toimii niin se tuo kokonaan uudentyyppistä ajattelua koko sirotinpeltien rakenteeseen. Siinä on käytetty hieman erilaista lähestymistapaa kuin perinteisesti. Viimeinen, sirotinpelti numero 6 on samaa kategorialla, mutta se on lähestymistavaltaan lähempänä nykyisiä sirotinpeltejä, mutta toisaalta sen ulkomuoto on uniikki. Tämä voi olla hyvin sellainen sirotinpelti, joka ajaa itsensä läpi tämän tutkimuksen aikana tai sitten siitä todetaan, että se on todella huono sirotinpelti.

Syy-seuraus -kaaviosta jää jäljelle vielä neljä olennaista tekijää, mutta ne kaikki vakioidaan eli suljetaan pois pelistä. Näin ollen tuloksista saadaan juuri sellaisia, kuin nämä kaksi tutkittavaa muuttujaa antaa. Neljä muuttujaa olivat: taivutustyyli, jäähdytysnopeus, puhallusteho ja lasin ylitys muotin reunasta. Seuraava kysymys on, kuinka nämä neljä muuttujaa vakioidaan?

Taivutustyyli on aina henkilökohtainen, joten jos eri koeajoja suorittaa eri henkilö, niin tuloksilla voi olla eroja. Tämä johtuu yksinkertaisesti taivuttajan osaamisesta ja asenteesta. Tämän takia koeajojen taivuttaja pyritään vakioimaan, eli sama taivuttaja taivuttaa koko koeajon. Tämä tulee olemaan näiden neljän muuttujan suurin haaste, koska yksi koeajo kestää noin 1,5 työvuorota. Haastetta tuo vielä se asia, että välillä tässä uunilla ei ole ns. omaa taivuttajaa, vaan viereisen uunin taivuttajat hoitavat tätä uunia. Koeajojen aikana tässä uunissa on ainakin oma henkilö ja esimerkiksi ylitöiden avulla pyritään siihen, että sama taivuttaja taivuttaa kaikki lasit. Tämä helpottaa myös tutkimuksen avaamista taivuttajalle, jos niitä on vain yksi eikä esimerkiksi kolme. Paras tapa vakioida taivutustyyli on se, että tehdään lasi ohjeiden mukaisesti. Se onnistuu kaikilta riippumatta esimerkiksi osaamisesta. Tämä toki vaatii valvomista koeajojen aikana, mutta ohjeiden mukaan taivuttaminen on tähän hyvä lähtökohta ja sen jälkeen sama taivuttaja koko koeajon ajan. Jos eri koeajoissa on eri taivuttaja, niin se ei varsinaisesti haittaa, kun siinä tutkitaan kuitenkin eri sirotinpeltejä, joten sen tulokset ovat jo lähtökohtaisesti hieman erilaisia.

Jäähdytysnopeudella tarkoitetaan jäähdytysaskelia eli miten nopeasti uunin vaunu tulee alas. Nämä on usein määritelty taivutuskortissa, joten koeajoissa näihin ei kosketa vaan askeleet otetaan ohjeiden mukaan. Tässä olisi mahdollisesti yksi tutkittava muuttuja, mutta jos se otetaan tähän tutkimukseen vielä mukaan niin tästä työstä tulee silloin todella laaja. Joten tämä muuttuja pitää vakioida ja se tapahtuu siten, että ennen koeajoa tietokoneelta tarkistetaan askeleet, että täsmääkö ne taivutuskorttiin. Tämä muuttuja pitää vakioida siksi, että sitä on helppo muuttaa tietokoneelta kesken ajon. Kolmas vakioitava muuttuja on puhallusteho eli kuinka kovaa ilmaa tulee puhallusputkista. Tällä on luonnollisesti vaikutusta reunajännityksiin ja lasiväleihin, koska puhallusilma tulee ensisijaisesti päällimmäiselle lasille. Kun päällimmäinen lasi saa enemmän puhallusta

kuin alimmainen lasi, niin silloin päällimmäinen lasi jäähtyy nopeammin. Tästä on seurausena se, että päällimmäisen ja alimmaisen lasin väliin jää lasiväli. Tämä vakioidaan siten, että ennen koeajoja tarkistetaan ilmvirtamittarilla putkesta tuleva ilma eikä kosketa sen jälkeen asetuksiin. Tämä tehdään jokaisen sirotinpellin vaihdon välissä ja koeajon lopuksi, koska jokin roska tai suuri määrä pölyä voi aiheuttaa puhallusputkiin tukkeumaa. Viimeinen vakioitava muuttuja on lasin ylitys muotin reunasta, koska tämä vaikuttaa reunajännityksiin yllättävän paljon. Tämä tapahtuu siten, että kun suora lasi nostetaan muotille, niin silloin lasi mitataan taivutuskortin mukaisesti. Siihen valittu menetelmä on kuitenkin standardimenetelmä ja erilaisilla kokeilla todettu parhaaksi menetelmäksi. Lasin mittausta muotille pitää taivuttajan kanssa käydä läpi pisin koeajoja, jotta se ei unohdu. Tämä muuttuja on siis vakio sillä, että mitataan ohjeen mukaisesti lasia eikä sovelleta omia mittoja. Usein omat mitat eivät tuota hyvää lasia asiakasvaatimusten mukaisesti, joten kukaan ei tahallaan sovelleta omia mittoja.

Näiden kahden muuttujan ja neljän vakioituneen muuttujan perusteella lähdetään suorittamaan koeajoja. Syy-seuraus -kaaviossa mainitut muut asiat ovat pääasiassa sellaisia, että niitä aletaan miettimään sitten kun ilmenee ongelmia. Näitä ovat esimerkiksi silkkipainoon liittyvät asiat, uunin vuotaminen tai uunin lämpötila. Kahden vaunun vs. yhden vaunun käyttö tulee myös huomioida koeajoissa, mutta ainakin kolme ensimmäistä koeajoa ajetaan kahdella vaunulla, joka on aina parempi vaihtoehto niin laadullisesti kuin tuotannon kapasiteetinkin puolesta.

3.6.2 Koesuunnittelun lähtökohdat ja koeajojen 1-3 suorittaminen

Koesuunnittelun muuttujat on nyt valittu ja seuraavaksi tehdään DOE -koesuunnitelma (Kuva 22). Tämän tutkimuksen DOE -koesuunnittelu koostuu 18:sta eri kokeesta, jolloin tulee tutkittua kaikki mahdolliset vaihtoehdot kahdesta valitusta muuttujasta. Tekijä A on sirotinpelti ja tekijä B on lasikoko.

KOENUMERO	TEKIJÄ		KOETULOS
	A	B	
1	1	1	Y1
2	1	2	Y2
3	1	3	Y3
4	2	1	Y4
5	2	2	Y5
6	2	3	Y6
7	3	1	Y7
8	3	2	Y8
9	3	3	Y9
10	4	1	Y10
11	4	2	Y11
12	4	3	Y12
13	5	1	Y13
14	5	2	Y14
15	5	3	Y15
16	6	1	Y16
17	6	2	Y17
18	6	3	Y18

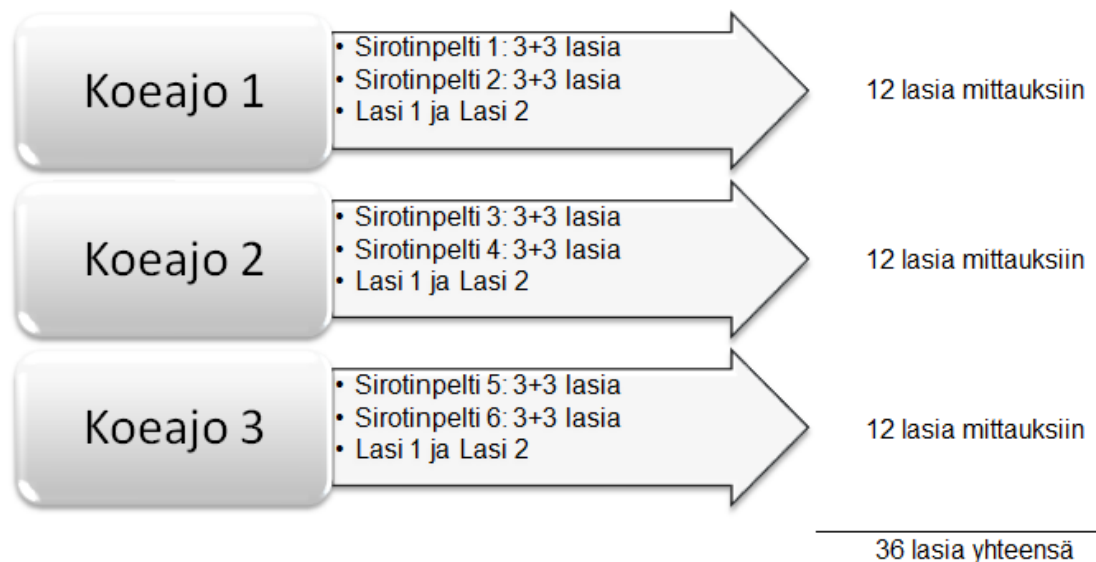
Kuva 22. Tutkimuksen DOE-kokeet ortogonaalimatriisissa. Harmaalla värillä merkatut koenumerot suoritetaan koeajoissa 1-3

Koeajot 1-3 suoritetaan kahdella lasikoolla, jossa tutkitaan niin sanottua työn päälasia ja pientä lasia eli lasi 1:stä ja lasi 2:sta. Näin ollen koeajoissa 1-3 suoritetaan yhteensä 12 koetta ortogonaalimatriisista. Koeajoissa halutaan ymmärtää, kuinka iso vaikutus lasin fyysisellä koolla on reunajännitysten muodostumiseen. Jos niillä on iso merkitys, niin sen jälkeen otetaan käyttöön vielä yksi lasikoko (lasi 3) seuraavissa koeajoissa. Koeajoissa on kaksi muuttujaa, joista toinen on lasikoko (tekijä B) ja toinen muuttuja on sirotinpelti (tekijä A), joita on yhteensä kuusi kappaletta. Sirotinpellit nimetään tässä tutkimuksessa numeroilla 1-6. Ne on yrityksen muottitiimi tehnyt omalla verstaallaan piirustusten pohjalta. Mitat on sirotinpelleissä 2-4 täysin samat kuin tehtaalla on käytössä muuallakin. Sirotinpellit laitetaan kiinni jäähdytysputken päähän kahdella ruuvilla, jotta ne on helppo irrottaa ja vaihtaa. Yhteen koeajopäivään tulee kolme sirotinpeltien vaihtoa, paitsi ensimmäiseen koeajopäivään tulee kaksi. Ensimmäinen vaihto tulee silloin kun otetaan nykyinen pois uunista ja laitetaan koeajon ensimmäinen sirotinpelti uuniin, toinen tulee kun vaihdetaan koeajon jälkimmäinen sirotinpelti uuniin ja kolmas tulee kun vaihdetaan uunin nykyinen sirotinpelti takaisin uuniin. Tämän takia sirotinpeltien kiinnitys täytyy olla helppo. Joissakin uuneissa ne on hitsattu kiinni, mutta näissä koeajoissa lähtökohta on ollut koko ajan, että ne laitetaan ruuveilla kiinni. Uunissa on muutamien senttien levyinen pelti puhallusaukon ylä- ja alapuolella, joten sirotinpellit kiinnitetään niihin.

Koeajojen onnistumisen kannalta on erittäin tärkeää, että koeajot sujuvat tasaisesti ja rauhallisesti. Tässä suurin haaste on sirotinpeltien vaihto. Koska uuni käy yli 600 °C:ssa, niin uunin on pakko jäähtyä jonkin aikaa, jotta sirotinpeltejä voi mennä sinne vaihtamaan. Uunin jäähdyttämällä on taas vaikutusta muun muassa siihen, että alkaako taivutus lämpimästä vai kylmästä uunista. Lisäksi uunin jäähdyttäminen hukkaa tuo-

tantokapasiteettia aivan turhaan. Näin ollen käytännön koeajojen suorittamisen lähtökohta oli, että sirotinpellin vaihtoja tulisi mahdollisimman vähän.

DOE -kokeista muodostettiin käytännön näkökulma huomioiden kolme erilaista koeajoa (Kuva 23), joista tulee yhteensä 36 lasia taivutetuksi. Kaikki nämä lasit mitataan tehtaan laboratoriossa ja siellä niihin tehdään myös kaikkiin raaputustesti. Yhdellä sirotinpellillä taivutetaan kolme lasia molemmilta puolilta uunia, jonka jälkeen sirotinpelti vaihtuu. Yhdessä koeajossa on kaksi sirotinpeltiä, joten kolmessa koeajossa tulee käytyä kaikki kuusi sirotinpellit läpi. Kohdeyritys halusi tähän vaiheeseen kolme lasia yhtä lasikokoa ja sirotinpeltiä vastaan. Kolme lasia tuo enemmän luotettavuutta mittauksiin kuin yksi lasi. Sirotinpeltien määrä koeajossa pyrittiin saamaan mahdollisimman jouhevaksi tuotannon virtauksen kannalta. Nyt yhteen pukkiin menee kuusi lasia, jonka jälkeen pukki laitetaan eteenpäin laminointiin. Normaalitilanteessa näitä lasia menee pukille 7-9 lasia, joten nyt päästään lähes normaaliin määrään. Pukit laitetaan normaali tuotantotilanteessa aina täyteen, jotta niitä riittää kaikille kammiouuneille. Nyt kun on kuusi lasia yhdessä pukissa, niin laminoinnin jälkeen koko pukki on helppo ohjata suoraan laboratorioon mittauksiin. Jos lasia olisi monessa eri pukissa sekaisin normaalien lasien kanssa, niin aina kasvaa riski sille, että lasit päätyisivät turhaan pakkaamoon asti.



Kuva 23. Kolmen ensimmäisen koeajojen rakenne

Kaksi lasikokoa koeajoihin sopii hyvin myös taivuttamisen kannalta. Nyt uunin molemmat vaunut ovat käytössä kuten normaalitilanteessakin ja molemmissa suoritetaan samaa aikaa koeajoja. Koska molemmat vaunut ovat käytössä, niin silloin ei tule kylmiä lähtöjä, vaan taivuttaminen on jouhevaa ja mahdollisimman normaalia. Yksi tekijä reuna- ja jännitysten muodostumiseen oli syy-seuraus -kaaviossa kahden vaunun käyttö vs. yhden vaunun käyttö ja tällä tavalla tämä haitta on eliminoitu näissä koeajoissa. Yksi koeajo kestää noin 1,5 työvuorota eli 12 tuntia. Normaalitilanteessa nämä lasit tulisi tehtyä yhdessä vuorossa, mutta uunia pitää jäähdyttää sirotinpeltien vaihdon ajaksi. Tähän on apuna kunnossapidolta viilennyspuhallin, mutta siitä huolimatta uunia pitää jäähdyttää ainakin 30 minuuttia ennen kuin sinne voi mennä sirotinpeltejä vaihtamaan.

Yhdestä koeajosta tulee kaksi pukkiä, joista molemmissa on kuusi lasia. Kuusi lasia mittaa laboratoriossa päivässä, eli pelkästään mittaukset yhdestä koeajosta vievät kaksi

päivää aikaa. Aina ennen seuraavaa koeajoa kaikki edellisen koeajon lasit mitataan, jotta testilasit eivät vie tilaa tuotannosta ja siten saadaan myös hieman tietoa siitä, mitä tuloksia edellisestä koeajosta tuli ja onko esimerkiksi raportoinnissa parannettavaa seuraavaan koeajoon. Jos tekee esimerkiksi kaikki koeajot samana viikkona, silloin syntyy kauhea suma laboratorioon. Tässä tutkimuksessa ainakin koeajojen 1-3 kaikki lasit päätyy suoraan roskalavalle, joten kaikkia laseja ei voida tehdä peräkkäisinä päivinä. Koeajot on suunniteltu siten, että yksi koeajo ottaa aikaa enintään kaksi viikkoa. Tähän kuuluu itse koeajojen suorittaminen, valvonta, mittaus laboratorioissa ja analysointi. Mittauksen jälkeen pyritään analysoimaan tuloksia, jotta viimeisen koeajon jälkeen olisi helppompaa lähteä analysoimaan heti kokonaisuutta. Ennen seuraavaa koeajoa vielä valmistellaan tulevaa koeajoa käymällä läpi koeajosuunnitelmat ja päätetään koeajojen taivuttaja sekä päiväkohtaisesti milloin koeajo suoritetaan. Tälläkin on väliä, koska koeajoja varten tuotannonsuunnittelun pitää leikata erikseen 12 lasia, joille ei ole tilausta. Nämä lasit laitetaan tuotekehitys -raportoinnilla eteenpäin, joka poikkeaa hieman normaalista toiminnasta. Koska laseja voi hajota esimerkiksi kärryllä tai uunissa, niin 12 lasia ei riitä, vaan laseja leikataan hävikkivaralla, jotta saataisiin koeajosta haluttu määrä laseja laboratorioon mittauksiin.

3.6.3 Koeajo 4 optimaalisen jäähdytysmenetelmän löytämiseksi

Tässä vaiheessa lukijan kannattaa siirtyä lukuun 4.1, koska siellä esitellään koeajon 1-3 tulokset ja sen jälkeen suositellaan palaamaan takaisin tähän lukuun. Kolmen ensimmäisen koeajon tuloksien pohjalta on suunniteltu viimeinen koeajo eli koeajo 4, jonka tarkoitus on löytää kaikista paras jäähdytysmenetelmä.

Tämä tutkimus määriteltiin alussa siten, että suoritetaan yhteensä neljä koeajoa. Koeajojen 1-3 tehtävä oli antaa ymmärrystä siitä, miten erimuotoiset sirotinpellit vaikuttavat reunajännityksiin. Näissä koeajoissa oli mukana isoin ja pienin lasi, koska haluttiin tutkia sitä, onko lasikoolla merkitystä reunajännitysten muodostumisiin. Koeajo 4:n suunnitelma jätettiin vielä suunnitteluvaiheessa auki, koska aluksi ei vielä tiedetty mitä tässä halutaan tutkia. Alunperin tässä piti tutkia keskimmäistä lasikokoa, mutta koeajojen 1-3 tulokset osoittivat, että lasikoolla ei ole käytännössä merkitystä reunajännitysten muodostumisiin. Kaikilla kuudella sirotinpellillä ison ja pienen lasin keskiarvotulos vetojännitykselle oli lähes sama ja puristusjännityksessä vastaavassa tuloksessa oli vain noin 2-4 MPa:n eroja. Yksittäisiä mittauspisteitä lukuunottamatta tulokset olivat saman suuntaisia. Näin ollen viimeisessä koeajossa ei tutkita keskikokoista lasia (lasi 3) kuten alunperin piti, vaan siinä tutkitaan jotakin uutta asiaa tämän tutkimuksen kannalta, jotta saadaan laajempi käsitys reunajännitysten muodostumisesta. Kuvassa 22 esitetyssä DOE -kokeista siis koenumeroita 3, 6, 9, 12, 15 ja 18 ei suoriteta tässä tutkimuksessa.

Tässä vaiheessa palataan takaisin syy-seuraus -kaavioon (Kuva 15), koska sieltä on syytä poimia seuraava tutkittava asia. Kaaviossa on kaikki ne asiat, joiden on katsottu vaikuttavan reunajännitysten muodostumiseen. Koeajoissa 1-3 tutkittiin laitetta, koska uunin ilmavirta liittyy siihen. Näin ollen on ajateltu, että uunin ilmavirta on isoin ratkaiseva tekijä laitteen asioista, joten koeajossa 4 kannattaa tutkia jotain muuta kategorialta, jotta tästä tutkimuksesta saadaan mahdollisimman laaja näkemys reunajännitysten muodostumisiin. Laitteen lisäksi menetelmä nostettiin luvussa 3.3 esille siten, että sen kategorian asioilla voi olla mahdollisesti merkittävä vaikutus reunajännitysten muodostumisiin. Näin ollen kannattaa tutkia jotain asiaa menetelmä -osiosta. Sieltä nousee esille

kaksi mielenkiintoista asiaa: Jäähdytysnopeus ja puhallusteho. Jäähdytysnopeudella tarkoitetaan prosessissa olevia viittä eripituista jäähdytysaskelta. Lasin reunajännitykset muodostuvat käytännössä ensimmäisellä askelluksella, joten tutkimuksen kannalta voi olla turha lähteä muuttamaan ensimmäisen askelluksen aikamäärää, koska silloin muutetaan pieniä marginaaleja. Näin ollen tutkittavasti asiaksi jää puhallusteho. Puhallusteho on normaalituotannossa asetettu siten, että lasi 1:n ensimmäisellä jäähdytysaskeleella puhallusteho on 50 % ja loput neljä jäähdytysaskellusta on 100 %:n puhallusteholla. Lasi 2:lla vastaavat lukemat ovat 50 % ja 70 %. Koska reunajännitykset muodostuvat ensimmäisessä jäähdytysaskelluksella, niin sen takia tässä koeajossa tutkitaan ja muutetaan vain ensimmäisen askelluksen puhallustehoa. Jäähdytysaskeleet 2-5 pidetään ennallaan, koska niillä ei uskota olevan niin isoa merkitystä reunajännitysten muodostumiseen kuin ensimmäisellä askelluksella. Koska molemmilla laseilla on ensimmäinen jäähdytysaskelluksen puhallusteho on 50 %, niin tässä kokeessa niitä voidaan muuttaa samanlaisesti molempiin laseihin.

Seuraava valittava asia on tämän koeajon muuttujat. Yksi muuttuja on jälleen lasikoko ja se on sama kuin ennen eli lasi 1 ja lasi 2. Toinen muuttuja on tähän koeajoon valittu puhallusteho ja tarkemmin sanottuna ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallusteho. Kolmas muuttuja on sirotinpelti. Sirotinpeltien keskiarvotulokset olivat niin lähellä toisiaan, että kaikkia sirotinpeltejä ei tässä koeajossa enää kannata tutkia. Yksi tämän tutkimuksen päätavoitteista oli saada aikaan vakaampi prosessi, joka tarkoittaa pienempää hajontaa. Tämän takia tähän koeajoon ainoaksi sirotinpeltimuuttujaksi valikoitui sirotinpelti 5, koska sen hajonta veto- ja puristusjännityksen osalta oli selvästi pienin verrattuna muihin sirotinpelteihin. Sirotinpelti 5 ohjaa ilmaa kammiouuniin kaikkein tasaisesti, koska se päästää ilmaa myös läpi eikä vain ohjaa ilmaa vasemmalle ja oikealle. Tämä muuttuja on vakioitu eli sitä ei muuteta, mutta se on mukana koematriisissa sen takia, että se ei ole normaalitilanteessa kammiouunissa käytössä. Puhallustehon säädöllä pyritään saamaan aikaan mahdollisesti parempia tuloksia, vaikka nytkin keskiarvotulokset kyseisellä sirotinpellillä koeajoissa 1-3 oli samanlaisia kuin muilla sirotinpellillä. Puhallustehon säätämällä haetaan sitä kaikkein optimaalisinta jäähdytysprosessia, koska pienen hajonnan ansiosta sirotinpelti 5:lla on mahdollisuus olla kaikkein paras ilmavirran hajottaja. Puhallustehon laskeminen on perusteltavissa myös sillä, että sirotinpelti 5 päästää ilmaa eniten läpi kaikista sirotinpellistä. Näin ollen puhallustehojen laskeminen voi saada aikaan parempia vieläkin parempia tuloksia.

Muuttujien eli tekijöiden valitsemisen jälkeen pitää muodostaa jälleen DOE -koematriisi (Kuva 24) siitä, miten koeajo suoritetaan. Taulukossa 3 on selitetty mitä tekijöiden numerot tarkoittavat sanallisesti.

Taulukko 3. Koeajon 4 tekijöiden numerot sanallisesti

Tekijä A:	1 = lasi 1
Lasikoko	2 = lasi 2
Tekijä B:	1 = 40 %
Puhallusteho	2 = 50 %
	3 = 30 %
Tekijä C: Sirotinpelti	5 = sirotinpelti 5

Liian nopea jäähdytys saa aikaan huonoja reunajännityksiä. Näin ollen puhallustehojen valinta perustui siihen, ettei nykyistä puhallustehoa ainakaan muuteta nykyistä suurem-

maksi. Tässä koeajossa ei tutkita esimerkiksi 20 %:n puhallustehoa, koska ilmavirta oli siinä vain noin 1,0 m/s. Tämä on todella alhainen lukema, kun 50 %:n puhallustehossa ilmavirta on 6,0-7,0 m/s. Näin ollen 20 %:n ei uskota vaikuttavan positiivisesti reunajännityksiin, joten se jätetään kokonaan pois. Puhallustehojen alarajaksi valitaan näin ollen 30 %:n puhallusteho. Tässä koeajossa halutaan tutkia myös nykyistä puhallustehoa (50 %), joka on tutkittu jo aikaisemmassa koeajossa. Tämän avulla saadaan tietoa siitä, että millainen on niin sanottu normaali vaihtelu prosessissa eri päivien välillä. 50 %:n ja 30 %:n väliin jää keskivaiheelle 40 %, joten se on viimeinen tutkittava puhallusteho.

Muiden jäähdytysaskelluksien puhallustehot pidetään ennallaan. Jokainen DOE - koenumero suoritetaan kaksi kertaa (peräkkäin), jotta jokaisesta kokeesta saataisiin kaksi lasia mittauksiin ja sitä kautta enemmän varmuutta tuloksiin. Kaksi lasia halutaan myös sen takia, että joskus lasi voi hajota esimerkiksi laminointilinjalta tai autoklaavis- sa. Jos jokaisesta koenumerosta tehtäisiin vain yksi lasi, silloin lasin hajottua ennen mit- tauksia sitä ei päästäisi lainkaan mittaamaan. Koeajoissa 1-3 jokaisesta koenumerosta suoritettiin kolme toistoa, joten tässä kokeessa tehdään yksi toistomäärä vähemmän, mutta tässä suoritetaan enemmän kokeita yhdessä koeajossa kuin koeajoissa 1-3. Näin ollen koeajopäivän kesto on tunneissa saman verran kuin aikaisemmin ja laseja tulee tutkittavaksi saman verran kuin aikaisemmin. Tämä on oikeastaan maksimimäärä laseja yhdellä koeajolla yhtenä päivänä, koska muuten koeajopäivä venyisi liian pitkäksi.

KOENUMERO	TEKIJÄ			KOETULOS
	A	B	C	
1	1	1	5	Y1
2	2	1	5	Y2
3	1	2	5	Y3
4	2	2	5	Y4
5	1	3	5	Y5
6	2	3	5	Y6

Kuva 24. Koeajon 4 DOE-kokeet ortogonaalimatriisissa

Myös tässä koeajossa mitataan ilmavirtaukset kaikista neljästä puhallusputkesta ennen koeajoa ja koeajon jälkeen. Koska sirotinpelti on koko koeajon vakio, niin ajan säästä- misen ja taivuttamisen sujumisen takia kesken koeajon ei kannata mitata ilmavirtauksia. Ilmavirrat mitataan ennen koeajoa kaikki kolme puhallustehoa samalla kerralla ja koe- ajon päätyttyä tehdään myös samoin. Tästäkin koeajosta tulee yhteensä 12 lasia taivute- tuksi, joista kuusi on lasi 1:stä ja kuusi on lasi 2:sta. Kaikki lasit päätyvät jälleen labora- torioon, jossa laseille tehdään samat mittaukset kuin aikaisemmissa koeajoissakin.

4. TULOKSET

Neljännessä luvussa käydään läpi tutkimuksen tulokset. DOE-kokeet jaettiin kahteen eri osaan: Koeajot 1-3 ja Koeajo 4. Koeajojen 1-3:n tarkoitus oli tutkia tutkimuksen isointa (lasi 1) ja pienintä lasia (lasi 2) ja löytää vastaus sille, että miten paljon erilaisemmin reunajännitykset muodostuvat isoon ja pieneen lasiin sekä miten paljon erilaisemmin erimuotoiset sirotinpellit muodostavat reunajännityksiä. Vasta näiden koeajojen jälkeen määriteltiin neljäs koeajo. Tässä osiossa luvussa 4.3 ja 4.4 on DMAIC -menetelmän kolmas vaihe eli analysointivaihe, koska tässä luvussa analysoidaan tuloksia ja sen perusteella tehdään toimenpidesuosituksia seuraavassa luvussa.

Koeajot on jaettu kahteen alaotsikkoon, koska koeajoissa 1-3 tutkittiin pientä ja suurinta lasia ja niissä minkään koeajon tulos ei ole riippuvainen toisen koeajon tuloksista. Neljännen koeajon tavoite määriteltiin vasta koeajojen 1-3 jälkeen, kun tiedettiin tarkemmin mitä asioita tässä tutkitaan. Neljäs koeajo on siis riippuvainen koeajojen 1-3 tuloksista, koska niiden perusteella tehtiin valinta, mitä tässä koeajossa tutkitaan. Luvussa 5.1 on esitetty yhteenvetona molempien lasikokojen mittaustulokset lasikoko kerrallaan siten, että yhdessä kuvassa on keskiarvoviiva jokaisen sirotinpellin tuloksesta. Tässä luvussa tulokset esitetään koeajo ja sirotinpelti kerrallaan.

4.1 Koeajot 1-3 ilmavirtojen muodostajien merkityksen selvittäjänä

Koeajot 1-3 toteutettiin suunnitelman mukaisesti (Kuva 23). Näissä koeajoissa suoritettiin seuraavat DOE-kokeet (Kuva 22): 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16 ja 17. Lasikoko tutkittiin lasista 1 ja lasista 2. Näiden kanssa tutkittiin kaikki sirotinpellit siten, että yhdessä koeajossa oli aina käytössä kaksi erimallista sirotinpeltiä.

Ennen jokaista koeajoa suljettiin pois mahdollisia häiriötekijöitä. Puhallusputkien asennettavat sirotinpellit ohjaavat ilmaa ja koeolosuhteiden varmistamiseksi on äärimmäisen tärkeää, että puhallusputkien ilmavirrat ovat samoja koko koeajojen aikana. Ilmavirrat mitattiin jokaisesta koeajosta koeajon aluksi, puolessa välissä ja lopuksi. Näin saadaan vakioitua yksi tekijä ja tuloksien reliabiliteetti nousee. Ilmavirrat mitattiin laittamalla uunin jäädytyksen puhallusteho täysille ja sen jälkeen puhallusputken päähän laitettiin ilmavirtamittari, jonka avulla mitattiin ilmavirrat kaikista neljästä puhallusputkesta ja ne kirjattiin ylös. Koeajojen aikana ilmavirrat eivät vaihdelleet mitenkään radikaalisesti ja ilmavirtaus oli kaikkien kolmen koeajojen aikana 10,0-11,3 m/s. Nämä ilmavirrat tulivat silloin, kun puhallusteho on 100 %. Jäädytysprosessissa puhallustehot eivät ole kaikissa laseissa 100 %, mutta tällä mittauksella saadaan varmistus, että puhallustehot ovat samat ennen jokaista sirotinpeltiä ja ne eivät tuo vaihtelevuutta tuloksiin. Samalla otettiin ylös myös ulkolämpötila, koska se vaikuttaa tehtaan sisälämpötilaan, minkä seurauksena uuniin puhallettava jäädytysilma voi olla hieman eri lämpöistä. Koeajot 1-3 suoritettiin syksyllä viikoilla 40-48. Kahdessa ensimmäisessä koeajossa ulkolämpötila oli klo 12.00 +7 astetta ja kolmannessa koeajossa ulkolämpötila oli klo 12.00 -3 astetta,

joten kolmannessa koeajossa ulkolämpötila oli kylmempää verrattuna kahteen ensimmäiseen koeajoon.

Puhallustehot vakioitiin siten, että jokaisen koeajon aluksi katsottiin uunin ohjauspaneelistä, että puhallustehot ovat kuten taivutuskortissa lukee. Koeajoissa ison lasin ja pienen lasin puhallustehoissa oli hieman eroa johtuen lasien pinta-alaerosta. Ison lasin pinta-ala on $4,6 \text{ m}^2$ ja pienen lasin pinta-ala on $3,4 \text{ m}^2$, joten iso lasi vaatii hieman enemmän puhallustehoa jäähtyäkseen. Jäähdytysprosessissa on viisi askelta ja puhallustehot on asetettu niiden mukaan. Isossa lasissa ensimmäisessä jäähdytysvaiheessa puhallusteho on 50 % ja sen jälkeen lopuissa jäähdytysvaiheissa puhallusteho on 100 %. Pienen lasin puhallustehot olivat ensimmäisessä jäähdytysvaiheessa 50 % ja lopuissa jäähdytysvaiheissa 70 %. Tämä selittyy sillä, että pienempi lasi ei vaadi niin paljon puhallusta jäähtyäkseen kuin iso lasi ja näin ollen sille riittää pienempi määrä jäähdytysilmaa. Puhallustehoissa pitää huomioida, että puhallustehoa pystyy ohjaamaan myös käsin. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi silloin kun näyttää siltä, että uunin lämpötila menee yli sen mitä halutaan ja se pitää saada nopeasti jäähtymään. Käsipuhalluksen teho on aina 100 %, joten jos sitä joudutaan käyttämään niin etenkin pienessä lasissa tämä vaikuttaa reunajännitysten muodostumiseen. Tästä syystä mittaolosuhteiden vakioimiseksi koeajoissa ei käytetty lainkaan käsipuhallusta. Jäähdytysprosessissa on yhteensä viisi eri porrasta, jolloin vaunu aina laskee uunissa. Vaunun laskeutumisessa alaspäin vaunun ja uunin seinän rako kasvaa, jolloin myös siitä pääsee ilmaa sisään uuniin. Näiden eri vaiheiden kestoajat riippuu esimerkiksi lasin koosta. Isommalla lasilla jäähdytysprosessi kesti yhteensä 11,5 minuuttia ja pienellä lasilla 10,5 minuuttia. Vaiheiden ajat menivät seuraavasti isolla lasilla: Ensimmäinen jäähdytysvaihe 6,2 minuuttia, toinen 1,7 minuuttia, kolmas 1,6 minuuttia, neljäs 0,7 minuuttia ja viides 1,2 minuuttia. Vastaavasti pienelle lasille nämä ajat olivat seuraavat: Ensimmäinen jäähdytysvaihe 3,8 minuuttia, toinen 1,4 minuuttia, kolmas 1,3 minuuttia, neljäs 1,7 minuuttia ja viides 2,3 minuuttia. Nämä ajat on määritelty silloin, kun tuotetta ajetaan sisään kyseiseen uuniin. Iso lasi vaatii jäähdytysaikaa minuutin enemmän kuin pieni isomman lasimassansa takia.

Isoon lasiin riitti yksi taivuttaja, mutta pienempi lasi on kahdentehtävä lasi. Koeajoissa taivuttaja oli muuten pääosin sama henkilö, mutta pienen lasin toinen taivuttaja vaihtui. Joissakin koeajoissa taivuttaja vaihtui silloin kuin työvuoro vaihtui, mutta tätä asiaa ei huomioida tämän työn kannalta sen enempää, koska se on ihan normaalia tuotantotoimintaa. Taivuttajan vaihtuminen otettiin ylös koeajopäiväkirjaan, koska vaihtunut taivuttaja voi olla virhelähde koeajojen tulosten kannalta kun yksi tekijä muuttuu. Toisaalta nyt saatiin myös dataa siitä, vaikuttaako taivuttajan vaihto tuloksiin. Sen ei pitäisi vaikuttaa tuloksiin, koska lasit taivutettiin taivutuskortin mukaan. On kuitenkin huomioitava, että eri ihmisellä voi olla eri herkkyys tarttua esimerkiksi käsipuhallukseen ja näin ollen reunajännitysmittausten tulokset voivat vaihtua hieman.

Seuraavissa kolmessa luvussa esitellään koeajojen 1-3 reunajännitysten mittaustulokset laseista sekä tulosten histogrammit.

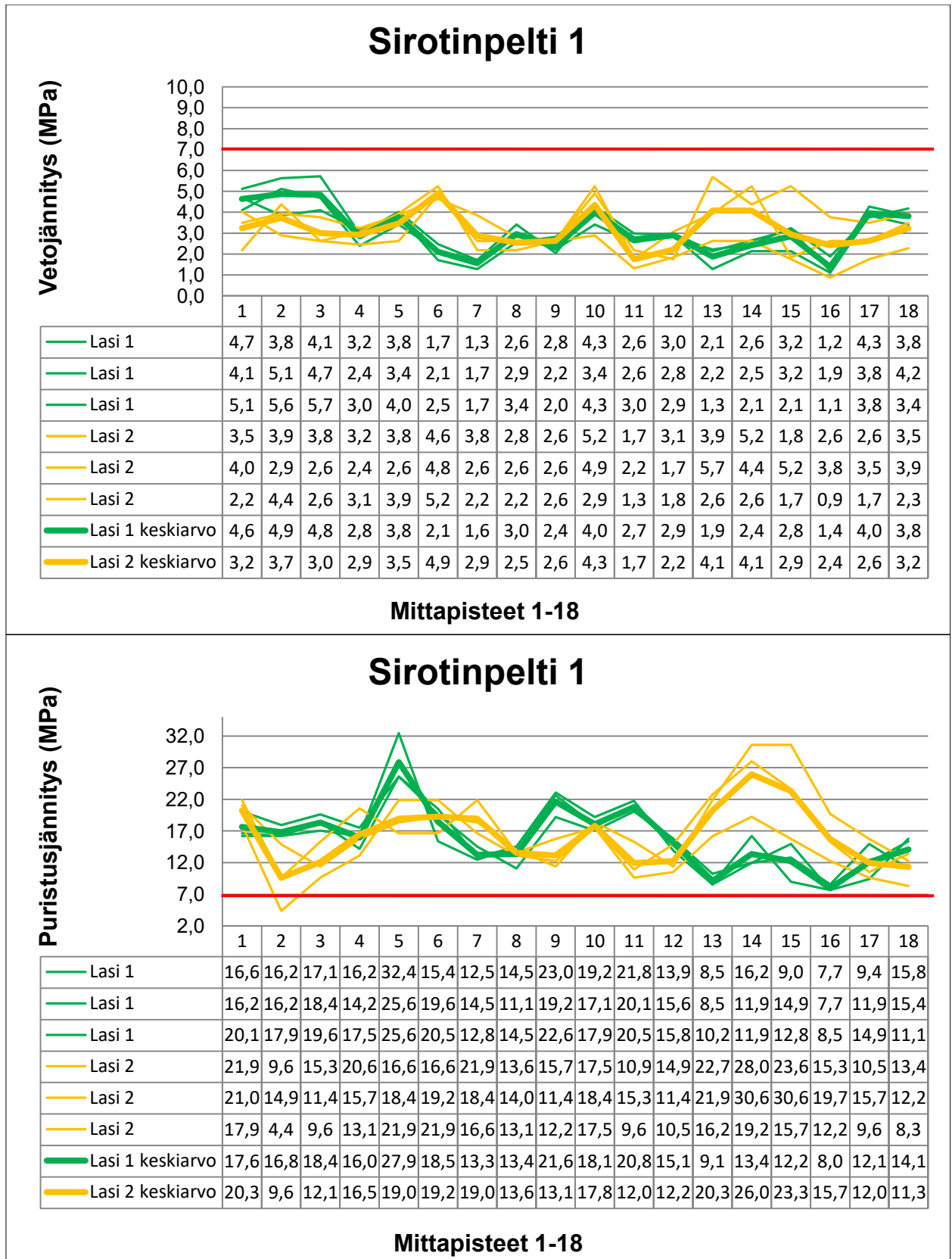
4.1.1 Koeajon 1 tulokset

Ensimmäisen koeajon sirotinpellit olivat sirotinpelti 1 ja sirotinpelti 2. Sirotinpelti 1 on normaalitilanteessa asennettuna kammiouuniin, joten näin ollen koeajon aikana saadaan nykytilanteesta enemmän tietoa, vaikka suoritetaankin koeajoja eli pyritään samaan uutta tietoa. Sirotinpelti 1 ohjaa ilmaa isommassa kulmassa suhteessa sirotinpelti 2:seen. Tässä koeajossa lasi 1:n ja lasi 2:n kaikki lasit kestivät mittausprosessiin kuuluvat raaputustestit laboratoriossa mikä on hyvä merkki. Molempien lasikokojen kaikki lasit näyttivät normaalilta polarisaatiotaululla sillä kummastakaan lasikoosta ei tullut esille yhtään punaista kohta. Normaali eli hyvä lasi näyttää polarisaatiotaulussa siniseltä ja huonot kohdat näyttäytyvät punaisina kohtina. Jos lasissa on jokin punainen kohta, silloin se kertoo siitä, että kyseisen kohdan reunajännitys ei ole sellainen kuin sen kuuluisi olla. Lasin kaarissa on usein hieman punaisempaa kuin keskellä, koska ilma puhaltaa niihin suoraan. Tätä on kuitenkin mahdoton korjata nykyisellä menetelmällä. Päämittausten perusteella koeajon sirotinpellit toimivat hyvin.

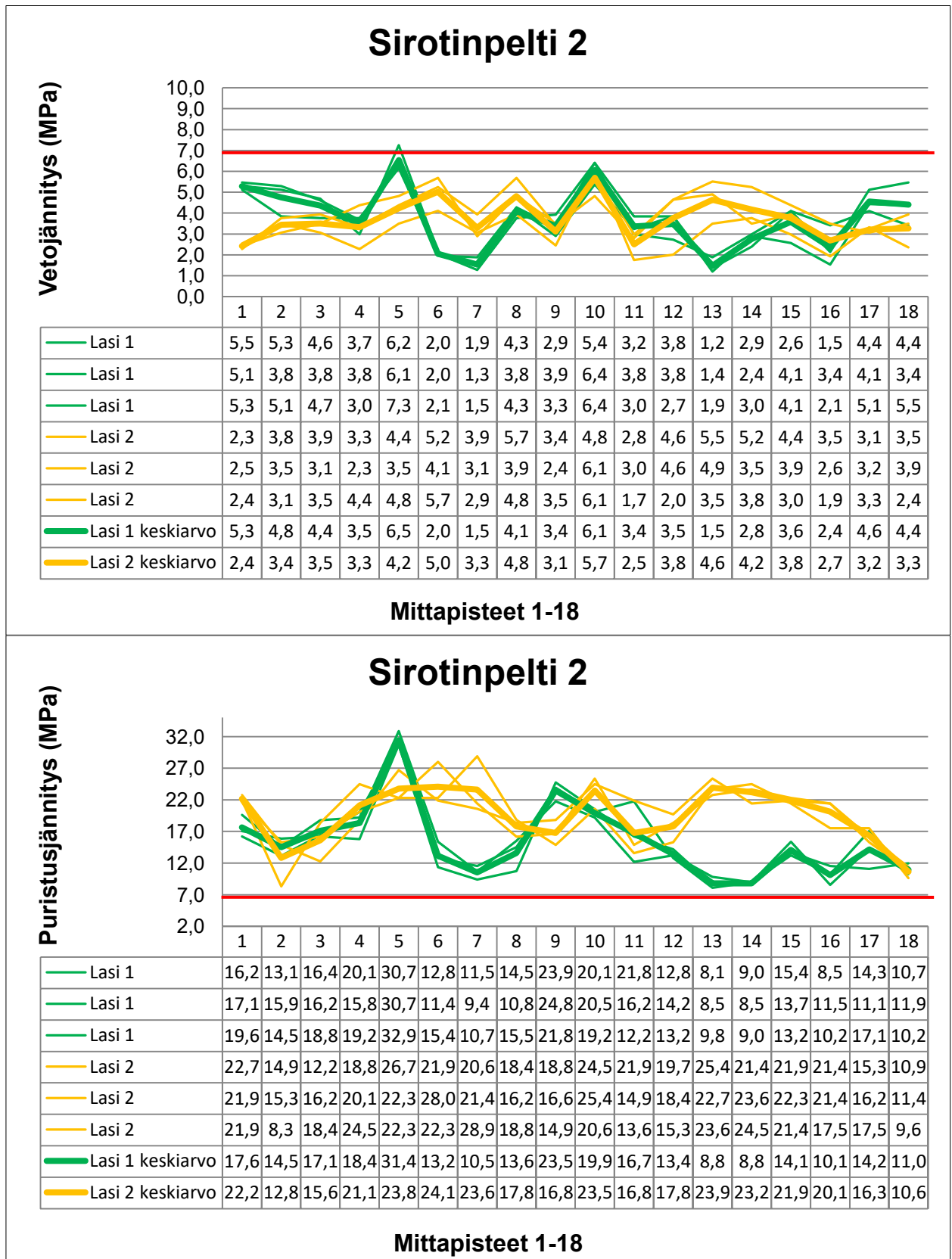
Kuvissa 25 ja 26 on esitelty reunajännitysmittausten tulokset molemmille sirotinpelleille. Lisäksi kuviin on lisätty tulosten perusteella keskiarvoviiva, joka on paksuin viiva. Veto- ja puristusjännityksen arvojen asteikot ovat niin paljon erilaisia keskenään, joten sen takia molemmille on piirretty omat kuvaajat. Punainen viiva on toleranssiraja ja siitä nähdään heti se asia, että molempien lasien keskiarvot ovat toleranssirajojen sisäpuolella, joka on ensimmäinen tärkeä havainto mittaustuloksista. Koska molemmankokoisissa laseissa kyseessä on tuulilasi linja-autoon, niin sen takia lasin alareuna on tärkeässä asemassa reunajännitysten takia. Jos kyseinen alue on esimerkiksi juuri toleranssirajojen sisäpuolella, niin lasi hajoaa todennäköisemmin silloin kuin sellainen lasi, jonka mittaustulokset ovat parempia. Esimerkiksi kiven iskut tuulilasiin kohdistuvat todennäköisesti juuri lasin alareunaan, koska linja-autossa lasin alareuna on ylempänä kuin henkilö- tai pakettiautoissa. Näin ollen huomio kiinnittyy alareunaan eli mittapisteisiin 8-12. Sirotinpelti 1 antoi molemmille laseille paremmat tulokset alareunaan. Aiempana tekstissä kuvassa 16 on esitetty mittauspisteiden sijainti lasissa.

Lasi 1:n kohdalla sirotinpelti 1 on parempi vaihtoehto, sillä tässä lasikoossa juuri alareunan keskikohta oli keltaisella kahdella mittatuloksella sirotinpelti 2:lla. Lisäksi mittapisteen 5 vetojännitys oli huomattavasti korkeampi sirotinpelti 2:lla. Tämä kohta on juuri puhallusputken kohdalla, joten tämä malli ei sopinut lasi 1:lle.

Lasi 2:lle sirotinpelti 2 teki myös tälle lasikoolle keskelle alareunaa huonon kohdan. Sirotinpelti 2 toisaalta taas paransi tämän lasin puristusjännityksen tuloksia pienemmällä hajonnalla kuin sirotinpelti 1:ssä.



Kuva 25. Sirotinpelti 1:n veto- ja puristusjäännitysten tulokset



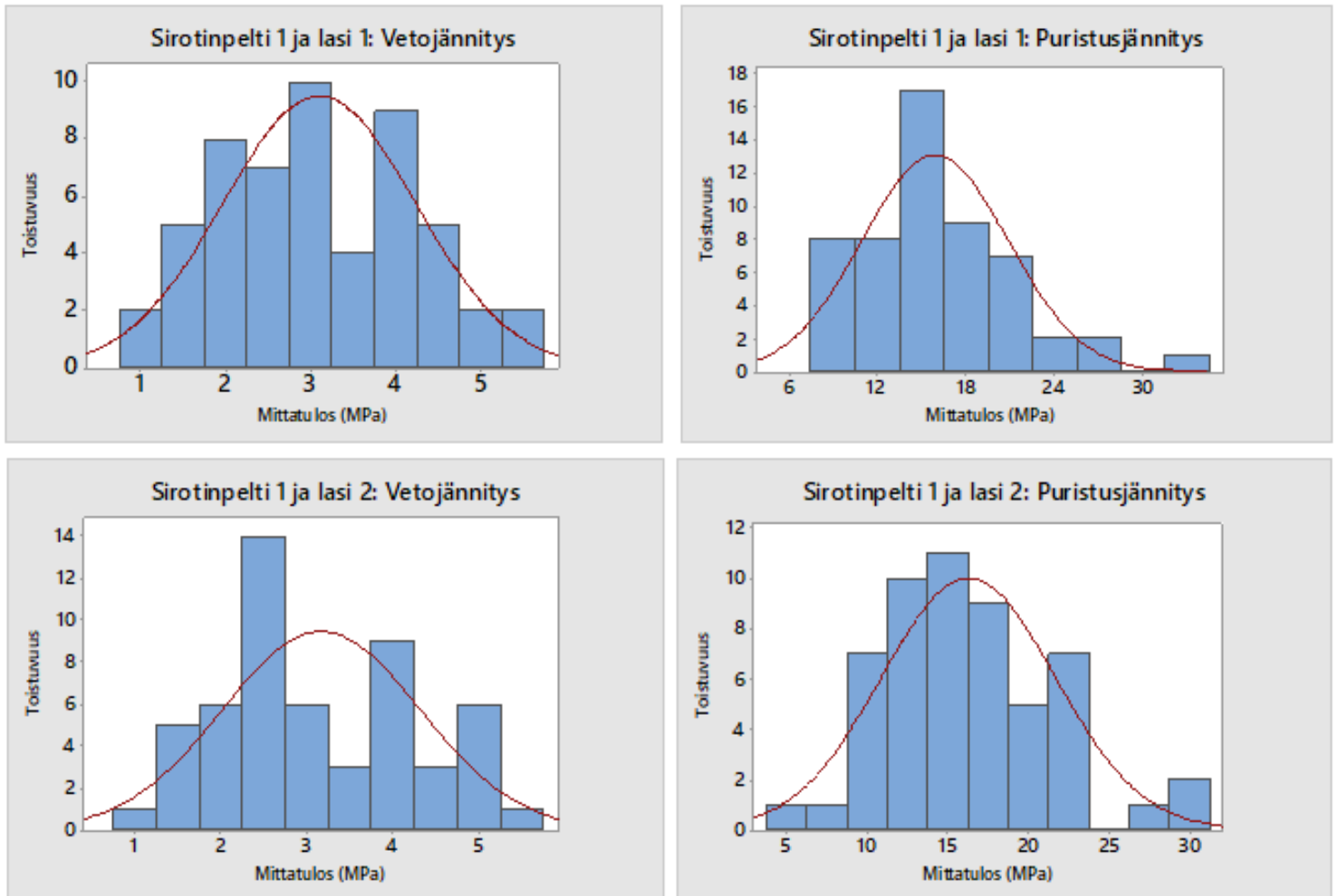
Kuva 26. Sirotinpelti 2:n veto- ja puristusjäännitysten tulokset

Lasi 1 ei muodostanut lasiväliä uunilla, kun taas lasi 2:sen lasivälit nousivat hieman kun sirotinpelti 2 oli käytössä. Lasivälit olivat kuitenkin maksimissaan 0,15-0,20 mm, joten ne eivät aiheuta vielä ongelmia laminoinnissa. Lasin ylitys muotin reunasta -mittauksessa havaittiin lasin liikkuvan jonkin verran taivutuksessa, mikä on ihan luonnollista. Kuitenkaan mitään niin suurta ylitystä tai poikkeamaa ei mittausten välillä ilmennyt, että sen takia reunajännityksen olisivat huonot. Isompi lasi ei liikkunut millimetriäkään sivuttaissuunnassa, mutta pieni lasi liikkui hieman kun taivuttaja vaihtui. Isomman lasin muotin ylityksen olivat ala- ja yläreunasta 10-15 mm välillä ja pienen lasin 10-20 mm välillä. Päädyissä iso lasi ylitti muotin 5 mm ja pieni lasi 8-10 mm. Nämä mitat riippuvat esimerkiksi muotin rakenteesta ja niitä ei voi vertailla keskenään.

Viivakaavioiden lisäksi mittaustuloksista laadittiin histogrammit. Histogrammissa x-akselilla on mittaustuloksen luokka ja y-akselilla on toistuvuus, eli miten monta kertaa kyseinen mittatulos on tullut. Sirotinpelti 1:sen tulokset ovat kuvassa 27. Vastaavasti kuvassa 28 on sirotinpelti 2:sen tulokset. Taulukossa 4 on jokaisen histogrammin keskiarvo ja hajonta. Keskiarvo on kyseisen lasin ja sirotinpellin kaikkien mittatulosten keskiarvo. Mittapistettä veto- ja puristusjännityksessä on 54 mittapistettä yhtä lasikokoja ja sirotinpellin kohtaan. Eli otanta n on 54. Tässä koeajossa vetojännityksen osalta keskiarvo ja hajonta ovat hyvin lähekkäin toisistaan eikä voida sanoa, että eri lasikoko toisi erilaiset tulokset. Puristusjännityksen osalta lasi 1:sen tulokset taas huononivat hieman sirotinpelti 2:seen, kun taas lasi 2 eli pienempi lasi sai parempia tuloksia sirotinpelti 2:lla kuin sirotinpelti 1:lla.

Taulukko 4. Koeajon 1 veto- ja puristusjännityksen tulosten keskiarvo ja hajonta

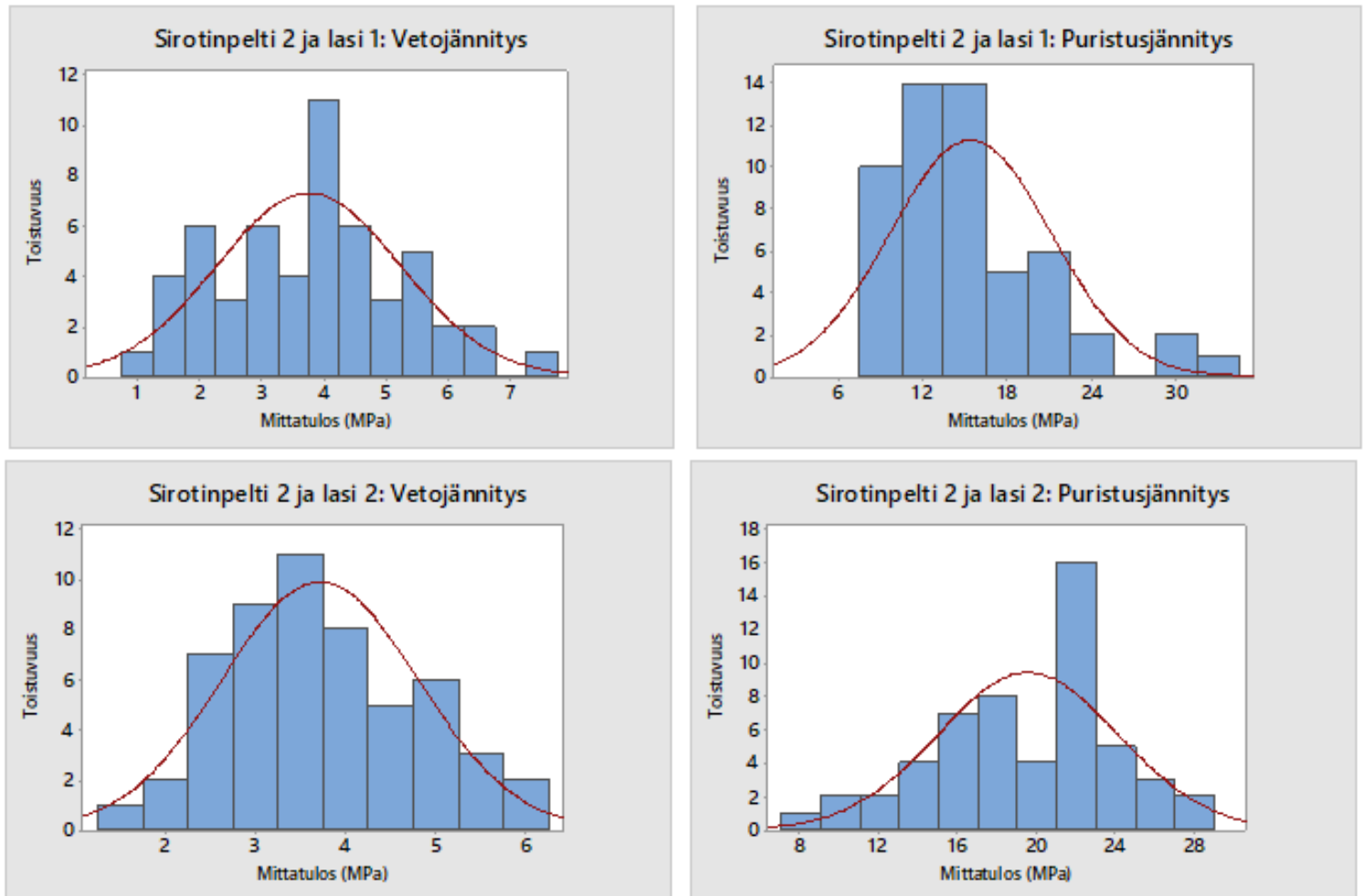
Koeajo 1	Vetojännitys		Puristusjännitys	
	Keskiarvo (MPa)	Hajonta	Keskiarvo (MPa)	Hajonta
Sirotinpelti 1				
Lasi 1	3,10	1,14	15,90	4,95
Lasi 2	3,17	1,14	16,27	5,39
Sirotinpelti 2				
Lasi 1	3,75	1,48	15,38	5,73
Lasi 2	3,71	1,09	19,55	4,58



Kuva 27. Sirotinpelti 1:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä

Molempien lasien puristusjännitys on saanut muutaman arvon, joka on irrallaan muista arvoista. Nämä ovat arvoja 26-32 MPa ja ne ovat korkeita verrattuna muihin arvoihin. Molempien lasien korkeat arvot tulevat mittapisteistä 5, 14 ja 15. Nämä mittapisteet ovat suoraan puhallusputkien edessä ja näin ollen sirotinpeltien muoto vaikuttaa erityisesti juuri näihin kohtiin. Kuvista täytyy huomioida, että niissä on eri asteikko x-akselilla ja näin ollen niitä ei voi ihan verrata keskenään.

Vetojännityksen osalta sirotinpelti 1 antoi lasi 1:lle yleisimmän lukeman 3 MPa ja lasi 2:lle 2,5 MPa. Puristusjännityksen vastaavat lukemat olivat 15 MPa ja 15 MPa. Lasi 2:sen puristusjännitys sai paljon arvoja, jotka ovat välillä 10-22 MPa, kun taas lasi 1:sen arvot ovat jakaantuneet tasaisemmin 8-20 MPa:n välille. Sirotinpelti 2 antoi vetojännitykseen lasi 1:lle tasaisia lukemia, joista yleisin oli 4 MPa. Lasi 2:sen yleisin oli 3,5 MPa. Puristusjännityksen tuloksissa lasi 1 sai alhaisia tuloksia, sillä suurin osa mittauksista ajoittui 8-15 MPa:n välille. Lasi 2:ssä taas selvästi eniten tuli 22 MPa:n tuloksia.



Kuva 28. Sirotinpelti 2:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä

Jokaisen koeajon lopussa käydään vielä läpi, noudattaako koeajon data normaalijakaumaa. Taulukossa 5 on p-arvo jokaiselle datalle, jota tästä koeajosta saatiin. Normaalisuuden testaus on tehty samalla tavalla kuin miten se tehtiin alkumittauksissa ja tässä käytetään jälleen 5 % merkitsevyysrajaa, eli jos p-arvo on suurempi kuin 0,05 niin silloin voidaan olettaa datan noudattavan normaalijakaumaa. Sirotinpelti 1:n ja lasi 2:n vetojännitys ja sirotinpelti 2:n ja lasi 1:n puristusjännitys ei näyttäisi noudattavan normaalijakaumaa.

Taulukko 5. Jakauman normaalisuuden testauksen tulokset p-arvona

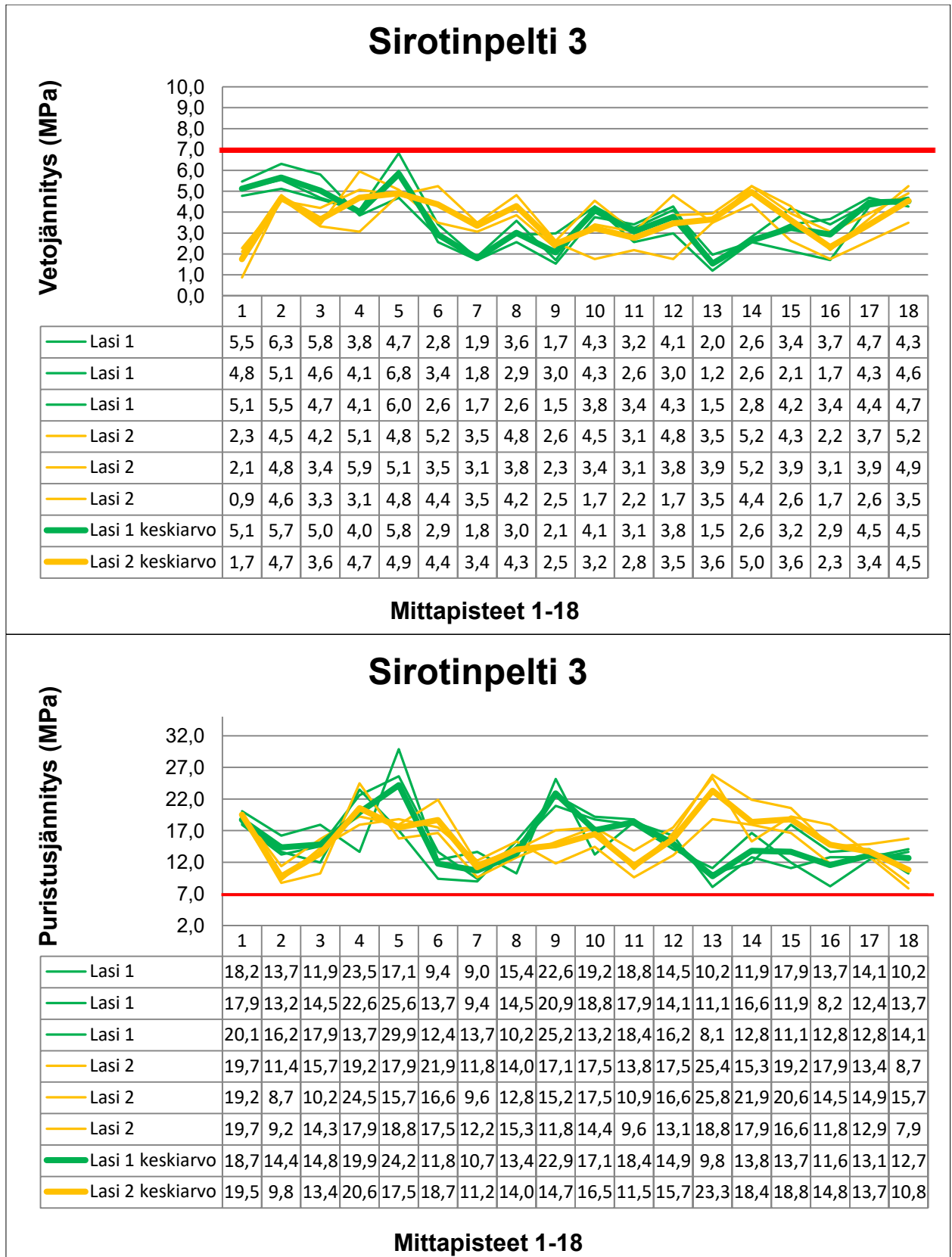
Koeajo 1	Vetojännitys	Puristusjännitys
Sirotinpelti 1: Lasi 1	0,52	0,37
Sirotinpelti 1: Lasi 2	0,01	0,21
Sirotinpelti 2: Lasi 1	0,60	<0,005
Sirotinpelti 2: Lasi 2	0,19	0,13

4.1.2 Koeajon 2 tulokset

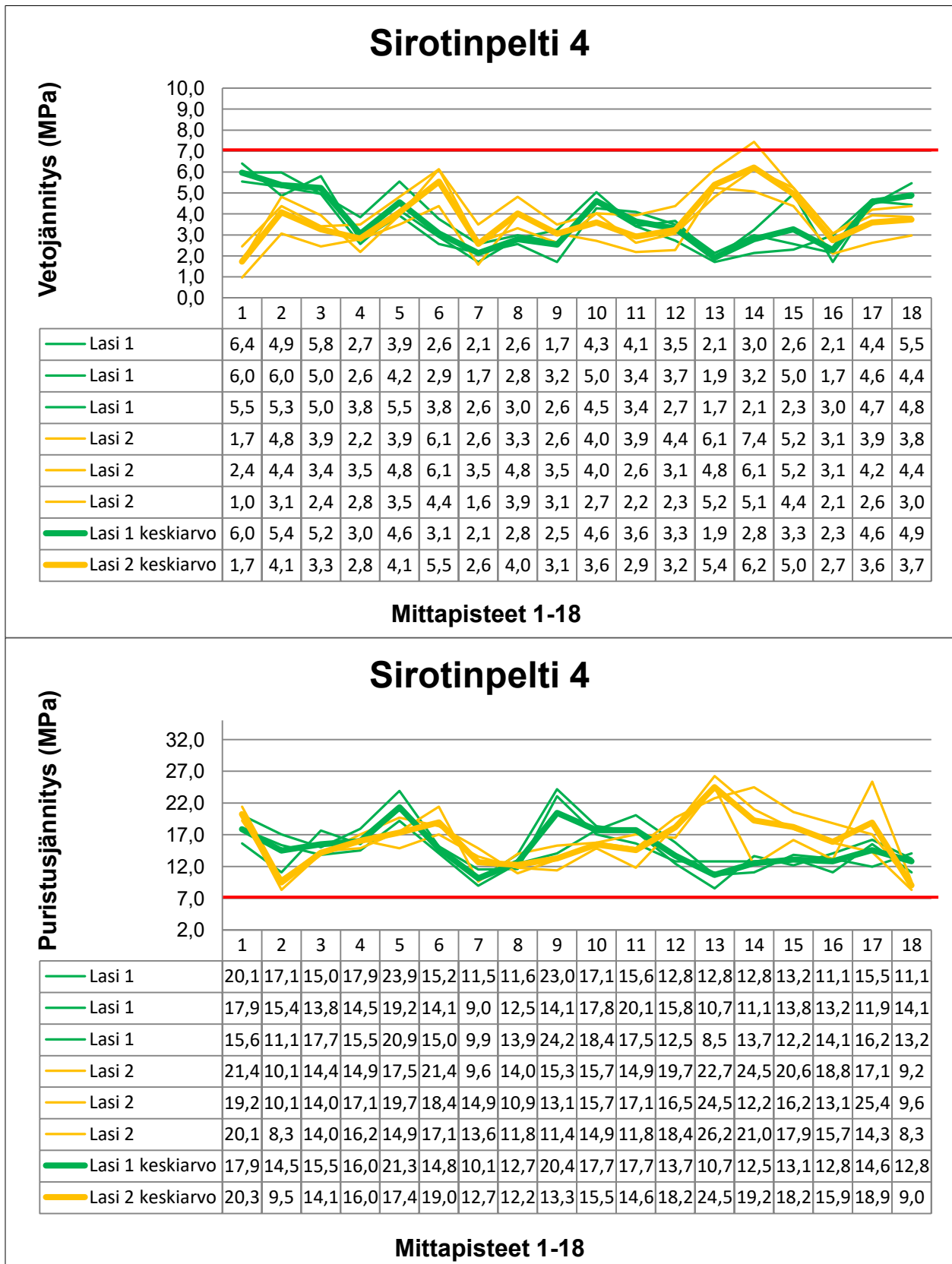
Toisessa koeajossa tutkittiin sirotinpeltejä 3 ja 4. Tutkimukset tehtiin samoille laselle kuin viime koeajossa, eli lasi 1:lle ja lasi 2:lle. Viime koeajossa sirotinpellit olivat uunin nykyinen sirotinpelti ja toinen sirotinpelti oli sellainen, joka on käytössä monessa vanhemmassa kammiouunissa tehtaalla. Tässä koeajossa tutkittiin sitä, että vaikuttaako sirotinpellin leveys reunajännityksiin ja onko keskikohdan leveydellä jotain merkitystä reunajännitysten muodostumiseen. Tässä koeajossa tutkittavat sirotinpellit ovat keskenään ulkoisilta mitoiltaan täysin samat, sillä molemmat sirotinpellit ovat juuri puhallusputken kokoisia niin korkeudeltaan kuin leveydeltäänkin. Sirotinpelti 3 on samanlainen kuin viime koeajossa ollut sirotinpelti 2, mutta ero on siinä, että sen leveys on puolet vähemmän ja sen keskikohta on yli puolet kapeampi. Sirotinpelti 4:ssä ei ole keskikohtaa lainkaan. Tässä vaikutuksena on se, että ilmavirta ei pysähdy keskikohtaan, joten se pääsee suoraan kohdistumaan tasaisesti sirotinpellille. Koska sirotinpelti 3:n leveys on puolet pienempi, niin silloin sen "siivekkeet" ohjaavat ilmaa paljon vähemmän aikaa kuin sirotinpelti 2. Sirotinpelti taas 4 on samanlainen kuin sirotinpelti 3, mutta siinä ei ole keskikohtaa lainkaan. Tämä vaikuttaa siihen, että ilmavirta pääsee hajoamaan luonnollisesti joka suuntaan, kun taas sirotinpelti 3 ohjaa ilmaa pääasiassa vain vasemmalle ja oikealle. Näillä sirotinpellillä halutaan tutkia sitä, että haittaako sirotinpellin keskikohta ilman hajoamista. Monissa tehtaissa sirotinpelleissä on juuri tuo keskikohta.

Tässäkin koeajossa kaikki 12 lasia menivät tehtaassa laboratorioon samoihin mittauksiin kuin viime koeajossa. Kaikki 12 lasia kestivät mittaustulokseen kuuluvan raaputustestin. Tätä asiaa tukee myös mittaustulokset, sillä muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta lasista tuli hyviä mittaustuloksia ja yhteensä vain yksi mittaustuloksesta meni yli toleranssien. Polarisaatiotaululla lasi 1 näytti siltä kuten sen kuuluu näyttää. Lasin yläreuna sai normaalia korkeampia vetojännitysarvoja, mutta polarisaatiotaululla kyseiset kohdat eivät olleet punaisia. Lasi 2:lle polarisaatiotaulu nosti esiin mittaustulokset 18 ja 2 sirotinpelti 3:lle. Niissä kohtaa olikin puristusjännityksen mitta-arvo muita mittauksia alempi. Muuten myös kaikki pienet lasit näyttivät normaalilta polarisaatiotaululla, mutta yleisesti ottaen lasit eivät olleet niin hyvännäköisiä kuin viime koeajossa.

Kuvissa 29 ja 30 on jälleen esitelty reunajännitysmittausten tulokset molemmille sirotinpelleille. Sirotinpelti 3:n mittaustuloksissa molempien lasien yksittäiset puristusjännitysmittaukset ovat lähellä toleranssirajaa, mutta keskiarvo on sentään hieman kauempana toleranssiviivasta. Lisäksi lasi 1:n yksi vetojännitysarvo on mennyt melkein toleransseita yli. Sirotinpelti 4:n tuloksissa lasi 2:sen yksi mittaustulos on yli toleranssirajan ja puristusjännityksessä kaksi tämän lasin yläreunan mittapistettä ovat jo lähellä toleranssiviivaa. Huomion kiinnittää niissä se, että kyseessä on paksumpi viiva eli keskiarvoviiva. Muuten mittapistet ovat toleransseissa, joten mitään katastrofaalisia tuloksia ei tässä koeajossa tullut. Silloin huomio keskittyy siihen, onko keskiarvoviivat nousseet lähemmäs toleranssiviivaa verrattuna viime koeajoon. Molempien lasien alareunan tulokset olivat hyviä.



Kuva 29. Sirotinpelti 3:n veto- ja puristusjäännitysten tulokset



Kuva 30. Sirotinpelti 4:n veto- ja puristusjäännitysten tulokset

Tämän koeajon sirotinpeltien tulokset olivat keskenään lähes identtiset molemmille lasille. Oikeastaan molempien lasien keskiarvo ja hajonta pysyivät molemmilla sirotinpelleillä samoissa lukemissa, sillä vain lasi 1:n puristusjännityksen hajonta pieneni sirotinpelti 4:ssä lähes sigman verran. Muuten eroja ei syntynyt.

Lasin ylitys muotin reunasta - mittauksessa tulokseksi saatiin samoja kuin viime koeajossa. Isompi lasi ei liikkunut sivuttaissuunnassa yhtään, mutta pieni lasi liikkui pari millimetriä. Sivuttaissuunnan liikkumiseen vaikuttaa myös lasin muoto, sillä jos lasi taipuu keskeltä enemmän, niin silloin sen reunat tavallaan liikkuvat, kun lasin reuna on eri paikassa. Ala- ja yläreunan mittatulokset olivat isolla lasilla 10-14 mm ja pienellä lasilla 10-20 mm.

Kuvissa 31 ja 32 on tämän koeajon tuloksien histogrammit. Sirotinpelti 3:sen kuvista huomaa sen, että vetojännitys on saanut pienempiä arvoja lasi 2:lla ja samoin on puristusjännitys on saanut korkeampia arvoja lasi 2:lla, joten tämä sirotinpelti sopii paremmin pienemmälle lasille kuin isolle lasille. Sirotinpelti 4:n kohdalla tuloksissa ei ole suuria eroavaisuuksia. Taulukossa 6 on jokaisen histogrammin keskiarvo ja hajonta eli ne ovat koeajon tuloksia. Mittapisteitä tässäkin koeajossa oli 54 yhtä lasikokoa ja sirotinpeltiä kohtaan. Molempien lasien tulokset tässä koeajossa ovat keskenään lähes identtiset eri sirotinpelleillä, mikä on harvinainen tilanne. Ainut suurempi muutos oli se, että lasi 1:n puristusjännityksen hajonta pieneni sirotinpelti 4:lla. Isolle lasille tämä sopii paremmin, koska sirotinpelti 4 ohjaa ilmaa joka suuntaan uunissa eikä vain vasemmalle ja oikealle. Tuloksia vertailtaessa viime koeajon tuloksiin (Taulukko 4) huomataan, että vetojännitys on molemmilla laseilla hieman pienempi kuin sirotinpelti 2:n vetojännitystulokset, kun taas sirotinpelti 1 antoi hieman parempia tuloksia. Puristusjännityksen osalta tulokset ovat samanlaisia viime koeajoon verrattuna. Ainut poikkeus on se, että edelleen puristusjännityksen osalta paras vaihtoehto lasi 2:lle on sirotinpelti 2, joka antoi noin 3 megapascalin verran parempia tuloksia.

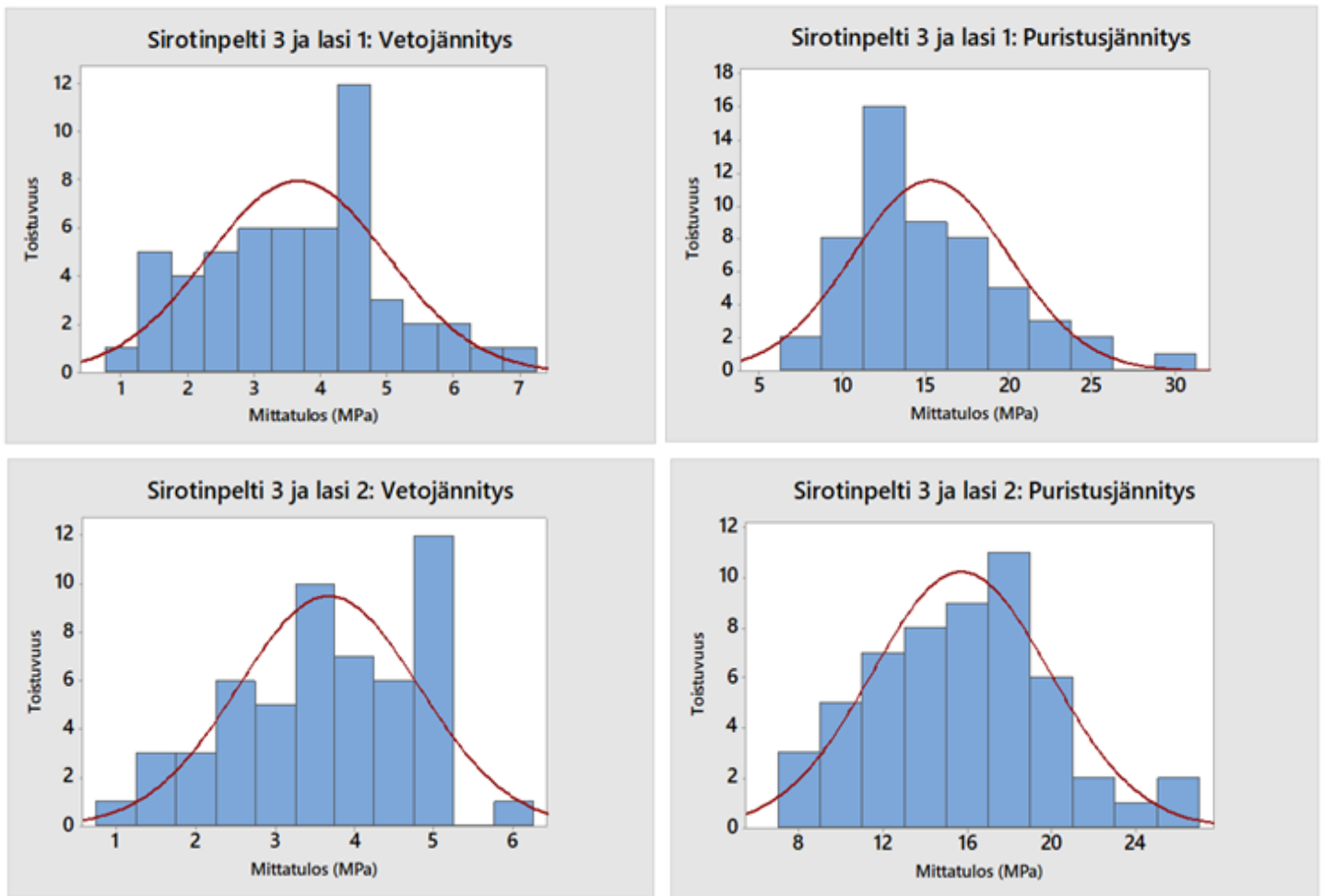
Taulukko 6. Koeajon 2 veto- ja puristusjännityksen tulosten keskiarvo ja hajonta

Koeajo 2	Vetojännitys		Puristusjännitys	
	Keskiarvo (MPa)	Hajonta	Keskiarvo (MPa)	Hajonta
Sirotinpelti 3				
Lasi 1	3,65	1,35	15,31	4,68
Lasi 2	3,67	1,14	15,71	4,22
Sirotinpelti 4				
Lasi 1	3,67	1,32	14,93	3,54
Lasi 2	3,75	1,31	16,03	4,41

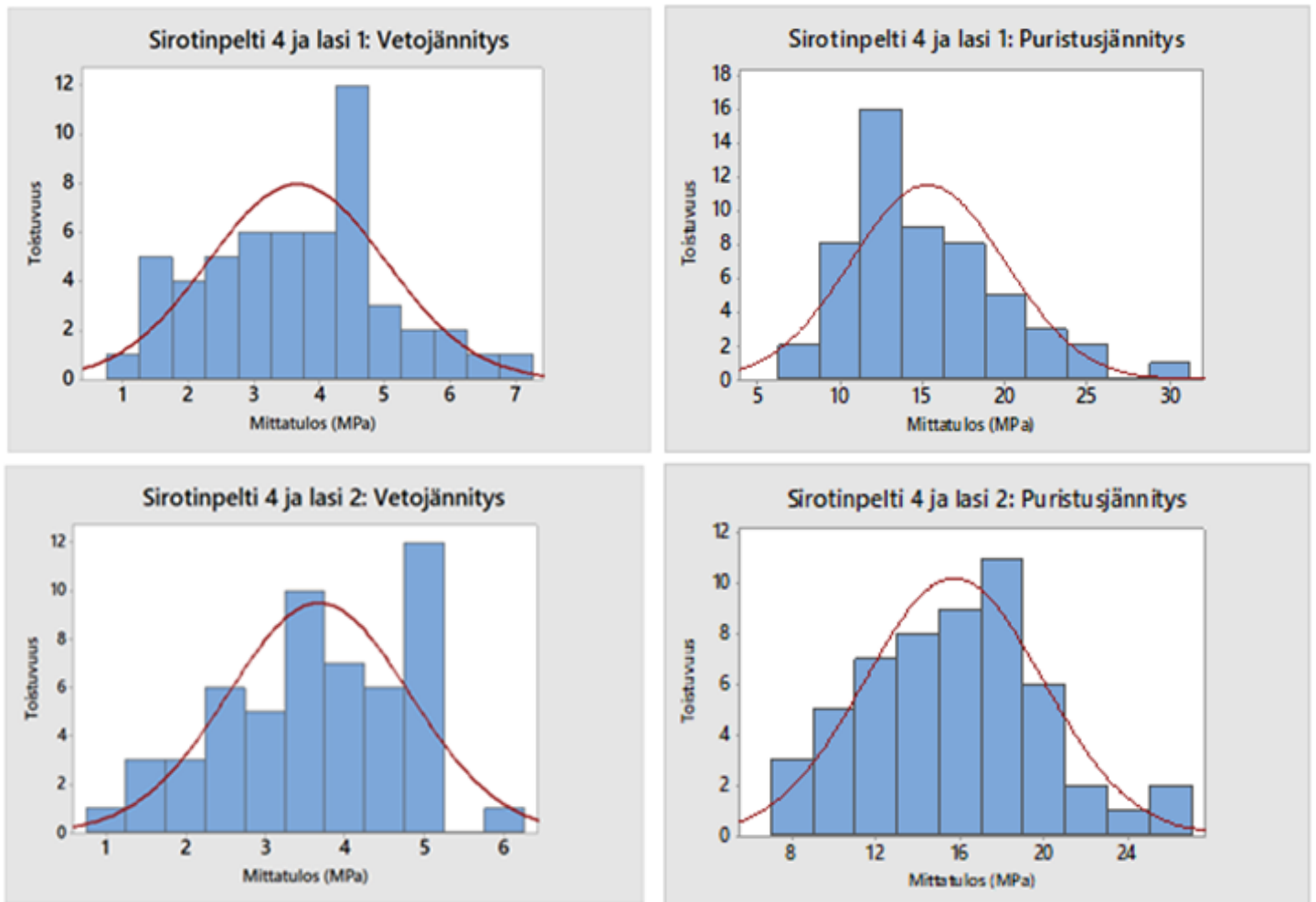
Taulukossa 7 on tämän koeajon dataan tehtyjen normaalisuuden testauksen tulokset. Lasi 1:n puristusjännitys ei näyttäisi noudattavan normaalijakaumaa sirotinpelti 3:lla ja siihen on syynä se, että puristusjännitys sai normaalia alhaisempia lukemia. Muut tulokset noudattavat normaalijakaumaa selvästi, mikä näkyy myös niiden histogrammien muodoista. Myös viime koeajossa lasi 1:n toinen puristusjännitys ei noudattanut normaalijakaumaa.

Taulukko 7. Jakauman normaalisuuden testauksen tulokset p-arvona

Koeajo 2	Vetojännitys	Puristusjännitys
Sirotinpelti 3: Lasi 1	0,43	0,01
Sirotinpelti 3: Lasi 2	0,28	0,77
Sirotinpelti 4: Lasi 1	0,44	0,12
Sirotinpelti 4: Lasi 2	0,28	0,76

**Kuva 31.** Sirotinpelti 3:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä

Sirotinpelti 3 antoi vetojännityksen osalta lasi 1:lle eniten 4,5 MPa tuloksia ja lasi 2:lle 5 MPa ja 3,5 MPa tuloksia. Puristusjännityksen osalta lasi 1:n yleisin tulos oli 13 MPa ja lasi 2:n 18 MPa. Vastaavasti sirotinpelti 4:n vetojännitystuloksissa yleisin tulos lasi 1:lle oli sama kuin sirotinpelti 3:ssa. Lasi 2 sai myös samoja lukemia kuin sirotinpelti 3:lla. Puristusjännityksen osalta yleisimmät lukemat olivat samat kuin sirotinpelti 3:ssa, joten myös näiden kuvaajien perusteella voidaan sanoa, että sirotinpelti 3 ja 4 toimivat samalla tavalla.



Kuva 32. Sirotinpelti 4:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä

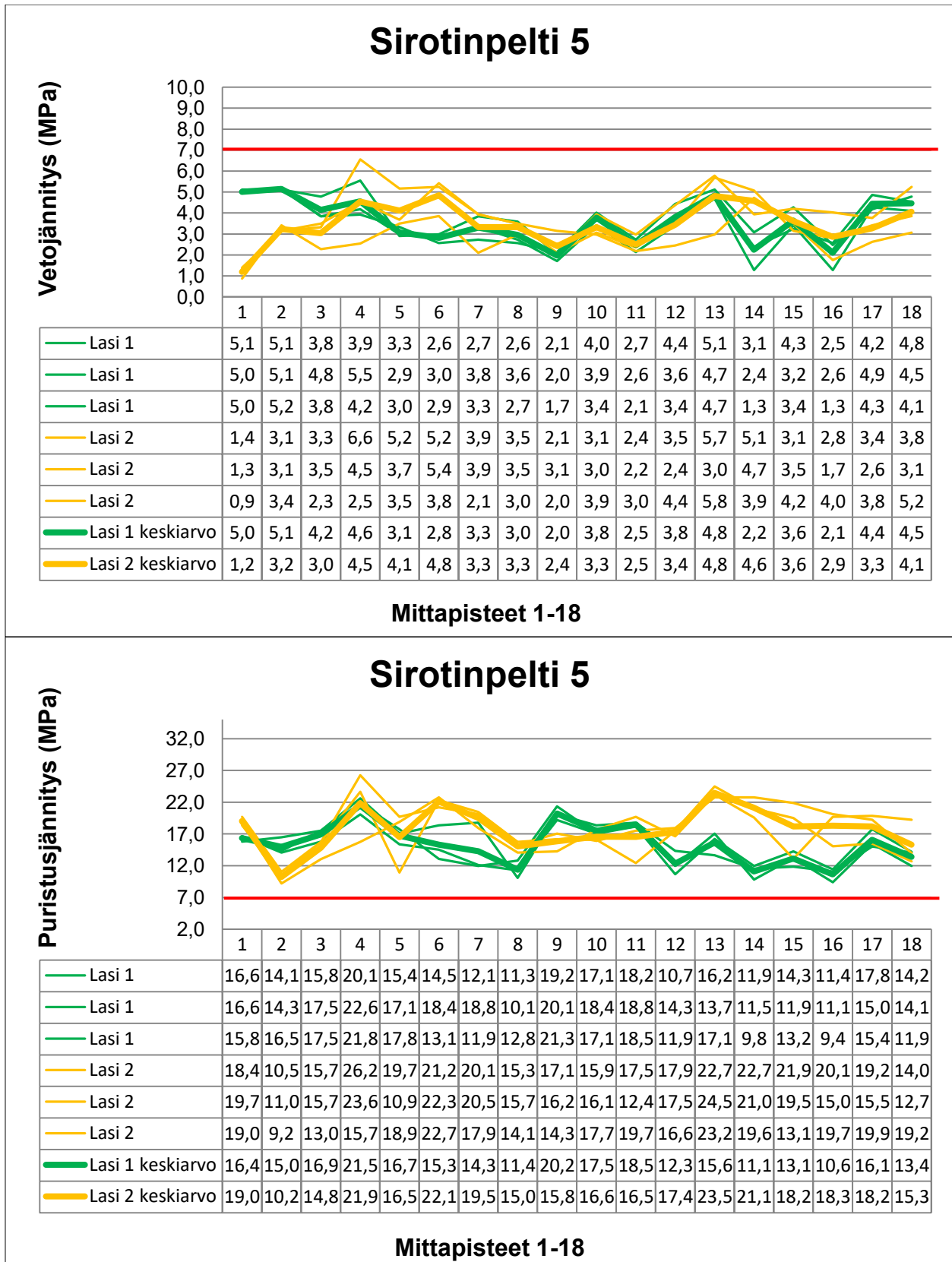
4.1.3 Koeajon 3 tulokset

Kolmannessa koeajossa tutkittiin sirotinpelti 5:sta ja sirotinpelti 6:sta. Aiemmat neljä sirotinpeltiä ovat tehtaassa käytössä ja tässä koeajossa olleet sirotinpellit on keksitty "out of the box" -tyyppisesti, sillä kumpaakaan ei olla ennen tehtaalla nähty. Sirotinpelti 5 on sellainen, että se poikkeaa muista todella paljon, sillä se jopa päästää ilmaa hieman läpi, kun taas muut sirotinpellit ohjaavat ilmaa johonkin haluttuun suuntaan. Tämä sirotinpelti on myös muodoltaan erilainen kuin muut, joten alkukäteen ei ollut mitään aavistusta siitä millaisia tuloksia tästä sirotinpelistä saadaan. Aavistus oli, että tulokset ovat todella hyviä tai sitten todella huonoja ja toiveissa oli, että jompikumpi näistä sirotinpelleistä olisi tutkimuksen "läpimurto -sirotinpelti". Sirotinpelti 6 on myös sellainen, että alkukäteen ei tiedetty yhtään mitä odottaa. Sirotinpellit ovat tavallisesti neliön- tai suorakaitteen muotoisia ja sirotinpelti 6 on ympyrä, jonka halkaisija on selvästi enemmän kuin itse puhallusaukko. Tämä tekee sen, että se ohjaa ilmaa tasaisesti joka suuntaan eikä vain esimerkiksi vasemmalle tai oikealle. Koska tämän halkaisija on paljon isompi kuin puhallusputken, silloin se ohjaa ilmaa myös paljon enemmän seinään päin, joten lasiin kohdistuu vähemmän puhallusilmaa. Tämänkään sirotinpellin toimivuudesta ei voinut etukäteen sanoa mitään, sillä se on niin erilainen verrattuna tehtaan muihin sirotinpelteihin.

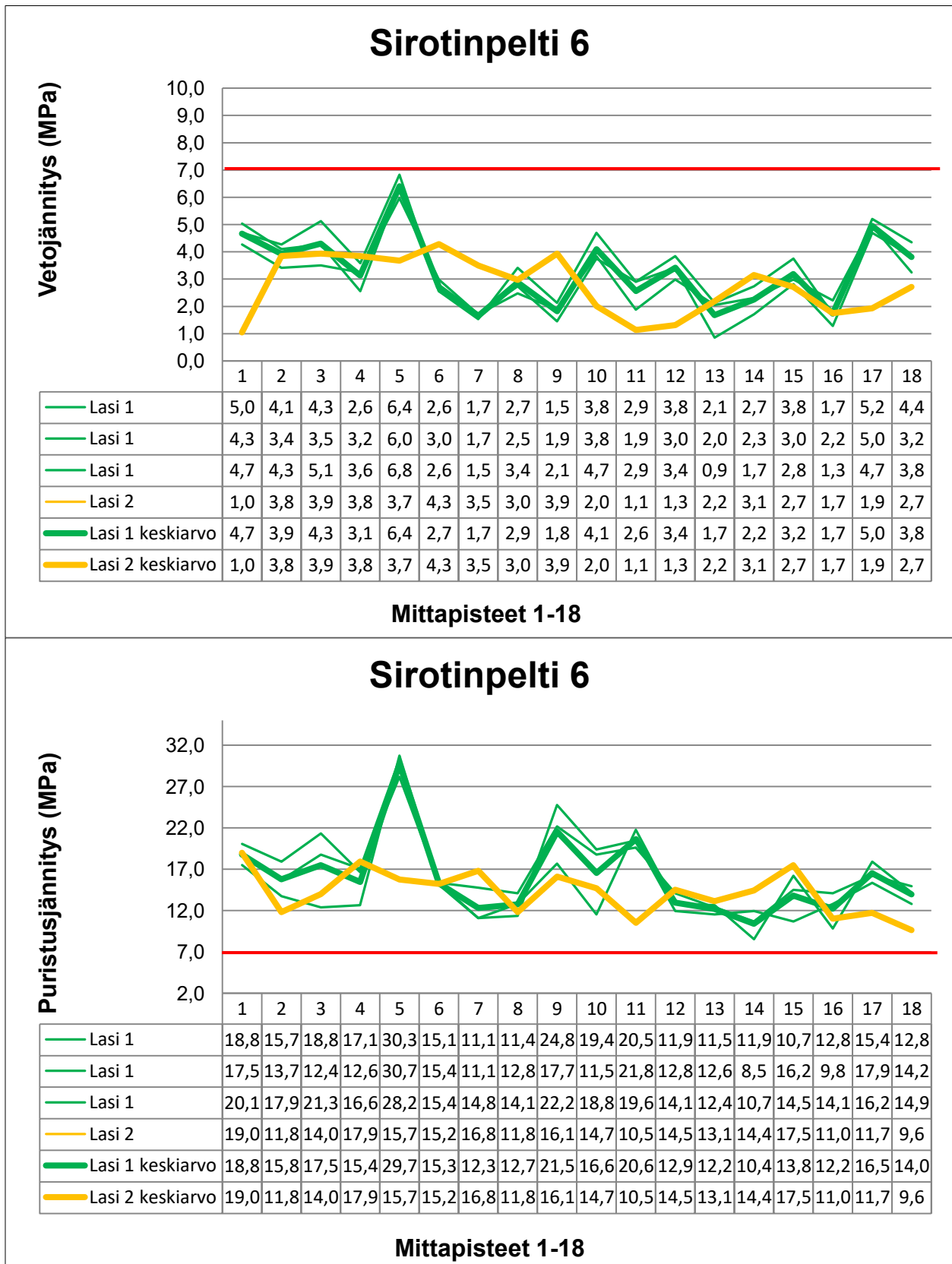
Tässä koeajossa lasit olivat samat kuin muissa koeajoissa (lasi 1 ja lasi 2). Lasi 1:n eli tutkimuksen päälasin osalta koeajo meni hyvin. Tästä ei tullut yhtään hävikkiä, joten tästä koeajosta saatiin mittauksiin suunnitellut kuusi lasia. Lasi 2:n eli pienemmän lasin osalta tämä koeajo oli todella haastava. Alunperin tätä lasia leikattiin kahdeksan lasia, josta kaksi kappaletta on hävikkivaraa. Näin ollen kaksi lasia sai mennä hävikkiin koeajon onnistumisen näkökulmasta, koska silti saataisiin halutut kuusi lasia. Kuitenkin näitä laseja meni hävikkiin jopa neljä kappaletta, joten lopputulos tästä koeajosta oli neljä lasia laboratorion mittauksiin. Heti ensimmäinen hajosi uunissa, kun muotin keskisalko ei toiminut ja sen perään heti seuraava lasi hajosi huonoon leikkuun reunahiontaan. Kolmas lasi putosi muotilta, joten kolme ensimmäistä lasia meni kaikki hävikkiin. Tämän jälkeen taivutus saatiin onnistumaan, kunnes viimeinen lasi hajosi samasta paikasta kuin mistä toinen lasi hajosi. Näin ollen sirotinpelti 6:sta saatiin lopputulokseksi vain yksi lasi. Kun laseja hajosi heti aluksi, niin silloin koeajossa tehtiin päätös, että sirotinpelti 5:sta halutaan suunnitellut kolme lasia ja sirotinpelti 6:sta saadaan mitä saadaan. Tämä sen takia, että sirotinpelti 5:sta haluttiin tutkia enemmän ja tulosten saatua mietitään, tarvitseeko sirotinpelti 6 jonkin täydennyskoeajon lasi 2:lle.

Lopputulos tästä koeajosta oli lasi 1:stä kuusi lasia ja lasi 2:sta neljä lasia. Tämänkin koeajon kaikki lasit kestivät mittausprosessiin kuuluvan raaputustestin, jota jälleen mitaustulokset tukevat. Yhtään mittauspistettä ei mennyt punaiselle arvolle kummastakaan lasista. Polarisaatiotaululta ei lasi 1:lle ilmennyt mitään erityiskohtaa ja kaikki kuusi lasia olivatkin normaalinnäköisiä. Lasi 2:ssa sen sijaan sirotinpelti 5:n laseissa oli punaisia kohtia enemmän ja vahvemmin kuin sirotinpelti 6:n yhdessä lasissa.

Kuvassa 33 ja 34 on esitetty reunajännitysmittausten tulokset molemmille sirotinpelleille. Lasi 1:n kaikki kolme lasia on saanut sirotinpelti 5:sta lähes samoja lukemia kaikista mittauspisteistä molemmissa kuvissa. Lasi 2:n tuloksissa on taas hieman enemmän hajontaa, mutta pääpiirteittäin tämäkään sirotinpelti ei tuo esille sitä asiaa, että lasikoko vaikuttaisi reunajännitysten muodostumiseen. Yksittäisiä eroja on, mutta yleisesti katsottuna tulokset ovat samoja. Isoin ero on mittapisteessä 1, jossa pienempi lasi on saanut todella vähän vetojännitystä kaikissa laseissa. Puristusjännityksen osalta pienempi lasi on saanut hieman korkeampi arvoja, kun taas isompi lasi on saanut vetojännityksen osalta korkeampia arvoja. Sirotinpelti 6 antoi myös lasi 1:lle tasaisia tuloksia kaikista kolmesta lasista. Tässä kuvassa lasi 2:lla on vain yksi lasi, joten siinä keskiarvoviiva on yhden lasin mittatulos. Lasi 1:n tuloksissa huomio kiinnittyy mittapisteeseen 5 molemmissa mittaustuloksissa, sillä kyseinen kohta on saanut niin veto- kuin puristusjännityksen osalta huomattavasti isompia arvoja kuin mikään muu mittapiste. Tämän mittauspisteen ilmavirtaus oli koko koeajon noin 0,2 m/s korkeampi kuin muut, joten tällainen puhallustehon ero voi vaikuttaa tuloksiin. Tämä sama puhallusero on ollut esillä myös viime koeajossa, mutta siellä se ei vaikuttanut näin paljon. Joten voidaan todeta, että ympyrässä sirotinpellissä puhallustehojen ero näkyy heti mittatuloksissa. Lasi oli painoitettu muotille kuten pitää ja se ei liikkunut taivutuksessa, joten sekään ei selitä tätä korkeaa mittaustulosta tästä kohtaa. Lasi 1:n mittaustulokset molemmissa sirotinpelleissä olivat keskenään paljon tasaisemmat kuin aikaisemmin, joka on prosessin vakauden kannalta hyvä asia.



Kuva 33. Sirotinpelti 5:n veto- ja puristusjäännityksen tulokset



Kuva 34. Sirotinpelti 6:n veto- ja puristusjäännityksen tulokset

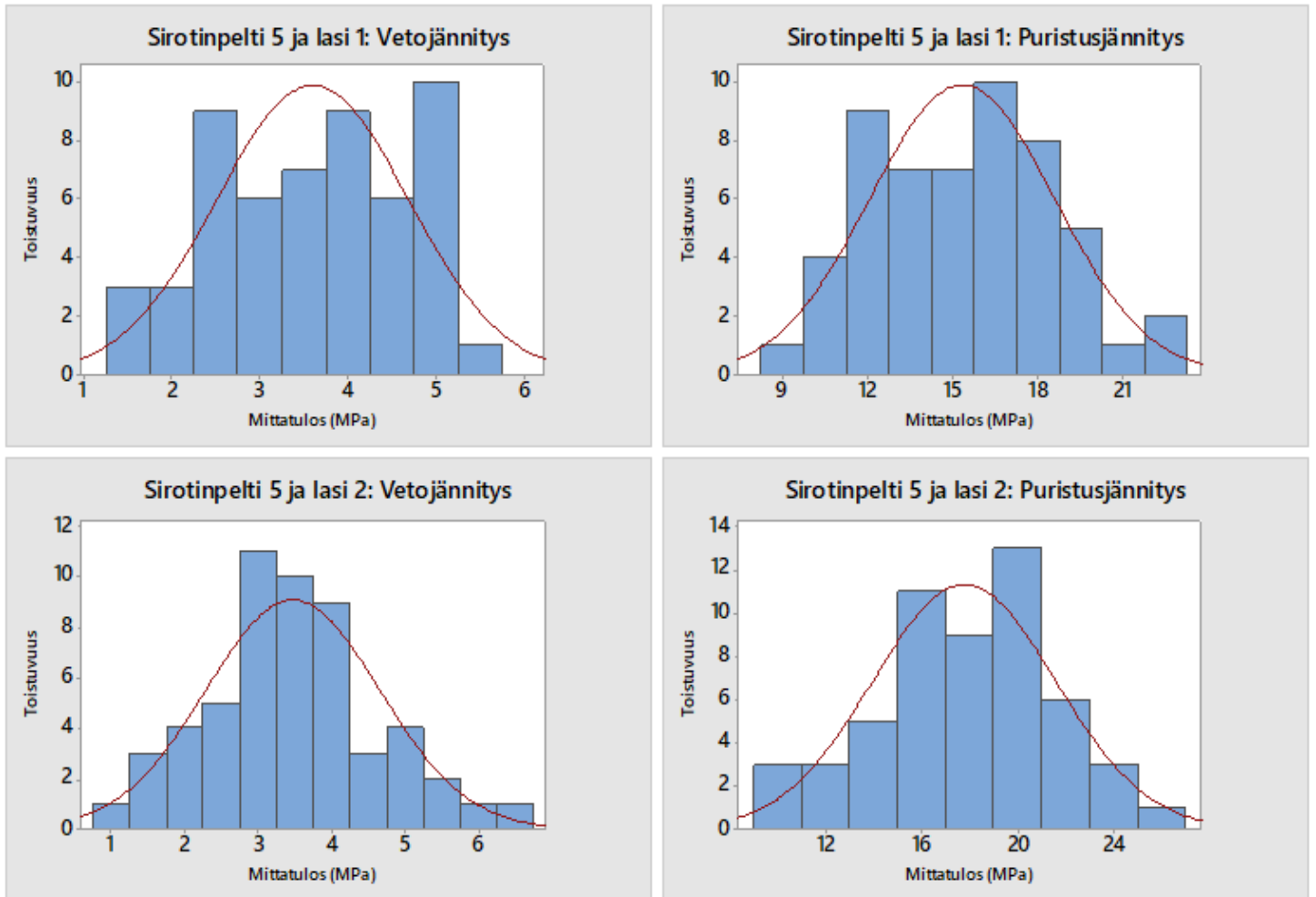
Lasi 1:n osalta sirotinpelti 5:n vetojännityksen keskiarvo oli suunnilleen sama, mitä se on oli viime koeajossa. Ero on siinä, että muihin koeajoihin verrattuna hajonta on huo-

mattavasti pienempi kuin aikaisemmin. Tämä on hyvä asia. Sirotinpelti 6 antoi isolle lasille hieman pienempiä vetojännitystuloksia kuin aikaisemmat sirotinpellit. Tämä on selitettävissä sillä, että lasiin ei kohdistu niin paljon ilmaa kuin muissa, joten se näkyy ison lasin mittaustuloksissa. Puristusjännityksen keskiarvo molemmille sirotinpelleille oli lähes samat kuin aikaisemmat, mutta sirotinpelti 5 antoi tässäkin selvästi pienimmän hajonnan kaikista koeajoista. Lasi 2:n osalta sirotinpelti 5 antoi myös selvästi pienimmän hajonnan muihin verrattuna. Tuloksien perusteella voidaan päätellä, että koska sirotinpelti 5 ohjaa ilmaa ylivoimaisesti tasaisesti muihin sirotinpelteihin verrattuna, niin se näkyy pienempänä hajontana ja vakaampana prosessina. Vaikka lasi 2:sta saatiin viimeisestä sirotinpelistä vain yksi lasi mittauksiin, niin tässä lasissa oli niin alhaiset veto- ja puristusjännitykset muihin laseihin verrattuna, joten ei ole tarvetta enää suorittaa täydennyskoeajoja tälle sirotinpelleille. Puristusjännityksen keskiarvo oli jopa 2-3 MPa pienempi kuin muiden sirotinpellien tuloksissa. Tässä lasissa myös vetojännitys oli kolmessa kohtaa vain 1 MPa.

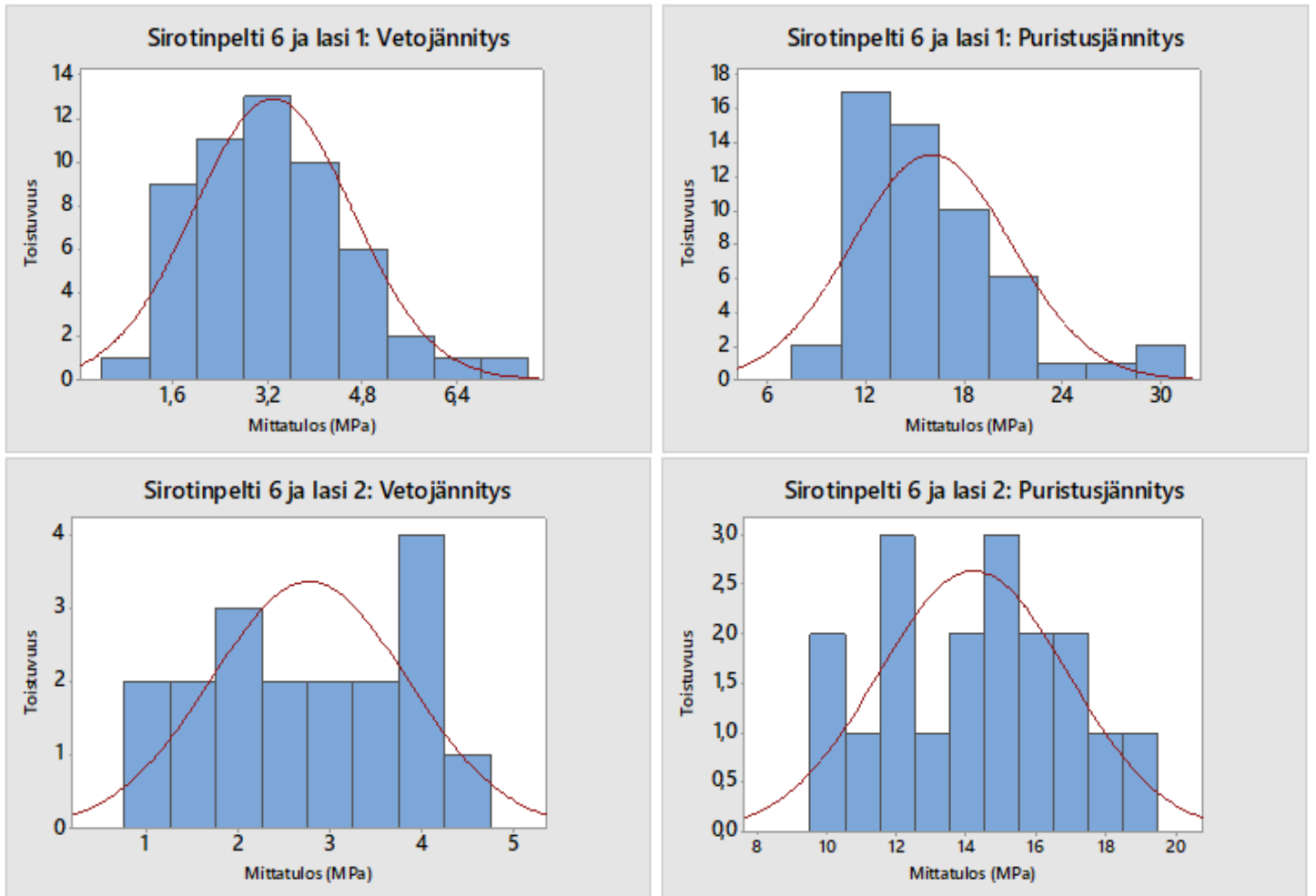
Kuvissa 35 ja 36 on tämän koeajon tuloksien histogrammit. Sirotinpelti 5:n mittatulokset ovat jakaantuneet normaalijakauman muotoisiksi. Sirotinpelti 6:n mittatulokset sen sijaan ovat tasaisempia lasi 2:n kohdalla johtuen pienestä otannasta hävikkilasiensa takia. Lasi 2:n puristusjännityksen jakauma on hieman taaksepäin kallellaan. Histogrammien muoto myös tukee asiaa, että sirotinpelti 5 toimii hyvin molemmille lasille ja tällä sirotinpelleillä saadaan aikaan vakain prosessi. Taulukossa 8 on esitetty tämän koeajon mittaustulosten keskiarvo ja hajonta. Vaikka tässä luvussa käsitellään tätä koeajoa, siitä huolimatta tuloksia pitää peilata kaikkiin aikaisempiin koeajoihin, jotta nähdään miten tämän koeajon sirotinpellit toimivat. Sirotinpelti 5:n tuloksissa hajonta on molemmissa lasissa vetojännityksessä huomattavan alhaisempi kuin muissa sirotinpelleissä tässä tutkimuksessa. Puristusjännityksessä myös hajonta on pienin mitä tässä työssä on saatu. Tämän perusteella sirotinpelti 5:sta voisi seuraavassa koeajossa tutkia enemmän, koska se antoi parhaimmat tulokset. Sirotinpelti 5:n otanta molemmissa lasissa oli 54 yhtä lasikokoa ja sirotinpeltiä kohtaan. Lasi 1:ssä lukema on sama sirotinpelti 6:ssa, mutta lasi 2:n otanta on siinä vain 18 mittauspistettä, joten näitä tuloksia ei voi keskenään vertailla hajontaa tutkiessa. Se johtopäätös voidaan pienemmästä lasista kuitenkin tehdä, että sen tulokset yhdellä lasilla oli alhaisemmat veto- ja puristusjännityksessä kuin mitä on koko tutkimuksessa ollut.

Taulukko 8. Koeajon 3 veto- ja puristusjännityksen tulosten keskiarvo ja hajonta

Koeajo 3	Vetojännitys		Puristusjännitys	
	Keskiarvo (MPa)	Hajonta	Keskiarvo (MPa)	Hajonta
Sirotinpelti 5				
Lasi 1	3,60	1,09	15,33	3,26
Lasi 2	3,29	1,34	16,02	4,86
Sirotinpelti 6				
Lasi 1	3,48	1,19	17,77	3,81
Lasi 2	2,78	1,07	14,20	2,71



Kuva 35. Sirotinpelti 5:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä



Kuva 36. Sirotinpelti 6:n histogrammit molempien lasien reunajännityksistä.

Sirotinpelti 5:n kaikki tulokset noudattavat normaalijakaumaa, joka näkyy selvästi histogrammeissa. Tämäkin puoltaa sitä, että tästä sirotinpellistä saa kaikista vakaimmat tulokset, koska myös hajonta oli kaikista pienin muihin tuloksiin verrattuna. Lasi 1:n puristusjännitys sirotinpelti 6:lla ei noudata normaalijakaumaa, koska tämä sirotinpelti on antanut niin alhaisia lukemia kyseiselle lasille.

Taulukko 9. Jakauman normalisuuden testauksen tulokset *p*-arvona

Koeajo 3	Vetojännitys	Puristusjännitys
Sirotinpelti 5: Lasi 1	0,28	0,38
Sirotinpelti 5: Lasi 2	0,26	0,76
Sirotinpelti 6: Lasi 1	0,40	<0,005
Sirotinpelti 6: Lasi 2	0,22	0,84

4.2 Koeajo 4 puhallustehojen merkityksen selvittäjänä

Koeajo 4 toteutettiin sen suunnitelman mukaisesti mikä luvussa 3.6.3 määriteltiin. Tässä koeajossa kammiouuniin asennettiin sirotinpelti 5 ja lasina olivat samat lasit kuin aikaisemminkin tässä tutkimuksessa. Tämä koeajo perustui puhallustehojen muuttamiseen, koska tietous puhallustehoista parhaimman sirotinpellin kanssa antaa enemmän li-

säarvoa tälle tutkimukselle. Tässä koeajossa ulkolämpötila oli klo 12.00 +3 astetta, kun aikaisemmin koeajoissa se on ollut +7 astetta ja -3 astetta. Näin ollen tämän koeajon ulkolämpötila sijoittuu aikaisempien koeajojen ulkolämpötilojen keskialueelle.

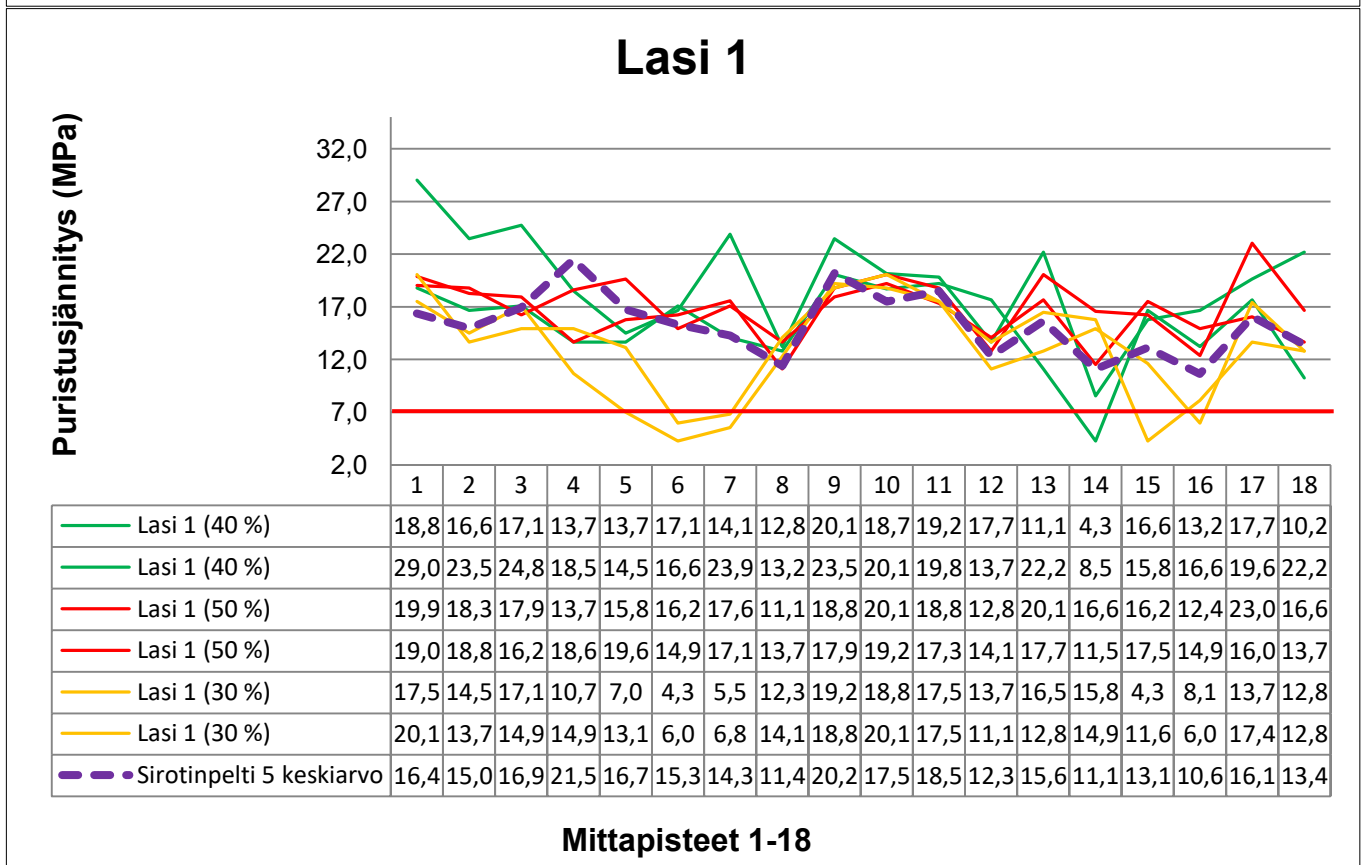
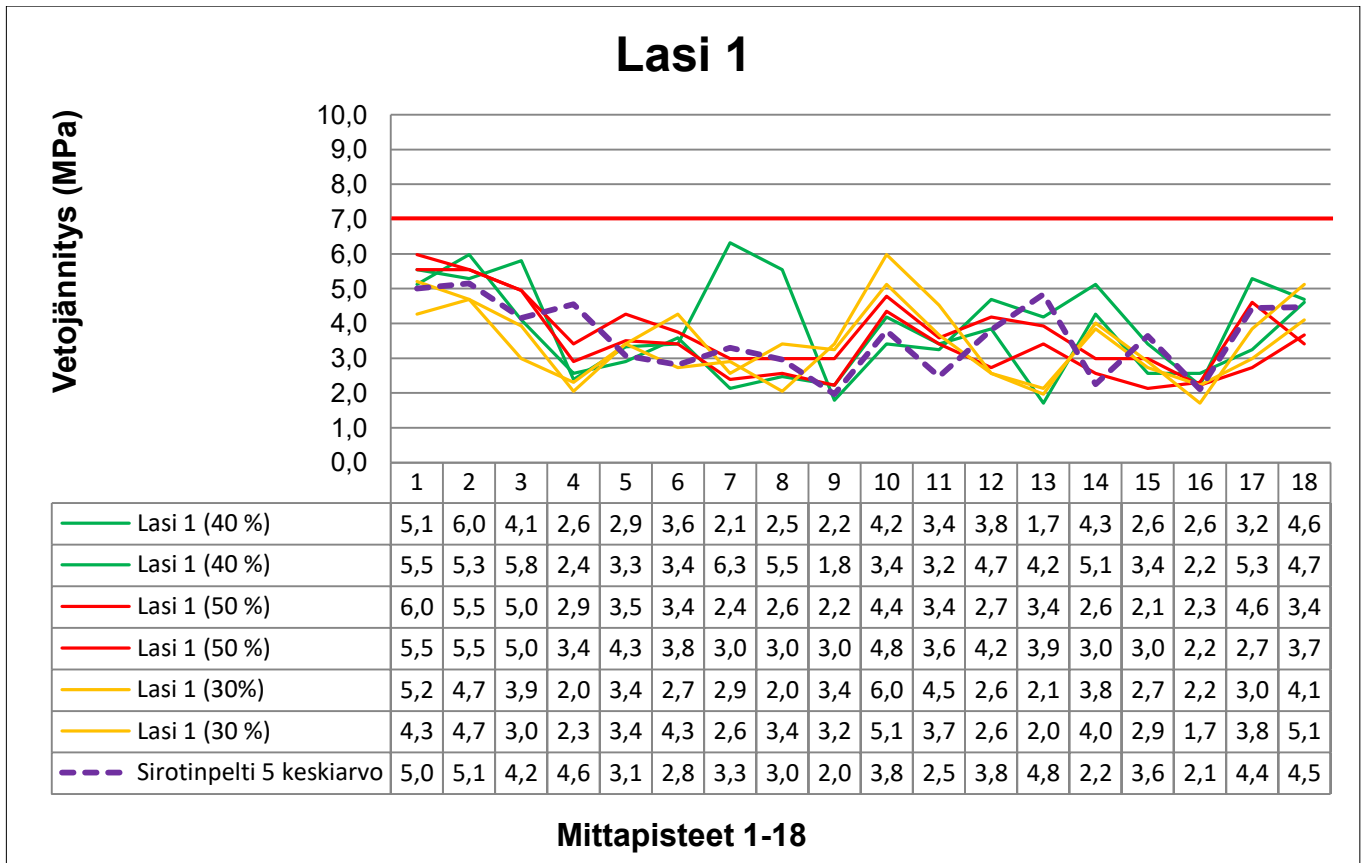
Myös tämänkin koeajon aluksi mitattiin ilmavirrat kaikista neljästä puhallusputkesta ja niistä paljastui hieman huonoja asioita. Aikaisemmissa koeajoissa ilmavirrat mitattiin vain 100 %:n teholla, koska oli tieto, ettei käsipuhalluksen puhallustehoa pysty säätämään. Ilmavirtoja ei pystytä mittaamaan muuta kuin käsipuhalluksella. Nyt kun haluttiin tutkia alhaisempia puhallustehoja, niin ennen koeajoja kävi ilmi, että käsipuhallusta pystyykin muuttamaan. Joten tämän koeajon aluksi ja lopuksi mitattiin puhallustehot seuraavista lukemista: 100 %, 50 %, 40 % ja 30 %. Näissä mittauksissa kävi ilmi, että yksi puhallusputki puhaltaa ilmaa lähes tuplat muihin verrattuna silloin, kun puhallusteho on 50 %. Tämä puhallusteho on normaalissa tuotantoprosessissa käytössä lähes kaikilla laseilla ensimmäisellä jäähdytysaskeleella. Ei ole tietoa, miten kauan tuo yksi puhallusputki on puhaltanut ilmaa muita puhallusputkia selvästi eniten. Tämä vika selittänee ne yksittäiset korkeat arvot lähes kaikilla muilla sirotinpelleillä paitsi sirotinpelti 5:lla. Puhallusteho ollessa 100 % ilmavirtaus oli sama kuin aikaisemmin eli 10,0-11,3 m/s. 50 % puhallusteholla ilmavirtaus oli 6,0-7,0 m/s mikä on johdonmukainen tulos, koska puhallusteho on puolet maksimitehosta. Puhallustehon ollessa 40 % ilmavirtaukset olivat 3,7-4,0 m/s ja 30 %:ssa ne olivat 1,6-1,8 m/s. Näiden lukujen perusteella oli odotettavissa erilaisia tuloksia, koska ilmavirtauksissa on huomattavia eroja.

Tämän vian paljastuttua puhallustehojen säätämisestä tuli hieman monimutkaisempaa, koska tätä vikaa ei voinut korjata koeajopäivänä ja tässä koeajossa haluttiin kaikkien ilmavirtojen olevan samat, koska se on normaalia tuotantotoimintaa. Kammiounin sähkökaapista oli yksi osa mennyt rikki ja sellaista ei ollut varastossa, joten ilmavirtoja piti kompensoida asettamalla tähän yhteen puhallusputkeen pienemmät puhallustehot kuin muihin, koska silloin ilmavirrat ovat oikeasti samat. Tässä kohtaa on tärkeä huomioda, että aikaisemmissa koeajoissa on todennäköisesti ollut jo tämä vika ja nyt 50 % puhallusteho tulee uudelleen tutkittua ilman tätä vikaa. Vian paljastuttua tähän kyseiseen puhallusputkeen asetettiin 10 % vähemmän tehoa kuin muihin, koska silloin ilmavirtamittari näytti samaa ilmavirtaa tähän puhallusputkeen kuin mitä se näytti muihin. 50 % ja 40 % puhallustehot tutkittiin samoilla ilmavirroilla, mutta 30 %:n puhallustehoon tätä vikaa ei saatu kompensoitua pois, koska puhallusputken moottori ei enää pyörinyt pienemmällä teholla. Näin ollen 30 % puhallustehon koelaseissa tämä yksi puhallusputki on puhaltanut enemmän ilmaa kuin muut. Tämä vika kertoo siitä, että ilmavirtoja ei koskaan normaalissa tuotantotilanteessa mitata ja tämä vika on voinut olla tässä kammiounissa jopa esimerkiksi 10 vuotta. Tämän takia lasien reunajännitystuloksissa on ollut joissakin yksittäisissä mittapisteissä isoa eroavaisuutta. Tämä vika tukee sitä teoriaa, että sirotinpelti 5 on paras sirotinpelti. Nimittäin koeajoissa 1-3 tämän sirotinpellin tulokset eivät "altistuneet" niin paljon tälle vialle kuin muut sirotinpellit. Tämä sirotinpelti on turvallisin vaihtoehto, koska normaalissa tuotantotilanteessa ei ole tietoa siitä, onko ilmavirrat samat ja tämä sirotinpelti näyttäisi parhaiten selviävän tällaisista yllätyksistä.

Tästä koeajosta saatiin kaikki ne 12 lasia niillä puhallustehoilla kuin haluttiinkin, joten siinä mielessä koeajo sujui hyvin. Myös viimeisen koeajon kaikki lasit menivät tehtaan laboratorioon, jossa niihin tehtiin samanlainen mittaustulosprosessi kuin muihinkin laseihin. Lasi 1:n koelasi puhallusteholla 40 % kesti raaputuksessa vain 1 min. ja 52 sek. ja tämä hajoamiskohta oli juuri viallisen puhallusputken kohdalla. 50 % puhallustehon toinen

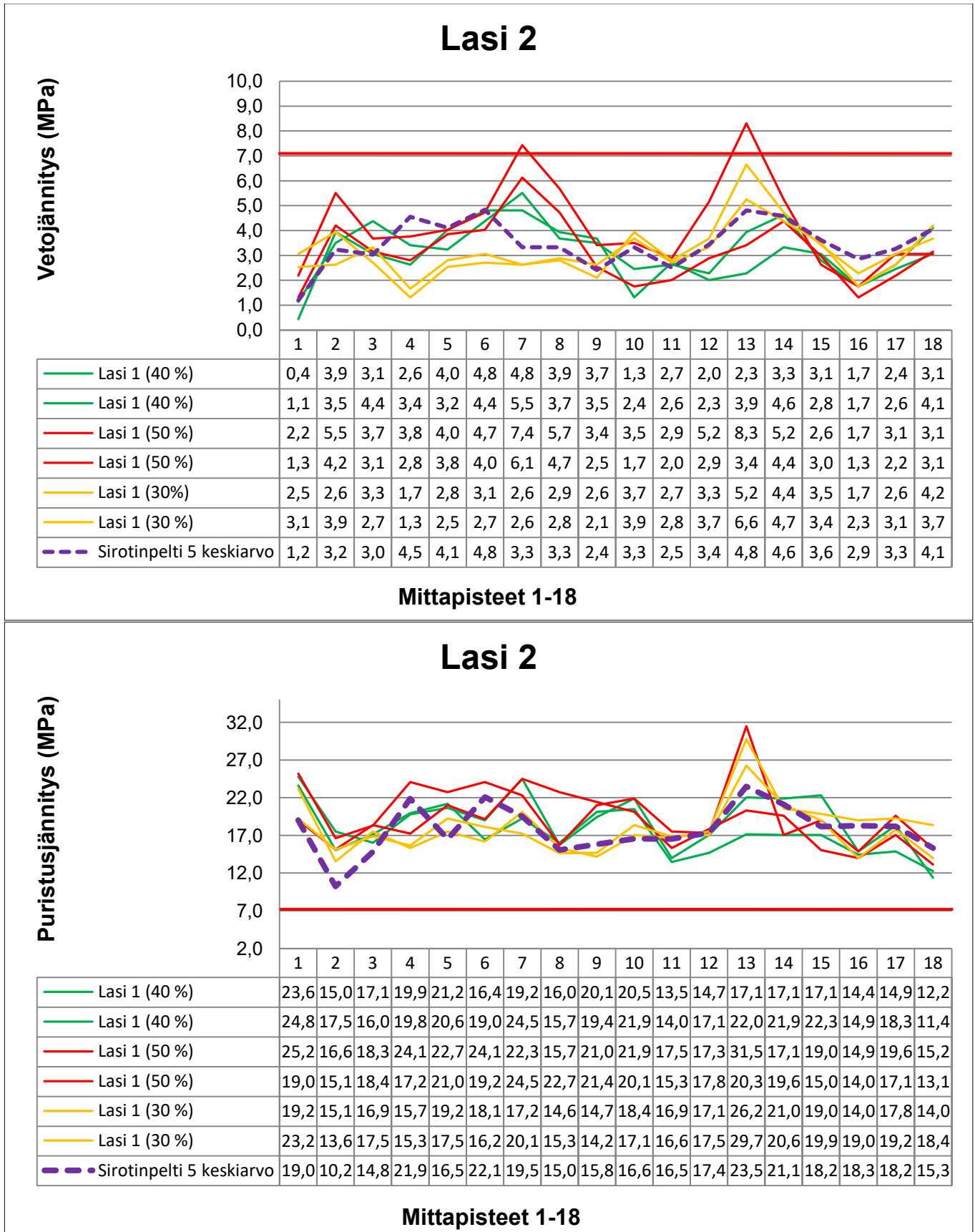
lasi kesti raaputuksen, mutta se hajosi myöhemmin noin 3,5 minuutin kohdalla. Tämä lukema läpäisee raaputustestin, mutta aikaisemmin kyseinen lasi on kestänyt siitä kohtaa aina, joten se kertoo jostain. Tämäkin lasi hajosi viallisen puhallusputken kohdalta, joten voi olla, että kyseinen puhallusputki ei ole tasaisesti puhaltanut ilmaa koko koeajon ajan kun sitä on mentiin hieman sähkökaapista säätämään. Kuitenkin reunajännitysmittaukset osoittavat, että 50 % puhallustehon lasit ovat hyviä. Polarisaatiotaululla 50 % puhallustehon lasit olivat parhaimman näköisiä ja ne näyttivät visuaalisesti katsottuna samalta kuin koeajossa 3. Lasi 2:n kaikki kuusi testilasia kestivät raaputuksen ja polarisaatiotaululta kaikki lasit näyttivät hyviltä. Lasi 2:ssa oli koeajon aikana ongelmia saada tuotteeseen keskipussia ja virtakuvioita jouduttiin hieman säätämään koeajon aikana. Tämä ei kuitenkaan auttanut ongelmaan. Tästä syystä lasi 2:n taivutusaika oli 13-16,5 minuuttia, kun yleensä sen vaihtelu on ollut kahden minuutin sisällä.

Kuvassa 37 tämän koeajon tulokset tutkimuksen päälasilille eli lasi 1:lle. Tähän kuvaajaan on otettu vertailun vuoksi mukaan koeajon 3 sirotinpelti 5:n mittatulosten keskiarvo, joka on paksumpi violetti katkoviiva. Sen avulla näkee, miten esimerkiksi 50 % puhallustehon lasit ovat muuttuneet nyt, kun puhallustehot ovat olleet varmasti samat. Tällä sirotinpellillä puhallustehojen kompensoiminen ei näyttäisi vaikuttavan vetojännitykseen, mutta puristusjännitykseen se antoi hieman korkeampia lukemia ja myös niiden hajonta oli pienempi. Vetojännityslukemat ovat alle toleranssirajan, mutta puristusjännityksessä muutama arvo on yli toleranssirajan. Yli toleranssirajan ovat mittapistet 6-7 ja 15-16. Nämä kohdat ovat molemmat lasin päädyissä, eli ne ovat alttiina puhallukselle enemmän kuin lasin ylä- tai alareuna. Puristusjännityksessä 30 %:n puhallustehon molemmat testilasit ovat menneet alle toleranssirajojen samasta kohtaa, joten tuloksia voidaan pitää uskottavina. 40 % puhallustehon yksi mittapiste on alle toleranssirajan ja sekin kohta on juuri puhallusputken kohtaa. Tämän puhallustehon toinen testilasi on saanut samasta kohtaa myös alhaisen puristuslukeman muihin puhallusprosentteihin verrattuna. Kaikista tasaisempia lukemia tuli 50 %:n puhallusteholla eli sillä, mikä on normaalistikin asetettu ensimmäiseen jäähdytysaskellukseen. Kaikki 50 %:n mittapistet ovat keskenään samassa linjassa, joten tämä puhallusteho ei aiheuta keskenään erilaisia tuloksia kuten 40 %:n puhallusteho antoi.



Kuva 37. Koeajon 4 veto- ja puristusjäännityksen tulokset lasi 1:lle

Kuvassa 38 on vastaavasti veto- ja puristusjännityksen mittaustulokset lasi 2:lle. Vetojännityksen tuloksissa 50 % puhallustehon toinen lasi on saanut kaksi tulosta yli toleranssirajojen. Myös mittapisteen 1 tulos on mielenkiintoinen, sillä siinä vetojännitys on saanut tulokseksi lähes 0 MPa. Se sai sitä myös jo viime koeajossa, mutta verrattuna isoon lasiin tuloksien ero on iso. Näissä tuloksissa tulee kiinnittää huomiota siihen, miten puhallustehojen muutos on näkynyt tuloksissa. Tuloksia tulee tulkita siten, että miten ne ovat muuttuneet suhteessa 50 % :n puhallustehoon, koska se on normaaliasetus. Tuloksien perusteella 50 % ei näyttäisi olevan optimitapa jäähdyttää pienempää lasia tällä sirotinpellillä. Puristusjännityksen tulokset näyttäisi myös parantuvan, kun puhallustehoa hieman alennetaan nykyisestä ja esimerkiksi 40 % puhallusteho antaa parempia ja tasaisempia tuloksia kuin viime koeajon tulokset. Molemmissa kuvaajissa mittapiste 13 on saanut keskenään erilaisia arvoja.



Kuva 38. Koeajon 4 veto- ja puristusjäännityksen tulokset lasi 2:lle

Tästä koeajosta ei muodosteta tulosten perusteella histogrammeja, koska tässä koeajossa ei tutkittu muuttujia kokonaisuutena. Näin ollen eri mittaustuloksia ei voida yhdistää, koska ne eivät liity toisiinsa ja kahden lasin mittatuloksista ei kannata tehdä histogrammia vähäisen otannan takia. Taulukossa 10 on tämän koeajon tulosten keskiarvo ja hajonta jokaiselle puhallusteholle.

Taulukko 10. Koeajon 4 veto- ja puristusjännityksen tulosten keskiarvo ja hajonta

Koeajo 4	Vetojännitys		Puristusjännitys	
	Keskiarvo (MPa)	Hajonta	Keskiarvo (MPa)	Hajonta
Puhallusteho: 40 %				
Lasi 1	3,81	1,31	17,18	4,92
Lasi 2	3,15	1,13	18,09	3,42
Puhallusteho: 50 %				
Lasi 1	3,61	1,07	16,76	2,69
Lasi 2	3,69	1,59	19,29	3,81
Puhallusteho: 30 %				
Lasi 1	3,43	1,07	13,21	4,64
Lasi 2	3,15	1,03	17,94	3,34

Taulukosta huomataan, että lasi 1:lle nykyinen puhallusteho (50 %) antaa parhaimmat tulokset. Vetojännitys on sama kuin viime koeajossa, mutta puristusjännitys on parantunut lähes 1,5 MPa ja sen hajonta on myös pienentynyt. Lasi 2:lle paras puhallusteho näyttäisi olevan 30 %, joka on 20 % pienempi kuin nykyinen menetelmä. Myös tässä tapauksessa puristusjännitys on hieman parantunut viime koeajosta ja sen lisäksi vetojännitys on parantunut. Parasta puhallustehoa määriteltäessä tulee huomioida molemmat jännitykset ja löytää kultainen keskitie. Vaikka puristusjännitys on tärkeämpi, niin esimerkiksi lasi 1:n kohdalla ei voida valita 40 %:n puhallustehoa, jossa puristusjännitys on korkeampi. Tähän on syynä se, että myös vetojännitys ja etenkin vetojännityksen hajonta kasvaa enemmän kuin puristusjännityksen nousu kasvaa.

Myös tämän koeajon mittaustuloksiin tehtiin normaalisuuden testaus (Taulukko 11), eli noudattaako data normaalijakaumaa. Tämä tieto auttaa mittaustuloksia vertailtaessa. Edellisessä kappaleessa määriteltiin, että lasi 1:lle 50 % puhallusteho on paras ja lasi 2:lle 30 % puhallusteho on paras. Lasi 2:n kohdalla 30 % ei näyttäisi noudattavan normaalijakaumaa. Lasi 1:n puristusjännitys noudattaa normaalijakaumaa, mutta sen vetojännitys on saanut pienen p-arvon. Todennäköisesti isommalla otannalla myös tämän p-arvo olisi isompi, koska viime koeajossa se oli vastaavilla asetuksilla 0,28. Toki tässä tuloksessa yhdestä puhallusputkesta tuli todennäköisesti enemmän ilmaa kuin muista ja siten tulokset eivät ole ihan vertailukelpoisia, mutta ne antavat silti suuntaa. 50 % puhallusteho lasi 1:llä ei ole saanut vetojännityksessä yhtään arvoa alle 2 MPa ja se on myös yksi syy, miksei voida varmasti sanoa, että data noudattaa normaalijakaumaa.

Taulukko 11. Jakauman normaalisuuden testauksen tulokset p-arvona

Koeajo 4	Vetojännitys	Puristusjännitys
Puhallusteho: 40 %		
Lasi 1	0,23	0,76
Lasi 2	0,98	0,72
Puhallusteho: 50 %		
Lasi 1	0,07	0,36
Lasi 2	0,12	0,41
Puhallusteho: 30 %		
Lasi 1	0,47	0,05
Lasi 2	0,02	0,01

4.3 Päätelmiä koeajojen tuloksista

Tämän työn hypoteesi oli, että muodostaako eri tekijät erilaisia reunajännityksiä ja tuleeeko samalla menetelmällä erikokoiselle lasille erilaisia reunajännitystuloksia. Asiaa lähdettiin tutkimaan syy-seuraus -kaavion kautta, josta tuli esille reunajännitysten kannalta olennaisia asioita. Syy-seuraus -kaaviosta esiin nousikin selvästi kaksi asiaa: uunin ilmavirrat ja puhallusteho. Koeajoissa 1-3 tutkittiin uunin ilmavirtojen eli sirotinpeltien vaikutusta reunajännityksiin ja koeajossa 4 taas tutkittiin puhallustehojen vaikutusta reunajännityksiin sillä sirotinpellillä, joka antoi parhaimmat tulokset koeajoista 1-3.

Koeajo 1

Lasi 1:lle tuli puristusjännityksen osalta hieman huonommat tulokset sirotinpelti 2:lle, mutta hajonta kasvoi huomattavasti. Vetojännitys taas nousi 0,65 MPa, joka on huono asia. Tähän syy on se, että sirotinpelti 1 ohjaa ilmaa kohti lasia paljon enemmän kuin sirotinpelti 2. Sirotinpelti 1 on seinästä katsottuna 135 asteen kulmassa ja sirotinpelti 2 on vastaavasti 90 asteen kulmassa. Sirotinpelti 1:n leveys on myös juuri puhallusputken kokoinen, kun taas sirotinpelti 2:sen leveys on lähes puolet enemmän kuin puhallusputki. Sirotinpelti 2:lla haluttiin tutkia sitä, että vaikuttaako sirotinpellin leveys reunajännityksiin. Nimittäin monessa vanhassa kammiouunissa on tehtaalla tällaiset sirotinpellit, joiden leveys on yli puhallusputken leveyden. Puhallusputken mitat ovat 130 x 130 mm. Sirotinpelti 2:sen leveydestä johtuen iso lasi ei saa tarpeeksi puhallusilmaa, kun sirotinpellit ohjaavat ilmaa vähemmän kohti lasia kuin normaalisti. Sirotinpelti 2 taas näyttäisi olevan pienelle lasille parempi vaihtoehto, koska se ei puhalla ilmaa niin paljon lasia kohti kuin sirotinpelti 1.

Tässä koeajossa vetojännitykset nousivat hieman molemmilla laseilla kun sirotinpeltiä vaihdettiin leveämpään sirotinpeltiin, mutta vastaavasti pienen lasin puristusjännitys parantui toisella sirotinpellillä. Isoon lasiin sirotinpellin vaihtaminen ei näyttänyt vaikuttavan puristusjännityksen keskiarvoon mitenkään erityisesti, mutta hajonta kasvoi 0,77 sigmaa. Vetojännitys nousi yhtä paljon kuin pienessä lasissa. Tämän koeajon perusteella ei voida sanoa, että sirotinpeltien vaihto muuttaisi reunajännityksiä mitenkään radikaalisti. Ne muuttivat niitä vähän kuten odottaa saattaa, mutta ei niin paljon, että voitaisiin

todeta kumpi on parempi sirotinpelti. Lasi 1:sen puristusjännityksen hajonta kasvoi lähes yhden sigman verran kun siirryttiin sirotinpelti 2:seen. Lasi 2:lle kävi päinvastoin eli hajonta pieneni ja samalla keskiarvo nousi, eli tämä sirotinpelti toimi paremmin pienelle lasille puristusjännityksen osalta. Tämän koeajon perusteella voidaan todeta, että sirotinpelti 1 toimii lähes yhtä hyvin molemmille laseille. Sirotinpelti 2 näyttäisi antavan lähes 3,0 MPa parempia tuloksia pienelle lasille puristusjännityksen osalta kuin sirotinpelti 1.

Koeajo 2

Tässä koeajossa mielenkiinto kohdistui siihen, että vaikuttaako sirotinpeltien leveys reunajännitysten muodostumiseen ja onko sirotinpellin keskikohdalla vaikutusta reunajännitysten muodostumisessa. Tämän koeajon perusteella voidaan sanoa, että sirotinpelti 3 ja sirotinpelti 4 muodostavat lähes identtisiä reunajännityksiä molempiin lasikokoihin. Kummankaan lasikoon tulokset eivät muuttuneet keskenään käytännössä mihinkään näillä sirotinpelleillä. Joten tulosten perusteella voidaankin todeta, että sirotinpellin keskikohdalla ei ole merkitystä reunajännitysten muodostumiseen.

Yksi mielenkiintoinen asia tässä koeajossa oli, että muodostaako sirotinpelti 3 erilaisia tuloksia kuin sirotinpelti 2. Sirotinpeltien 3 ja 4 tulokset ovat lasi 1:lle lähes identtiset ja lasi 2:sen vetojännitys on lähes identtinen, mutta puristusjännityksen keskiarvo laski 3 MPa verrattuna sirotinpelti 2:seen. Sirotinpelti 3:n tulokset ovat lähes samat kuin sirotinpelti 2:sen tulokset, jossa sirotinpelti on puolet leveämpi kuin tässä koeajossa ollut sirotinpelti 3. Myös sirotinpeltien leveys suhteessa puhallusaukkoon ei näyttäisi olevan avainasemassa reunajännitysten muodostumisessa.

Koeajo 3

Tämän koeajon alussa ei ollut minkäänlaista käsitystä siitä, mitä tuloksia tästä koeajosta saadaan. Tätä ennen koeajojen 1-2 perusteella oli aavisteltavissa, että sirotinpellit eivät vaikuta mitenkään ratkaisevasti reunajännitysten muodostumisiin ja lasikoko ei ole merkitsevä reunajännitysten muodostumisessa. Jokainen sirotinpelti antoi vetojännityksen osalta lähes saman keskiarvotuloksen molemmille laseille, mutta puristusjännityksessä oli 2-4 MPa:n eroja eri sirotinpeltien välillä. Tämän koeajon tulosten perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että sirotinpelti vaikuttaa reunajännityksiin jollakin tasolla, koska sirotinpelti 5 antoi niin paljon pienemmän hajonnan veto- ja puristusjännityksen tuloksiin molemmilla laseilla kuin mitä aikaisemmin tässä tutkimuksessa on nähty. Normaalisti uunissa oleva sirotinpelti 1 pääsi ainoana sirotinpeltinä lähes samoihin lukemiin sirotinpelti 5:n kanssa kun tutkitaan vetojännityksen hajontaa. Sitten taas puristusjännityksen hajonta on oli huomattavasti pienempi sirotinpelti 5:lla kuin sirotinpelti 1:llä. Koska työn yksi tavoite oli saada aikaan mahdollisimman vakaa prosessi, niin pienimmän hajonnan ansiosta sirotinpelti 5 on tähän paras valinta näiden tuloksien perusteella.

Tämän takia tutkimuksen viimeisessä koeajossa olisi syytä tutkia enemmän sirotinpelti 5:sta kuin keskimmäistä lasikokoa. Alun perin oli tarkoitus tutkia viimeisessä koeajossa keskimmäistä lasikokoa, jos koeajoissa 1-3 syntyy isoja eroja ison ja pienen lasin reunajännityksiin. Näitä eroja ei syntynyt, joten ei ole mitään syytä ottaa tutkimukseen kolmatta lasikokoa. Viimeisessä koeajossa kannattaisi tutkia eri asioita kuin sirotinpeltejä, koska niistä on nyt saatu se tieto mitä haluttiin. Koeajossa 4 voitaisiin tutkia puhalluste-

hon vaikutusta ja sitä kautta optimipuhallustehon hakua. Vielä on aikaista sanoa onko sirotinpelleillä keskenään käytännön merkitystä, mutta sirotinpelti 5 antoi lupaavia tuloksia siihen, että se olisi paras sirotinpelti. Tämän takia puhallustehoja tutkiessa uunin asennetaan sirotinpelti 5, koska se antaa pienimmän hajonnan kaikista tutkimuksen sirotinpelleistä.

Koeajo 4

Viimeisessä koeajossa tutkittiin puhallustehojen vaikutusta reunajännitysten muodostumisiin. Tämän koeajon tulos oli, että isommalle lasille eli lasi 1:lle paras puhallusteho ensimmäisessä jäähdytysaskelluksessa on 50 % ja lasi 2:lle vastaava arvo on 30 %. Tämä on johdonmukainen tulos, sillä pieni lasi vaatii jäähtyäkseen vähemmän puhallustehoa kuin isompi lasi. 30 % ilmavirtaus näytti olevan liian heikko isolle lasille, joten tätä puhallustehoa ei tarvitse edes miettiä keskikokoisiin tai isoihin lasihin, kun uusia tuotteita tuotannollistetaan. Pienen lasin tulosten muutos viime koeajosta osoittaa sen, että veto- ja puristusjännitys kulkevat rinnakkain. Koeajoon 3 verrattuna lasi 2:n vetojännitys laski ja puristusjännitys nousi, joten kun toisen jännityksen saa testilaseilla paremmaksi kuin aikaisemmin oli, niin silloin myös parhaassa tapauksessa toinen jännitys kehittyy ikään kuin vahingossa. Toki on tilanteita, että toinen vain nousee kuten lasi 1:n kohdalla kävi, sillä vain sen puristusjännitys parani viime koeajoon verrattuna. Tähän vaikuttaa se, että viime koeajossa jo lasi 1:n vetojännityksen hajonta oli niin pieni, ettei se voi siitä oikein enää pienentyä. Sitten taas puristusjännityksen hajonnassa oli varaa parantaa.

Tämän koeajon tuloksia pitää verrata hieman viime koeajon sirotinpelti 5:n tuloksiin, koska silloin yksi puhallusputki on todennäköisesti myös puhaltanut ilmaa puolet enemmän yhdestä puhallusputkesta kuin muista. Nyt kun ilmavirrat oli varmasti samat, niin sirotinpelti 5:lla lasi 1:n tulokset eivät muuttuneet mitenkään radikaalisti kun tarkastellaan tuloksia mittapiste kerrallaan. Puristusjännityksen keskiarvo nousi ja hajonta pieneni ja pienempi hajonta on loogista, koska nyt ilmaa tuli joka suunnasta saman verran. Lasi 2:lla sen sijaan tämä muutos näkyi selvemmin, sillä 50 %:n tulokset olivat tässä koeajossa korkeammat kuin edellisessä koeajossa. Tämä ero näkyy molemmissa jännityksissä. Kun vika oli kompensoitu, niin nykyinen 40 % antoi lähes samoja tuloksia kuin koeajon 3 50 % puhallusteho. Puristusjännityksessä 50 % antoi taas 1,5 MPa paremmat tulokset samalla puhallustehoilla eri koeajolla lasi 2:lle.

Loppupäätelmät

Näiden kaikkien koeajojen perusteella voidaan todeta, että sirotinpelti 5 on paras ilmavirran ohjaaja. Sen avulla saatiin kaikkein tasaisempia tuloksia myös silloin, kun todennäköisesti yhdestä puhallusputkesta on tullut enemmän ilmaa kuin muista. Koska ei ole tietoa mikä tehtaalla on tilanne muiden kammiouunien kanssa liittyen vialliseen ilmavirtaukseen yhdessä puhallusputkessa, niin myös sillä perusteella tämä sirotinpelti on paras, koska se on vähiten altis tällaisille ikäville yllätyksille. Vaikka koeajo 4 määrittäi optimi jäähdytysmenetelmän, niin silti tutkimuksen runko on koeajot 1-3, koska niissä tutkittiin kaikki vaihtoehdot ja puhallustehojen vika voi olla läsnä myös muissa kammiouuneissa tai se voi ilmaantua ihan milloin vain. Koeajon 4 tulokset ovat johdonmukaisia, koska pienempi lasi vaatii vähemmän puhallustehoa kun käytössä on samat jäähdytysmenetelmät. On loogista, että näiden lasien välillä on eroa. Kun kaikki ilmavirrat kompensoitiin koeajossa 4 samanlaisiksi, silloin sen ansiosta jo ennestään paras sirotin-

pelti antoi vielä paremmat tulokset valituille puhallustehoille. Vaikka tämä selviää ylempänä tuloksista, niin silti seuraavassa luvussa asia todistetaan vielä tilastollisia menetelmiä hyväksi käyttäen.

Tässä tutkimuksessa tehtiin myös koeajojen aikana kammiouuneilla niin sanottuja tukimittauksia, jotta saataisiin enemmän ymmärrystä reunajännitysten muodostumiselle. Näiden mittausten perusteella voidaan tehdä seuraavia havaintoja:

- Lasiväli uunilla (mm): Lasivälit mitattiin neljästä kohtaa jokaisesta lasista. Mittaus tapahtui aina silloin, kun toisen vaunun lasin taivutusvaihe alkoi. Näin ollen mittaustulokset ovat keskenään vertailukelpoisia ja jokainen lasi on jäähtynyt muotilla lähes saman verran. Näitä mittauksia tuli siis yhteensä 200 kpl. Suurimmaksi osaksi lasivälit olivat 0 mm, 5 mm tuloksia oli 23 kpl, 10 mm tuloksia oli 5 kpl, 15 mm tuloksia oli 8 kpl, 20 mm tuloksia oli 3 kpl, 25 mm tuloksia oli 0 kpl ja suurin lasiväli oli 30 mm, joita oli 1 kpl. Eli vaikka sirotinpeltejä ja puhallustehoja muutettiin, niin lasivälit eivät kasvaneet yli riskirajan (+30 mm). Voidaankin todeta, että on harvinaista, että sirotinpelti tai ensimmäisen askelluksen puhallusteho aiheuttaisi kuplaa lasihin.
- Lasin ylitys muotin reunasta (mm): Jos lasit ovat kooltaan ja muodoltaan asiakastoleransseissa, niin silloin lasi liikkuu taivutuksessa jonkin verran. Lasi 1:n "liikkumisalue" ylä- ja alareunoissa muotin reunasta on 9-15 mm ja vastaava lukema lasi 2:lle on 9-20 mm. Tällä lasilla lukema on sen takia suurempi, koska yksi kulma oli jokaisessa koeajossa hieman enemmän yli muotista kuin toinen kulma samasta päädyistä. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi se, ettei lasi ole aivan symmetrinen. Näillä "liikkumisalueilla" ei näyttänyt olevan vaikutusta reunajännitysten muodostumisiin vaan kyse on luonnollisesta liikkumisesta, koska laseja kehitetään "käsityönä". Päädyissä "liikkumisalue" on vielä enemmän tuotekohmainen, sillä lasi 1:llä se oli 5-7 mm ja lasi 2:lla vastaava lukema oli 6-11 mm. Päädyissä on se ero, että jos lasi on asiakastoleranssissa niin silloin molempien päätyjen ylitys on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta sama.
- Uunin katkaisulämpötila: Ei merkittäviä eroja koeajojen välillä.
- Taivutusaika: Jos suoritetaan niin sanottu kylmä lähtö, niin esilämmitysaika on silloin 2-3 minuuttia pidempi kuin normaali lähtö. Tämän tutkimuksen aikana tuli ilmi, että paras tapa on pitää uunia viisi minuuttia tyhjänä ennen kuin laittaa seuraavan lasin sisään. Tässä vaiheessa uuni ehtii hieman jäähtyä. Jos laittaa heti seuraavan lasin uuniin kun se on mahdollista, silloin itse taivutusaika itse asiassa piteni, koska uuni käyttäytyy erilaisesti kun se on lähdössä ollut jo niin kuuma. Jos lasin laittoi sisään heti kun mahdollista, niin muutamissa testeissä itse esilämmitysaika oli silti vain 20 sekuntia lyhyempi, mutta taivutusvaihe kesti 2-3 minuuttia kauemmin. Lisäksi tuo 2-3 minuuttia sai tehdä kunnolla töitä, jotta lasi saa oikean muodon. Eli jos uunia ajaa "täydellä ajolla" koko ajan, niin ei siitä ole muuta kuin haittaa.

4.4 Tuloksien todentaminen tilastollisilla menetelmillä

Tämän tutkimuksen koeajoista saatiin paljon numeerisia tuloksia. Tuloksista tehdään aina johtopäätöksiä, jossa huomioidaan tilanne myös käytännön näkökulmasta. Kannattaako tutkimuksen tulokset implementoida? Onko siitä saadut tulokset niin hyviä, että ne ovat oikeasti totuttamisen arvoisia? Miten paljon koeajoista saatu paras menetelmä on parempi kuin nykyinen menetelmä? Näihin kysymyksiin voidaan esittää vastauksia

tilastollisten menetelmien kautta. Ne antavat numeerisia vastauksia esitettyihin hypoteeseihin, joka auttaa tulosten tulkinnassa.

Hypoteesin testaus voidaan jakaa viiteen eri vaiheeseen (Henkel 1976):

1. Hypoteesien valinta
2. Sopivan tilastollisen testin valinta
3. Merkitsevyystason valinta
4. Testin suorittaminen
5. Lopullisen päätöksen tekeminen.

Tutkimusta suorittaessa tutkijalla voi olla jo kesken tutkimusta jonkinlaisia oletuksia siitä, minkälaisia eroja tai samankaltaisuuksia mitattavasta perusjoukosta on löytynyt. Usein nämä oletukset perustuvat kirjallisuuteen tai aikaisemmin tutkimuksessa löydettyille havainnoille, mutta ne perustuvat vain omaan päättelykykyyn. Tutkija voi testata näitä oletuksia tilastollisten menetelmien avulla. Hypoteesin testaus perustuu siihen, että tutkija muotoilee aluksi hypoteesin, joka on vastoin hänen oletustaan ja sen jälkeen hän tutkii, voidaanko tämä hypoteesi kumota nykyisen tutkimuksen avulla. Alkuperäistä oletuksen vastaista hypoteesia kutsutaan nimellä nollahypoteesi (H_0). Nollahypoteesin lisäksi valitaan vastahypoteesi (H_1), joka hyväksytään silloin, jos nollahypoteesi pystytään kumoamaan. Tämän jälkeen valitaan tilastollinen testi, joita on useita. Testin valitseminen riippuu esimerkiksi työn tutkimusongelmasta. (Henkel 1976)

Kolmantena valitaan testin merkitsevyysraja, jota kutsutaan usein myös riskitasoksi. Tilastollisen päättelyn avulla ei pystytä koskaan sanomaan varmuudella, että jokin asia on epätosi tai tosi, vaan siinä on kyse siitä, että millä todennäköisyydellä testin suorittaja on valmis hylkäämään hypoteesin. Tieteellisissä tutkimuksissa käytetään lähes poikkeuksetta 0,05:n (5 %) tai 0,01:n (1 %) riskitasoa. Jos esimerkiksi riskitasona käytetään 5 %:n riskitasoa, se tarkoittaa sitä, että tutkimuksen tulos on perusjoukosta 95 %:n varmuudella pätevä, mutta samalla virheen todennäköisyys on 5 %. Useimmiten käytetään 5 % riskitasoa. Tilastollisen testin tuloksena saadaan aina p-arvo, joka ilmoittaa virheellisen päätelmän todennäköisyyden. Tilastollinen testaus kannattaa tehdä jonkin tietokoneohjelmiston avulla, sillä niissä laskuvirheiden mahdollisuus pienenee ja samalla tutkija voi keskittyä enemmän tulosten tulkintaan. (Henkel 1976)

Viimeinen vaihe on lopullisen päätöksen tekeminen tulosten perusteella. Hypoteesin testauksessa on kyse siitä, että hylätäänkö nollahypoteesi vai ei. Jos tilastollisen testin antama tulos (p-arvo) on pienempi kuin testissä käytetty riskitaso niin silloin nollahypoteesi hylätään ja vastahypoteesi valitaan. Muussa tapauksessa vastaus on aina, että nollahypoteesia ei voida kumota. Missään tutkimuksessa pelkkä tilastotieteellinen tarkastelu ei riitä, vaan aina pitää huomioida asiaa tutkimusongelman ja käytännön näkökulma huomioiden. (Henkel 1976)

Tässä tutkimuksessa koeajojen 1-3 tulosten perusteella määriteltiin, että sirotinpelti 5 olisi paras ilmavirran ohjaaja. Seuraavaksi sirotinpelti 5:n tuloksia vertaillaan sirotinpelti 1:n tuloksiin, koska tämä sirotinpelti on nykyinen käytössä oleva menetelmä. Joten tässä tilastollisessa testauksessa käytetään vain sirotinpelti 1:n ja sirotinpelti 5:n tuloksia, jotta saadaan tietoa siitä, onko sirotinpelti 5 niin paljon parempi, että tilastollisten menetelmiä hyväksi käyttäen se kannattaisi ottaa käyttöön. Tässä tutkitaan myös molempia tutkimuksen laseja, jotta saadaan mahdollisimman kokonaisvaltainen kuva. Tilastollisesti tutkitaan hajontaa eikä esimerkiksi keskiarvoa, koska toisen työlle asetetun

tutkimuskysymyksen tavoite oli löytää mahdollisimman vakaa prosessi, joka tarkoittaa pientä hajontaa tulosten välillä. Vakaa prosessi tuo varmuutta tuotelaatuun pitkällä aikavälillä.

Koeajoista 1-3 perusteella muodostetaan seuraavia hypoteeseja ja niitä tutkitaan tilastollisten menetelmien avulla:

- A. Lasi 1: Onko puristusjännityksen hajonnassa merkitsevästi eroa?
- B. Lasi 1: Onko vetojännityksen hajonnassa merkitsevästi eroa?
- C. Lasi 2: Onko puristusjännityksen hajonnassa merkitsevästi eroa?
- D. Lasi 2: Onko vetojännityksen hajonnassa merkitsevästi eroa?

Tilastolliseksi testiksi valikoitui 2-Sample Standard Deviation -testi, koska tässä valitut hypoteesit sisältävät dataa kahdesta eri otoksesta (sirotinpelti 1 ja sirotinpelti 5). Tämä testi tutkii, että onko datojen keskihajonnan välillä eroavaisuuksia aivan kuten hypoteeseissa on määritelty. Nollahypoteesi on, ettei datojen keskihajonnalla ole eroavaisuuksia ja vaihtoehtoinen hypoteesi on, että niillä olisi keskenään eroavaisuuksia. Seuraavaksi suoritetaan tilastolliset testit Minitab -tietokoneohjelmistolla jokaiselle neljälle hypoteesille.

Olkoot S_1 = sirotinpelti 1 ja S_5 = sirotinpelti 5.

A. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Sirotinpelti 1:n puristusjännityksen hajonta on 4,95 ja sirotinpelti 5:n vastaava hajontaluku on 3,26. Minitabin hypoteesin testaus antaa p-arvoksi 0,022. Koska tulos on alle merkitsevyysrajan, H_0 hylätään ja H_1 valitaan. Sirotinpelti 5:n hajonta eroaa merkitsevästi sirotinpelti 1:n hajonnasta. Toisin sanoen sirotinpelti 5 on parempi valinta tähän hypoteesiin, kun näiden kahden tuloksien lukemien keskiarvotkin ovat lähes samat.

B. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Hypoteesin testaus antaa p-arvoksi tuloksen 0,72, joka tarkoittaa ettei sirotinpeltien vetojännityksen hajonnassa ole merkitsevästi eroa. Valitaan H_0 .

C. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Sirotinpelti 1:n puristusjännityksen hajonta on 5,39 ja sirotinpelti 5:n vastaava hajontaluku on 3,81. Minitabin hypoteesin testaus antaa p-arvoksi 0,035. Koska tulos on alle merkitsevyysrajan, H_0 hylätään ja H_1 valitaan. Sirotinpelti 5:n hajonta eroaa merkitsevästi sirotinpelti 1:n hajonnasta. Toisin sanoen sirotinpelti 5 on parempi valinta tähän

hypoteesiin, koska myös sen puristusjännityksen keskiarvo on myös suurempi kuin sirotinpelti 1:n.

D. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Hypoteesin testaus antaa p-arvoksi tuloksen 0,75, joka tarkoittaa ettei sirotinpeltien vetojännityksen hajonnassa ole merkitsevästi eroa. Valitaan H_0 .

Näiden tilastollisten testien perusteella voidaan sanoa, että sirotinpelti 5 tuo vakaamman prosessin puristusjännityksen osalta kuin sirotinpelti 1. Reunajännityksissä puristusjännitys on tärkeämpi, joten tämä puoltaa sirotinpelti 5:n valintaa. Sirotinpelti 5:lla vetojännitys ei muutu mitenkään radikaalisti, joten se ei poissulje sirotinpelti 5:n valintaa.

Koeajossa 4 oli kompensoitu kaikki ilmavirrat niin, että ne puhalsi saman verran ilmaa. Lasi 1:n osalta vetojännitys ei muuttunut oikeastaan mihinkään koeajoon 3 verrattuna 50 %:n puhallusteholla, joten sitä on turha tutkia tilastollisesti. Sama juttu on lasi 2:n puristusjännityksessä 30 % puhallusteholla, sillä se pysyi lähes muuttumattomana ja sitä ei tutkita tilastollisesti. Keskihajonta-testit suoritetaan samalla testillä kuin koeajoissa 1-3, mutta keskiarvo testit suoritetaan 2-Sample t-testillä, jossa vertaillaan keskiarvoa. Tässä tuloksiin pitää suhtautua pienellä varauksella, koska koeajoissa 1-3 otanta on 72 ja koeajossa 4 otanta on 36.

Koeajosta 4 tutkitaan tilastollisesti seuraavia asioita:

- A.** Lasi 1: Onko 50 % puhallustehon puristusjännityksen keskiarvo merkitsevästi parempi kuin koeajossa 3?
- B.** Lasi 1: Onko 50 % puhallustehon puristusjännityksen hajonta merkitsevästi parempi kuin koeajossa 3?
- C.** Lasi 2: Onko 30 % puhallustehon vetojännityksen hajonta merkitsevästi parempi kuin koeajossa 3?
- D.** Lasi 2: Onko 30 % puhallustehon vetojännityksen keskiarvo merkitsevästi parempi kuin koeajossa 3?

A. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Sirotinpelti 5:n puristusjännityksen keskiarvo koeajossa 3 on 15,33 ja koeajossa 4 se on 16,76. Minitabin hypoteesin testaus antaa p-arvoksi 0,02. Koska tulos on alle merkitsevyysrajan, H_0 hylätään ja H_1 valitaan. Koeajon 4 keskiarvo on merkitsevästi parempi kuin koeajon 3 keskiarvo.

B. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Hypoteesin testaus antaa p-arvoksi tuloksen 0,16, joka tarkoittaa ettei puristusjännityksen hajonnassa ole kauheasti eroa koeajojen välillä. Voi olla, että jos otanta olisi ollut isompi, niin p-arvo olisi ollut pienempi. Valitaan H_0 .

C. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Hypoteesin testaus antaa p-arvoksi tuloksen 0,42, joka tarkoittaa ettei vetojännityksien hajonnassa ole merkitsevästi eroa puhallustehojen välillä. Valitaan H_0 .

D. Asetetaan hypoteesit ja suoritetaan testi 0,05:n merkitsevyysrajalla.

$$H_0: S_1 = S_5$$

$$H_1: S_1 \neq S_5$$

Hypoteesin testaus antaa p-arvoksi tuloksen 0,17, joka tarkoittaa ettei vetojännityksien keskiarvoilla ole merkitsevästi eroa puhallustehojen välillä. Voi olla, että jos otanta olisi ollut isompi, niin p-arvo olisi ollut pienempi. Valitaan H_0 .

Tässä luvussa testattiin tilastollisesti niitä hypoteeseja, joita on tehty kaikkien koeajojen tuloksien perusteella. Hypoteesien testauksista saadut tulokset tukivat väitettä, että lasi 1:n puristusjännityksen hajonta on merkitsevästi parempi sirotinpelti 5:lla. Vetojännityksen hajonnassa ei ollut tilastollisesti tutkittuna eroavaisuuksia. Koeajossa 4 saatiin vieläkin parempia tuloksia sirotinpelti 5:lle puristusjännityksen keskiarvolle ja vaikka hajontakin parantui viimeisessä koeajossa, niin sillä ei näyttänyt olevan tilastollisesti merkitystä.

Lasi 2:n osalta hypoteesien testaus tuki väitettä, että sirotinpelti 5 antaa merkitsevästi paremman hajonnan puristusjännitykselle kuin sirotinpelti 1. Myös tässä lasissa vetojännityksen hajonnalla ei ollut merkitsevästi eroa. Koeajon 4 johtopäätös oli, että 30 % puhallusteho olisi parempi kuin 50 %:n puhallusteho. Tilastollinen testaus kuitenkin osoittaa, että vetojännityksen keskiarvo ja hajonta eivät eroa merkitsevästi puhallustehojen välillä. Tähän pitää suhtautua varauksella, koska 30 %:n koelaseissa yksi puhallusputki puhalsi enemmän ilmaa kuin muut. Näin ollen tulos ei ole aivan luotettava, joten tämä pitäisi tutkia uudelleen silloin kun kyseinen puhallusputken moottori on korjattu. Koeajossa 4 Lasi 2:n kumpikaan reunajännitystulos ei noudata normaalijakaumaa, joten se myös vaikuttaa tähän tulkintaan. Se miksi juuri tässä puhallustehossa data ei noudata normaalijakaumaa johtuu todennäköisesti siitä, että 30 % puhallusteho on huomattavasti pienempi ja siten lasi on herkempi tuplasti puhaltavalle puhallusputkelle. On huomion-arvoista, että kun 50 %:lla puhallustehot oli kompensoitu, lasi 2:n vetojännitys oli huomattavasti korkeampi kuin 30 %:lla, joten tämä asia vaatii lisää koelaseja asian selvittämiseksi.

tämiseksi. Visuaalisesti tarkasteltuna oltaisi tehty johtopäätös, että 30 % on parempi, mutta tilastollisen tutkimuksen mukaan näin ei ole, joten asia vaatii lisää otantaa kun vika on korjattu. Kuitenkin trendi näyttää lasi 2:lle olevan se, että paras puhallusteho on vähemmän kuin se on lasi 1:lle. Koeajossa 3 lasi 2:n vetojännityksen tulokset huononiivat sirotinpelti 5:lla verrattuna nykytilaan, mutta 30 %:n puhallusteholla taas vetojännitys oli hieman parempi kuin mitä se on nykytilanteen sirotinpellillä.

5. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli kehittää kohdeyrityksen taivutusprosessista vakaampi ja saada tietoa siitä, miten eri elementit vaikuttavat reunajännitysten muodostumisiin. Taivutusprosessin kaksi tärkeintä vaihetta on taivutus ja jäähdytys. Yritys oli saanut reklamaatioita siitä, että heidän lasit hajoavat asiakkaalla ilman fyysistä kosketusta. Tämä viittaa hallitsemattomiin reunajännityksiin ja siitä syystä tässä työssä tutkittiin jäähdytysprosessia, koska reunajännitykset muodostuvat kyseisessä prosessivaiheessa.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin yhteensä 50 lasia ja kaikki lasit kävivät läpi saman mittausprosessin. Työn tuloksia tulkitaan tutkimuskysymyksien avulla, joita asetettiin tämän työn alussa kaksi kappaletta. Tutkimuskysymykset olivat:

- 1) Miten kehittää taivutusprosessia nykyistä tasapainoisemmaksi ja virheetömäksi?
- 2) Miten eri elementit vaikuttavat reunajännitysten muodostumisiin ja miten ne toimivat erikokoisiin laseihin?

Tässä luvussa käydään läpi tämän tutkimuksen keskeiset tulokset, määritetään tutkimuksen suositukset ja niiden lisäksi annetaan muutama jatkokehitysidea. Näiden lisäksi tässä luvussa arvioidaan miten tutkimus sujui ja mitä haasteita siinä kohdattiin.

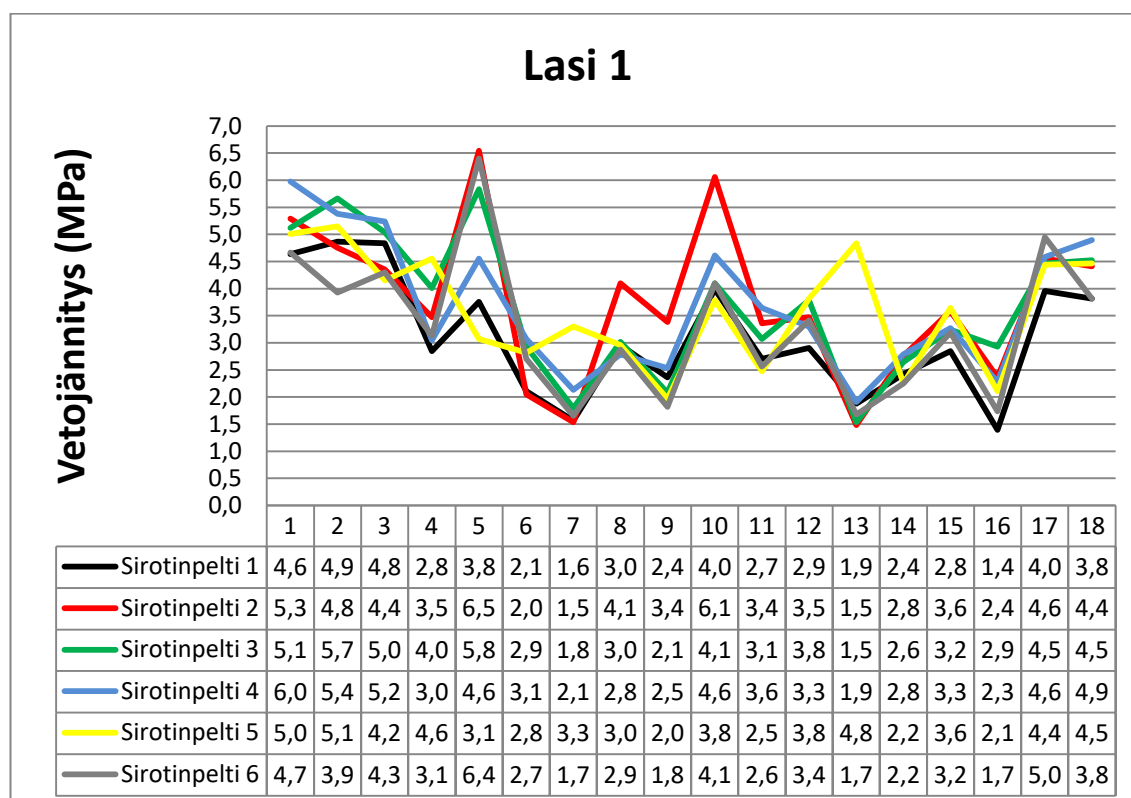
5.1 Tulokset ja havainnot

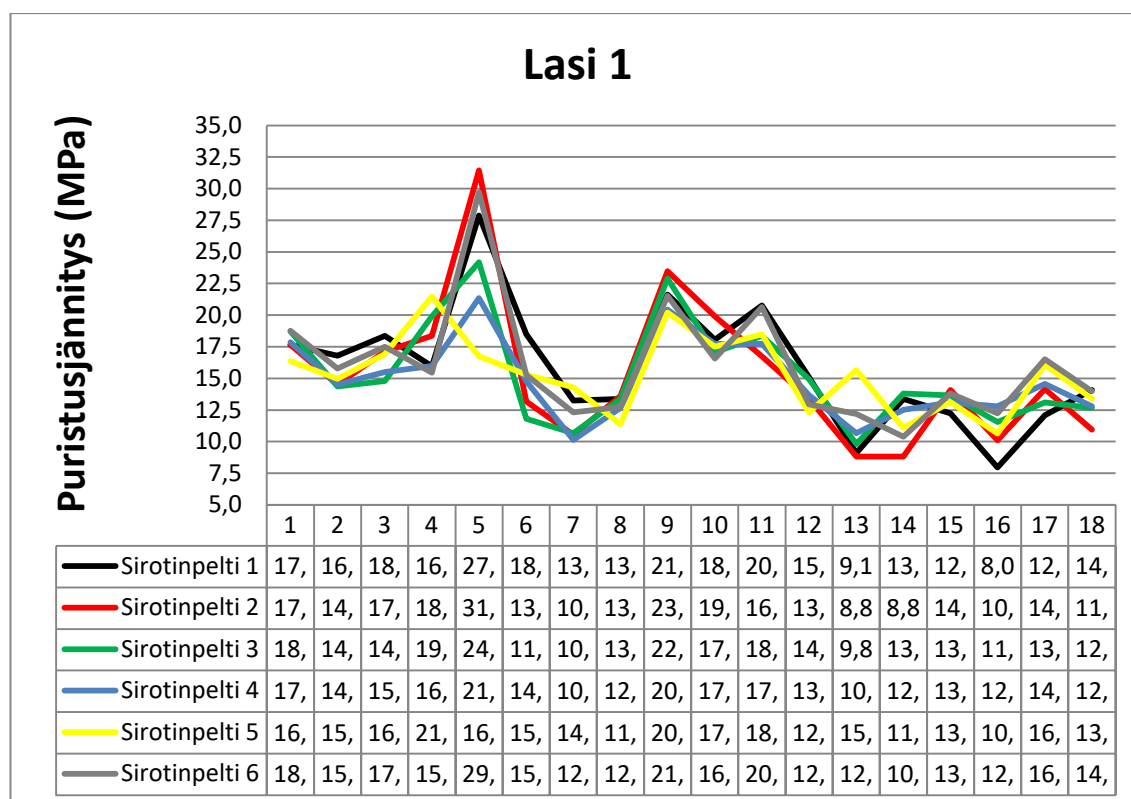
Tutkimuksen tulokset tulevat pääosin koeajoista 1-3, koska niissä tutkittiin erilaisia ilmavirran ohjaajia kahdelle erikokoiselle lasille. Ilmavirran ohjain eli sirotinpelti oli yksi tekijä, joka syy-seuraus -kaaviosta nousi esiin mahdollisena merkittävänä tekijänä reunajännitysten muodostumisiin. Tämän lisäksi näissä koeajoissa tutkittiin kahta lasikokoja, koska haluttiin tietää, miten paljon erilaisemmin reunajännityksen muodostuvat erikokoisille laseille. Tutkimuksen aikana kävikin ilmi, että lasien reunajännitysten mitaustulokset ovat lähes samoja isolle ja pienelle lasille. Tämän takia työhön ei otettu enää mukaan keskikokoista lasia kuten alunperin oli suunniteltu. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta mitaustulokset eri lasikoon välillä olivat samansuuntaisia. Myös kaikkien tulosten keskiarvot olivat toleranssien sisäpuolella, joten sirotinpeltien vaihdolla ei saatu aikaan mitään katastrofaalisia tuloksia. Koeajojen 1-3 kaikki lasit kestivät laboratorion raaputustestin, joten se myös puoltaa sitä asiaa, että erimuotoisten sirotinpeltien välillä ei keskenään ole hirveän isoja eroja.

Tutkimuksessa tutkittiin yhteensä kuutta erilaista sirotinpeltiä, joista yksi on nykyinen tehtaassa käytössä oleva sirotinpelti ja sen lisäksi työlle valittiin kolme muuta sirotinpeltiä, joita tehtaalla on käytössä. Tämä sen takia, että nyt on joku yleiskäsitys lähes kaikista tehtaan sirotinpelleistä. Sen lisäksi tutkimuksessa oli mukana kaksi sirotinpeltiä, joita ei ollut tehtaalla käytössä. Ne olivat muodoltaan aivan erilaisia kuin tehtaan sirotinpellit. Sirotinpelti 5 ja 6 olivat sellaisia, joita ei tehtaalla ole käytössä. Tutkimuksen tuloksista

kävi ilmi, että sirotinpelti 5:n hajonta oli varsinkin puristusjännityksen osalta selvästi paras. Tämä selittyi sillä, että sirotinpelti 5 päästää ilmaa myös läpi, kun muut sirotinpellit ohjaavat ilmaa eri suuntiin. Näin ollen sirotinpelti 5 valikoitui parhaaksi ilmavirran ohjaajaksi, koska työn tavoitteena oli löytää mahdollisimman vakaa taivutusprosessi.

Kuvassa 39 on kaikkien sirotinpellien reunajännitysmittausten keskiarvotulokset veto- ja puristusjännityksen osalta tutkimuksen päälasille eli lasi 1:lle. Koko tutkimus oikeastaan tehtiin tälle lasille ja lasi 2 oli mukana vain sen takia, koska haluttiin ymmärtää erilaisten lasikokojen merkitys reunajännitysten muodostumisissa. Tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään, sillä ilmavirroissa ei ollut eroa koeajojen aikana silloin kun puhallusteho oli 100 %. Kuvista huomaa sen, että etenkin mittapiste 5 on saanut korkeimpia arvoja kuin muut mittapistet kaikilla muilla sirotinpelleillä paitsi sirotinpelti 5:lla niin veto- kuin puristusjännityksessä. Tämän poikkeaman syy todennäköisesti löytyi koeajosta 4, kun siellä selvisi, että yhdestä puhallusputkesta tulee ilmaa tuplasti enemmän kuin muista. Mittapiste 5 sijaitsee tämän puhallusputken vastapäätä, joten todennäköisesti kovempi ilmavirta on blokkannut tämän mittapisteen puhallusputken ilman. Sitten taas mittapiste 13 näkyi selvänä erona sirotinpelti 5:ssä muihin verrattuna ja tämä on se kohta, josta ilmavirtaa tuli tuplasti enemmän. Tämä sirotinpelti päästää ilmaa myös läpi, joten se on osunut suoraan lasiin. Tärkeä havainto kuvista on, että sirotinpelti 5 ei altistunut mittapisteessä 5 tälle puhallusputken vialle. Tämä on tärkeä asia, koska voi olla, että tehtaassa on myös muissa kammiouuneissa samanlaista vikaa. Sirotinpelti 5 tuo tasaisimman tuloksen, vaikka ilmavirrat eivät olisi samat ensimmäisessä jäähdytysaskeluksessa.





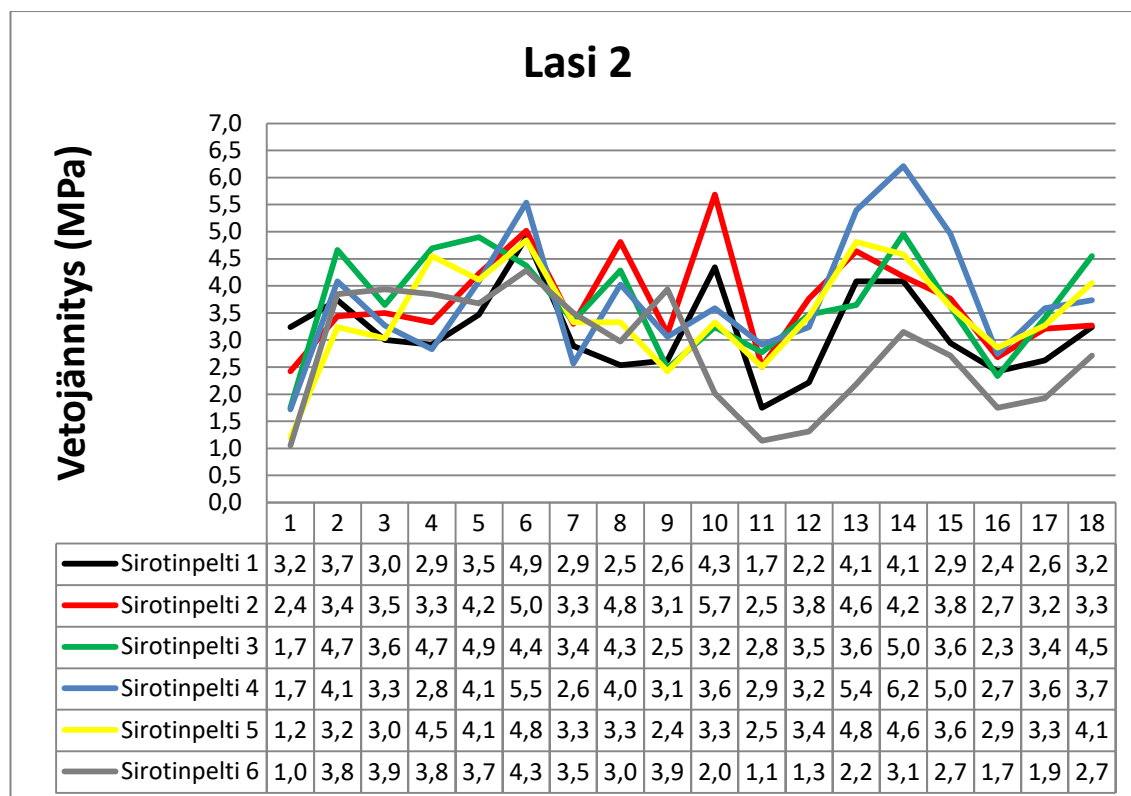
Kuva 39. Kuuden sirotinpellin keskiarvotulokset lasi 1:lle koeajoissa 1-3

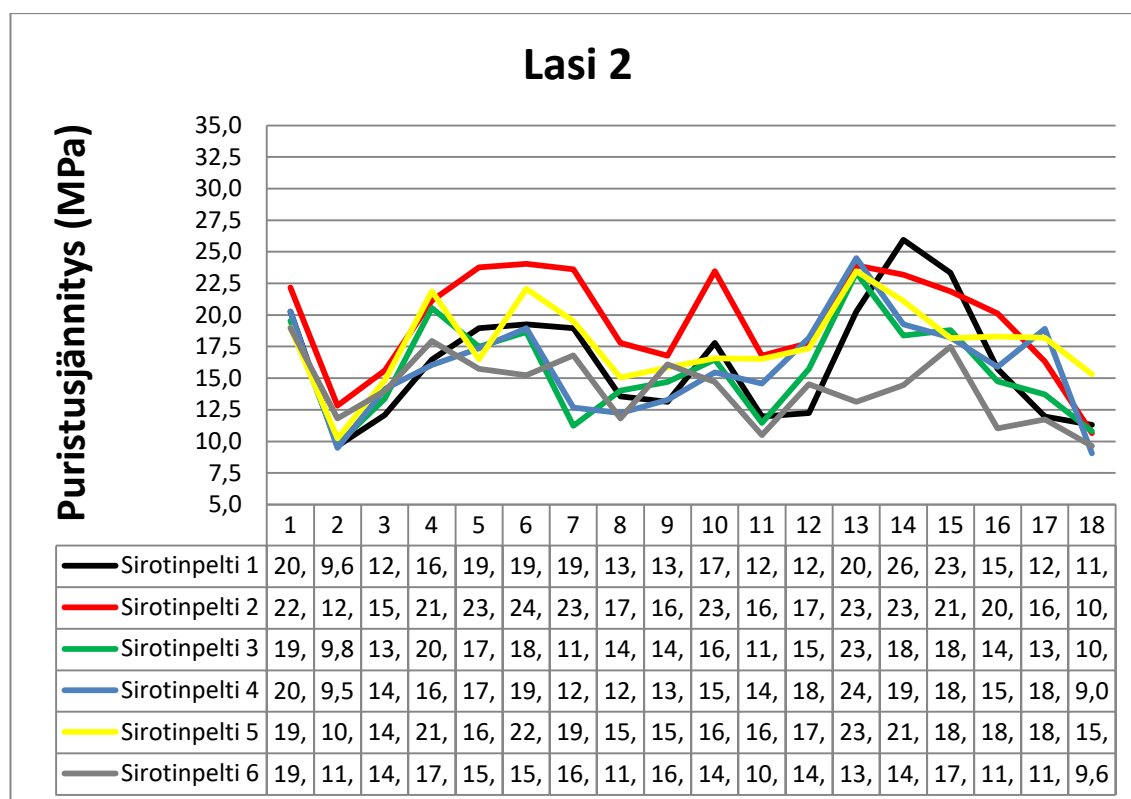
Erilaiset sirotinpellit antoivat lasi 1:lle veto- ja puristusjännityksen keskiarvoissa lähes samoja lukemia. Tässä tutkimuksessa tulee kuitenkin katsoa etenkin mittatulosten keskihajontaa, koska yksi työn tavoite oli saada aikaan vakaampi prosessi. Vakaa prosessi tuo varmuutta tuotelaatuun ja toimintaan pitkällä aikavälillä. Tämän takia keskihajonta valikoitui erityisen tarkkailun alle kaikista mittatuloksista. Kävi ilmi, että sirotinpelti 5 antoi pienimmän keskihajonnan niin veto- kuin puristusjännityksiin kun keskihajontaa vertailtiin kaikkien sirotinpeltien kesken. Tämä näkyy myös kuvista, koska keltainen viiva on kaikkein vähiten levittäytynyt y-akselin suuntaisesti. Nykyisen sirotinpelti 1:n vetojännityksen keskihajonta oli 1,14 ja puristusjännityksen keskihajonta oli 4,95. Sirotinpelti 5 antoi vetojännityksen hajonnaksi 1,09 ja puristusjännityksen hajonnaksi 3,26. Kun koeajossa 4 kompensoitiin tuplasti puhaltava yhden puhallusputken ilmavirtaus pois, niin sirotinpelti 5 antoi vielä paremman keskihajonnan puristusjännitykseen ja nyt se oli 2,69. Ero on merkittävä verrattuna nykyiseen sirotinpeltiin. Myös puristusjännityksen keskiarvo samalla nousi, mikä on hyvä asia.

Tämä ero todistettiin myös tilastollisten menetelmien avulla, sillä p-arvon tuloksen mukaan sirotinpelti 5:n puristusjännityksen hajonta on merkitsevästi parempi kuin sirotinpelti 1:llä koeajoissa 1-3. Kun uunin ilmavirtauksen vika oli kompensoitu, niin koeajon 4 puristusjännityksen hajonta sirotinpelti 5:lla oli vielä merkitsevästi parempi kuin koeajossa 3. Koska puristusjännitys on tärkeämpi kuin vetojännitys lasin kestämisen kannalta, niin lasi 1:lle sirotinpelti 5 on valinta parhaaksi ilmavirran ohjaajaksi.

Kuvassa 40 on vastaavasti kaikkien sirotinpeltien reunajännitysmittausten keskiarvotulokset lasi 2:lle eli pienelle lasille. Siinä pitää huomioida aluksi se, että sirotinpelti 6:sta saatiin vain yksi lasi laboratorioon mittauksiin, joten sen otanta on pienempi verrattuna muihin sirotinpelteihin. Tämä sirotinpelti antoi huonoja tuloksia tälle lasille, joten sille ei otettu uusintakoeajoja. Pienelle lasille sirotinpelti 5 ei antanut niin hyviä tuloksia kuin

isolle lasille. Tämä on loogista, sillä pieni lasi vaatii jäähtyäkseen vähemmän puhallusilmaa kuin iso lasi ja sirotinpelti 5 päästi ilmaa myös läpi, joten tämän takia tämä lasi on saanut korkeimpia arvoja vetojäännityksessä sirotinpelti 5:lla kuin nykyisellä sirotinpellillä. Kuitenkin puristusjännityksessä sirotinpelti 5 antoi keskiarvoltaan paremman tuloksen kuin nykyinen sirotinpelti. Näiden välillä keskihajonnassa oli myös huomattavia eroja, kun sirotinpelti 1 antoi keskihajonnaksi 5,39 ja sirotinpelti 5 antoi vastaavasti 3,81. Kun keskiarvo nousee ja hajonta laskee, niin voidaan todeta, että prosessi paranee tällä sirotinpellillä myös lasi 2:lle, koska vetojännityksessä ei tapahtunut kuitenkaan dramattista muutosta huonompaan suuntaan. Puristusjännityksen ero oli merkittävä myös tilastollisen testauksen mukaan.





Kuva 40. Kuuden sirotinpellin keskiarvotulokset lasi 2:lle koeajoissa 1-3

Koeajossa 4 muutettiin puhallustehoja, koska haluttiin saada selville, voiko sirotinpelti 5:lla saada aikaan vieläkin parempia tuloksia etenkin lasi 2:lle. Tämä sirotinpelti oli paras sirotinpelti pienen hajontansa ansiosta koeajojen 1-3 tulosten perusteella. Koeajon 4 tuloksista kävi ilmi, että 30 % puhallusteho antaa vielä paremmat tulokset lasi 2:lle kuin aikaisemmassa koeajossa. 20 %:a pienemmällä puhallusteholla lasi 2:n vetojännityksen mittaustulosten keskiarvo tippui ja keskihajonta tippui, jotka molemmat ovat hyviä asioita. Tilastollisesti tutkittuna ne tippuivat kuitenkin sen verran, ettei niillä ole tilastollisesti merkitystä. Mutta 30 %:n puhallustehossa ei saatu kompensoitua pois yhtä tuplasti puhaltavaa puhallusputkea, joten todennäköisesti kun tämä vika on korjattu, niin 30 %:n puhallusteho antaa todennäköisesti vieläkin parempia tuloksia lasi 2:lle. Tämä vaatii lisää testejä, joita tässä tutkimuksessa ei voida enää suorittaa. Silti paremman puristusjännityksen ansiosta lasi 2:lle voidaan suositella sirotinpelti 5:sta.

Molemmille laseille valittiin parhaaksi ilmavirran ohjaajaksi sirotinpelti 5. Koeajossa 4 haluttiin tutkia puhallustehoja, koska tälle työlle haluttiin vielä lisäarvoa sillä, että antaako hieman eri ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallusteho vieläkin parempia tuloksia. Tässä koeajossa saatiin kammiounista löytyvä vika kompensoitua puhallustehoja säätämällä 50 %:n ja 40 %:n puhallustehoissa, mutta ei enää 30 %:n puhallustehossa. Kun puhallustehot olivat varmasti samat, niin silloin lasi 1:lle saatiin vielä parempia tuloksia kuin aikaisemmin sirotinpelti 5:lle 50 %:n puhallusteholla, joka on nykyinen kammiounissa oleva puhallusteho tälle tuotteelle. Myös lasi 2:n tulokset paranivat 30 %:n puhallusteholla, vaikka edellä mainittu vika oli tässä läsnä. Vika näkyi selvästi lasi 2:n mittapisteessä 13, joka on juuri kyseisen puhallusputken kohdalla. Kun tämä korjataan, 30 %:n puhallustehon uskotaan antavan vieläkin parempia ja tasaisempia tuloksia. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että sirotinpelti 5 on paras ilmavirran ohjaaja molemmille laseille. Isolle lasille paras ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallusteho on 50 % ja pienelle lasille vastaava optimipuhallusteho on 30 %.

Tulosten merkitys koko tehtaalle on merkittävä. Ensinnäkin, tehtaalla kukaan ei oikein ennen tätä tutkimusta tiennyt onko sirotinpelleillä keskenään mitään eroa. Toiseksi, tehtaalla ei ollut oikein myöskään käsitystä siitä, miten paljon lasikoko vaikuttaa reunajännitysten muodostumisiin. Merkittävin asia on se, että sirotinpelti 5 on aivan erilainen kuin nykyiset tehtaassa olevat sirotinpellit ja se tuo toimintaan jo uudenlaista ajattelua. Seuraavaksi tuleekin vastaan pohdinta, että aletaanko näitä sirotinpeltejä laittamaan taivuttamoon muihin kammiouuneihin. Tai kun tehtaalle tulee uusi kammiouuni, niin asennetaanko siihen sirotinpelti 5:n tyyppinen sirotinpelti. Sirotinpelti 5 antoi vastauksen ensimmäiseen tutkimuskysymykseen, koska sen avulla jäähdytysprosessista saatiin vakaampi.

5.2 Tutkimuksen suositukset ja jatkokehitysajat

Tässä luvussa on kaksi viimeistä vaihetta DMAIC -menetelmästä, jotka ovat kehitysvaihe (Improve) ja valvontavaihe (Control). Tässä luvussa esitellään prosessin parannusehdotuksia tämän tutkimuksen tulosten perusteella. Tämän tutkimuksen teoriaosuudessa kehitysvaiheesta kirjoitettiin, että tässä vaiheessa voi prosessista paljastua jotain yllättävää kun asiaan syvennytään tarkemmin. Näin kävi myös tässä tutkimuksessa, koska viimeisessä koeajossa tuli esille, että yksi puhallusputki on puhaltanut ilmaa todennäköisesti tuplasti enemmän ensimmäisellä askelluksella kuin muut koko tutkimuksen aina. Ei ole tietoa miten kauan tämä vika on ollut kyseisessä kammiouunissa, mutta suurella todennäköisyydellä se on siellä jo ennen tätä tutkimusta. Valvontavaihe alkaa silloin, kun muutos on otettu käyttöön ja näin ollen tätä vaihetta ei voida tässä tutkimuksessa enää suorittaa aikataulujen vuoksi. Se jää tulevaisuudelle tämän raportin ulkopuolelle. Valvontavaihetta ei saa aliarvioida, koska muutos vaatii aina valvontaa ja näin ollen kehityskohdetta on valvottava säännöllisesti esimerkiksi reunajännitysten tarkistustilauksilla tehtaassa laboratorioissa muutoksen käyttöönoton jälkeen.

Tämän työn tuloksien perusteella kohdeyritykselle suositellaan seuraavia prosessin parannussuosituksia:

- Sirotinpelti 5:n asentaminen ja puhallustehojen optimointi kohdeuunille
- Säännölliset ilmavirtamittaukset taivuttamossa
- Isomman otannan hankkiminen lasi 2:lle työssä esitetylle jäähdytysmenetelmälle
- Tuplasti puhaltavan puhallusputken moottorin korjaus
- Uuden reunajännitysmittarin kartoittaminen ja hankinta
- Sirotinpelti 5:n käyttöönotto koko taivuttamossa

Sirotinpelti 5:n asentaminen ja puhallustehojen optimointi kohdeuunille. Tämän tutkimuksen tärkein suositus on asentaa sirotinpelti 5 vakituiseen käyttöön tutkimuksen kohdeuunille. Kohdeuunin koko tuotanto perustuu lähes tulkoon lasi 1:lle, joka on todella iso volyyminen tuote. Sirotinpelti asennetaan fyysisesti kiinni kammiouunin seinään eikä sitä normaalitilanteessa voi vaihtaa eri tuotteiden mukaan, joten sen pitää olla sellainen, että se sopii kaikille tuotteille kyseisessä kammiouunissa. Näin ollen sirotinpellin valinta on "pysyvä asetus", mutta kohdeuuniin se voidaan ainakin aluksi asentaa, koska siinä tehdään niin paljon lasi 1:stä eikä se anna pienelle lasille mitään katastrofisia tuloksia. Kun sirotinpelti 5 asennetaan kohdeuuniin, niin tämän jälkeen täytyy käydä läpi kaikki muut kohdeuunin tuotteet ja tutkia tehtaassa laboratorioissa, miten niiden reunajännitykset ovat muodostuneet uudella sirotinpellillä ja niiden perusteella mahdolli-

sesti täytyy optimoida ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallustehoa. Tässä voidaan käyttää hyväksi tutkimuksessa ollutta lasi 1:n ja lasi 2:n pinta-alaa ja niiden kautta voidaan hakea suoraan optimipuhallustehoa ilman, että kävisi läpi kaikki puhallustehot ja sen jälkeen valitsisi parhaan niistä. Muita tuotteita ei niin hirveästi ole ja tarkistuserään riittää muutama lasi. Näiden kahden toimenpiteen avulla pitäisi saada aikaan hyviä reunajännityksiä, mutta jos niissä vielä ilmaantuisi jotain ongelmia, niin sen jälkeen kolmantena toimenpiteenä voitaisiin tehdä muutoksia muottiin esimerkiksi asentamalla siihen metalliverkkoa. Lasi 1:stä tehdään uunin tuotannosta noin 70-80 % sen koko kapasiteetista ja siihen on jo asetukset valmiina. Näin ollen tarkistuserien mittaaminen muista tuotteista ei ole niin iso työ kuin se olisi jollakin muulla kammiouunilla.

Säännölliset ilmavirtausmittaukset taivuttamossa. Toinen suositus on aloittaa säännölliset ilmavirtausmittaukset taivuttamossa, ettei enää tulisi vastaan tilanteita, joissa yksittäinen puhallusputki puhaltaa tuplatholla muihin verrattuna. Jokaiselle kammiouunille suoritetaan kerran kuudessa viikossa TPM (Total Production Maintenance), jossa kammiouuni huolletaan säännöllisen huolto-ohjelman mukaan. Tähän huolto-ohjelmaan voisi lisätä ilmavirtausmittaukset. TPM:ssä kammiouuni on jo valmiiksi jäähdytetty, joten tämän mittauksen voisi suorittaa myös sisäpuolelta. Siinä on ongelmana kuitenkin se, että sirotinpelti pitäisi irrottaa varmojen tuloksien saamiseksi ja ne eivät välttämättä lähde sieltä aina helposti. Näin ollen ilmavirtausmittaus tehtäisiin kammiouunin ulkopuolelta puhallusputken päässä olevassa moottorissa, koska se pyörii näkyvästi ja sen vierestä saa mitattua ilmavirrat samalla mittarilla kuin koeajoissa mitattiin. Ilmavirrat mitataan ensin käsiajon ollessa 100 % puhallusteholla ja sen jälkeen 50 %:n puhallusteholla. 50 %:n mittaus riittää, koska se on monessa ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallusteho ja siitä näkee jo sen, onko tulokset keskenään samankaltaisia. Tämä suositus vaatii sen, että ilmavirtausmittareita ostetaan tehtaalle enemmän.

Isomman otannan hankkiminen lasi 2:lle työssä esitetylle jäähdytysmenetelmälle. Kolmas suositus on isomman otannan hankkiminen lasi 2:lle tässä työssä esitetylle parhaimmalle jäähdytysmenetelmälle. Tämä voidaan suorittaa vasta, kun kohdeuunin puhallustehon vika on korjattu, koska pienelle lasille valittiin optimi jäähdytysmenetelmäksi 30 %:n puhallusteho ja nyt sitä ei pystytä tekemään, koska vikaa ei tällä puhallusteholla saatu kompensoitua pois. Tällä suosituksella saadaan varmistusta siihen, miten sirotinpelti 5 toimii pienelle lasille yleisesti ja se on tärkeä tieto koko taivuttamon kannalta.

Tuplasti puhaltavan puhallusputken moottorin korjaus. Yksi suositus on tuplasti puhaltavan puhallusputken moottorin korjaus. Tämä on ehdoton toimenpide, kun halutaan vakaa prosessi. Moottori vaatii sähkökaappiin uuden yksikön, joka on helppo vaihtaa. Tämän suosituksen hoitaisi alusta loppuun tehtaan kunnossapito.

Uuden reunajännitysmittarin kartoittaminen ja hankinta. Viides toimenpidesuositus on uuden reunajännitysmittarin kartoittaminen ja hankinta. Nykyinen reunajännitysmittari on hieman vanhahko ja työläs. Jos sirotinpelti 5:sen muotoisia sirotinpeltejä aletaan asentamaan taivuttamoon monelle kammiouunille, niin silloin jokaisesta lasista täytyy muutoksen jälkeen mitata reunajännitykset tehtaan laboratorioissa varmistusmittauksena. Tämä on todella työläs työvaihe suorittaa nykyisellä reunajännitysmittarilla ja lisäksi se vaatii työresurssia paljon, koska mittauksiin menee aikaa paljon. Kartoittamisella tarkoitetaan sitä, että haalittaisiin tietoa, mitä kaikkia mittareita olisi saatavilla. Voisi kuvitella, että 2010 -luvulla olisi kehitetty esimerkiksi sellainen mittari, joka antaa

tuloksen digitaalisena kun asettaa mittarin haluttuun kohtaan. Nyt mittarissa olevaa kiekkoa joutuu pyörittämään moneen suuntaan, kun määritetään veto- ja puristusjännitystä. Digitaalisen mittarin ansiosta myös mittausepävarmuus pienenee huomattavasti, koska tällä hetkellä ihmisen silmä tekee tulkinnan siitä, milloin tulos on hyvä. Vaikka mittari maksaisi reilusti, niin sopii miettiä kummassa säästetään enemmän: uuden mittarin hankinnassa vai siinä, että työlään mittausprosessin takia työn suositukset jäävät vain yhteen kammiouuniin ja sen takia tulee reklamaatioita huonoista reunajännityksistä. Pahimmillaan jopa kohdeuunin prosessinmuutos jää tekemättä, koska nykyinen menetelmä on niin työläs. Yksi vaihtoehto on se, että työn suositukset otetaan käyttöön nykyisellä mittausmenetelmällä, joka myös maksaa siinä vaiheessa, kun se sitoo työntekijää kauemmaksi aikaa lasien mittaamiseen.

Sirotinpelti 5:n käyttöönotto koko taivuttamossa. Kuudes ja viimeinen suositus on erittäin kunnianhimoinen, sillä siinä implementoitaisiin tästä työstä saadut tulokset koko taivuttamoon. Kammiouuneja on tehtaassa 18 kappaletta, joten tämä projekti olisi todella laaja. Se vaatisi ainakin edellä mainitun uuden reunajännitysmittarin ja tarkan prosessikuvausten siitä, miten tarkastuslasit kulkisivat tuotannossa ja milloin ne mitataan. Tarkastuslaseja tulisi tällöin satoja, joten sen takia tämä suositus on erikseen ja aluksi on hyvä keskittyä siihen, että kohdeuunilla otettaisiin käyttöön uusi sirotinpelti ja aluksi käytäisiin läpi kaikki sen uunin tuotteet. Työn tuloksia ei kannata implementoida välttämättä kaikkiin kammiouuneihin, vaan tärkeysjärjestys määräytyisi seuraavien tekijöiden mukaan: tuotteen volyyymi, uunin jäljellä oleva käyttöikä ja uunit, joiden tuotteiden reunajännityksissä on ongelmia.

Osa edellä mainituista suosituksista voitaisiin lukea jatkokehitysideoihin, koska ne kehittävät myös koko taivuttamon toimintaa ja tuotelaatua. Jatkokehitysideoina nostetaan esille sellaisia asioita, jotka liittyvät tämän työn aihepiiriin, mutta ne eivät varsinaisesti liity tämän työn tuloksiin. Kolme jatkokehitysideaa ovat:

- Sirotinpeltien kiinnityksien vakioiminen
- Ongelmatuotteille oma tutkimus
- Käsipuhalluksen puhallustehon optimoiminen

Sirotinpeltien kiinnityksien vakioiminen. Koeajoissa tämän tutkimuksen epämuukavim vaihe oli sirotinpeltien irrottaminen ja kiinnittäminen kammiouunissa. Siellä on niin kuumaa, että ruuvit pahimmillaan palavat kiinni ja näin ollen sirotinpeltien vaihtaminen on työlästä. Jos ja kun kohdeyrittäjä haluaa implementoida tämän tutkimuksen tuloksia, niin uusien sirotinpeltien sisäänajossa tulee väkisininkin vastaan tilanteita, joissa sirotinpelteilä täytyy vaihtaa monta kertaa. Esimerkiksi kun tehdään koe-erä ja jatketaan normaalia tuotantoa. Tässä tilanteessa normaalituotanto todennäköisesti tapahtuisi kammiouunin normaaleilla vanhoilla sirotinpelteilä, koska koe-erän reunajännitysmittaustulosten saamisessa kestää. Sirotinpeltien kiinnitys voisi tapahtua jonkinlaisen lukitusmekaniikan avulla tai sitten kammiouunin seinään tehtaisiin jokin teline, johon sirotinpelti laitetaan.

Ongelmatuotteille oma tutkimus. Kohdeyrittäjässä on muutamia ongelmatuotteita liittyen reunajännityksiin. Nämä tuotteet usein poikkeavat normaalista linja-autolasista, kuten esimerkiksi puimurien tuulilasit. Näille tuotteille olisi syytä tehdä tällainen samantyyppinen isompi tutkimus. Sen ei välttämättä tarvitse olla sirotinpelteihin liittyvää, vaan siinä voitaisiin tutkia esimerkiksi puhallustehoja, jäähdytysaikoja tai muottitekni-

siä ratkaisuja. Myös ongelmatuotteen kammiouuniin voitaisiin asentaa sellainen sirotinpelti, jonka muoto olisi suosiollinen ongelmatuotteelle ja sitä kautta lähdetäisiin muille tuotteille optimoimaan jäähdytysmenetelmää tälle sirotinpellille.

Käsipuhalluksen puhallustehon optimoiminen. Normaalissa tuotannossa käsipuhallusta ei lähtökohtaisesti käytetä. Sitä käytetään silloin kun lasi alkaa näyttämään siltä, että se tippuu muotilta eli on saanut liikaa lämpöä. Käsipuhalluksen puhallusteho on aina 100 %. Monessa tuotteessa ensimmäisen jäähdytysaskelluksen puhallusteho on 50 %, koska tässä vaiheessa lasiin muodostuu sen reunajännitykset. Ero on huomattava 100 %:n ja 50 %:n välillä. Asetus on sen takia 100 %, koska tätä käytetään silloin "kun tulee kiire", joten sen teho on silloin mahdollisimman hyvä. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että 20 %:n puhallustehon lasku isolla lasilla saa aikaan selvästi huonompia tuloksia isolla lasilla. Näin ollen voisi olla paikallaan tutkia sitä, miten paljon käsipuhalluksen käyttö oikeasti vaikuttaa reunajännityksiin ja onko vaikutus pienempi, jos puhallusteho asetettaisiin esimerkiksi 80 %:iin? Tätä puhallustehon eroa ei välttämättä huomaa edes lasin taivutustilanteessa, mutta voi olla, että sen laskeminen pienentäisi niitä "vahinkoja", joita syntyy kun käsipuhallusta käytetään maksimiteholla. Totuus on kuitenkin se, että käsipuhallusta joudutaan välillä käyttämään.

Tässä luvussa tuotiin esille kuusi prosessin parannussuositusta ja kolme jatkokehitysideaa. Kuudesta parannussuosituksesta viimeinen suositus vaatii sen, että kaikki edellä mainitut suositukset on toteutettu ja niissä on onnistuttu. Kuudes suositus on todella laaja projekti, johon aikaa kuluisi ainakin vuoden verran. Sen takia voi olla parempi, ettei tätä uudistusta tehdä sellaisille kammiouuneille, joissa jäljellä oleva käyttöikä on pieni. Jatkokehitysideat ovat sellaisia, jotka ovat tulleet esille tämän tutkimuksen aikana.

5.3 Työn arviointi ja rajoitteet

Viimeisessä luvussa arvioidaan tämän työn toteutumista. Työtä arvioidaan kolmesta näkökulmasta: Työn tutkimustulokset, tutkimuksen menetelmät sekä työn haasteet ja rajoitteet.

Tutkimustulosten arviointi: Työn avulla saatiin konkreettisia tutkimustuloksia neljän eri koeajon avulla, joiden ansiosta parhaaksi valitun jäähdytysmenetelmien avulla nykyisestä jäähdytysprosessista saadaan entistä vakaampi. Nämä tutkimustulokset pystyttiin osoittamaan myös tilastollisesti, että nykyisen ja parhaaksi valitun jäähdytysmenetelmän välillä on merkittäviä eroja. Tämä oli myös toinen tutkimuskysymys. Näin ollen työn tuloksia voidaan pitää onnistuneena, koska saatiin vastaus siihen mitä alussa haluttiin. Toinen tutkimuskysymys oli eri elementtien vaikutus reunajännitysten muodostumisiin ja muodostuvatko ne eri tavalla erikokoisiin lasihin. Myös tähän saatiin vastaus, sillä erikokoisilla lasilla ei näyttänyt olevan mitään konkreettista vaikutusta. Sirotinpellien muodon vaikutus reunajännityksiin oli lopulta pienempi mitä tutkimuksen alussa kuviteltiin, mutta tämä on jäähdytysprosessin kannalta hyvä asia. 4. luvussa esiteltiin tutkimuksen kaikki tulokset viivakaavioina, joista selviää, että mittatulokset ovat hyvin samanlaisia keskenään samaa asiaa mitattaessa. Näin ollen tutkimuksen reliabiliteetin voidaan sanoa olevan hyvä, koska sama mittaaja on saanut samanlaisia mittaustuloksia jokaisella kerralla. Yksittäisiä eroja on, mutta ne eivät johdu mittausten menetelmästä vaan jostakin erityisyydestä.

Tutkimuksen menetelmien arviointi: Tutkimuskysymyksiä lähdettiin ratkomaan tutkimusmenetelmän avulla, joka tässä tutkimuksessa on kokeellinen tutkimus. Tämä sen takia, että alussa oli tiedossa monia muuttujia, jotka voivat vaikuttaa reunajännitysten syntymiseen eikä silloin ollut vielä selvää, miten paljon ne oikeasti vaikuttavat. Asiaa lähdettiin tutkimaan monimuuttujakokeiden kautta ja DOE -koesuunnittelu olikin tämän työn keskiössä ja sen perusteella suunniteltiin kaikki koeajot käytännön näkökulma huomioiden. Lukumäärällisesti monta erilaista koeajoa osoittautui hyväksi valinnaksi, koska niiden avulla saatiin rauhassa tutkia asioita eikä ollut paineita siitä, saadaanko aikaan hyviä vai huonoja laseja. Keskittyminen oli itse tutkimustyössä ja lopussa vasta arvioitiin onnistuminen. DMAIC -menetelmä oli myös työssä mukana, mutta ehkä tähän tarkoitukseen se oli turha. Sillä diplomityössä tulee käytyä läpi tämän menetelmän vaiheita joka tapauksessa. Tämä menetelmä on varmasti hyvä kun tehdään eri projekteja työelämässä, sillä ainakin oman kokemuksen mukaan määrittelyvaihe jää usein liian vajaaksi. Tulevaisuutta varten oli varmasti hyvä asia, että DMAIC -menetelmä oli mukana tässä työssä, sillä nyt kyseinen menetelmä on paremmin muistissa. Tutkimuksen tuloksia analysoitiin Minitabilla ja sen opetteleminen olisi kannattanut tehdä ennen kuin alkoi koeajojen suorittaminen. Tällöin olisi voinut keskittyä vain koeajojen tuloksien analysoimiseen eikä aikaa olisi kulunut siihen, että miten Minitab toimii. Tästä oppina tulevaisuuteen, että ennen käytännön suoritusvaihetta kannattaa varmistaa, että tietää ja tuntee kaikki asiat joita on käyttämässä kyseisessä tutkimuksessa. Tutkimus suunniteltiin hyvin ennen koeajoja muun muassa syy-seuraus -kaavion kautta ja tämä vaihe todellakin kannatti tehdä huolella. Se toi vakaan pohjan tutkimustyölle ja asioihin ei tarvinnut enää koeajojen aikana palata, kun tiesi että tutkimus on hyvin suunniteltu.

Työn haasteet ja rajoitteet: Työn suurin yksittäinen rajoite on otanta, sillä vaikka mittapisteitä oli paljon, niin siitä huolimatta yhdellä samalla asetuksella tehtiin koeajoissa 1-3 kolme lasia ja koeajossa 4 kaksi lasia. Tämä antaa vahvaa suuntaa siihen miten kyseinen asetetus toimii, mutta silti täyttä varmuutta sillä ei voi mitenkään saada. Pienen otannan suurin syy oli aika ja se, että kohdeuunilla on paljon tilauksia. Jos tässä tutkimuksessa olisi ollut enemmän otantaa, niin silloin joitakin asioita oltaisi voitu suositella enemmän, kuten esimerkiksi sirotinpeltien asentamista moniin kammiouuneihin heti. Työssä haasteellista oli tutkijan oma kokemus lasiteollisuuden alasta, sillä varsinkin tutkimuksen alussa kysymysmerkkejä oli paljon. Tämä aiheutti sen, että vaikka teoriaosuus oli kirjoitettu jo hyvissä ajoin, niin koeajojen suunnittelu ja toteuttaminen venyi. Tämä tapahtui yksinkertaisesti siitä syystä, että piti kerryttää kokemusta siitä, miten asiat oikeasti menevät ja mitkä asiat vaikuttavat mihinkin asioihin. Jälkikäteen sanottuna tämä kannatti. Aikataulullisesti tutkimus oli onnistunut, sillä aikaa tähän kului yhteensä 10 kuukautta. Tämä on erittäin hyvä lukema, koska tutkimuksen koeajoja ja reunajännitysmittauksia lukuun ottamatta kaikki työ tapahtui normaalin päivätyön ohella iltaisin ja viikonloppuisin. Työssä toi haastetta myös viimeisessä koeajossa löydetty puhallusputki, jonka puhallusilma oli tuplasti enemmän kuin muilla puhallusputkilla. Tämä löytö toi yhtäkkiä aivan uuden näkökulman koko tutkimuksen aikaisempiin tuloksiin ja tämän ansiosta muutamiin mysteeriasioihin saatiin vastaus tutkimuksen loppupuolella. Tämä vika korostaa vain sitä, että vaikka kaikki näyttäisi päältä päin hyvältä, niin jokin vika voi silti vaikuttaa taustalla ja näin ollen aiheuttaa prosessiin kohinaa.

LÄHTEET

- China Suppliers, OEM Bus Windscreen Glass Thermal Bending Furnace, 2019. Saatavissa (viitattu 17.11.2019): <https://detail.en.china.cn/provide/p159716995.html>
- M. Grönroos, Johdatus tilastotieteeseen, Tammerprint Oy, Tampere, Suomi, 2003, 4-5 p.
- T. Hannukainen, S. Slotte, E. Kilpi, R. Nikiforow, Johtamisen kuntokoulu, Vuorovaikutuksella laadun läpimurtoon, Talentum Oyj, Helsinki, Suomi, 2006, 31-32 p.
- T. Heikkilä, Tilastollinen tutkimus, Edita Publishing Oy, Helsinki, Suomi, 2014.
- R. Henkel, Test of Significance, Beverly Hills, 1976.
- J. Karisola, Reshaping bus windshields with modern technology, 2016. Saatavissa (viitattu 17.11.2019): <https://www.glastory.net/bus-windshields/>
- E. Karjalainen, Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla, Taguchi-menetelmä, Mäntän kirjapaino Oy, Mänttä, Suomi, 1990, 11-12 p., 45 p., 48 p., 52-58 p., 72 p.
- E. Karjalainen, Quality Knowhow Karjalainen Oy, Laadun perustyökalut - Pareto, histogrammi ja ohjauskortti?, 2007. Saatavissa (viitattu 20.4.2019): <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/laadun-perustyoekalut-pareto-histogrammi-ja-ohjauskortti/>
- T. Karjalainen, Koesuunnittelu - Tehokas prosessin sekä datankeräys- ja analysointimenetelmä, 2007. Saatavissa (viitattu 30.5.2019): <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/koesuunnittelu-tehokas-prosessin-sekae-datankerays-ja-analysoin/>
- T. Karjalainen, Quality Knowhow Karjalainen Oy, Yhdistä ideointityökaluilla luovan ajattelun eri ulottuvuudet - Aivoriihi, ryhmittelykaavio sekä kalanruotokaavio, 2007. Saatavissa (viitattu 20.4.2019): <http://www.qk-karjalainen.fi/fi/artikkelit/luova-ajattelu/>
- T. Karjalainen, E. Karjalainen, Laatujohtamisoppien soveltaminen PK-yritykseen - SPC, systeemitteoria, Tor-teoria, N paino, Lahti, Suomi, 1999, 10-14 p.
- L. Karkela, M. Kervinen, P. Meriläinen, I. Parkkila, R. Seppänen, maol taulukot, Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu, Suomi, 2007, 72-77 pp.
- Kolb, K. E. & Kolb D. K., The chemistry of glass, Journal of Chemical Education, 56 (9), 1979, pp. 604.
- P. Keller Six Sigma Demystified, Second Edition, McGraw-Hill Education, United States of America, 2011.
- K. Kolehmainen, Kimmokertoimet - taulukko, 2015. Saatavissa (viitattu 15.4.2019): <https://www.karikolehmainen.com/1124>
- Laatuakatemia, Laatu työkaluja, 2010. Saatavissa (viitattu 19.4.2019): <http://www.kotiposti.net/tuurala/PDCA.htm>
- O. Lecklin, Laatu yrityksen menestystekijänä, Talentum Oyj, Helsinki, Suomi, 2006, 123 p.
- R. Lintula, Lean Six Sigma on prosessien systemaattista ja tuloshakuista kehittämistä! (osa 1), 2015. Saatavissa: (viitattu 4.5.2019): <https://www.aalto.pro.fi/aalto-leaders-insight/2015/lean-six-sigma-on-prosessien-systemaattista-ja-tuloshakuista-kehittamista-osa-1>

- R. Lintula, Define - Tunnista kehittämistarve ja aseta projekti huolella (osa 2), 2015. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): <https://www.aaltopro.fi/aalto-leaders-insight/2015/lss-dmaic-define-tunnista-kehittamistarve-ja-asetta-projekti-huolella-osa-2>
- R. Lintula, Analyze - analysoi ongelman juurisyyt esille (osa 4), 2016. Saatavissa (viitattu 4.5.2019): <https://www.aaltopro.fi/aalto-leaders-insight/2016/lss-dmaic-analyze-analysoi-ongelman-juurisyyt-esille-osa-4>
- H. Lehto, R. Havukainen, J. Maalampi, J. Leskinen, Fysiikka 2: Lämpö, Tammi, Helsinki, Suomi, 2009, 60-61 p., 116-117 p.
- P. Manninen, M. Ylen, Tilastollisen päättelyn käytäntö, Tilastotiedettä soveltajille, TI- Tutkimuspalvelu Oy, Tampere, Suomi, 2001, 1 p., 20-21 p.
- J. Metsämuuronen, Tilastollisen päättelyn perusteet, International Methelp Ky, Helsinki, Suomi, 2002, 22-24 p.
- J. Pihkala, Kokonaisprosessit, Lasin valmistus. Saatavissa (viitattu 10.4.2019): <http://prosessitekniikka.kpedu.fi/index-kp-kp.htm>
- Pilkington: Floatprosessi, 2019. Saatavissa (viitattu 31.5.2019): <https://www.pilkington.com/fi-fi/fi/tietoa-yhtiosta/mita-lasi-on/floatprosessi>
- Pilkington: Lasin koostumus, 2019. Saatavissa (viitattu 19.4.2019): <https://www.pilkington.com/fi-fi/fi/tietoa-yhtiosta/mita-lasi-on/lasin-koostumus>
- Pilkington, Lasifakta, 2012, pp. 68.
- M. Rainamo, M. Riikonen, Lasirakentajan käsikirja, Enterpress Oy, Tampere, Suomi, 1999, p. 13.
- H. Ruonavaara, Johdatus tieteelliseen tutkimukseen, Luento 5-6: Tutkimusasetelman rakentaminen, 2011.
- R. Salomäki, Suorituskykyiset prosessit - Hyödynnä SPC, Tammer-Paino Oy, Tampere, Suomi, 2003, 46 p., 86-92 p., 114-117 p., 133-134 p., 155-157 p., 166-169 p., 179-180 p., 337-339 p., 341-342 p., 347 p.
- J.E. Shelby, Introduction to Glass Science and Technology, TJ International Ltd, Cornwall, UK, 2005, 21-22 p.
- Six Sigma, Mitä Lean Six Sigma on?, 2019. Saatavissa (viitattu 28.4.2019): <http://www.sixsigma.fi/fi/six-sigma/>
- M. Sokovic, D. Pavletic, K. Kern Pipan, Quality Improvement Methodologies – PDCA Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43, 2010, pp. 476-477.
- S. Stefanovic, I. Kiss, D. Stanojevic, N. Janjic, Analysis of technological process of cutting logs using Ishikawa diagram, Acta Tehnica Corviniensis - Bulletin of Engineering, Vol. 4, 2014, pp. 93-94.
- P. Suomala, O. Manninen, J. Lyly-Yrjänäinen, Laskentatoimi johtamisen tukena, Edita, Helsinki, Suomi, 2011, 195-196 p.
- T. Sutela, Lasi rakennusmateriaalina. Saatavissa (viitattu 19.4.2019): <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK050403.pdf>
- A. Taanila, Kruskal-Wallis -testi, 2013. Saatavissa (viitattu 31.5.2019): <https://tilastoapu.wordpress.com/tag/ei-parametriset-testit/>
- A. Taanila, Khiin neliö -testi - lisätietoa, 2019. Saatavissa (viitattu 31.5.2019): <https://tilastoapu.wordpress.com/2013/01/17/khiin-nelio-testi-lisatietoa/>
- M. Turunen, Mineraalien ominaisuudet, 2018. Saatavissa (viitattu 15.4.2019): <http://www.geologia.fi/index.php/2018/06/10/mineraalien-ominaisuudet/>
- R. Walpole, R. Myers, S. Myers, K. Ye, Probability & Statistics for Engineers & Scientists, Ninth Edition, Pearson Education, USA, 2012, 668-669 p.
- D. J. Wheeler, Five Ways to Use Shewhart's Charts, Quality Digest, Vol. 17, 1997, p. 21.