

# UUDEN KARTONKIVUOAN TESTAUS- JA YLÖSAJOPROSESSIN KEHITYS

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Muovitekniikka  
Opinnäytetyö  
Kevät 2010  
Ilari Vahtila

Lahden ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ala  
Muovitekniikka

ILARI, VAHTILA: Uuden kartonkivuoan testaus- ja ylösajoprosessin kehitys

44 sivua, 1 liite

Kevät 2010

## TIIVISTELMÄ

---

Opinnäytetyö tehtiin Stora Enso Packaging:in toimeksiannosta Lahdessa. Opinnäytetyöni tavoitteena oli kehittää kartonkivuoan ylösajoprosessia ja optimointia, löytää vuoan vääntyilyyn syitä sekä pyrkiä vaikuttamaan niihin. Vuonan tutkimisessa käytettiin differentiaalista pyyhkäisykalorimetriä (DSC), jotta vääntyilyyn syitä saataisiin selville. Valmistusprosessin optimointimenetelmien yhteydessä keskitytään enimmäkseen Taguchi -menetelmän soveltuvuuteen vuokaprosessissa. Vuokaprosessin ylösajon kehityksen päätarkoitus oli listata ylösajossa huomioitavat asiat, jotta ylösajoprosessille saadaan laadittua selkeät suoritusohjeet.

Teoriaosassa keskitytään täyteaineiden mahdollisuuksiin vuoan valmistuksessa ja niiden vaikutuksia taloudelliselta, laadulliselta ja käytännölliseltä kannalta. Parametrit ja niillä saavutettavat muutokset tuotteen laadun näkökulmasta käsitellään myös teoriaosuudessa. Lisäksi esitellään työssä käytettyjä menetelmiä ja kerrotaan niiden merkitys opinnäytetyössä.

Käytännön osuudessa selvitettiin kiteisyysasteen vaikutusta muiden parametrien ohella vääntyilyyn. Parametrien vaikutuksia selvitettiin valmistusprosessissa ja ne koottiin helposti luettavaksi listaksi. Myös muita mahdollisia syitä vääntyilyyn selvitettiin ja tutkittiin. Lisäksi Taguchi -menetelmän soveltuvuutta ja käyttöä vuokaprosessissa arvioitiin. Työn lopussa analysoidaan työn tuloksia ja arvioidaan tulevaisuuden kehityskohteita.

Työssä selvisi syitä vuoan vääntyilylle mutta osa niistä on mahdottomia poistaa prosessiteknisistä syistä. Prosessin ylösajoon laadittiin tarkastuslista, jonka mukaan jatkossa voidaan systemaattisemmin saattaa tuote tuotantoon. Tästä saadaan taloudellista hyötyä yritykselle sekä selkeät toimintatavat työntekijöille.

Avainsanat: kartonkivuoka, ylösajo, DSC, Taguchi

Lahti University of Applied Sciences  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Plastics Engineering

ILARI, VAHTILA: Development of the testing and start-up process of a  
new carton tray

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering 44 pages, 1 appendix

Spring 2010

## ABSTRACT

---

This thesis was commissioned by Stora Enso Packaging in Lahti. The main objective of the study was to find the right and optimized parameters in the ramp-up process in order to avoid warpage of the new carton tray, specify the problems and try to control them. For example the DSC method was used in this warpage study. When optimizing the production process parameters the focus was on the usability of the Taguchi method. In order to develop the ramp-up process, the main objective was to list the factors essential for the process so that it would be possible to make a clear checklist for operators.

In the theoretical part the focus is on possibilities to use additives / fillers and the effect from the economical, quality and practical points of view. Parameters and what can be achieved by using them is discussed in the theoretical part. In addition, the methods used in this study are presented and their importance is discussed.

In the practical part, the effects of crystallization degree and other parameters on warpage were studied. An easily understandable list was made of the effects. Other potential reasons for warpage were also examined. In addition, the suitability and usability of the Taguchi method for the tray process was evaluated. Finally, the results were analyzed and the future development areas were pointed out.

In the thesis several reasons for warpage were found, but some of them are impossible to remove because of process related reasons. A ramp-up checklist has been created and later on it will be easier and more systematical to proceed in the ramp-up phase. This gives economical benefits for the company and clear and systematic procedures for pilot drivers and operators.

Keywords: carton tray, ramp-up, DSC, Taguchi

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	POLYETEENITEREFTALAATTI (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>N</sub> )	9
2.1	PET yleisesti	9
2.1.1	PET:n edut ja ongelmat verrattuna muihin pakkausteollisuuden materiaaleihin	10
2.1.2	PET:n prosessointi	11
3	TÄYTEAINEIDEN MAHDOLLISUUDET	12
4	PARAMETREILLÄ VAIKUTTAMISEN MAHDOLLISUUDET	13
4.1	Parametrien syy ja seuraussuhteet	13
4.2	Vääntyilyn hallinta	14
4.3	Polymeerin kiteytyminen ja amorfisuus	14
4.4	Optimointi	15
4.5	TAGUCHI -menetelmä	17
5	KÄYTETYT MENETELMÄT, LAITTEET JA MATERIAALIT	19
5.1	Laitteet	19
5.2	Mikrotus ja uunitus	19
5.3	DSC eli Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria	20
5.4	Pinhole-testaus	20
5.5	Materiaalit	20
6	VÄÄNTYILYN HALLINTA	21
6.1	Mikroaaltouunitesti eri lämmöillä	21
6.2	Uunitesti	21
6.3	DSC-testaus	22
7	OHJEISTUS TUOTTEEN YLÖSAJOON SEKÄ OPTIMOINTIIN	28
7.1	Ylösajon ja optimoinnin onnistumiseen vaikuttavat asiat	29
7.1.1	Ympäristötekijät	29
7.1.2	Laitteisto	30
7.1.3	Vuokamateriaalit	31
7.2	Tuotteen ylösajon tarkastuslista	33
7.3	Optimoinnin mahdollisuudet	35
7.3.1	Johtopäätökset ylösajosta ja optimoinnista	36
8	YHTEENVETO	37

## LÄHTEET

## Alkusanat

Opinnäytetyö tehtiin vuoden syksyn 2009 ja kevään 2010 välisenä aikana opintojen ohessa, Stora Enso Packaging:lle. Ohjaajana toimivat Lahden ammattikorkeakoulun puolelta lehtori Reijo Heikkinen sekä yliopettaja Pirkko Järvelä. Stora Enso:lla yhteistyössä toimivat kehitysinsinööri Timo Myllys sekä tekninen päällikkö Päivi Määttä. Suuret kiitokset kaikille heille antamastaan tuesta. Lisäksi haluan kiittää tuotannossa työskenteleviä Petri Mikkolaa sekä Sami Kangasahoa avusta kokeiden suorituksessa ja tiedon saamisessa. Kiitokset kuuluvat myös kaikille muille työni valmistumisessa auttaneille henkilöille.

## Sanastoa

Aihio	Kartonki, joka on leikattu muotoon ja siihen on tehty nuutit. Se voi olla pinnoitettu muovikalvolla.
Kiteisyys	Kiinteä aine koostuu kiteisestä ja amorfisesta aineksesta. Kiteisessä aineessa polymeeriketju on ”laskostunut” järjestyneiksi alueiksi, kun taas amorfisissa aineissa polymeeriketjut ovat ”sekaisin”.
Lasimuutoslämpötila	Lasimuutoslämpötilalla viitataan lämpötilaan, jonka alapuolella polymeerin amorfisessa rakenteessa olevat molekyylivetket menettävät liikkuvuutensa.
Muovi	Yhden tai useamman polymeerin ja lisäaineen seosta kutsutaan muoviksi.
Nuutti	Painettu ura kartonkiaihiossa (ei läpi)
Polymeeri	Suurikokoinen molekyyli eli makromolekyyli, joka on muodostunut pienistä osamolekyyleistä eli monomeereista kemiallisten reaktioiden kautta. Sana polymeeri muodostuu kreikan kielen sanoista poly = useita, meros = osia
Stanssi	Stanssi on puristin, jolla voidaan painaa aihioon muotoja, reikiä tai nuutteja sekä leikata aihiolle oikea muoto.
Sulamislämpötila	Sulamislämpötilalla viitataan lämpötilaan, jossa osakiteisen polymeerin kiderakenne hajoaa.

Wollastoniitti	( <u>CaSiO<sub>3</sub></u> ) on pyroksenoidiryhmään kuuluva hauras mineraali. Mineraaleja käytetään muoveissa lisäaineina.
Lyhenteitä	
PET	Polyeteenitereftalaatti
PET-C	Kiteinen PET-> jäykempi, parempi lämmön kesto ja sulalajuus kuin amorfisella PET:lla, voidaan laittaa uuniin
PET-A	Amorfinen PET -> kirkas, hyvä kosteudenkesto, vääristyy jo kuumassa vedessä
PET-G	Glykolimodifioitu PET -> parempi sulalajuus, muovatavuus, työstettävyys, jäykkyys, kovuus ja sitkeys kylmässä kuin perinteisellä PET - tyypillä?
PET-P	Biakksiaalisesti orientoitu PET -> Lämpöstabiili ja kosteuden kestävä
PVDC	Polyvinylideenikloridi. Erinomainen neste- ja kaasuesite
E/VAL	Eteeni/vinyylialkoholikopolymeeri (EVOH).



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aihe syntyi Stora Enson tarpeesta kehittää uuden kartonkivuoan valmistusprosessia. Ensimmäinen tavoite oli listata mitkä asiat vaikuttavat tuotteen onnistuneeseen ylösajoon ja tehdä havaintojen perusteella ohjeistus. Toinen tavoite oli tutkia vuoassa lämmön aiheuttamia vääntyilyn syitä, jotta vääntyilyä voitaisiin vähentää. Tässä yhteydessä oli tarkoituksena myös miettiä materiaaliin lisättävien lisäaineiden mahdollisuuksia. Kolmas tavoite oli tutkia ylösajon vaiheita, jotta voidaan suorittaa koeajot luotettavasti systemaattisin toimintatavoin. Näin tehostetaan ylösajovaihetta ja saadaan luotettava pohja myös seuraaville ajokerroille. Ylösajoista ja koeajoista kerätyillä tiedoilla vähennetään turhaa tekemistä ja työvaiheita sekä helpotetaan tulevaisuuden toimintaa. Neljäs tavoite oli selvittää Taguchi -laatu järjestelmän soveltuvuutta vuokaprosessiin sekä esitellä menetelmä ja sen edut vuokatuotannossa.

## 2 POLYETEENITEREFTALAATTI (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>N</sub>)

### 2.1 PET yleisesti

Polyeteenitereftalaatti eli lyhenteeltään PET kuuluu teknisten muovien ryhmään. Teknisiä muoveja käytetään nimen mukaisesti usein teknisissä kohteissa. Tekniset muovit ovat valtamuoveja hieman kalliimpia sekä vähemmän käytettyjä, mutta kuitenkin yleisesti käytettyjä muoveja (Järvinen 2008, 22.)

PET valmistetaan tereftaalihappoa ja eteeniglyolia polymeroimalla. Polymeroinnissa pienet molekyylit yhdistyvät katalyyttien avulla pidemmiksi polymeeriketjuiksi. Tereftaalihappo esteröidään ensin metanolilla ja saatua esterää käytetään sitten polymeerin valmistukseen. Tämän jälkeen esteröinti tapahtuu 190 -200 °C lämpötilassa, jolloin metanoli tislautuu pois. Loppuesteröinti suoritetaan tyhjiössä (Seppälä 2008, 207.)

Polymeeri soveltuu erinomaisesti vahvojen kalvojen ja kuitujen valmistukseen. Alun perin PET-polymeeri onkin syntynyt kuituteollisuuden tarpeisiin. Kuitua käytetään yleisimmin vaateteollisuudessa vaatteissa, teknisissä tuotteissa, kuten köysissä ja nostoliinoissa. Tästä kuidusta käytetään nimitystä polyesteri, koska PET on tunnetuin termoplastinen polyesteri. (Järvinen 2008, 74.)

Virvoitusjuomapullot ja jäykät läpinäkyvät ruokapakkaukset ovat viimevuosina kasvattaneet suosiota ja näin ollen nostaneet PET:n käyttöä. PET:n tuotantokapasiteetti oli vuonna 2008 Seppälän mukaan yhteensä 3 460 miljoonaa kiloa, tästä kaksi kolmasosaa ruoka- ja juomapakkauksiin. PET:n tuotanto on kasvanut 5 % kasvuvauhdilla 2000-luvulla. PET:n hinta on noussut maltillisesti suosion kasvassa muita suurmuoveja hitaammin. Hinta vuonna 2008 oli noin 1,3 €/kg (Järvinen 2008, 22.)

PET antaa mahdollisuuden vaikuttaa kiteisyysasteeseen. Tämän vuoksi sen ominaisuudet myös vaihtelevat sen molekyyliarakenteen ja kiteisyyden vaikutuksesta. Kiteisyyttä voidaan lisätä hitaammalla jäähtymällä, jolloin materiaaliin ehtii muodostua suurehkoja sferuliitteja. Kiteisyysasteen nousu kasvattaa materiaalin jäykkyyttä mutta myös haurastuttaa materiaalia. Ruiskuvalettavan PET:n molekyyliainepaino on noin 80000 ja suulakepuristettavien PET:n molekyyliainepaino on matallettu noin 40000:een (Olabisi 1997, 426.)

### 2.1.1 PET:n edut ja ongelmat verrattuna muihin pakkausteollisuuden materiaaleihin

PET on keskivertomuovia parempi happieste myös kosteassa ilmastossa. Parempia olisivat vain PVDC ja E/VAL. Näiden hinta ja prosessoitavuus taas eivät ole samaa luokkaa kuin PET:lla. PET on edullinen lujuus- ja sitkeysominaisuuksiltaan, myös märkänä. PET myös kestää ilmaston vaikutuksia, kuten UV-valoa. PET on myös saumattavissa useisiin kaupallisiin kalvoihin. PET on taipuvainen hydrolyyttiseen hajoamiseen varsinkin kuumana, minkä vuoksi se on aina kuivattava ennen prosessointia. (Järvelä, 2006); (Perkiö, 2009)

PET:lla on erinomainen kierrätysaste, joka onkin korkein kaikista muovityypeistä. Suurin osa PET:n kierrätyksestä koostuu virvoitusjuomapullojen uusiokäytöstä, mikä aloitettiin vuonna 2008 suuremmissa mittakaavassa. Juomia on alettu pulloittaa enemmän PET pulloihin, koska ne voidaan kierrättää tehokkaammin. Pulloja murskataan murskaimissa ja lajitellaan värin mukaan. Lajiteltu materiaali on tehokkaammin käytettävissä uusiin tuotteisiin. (PALPA, 2010)

PET:n heikkoudet muihin materiaaleihin verrattuna ovat suurehko kutistuma, hauraus pakkasessa ja lujuus suurissa lämpötiloissa. Lujitteet vähentävät kutistumaa sekä parantavat kuumankestoa mutta vaikeuttavat prosessointia, heikentävät pinnanlaatua ja nostavat hintaa. (Nykänen, 2010)

### 2.1.2 PET:n prosessointi

Yleisesti voidaan sanoa, että mitä suurempi muovin kiteisyys on, sitä parempia ovat mekaaniset ominaisuudet: kaasutiiveys, kemiallinen kestävyys, kovuus, korkeampia sulamislämpötila ja lämmönkesto. Iskulujuus, taipuisuus, jännityssäriilyn kesto ja läpinäkyvyys heikkenevät kiteisyyden kasvaessa. (Olabisi 1997, 427)

PET:sta on olemassa amorfista PET-A sekä osittain kiteistä PET-C-tyyppiä. PET-A:ta yleisesti käytetään sulaljuutensa ansiosta puhallusmuovattuihin pulloihin ja ekstruusiovalmistettuihin kalvoihin ja levyihin. Amorfinen PET on sitkeä ja lasinkirkas. Kiteinen PET omaa hieman paremman lämmönkeston kuin amorfinen, mutta sen työstö on kuitenkin vaikeampaa. PET-C:ta taas käytetään enemmän ruiskuvaluun. Kiteisyys määrittää moolimassan ja koheesioenergian ohella polymeerin fysikaalisen luonteen (Seppälä 2008, 47).

### 3 TÄYTEAINEIDEN MAHDOLLISUUDET

Lujitteilla saavutetaan monia positiivisia mutta myös negatiivisia vaikutuksia. Sana lujite kertoo jo, että kyseinen lisä lujittaa tuotetta. Muita etuja lujitteilla ja täyteaineilla ovat tuotteen lämmönkeston parantaminen ja kutistuman vähentäminen. Lujitteina useimmiten käytetään lasikuitua. Lasikuidun suosio perustunee halpaan hintaan suhteessa saavutettavaan lujuuteen. Kuitujen suuntautuminen virtaussuunnassa vääristää kutistumaa. Kutistuma kuitujen suuntaan on merkittävästi vähäisempää kuin poikkisuunnassa. Tästä aiheutuu vääntyilyä. Kuidun vaihtoehtona ovat myös lasipallot, jotka eivät tuo niin hyvää lujuutta mutta pitävät pinnanlaadun parempana kuin kuitu. Myös mineraalitäytteet ovat varteenotettava vaihtoehto. Ne ovat halpoja ja jopa halvempia kuin itse perusraaka-aine. Mineraaleja, kuten talkki, wollastoniitti ja kalsiumkarbonaatti, ja niitä voidaan käyttää myös lisäämään lujuutta ja lämmönkestoa. Tällöin voidaan saavuttaa raaka-aine säästöjä samalla kun ominaisuudet paranevat (Järvinen 2008, 207.); ( Meyer 1987, 89) ; (Olabisi 1997, 4)

Lasikuidun tuomia haittoja:

- virtausominaisuudet huononevat.
- ruuvien sekä sylinterien nopeampi kuluminen.
- tuotteelle karheampi pinta.
- yhtymäsaumojen pinnanlaatu ja lujuus saattavat kärsiä.

#### 4 PARAMETREILLÄ VAIKUTTAMISEN MAHDOLLISUUDET

Ajoarvoja säädetään, jotta saataisiin toivotunlainen kappale toivotuilla ominaisuuksilla. Muotti valmistetaan tuotesuunnittelijan 3D -kuvien mukaan, jossa on otettu huomioon esimerkiksi materiaalin kutistuma. Muotin valmistuksessa pyritään tarkalleen niihin mittoihin mitä muottisuunnittelija on suunnittelemaan vaatinut. Muotti on aina ainutlaatuinen. Muottia voi toki korjata, jos siinä todetaan jokin vika tai parempi ratkaisu. Korjaaminen vaatii työtä, aikaa ja rahaa. Nämä aiheuttaa muotin poissaolon tuotannosta. Parametreilla voidaan vaikuttaa pienempiin kappaleen muutoksiin. Kappaleen jäähtytystä, ruiskutusnopeutta, annostelua ym. säätämällä voidaan vaikuttaa esimerkiksi värin tasaisuuteen, kappaleen kunnolliseen täyttymiseen, tai mahdollisiin vääntyilyihin eli lähes kaikkiin ominaisuuksiin, joita materiaalivalinta eikä muottisuunnittelu estä. (Pötsch & Michaeli 2008, 129-160.)

##### 4.1 Parametrien syy ja seuraussuhteet

Parametrit pyritään säätämään niin, että tuote täyttäisi mahdollisimman pienillä kustannuksilla asiakkaan toivomat odotukset. Käytännössä parametrit pyritään säätämään toleranssialueen keskivaiheelle, koska silloin kyseinen arvo saa vaihdella toleranssin salliman verran puolelta toiselle ilman tuotteen hylkäystä. Vaihtelu pyritään myös saamaan mahdollisimman pieneksi ja harvaan toistuvaksi. Toisin sanoen vaihtelu pyritään poistamaan tai ainakin minimoimaan. Parametrejä säätäessä pitää ottaa huomioon myös pitkäaikaiset vaikutukset, kuten muotin ja energian kulumisen. Yhteenveto parametrien vaikutuksista on liitteessä 1 (Pötsch & Michaeli 2008, 129-160.)

## 4.2 Vääntyilyn hallinta

Kun kutistuma on erisuuruista eri puolilla kappaletta, aiheutuu vääntyilyä ja sisäisiä jännityksiä. Tästä saattaa aiheutua jopa murtumia ja muodonmuutoksia. Perinteisesti vääntyilyä ja kutistumaa on pyritty hallitsemaan prosessiparametrein, kuten lämpötilojen, paineiden ja ruiskutusnopeuden avulla. Nämä kuitenkin vaikuttavat samanaikaisesti tuotteen muihin ominaisuuksiin. Muottia suunnitellessa voidaan ennakoida kutistumia ja vääntyilyitä osittain. (Valtonen 2001, 9)

Suurin kutistuma tapahtuu kappaletta kuumenttaessa suuttimien kohdalla. Prosessissa massa on suuttimien kohdalla viimeisimpänä kuumana. Jäännösjännityksiä syntyy kun kappaleessa on lämpötilaeroja. Muovi jäähtyessään pyrkii kutistumaan, jolloin syntyy jännityksiä. Suuttimien kohdalla materiaalin virtauksesta aiheutuu myös suurin paine. Muovin virratessa kohti yhtymäsaumaa se orientoituu virtaussuuntaan, riippuen kappaleen muodoista. Kappale jäähmettyy ensin pinnasta ja viimeiseksi keskeltä. Pintaan syntyykin vetojännitystä ja keskiosaan puristusta. (Järvelä ym. 2000, 76)

## 4.3 Polymeerin kiteytyminen ja amorfisuus

Polymeerien kiteytyminen ei tapahdu hetkessä. Siihen kuluu tietty, polymeerimateriaalin ominaisuuksista riippuva aika. Suurimolekyylisen polymeerin kiteytyminen vie pidemmän ajan kuin pienimolekyylisillä aineilla, esimerkiksi metalleilla. Jos materiaalia jäähdytetään liian voimakkaasti prosessoinnin aikana, se ei ennätä muodostaa kiderakennetta ja jää pakkotilaan. Toisinaan tilanne on suotuisa, mutta ei läheskään aina. Pakkotilaan jäänyt rakenne voi hakeutua myöhemmin tasapainotilaan, jolloin kappaleessa tapahtuu mittamuutoksia ja vetelyä. Tasapainotilan syntymiseen vaikuttaa paljon lämpötila. Samasta polymeerista valmistetaan toisinaan tavanomaisten laatujen lisäksi nopeasti kiteytyviä tyyppisiä, joilla voi laskea valmistusprosessin jaksoaikaa. (Höök 2010)

Amorfisilla polymeereilla on tietty, usein kierteinen muoto, johon polymeeriketju mielellään hakeutuu. Jos amorfisesta polymeerista valmistettu tuote jäädytetään liian nopeasti siten, että polymeeriketjut jäävät venyneiksi, se voi vääntyillä tasapainotilaan hakeutumisen aikana vastaavalla tavalla kuin kiteisestä polymeerista valmistettu kappale. (Höök 2010)

Amorfiset polymeerit kutistuvat vähemmän kuin osakiteiset polymeerit. Amorfisten polymeerien muottikutistumat ovat luokkaa 0,5 – 1 %. Osakiteisten polymeerien kutistuma on luokkaa 1 - 2,5 % (jopa 1 - 5 %). Useat polymeerit kutistuvat virtauksen suunnassa enemmän kuin virtaukseen nähden poikittaisessa suunnassa. Polymeerien kutistumaa voi kompensoida jonkin verran kohdistamalla muotissa olevaan sulaan materiaaliin painetta, koska polymeerimateriaalit ovat kokoonpuristuvia. Menettelyllä on kuitenkin omat rajoitteensa. Muotin kapeissa kohdissa tapahtuu painehäviöitä ja paine pyrkii useimmiten olemaan suurin juuri portin edessä. Epätasainen painejakauma aiheuttaa myös vääntyilyä sekä mitta- ja muotomuutoksia kappaleeseen. (Höök 2010)

#### 4.4 Optimointi

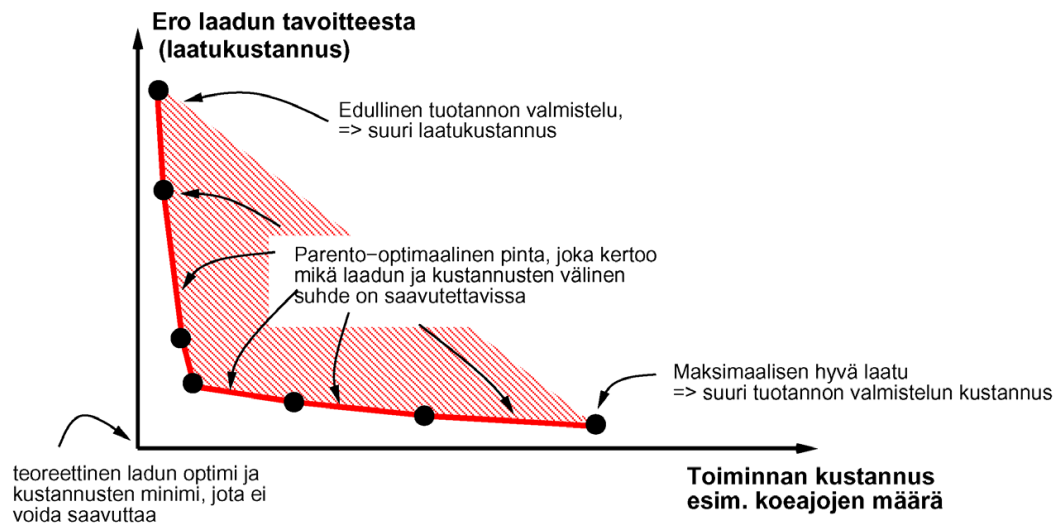
Monet optimointiongelmat, kuten lyhimmän tai nopeimman ajoreitin valinta, ovat meille jokaiselle arkipäivää. Optimointi on matematiikkaa ja muita tekniikoita, kuten tietotekniikkaa, käyttävä päätösongelmia ratkova systeemi. Optimointi on systemaattinen tapa saada paras mahdollinen ratkaisu. Optimointitapoja on monia, joista voi valita parhaiten omaan prosessiin ja resursseihin soveltuvan. Optimoinnin kohde on ensisijainen vaikuttaja optimointisysteemin valintaan. Optimoinnissa voi olla hyvä käyttää mallinnusta apuna. Malli on rakennettava huolellisesti, jotta se antaa oikeita tuloksia. (Miettinen K & Co , 2010)

Osa tavoitteista on mitattavissa, kun taas osa on enemmän mielipideoita. Ulkonäköön vaikuttavat monet tekijät. Esimerkiksi valo voi vaikuttaa kappaleen väriin niin, että se näyttää virheelliseltä. Asiakas vaatii omiin käyttötarkoituksiin sovel-



tuvaa tuotetta, jonka on täytettävä tietyt kriteerit. Sen on esimerkiksi oltava hyvän näköinen ja kestävä käytössä.

Optimoitavat tavoitteet ovat usein ristiriitaisia. Tällöin yhden tavoitteen parantaminen heikentää jotakin toista. Tästä lieneekin alkunsa saanut usein lausuttu lausahdus ”kaikki vaikuttaa kaikkeen”. Monitavoiteoptimoinnissa optimin sijaan etsitään parasta kompromissiratkaisua, joka onkin oikea tapa lähestyä aihetta. Tuotteelle annetaan usein toleranssit, joiden rajoissa sen arvot saa olla. Kaikki toleroidut arvot on täytyttävä, jotta kappale voidaan toimittaa asiakkaalle.



KUVIO 1. Laadun ja kustannusten välinen suhde (TEKES. 2002-2004)

Optimointi on yksi tapa parantaa laatua. Optimiin pääsemiseksi on kehitetty monenlaisia menetelmiä. Taguchi on yksi parhaista, joka soveltuu ruiskuvaluprosessiin sen ristikkäisvaikutusten huomioivan kyvyn vuoksi. Laatumenetelmiä on myös monia muita kuten, Six Sigma, QFD, LEAN, Kaizen jne. Pyrkimyksenä useimmissa on kokonaisvaltainen toimintatapa. (Quality Knowhow Karjalainen Oy, 2010)

#### 4.5 TAGUCHI -menetelmä

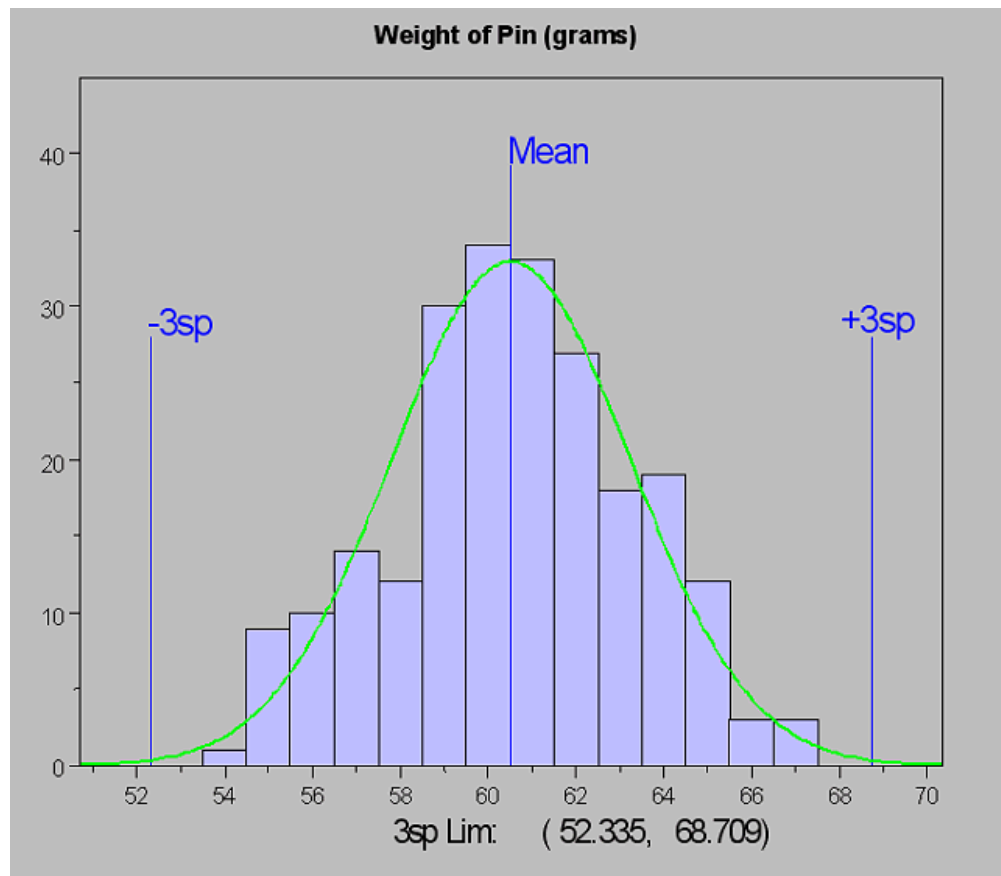
Taguchi-menetelmä on kokonaisvaltainen tuotteen ja prosessin kehitystyökalu, jolla voidaan optimoida tuotteita, prosesseja tai palveluita. Työkalua käyttämällä voidaan parantaa laatua ja säästää kustannuksissa yhtäaikaisesti. Näihin saavutuksiin vie vaihtelun pienentyminen ja sitä kautta harvemmin syntyvistä häiriöistä syntynyt hävikki. Taguchi-menetelmä perustuu tilastotiedon ja insinööritiedon yhdistämiseen. Taguchin ajattelussa laadun mittarina on hävikki, jonka tuote aiheuttaa yhteisölle sen jälkeen kun se on toimitettu käyttäjälle. Laatua voidaan parantaa käyttämällä tuotteen epälineaarisia ominaisuuksia hyväksi. (Karjalainen 1999, 21)

Menetelmällä pyritään tuottamaan asiakkaan toiveet täyttävä tuote, joka on miellyttävä omistaja. Tuote on myös toiminnallinen ja vahva minimaalisilla poikkeamilla. Kaiken lisäksi tuotteen olisi oltava parempi kuin muiden tuottamat, hinnaltaan, vaikutelmaltaan ja käytettävyydeltään. Niihin tavoitteisiin pyritään suunnittelulla, kehityksellä, prosessisuunnittelulla, tuotantomuutoksilla ja myynnillä ja huollolla. Yritys, joka ei tuota riittävästi voittoa, ei voi toimia kilpailukykyisenä. Taguchi -menetelmällä pyritään vähentämään hävikkiä eli parantamaan laatua ja sitä kautta parantamaan tuottavuutta. Hävikkiä mitataan aina rahana. Tavoitteisiin vie tuotteiden vaihtelun pienentyminen. (Karjalainen 1999, 21)

Vaihtelu saadaan pienentymään tuotteen suunnittelulla ja prosessin optimoinnilla. Jotta prosessia voidaan optimoida, on sen oltava vakaa. Suositellaan kolmen sigman vakaustasoa, joka on melko tiukka. Optimointi ei onnistu, jos siinä on liikaa lukemiin vaikuttavia ulkoisia häiritteitä. Kolmen sigman vakaustaso voidaan katsoa frekvenssikuviosta, jossa on mitattu optimoitavaa arvoa suurehkoista otoksesta vakioarvoilla. Otoksesta saatujen arvojen pitäisi olla kolmen sigman toleranssissa. Alla olevassa kuvassa 2 on mitattu painon vaihtelua. Suuresta otoskoota on saatu kuvan mukainen frekvenssikaavio. Painon haluttu keskiarvo on esimerkkikuvassa 60 grammaa. Sigma tarkoittaa tilastollista lukua, joka kuvastaa hajontaa. Hajonnan suositellaan olevan maksimissaan kolminkertainen, kun optimointiin ryhdytään. Hajonta mittaa paljonko havaintoarvot poikkeavat keskimäärin keskiarvostaan. Keskihajonta sopii kuvaamaan väli-

ja suhdeasteikollisten muuttujien havaittujen arvojen hajaantuneisuutta tai keskittyneisyyttä. Alla on keskihajonnan kaava. (Ranivaara, 2009)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$



KUVIO 2. Kolmen sigman rajat (Northwest Analytical, 2010)

Taguchi vaatii erittäin paljon osaamista, ja se vie monen ihmisen resurssit. Taguchi on parhaimmillaan, kun kyseessä on massatuotanto. Tuotannon aloitusvaiheessa tärkeintä on saada prosessista ylimääräiset häiriötekijät karsittua pois. Taguchi on kokonaisvaltainen laadunparantamisjärjestelmä, joka koostuu kolmesta päävaiheesta. Vaiheet on systeemisuunnittelu, parametrisuunnittelu ja toleranssisuunnittelu. Parametrisuunnittelulla voidaan optimoida esimerkiksi ruiskuvaluprosessin parametrit. Parametrisuunnittelua esitellään tarkemmin käytännönsuudessa. (Ranivaara, 2009)

## 5 KÄYTETYT MENETELMÄT, LAITTEET JA MATERIAALIT

### 5.1 Laitteet

Prosessissa aihio siirretään robotilla muottiin, jossa se muovataan. Robotti hakee aihiot makasiinista ja tuo valmiin kappaleen liukuhihnalle. Valmiille kappaleelle tehdään laaduntarkistus, jonka jälkeen se pinotaan pinotalaitteessa.

Näytteet valmistettiin seuraavalla laitteistolla:

- Tuotantokone
- Fanuc Robotti M-6i
- 1-pesäinen muotti
- Makasiini
- Kappaleenpinotalaite.

### 5.2 Mikrotus ja uunitus

Useilla kaupallisilla vuolla ruoka ohjeistetaan lämmittämään mikroaaltouunissa täydellä teholla (700W) kolme minuuttia. Mikroaaltojen ruokaa lämmittävä vaikutus perustuu ruoassa olevien poolisten molekyylien (esimerkiksi vesimolekyylin) liikutteluun. Poolisen molekyylin toinen pää on varautunut positiivisesti ja toinen negatiivisesti, jolloin muuttuvassa sähkökentässä molekyylit alkavat liikkua sähkökentän mukaan. Molekyylien liike aiheuttaa ruoan lämpenemisen. (Gallawa 2000.)

Vuoan jälkikiteytymistä lämmitettäessä, testattiin lämmittämällä vuokaa uunissa. Testaus tapahtui eripituisilla ajoilla ja erilaisilla lämpötiloilla. Testeissä tavoitteena oli havaita vääntyilyn syitä, tutkia lämpötilojen, aikojen ja muottilämmön vaikutusta vuoan vääntyilyyn. Tarkoituksena oli myös havaita lämpötila, jossa vuoka alkaa vääntyä ja aika, jonka vuoka kestää lämpöä.

### 5.3 DSC eli Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria

DSC on yksi termisistä analyyseistä. Analyysilla voidaan tutkia esimerkiksi sulamislämpöä, kiteytymislämpöä, kiteisyysastetta, lasittumislämpöä ja liitoksen induktioaika. Analyysissa tallennetaan signaali, joka kertoo referenssiin ja näytteen käytetyn lämpövuon eron. Toisin sanoen tutkittavaa kohdetta ja referenssiä lämmitetään tai jäähdytetään ja niiden sitomien energioiden eroa seurataan. Kiteytyminen on eksoterminen ja sulaminen endoterminen reaktio. Lasisiirtymälämpötilan kohdalla näyte tarvitsee enemmän energiaa pysyäkseen tasalämpöisenä referenssin kanssa, silloin kuvaajassa näkyy muutos. Materiaalin kiteytyessä se luovuttaa energiaa. Entalpiamuutoksen voi lukea kuvaajasta. Sulamispisteen näkee selvästi jyrkkänä piikkinä kuvaajassa.

### 5.4 Pinhole-testaus

Testin tarkoituksena on selvittää onko vuoka tiivis. Vuoaan ollessa virheellinen, väri läpäisee muovin ja imeytyy kartonkiin. Kartonkiin imeytynyt väriaine on helppo havaita. Useimmiten reikä on erittäin pieni, jonka takia sitä kutsutaan pinholeksi eli huokosreiäksi tai neulanreiäksi. Alla olevassa kuvassa 7. näkyy testin vaatima laitteisto. Testissä neste kaadetaan vuokaan, annetaan vaikuttaa ja imeetään se takaisin säilytysastiaan. Väriä sisältää denaturoitua alkoholia ja väriainetta. Tiiveystestin tarkempi ohjeistus on liitteessä 2.

### 5.5 Materiaalit

Vuoan valmistuksessa tarvitaan kartonkiaihiö, joka on päällystetty muovikalvolla ja painettu muovittamattomalta puolelta. Kartongin kokonaispaksuus on noin 425 µm. Muovin sekaan sekoitetaan väriaine, joka värjää materiaalin halutun väriseksi. Alla on tarkempi kuvaus käytetyistä materiaaleista.

Kartonkiaihiö: Trayforma performance 290+WPET60

Muovimateriaali: PET+ väriaine

## 6 VÄÄNTYILYN HALLINTA

Ruoka on tarkoitus kuumentaa vuossa 3min mikroaaltouunissa täydellä teholla. Kuumentaessa ruokaa vuoka pehmenee ja jännitykset purkautuvat. Pyrkimyksenä on siis vähentää vääntyilyä. Kieroutuminen ei sinänsä haittaa syömistä mutta heikentää vuoan ulkonäön laatuvaikutelmaa. Tuotantoa kehitettäessä on myös hyvä tietää, mistä vääntyily johtuu.

### 6.1 Mikroaaltouunitesti eri lämmöillä

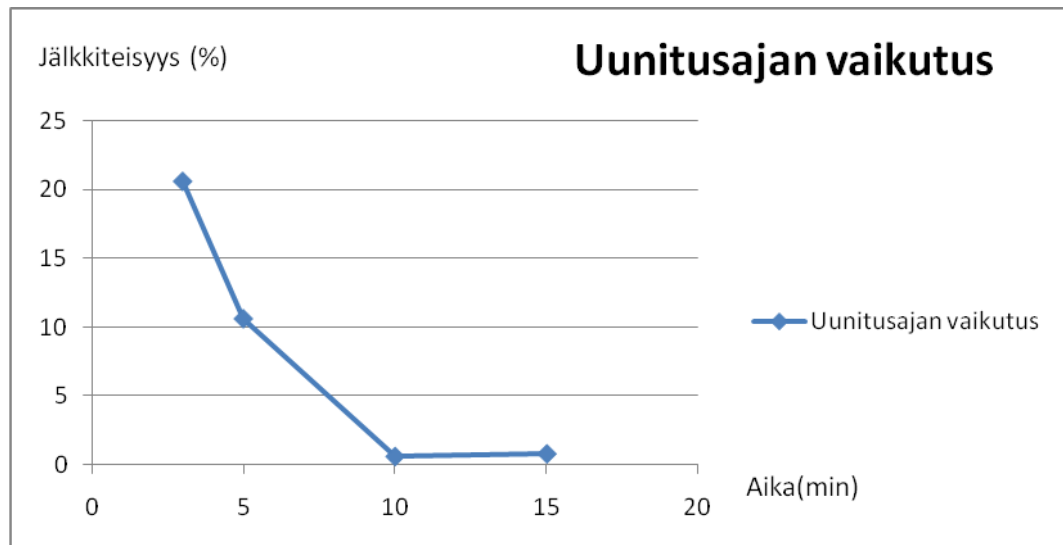
Kuumensin aluksi vuokia mikrossa, jolloin havaitsin vääntymisen. Mikrokuvulla on todella tuhoisa vaikutus siihen, mitä vuoalle mikrossa tapahtuu. Vuoka vääntyy aivan muodottomaksi, jos kupua käytetään. Tosin ruokakin kyllä lämpiää nopeammin. Ilman vettä vuoka vääntyi vielä enemmän. Kaikki mikron teho kohdistuu tällöin vuokaan ja sen sisältämään kosteuteen. Vuoka tummui kuumentessaan pohjasta ja haisi palaneelle. Vuokaa ei siis ole syytä kuumentaa tyhjänä tai pienellä määrällä lämmitettävää ruokaa. Seuraava koe oli muotin lämpöjen nostaminen ja uusi mikrotesti. Havaitsin, että kuumemmassa muotissa jäähtynyt kappale vääntyi selkeästi vähemmän. Tästä lähti idea siihen, että materiaalia on testattava DSC:llä.

### 6.2 Uunitesti

Uunitestissä käytin muottilämpötila kolmella ajettuja vuokia. Tein kaksi erilaista testiä, joista ensimmäisessä tutkittiin kuinka pitkään vuokaa pitää kuumentaa, jotta jälkikiteytyminen tapahtuu. Toisessa tutkittiin missä lämpötilassa jälkikiteytyminen tapahtuu. Vuokaa piti lämmittää yli 5 min ja 110 - 130 asteisessa uunissa, jolloin kappale pääsi kiteytymään täydellisesti. Lyhyempikin aika olisi riittänyt, jos lämpötilaa olisi nostettu. Tämä tutkimus on yhtenevä myös DSC-käyrän kanssa, jossa kiteytyminen alkaa 120 asteen kohdalla.

TAULUKKO 1. Uunitusaika ja sen vaikutus vuoan kiteisyyteen

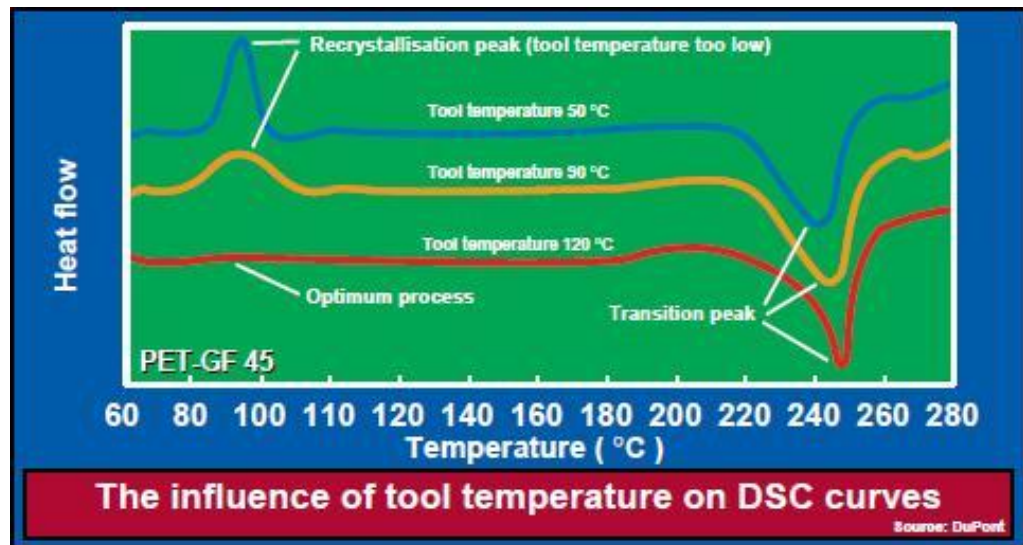
Lämpötila (°C)	Aika(min)	Jälkikiteisyys(%)
130	3	20,57
130	5	10,61
130	10	0,62
130	15	0,81



KUVIO 3. Uunitusajan vaikutus kiteisyyteen

### 6.3 DSC-testaus

Vuokamateriaalia tutkiessani huomasin, että tuotteessa tapahtuu jälkikiteytymistä, kun se lämpenee. Reaktio on todettu DuPontin artikkelissa, josta alla oleva kuvio 4 on liitetty. Kuvassa kuumemmalla työkalulla uudelleenkiteytymistä ei tapahdu juuri lainkaan. DuPontin materiaali on eri kuin vuokaprosessissa mutta kuitenkin samaa polymeeriä. Koeajossa saatiin hetkellisesti lämpö nostettua ajolämpötilaksi viisi. Se ei vielä riittänyt poistamaan kiteisyyspiikkiä DSC-kuvaajasta. Jälkikiteytyminen poistuu, kun kappale saa jähmettyä hitaasti prosessoinnin aikana, jolloin kappale kerkeää kiteytyä jo muotissa. Vuokaprosessissa tämä edellyttää kuumaa muottia ja pitkää jäähtymisaikaa. Pitkä jäähtymisaika taas pidentää jaksoaikaa, mikä ei ole suotavaa. Tässä kuitenkin tarkoituksena oli havaita kiteisyysmuutoksia muottilämpöä muutettaessa.



KUVIO 4. Työkalun lämpötilan vaikutus DSC – käyrään ja kiteytymiseen (DuPont)

Yhtenä tarkoituksena oli löytää selkeä yhteys muottilämpötilan ja kiteytymisen välille sekä kappaleen vääntyilyn yhteys kiteisyyteen. Näiden yhteyksien avulla olisi voitu todeta yksiselitteisesti, että materiaali vääntyy muottilämpötilan ollessa liian alhainen. Tuloksia vertaamalla olisi voinut ilmetä muottilämmön edukas vaikutus vääntyilyn vähenemiseen. Kiteisyyden muutosta ei ainakaan DSC:llä havaittu vielä ajolämmöllä 5. Alla on tulokset erilämpöisillä muoteilla otetuista näyttekappaleista.

TAULUKKO 2. Kiteisyysaste

Ajolämpötila(°C)	DSC Kiteisyys %
1	15,13
2	15,45
3	19,18
4	16,52
5	15,78



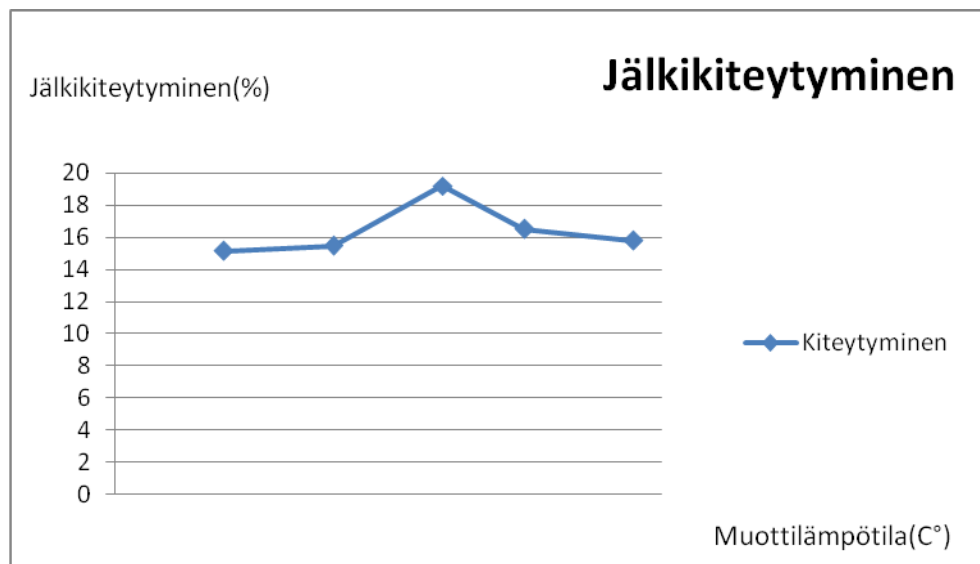
TAULUKKO 3. Kiteytymisenergia

Ajolämpötila(°C)	Energia (J/g)
1	20,88
2	25,8
3	26,47
4	22,8
5	21,78

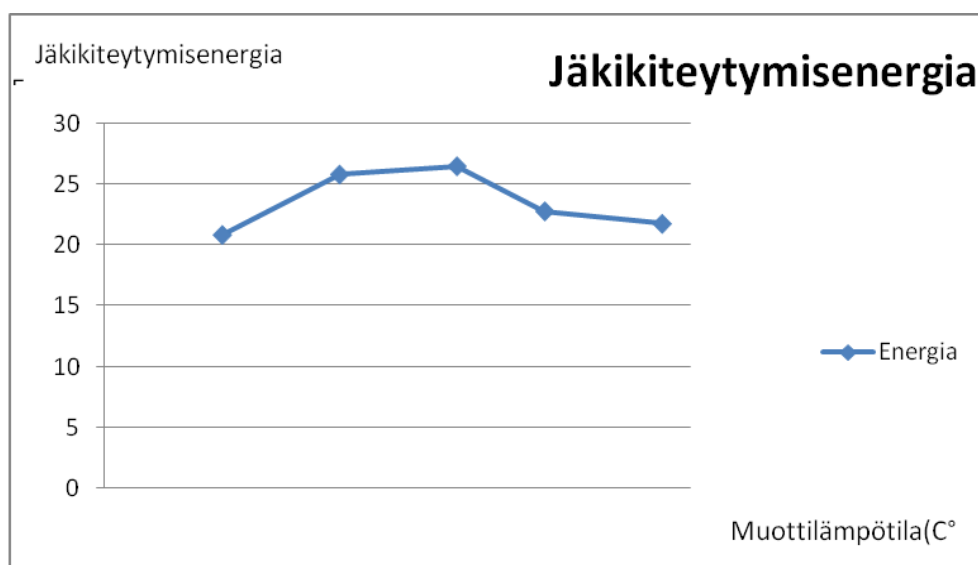
Taulukoissa ajolämpötila 1 on kylmin ja 5 kuumin.

TAULUKKO 4. Muottilämpötilalla kolme rinnakkaiskokeet heittelevät jonkin verran mutta silti kaikki luvut ovat korkeita toisiin muottilämpötiloihin verrattuna.

Ajolämpötila	DSC Kiteisyys %	Energia (J/g)
3	20,4	28,16
3	17,6	24,29
3	19,55	26,98
Ka.	19,18	26,47



KUVIO 5. Suhteellinen jälkikiteytyminen eri muottilämpötiloilla



KUVIO 6. Jäkikiteytymiseen kulunut energia

Yllä olevista kuvaajista päätellen kappale on jäänyt amorfisimmaksi lämpötilalla kolme ajetulla muotilla. Kuvaajat eivät ole teorian mukaisia, joten on arveluttavaa luottaa täysin niihin tietäen tuloksiin vaikuttavista virhetekijöistä. Teoriassa kuumemmassa muotissa vakioajan jäähtynyt kappale on muotista poistettaessa kuumempi. Tällöin kuumempi kappale myös jäähtyy hitaammin huoneenlämpötilaan. Tämä taas aiheuttaa kiteisyysasteen kasvamisen, mikä taas vaikuttaa muun muassa kappaleen tilavuuteen ja vääntyilyyn. Muotista poistettu kuumempi kappale jäähtyy suhteessa nopeammin kuin viileämpi kappale, koska ympäröivän ilman ja kappaleen lämpötilaero on suurempi. Testituloksista voisi päätellä, että kappaleen jäähtymisen loppuosalla ei juuri ole merkitystä. Se aika, jonka kappale saa jäähtyä kiteytymisalueella, eli pyöreästi 110 - 160 astetta, on merkityksellinen. Tuloksista päätellen yli kolmosen ajolämmöllä muotti alkaa vaikuttaa kappaleeseen kiteisyyttä kasvattavasti.

Suhteellinen jälkikiteytyminen on laskettu ohjelmallisesti. Ohjelmaan syötetään näytteen paino ja 100%:esti kiteytyneen PET:n sulatukseen vaadittu energia eli sulatusentalpia. Laskelmissa on käytetty ominaisentalpian arvoa 138 J/g (Liangbin & CO, 2000)

$$\text{Kiteisyysaste} = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100\%}} = \frac{\text{Näytteen kiteytymisenergia}}{\text{Kiteisyysenergia}_{100\%}}$$

(Pötsch & Michaeli 2008, 42)

(2)

Entalpia muutos voidaan mitata kalorimetrillä eli DSC-laitteella. Entalpiaa voidaan tässä yhteydessä nimittää myös lämpösisällöksi, koska paine ja tilavuus ovat lähes muuttumattomat. Sisäenergia sisältää myös tehdyn työn energian. Kiteytyminen näyttäisi tapahtuvan testeissä käytetyllä lämpötilan nostonopeudella (20 C°/min) noin 20 asteen aikana välillä 130 - 160. Ohjelma laskee entalpiamuutoksen alla olevassa kuvassa janan ja käyrän välisestä pinta-alasta. Tätä pinta-alan laskemista kutsutaan integroinniksi. Energia suhteutetaan näytteen massaan. Ala kertoo suoraan, kuinka paljon energiaa näyte on luovuttanut tai vastaanottanut. Ohjelma vertaa kiteytymisen aikana tapahtunutta entalpiamuutosta täysin kiteytyneen materiaalin arvoon, josta saadaan suhteellinen muutos. Kiteisyyden tarkkuus riippuu osittain siitä, mistä kohtaa kiteisyyspiikin katsotaan alkavan ja päättyvän.

Entalpia  $H = U + pV$ , jossa (3)

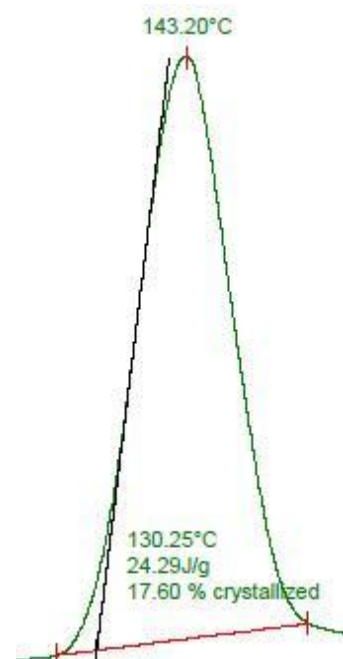
$U$  = Systemin sisäenergia

$p$  = paine

$V$  = tilavuus

Jos entalpia kasvaa vakiopaineisessa prosessissa eli jos  $\Delta H > 0$ , prosessi on endoterminen eli lämpöä sitova. Jos entalpia pienenee vakiopaineessa eli jos  $\Delta H < 0$ , systeemi menettää lämpöä ja prosessi on eksoterminen.

KUVIO 7. Kiteytyminen näytettä lämmittäessä



Lämmönvaihtoon vaikuttavat yleisesti konduktio eli johtuminen, konvektio eli siirtyminen ja lämpösäteily. Newtonin jäähtymislain mukaan kappale jäähtyy alla olevan kaavan mukaisesti. Lämmönvaihdossa siirtynyt lämpömäärä aikayksikköä kohti on suoraan verrannollinen kappaleen ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon.

$$\frac{dT}{dt} = -K(T - T_y) \quad , \text{ jossa:} \quad (4)$$

$K$  on kokeellinen vakio (lämmönjohtavuus)

$\frac{dT}{dt}$  on lämpötilan derivaatta ajan suhteen

$T_y$  on ympäristön vakiolämpötila

$T$  on kappaleen lämpötila

Kiteisyyden muutoksella voisi olla vaikutusta myös kartongin ja kauluksen parempaan liittymiseen. Muovin saumaus vaatii lämpöä sekä painetta. Kauluksen muodolla sekä jäähdytysvesikierrolla on jo havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia saumauksessa.

## 7 OHJEISTUS TUOTTEEN YLÖSAJOON SEKÄ OPTIMOINTIIN

Varsinaisen tuotantoprosessin optimaalisen hallinnan kannalta on oleellista tehdä tuotannon ylösajo mahdollisimman systemaattisesti. Sama pätee myös uuden tuotteen ylösajoon. Ylösajoprosessin analysointi on tärkeä prosessin kokonaiskannattavuuden kannalta. Ylösajovaiheessa määritetään suurelta osin laatu ja tehokkuus. Laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat muotti, tuotantokone, tuotantoympäristö, oheislaitteet, materiaali ja henkilöstö.

Ohjeistus ylösajoon tarvitaan, jotta saataisiin luotettavat tiedot siitä millä arvoilla kyseinen ajo on tehty. Ohjeistuksen tarkoituksena on myös nopeuttaa ja selkeyttää tuotannon käynnistystä. Ohjeistuksen avulla voidaan suorittaa identtisiä koeajoja ajoarvojen suhteen, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia. Tämä on erittäin olennaista, jotta välttyään vääriltä johtopäätöksiltä ja ylimääräisiltä koeajoilta. Kartonkeja kokeiltaessa on erityisen tärkeää pitää samat ajoarvot kaikkialla. Ohjeistus tulee säästämään kustannuksia tuotteen ylösajovaiheessa. Suurimmat säästöt syntyvät säästetystä ajasta, turhien koeajojen pois jäämisestä sekä materiaali- ja työkalusäästöistä.

Työkalukustannuksilla tarkoitetaan tässä lähinnä stanssityökalumuutoksia ja pahimmillaan muottimuutoksia. Stansauksessa tarvitaan stanssityökalu, joka suunnitellaan jokaiseen aihioon omansa. Stanssityökaluille kertyy hintaa useita tuhansia euroja, joten sen pitäisi olla kerralla oikeanlainen. Ajoarvot, niistä tärkeimpinä muottilämmöt ja pidätyspaine, sekä kartongin kosteus on oltava samat aina kun koeajoja tehdään. Muuten ei voida vertailla muutoksia eri stanssilla ajettujen kappaleiden välillä. Koeajoihin on myös löydyttävä ohjeet, jonka mukaan työntekijät toimivat systemaattisesti. Koeajot vievät oman aikansa mutta huolella tehtynä ne säästävät useiden turhien stanssien tilauksen. Eri stansseja testatessa olisi hyvä kirjata huomioita ylös miten mikäkin muutos on vaikuttanut tuotteeseen. Merkitä muutetut asiat selkeästi ja kertoa mihin muutos vaikutti. Tätä tietoa voidaan jatkossa käyttää hyödyksi vastaavanlaisissa tuotteissa.

## 7.1 Ylösajon ja optimoinnin onnistumiseen vaikuttavat asiat

Onnistumiseen ei riitä pelkästään omassa yksikössä tehtävät ratkaisut vaan siihen vaikuttaa jo alihankkijoidenkin onnistuminen. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että yhteistyö alihankkijoihin on tiivistä jatkuvasti. Etenkin ylösajovaiheessa, kun tuotantoa käynnistetään, palikoita asetellaan paikoilleen ja sovitaan oikeat toimintatavat, on ehdottoman tärkeää kommentoida havaituista asioista. Tässä työssä keskitytään kuitenkin pääasiassa oman tuotantotilan sisällä havaittuihin asioihin, joita on tutkittu ja raportoitu alempana.

### 7.1.1 Ympäristötekijät

Aihion ominaisuudet koostuvat kartongin ja muovin yhdistetyistä ominaisuuksista. Jotta prosessista saadaan vakaa, on aihion ominaisuuksien oltava mahdollisimman tasaiset. Kartongille on ominaista revetä kuivana, tästä syystä kosteusprosentti on pidettävä vakiona. Kosteus saadaan pysymään vakiona huoneessa, jossa on vakiolämpötila (23 °C) sekä -kosteus. Muotin ja aihion välisen kitkan hallinta on prosessissa ratkaisevan tärkeää. Vaikeaksi hallinnan tekevät monet muuttuvat asiat, kuten kosteus, lämpötila sekä muovin ja kartongin erilaiset kitkakertoimet metallia vasten. Ympäristön kosteus ja lämpötila vaikuttavat aihion muutosten lisäksi myös muottiin ja sen kitkaominaisuuksiin. Kosteutta voi kondensoitua muottiin, jos muotti on kylmä ja ympäröivä ilma lämmin. Näiden lisäksi muovikalvon pehmeneminen lämmitessä lisää kitkaa, jolloin kuumemmalla työkalulla ajaminen on mahdotonta aihion repeämisen vuoksi.

Aihion suoruuteen vaikuttaa erityisesti kosteus. Kartongilla on tapana puun lailla turvota kostuessaan. Muovi taas imee suhteessa kartonkiin vähän vettä, jolloin se ei turpoa samassa suhteessa kuin kartonki. PET imee kuitenkin muoviksi melko paljon kosteutta. Erosta johtuen, muovi pyrkii pysymään omassa mitassaan, kun taas kartonki laajenee pituus- ja leveyssuunnassa. Aihio muuttuu suorasta kaarevaksi. Tämä taas aiheuttaa ongelmia aihion kohdistuksessa, jolloin aihio menee vinossa muottiin ja tulee hylättävä tuote suurella todennäköisyydellä. Tätä koetaan ehkäistä kohdistuslaitteistoa kehittämällä.

## 7.1.2 Laitteisto

### Tuotantokone

Tuotantokoneessa ja sen yhteyteen liitetyissä toimilaitteissa on yhteensä säädettäviä asioita useita kymmeniä, jopa satoja. Jokainen niistä vaikuttaa johonkin enemmän tai vähemmän. Useimmiten niiden vaikutukset tiedetään, mutta niiden yhteisvaikutuksia ei. Kaikkia vaikutuksia ei kykene ennustamaan. Kun koetetaan tutkia joitakin muutoksia prosessissa, olisi parametrien oltava yhtenevät muutoin paitsi tutkittavan asian osalta. Tuotantokone on massiivinen laite, jolla on suuri lämpökapasiteetti. Konetta käynnistäessä on huomioitava lämmön tasautuminen, jotta vältytään toimittamasta asiakkaille huonolaatuisia tuotteita. Suurissa koneissa lämpö saattaa tasaantua vasta usean tunnin yhtäjaksoisen ajon jälkeen, koska materiaalin ja muotin lämpö siirtyvät massiiviseen koneen runkoon.

### Muotti, robotti, tarttuja ja makasiini

Muotin kitka on olennaisessa osassa vuokaa valmistettaessa monestakin syystä. Ensinnäkin kartonki pitää saada repeämättä pesän muotoon muotin sulkeutuessa. Toiseksi muovikalvo kartongin pinnassa ei saa vaurioitua tiiveyden vuoksi. Muotin kitkaan ympäristötekijöiden lisäksi vaikuttavat muotin pinnan kiillotus ja mahdollinen erikoispinnoitus.

Muotin suuren massan vuoksi sen lämpötila vaihtuu melko hitaasti. Muotin eri osien pitää toisaalta olla eri lämpötiloissa jotta muotti toimii oikein. Osa lämmöstä myös johtuu tuotantokoneen runkoon. Tästä syystä lämpöjen tasaantuminen ottaa oman aikansa ajon alussa. Tämä on syytä ottaa huomioon varsinkin mittatarkkojen kappaleiden koeajossa. Muotissa on paljon liikkuvia osia, joista moni vaikuttaa muotin kohdistumiseenkin. Kuluvien osien vaihtamiset huollossa saattavat vaikuttaa muotin liikkeisiin, jolloin voi joutua tekemään muita muutoksia. Nämäkin on syytä huomioida, jos huoltoja on tehty koeajojen välissä.

Robotti tai jokin muu kappaleenkäsittelyautomaatti on tärkeässä roolissa tuotannossa. Robotin olisi oltava yhtä nopea kuin tuotantokone mutta myös erittäin tarkka. Uutena robotit ovatkin erittäin tarkkoja, jopa 0,1mm tarkkuudet onnistuvat. Robotin ohjelmoinnin on oltava asianmukainen, jotta vaadittaviin tarkkuuksiin ja nopeuksiin päästään. Robotin lisäksi kappaleen käsittelyyn läheisesti liittyvät makasiini ja tarttuoja. Kartongin aiheuttamat haasteet olisi pystyttävä eliminoimaan osittain tarttujan ja makasiinin suunnittelulla. Makasiinista haetaan pinossa olevat kartongit tarttujan avulla. Tarttujan olisi saatava kartonki aina samasta kohtaa kiinni, jotta se voidaan viedä muottiin samaan kohtaan. Tästä syystä tarttujan ja makasiinin säädöt on oltava kunnossa ylösajoa suoritettaessa. Makasiinin tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluvat helppo ja toistettava täytettävyyys, hyvä kohdistavuus, helppo noudettavuus ja mahdollisimman harva vikaantuvuus. Tarttujalta vaaditaan ulottuvuutta, jämäkkyyttä, hyvää tartuntaa ja konemaista tuntoaistia. Usein pelkkä robotin liikerata ei riitä muotin väliin, jolloin tarttujan pituutta joudutaan kasvattamaan. Mitä pidemmät varret tarttujassa, sitä suuremmat ovat heitot kohteessa.

### 7.1.3 Vuokamateriaalit

Muoviraaka-aineen toimittaja valmistaa omaa tuotettaan omilla laatukriteereillään. Raaka-aineessa saattaa olla pieniä vaihteluita esimerkiksi viskositeetin suhteen. Nämä vaihtelut on hyvä tiedostaa, mutta niihin voi olla vaikeampi vaikuttaa. Raaka-aineen kosteus on kuitenkin suoraan omissa käsissä. Raaka-aineen pakkaustapa, säilöntätapa ja -aika sekä kuivausprosessi vaikuttavat materiaalin kosteuteen. PET:n kosteus aiheuttaa muun muassa iskulujuuden ja vetolujuuden heikkenemistä sekä turpoamista ja viirujen syntymistä kappaleen pintaan (DuPont, 2007.) Väri- ja lisäaineet on myös hyvä pitää kuivana, vaikka niiden suhteellinen osuus massasta on melko pieni. Niiden toimittaja suosittelee niille oikean sekoitussuhteen oikean värin saamiseksi. Sekoitussuhdetta voidaan kuitenkin säätää, jos se nähdään tarpeelliseksi. Sekoitusmäärä pitää myös merkitä koeajopöytäkirjaan virheellisten tulosten välttämiseksi. Kartongin luonne asettaa omat haasteensa ja toisaalta aihoiden valmistajalta on vaadittava tasalaatuisia ja samankokoisia aihioita, jotta niistä ei synny laatuvirheitä.



## Nuuttaus

Kartonkiin tehdään stanssauksessa aihion muodon lisäksi muotoutuvuutta helpottavia ja ohjaavia nuuttauksia. Nuuttaukset lisäävät kartongin venymistä huomattavasti, mikä on otettava myös aihion muodon ja mittojen suunnittelussa huomioon. Nuuttaukset olisi hyvä tehdä mahdollisimman symmetrisesti, jotta niiden vaikutukset olisi mahdollisimman helppo arvioida tai laskea. Nuuttauksia vaaditaan vuoan kaarevissa kohdissa, joissa aihion kaaren piiri on suurempi kuin vuoan. Aihio muotoutuu vuoaksi, kun se muovataan muotoonsa. Muotoutuminen saadaan tapahtumaan hallitusti nuuttauksien kohdalta.

## Kartongin pinnoitus ja sen vaikutukset

Kartonkiin painetaan asiakkaan toivoma grafiikka. Painatusmenetelmiä on monia erilaisia. Väriin päälle tulee lakkakerros, joka kovettuu tai kovetetaan riippuen menetelmästä. Nämä vaikuttavat kartongin kitkaan. Kitkamuutoksia ei ole vielä tutkittu, mutta kokemuksella havaittu. Aineiden valintaan vaikuttavat kuitenkin myös monet muut asiat, kuten sertifikaatit ja ulkonäkö.

## Aihion koko ja muoto

Aihion koko ja muoto määräytyvät stanssauksessa, jossa aihiot leikataan ja nuutetaan halutunlaisiksi. Asiakkaan toivoman tuotteen mukaan mitoitetaan aihion koko tietokonetta hyväksikäyttäen. Myös nuuttaukset vaikuttavat aihion lopulliseen kokoon, jota on vaikea ennakoida ennen koeajoja. Kaaren sädettä voidaan pienentää tai kasvattaa suhteessa muuhun vuokaan, jolloin saadaan mahdollisesti enemmän venyviä kohtia kompensoitua.

## 7.2 Tuotteen ylösajon tarkastuslista

Ylösajo suoritetaan pääpiirteittäin listan järjestyksessä ylhäältä alaspäin. Listassa on listattu eri laitteiden yhteydessä tehtävät tarkastukset ja huomioitavat asiat.

### Muotin kiinnitys:

- muotin korkeuden säätö
- sulkuvoiman asetus
- letkut/johdot (ilma, vesi, sähkö, anturit) kytketty ja toiminta tarkastettu
- sulkuvoima pienin mahdollinen, jolla ei synny pursetta
- katso ohje koneen toimittajan kirjasta, jos epäselvyyttä.

### Muotin toiminta:

- muotin liikkeet toimivat (ulostyöntö, sulku, välilevyn toiminta)
- profiloitava oikea muotin aukeaminen, sulkeutuminen ja ulostyöntö
- ulostyöntöpuhalluksen toiminta
- Muotti lämpiää tasaisesti
- muotti ei vuoda (ilma, vesi)
- tarkistettava vuodot koepaineistuksella
- vakuumin toiminta
- muotin puhtaus ja hygieenisuus
- välilevyn paine oikea.

### Temperointilaitteet:

- säädetty oikeat lämpötilat
  - muotin mitatut vrt. säädetyt lämpötilat
- vesi kiertää oikein
  - tarkista jokainen sisään ja ulos menevä liitäntä
  - mittaa sisään ja ulosmenevän veden lämpötilaerot
  - varmistu ettei ole tukossa olevia kanavia
- letkut eivät vuoda
- liittimet ovat kunnossa
- paine/vakuumi
- onko varaletkuja lähettyvillä.

#### Raaka-aineet:

- raaka-aine kuivattu ohjeen mukaan
- oikea väriaine
- oikeat lisäaineet
- värin ja lisäaineiden määrä oikea.

#### Aihiot:

- aihiot ovat olleet säilössä oikeissa olosuhteissa
  - aihiot ovat suoria
- oikean muotoiset ja kokoiset aihiot
- oikea painatus
- ei sävyvirheitä
- aihiot ehjiä.

#### Tarttuja ja makasiini:

- makasiini säädetty oikealle kartongille
- makasiinin ja robotin akselit täsmäävät keskenään
- robotissa oikea tarttuja säädettyinä
- tarttuja suunniteltu ja valmistettu
- tarttujassa imukupit kunnossa ja puhdistettuina.

#### Robotti:

- robotissa oikea ohjelma tehtynä sekä valittuna
- tarkastetaan robotin liikeradat käsiajolla, myös virhetilanteet
- varmistetaan lupien toiminta masterin ja slaven välillä
- valitaan oikeat liikenopeudet.

#### Muut toimilaitteet: (kappaleen jatkokäsittely)

- varmistu laitteiden toiminnasta ja oikeista säädöistä
- nollaa kappalemäärät
- varmistu määräaikaishuoltojen suorituksista.

#### Tuotantokone:

- haetaan muistista ohjelma, jolla on tehty vastaavanlaista tuotetta tai asetetaan materiaalitoimittajan/esimiehen antamat arvot sekä haetaan loput arvot kokeellisesti
- tarkistetaan liikkeiden toiminta
- tarkistetaan muotin ohjausten toiminta.

#### Puhtaus:

- kaikki pinnat, joihin kappale koskettaa prosessissa puhdistettava asiaankuuluvilla puhdistusaineilla
- ympäristö on peruspuhdas -> ei liukastumisvaaroja ym.

#### Yleisohjeita:

- koneiden määräaikaishuollot tehtyinä, jos ne ovat ajankohtaisia
- käyttöohjeet paikoillaan
- turvallisuusmääräykset täytetty.

#### Laadun varmistus:

- pinhole
- tiiveys
- aihion oikean koon tarkistus
- paikoitus
- mekaaninen lujuus.

### 7.3 Optimoinnin mahdollisuudet

Opinnäyteyössä tavoitteena oli tutkia prosessin optimointimahdollisuuksia. Tarkoituksena oli soveltaa koesuunnittelua vuokaprosessin optimointiin. Liian usein teollisuudessa käytetään ainakin tuotannon alkuvaiheessa kokemuksen, yrityksen ja erehdyksen periaatetta. Tällä menetelmällä voidaan saavuttaa kohtalaisia tuloksia, mutta sillä ei päästä aidosti parhaaseen ratkaisuun. Pitkällä tähtäimellä selkeä optimointi tuo myös toivotun tuloksen nopeammin. Melko pian asiaa tutkittuani tulin siihen tulokseen, että prosessi ei ole vielä riittävän stabiili optimoita-

vaksi. Useimmissa optimointimenetelmissä optimointi perustuu kirjainyhdistelmään DMAIC, joka tulee sanoista Define, Measure, Analyze, Improve, Control. Jotta voidaan optimoida, on saatava luotettavaa mittausdataa erilaisin keinoin. Mittausdatasta on osattava analysoida oikeita asioita, jotta voidaan tehdä oikeita päätöksiä ja parannustoimenpiteitä.

### 7.3.1 Johtopäätökset ylösajosta ja optimoinnista

Näillä ohjeilla pitäisi olla mahdollista saada luotettavat tulokset kahdesta tai useammasta koeajosta. Todellisuus ei aina kuitenkaan mene käsikirjoituksen mukaan, ja matkan varrelle osuu monia esteitä. Jos ylösajo ei ohjeistuksesta huolimatta tapahdu johdolle riittävässä ajassa, suosittelisin tuotteen ylösajon vaiheiden seuraamista. Vaiheet tulisi kirjata työkulkukaavioon, josta voitaisiin tarkemmin analysoida kunkin vaiheen kesto, vaaditut resurssit ja liitännäisvaikutukset. Tulevaisuudessa voitaisiin kirjata muistiin ylösajon keston lisäksi aikaan vaikuttavia tekijöitä. Tällaisia ovat koeajojen, muotin korjausten, tuotemuutosten, erilaisten hyväksyntöjen tai raporttien ja asiakkaille lähetettävien mallien lukumäärät. Pyrkimyksenä olisi välttyä näiltä aikaa ja rahaa vaativilta tehtäviltä.

## 8 YHTEENVETO

### Vääntyily

Tuotteen vääntyminen saa raamit jo tuotesuunnittelussa, kun kappaleen muoto ja materiaali valitaan. Vääntyilyn syitä tutkittiin, mutta vääntyilyä ei kuitenkaan kokonaan saatu poistettua. Materiaalin kiteytymisestä saatiin uutta tietoa, jota voidaan hyödyntää tuotannossa. Tieto kappaleen vääntyilyn syistä lisääntyi, mikä mahdollistaa toiminnan muuttamisen jatkossa. Testeissä ylitettiin tarkoituksella materiaalityömittajan arvoja, jotta havaittaisiin kiteisyyseroja. Vuokaa ei kuitenkaan muista rajoittavista syistä voitu ajaa niin kuumalla työkalulla, kuin olisi ollut tarvetta.

DSC-testissä on helppo selvittää materiaalin ominaisuuksia mutta pienten kiteisyyserojen havaitseminen on vaikeampaa. Kiteisyys kappaleen eri kohdissa voi jo vaihdella riittävän paljon haitatakseen tutkimuksen tuloksia. Virheitä testauksessa saattoi aiheuttaa näytepalan painoero, erimallinen koekappale (erilainen lämpöenergian johtuminen antureihin) ja näytepalan kohta kappaleessa (pinta / ydin / yhtymäsauma / suutinkohta). Näytteet pyrittiin ottamaan yhtä suurina ja samasta kohdasta kappaletta. Ohjelma ottaa painon huomioon testin laskelmissa, joten siitä ei pitäisi syntyä virhettä.

### Ylösajo ja optimointi

Ylösajoa sekä optimointia on mahdollista nopeuttaa ja parantaa lähes loputtomiin. Ylösajon tehostamiseen voidaan päästä dokumentointia kehittämällä. Tieto, joka on kertynyt prosesseista, pitää saada henkilöiden hallusta laajempaan tietoisuuteen. Prosessi olisi hyvä aikatauluttaa, mikä on yhdessä johdon ja suorittavan tason kanssa realistiseksi todettu. Tämä vähentää myöhästymisiä, päällekkäisyyksiä ja auttaa sisäistämään tavoitteet. Koeajojen pitää olla suunnitelmallisia ja valmisteltuja, ja erilaiset yhteensopivuudet on tarkistettava jo hyvissä ajoin ennen koeajoja, jotta itse koeajo ei viivästy.

Optimointityökalujen oikeaoppinen käyttäminen tuotannossa on olennainen osa suursarjatuotantoa. Se kuitenkin vaatii erittäin paljon koulutusta, osaamista ja panostuksia. Panostukset voivat kuitenkin maksaa itsensä hyvinkin nopeasti takaisin. Optimoinnista on tehty erittäin kattavia projekteja kuten Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet älykkäät työkalut (IDEAL) sekä PRO muovi - projekti. Suosittelen näihin projekteihin tutustumista, pohtimista mitkä näistä systeemeistä olisi hyödyllisiä juuri vuokatuotantoon, mitkä niistä olisivat taloudellisesti toteutettavissa ja missä vaiheessa niitä sovellettaisiin.

Tiedonkeruu pitäisi olla reaaliaikaista, jotta virheisiin voitaisiin puuttua välittömästi. Dokumentoidusta materiaalista kertyy ajan mittaa kattava tietopankki, jota prosessin eri tahot voivat hyödyntää. Kerätty tieto auttaa tulevien projektien ja tuotteiden virheettömämpää ja nopeampaa valmistumista.

Mahdollisia virheitä on analysoitu kussakin opinnäytteen osiossa itsessään. Suurimmat virheiden paikat ovat vuolan testauksessa vastaan tulleet ongelmat.

Mikroaaltouuneja on paljon erilaisia, joten suora vertailu niiden kesken on vaikeaa. Mikroja on erimallisia ja tehoisia, pyörivällä lautasella olevia ja erilaisilla ajastimilla olevia. Myös mikrossa olevan vuolan sisältö ja sen nestepitoisuus vaikuttaa mikron lämmitystehtävään. Lisäksi mikrokuvun käyttö tehostaa vuolan kuumentamista mikrossa. Ilman sisältöä, vuoka ei suuremmin reagoi mikrossa. Tämä johtuu mikroaaltojen toimintaperiaatteesta, joka on selvitetty aiemmin.

DSC:llä testatessa on paljon tulosta epävarmentavia tekijöitä. Tekijät on pyritty eliminoimaan mahdollisimman hyvin käyttämällä esimerkiksi rinnakkaiskokeita, keskiarvoja ja muita vastaavia testauksen perusmenetelmiä.

## LÄHTEET

### Sähköiset lähteet

British Plastics Federation. [viitattu 21.3.2010] Saatavissa:

[http://www.bpf.co.uk/bpfindustry/Plastics\\_Additives.cfm](http://www.bpf.co.uk/bpfindustry/Plastics_Additives.cfm)

Carlton Gallawa J. 2000. Basic Principles of Microwave energy. [viitattu

19.3.2010] Saatavissa: [http://www.gallawa.com/microtech/Ch2\\_Sample.pdf](http://www.gallawa.com/microtech/Ch2_Sample.pdf)

Havola P. TEKES - Pro Muovi –teknologiaohjelma loppuraportti [viitattu

25.3.2010] Saatavissa: [www.tekes.fi/fi/document/43374/pro\\_muovi.pdf](http://www.tekes.fi/fi/document/43374/pro_muovi.pdf)

Höök T. ValuAtlas ja CAE DS – Muotin suunnittelu - Polymeerimateriaalit.

[Viitattu 12.1.2010] Saatavissa: <http://www.valuatlas.net>

Miettinen K. & Optimointiryhmä. Teollinen Optimointi. JYU. [Viitattu 8.4.2010] Saatavissa:

<https://www.jyu.fi/it/laitokset/mit/opiskelu/suuntautumisvaihtoehdot/simo/teollinen-optimointi>

Silén J, Kylmälä M, Latvakangas T, Välipakka E, Koikkalainen P, Lensu A ja Haranen M. (TEKES, TTY, JYO). 2002 - 2004. Tehokkaan, laadukkaan ja mukautuvan ruiskuvalun uudet älykkäät työkalut (IDEAL) Loppuraportti [viitattu

8.4.2010]. Saatavissa:[http://erin.mit.jyu.fi/ideal/rap/loppuraportti\\_final.pdf](http://erin.mit.jyu.fi/ideal/rap/loppuraportti_final.pdf)

Liangbin L, Rui H, Ai L, Fude N, Shiming H, Chunmei W, Yuemao Z and Dong W. High pressure crystallized poly (ethylene terephthalate): High crystallinity and large extended-chain crystals

[Viitattu 1.4.2010]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science>

Nykänen, S. TTY. Termoplastiset polyesterit PET ja

PBT.PET\_PBT:ominaisuudet.pdf.[Viitattu 24.3.2010] Saatavissa:

[www.valuatlas.net/tietomat/docs/plastics\\_PET\\_PBT\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.net/tietomat/docs/plastics_PET_PBT_FI.pdf)



Päivölä 7.-8.6.2001. Käytännön muovitietoutta: Tampereen teknillinen korkeakoulu, muovi- ja elastomeeritekniikka, materiaaliopin laitos. Tampere 2001.

Karjalainen E. Quality Knowhow Karjalainen Oy. [viitattu 12.3.2010]. Saatavissa: <http://www.qk-karjalainen.fi/?sivu=Artikkelit>

Valtonen M, Silen J & Järvelä P. 2001. Ruiskuvalukappaleen kutistuminen ja vääntyilyn simulointi.pdf. Tampereen teknillinen korkeakoulu/Materiaaliopin laitos/Muovi- ja elastomeeritekniikka

Wilkinson R, Poppe EA, Leidig K, & Schirmer K. 2007. Engineering polymers: The top ten moulding problems. Dupont [http://www2.dupont.com/Plastics/en\\_US/Knowledge\\_Center/TopTens/top10moulding.html](http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/Knowledge_Center/TopTens/top10moulding.html)

## **Painetut lähteet**

Järvelä P, Vastela M & Syrjälä K 2000. Ruiskuvalu 3. painos. Plastdata Oy Tampere. TTKK- Paino 2000

Järvinen P.2008. Uusi muovitieto. 1.painos. Muovifakta Oy. WS Bookwell Oy Porvoo

Karjalainen E.1999. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla, TAGUCHI -menetelmä. 2.painos. Metalliteollisuuden kustannus Oy. Tamperepaino Oy Tampere

Kunststoff – Institut 1992. Opas pintavirheiden poistamiseen ruiskupuristetuiissa kestopuovikappaleissa. 1. painos. Lüdenscheid. Kunststoff-Institut für die mitteltändische. Wirtschaft NRW GmbH (K.I.M.W)

Meyer R.W. 1987 Handbook of Polyester Molding Compounds and Molding Technology

Olabisi O. 1997. Handbook of Thermoplastics.Marcel Dekker, Inc

Pötsch G & Michaeli W 2008.Injection Molding an Introduction. 2.painos. Carl Hanser Verlag

Seppälä J. 2008. Polymeeritekniologian perusteet. 6. painos. Otatieto Oy. Haka-paino Oy Helsinki

**Suulliset lähteet**

Järvelä, P.2006. Kurssimateriaali Lahden ammattikorkeakoulu; Muovimateriaalit

Perkiö, K.2009. Kurssimateriaali Lahden ammattikorkeakoulu; Kalvotekniikka

Ranivaara, J. Entinen Foxconin laatuteknikko. Haastattelu 12.1.2010

## LIITTEET

## LIITE 1

Taguchin kulku