



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUUSO HAUTALA
OPTISEN MITTA-ANTURIN HYÖDYNTÄMINEN EKSTRUUSIO-
PROSESSIN KEHITTÄMISESSÄ

Diplomityö

Tarkastajat: professori Jyrki Vuori-
nen, tohtorikoulutettava Ilari Jönkkä-
ri
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 6. huhtikuuta
2016

TIIVISTELMÄ

JUUSO HAUTALA: Optisen mitta-anturin hyödyntäminen ekstruusioprosessin kehittämisessä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 70 sivua.

Syyskuu 2016

Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Muovi- ja biomateriaalit

Tarkastaja: professori Jyrki Vuorinen, ohjaaja: tohtorikoulutettava Ilari Jönkkäri

Avainsanat: ekstruusio, optinen mitta-anturi, kalvonvalmistus, pinnankarheus

Muovikalvon pinnankarheuden mittaaminen ekstruusiolla valmistetusta kalvosta on ollut pitkään haastavaa. Erilaisten leikenäytteiden kerääminen koeajoista mittauslaitteita varten on aikaa vievää. Lisäksi tulosten vertailukelpoisuus vaihtelee näytenäytteiden välillä. Pinnankarheuden määrittäminen optisen on-line mitta-anturin avulla nopeuttaa mittaustulosten saantia ja tehostaa ekstruusioprosessin laadunvalvontaa. Menetelmän avulla saadaan reaaliaikaista tietoa kalvon pinnan ominaisuuksista. Tällöin negatiivisiin muutoksiin voidaan reagoida prosessiparametreja tai materiaaleja säätämällä. Lisäksi muovikalvon pinnalla esiintyvät prosessointivirheet voidaan havaita optisella mittauksella tarkasti.

Työn kokeellisessa osuudessa valmistettiin tasokalvoa laboratorio-olosuhteissa ekstruderilla. Kelauslaitteistoon asennettua on-line mitta-anturia käytettiin koeajoissa kalvon pinnankarheuden määrittämiseen.

Kokeellisessa osuudessa käytettiin kahta teollisuudessa paljon käytettyä muovilaatua ja kalvoa valmistettiin niin läpinäkyvänä kuin Masterbatchin avulla valkoiseksi värjättyinä, jolla tutkittiin materiaalin vaikutusta tutkimustuloksiin. Työhön kuului myös kirjallisuuskatsaus, jossa tarkasteltiin yleisellä tasolla ekstruusiota, muovikalvon valmistusta, kalvonvalmistuksen materiaaleja sekä optista mittaamista.

Tarkoituksena oli tarkastella eri prosessointivirheiden, erityisesti pinnalla tapahtuvana aaltoiluna esiintyvän sharkskin-ilmiön ja laajemman sulamurtuman esiintyminen muovikalvoa prosessoitaessa. Lisäksi työhön kuului optisen mitta-anturin kapasiteetin määrittäminen teollista tuotantoa varten ja mahdollisten kehittämiskohteiden arviointi.

Työssä saatiin valmistettua onnistuneesti muovikalvoa erilaisilla prosessiparametreilla ja optinen mitta-anturi myös kykeni määrittämään kalvon pinnankarheuden tarkasti. Ongelmaksi syntyivät suuret vaihtelut kalvon paksuudessa johtuen eri prosessiparametreista tai prosessivirheistä, jolloin pinnan karheuden määrittäminen oli haastavaa. Tutkimuksen perusteella mitta-anturi soveltuu erinomaisesti työkaluksi sovelluksiin, joissa pinnankarheuden tarkka määrittäminen on tärkeää.

ABSTRACT

JUUSO HAUTALA: Use of optical measurement unit in development of extrusion process

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 70 pages.

September 2016

Master's Degree Programme in Material Technology

Major: Polymers and Biomaterials

Examiner: Professor Jyrki Vuorinen, supervisor: doctoral Student Ilari Jönkkäri

Keywords: extrusion, optical measurement unit, polymer cast film, film surface roughness

Measurement of surface roughness of film in extrusion process has long been a challenging endeavor. Collecting samples from trial runs for external measurement devices is time consuming and comparability of samples varies. By measuring surface roughness of polymer film with the help of on-line measurement unit enables faster data gathering and improves quality control of extrusion process. Measuring polymer film surface roughness in industrial environment gives real-time data of the film surface properties which enables altering processing parameters or materials. Additionally, processing defects which occur in surface of the film can be accurately detected with optical measurements.

Experimental study part of this thesis focuses on polymer cast film manufacturing in laboratory environment. This was done by using extruder and implementing optical on-line measurement unit on film rolling unit. Measurement unit was used to determine the surface roughness of manufactured polymer cast film. Two different materials were chosen that are both widely used in film manufacturing industry. Cast films were manufactured both transparent and colored white with Masterbatch to determine possible variations to measurement results caused by different materials. Thesis also includes theoretical study which focuses on polymer film manufacturing, materials used in film industry and optical measurements.

Purpose of this study was to examine surface roughness defects, namely sharkskin phenomenon and advanced surface melt fractures, which occur in cast film process. Thesis also focuses on optical measurement unit's capability in industrial use and evaluation of future research and development.

In experimental study polymer cast film was successfully manufactured with different processing parameters and optical measurement unit was able to determine the surface roughness of polymer film accurately. Problem was great variations in film thickness and processing defects which made continuous surface roughness measurements challenging. Nevertheless, for applications which require accurate and steady surface roughness, optical measurement unit can be a great tool in quality control.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on ollut haasteellinen, mutta myös kovin opettavainen kokemus. Opintojen varrella kerätyt tiedot ja taidot tiedonhankintoihin ovat joutuneet koetukselle, mutta tuloksena on saatu aikaan viimeinen etappi matkalla kohti valmistumista. Aikataulu on muuttunut muutamaaan otteeseen mutta eteenpäin on menty koko ajan, vaikka aina siltä ei ole tuntunutkaan. Diplomityö on ollut hyvä osoitus projektityöskentelyn eri puolista ja valmistanut suhtautumaan erilaisiin ylä- ja alamäkiin mitä työelämässä voi tulla vastaan.

Tämän työn saavuttaminen loppuun ei ole kuitenkaan ollut vain omaa ansiotani ja haluan osoittaa kunnian myös lukuisille työtä edesauttaneille tahoille. Ensimmäiseksi haluan kiittää koulun puolesta ohjauksesta professori Jyrki Vuorista sekä tohtorikouluuttava Ilari Jönkkäriä heidän tuestaan ja ymmärryksestään työn edetessä. Haluan osoittaa kiitoksen myös koko Focalspecin henkilöstölle ja erityisesti Heimo Keräselle heidän uskosta minuun diplomityötä valittaessa sekä jatkuvasta tuesta työn aikana. Työn valvojana myös toimineen Kai Syrjälän apu sekä jatkuva tsemppaus ovat olleet myös kullannarvoisia koko prosessin ajan.

Tutkimusmateriaaleista haluan kiittää pakkaustekniikan ja Borealixen henkilöstöä. Koikkeellisessa osuudessa erikoislaboratoriomestari Tommi Lehtinen oli erittäin tärkeässä roolissa. Vertaistukena äärimmäisen tärkeässä roolissa olivat samassa tilanteessa olevat tai olleet ystävät joita ilman en olisi selvinnyt tästä urakasta. Viimeiseksi haluan kiittää Jennaa hänen vankkumattomasta uskostaan minuun ja tuesta läpi projektin.

Tämän tuen avulla olen pystynyt tekemään tämän teoksen, joka tulee olemaan merkki opintojen päätöksestä ja uuden alusta.

Tampereella, 23.8.2016

Juuso Hautala

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	EKSTRUUSIO.....	2
2.1	Ekstruusiolaitteisto	2
2.2	Ekstruusiosprosessi	3
2.3	Muut ekstruusiotyypit	3
2.3.1	Kaksoisruuviekstruusio	4
2.3.2	Kartioekstruusio	4
2.3.3	Koekstruusio	5
2.3.4	Kompaundointi ekstruuderilla	7
2.4	Ekstruusiovyöhykkeet.....	7
2.5	Ekstruusion ruuvityypit.....	8
2.6	Ekstruusioon vaikuttavia parametreja.....	8
2.6.1	Sulapaine	8
2.6.2	Sulalämpötila	9
3.	EKSTRUUSIOSSA KÄYTETTÄVÄT MUOVIT	10
3.1	Muovien jaottelu.....	10
3.2	Polyolefiinit	12
3.2.1	Polyeteeni	12
3.2.2	Polypropeeni.....	14
3.3	Muita kalvonvalmistuksessa käytettäviä muoveja	16
3.3.1	Polyetyleenitereftalaatti.....	16
3.3.2	Polyvinyylidikloridi	17
3.3.3	Polyamidit.....	18
3.4	Muovien lisäaineet.....	18
3.5	Muovien prosessointiin vaikuttavia tekijöitä	19
3.5.1	Sulamis- ja lasisiirtymälämpötila.....	19
3.5.2	Reologia.....	19
4.	KALVONVALMISTUS	21
4.1	Kalvonvalmistusmenetelmät	21
4.1.1	Tasokalvon valmistus.....	21
4.1.2	Puhalluskalvon valmistus	22
4.1.3	Ekstruusiopäällystys.....	23
4.2	Kalvonvalmistuksen keskeiset parametrit.....	24
4.3	Kalvonvalmistuksen haasteet	25
4.4	Kalvonvalmistuksen tuotantoluvut	26
5.	MUOVIKALVON OPTINEN MITTAAMINEN	28
5.1	Optinen mitta-anturi.....	28
5.1.1	Optisen mittauksen teoria.....	28
5.1.2	Anturin toiminta.....	29

6.	KOEAJOJEN SUORITUS	33
6.1	Koeajojen suoritus	33
6.1.1	Testimatriisi	33
6.2	Kokeellisessa osuudessa käytetyt materiaalit	34
6.2.1	LDPE	35
6.2.2	LLDPE	36
6.2.3	Masterbatch	36
6.3	Kokeellisessa osuudessa käytetty laitteisto	36
6.3.1	Ekstruuderit	37
6.3.2	Vetolaitteisto	38
7.	KOEAJOJEN TULOKSET	39
7.1	LDPE	39
7.1.1	LDPE 160 °C lämpötilassa	39
7.1.2	LDPE 175°C lämpötilassa	41
7.1.3	LDPE 190°C lämpötilassa	42
7.2	LLDPE	44
7.2.1	LLDPE 180°C lämpötilassa	44
7.2.2	LLDPE 195°C lämpötilassa	45
7.2.3	LLDPE 210°C lämpötilassa	47
7.3	Värjätty LDPE	48
7.3.1	Värjätty LDPE 160°C lämpötilassa	48
7.3.2	Värjätty LDPE 175°C lämpötilassa	50
7.3.3	Värjätty LDPE 190°C lämpötilassa	51
7.4	Värjätty LLDPE	53
7.4.1	Värjätty LLDPE 180°C lämpötilassa	53
7.4.2	Värjätty LLDPE 195°C lämpötilassa	54
7.4.3	Värjätty LLDPE 210°C lämpötilassa	56
7.5	Koeajojen laskennalliset luvut	57
7.6	Pohdintaa tuloksista	59
8.	OPTISEN MITTA-ANTURIN POTENTIAALI	62
8.1	Kehitysideat optiselle mitta-anturilaitteelle	62
8.1.1	Mittausten herkkyys etäisyydestä	62
8.1.2	Valmiin raportin tuottaminen	62
8.2	Laitteen potentiaali teollisuudessa	63
8.2.1	Teollisen Internetin applikaatiot	63
8.2.2	Mittaustekniikan sovellukset	64
9.	YHTEENVETO	65
	LÄHTEET	66

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LCI	Line Confocal Imaging
T_g	Lasiirtymälämpötila
T_m	Sulamislämpötila
LDPE	Matalatiheyksinen Polyeteeni
LLDPE	Lineaarinen Matalatiheyksinen Polyeteeni
HDPE	Korkeatiheyksinen Polyeteeni
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PVC	Polyvinyylikloridi
PA	Polyamidi (Nylon)

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön aiheena on muovikalvojen pinnankarheuden määrittäminen optista mitta-anturia hyödyntäen. Tavoitteena oli löytää keskeiset laatutekijät muovikalvojen ekstruusiossa sekä pohtia mitä etuja optisella on-line pinnankarheusmittauksella voidaan saavuttaa tuotannossa. Työssä käytettiin Focalspec Oy:n kehittämää ja patentoimaa tekniikkaa ja laitteistoa, joilla voidaan määrittää muovikalvoista pinnankarheus. Lisäksi laitteisto pystyy määrittämään läpikuultavista muoveista materiaalipaksuuden.

Työn tavoitteena oli luoda laboratorio-olosuhteissa tarkkaa ja luotettavaa tutkimustulosta, jota voidaan hyödyntää laitteiston jatkokehityksessä sekä myöhemmin referenssidatana yritysten tarpeiden täyttämiseksi. Diplomityöhön kuului kokeellisen osuuden lisäksi kirjallisuuskatsaus muovien ekstruusiosta sekä pohdinta laitteiston hyödyntämisestä muoviteollisuuden tarpeisiin.

Diplomityön kokeellinen osuus suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston muovitekniikan tutkimuslaboratorion ekstruusiolaitteistolla. Ekstruusiolinjalle kiinnitettiin Focalspecin LCI-1200 on-line optinen mitta-anturi, jolla saadaan määritettyä valmistetun muovikalvon pinnankarheus. Laite hyödyntää yrityksen itse kehittämää ja patentoimaa tekniikkaa nimeltä Line Confocal Imaging (LCI). Tarkka topografinen pinnanmittaus suoritetaan valon heijastumisen spektrisellä analyysillä. Tulokset ovat nähtävissä reaaliajassa ja teknologia tarjoaa täten useita etuja materiaalien on-line mittaukseen sekä laadunvalvonnan ilman keskeytystä tuotantolinjastoon.

Aikaisemmin pinnankarheuden tarkka määrittäminen integroituna tuotantolinjastoon reaaliajassa on ollut käytännössä mahdotonta. Vastaanotettu mittausdata laitteesta helpottaa laadukkaan tuotteen valmistusta mittaamalla materiaalin pinnankarheutta. Tämä mahdollistaa teoriassa suuret säästöt materiaalikustannuksissa optimoimalla tuotantoparametrit sekä syklijat. Tuotantoparametrien vaivaton siirto eri osapuolien välillä mahdollistaa sujuvan kommunikaation osapuolien välillä ja voi helpottaa huoltotöitä huomattavasti.

Diplomityön päällimmäisenä tavoitteena oli löytää yhteys mitatun datan sekä materiaalin laatutekijöiden välillä. Pinnankarheus kertoo paljon tuotannon toimivuudesta ja täten sen analysointi voi mahdollistaa säästöt pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna. Uuden teknologian tutkiminen ja hyödyntäminen muovituotteiden valmistuksessa on erittäin mielenkiintoinen aihealue, johon kannattaa käyttää resursseja.

2. EKSTRUUSIO

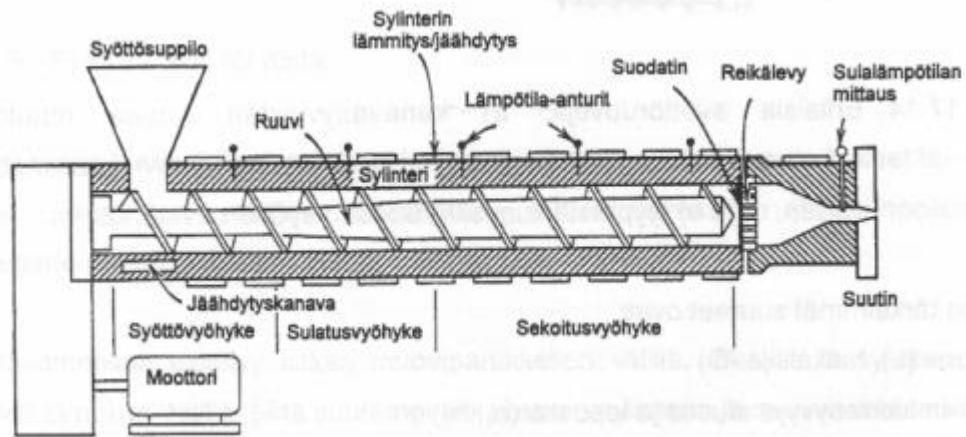
Ekstruusio eli suulakepuristus on jatkuvatoiminen muovien prosessointimenetelmä. Ekstruusio on laajalti käytössä kalvojen ja kaapelien valmistuksessa, mutta sillä on suuri merkitys myös muovien sekoituksen kannalta. Käytännössä kaikki muovaineet ovat ekstrudoitu vähintään kertaalleen. Usein ekstruusiolla valmistetut tuotteet ovatkin puolivalmisteita joita tarvitsee vielä muokata tai uudelleen prosessoida ennen kaupallista käyttöä. [1]

Ekstruusion kannalta tärkeitä tekijöitä ovat muovin virtauskäyttäytyminen sekä pyrkimys välttää muovimateriaalin terminen hajoaminen. Prosessoitaessa myös tuotteen materiaaliominaisuuksilla on suuri rooli. Hyvä materiaalituntemus on siis olennaisessa osassa korkealaatuisen lopputuotteen saavuttamiseksi.

2.1 Ekstruusiolaitteisto

Perinteisessä yksiruuviekstruusiossa muoviraaka-aine syötetään yleensä granulaatteina eli pieninä muovirakeina annosteluyksikön läpi sekoitusyksiköiden kautta sulana muovivirtana suuttimelle. Sulavirtaus saavutetaan lämmön sekä ekstruuderissa sijaitsevan pyörivän ruuvin aiheuttaman kitkaliikkeen ansiosta. [2]

Ekstruusiolaitteisto voidaan jakaa toimintojen perusteella pääyksikköön, syöttöyksikköön, sekoitusyksikköön, suuttimeen ja ohjausyksikköön. Syöttöyksikköön tuodaan raaka-aine useimmiten granulaattimuodossa, josta raaka-aine kulkee painovoiman avulla ensimmäiseen sekoitusvyöhykkeeseen. Sekoitusyksikköön kuuluu ruuvi sekä sitä ympäröivät lämmitysyksiköt. Ohjausyksikköä käytetään prosessiparametrien seuraamiseen ja niiden muuttamiseen. [1] Alla on esitettyä kuva 1 eniten käytetystä ekstruuderista eli yksiruuviekstruuderista.



Kuva 1. Yksiruuviekstruuder. [3, s.243]

Pääyksiköiden lisäksi voidaan mainita myös jäähdytysyksiköt, jotka ovat lämmitysyksiköiden lisäksi vastuussa lämmön tasaisesta jakautumisesta sekä ekstruuderin lämpötilan tarvittavasta laskemisesta. Jäähdytys voidaan suorittaa joko ilman tai nesteen avulla. Ilmajäähdytys on yksinkertaisempi prosessi, mutta teholtaan usein heikko verrattuna nestejäähdytykseen. Nestejäähdytyksessä käytetään hyväksi virtaavaa vettä tai öljyä, jotka tehokkaasti jakavat ja pienentävät lämpötilaa. Kääntöpuolena nestejäähdytyksellä on lisääntynyt prosessin monitoroinnin tarve. [2]

2.2 Ekstruusioprosessi

Lämmitysyksiköiden tuottaman energian sekä ruuvin pyörivän liikkeen muodostaman kitkan avulla kiinteä muovimassa plastisoituu. Muovimassa siirtyy eteenpäin kohti suutinta etenevässä määrin homogeenisessä sulamuodossa. Ohjausyksikköä käytetään prosessiparametrien säätämiseen sekä ekstruusioprosessin valvontaan. Ekstruusiolaitteistoa pystytään modifioimaan monella tapaa aina ruuvien geometriasta niiden lukumäärään. Lisäksi lämmitysyksiköiden lukumäärä sekä teho määräävät hyvin pitkälle mahdolliset käytettävät materiaalit. [2]

Ekstruusiossa on tärkeää ymmärtää käytettyjen muovien ominaisuuksia. Ekstruusiossa käytettävät muovit voivat olla luonteeltaan amorfisia tai osakiteisiä. Osakiteisillä muoveilla on korkea sulamispiste, kun taas amorfiset muovit alkavat hiljalleen pehmetä laittumislämpötilansa yläpuolella. Osakiteisillä muoveilla on myös hyvä virtaavuus sulamispisteen yläpuolella, mutta amorfisten muovien virtaus on huomattavasti lämpötilariippuvaisempaa. [3, s.38-39]

2.3 Muut ekstruusiotyypit

Ekstruusiotyyppejä on monia erilaisia ja niiden eroavaisuuksien takia kannattaa hetki käyttää niiden esittelyyn. Materiaalista, jatkoprosessointitavasta sekä käyttökohteesta

riippuen on hyvä huomioida eri ekstrudereiden ominaisuudet ja eroavaisuudet. Alun perin ekstruusiolla tarkoitettiin nimenomaan yksiruuviekstruusiota, mutta materiaalien ja teknologian kehittymisen myötä muut ekstruusiotekniikat ovat nostaneet suosiotaan huomattavasti. [4]

Erilaisilla ekstruusiotyypeillä voidaan vaikuttaa käytettävään materiaalin kyseessä olevan sovelluksen mukaan. Muovilaaduilla voidaan saavuttaa erilaisia ominaisuuksia tuotteelle ja ekstruusiotekniikka mahdollistaa niiden muodonannon. Samaan tuotteeseen on myös mahdollista yhdistää eri muovilaatuja joko sekoittamalla ne keskenään tai järjestämällä materiaalit kerroksittain. Yhdistelyllä pyritään saavuttamaan laajemmat ominaisuudet lopputuotteelle. Polymeereihin lisätään usein myös täyte- tai lisäaineita, joilla voidaan parantaa esimerkiksi tuotteen kemiallisia tai fysikaalisia ominaisuuksia tai laskea tuotteen valmistuskustannuksia. [4]

Yleisin vaihtoehto polyolefiineille ja muille kestopuoveille on yksiruuviekstruusio, kun taas esimerkiksi lämpötilaherkän PVC:n tapauksessa suositaan usein kaksoisruuviekstruuderia. [3, s. 242]

2.3.1 Kaksoisruuviekstruusio

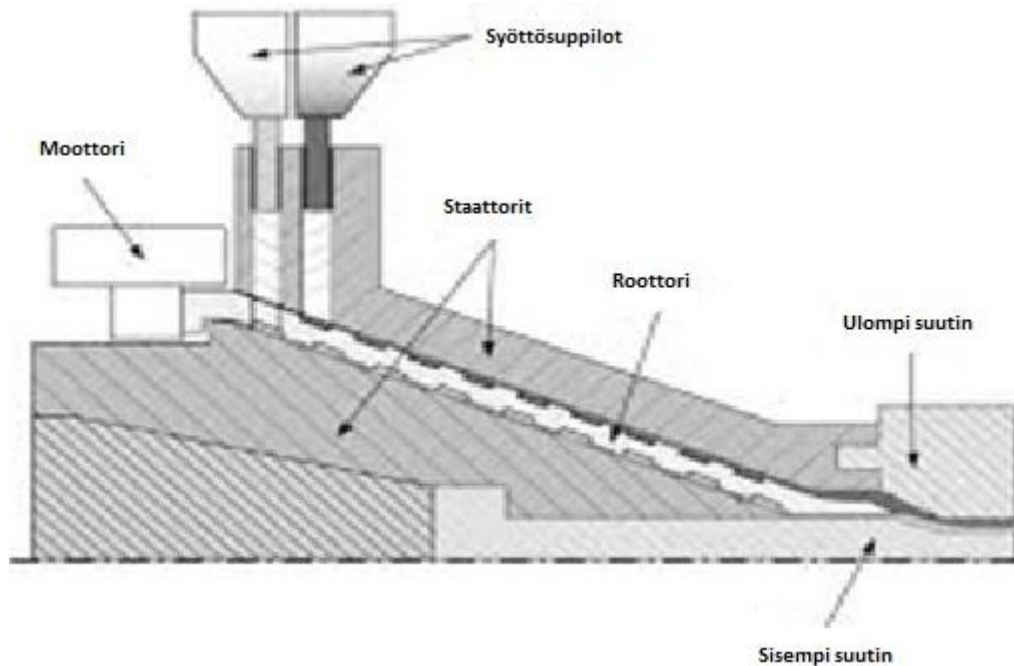
Kaksoisruuviekstruusiossa on kaksi rinnakkaista ruuvia sylinterissä. Ekstruuderin ruuvit voivat pyöriä samaan tai vastakkaiseen suuntaan. On olemassa paljon erilaisia kaksoisruuviekstruusiosovelluksia, jotka vaihtelevat käytettävän materiaalin ja käyttökohteen mukaan. [5]

Kaksoisruuviekstruusiolla on useita etuja verrattuna yksiruuviekstruusioon. Kaksoisruuviekstrudereiden suoritusteho voi olla riippumaton ruuvin pyörimisnopeudesta tai syöttöasteesta. Prosessiin vaikuttavia muuttujia ovat muun muassa lämmönsiirto, prosessointilämpötila, ruuvin täyttöaste sekä leikkausvoimat. Kaksiruuvinen järjestelmä mahdollistaa materiaalien korkeamman kosteuspitoisuuden ja ainesosapitoisuuden. Kaksoisruuviekstruusiota käytetään paljon elintarviketeollisuudessa sekä kompaundoinnissa [6]

2.3.2 Kartioekstruusio

Kartioekstruusiossa yleensä kahta tai useampaa polymeeriä ekstrusoidaan samaan aikaan yhden suuttimen läpi. Lopputuloksena syntyy yksi monikerroksinen tuote. Kartioekstruuderilla voidaan prosessoida myös vain yksittäistä muovia. Vastoin muita ekstruuderityyppejä kartioekstruuderissa ei ole ekstruusioruuvia, vaan se koostuu pyöriävästä roottorista. Roottoria ympäröi kaksi paikallaan olevaa staattoria sekä sen molemmille puolilla olevat työstetyt ruuvipinnat. Sulan muovin virtaus kartioekstruuderissa on kolmiulotteista. Kaksikerroksinen tuote saadaan syöttämällä muovimateriaalia roottorin

eri puolille. Lisäämällä roottoreita voidaan lisätä vastaavasti muovikerrosten määrää [7]. Alla on esitettyä kuvassa 2 kartioekstruuderin kaaviokuva.

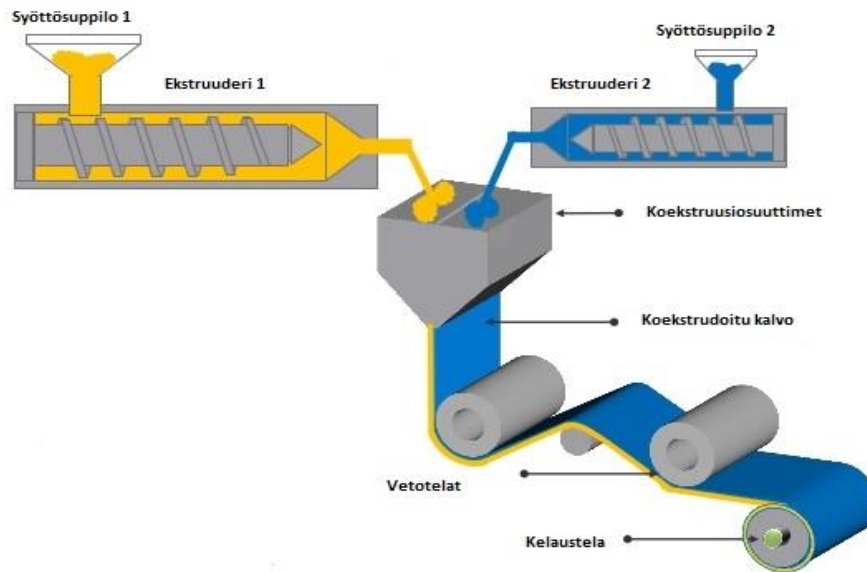


Kuva 2. Kartioekstruuderin. [Muokattu lähteestä 7]

Kartioekstruuderin etuna muihin ekstruudereihin voidaan pitää lyhyttä muovin lämmitysaikaa, jolloin termisen hajoamisen riski pienenee. Valmiin tuotteen homogeenisyys on myös hyvä, koska suuttimen rakenteesta ansiosta siihen ei jää yhtymäsaumoja tai valujälkiä. Kartioekstruuderia voidaan hyödyntää puhalluskalvojen tai putkien ekstruusioon sekä myös esimerkiksi kaapelien pinnoitukseen. [7]

2.3.3 Koekstruusio

Koekstruusio tarkoittaa kaksi- tai useampikerroksisen tuotteen ekstruusiotta. Sitä käytetäänkin yleisesti kalvomaisten tuotteiden valmistukseen. Menetelmällä voidaan myös valmistaa erilaisia profiileja sekä putkea. Koekstruusiossa eri muovit syötetään saman suuttimen läpi, missä ne liittyvät toisiinsa muodostaen yhtenäisen tuotteen. Jokainen muovi vaatii silti oman ekstruuderin muovisulan syöttöön [8]. Alla esitettyä kuvassa 3 koekstruusio kaaviokuva.



Kuva 3. Koekstruusio. [Muokattu lähteestä 9]

Koekstruusion avulla lopputuotteeseen voidaan liittää erilaisia materiaaliominaisuuksia, kuten kaasujen läpäisemättömyys, kemiallinen kestävyys tai lisääntynyt jäykkyys. Adheesio eri raaka-ainekerrosten välillä on erittäin tärkeässä roolissa. Jotkut muovit liittyvät toisiinsa helposti, mutta jotkut yhdistelmät saattavat vaatia erillisen liimakerroksen riittävän adheesio aikaansaamiseksi. Yleisesti polaarisuudeltaan samanlaiset muovit tarttuvat toisiinsa. Muovien välinen adheesio syntyy polymeeriketjujen kietoutuessa toisiinsa kahden kerroksen rajapinnalla. Uudelleenkiteytyminen sekä Van der Waalsin voimat vaikuttavat adheesio tehokkuuteen. [8]

Yhteen liitettävillä materiaaleilla täytyy olla yhtäläiset olevat sulaviskositeetit, jotta kerrosrakenteesta tulisi stabiili. Muovikerrosten uudelleenjärjestäytyminen tapahtuu sulavirtojen yhdistymisen sekä suuttimen poistumisen välisellä matkalla. Suuttimen jälkeen jäähtymisvaiheessa uudelleenjärjestäytymistä ei enää tapahdu. Tämän takia suuttimen rakenteella on suuri merkitys lopputuloksen kannalta. Kerrospaksuusvaihtelu, jota voi esiintyä niin ekstruusio- että poikkisuunnassa, on yksi koekstruusion suurimmista ongelmista. Vaihtelun voi aiheuttaa väärin asennettu tai suunniteltu suutin, sulalämpötilan vaihtelut eri puolilla, sulapaineen vaihtelut tai materiaalien yhteensopimattomat viskositeetit. [10]

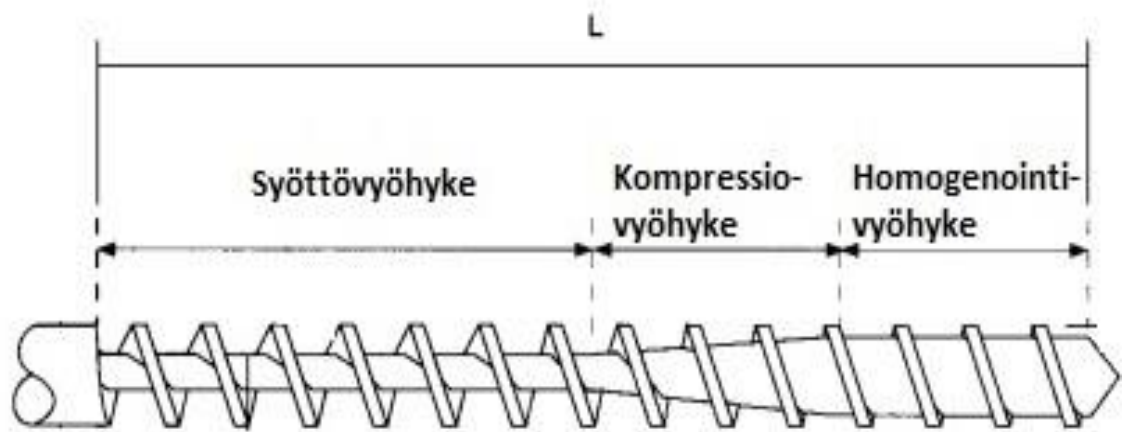
Kahden tai useamman polymeerin viskositeetteja voidaan yhteensovittaa esimerkiksi vertailemalla leikkausnopeuden ja viskositeetin yhteyttä eri lämpötiloissa. Lämpötilaa ja leikkausnopeutta muuttamalla voidaan siten löytää koekstruusiolle suotuisa alue. Muovien lämmönkestoa voidaan jonkin verran muokata stabilisaattoreilla, mutta lähtökohteisesti koekstrudoitavien muovien täytyy olla prosessointiominaisuuksiltaan samankaltaisia. [11]

2.3.4 Kompaundointi ekstruuderilla

Ekstruuderia voidaan hyödyntää myös kompaundointiin eli muovien sekoittamiseen joko toisiinsa tai lisätäkseen niihin lisä- tai täyteaineita. Tämä on usein tarpeellista esimerkiksi komposiittimateriaaleille, kun tavoitteena on homogeeninen seos. Kompaundointi suoritetaan yleensä kaksoisruuviekstruusiolla. Suurin osa kaupallisista muoveista on myös jo kertaalleen ekstrudoitu ja sen jälkeen leikeltä pelleteiksi. Ongelmaksi syntyy usein materiaalien eri koostumus, joka täytyy ottaa huomioon sekoituksessa sekä ekstruusiotyyppejä valittaessa. [12]

2.4 Ekstruusiovyöhykkeet

Ekstruusiossa ruuvin tehtävänä on plastisoida, sekoittaa sekä homogenisoida muoviraaka-aine valmiiksi suulakepuristusta varten. Ekstruusiolaitteiston sekoitusvyöhyke voidaan jakaa erikseen osiin, joilla jokaisella on hieman erilainen tehtävä ekstruusioprosesissa. Alla on esitetty kuvassa 4 kolmivyöhykkeisen yksiruuviekstruuderin ruuvi-vyöhykkeet. [13, s.206]



Kuva 4. Ekstruusiovyöhykkeet. [Muokattu lähteestä 13, s.206].

Syöttövyöhykkeellä kiinteä muoviraaka-aine siirretään tehokkaasti syöttöyksiköstä ruuville samalla puristaen massan mahdollisimman tiiviiksi. Kitka on kriittinen tekijä muovin liikkumisessa vyöhykkeiden välillä, sillä se mahdollistaa materiaalin siirtymisen eteenpäin kitkavirtauksen avulla. Ruuvin ja muovin välisen kitkakertoimen täytyy olla mahdollisimman pieni. Toisaalta sylinterin ja muovin välisen kitkakertoimen halutaan olevan mahdollisimman suuri, jotta muovi liikkuisi tehokkaasti eteenpäin. [2]

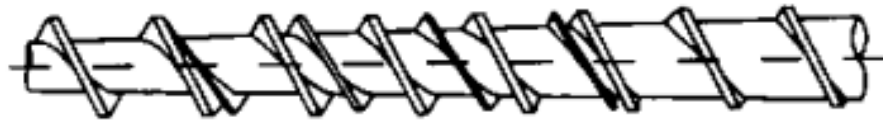
Kompressiovyöhykkeellä muovi sulaa kitkaenergian ja sylinterilämmön vaikutuksesta. Ruuvikanavan syvyys madaltuu kompressiovyöhykkeellä, jolloin paine kanavassa vas-

taavasti kasvaa. Tämä johtuu sulan muovin pienemmästä tiheydestä verrattuna kiinteään muovimassaan. [2]

Homogenointivyöhykkeelle siirryttäessä kaiken muovin on tarkoitus olla jo sulamuodossa. Vyöhykkeen tehtävänä on ylläpitää sula massa mahdollisimman homogeenisenä suutinta varten. Riippuen käytetyistä parametreista, suutintyyppistä sekä käytetystä suutinarakolevyydestä sulan muovimassan aika homogenointivyöhykkeellä vaihtelee. Tavoitteena on kuitenkin välttää muovin terminen hajoaminen. [2]

2.5 Ekstruusion ruuvityypit

Sulan muovimassan virtaukseen ekstruusiossa voidaan vaikuttaa käytettävien parametrien lisäksi erilaisilla ruuvityypeillä. Riippuen halutusta lopputuotteesta tai käytettävästä materiaalista on huomioitava tarpeet yksilöllisesti ja mahdollisesti vaihdettava ruuvityyppiä tarpeen mukaan. Tavallisen yksiruuviekstruuderin ruuvin lisäksi kiteisimmille materiaaleille on käytössä Barrier-ruuvi, jonka tarkoituksena on luoda tehokkaampi plastisoituminen vyöhykkeissä. Homogenointivyöhykkeen päähän asennettavan lisäosan avulla voidaan myös tehokkaasti vaikuttaa muovien sekoittumiseen. Se tehostaa muovimassan virtaamista ja homogenoitumista ennen suutinta [13, s. 206-207]. Alla on esitettyä kuvassa 5 Barrier-ruuvi.



Kuva 5. Yksiruuviekstruusiossa käytettävä Barrier-ruuvi. [13, s. 207]

2.6 Ekstruusioon vaikuttavia parametreja

Ekstruusioon liittyy useita tekijöitä, joilla on suuri vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin. Aikaisemmin käsiteltyn ekstruuderin liittyvien seikkojen sekä myöhemmin tehtävän materiaalivalinnan lisäksi ohjauksyksiköstä voi lukea muutamia parametreja. Näiden vaikutus prosessin hallintaan on hyvä avata ja ymmärtää niiden merkitys lopputuotteen laadun kannalta.

2.6.1 Sulapaine

Sulan muovimassan homogeenisyydellä on suora vaikutus hyvään tuotelaatuun. Ehkä tärkein indikaattori sulaladusta on ruuvien päästä mitattava sulapaine. Niin sulalämpötila, ruuvien pyörimisnopeus, ruuvien geometria sekä käytössä oleva materiaali vaikuttaa sulapaineen muodostumiseen. Sulapaine auttaa myös antamaan käsityksen muovisulan

viskositeetistä sekä epäsuorasti materiaalimäärästä ekstruuderissa. Liian korkea sulapaine viittaa muovisulan liian suureen viskositeettiin eli materiaali ei ole riittävän virtaavaa. Tämä voi johtaa suuriin ongelmiin muovivirran irrotessa heikosti suuttimesta mikä johtaa prosessointiongelmiin ja tuotteen laadun heikkenemiseen. [14,15]

2.6.2 Sulalämpötila

Ekstruusiossa käytettävällä lämpötilalla on suora vaikutus prosessin onnistumiseen. Liian pieni käytetty lämpötila voi tuottaa ongelmia prosessin edetessä. Tällöin erityisesti alhaisen sulaindeksin materiaaleilla ei saavuteta riittävän alhaista viskositeettia. Liian suuri lämpötila ja pitkä altistus aika voivat aiheuttaa polymeerien termisen hajoamisen.

Sulalämpötilalla on suora vaikutus ekstruusion lopputuotteen laatuun. Ekstruusion aikana sulalämpötila on harvoin tasainen. Sen sijaan lämpötilapiikkejä syntyy prosessissa jatkuvasti johtuen pyörivän ruuvin aiheuttamista leikkausvoimista. Näiden lämpötilapiikkien takia tarkan lämpötilan määrittäminen on haasteellista. Yleensä lämpötila määritetään suuttimen sisäseinämässä sijaitsevilla termopareilla. Käytännössä termoparit kuitenkin mittaavat suuttimen seinämän lämpötilaa itse sulamateriaalin sijasta. [16]

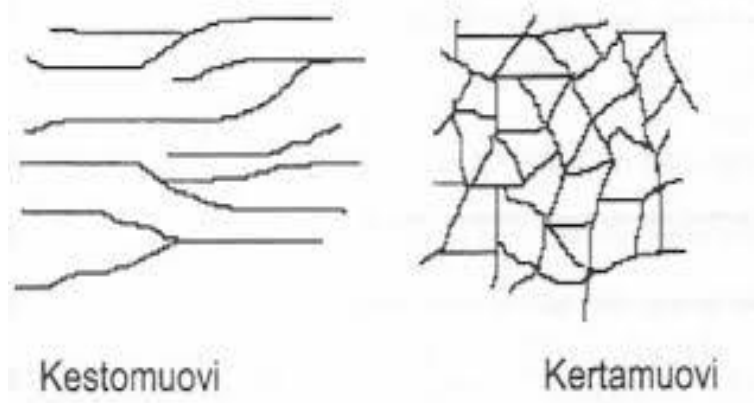
Sulalämpötilan tarkka monitorointi on tärkeää erityisesti prosessoitaessa, mutta yleisesti lämpötilapiikeillä on suora vaikutus materiaalin virtaavuuteen sekä materiaalin termiseen hajoamiseen.

3. EKSTRUUSIOSSA KÄYTETTÄVÄT MUOVIT

Kun puhutaan muoveista, tarkoitetaan polymeerejä ja niiden lisäaineita. Monomeerit, eli pienet ketjutettavissa olevat molekyylit kuten hiilivedyt, ketjutetaan kovalenttisin sidoksin polymerointireaktiolla. Tuloksena saadaan ketjuttuneita monomeereja eli polymeerejä. Lisäaineita lisätään mukaan seokseen useasta syystä, kuten funktionaalisten ominaisuuksien tai raaka-aineen hinnan alentamisen takia. Mahdollisia funktionaalisia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi parempi suoja palamista, kosteutta tai UV-säteilyä vastaan. Lisäaineilla pystytään myös muokkaamaan muovien sähkönjohtavuutta tai eristävyttä sekä muuttamaan mekaanisia ominaisuuksia. [17] Tässä kappaleessa keskitytään erityisesti ekstruusiossa ja kalvonvalmistuksessa käytettäviin muoveihin.

3.1 Muovien jaottelu

Muovit jaotellaan yleisesti joko niiden raaka-aineiden tai rakenteen mukaan. Valtaosa käytössä olevista muoveista on lähtöisin fossiilista polttoaineista, mutta myös biomuovien käyttö on yleistymässä. Biohajoavat muovit voivat olla myös peräisin fossiilista raaka-aineista. Muovit voidaan myös jakaa niiden biohajoavuuden sekä bioperäisyyden mukaan. Muovit voidaan myös luokitella niiden prosessoitavuuden mukaan kerto- ja kestonuoveiksi. Kestomuovien etu kertamuoveihin verrattuna on, että niitä voidaan lämpömuovata uudelleen. Tämä mahdollistaa muovin uudelleenprosessoinnin ja sitä kautta kierrätyksen. Tästä johtuen kestonuoveja kutsutaan tästä syystä sulatyöstettäviksi. [18] Alla on esitettyä kuvassa 6 kerta- ja kestonuovien rakenteellinen ero.

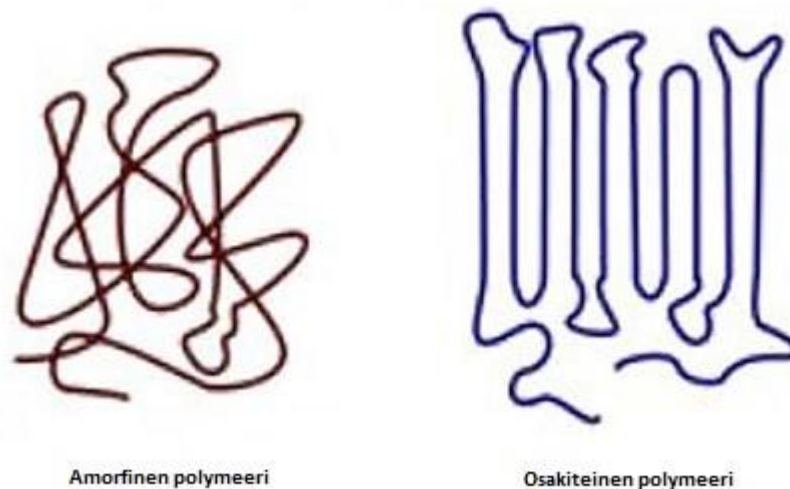


Kuva 6. Kerta- ja kestonuovien rakenteeltaan. [3, s.11]

Rakenteen mukaan jaottelu tehdään yleensä käyttömäärien mukaan valtamuoveihin, teknisiin muoveihin sekä erikoismuoveihin. Tässä kappaleessa keskitytään erityisesti muovikalvon valmistuksessa käytettäviin muovilaatuihin. Muovien raaka-ainehinnat kasvavat ominaisuuksien sekä käyttökohteiden vaatimusten mukaan. [18]

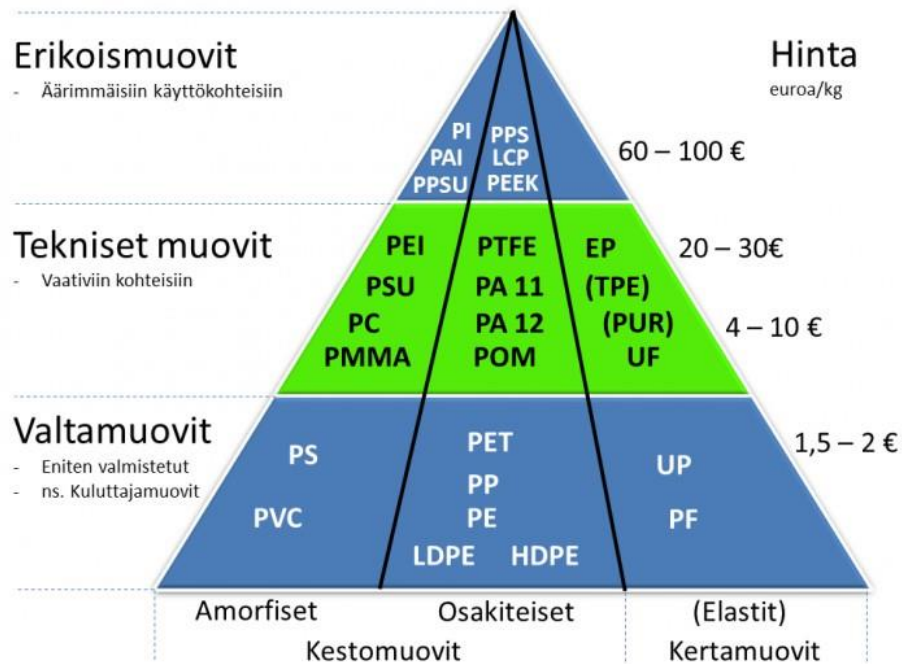
Muoveja voidaan myös jakaa niiden kiteisyyden perusteella. Amorfisiksi muoveiksi kutsutaan muoveja, jotka eivät kiteydy lainkaan vaan ovat jähmeän nesteen kaltaisia sekä satunnaisesti järjestäytyneitä. Tämä johtuu siitä, että amorfisilta polymeereiltä puuttuu selkeä sulamispiste. Sen sijaan ne muuttuvat hiljalleen juokseviksi niiden lasisiirtymälämpötilan (T_g) yläpuolella. Amorfisiin muoveihin kuuluvat esimerkiksi polykarbonaatti- ja -styreeni. [3, s 38-47]

Osittain kiteisten muovien rakenteessa taas on sekä amorfisia että kiteisiä osia kiteisyyden vaihdellessa 5–90 % välillä muovista riippuen. Polypropeeni ja -eteeni ovat esimerkkejä osittain kiteisistä muoveista. Osittain kiteisillä muoveilla prosessointilämpötila-alue vaihtelee yleensä kiteiden sulamispisteen alapuolelta lasisiirtymälämpötilan yläpuolelle. Amorfisten polymeerien prosessointilämpötila-alue sen sijaan on tyypillisesti hieman lasisiirtymälämpötilan alapuolella. Alla on esitettyä kuvassa 7 amorfisen ja puolikiteisen muovin eroavaisuus ketjun rakenteessa. [3, s.38-41]



Kuva 7. Amorfisen ja puolikiteisen muovin rakenne [19]

Valtamuovit ovat suosituin materiaalsegmentti, joka ei ole yllättävää ottaen huomioon erittäin edulliset raaka-ainekustannukset. Alla on kuvassa 8 on esitetty muovien jaottelea edellä mainituin perustein.



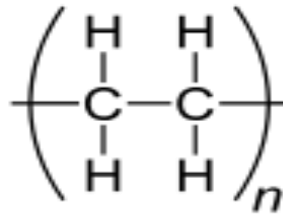
Kuva 8. Muovien jaottelu. [20]

3.2 Polyolefiinit

Polyolefiinit ovat olefiinien polymeerejä, joissa molekyylit ovat liittyneet toisiinsa muodostaen polymeeriketjuja. Polyeteeni ja polypropeeni kuuluvat polyolefiineihin. Olefiinit ovat alifaattisia tai suoraketjuisia hiilivetyjä. [21]

3.2.1 Polyeteeni

Polyeteeni on valtamuoveihin kuuluva osittainen kiteinen polymeeri. Rakenteeltaan polyeteeni on tavallisesti suoraketjuinen, mutta valmistustavasta riippuen siinä voi olla myös eripituisia haaroja. Kuvassa 9. on esitettyä polyeteenin perusrakenne. Polyeteenin suosio perustuu sen helppoihin prosessointiominaisuuksiin. Lisäksi se on rakenteeltaan yksinkertaisin kaikista kaupallisista polymeereistä. PE onkin yksi eniten käytetyistä muoveista maailmassa ja sitä valmistetaankin yli 60 miljoonaa tonnia vuodessa. [21]



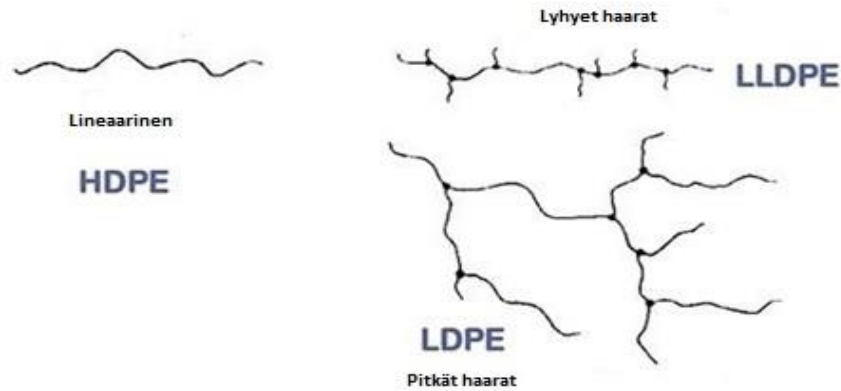
Kuva 9. Polyeteenin perusrakenne. [22]

Polyeteenin ominaisuudet riippuvat paljon molekyylin pituudesta, ketjun haaroittuneisuudesta sekä moolimassajakaumasta. Eri polyeteenityypeillä on kuitenkin yhteisiä ominaisuuksia kuten palamisherkyys, pinnan vahamaisuus ja vanheneminen UV-säteilyn vaikutuksesta. Lisäksi PE:illä on hyvä kemiallinen kestävyys voimakkaita happoja lukuunottamatta sekä erinomainen sähkön eristävyys. [3, s. 142-143]

Polyeteenit valmistetaan joko matala- tai korkeapaineprosesseilla. Matalatiheksinen polyeteeni (LDPE) on valmistettu korkean paineen alaisesti radikaalipolymerointina. Kaksi yleisintä korkeapaineprosessia ovat nimeltään autoklaavi- ja tubulaariprosessi. Vastaavasti matalapainereaktoreita ovat loop- ja leijupetireaktorit, jotka tunnetaan myös slurry- ja kaasufaasireaktoreina. Muun muassa lineaarinen matalatiheksinen polyeteeni (LLDPE) sekä korkeatiheksinen polyetyleni (HDPE) valmistetaan matalapaineprosesseilla. [3, s. 136-137.]

LLDPE-polyeteenit ovat eteenin ja alfa-olefiinin kopolymeerejä. Yleisimmin käytetyt komonomeerit ovat 1-buteeni, 1-hekseeni tai 1-okteeni. LLDPE:n sivuhaarat ovat LDPE:tä lyhyempiä ja niitä on vähemmän. Komonomeeri lisää lyhyitä ketjuhaarautumia polyeteenin rakenteeseen. Polyeteeniketjuun satunnaisesti liittynyt komonomeeri alentaa polyeteenin kiteisyyttä, minkä vuoksi kirkkaus kasvaa ja tiheys alenee. Katalyyttisesti valmistetulla LLDPE:llä on myös LDPE:ä kapeampi moolimassajakauma, minkä vuoksi iskulujuus LLDPE:llä on suurempi. Mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat, mutta muovin työstettävyysominaisuudet ovat heikommat. [3, s.138-139]

HDPE on rakenteeltaan lineaarinen. Sen molekyyleissä on vain vähän lyhyitä sivuhaaroja ja täten polyeteenimolekyylit ovat järjestäytyneet tiheämmäksi rakenteeksi. Korkean tiheyden vuoksi se on jäykempää kuin LLDPE ja LDPE. Kaasun läpäisevyys on myös HDPE:llä pienempi. [3, s.136-137]. Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty eri PE-muovien haarautuneisuus.



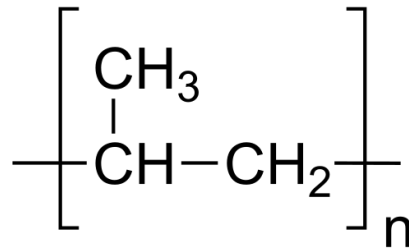
Kuva 10. PE-laatuojen ketjujen haarautuneisuus. [Muokattu lähteestä 23]

Eniten käytetty polyeteenityyppi on LDPE, jonka osuus PE:n markkinoista on jopa 70%. Suurin osa LDPE:stä käytetään kalvonvalmistukseen, mutta sillä on merkittävä osuus myös ekstruusiopäällystyksessä [24, s.20-21]. Lainsäädäntöjen kiristyessä muovin osuus pahvin ja kartongin päällysteenä tuleekin vain kasvamaan ja Suomi on tässä kehityksessä vahvasti mukana.

Johtuen polyeteenin suosioista se koostaa myös suurimman osan luontoon päätyvästä muovijätteestä. Polyeteeni on kuitenkin helposti kierrätettävissä oleva materiaali, jota voidaan hyödyntää niin energijätteenä kuin kierrättämällä uusiokäyttöön. PE:n polttamisessa energijätteenä ei synny ympäristölle haitallisia aineita. Lisäksi sillä on erinomainen energiasisältö, joka on samaa luokkaa öljyn kanssa. [25]

3.2.2 Polypropeeni

Polypropeeni (PP) on polyeteenin tavoin valtamuoveihin kuuluva osittainen kiteinen muovi. Kuvassa 11 on esitettyä polypropeenin yleiskaava. PP voi olla rakenteeltaan joko syndiotaktinen, ataktinen tai isotaktinen. Syndiotaktisessa rakenteessa metyyliiryhmät sijaitsevat vuorotellen hiiliketjun molemmiin puolin. Ataktisessa rakenteessa taas metyyliiryhmät sijaitsevat satunnaisesti hiiliketjun eri puolilla. Isotaktinen rakenne on kaupallisesti eniten käytetty ja siinä metyyliiryhmät sijaitsevat samalla puolella hiiliketjua. Valmiit kaupalliset laadut ovat yleensä edellä mainittujen polypropeenityyppien sekoituksia, useimmiten sekoitus sisältää vähintään 90% isotaktista polypropeenirakennetta ja loput ataktista rakennetta [3, s.145-146,24]



Kuva 11. Polypropeenin yleiskaava. [27]

Isotaktinen polypropeeni on ominaisuuksiltaan kemiallisesti kestävä ja kiteinen polymeeri, mikä tekee siitä houkuttelevan kaupallisessa mielessä. Ataktisuus taas tekee polypropeenista amorfisen, jolloin sillä on heikompi sään ja kemikaalien sietokyky. [3, s.145-146]

Fysikaalisilta ominaisuuksiltaan polypropeenin voi sanoa sijoittuvan HDPE:n ja LDPE:n välimaastoon. PP ei ole yhtä sitkeä kuin HDPE, muttei myöskään yllä joustavuudessaan LDPE:n tasolle. Polypropeeni on erittäin jäykkä muovi, joka tekee siitä kestävän mutta hauraan verrattuna esimerkiksi HDPE:hen. Polypropeenin tiiviysominaisuudet ja mekaaninen kestävyys sekä lämmön- ja rasvankesto tekevät siitä myös varteenotettavan vaihtoehdon kalvonvalmistukseen. Se on usein haasteellisempi prosessoitava verrattuna esimerkiksi polyeteeneihin. [3, s.146-147]

Molekyylien koko sekä kiteisyysaste vaikuttavat voimakkaasti polypropeenin mekaanisiin ominaisuuksiin. Kasvattamalla polypropeenin kiteisyysastetta voidaan lisätä materiaalin kovuutta ja jäykkyyttä. Polypropeenin sitkeyttä ja venyvyyttä taas voidaan nostaa moolimassaa kasvattamalla. Moolimassan kasvaessa polypropeenin tiheys kuitenkin laskee, koska kiteytyminen heikkenee. Tällöin myös tiheydestä riippuvat lujuusominaisuudet heikkenevät. [3, s.146]

Polypropeenin lämmönkesto on polyeteenejä parempi ja sen sulamis- ja hajoamislämpötilat ovat myös korkeammat. Näin ollen polypropeenilla on polyeteenejä laajempi prosessointilämpötila-alue. Polypropeenilla on hyvä kemiallinen kestävyys, mutta huomattavasti polyeteeniä huonompi kylmyyden sietokyky [3, s. 146-147, 24, s.26-27]. Alla on esitetty kuvassa 12 polypropeenin jakautuminen eri käyttökohteiden mukaan.



Kuva 12. PP:n jakautuminen käyttökohteiden mukaan. [muokattu lähteestä 28]

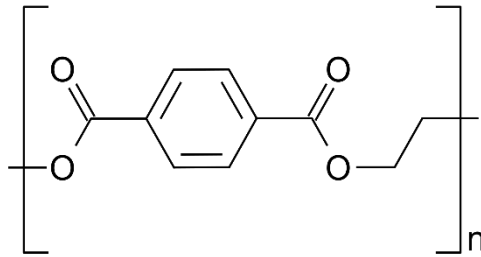
Polypropeenin suurimmat pakkaussovelluskohteet ovat biaksiaalisesti orientoidut kalvot sekä elintarviketeollisuuden jogurttipurkit sekä muut syvävedetyt rasiat ja puhalletut kanisterit ja pullot. Orientoimattomia kalvoja voidaan käyttää sterilointipakkauksiin ja suursäkkejä valmistetaan kudotusta PP-kalvonauhasta. [29, s.81-82]

3.3 Muita kalvonvalmistuksessa käytettäviä muoveja

Suurin osa kalvonvalmistuksessa keskittyy polyolefiinien prosessointiin, joten ne ovat perusteltua pitää pääosassa materiaaleista. Myös muita muoveja käytetään kalvonvalmistukseen, joten seuraavaksi esitettynä joitain yleisimpiä muita muovityyppejä yleisesti.

3.3.1 Polyetyleenitereftalaatti

Polyetyleenitereftalaatti eli PET on hieman vaikea kategorisoida, sillä muiden muovien tavoin sillä on monia ominaisuuksiltaan vaihtelevia muotoja. PET-A on amorfinen lasinkirkas valtamuovi. Se on hyvin iskunkestävä ja kaasutiivis. Sillä on hyvä pinnan laatu sekä kemiallinen kestävyys. PET-C on kiteinen perusväriltään valkoinen tekninen muovi. PET-A:ta käytetään muun muassa puhallusmuovattujen pullojen ja suojakaasupakkauksien valmistukseen. PET-C on yleisesti ruiskuvalettava muovityyppi [24, s. 42]. Alla on esitettynä kuvassa 13 PET:n rakennekaava.

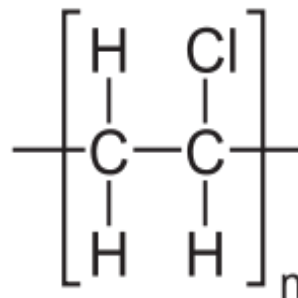


Kuva 13. PET:n rakennekaava. [30]

PET on yksi nopeiten kasvavista muovityypeistä Euroopassa ja sitä käytetään paljon esimerkiksi tekstiilikuituihin. Amorfista PET-A:ta käytetään paljon pakkauskalvoihin ja muotokappaleiden valmistukseen. Puhallusmuovauksessa PET kiteytyy osittain ja orientoituu säilyttäen lasinkirkkaan läpäisevyyden. Sitä käytetäänkin paljon pullojen puhallusmuovauksessa ja Suomessakin PET on korvannut paljon lasista ja PVC:stä valmistettuja pulloja. PET:n etuna on myös sen erinomainen kierrätettävyys. [24, s. 42-43]

3.3.2 Polyvinyylikloridi

Polyvinyylikloridi (PVC) on amorfinen valtamuovi, jonka valmistuksessa käytetään pääasiallisesti kolmea polymerointimenetelmää: massa-, emulsio- ja suspensiopolymeerointia. PVC eroaa siinä mielessä muista kestumuveista, että siihen lisätään aina lämpöstabilisaattori ennen prosessointia muiden lisäaineiden lisäksi [24, s.30]. Alla on esitetty kuvassa 14 PVC:n kemiallinen kaava.



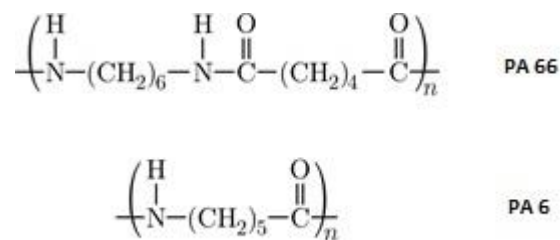
Kuva 14. PVC:n rakennekaava. [29]

PVC:llä on monipuoliset ominaisuudet, jonka ansiosta se soveltuu moniin käyttökohteisiin. Sitä käytetään paljon rakennusteollisuudessa esimerkiksi kaapeleina, päällysteinä ja putkina sen kestävyys ja sitkeyden takia. PVC:tä käytetään paljon myös kodin käyttöesineissä kuten kengissä, laukuissa sekä sadeasuissa. Pakkaustekniikassa PVC:tä on käytetty erityisesti ruokatarvikkeiden säilöntätuotteisiin sekä lääketieteellisuudessa veripussien, sairaalaletkujen, suojakäsineiden sekä muiden hygieniatuotteiden valmistukseen. [24, s.32]

PVC on yksi eniten käytetyistä muovityypeistä, vaikkakin sen käyttö on vähentynyt huonon maineen takia. Tämä johtuu siitä, että PVC:n monomeeri on karsinogeeni ja lisäksi siitä voi liueta terveydelle haitallisia pehmittimiä. Oikeaoppisella käytöllä ja jätehuollolla kyseessä on kuitenkin erittäin käyttökelpoinen materiaali. [32]

3.3.3 Polyamidit

Polyamidit (PA) ovat eniten käytetty tekninen muovilaji, joka tunnetaan myös paremmin kaupanimeltään Nylonina. Todellisuudessa polyamidit ovat suuri ryhmä erilaisia muoveja, jotka erotetaan toisistaan merkitsemällä nimen loppuun toistuvan jakson hiiliatomien lukumäärä. Ylivoimaisesti eniten käytetyt polyamidityypit ovat PA 6 ja PA 66 [24, s.48]. Alla on esitetty kuvassa 15 molempien polyamidityyppien kemialliset kaavat.



Kuva 15. Yleisimpien polyamidityyppien rakennekaavat. [Muokattu lähteestä 33]

Yleisimmät PA:lle tyypillisiä ominaisuuksia ovat suuri jäykkyys, kovuus sekä lujuus. Lisäksi polyamidit ovat verrattain helppoja prosessoitavia sekä kemikaalin- ja iskunkestäviä. Polyamidien tärkeimmät käyttökohteet ovat auto- ja elektroniikkateollisuudessa mutta niitä käytetään laajasti myös kalvonvalmistukseen. Pakkausteollisuudessa käytetään polyamidia (PA 6) erityisesti yhdessä LDPE:n kanssa monikerroskalvoissa kuten juusto- ja lihapakkauksissa. Yhdistämällä materiaaliominaisuudet saavutetaan hyvät barrier-ominaisuudet, erityisesti vesihöyry- sekä kaasutiiviys. [24, s.48]

3.4 Muovien lisäaineet

Suurin osa polymeereistä sisältää myös lisäaineita. Lisäaineiden osuus muovissa vaihtelee suuresti käyttökohteiden mukaan muutamasta prosentista jopa kymmeneen prosenttiin. Lisäaineiden käytöllä voi olla monta syytä. Muovien materiaaliominaisuuksia voidaan muokata lisäaineiden käytöllä. Hyötynä tällä voi olla helpottunut prosessointavuus, pidentynyt käyttöikä tai parantuneet kemialliset tai fysikaaliset ominaisuudet. Lisäaineiden käytöllä voi olla myös taloudellinen hyöty, sillä oikeaoppisella lisäyksellä raaka-ainehintaa voidaan alentaa ilman merkittäviä negatiivisia vaikutuksia. [34, s. 1-3]

Funktionaalisilla lisäaineilla on nimensä mukaisesti vaikutus materiaalin ominaisuuksiin. Lisäaineet voivat olla muun muassa antioksidantteja, väriaineita, prosessin tai käytön stabilisaattoreita tai palonestoaineita. Funktionaalisilla lisäaineilla voidaan myös

vaikuttaa käyttökohteen mukaan muovin sähkönjohtavuuteen tai –eristävyyteen. Täyteaineilla pyritään alentamaan muovin hintaa, jolloin käytetään raaka-ainetta halvempia materiaaleja jotka ovat usein jäännöksiä esimerkiksi tuotantoprosesseista. Yleensä täyteaineet ovat polymeerejä painavampia, eli ne nostavat lopputuotteen tiheyttä. Täyteaineet sopivat huonosti optisia ominaisuuksia vaativiin sovelluksiin, sillä täyteainepartikkeleista siroava valo heikentää muovin läpinäkyvyyttä. [34, s. 5-11)

3.5 Muovien prosessointiin vaikuttavia tekijöitä

Muovien prosessointiin voi vaikuttaa monta asiaa, jotka pääasiassa liittyvät fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Tässä osiossa tarkastellaan muutamaa tekijää, jotka täytyy ottaa prosessoinnissa huomioon.

3.5.1 Sulamis- ja lasisiirtymälämpötila

Sulamis- ja lasisiirtymälämpötilojen (merkitään T_m ja T_g) tietäminen on tärkeää muovien oikeaoppisen prosessoitavuuden kannalta. Lasisiirtymälämpötilan alapuolella amorfiset polymeerit ja kiteisten polymeerien amorfiset osat ovat jähmeitä tehden materiaalista lasimaisen ja kova. Lasisiirtymälämpötilan yläpuolella muovin amorfisen osan polymeeriketjut pääsevät vapaasti liikkumaan tehden materiaalista joustavan. Sulamislämpötila esiintyy vain kiteisillä muovityypeillä. Siinä lämpötilassa muovien kiderakenne sulaa ilman molekyylien katkeilua. Alla on esitetty taulukossa 1 kalvonvalmistuksessa käytettyjen muovien sulamis- ja lasisiirtymälämpötilat. [3, s. 42-43, 50-51]

Materiaali	Sulamislämpötila (°C)	Lasisiirtymälämpötila (°C)
LDPE	105-115	-110
HDPE	125-135	-90
PP	158-170	-14
PA (66)	265	57
PVC	212	87
PET	255-258	69

Taulukko 1. Muovien sulamis- ja lasisiirtymälämpötiloja [3, s. 43,50]

3.5.2 Reologia

Reologia on tiede, joka tutkii materiaalin muodonmuutoksia ja virtauksia. Polymeereistä tutkitaan yleensä niiden sulavirtausominaisuuksia. Perusidea reologisessa mittauksessa on aiheuttaa materiaalille muodonmuutos ja mitata sitä vastustava voima tai kohdistaa mitattavalle materiaalille vakiokuormitus ja mitata sen aiheuttama muodonmuutos (puristuma, venymä tai kulmapoikkeama). Mittausdatasta saadaan laskentamalleilla reologisia suureita, jotka korreloivat muun muassa molekyyllipainon, molekyyllipainojakauman ja molekyyliketjujen haarautuneisuuden kanssa. [35, s.1-4]

Polyolefiineille virtausominaisuuksia ilmaisevista suureista tavallisin on sulaindeksi (MFR). Sulaindeksi antaa tietoa samantyyppisten polyolefiinien fysikaalisista ominaisuuksista, molekyyliarakenteesta ja työstettävyydestä. Menetelmä perustuu sulan polymeerin juoksevuuden mittaukseen tarkkaan spesifioidun suuttimen kapillaarin lävitse tietyssä paineessa. Mitä pienempi sulaindeksi on, sitä jäykempää polymeerisula on ja sitä suurempia polymeerimolekyylit ovat. Molekyylien koon lisäksi sulaindeksi suuruus riippuu molekyylien haarautuneisuudesta ja molekyylipainojakaumasta. [3, s. 75]

4. KALVONVALMISTUS

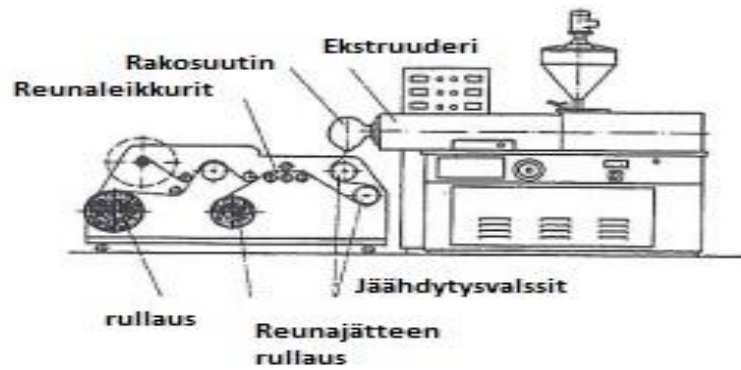
Kalvonvalmistus on jatkuvatoiminen prosessi, jossa ekstruuderista saatava muovisula muovataan kelauslaitteiston avulla tasaiseksi profiiliksi. Yleisesti riippuen halutun tuotteen paksuudesta, profiilia kutsutaan levyksi, kalvoksi tai filmiksi alenevassa materiaali-paksuusjärjestyksessä. Kalvonvalmistuksen oikeaoppinen monitorointi on tärkeätä, sillä sopimattomien prosessiparametrien lisäksi myös prosessin jatkuvuus on olennaista. Tämä on tärkeää varsinkin, kun tavoitteena on korkean nopeuden kalvonvalmistuslinja. [36]

4.1 Kalvonvalmistusmenetelmät

Ekstruusion jälkeen saatua puolivalmistetta voidaan jatkosoveltaa useaan käyttökohteeseen. Riippuen materiaalista ja käyttökohteesta erilaiset kalvonvalmistustekniikat tuovat vaihtelevat ominaisuudet ja profiilit tuotteelle. Seuraavissa kappaleissa on esitetty erilaisia yleisiä kalvonvalmistusmenetelmiä.

4.1.1 Tasokalvon valmistus

Tasokalvolaitteisto koostuu ekstruuderista, tasosuuttimesta, leikkureista ja useista erilaisista teloista. Suuttimen rakenne on kriittinen onnistuneelle kalvon valmistukselle. Eräs tehokas keino muovimassan levitykseen on suutin, jossa on niin sanottu vaateripustin-kanava. Ekstruuderin suuttimelta tuleva muovi johdetaan kapean suutinraon kautta jäähdysteloille, joiden jäähdytys suoritetaan yleensä kylmävesikierrolla. Jäähdytyksen jälkeen kalvo kulkee useiden telojen ja reunaleikkurien kautta kelaukseen [37, s. 57-58]. Alla esitettynä kuvassa 16 kaaviokuva tasokalvolinjastosta.



Kuva 16. Tasokalvolinjasto. [3, s.252]

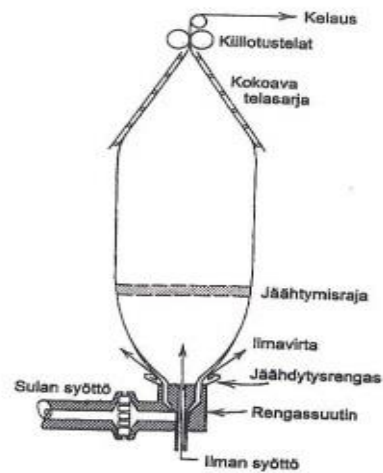
Tärkeä tekijä onnistuneessa tasokalvon valmistuksessa on kalvon nopea jäädytys, joka tulee esille muun muassa suuttimen lyhyestä etäisyydestä jäädytystelaan. Nopealla jäädytyksellä pyritään minimoimaan kalvonkouroumaa eli neck-in ilmiötä. Kalvokourouma tekee kalvon reuna-alueista paksummat. Tämän takia reunat leikataan usein ennen kelauslaitteistoa pois. Leikattu reuna voidaan kuitenkin useimmiten hyödyntää uudelleen raaka-aineena. [38, s. 106-107]

Kalvon paksuuteen voidaan vaikuttaa säätämällä ekstruuderin ruuvinpyörimisnopeutta, suutinraon korkeutta sekä vetokoneen suhteellista nopeutta. Tasokalvoa pystytään myös orientoimaan, mikä tarkoittaa kalvon venyttämistä sulamislämpötilan alapuolella joko pituus- tai leveys-suuntaan tai jopa molempiin suuntiin. Orientoinnissa polymeerien molekyyliketjut suuntautuvat venytyksen mukaan, mikä lisää kalvon lujuutta kyseiseen suuntaan. Tasokalvon valmistuksessa orientointi tehdään yleensä vain yhteen suuntaan, sillä mekaaniset ominaisuudet huononevat toisessa suunnassa samalla kun toinen paranee. [38, s. 52-53]. Tasokalvomenetelmää käytetään yleisesti PP-, PA- ja PVC-kalvojen valmistukseen. Menetelmää voidaan myös hyödyntää erilaisten yhdistelmäkalvojen valmistukseen, jolloin polyeteeni on yleensä yksi raaka-aineista.

4.1.2 Puhalluskalvon valmistus

Puhalluskalvon valmistus on yleisin muovikalvon valmistusmenetelmä, jopa 85 % kaikesta kalvotuotannossa valmistetaan tällä tavoin [37, s. 50]. Puhalluskalvon valmistuksessa sulanut muovimassa johdetaan ekstruuderista adapterin avulla rengassuuttimelle. Muovisulan annetaan pursuta suutinraosta, kunnes sitä tulee tasaisesti, tämän jälkeen muoviletkun pää suljetaan ja suuttimen keskeltä puhalletaan paineilmaa muoviletkun sisälle. Tämän jälkeen letkua aletaan hiljalleen kiskoa ylöspäin vetoliinalla, joka on pujotettu nipin läpi. Kun letkun pää on saatu vedettyä nipistä läpi, nippi suljetaan ja puhallusta jatketaan, kunnes saadaan halutun kokoinen kappale. Yleensä kalvo puhalletaan alhaalta ylöspäin, mutta prosessi voidaan tehdä myös ylösalaisin tai harvinaisissa tapauksissa jopa vaakatasossa. Puhalluskalvon valmistuksessa kalvokuplan jäähtyminen

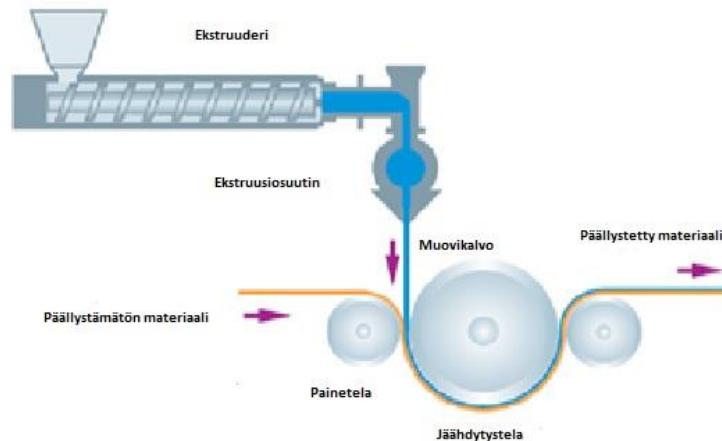
on tärkeää kappaleen laadun sekä prosessin tuotantotehokkuuden kannalta. [17, s. 102-103]. Alla on esitetty kuvassa 17 kaaviokuva puhallusmuovauslaitteistosta.



Kuva 17. Puhallusmuovauslaitteisto. [3, s.253]

4.1.3 Ekstruusiopäällystys

Ekstruusiopäällystyksellä tarkoitetaan jonkin tuotteen päällystystä ekstruusiotekniikkaa hyödyntäen. Päällystettävä tuote on usein paperista tai kartongista valmistettu tuote. Ekstruusiopäällystäminen mahdollistaa näiden tuotteiden hyödyntämisen esimerkiksi nestepakkauksissa ja kosteissa olosuhteissa ilman mekaanisten ominaisuuksien huononemista. Ekstruusiopäällystyksen tärkein prosessitekijä on adheesio päällystettävän materiaalin ja päällystyksen välillä [17, s.110-111]. Alla esitetty kuvassa 18 ekstruusiopäällystysprosessi.



Kuva 18. Ekstruusiopäällystysprosessi. [Muokattu lähteestä 39]

4.2 Kalvonvalmistuksen keskeiset parametrit

Kalvonvalmistuksen prosessiparametrit ovat hyvin läheisesti yhteydessä ekstruusion edeltämainittuihin prosessiparametreihin. Ekstruusion lämpötila sekä ruuvin pyörimisnopeus luovat materiaalivirran, josta kalvo muodostuu. Kalvonvalmistuksen tärkein prosessiparametri on kalvon paksuus. Tätä säädellään ekstruusiolinjan jälkeen sijoitettavalla vetolaitteistolla, joka antaa kalvolle muodon ekstruusion jälkeen. Kelauslaitteiston nopeutta säätämällä saadaan muutettua kalvon paksuutta sekä leveyttä. Suurempi kelauslaitteiston nopeus tasaisella ruuvin pyörimisnopeudella vähentää kalvon leveyttä ja paksuutta. [40]

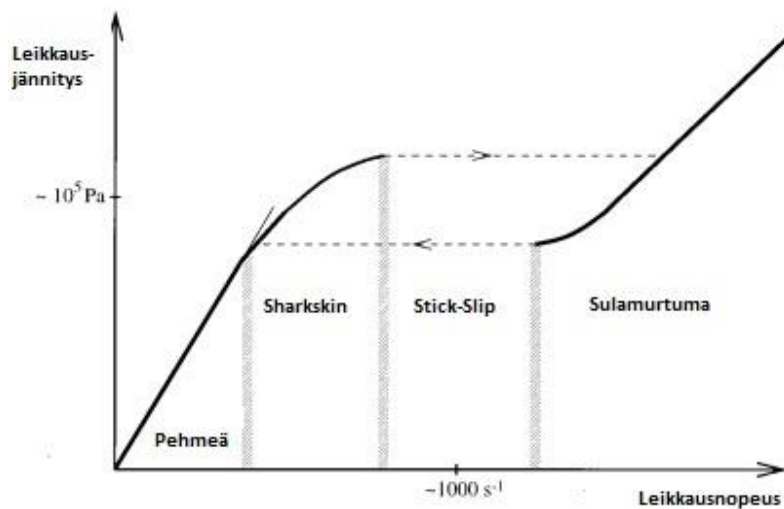
Toinen tärkeä, mutta heikommin silmin havaittava tutkittavissa oleva parametri on kalvon pinnankarheus. Suuremmat mittavirheet johtuvat usein sopimattomista laiteparametreista tai epäsoveltuvasta materiaalista kalvonvalmistukseen. Pienemmät erot ovat kuitenkin mahdollista saada halutuiksi optimoimalla prosessiparametreja. Haluttu pinnankarheus vaihtelee eri applikaatioiden mukaan. Yleinen väärinkäsitys on, että tasainen materiaali on aina toivottu lopputulos. Toisaalta esimerkiksi lääketieteellisuuden tuotteissa kuten kanyyleissa tavoitteena on saada tarkka pinnankarheus. Näin saavutetaan mahdollisimman helppo tuotteen käyttö sekä potilaan kannalta mahdollisimman miellyttävä ja turvallinen operaatio. [40]

Pinnankarheutta voidaan määrittää usealla laboratoriolaitteistolla, joilla yleensä seurataan optisesti pinnan käyttäytymistä. Ongelmana näiden seurannassa on usein, että se vaatii leikkeiden ottoa tuotantolinjastosta ja täten reaaliaikaista seuranta ei tapahdu. Jokainen tuotantoyksikkö on oma yksilönsä, eikä kalvonvalmistukseen ole varsinaisesti suoria prosessointiparametreja. Operaattorin on käytettävä hyödyksi materiaaliprosessointiohjeita sekä otettava huomioon oman laitteistonsa kapasiteetti sekä rajoitukset huomioon kalvonvalmistuksessa.

4.3 Kalvonvalmistuksen haasteet

Prosessointiparametreista johtuvat prosessivirheet kalvossa ovat usein aaltomaisuus kalvon pinnassa johtuen väärästä lämpötilasta. Liian suuri lämpötila heikentää jäähdytyksen aiheuttamaan muodonmuutosta, jolloin pinnan tasaisuus ei ehdi muodostumaan ja syntyy poikkeamia profiilin pintaan. Epäpuhtaudet ovat suuri riskitekijä kalvonvalmistuksessa, joka täytyy ottaa huomioon huolellisella puhdistuksella sekä riittävän suurella prosessointilämpötilalla [40]. Kuitenkin myös liian suuri lämpötila voi aiheuttaa materiaalin hajoamisen, jolloin on riski palaneen materiaalin synnyttävien epäpuhtauksia satunnaisessa kohtaa prosessia. [41]

Ekstruusion epätasaisuuksia ja tuotteen laadussa tapahtuvia muodonmuutoksia on tutkittu vuosikausia vaihtelevalla menestyksellä. On kuitenkin selvää, että niillä on suuri vaikutus muovituotteiden prosessoinnissa. Yleisimmät pintavirheilmiot ovat nimeltään sharkskin, stick-slip sekä sulamurtuma (gross melt fracture). Näiden ilmiöiden tiedetään riippuvan leikkausnopeudesta sekä -jäännityksestä [42]. Kuvassa 19. esitetään näiden ilmiöiden esiintyminen leikkauskäyrällä.



Kuva 19. Sulamurtuman eteneminen ekstruusioprosessissa. [Muokattu lähteestä 43]

On huomioitava, että kyseessä olevat ilmiöt ovat herkkiä ja eri materiaalit käyttäytyvät eri tavoin. Mahdollista on myös, että materiaalilla ei esiinny pintavirheitä ollenkaan prosessoinnissa. Materiaalin molekyyliarakenteella sekä prosessointiparametreilla on suuri merkitys sulavirtaukseen. [42]

Sulamurtumaa alkaa esiintyä jo alhaisilla leikkausnopeuksilla, jolloin kappaleen pinnassa alkaa esiintyä pientä epätasaisuutta. Tässä niin sanotussa pehmeässä vaiheessa epätasaisuudet ovat jo säännöllisiä, mutta vaikeasti havaittavissa. Seuraavassa vaiheessa pintaan alkaa muodostua sahalaitakuviota, jota kutsutaan sharkskiniksi. Sharkskinin aikana

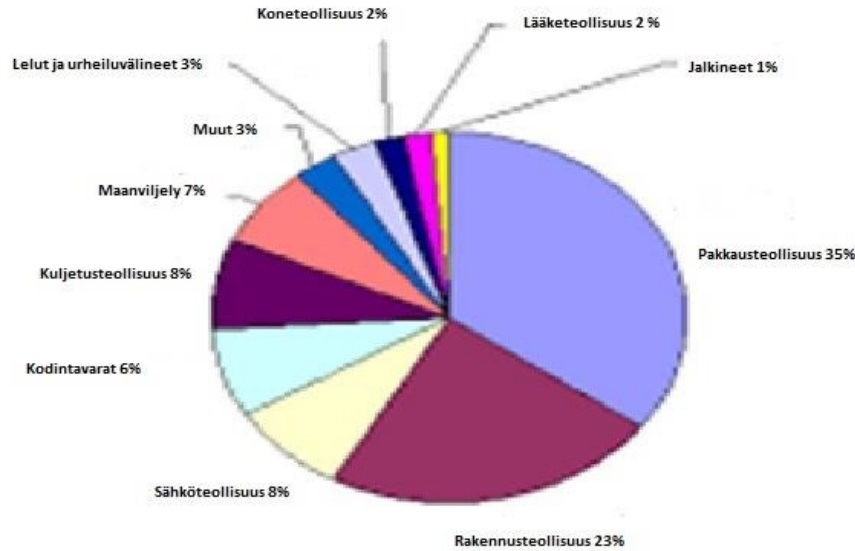
paine laskee äkillisesti tarkastellessa painetta leikkausnopeuden funktiona. [42] Sharkskina esiintyy yleensä varsinkin kapean moolimassajakauman muoveilla. [44]

Seuraavassa Stick-Slip vaiheessa muovin pinta alkaa muuttua entistä epätasaisemmaksi ja leikkausnopeuden kasvaessa paine alkaa oskilloimaan pitkällä aikavälillä. Viimeisenä vaiheena on selvä sulamurtuma, jolloin muovin pinnan epätasaisuudet alkavat olla jo erittäin suuria ja epäsäännöllisiä. [11]

Sulamurtumaa voidaan pyrkiä ehkäisemään monin tavoin. Yksi keino on kasvattaa ekstruuderin suuttimen L/D-suhdetta, eli pidentää ekstruuderin suutinta sen halkaisijaan verrattuna. Tuotantonopeuksien laskemisella voidaan myös vähentää sulamurtuman esiintymistä, mutta tämä ei luonnollisesti ole teollisuudessa toivottu ratkaisu. Käytetyllä prosessointilämpötilalla on suuri merkitys, sillä viskositeetin pienentyessä leikkausjännitykset laskevat. Tällöin prosessoitavuus helpottuu suuremmillakin ruuvinpyörimisnopeuksilla. Yksinkertainen tapa välttää sulamurtumaa on myös käyttää leveämmän moolimassajakauman polymeerejä, joilla sulamurtumaa ei niin herkästi esiinny. Myös lisäaineilla voidaan parantaa muovien prosessoitavuutta ja siten vähentää sulamurtuman esiintymistä. [45]

4.4 Kalvonvalmistuksen tuotantoluvut

Muovin valmistusta on käsitelty jo jonkin verran aikaisemmissa kappaleissa, mutta jotta voisi saada käsityksen kalvonvalmistuksen markkinoista seuraavassa esitellään lyhyesti muovikalvojen käytön jakautumista eri sovelluksiin. Muovikalvoa käytetään laajasti eri markkinasegmenteissä, erityisesti pakkausteollisuudessa joka onkin maailman suurin muovimateriaalien käyttöteollisuus. Alla esitetty kuvassa 20 muoviteollisuuden jakautuminen eri segmentteihin vuonna 2014.



Kuva 20. Muoviteollisuuden jakautuminen maailmassa 2014. [Muokattu lähteestä 46]

Kuvasta nähdään pakkausteollisuuden olevan siis ylivoimaisesti suurin muovien hyödyntäjä, mutta myös muilla teollisuudenaloilla on paljon tarvetta erilaisille kalvoille, pusseille ja levyille. Kyseessä on myös erittäin globaali ala. Yhdysvallat oli vuonna 2014 suurin muovien valmistaja maailmassa 42 % osuudella, seuraavana olivat Eurooppa 25 %:lla ja Kiina 17 %:lla [47]. On kuitenkin perusteltua olettaa, että tulevaisuudessa muovinvalmistus siirtyy entistä enemmän Aasiaan ja Etelä-Amerikkaan kustannus- ja ympäristöpaineiden takia.

Muovikalvon valmistus tulee muuttumaan tulevaisuudessa varmasti hyvin paljon. Tarkoituksena on jo nykyisellään vähentää muovien käyttöä tai korvata niitä biohajoavilla vaihtoehdoilla. Kalvonvalmistuksessa pyritään jatkossa varmasti käyttämään entistä tehokkaammin eri materiaaleja yhdessä, jotta voidaan päästä mahdollisimman ohuisiin lopputuloksiin ominaisuuksista tinkimättä ja sitä kautta vähentämään ympäristöjätteen määrää.

Kalvonvalmistus ei kuitenkaan arvioiden mukaan ole vähenemässä vaan ennusteiden mukaan kasvamassa jopa neljänneksen vuoteen 2020 mennessä. Muovikalvot ovat ottaneet lisää markkinaosuutta lasi- ja metallipakkauksilta. Lisäksi biohajoavien kalvojen määrä on nousussa. [48]

5. MUOVIKALVON OPTINEN MITTAAMINEN

Optinen mittaaminen tarkoittaa käytännössä tuotteen tarkempaa analyysiä optisin menetelmin. Optiikka tarkoittaa valon tai muiden säteiden heijastumista ja sen analysointia. Optiseen mittaajärjestelmään kuuluu aina vähintään linssi sekä valoa tuottava projektori. Lisäksi tarvitaan vastaanottava anturi, joka muuntaa saadun datan käytettäväksi tiedoksi. Optinen analyysi on laajasti käytössä mittaustekniikassa. Yleinen käyttökohde on optiset mikroskoopit, joilla saadaan hyvä mittatarkkuus kustannustehokkaasti verrattuna muihin menetelmiin.

5.1 Optinen mitta-anturi

Optisella mittauksella ymmärretään kappaleen analysointia optiikan avulla. Optinen analyysi on kustannustehokas ja tarkka vaihtoehto useisiin applikaatioihin teollisuudessa. Tekniikoita on useita, mutta tässä kappaleessa keskitytään työssä käytettyyn Focalspecin LCI-1200 optiseen on-line mittaustilanteeseen.

Yleisesti riippuen halutun tuotteen paksuudesta, profiilia kutsutaan levyksi, kalvoksi tai filmiksi alenevassa materiaali-paksuusjärjestyksessä. Kalvonvalmistuksen oikeaoppinen monitorointi on tärkeitä, sillä epäsovivien prosessiparametrien lisäksi myös prosessin jatkuvuus on olennaista.

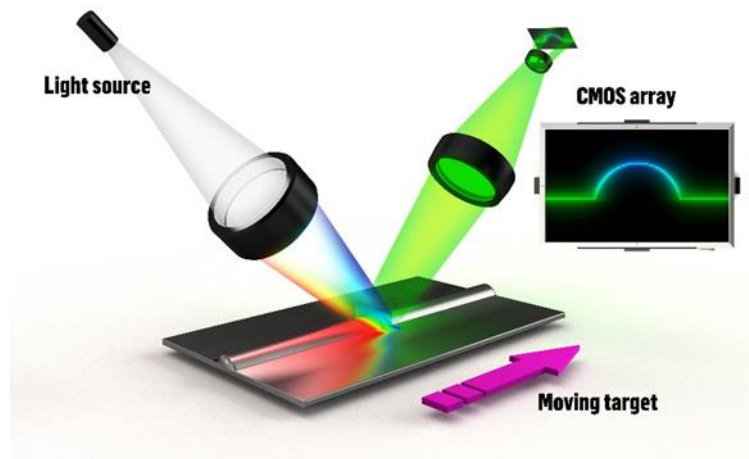
5.1.1 Optisen mittauksen teoria

Työssä käytettävä mittalaite hyödyntää tekniikkaa nimeltään Line Confocal Imaging (LCI). LCI on optinen mittaumenetelmä, jossa mitataan etäisyyttä valoa heijastavaan pintaan valon spektrin mittaamisen avulla. Pintaan kohdistetaan valoa optisella järjestelyllä, joka fokusoi jokaisen aallonpituuden eri korkeudelle pintaan nähden. Pinnasta heijastanutta valoa mitataan optiikalla, joka vastaanottaa kultakin korkeudelta vain yhtä valon aallonpituutta. [49]

Mittaamalla vastaanottimelle tulevan valon aallonpituus voidaan määrittää etäisyys pintaan hyvin tarkasti, kymmenien nanometrien resoluutiolla. LCI-tekniikassa etäisyysmittaus tehdään viivamaiselta alueelta siten, että viiva koostuu 2048 erillisestä toisiaan lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauspisteiden väli on luokkaa 5,5 mikrometriä. Etäisyysmittaus voidaan tehdä noin 1.4 mm korkeusalueelta. Yksi 2048 pisteinen mittaustuottoa siten tarkkan pinnan profiilin, jonka pituus on 11.2 mm. Yksi profiili voidaan mitata noin 10 mikrosekunnin ajassa. [49]

LCI-tekniikka tarjoaa siten mahdollisuuden mitata tarkasti pinnan topografiaa myös liikkuvasta pinnasta. Topografiaprofiilista voidaan laskea esimerkiksi materiaalin pinnankarheus [49].

Laite tuo useita etuja ekstruusioprosessin valvontaan, sillä kalvonvalmistuksen haasteena on pinnankarheuden tarkka määrittäminen. Alla on esitetty kuvassa 21 kaaviokuva laitteen mittaustekniikasta.



Kuva 21. Kaaviokuva käytetyn laitteen mittaustekniikasta [49]

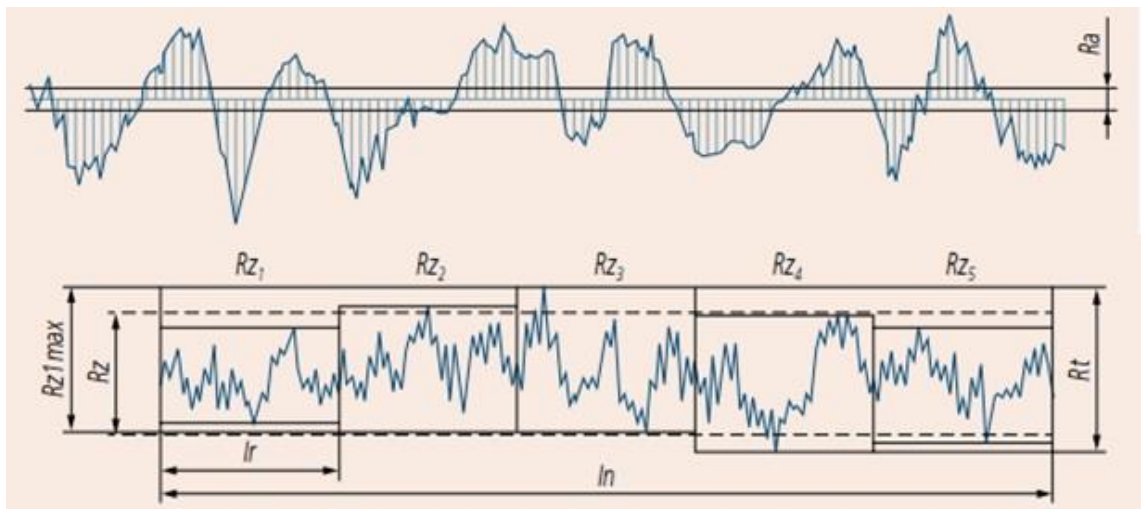
5.1.2 Anturin toiminta

LCI-teknologia mahdollistaa jopa 2500 erillisen pintaprofiilin mittauksen sekunnissa. Pintaprofiilista voidaan määrittää muun muassa pinnankarheuden Ra-arvo noin $0,1 \mu\text{m}$ toistettavuudella. Laitteen ohjausyksikön monitori tarjoaa reaaliaikaista dataa kalvon käyttäytymisestä. Lisäksi mittapistevälit voidaan tallentaa Exceliin myöhemmää tarkastelua varten [49]. Alla kuva ohjausyksikön tarjoamasta materiaalin pinnankarheudesta.



Kuva 22. . Mittauslaitteiston pinnankarheusmittaus.

Mittauksesta tärkein saatava data on pinnankarheuden Ra- sekä Rz-arvot. Tulokset esitetään tässä työssä ja yleisestikin mikrometreinä (μm). Molemmat arvot ovat standardoituja keskimääräisiä pinnankarheusarvoja, mutta niiden erilaisen laskentatavan takia ne antavat molemmat eri tavalla hyödyllistä dataa. Kuvassa 23. on esitetty Ra- ja Rz-arvojen määrittäminen kuvaajasta.



Kuva 23. Ra- ja Rz-arvojen määrittäminen. [Muokattu lähteestä 50]

Ra-arvo kertoo mittausvälille sijoittuvien huippujen ja syvennyksien aritmeettisen keskiarvon. Tällöin saadaan hyvä kokonaiskuva kalvon pinnankarheudesta ja laadusta, mutta suuret yksittäiset piikit suodattuvat mittausdatasta pois. Rz-arvo taas määrittää mittausvälille sijoittuvien viiden korkeimman sekä matalimman piikin arvot laskien niistä keskiarvon. Tällöin saatava data on huomattavasti Ra-arvoa korkeampi, mutta antaa realistisemmän kuvan kalvon pinnalla tapahtuvasta pintavaihtelusta [48].

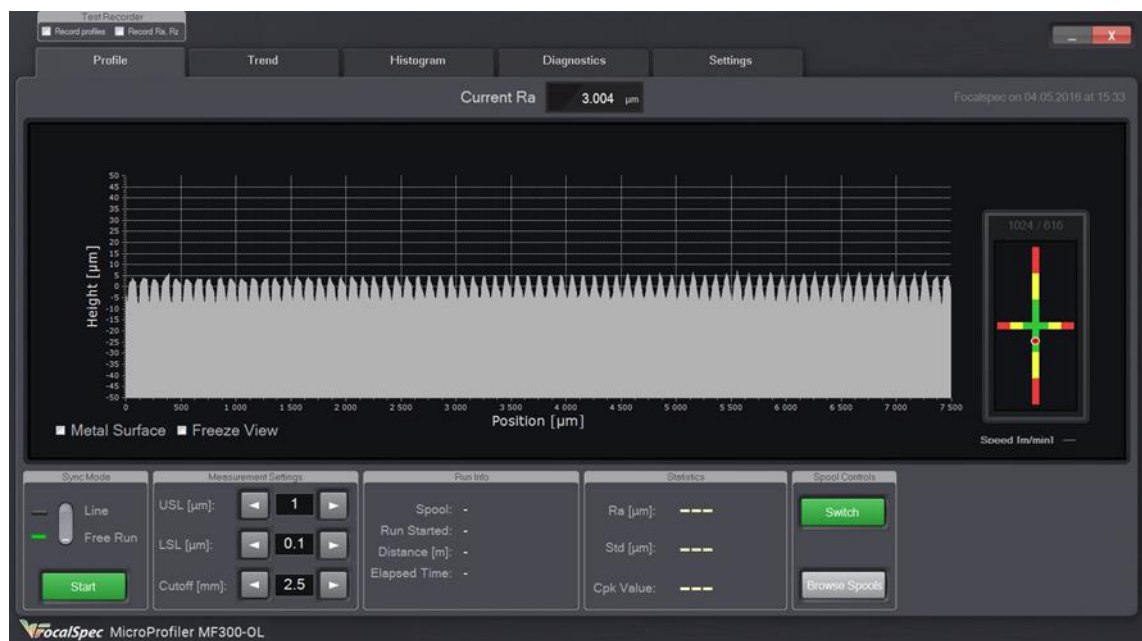
Arvoista voidaan määrittää pinnankarheuden muutosfunktio sekä kuvaajia, jolloin prosessista saadaan parempi kokonais käsitys. Testauksissa pinnan karheus määritettiin 7.5 mm pituiselle profiilin osalle ja Cut off- pituutena oli 2.5 mm, jolloin hyödynnetty profiilin kokonaispituus oli 10.0 mm.

Mittauksessa käytetyt parametrit olivat:

- Lr : 2.5 mm
- Ln: 7.5 mm
- Cut off -pituus: 2.5 mm
- Mittaustaajuus: 25 profiilia /s (= 25 Ra ja 2.5 Rz- mittausta/ s)

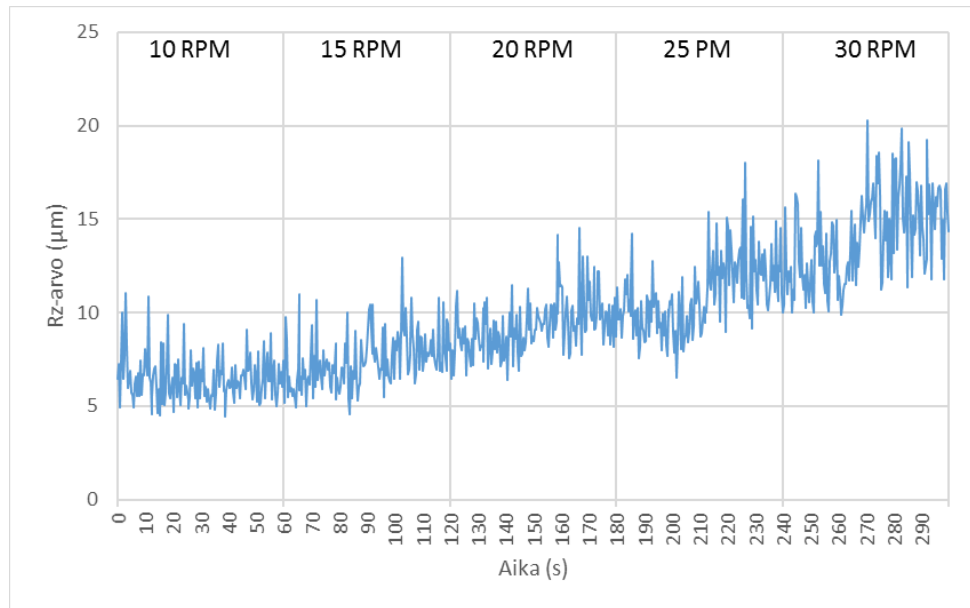
Mittauksissa päädyttiin käyttämään hyvin pientä 2.5 Hz:n taajuutta Rz-arvojen määrittämiseen. Syynä oli koeajokonstruusion matala tuotantonopeus sekä halu rajoittaa tiedostomäärien kokoa. On kuitenkin huomionarvoista, että laite kykenee mittaamaan profiilia jopa 100 Hz:n taajuudella. Näin laitetta voidaan hyödyntää erinomaisesti suuremmillakin tuotantonopeuksilla teollisissa ympäristöissä.

Ennen mittauksien suoritusta mittalaite kalibroitiin karheusnäytteellä, jossa metallipintaan on etsattu sinimuotoinen pintaprofiili, jonka Ra = 3.0 µm. Alla esitettyä kuva kalibrointinäytteestä.



Kuva 24. Laitteen mittauskuva kalibrointinäytteestä

Saadut mittaustulokset tallentuvat tietokoneelle ja niitä voidaan muokata tarkempien tulosten laskemiseen tai kuvaajien muodostamiseksi. Alla esitettyä kuvassa 25 esimerkkikuva pinnankarheuden Rz-arvon vaihtelusta koeajon aikana.



Kuva 25. Pinnankarheuden Rz-arvon vaihtelu prosessissa.

Saatu data on hyödynnettävissä pohdittaessa prosessinhallintaa, sekä selvittäessä materiaalin pintavirheiden syitä. Muovikalvon kriittisiin prosessointivirheisiin lukeutuvat sharkskin sekä sulamurtumat ovat optisella analyysillä havaittavissa varhaisessa vaiheessa sekä mahdollisesti jopa ehkäistävässä prosessiparametrien muutoksella.

6. KOEAJOJEN SUORITUS

Tässä kappaleessa esitellään kokeellisen osuuden koeajojen suoritusmenetelmät sekä esitellään käytetty materiaali sekä laitteisto.

6.1 Koeajojen suoritus

Koeajot suoritettiin Tampereen Teknillisellä Yliopistolla Muovi- ja elastomeeritekniikan tutkimuslaboratoriossa. Tarkoituksena oli simuloida oikean tasokalvolinjaston toimintaa laboratorio-olosuhteissa ja saada näin mittausdataa pinnankarheudesta erilaisilla prosessiparametreilla.

6.1.1 Testimatriisi

Ottaen huomioon järkevän ajankäytön sekä saatavilla olevat materiaalit päätettiin muodostaa testimatriisi, jonka mukaan koeajot suoritettiin. Aluksi täytyi määrittää muuttujat, joita lähdetään vaihtamaan testien edetessä. Ensimmäisenä prosessointimuuttujana toimi lämpötila. Päädyttiin valitsemaan 3 eri lämpötilaa muovien ominaiselta prosessointialueelta 15 °C välein.

Seuraava muuttuja syntyi vetolaitteiston vetonopeudesta, jolla on suuri merkitys kalvon paksuuden kannalta. Testien aikana huomattiin myös, että liiallinen vetonopeus orientoi kalvoja liian voimakkaasti ja täten saattaa peittää esiintyviä pintavirheitä. Tämän perusteella päädyttiin valitsemaan myös 3 eri vetonopeutta ennakkoon määritettyjen testien perusteella sopivaksi vaihteluväliksi 5 vaihteluvälillä 20-30.

Näin saatiin muodostettua ensimmäinen osuus matriisia. Alla on esitetty taulukossa 2 käytetty testimatriisi.

Koeajomatriisi	Lämpötila	Vetonopeus
Materiaali	T1	20
		25
		30
	T2	20
		25
		30
	T3	20
		25
		30

Taulukko 2. Koeajomatriisi Prosessointivaihteluiden mukaan.

Tästä saadaan 9 erilaista koeajoa, jotka jokainen suoritetaan 5 min kestävällä koeajolla. Koeajon aikana kolmatta tärkeää prosessointiparametria eli ruuvin pyörimisnopeutta (rpm) kasvatetaan tasaisesti. Ennakkoon tehtyjen testien mukaan soveltuva vaihteluväli oli 10-30 rpm. Ruuvinpyörimisnopeuden kasvatus tehtiin 5 rpm minuutissa, jolloin voidaan seurata prosessivaihteluiden aiheuttamaa muutosta kalvon pinnankarheuteen.

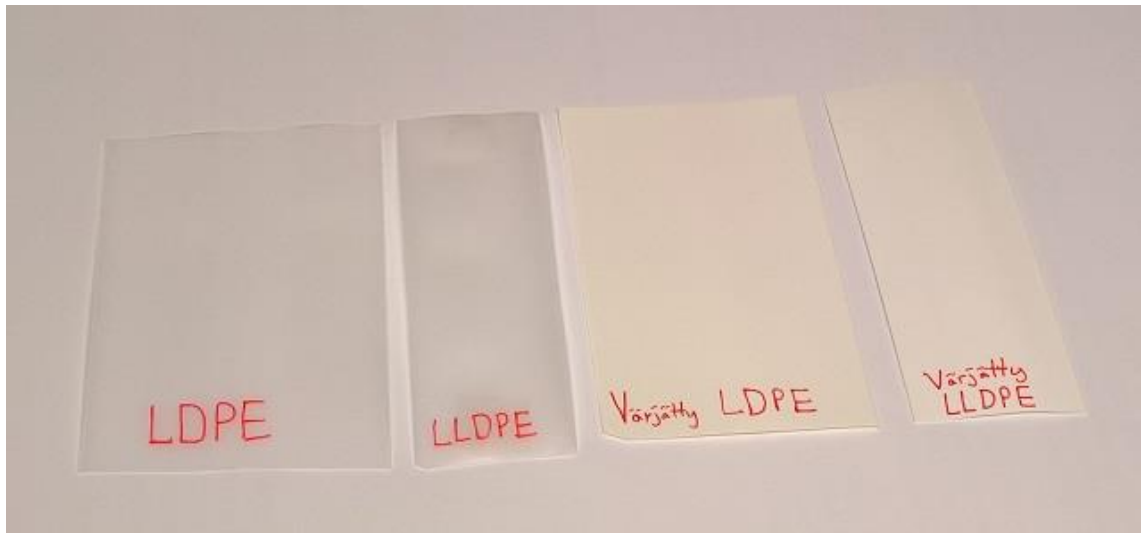
Matriisia sovellettiin samalla tavalla materiaaleille ottaen huomioon materiaalivalmistajan suositukset optimaalisista prosessointilämpötiloista. Yhteensä siis tehdään 36 koeajoa, 9 molempia materiaaleja kohden ja sama toistetaan värjätyille materiaaleille. Kaikki käytetyt ruuvinpyörimisnopeudet 10-30 rpm kuuluu jokaiseen testimatriisiin. Seuraavaksi esitellään kokeellisessa osuudessa käytetyt materiaalit.

6.2 Kokeellisessa osuudessa käytetyt materiaalit

Koeajoihin tarvittiin kalvonvalmistuksessa yleisesti käytössä olevia muovilaatuja. Valintakriteerinä oli riittävän sulaindeksin omaavat samankaltaiset materiaalit, joilla olisi kuitenkin odotettavissa eriäväsyyttä tuloksiin. On otettava huomioon käytössä oleva laitteisto ja sen perusteella valittava prosessoitavissa olevat muovilaadut. Tässä työssä päädyttiin hyödyntämään LDPE:ta sekä LLDPE:ta niiden prosessoitavuuden takia. Kirjallisuudesta pystyi myös tekemään oletuksen, että LLDPE:llä esiintyy herkemmin kalvonvalmistuksessa haluttuja pintavirheitä. [44]

Johtuen työn kokeellisuudesta päätettiin myös kokeilla Masterbatchin vaikutusta pintaominaisuuksiin. Tällöin saatiin laajennettua testattavia muovikalvoja läpinäkyvien lisäksi myös valkoiseksi värjättyihin.

Esimerkki koeajoissa valmistetuista kalvonäytteistä on esitetty alla kuvassa 27. Kalvot on kaikki valmistettu 10 RPM ruuvinyörimisnopeudella sekä vetonopeudella 20. Alla esitetty kuvassa 25 koeajoista saatua kalvonäytteitä.



Kuva 26. Koeajossa valmistettuja kalvonäytteitä

6.2.1 LDPE

Ensimmäinen materiaali on Borealixsen FA5223. Kyseessä on LDPE, joka on suunniteltu kalvonvalmistukseen. Kyseinen muovi sisältää myös lisäaineina yrityksen antioksidanteja sekä antiblokkereita. [51]

Tämä materiaali valittiin sen helpon prosessoitavuuden takia ja koska tiedettiin sen olevan käytössä monessa kalvosovelluksessa. Alla esitetty taulukossa 3 materiaalin tekniset tiedot.

Materiaali	LDPE
Kauppanimi	Borealis FA5223
Tiheys	922 kg/m ³
Sulaindeksi (190 °C/2.16 kg)	1,2 g/10 min
Sulamislämpötila	110 °C
Suositteltu prosessointilämpötila-alue	160-190 °C

Taulukko 3. Käytetyn LDPE:n tiedot [51]

6.2.2 LLDPE

Toiseksi materiaaliksi valittiin Borealixen Borstar FB4230. Kyseessä on LLDPE, joka on myös tarkoitettu kalvonvalmistukseen. Materiaaleissa löytyy silti myös eroja, sillä LLDPE on elastisempaa kuin LDPE vaikka sillä on pienempi sulaindeksi. Myös LLDPE sisältää antioksidantteja lisäaineena. Pääsyy materiaalinvalintaan oli kuitenkin teorialähteistä lähtöisin oleva olettaus, että LLDPE:llä esiintyy herkemmin sulamurtumaa kuin LDPE:llä. Alla taulukossa esitettynä materiaalin tekniset tiedot.

Materiaali	LLDPE
Kauppanimi	Borealis Borstar FB4230
Tiheys	923 kg/m ³
Sulaindeksi (190 °C/2.16 kg)	0,4 g/10 min
Sulamislämpötila	124 °C
Suositteltu prosessointilämpötila-alue	180-210 °C

Taulukko 4. Koeajoissa käytetyn LLDPE:n tekniset tiedot [52]

6.2.3 Masterbatch

Masterbatchina käytettiin Clariantin Remafin PE-white LM7: aa. Se on erityisesti suunniteltu PE-muovien värjäämiseen kalvonvalmistuksessa. Tähän päädyttiin, koska Masterbach värjää kalvon tehokkaasti pienissäkin erissä ja ei häiritse prosessointia. Värjätyn kalvon valmistukseen käytettiin 5 m% Masterbatchia.

6.3 Kokeellisessa osuudessa käytetty laitteisto

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti kokeellisessa osuudessa käytetty laitteisto.

6.3.1 Ekstruuderit

Tässä kappaleessa on lyhyesti esiteltyä kokeellisessa osuudessa käytetty ekstruuderit.



Kuva 27. Kokeellisessa osuudessa käytetty ekstruuderit

Ekstruuderina käytettiin muovi- ja elastomeeritekniikan tutkimuslaboratorion Extrudex ED-N 30 yksiruuviekstruuderit. Tämä ekstruuderit pystyy valmistamaan erilaisia profiileita, kuten esimerkiksi kalvoa. Lisäksi ekstruuderit voidaan käyttää muovien kompaundointiin [51]. Alla on esitetty taulukossa 5 Extrudex ED-N 30:n tärkeimmät tekniset tiedot.

Malli	Extrudex ED N 30
Ruuvien halkaisija	30 mm
Ruuvien L/D suhde	20-30
Ruuvien pyörimisnopeus	0-150 RPM
Prosessointilämpötila	0-400 °C (3 sylinteriä)

Taulukko 5. Koeajossa käytetyn ekstruuderin tekniset tiedot [53]

6.3.2 Vetolaitteisto

Tässä kappaleessa on lyhyesti esitetty kokeellisessa osuudessa käytetty vetolaitteisto.



Kuva 28. Vetolaitteisto

Vetolaitteistona käytettiin muovi- ja elastomeeritekniikan tutkimuslaboratorion vetokoneetta. Koneessa on paineilmalla toimiva puhallin, jonka avulla pystytään ekstruuderin suuttimelta tulevaa kalvoa jäähdyttämään. Ensimmäinen tela on metallia ja se on yhdistetty temperointiyksikköön tehokkaamman lämmön jakautumisen takia. Kuvassa näkyy myös mittalaitteisto sekä sitä varten rakennettu tukiteline. Mittalaitteen vaatimuksista johtuen vetolaitteistoa muokattiin hieman poistamalla yksi teloista. Näin saatiin kalvo vedettyä paremmin vaakatasossa mittausten helpottamiseksi.

Vetolaitteistossa on myös portaaton nopeuden säätö, mutta kuten aikaisemmin mainittiin se ei noudata normaalia lineaarista nopeusasteikkoa. Vetolaitteistossa voi säätää joko kaikkien telojen pyörimisnopeutta tai telojen välistä nopeuksien suhdetta. Tässä työssä muutettiin ainoastaan kaikkien telojen nopeutta. Käytetyt vetonopeudet on valittu testiajojen perusteella sopiviksi eri kalvolaatujen tuottamiseen.

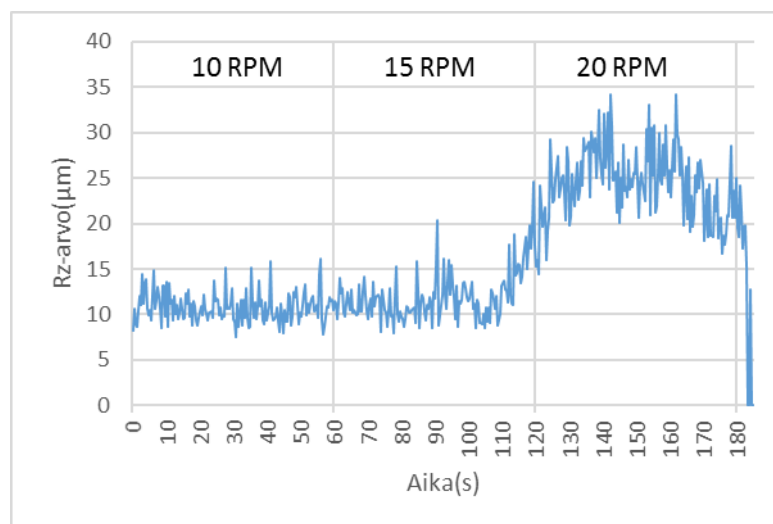
7. KOEAJOJEN TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään tehdyt koeajot testimatriisia noudattaen. Aluksi esitellään luodut kuvaajat Rz-arvon pinnankarheuden muutoksista 300 s koeajon aikana. Kuvaajissa päädyttiin Rz-arvon käyttöön, sillä se on laskennallisesti suoraan verrannollinen Ra-arvoon, joten molempia kuvaajia ei ole järkevää esittää. Lisäksi Rz-arvo antaa paremman kokonaiskuvan mittauksen etenemisestä. Kuvaajiin on liitetty mukaan ekstruusion ruuvinpyörimisnopeus (RPM) selventämään prosessivaihteluiden ajankoh-
tia.

Jokainen mittaus on käsitelty sanallisesti erikseen ja koeajoissa tulleita huomioita on liitetty mukaan tarpeen mukaan. Lisäksi pintapuolisesti kerrotaan tärkeimmät huomiot kuvaajasta. Kuvaajien jälkeen on koottuna tutkimustulosten merkittävimmät laskennalliset arvot ja ne analysoidaan lisäksi sanallisesti.

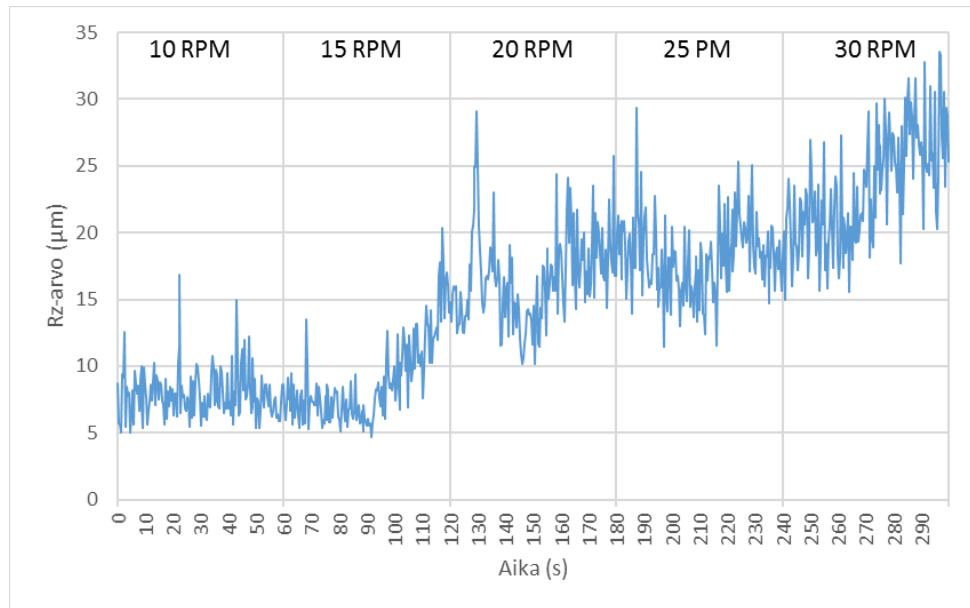
7.1 LDPE

7.1.1 LDPE 160 °C lämpötilassa



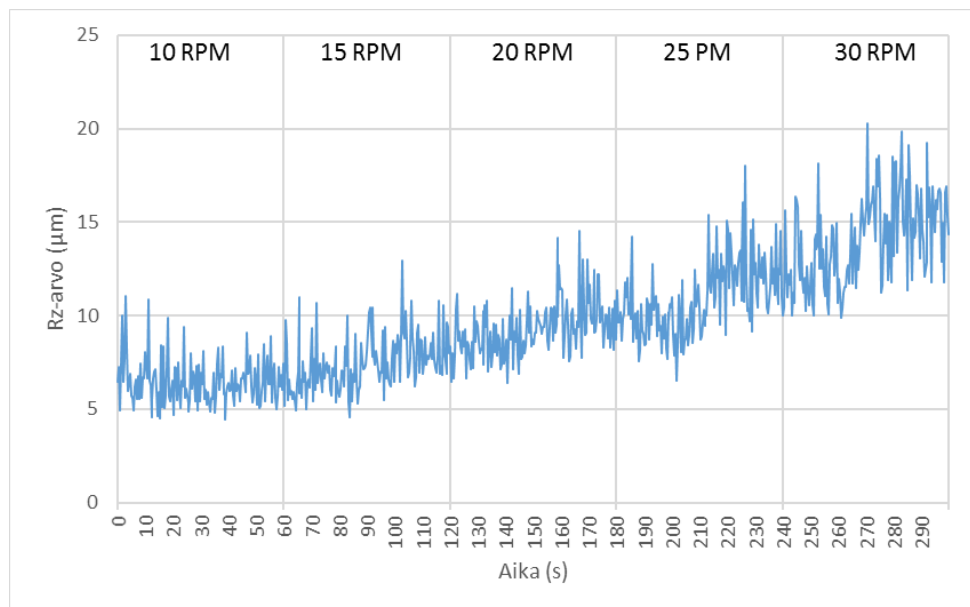
Kuva 29. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Ensimmäinen koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 jouduttiin keskeyttämään 180 s kohdalla. Tämä johtui hitaan vetonopeuden aiheuttamasta kalvon paksuuntumisesta erityisesti isommilla ruuvinpyörimisnopeuksilla. Ensimmäiset 120 s ruuvinpyörimisnopeuksilla 10–15 rpm sujui hyvin, mutta 20 rpm alkaen pinnankarheus alkoi kasvaa nopeasti ennen mittauksen keskeytystä.



Kuva 30. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

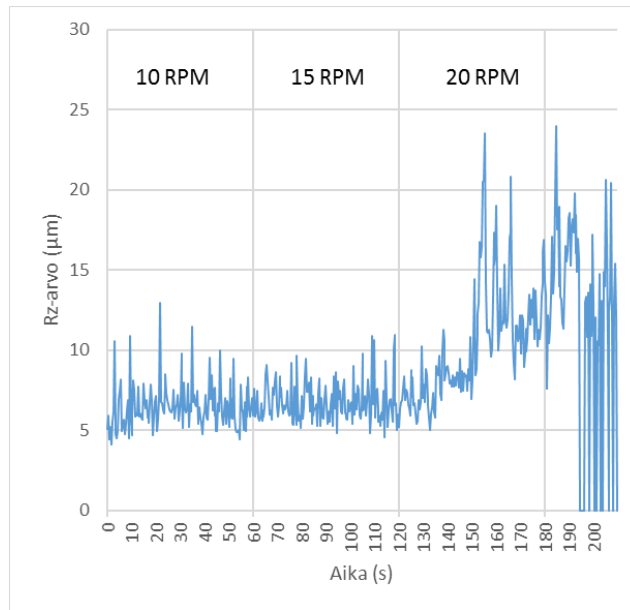
Koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 sujui hyvin, pinnankarheudella on selkeä nouseva trendi ruuvin pyörimisnopeuden kasvaessa. Suuret mittauspiikit pinnankarheudessa sijoittuvat ruuvinpyörimisnopeuden kasvatusajankohtiin 60, 120 ja 180 sekunnin jälkeen. Lisäksi kannattaa huomioida lisääntynyt varianssi pinnankarheudessa suuremmilla ruuvin pyörimisnopeuksilla.



Kuva 31. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

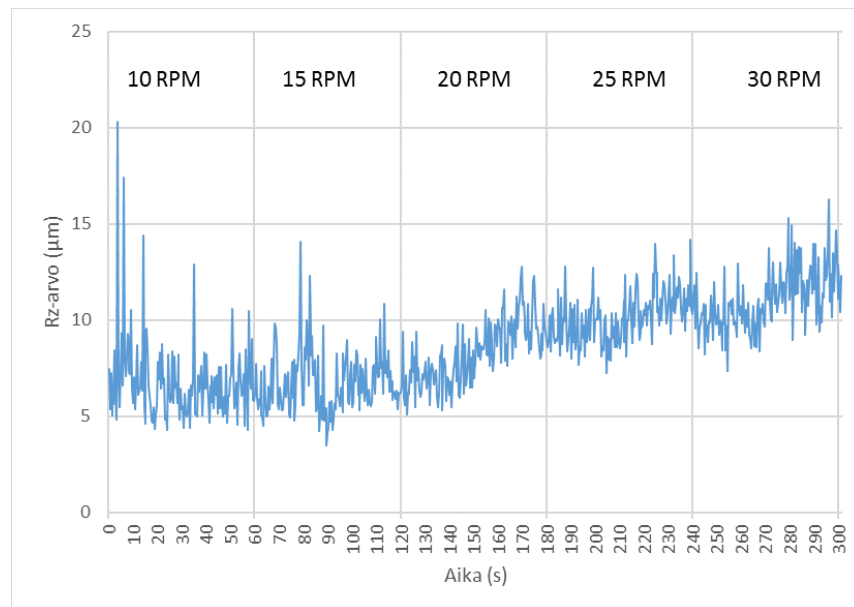
Koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisesti nousevan pinnankarheuskäyrän. Kalvon laadussa ei ollut merkittävää vaihtelua myöskään silmämääräisesti tarkasteltuna. Vaikuttaa että vetonopeutta kasvattamalla muovikalvon orientaatio lisääntyy, jolla on pienentävä vaikutus pinnankarheuteen.

7.1.2 LDPE 175°C lämpötilassa



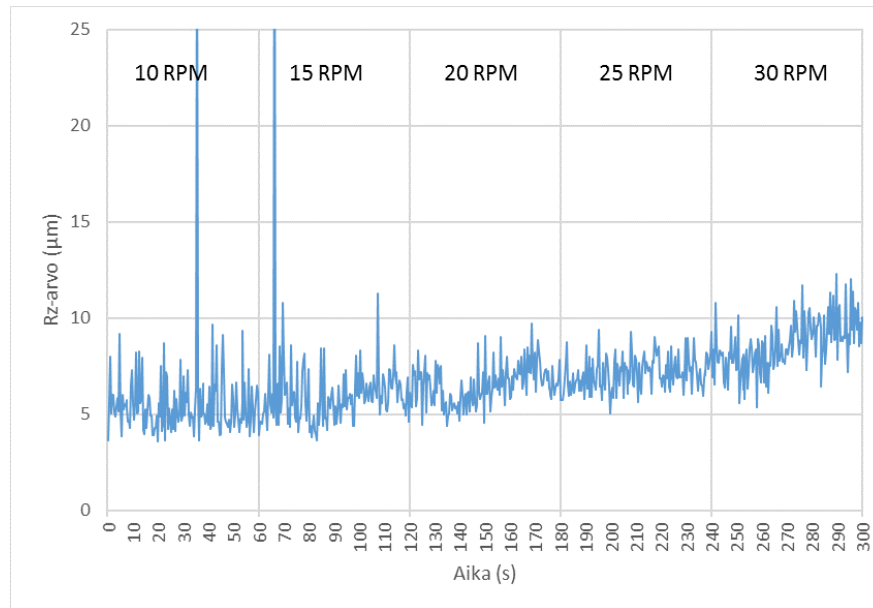
Kuva 32. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Tähän koeajoon lämpötila nostettiin 175 °C vetonopeudella 20. Tätäkään mittausta ei saatu suoritettua loppuun, vaan kalvon paksuus aiheutti mittahäiriötä yli 20 rpm ruuvipyörimisnopeudella 150 s kohdalta alkaen. Tähän asti pinnankarheus oli ollut tasaista.



Kuva 33. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

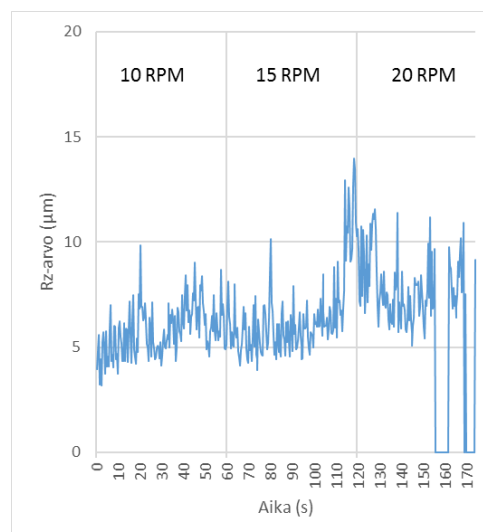
Koeajo 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 osoitti tasaista hieman nousevaa trendiä pinnankarheudessa. Alussa syntyi muutama mittapiikki tuntemattomista syistä, mutta niillä ei ollut silminnähtävää vaikutusta kalvon laatuun.



Kuva 34. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

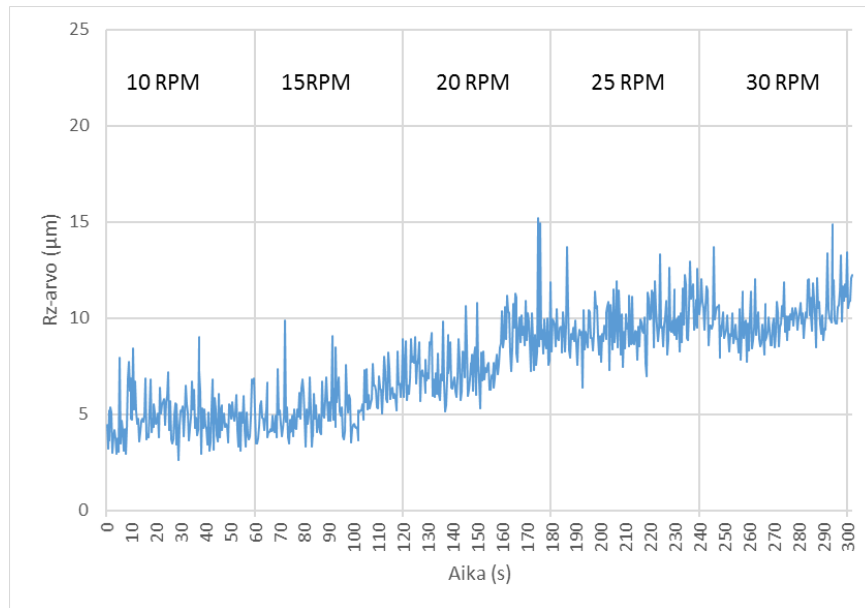
Koeajo 175 °C lämpötilassa vetonopeudella tuotti 40 µm suuruiset virhepiikit tuntemattomasta syystä 35 ja 60 s kohdalla. Kuvaaja on rajattu 25 µm:iin jatkuvuuden takia. Kalvossa ei ollut nähtävissä eroavaisuutta silmämääräisellä tarkastelulla. Virhepiikkejä lukuun ottamatta tasainen kuvaaja hienoisella nousevalla keskimääräisellä pinnankarheudella. Ensimmäisellä 90 s aikana hieman tavallista suurempi varianssi pinnankarheudessa.

7.1.3 LDPE 190°C lämpötilassa



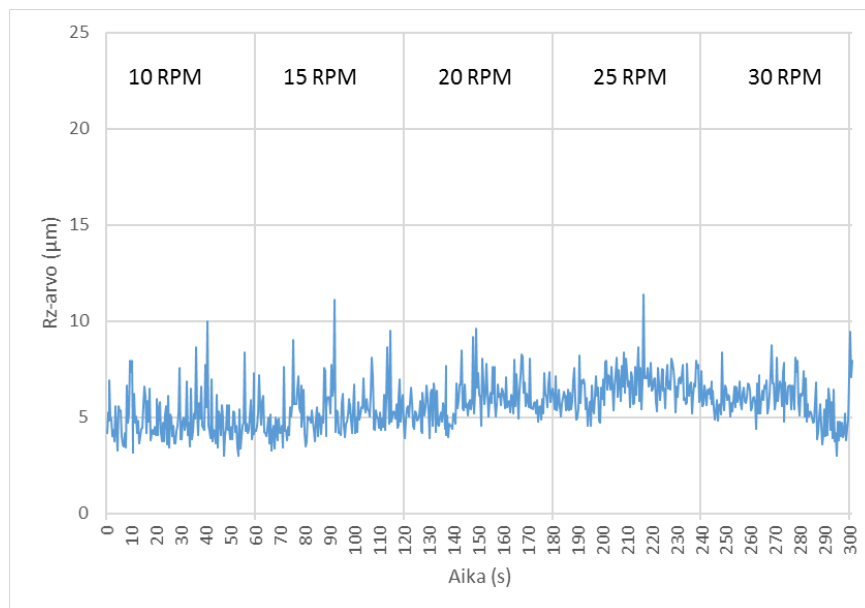
Kuva 35. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajoa 190 °C lämpötilassa vetonopeudella ei saatu vietyä päätökseen, vaan mittaus jouduttiin keskeyttämään 170s jälkeen johtuen kalvon huonosta laadusta.



Kuva 36. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

Koeajo 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti tasaisen nousevan käyrän pinnan-
karheudessa. Tämä kuvaaja on malliesimerkki millainen pinnankarheuden määrittäminen voi
olla koeajossa.

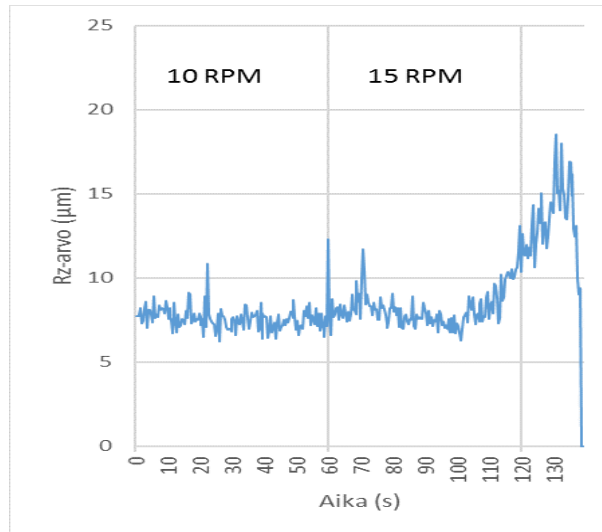


Kuva 37. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

190 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisen pinnankarheuden kaikilla ruuvin-
pyörimisnopeuksilla. Muutama piikki on havaittavissa mittauksista, mutta ei merkittä-
vää vaihtelua havaittavissa kalvon laadussa.

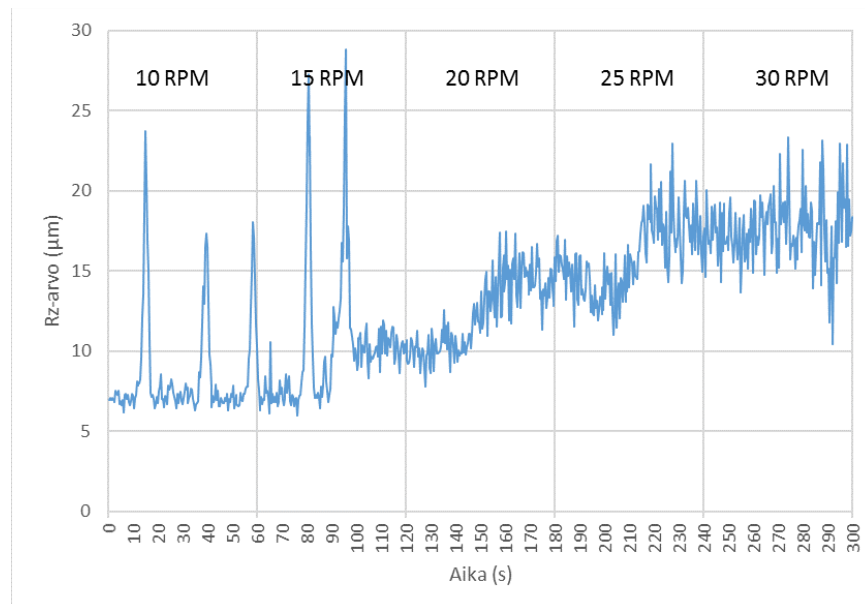
7.2 LLDPE

7.2.1 LLDPE 180°C lämpötilassa



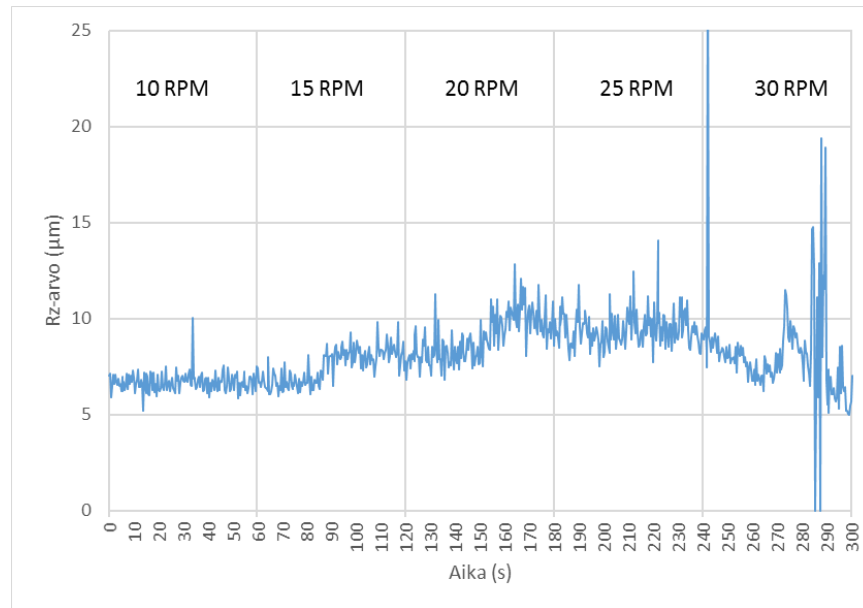
Kuva 38. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 jouduttiin keskeyttämään 135 sekunnin kohdalla kalvon paksutessa liikaa aiheuttaen mittahäiriöitä. Ennen keskeytystä tasainen kuvaaja, joka lähti loppua kohden nousemaan 100 s jälkeen.



Kuva 39. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

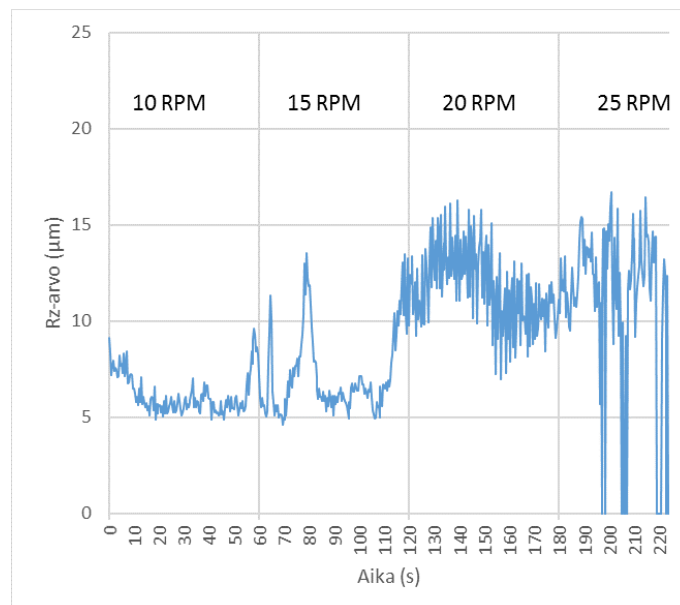
Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 osoitti mittauksen ensimmäisen 90 s kohdalla suuria piikkejä pinnankarheudessa. Tämän jälkeen käyrä tasaantui osoittaen portaittaista nousua ruuvinpyörimisnopeuksien myötä. Myös pinnankarheuden varianssi kasvoi loppua kohden huomattavasti.



Kuva 40. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 sujui hyvin esittäen tasaisen käyrän lukuun ottamatta virhepiikkiä 240s kohdalla. Virhepiikki oli suuruudeltaan 35 µm, mutta kuvaaja rajattiin 25 µm:iin jatkuvuuden takia. Lisäksi laitteisto hukkasi hetkittäin mittapisteen 285 s kohdalla. Mittaus saatiin kuitenkin suoritettua loppuun asti.

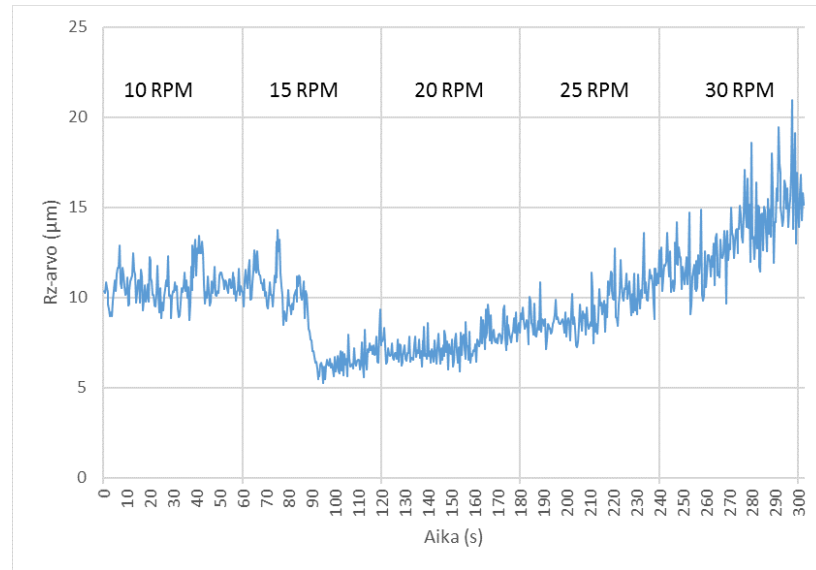
7.2.2 LLDPE 195°C lämpötilassa



Kuva 41. Rz arvon muuttuminen 195°C lämpötilassa vetonopeudella 20

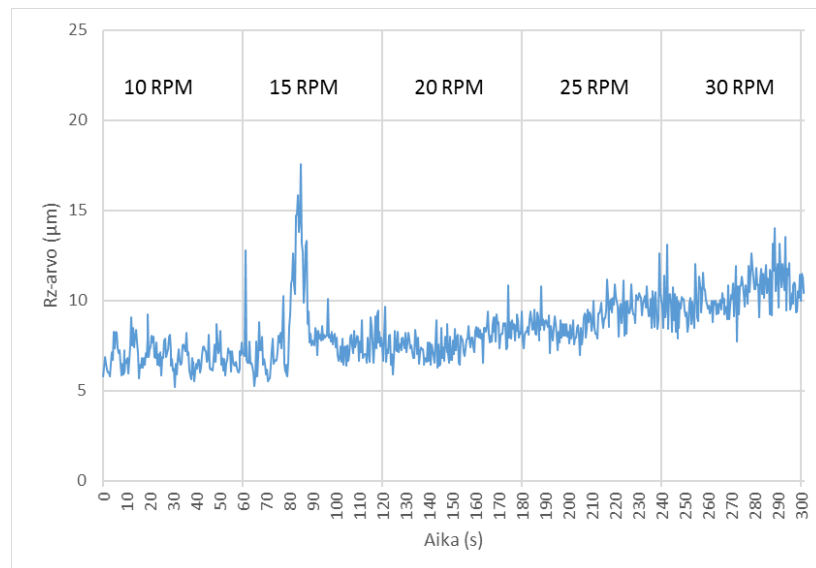
Koeajossa 195°C lämpötilassa vetonopeudella 20 alkoi ensimmäisen kerran mittauksissa esiintyä sharkskiniä kalvon pinnassa 120 s kohdalla, kun ruuvinpyörimisnopeus kasvatettiin 20 rpm:iin. Tämä näkyy kuvaajassa suurena varianssina. Johtuen kalvon epäta-

saisuudesta mittaus jouduttiin keskeyttämään 220 s jälkeen. Liian suuri pinnanvaihtelu tekee mittauksen haastavaksi.



Kuva 42. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

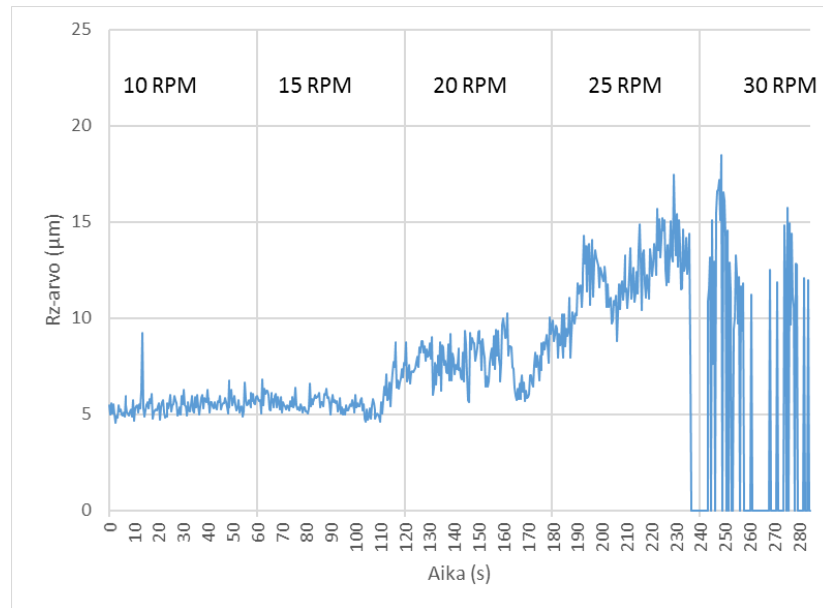
Koeajo 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti epätavallisen kuvaajan siinä mielessä, että pinnankarheus pieneni hetkellisesti 80 s jälkeen. Tämä voi johtua mahdollisesti siitä, että prosessi ei ollut vielä tasaantunut edellisen mittauksen jäljiltä. Tämän jälkeen käyrä kasvoi tasaisesti kohti mittauksen loppua.



Kuva 43. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

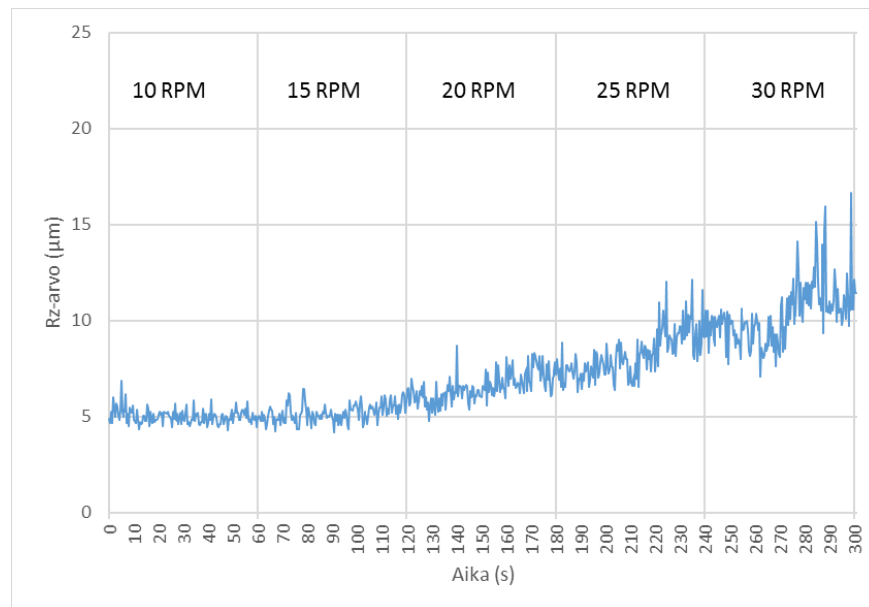
Koeajo 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisen käyrän, poikkeuksena piikit 60 ja 85 s kohdalla. Muutoin tasaisesti nouseva pinnankarheus ruuvinpyörimisnopeuden kasvattamisen myötä.

7.2.3 LLDPE 210°C lämpötilassa



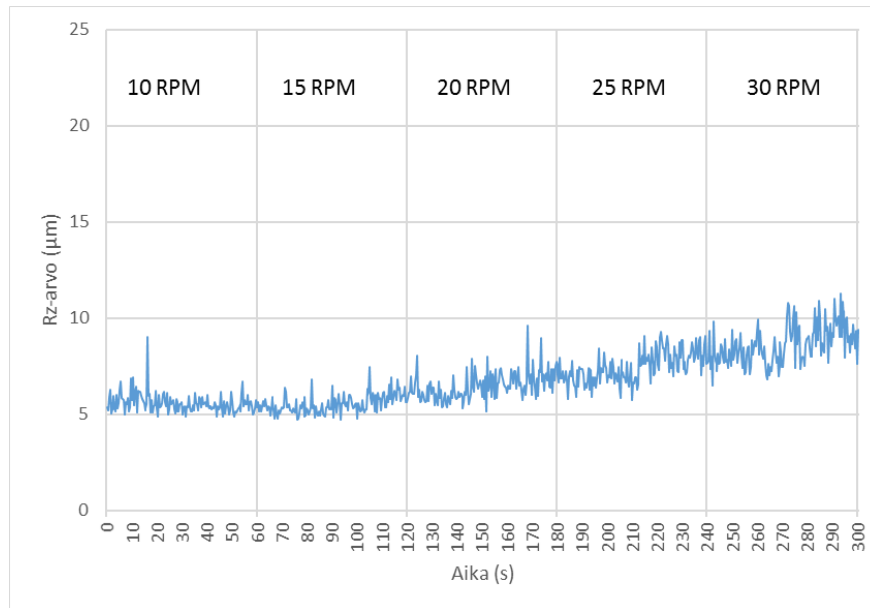
Kuva 44. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 osoitti pientä sulamurtumaa/sharkskinia välillä 120-160s. Mittausta ei saatu suoritettua aivan loppuun, sillä loppuvaiheessa kalvon laatu alkoi heiketä siinä suhteessa, että mittaus ei enää onnistunut. Koeajon alkuvaiheessa nähtävissä myös virhepiikki 10 s kohdalla tuntemattomasta syystä.



Kuva 45. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti tasaisen kuvaajan nousevalla trendillä. Käyrän varianssi alkoi kasvaa 230 s jälkeen.

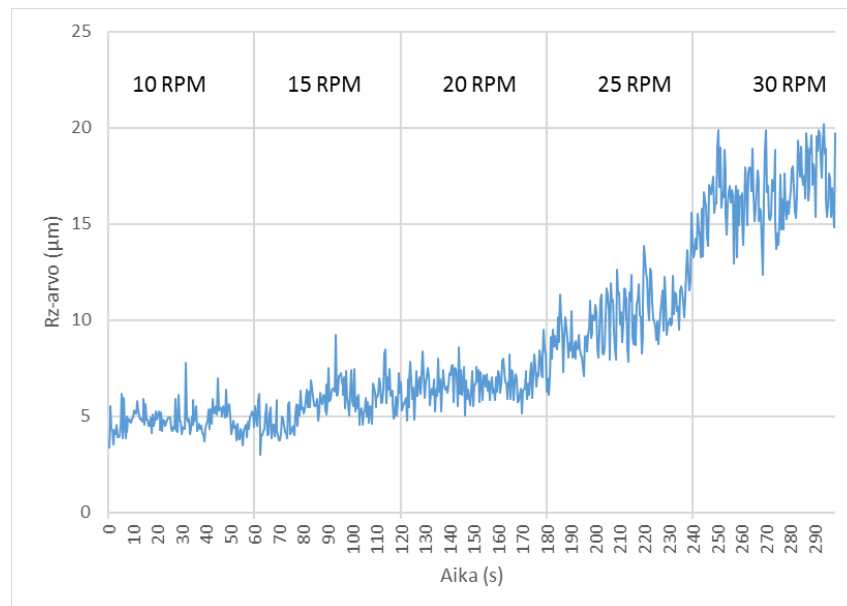


Kuva 46. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisen käyrän muutamaa piikkiä lukuun ottamatta. Pinnankarheus kasvoi hieman ruuvin pyörimisnopeuden noustessa.

7.3 Värjätty LDPE

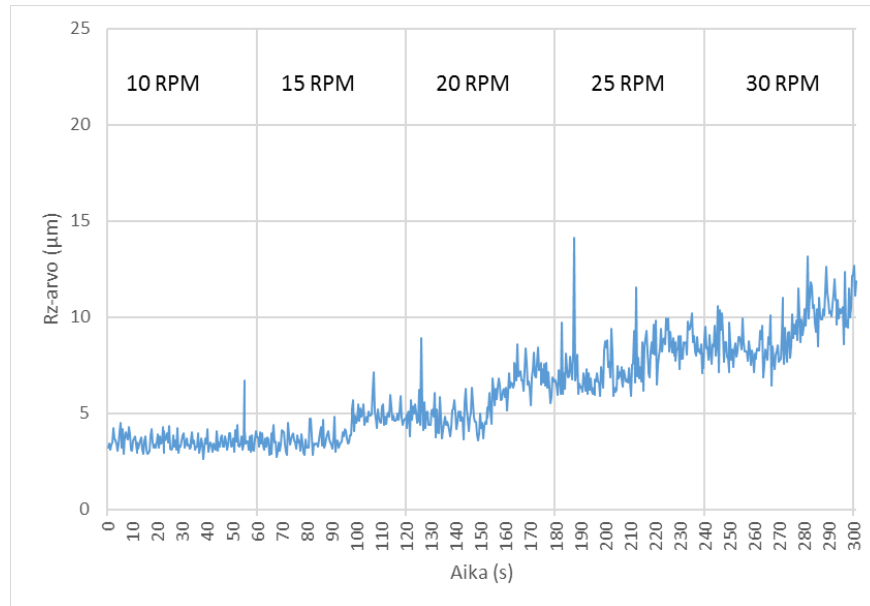
7.3.1 Värjätty LDPE 160°C lämpötilassa



Kuva 47. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

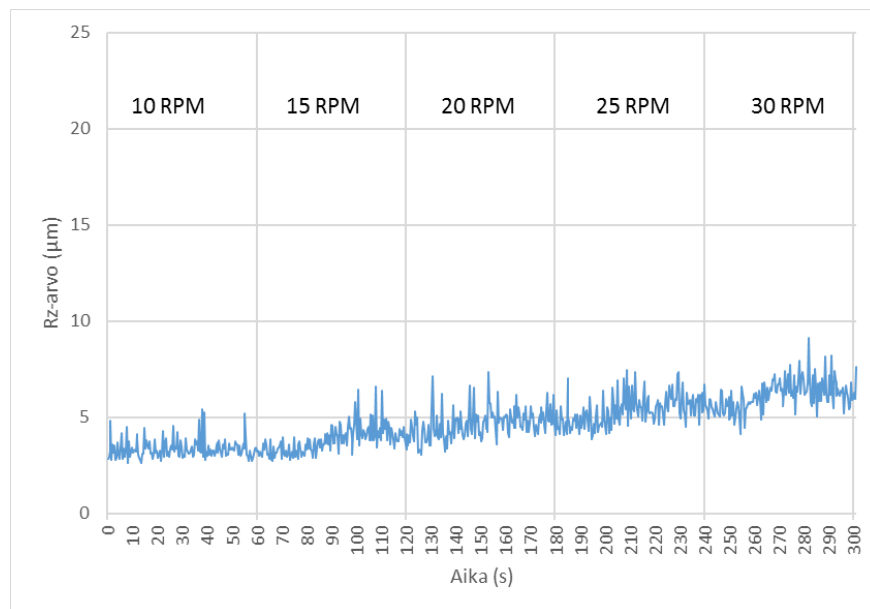
Koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 saatiin mitattua loppuun asti ensimmäistä kertaa kyseisellä vetonopeudella. Kalvon prosessoitavuus on parantunut johtuen Masterbatchin sisältämistä lisäaineista. Kuvaaja osoittaa portaittaista pinnankarheuden kas-

vua ruuvin pyörimisnopeuden kasvaessa. Kalvossa havaittavissa sharkskiniä välillä 200-240s.



Kuva 48. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

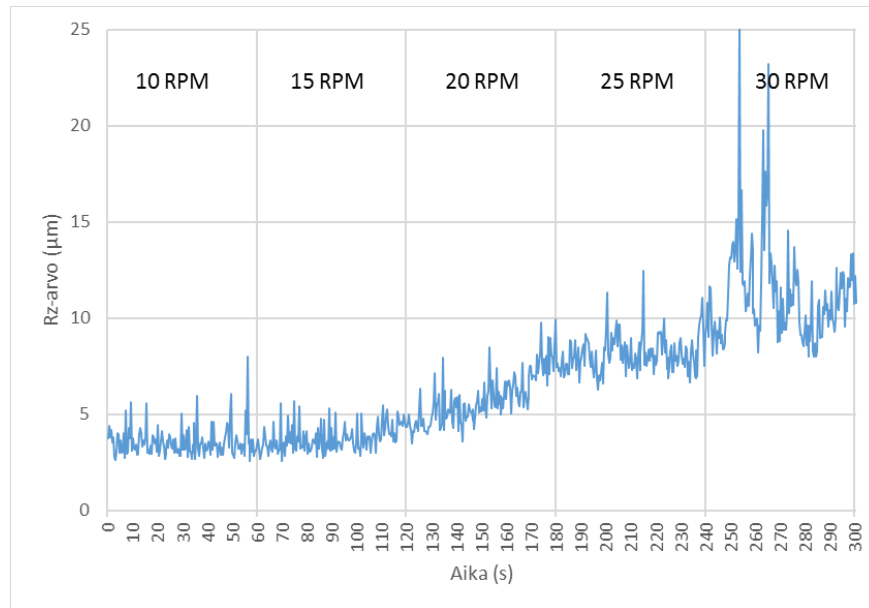
Koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti muutamaa piikkiä lukuun ottamatta tasaisen kuvaajan, josta on nähtävillä pinnan karheuden kasvu ruuvin pyörimisnopeuden lisääntyessä.



Kuva 49. Rz arvon muuttuminen 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

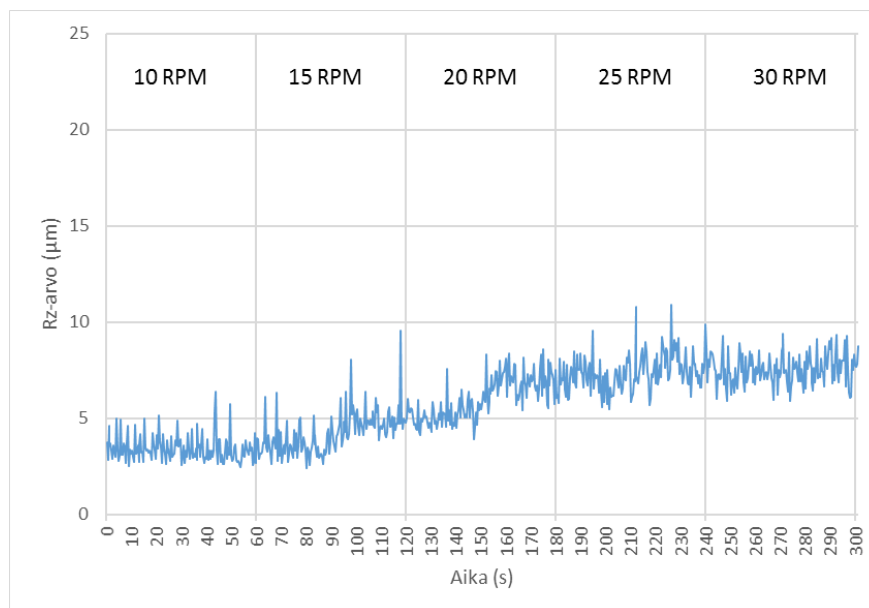
Koeajo 160 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisen hieman nousevan käyrän. Yleisesti ottaen erinomainen pinnanlaatu läpi koeajon.

7.3.2 Värjätty LDPE 175°C lämpötilassa



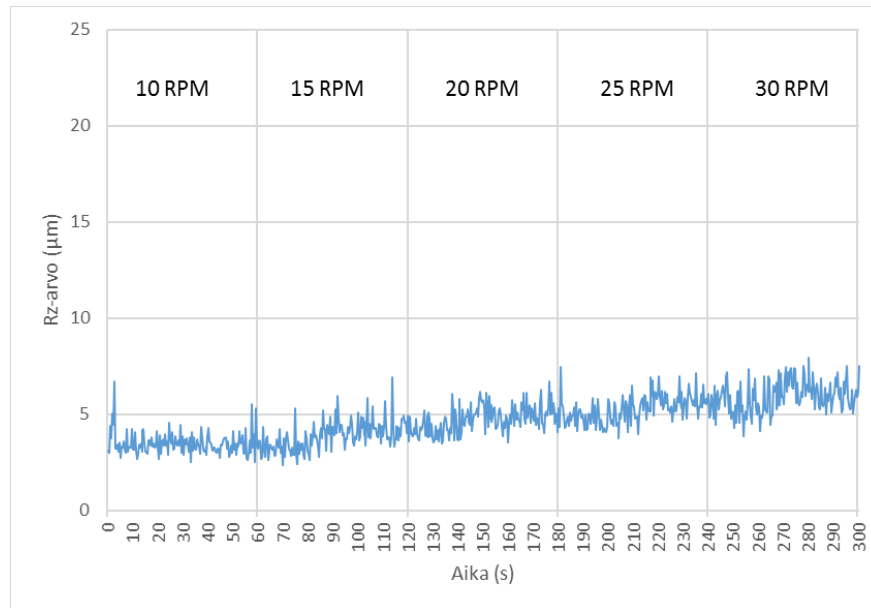
Kuva 50. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 tuotti tasaisesti nousevan pinnankarheuden käyrän. Välillä 250-260 s suurta vaihtelua pinnankarheudessa.



Kuva 51. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

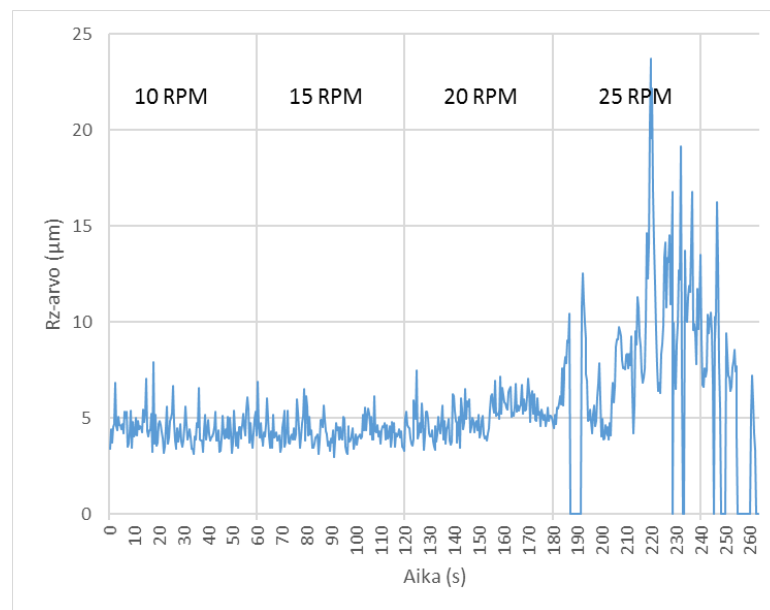
Koeajo 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti tasaisen käyrän pienellä nousulla pinnankarheudessa ruuvinyörimisnopeuden kasvaessa.



Kuva 52. Rz arvon muuttuminen 175 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

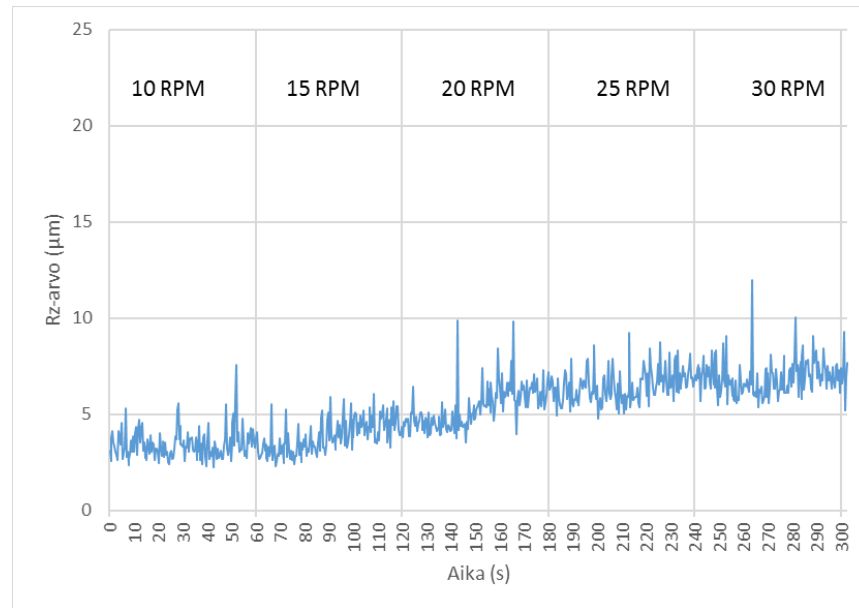
Koeajo 175 °C lämpötilassa vetonopeudella tuotti varsin tasaisen aaltoilevan käyrän. Silmämääräisellä tarkastelulla ei vaihteluita kalvolaadussa.

7.3.3 Värjätty LDPE 190°C lämpötilassa



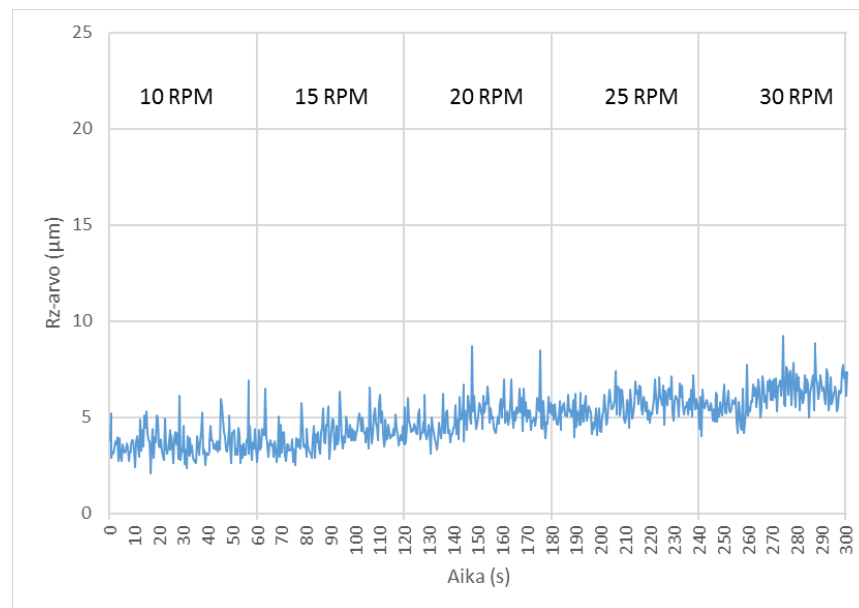
Kuva 53. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 tuotti tasaisen käyrän 180 s asti. Tämän jälkeen alkoi esiintyä voimakasta sulamurtuma kalvon pinnassa, jonka seurauksena mitaus jouduttiin keskeyttämään 260 s kohdalla. Voimakasta muutosta pinnankarheudessa välillä 180–260 s.



Kuva 54. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

Koeajo 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti tasaisen nousevan käyrän pinnan-
karheudesta. Muutama piikki havaittavissa mittauksen aikana, mutta ei silmämääräisesti
eroavaisuuksia kalvolaadussa.

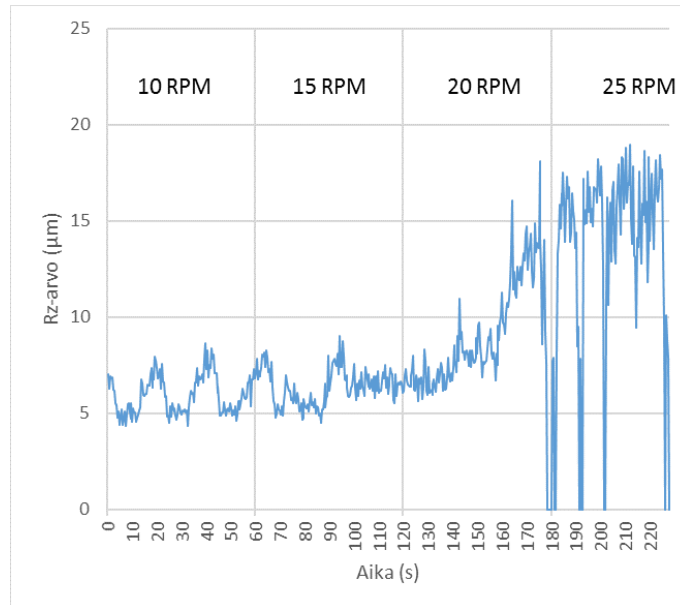


Kuva 55. Rz arvon muuttuminen 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

Koeajo 190 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti erittäin tasaisen pinnan-
karheuskäyrän ilman suuria vaihteluita.

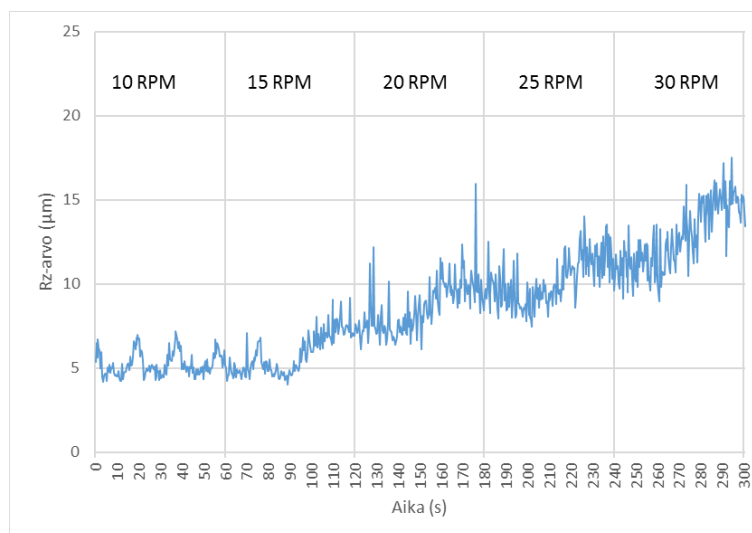
7.4 Värjätty LLDPE

7.4.1 Värjätty LLDPE 180°C lämpötilassa



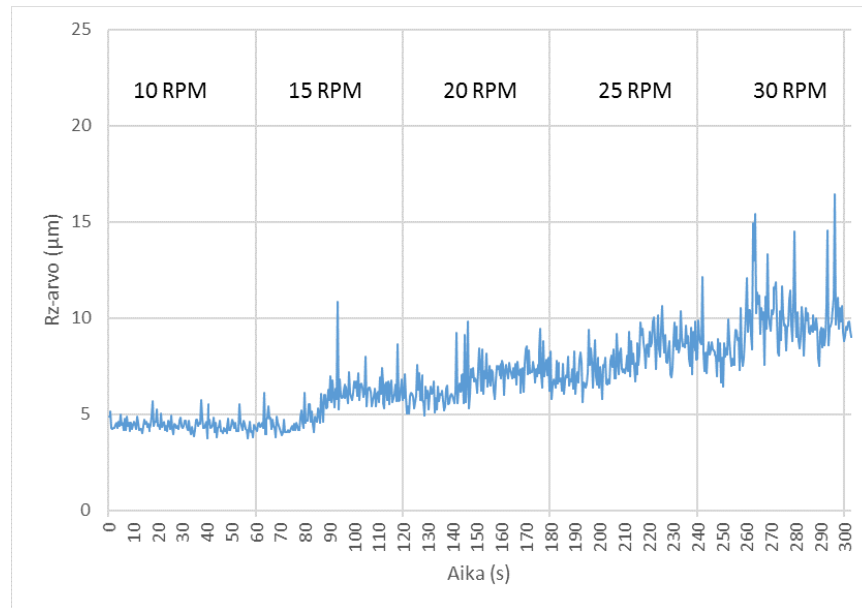
Kuva 56. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 jouduttiin keskeyttämään 220 s jälkeen liian suurten pinnanvaihteluiden takia. Masterbatchilla ei vaikuttanut olevan samaa vaikutusta prosessoitavuuteen kuin LDPE:llä. Vaikeudet LLDPE:n prosessoitavuudessa oli kuitenkin ennustettavissa kirjallisuuden ja aikaisempien kokemusten perusteella.



Kuva 57. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

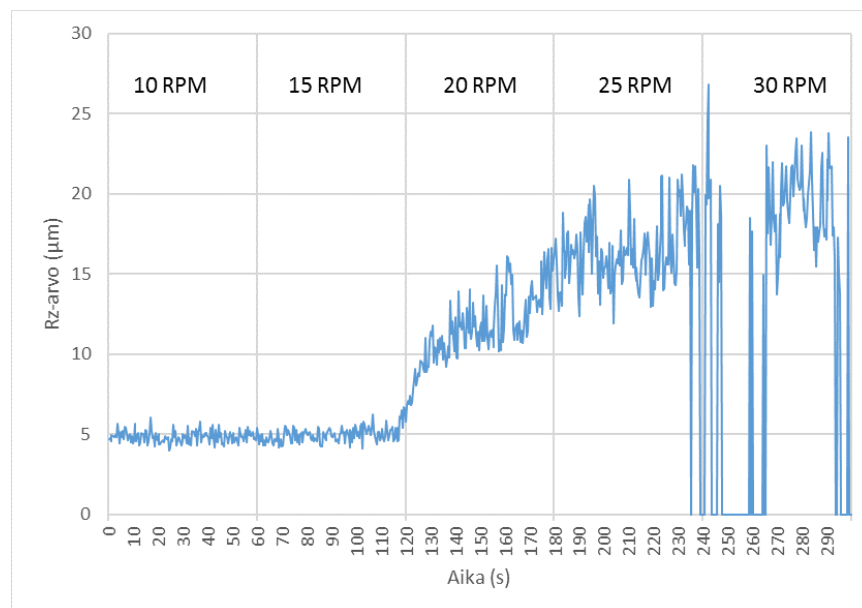
Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti nousevan porrasmaisen käyrän ruuvinpyörimisnopeuden kasvaessa. Käyrän varianssi kasvoi myös tasaisesti mittauksen edetessä.



Kuva 58. Rz arvon muuttuminen 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

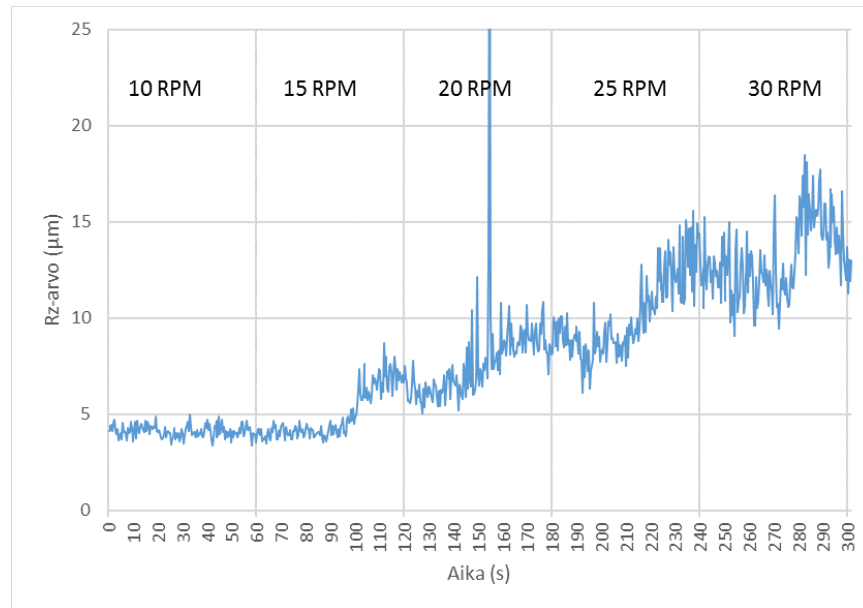
Koeajo 180 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisesti nousevan käyrän muuttamaa piikkiä lukuun ottamatta.

7.4.2 Värjätty LLDPE 195°C lämpötilassa



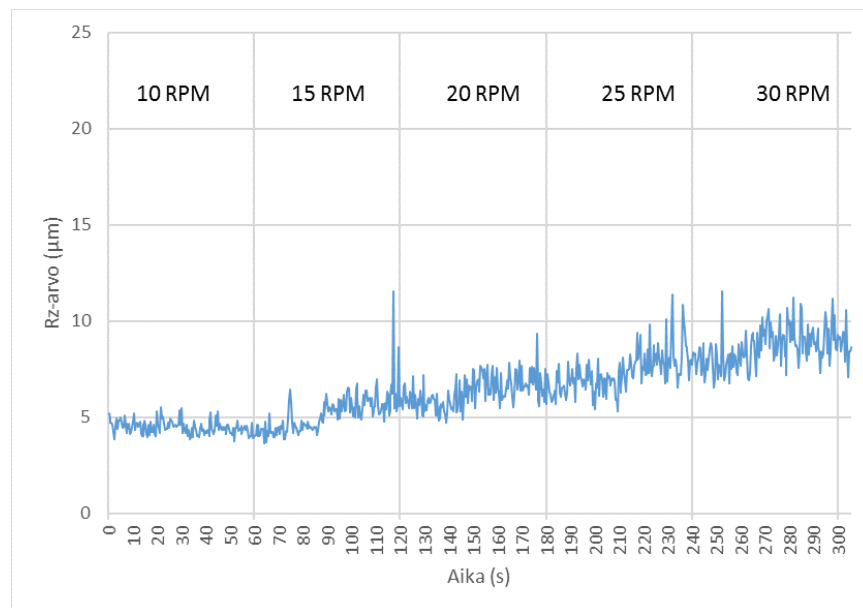
Kuva 59. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 tuotti 120 s asti erittäin tasaisen käyrän. Tämän jälkeen alkoi esiintyä voimakasta sharkskiniä. 240 s alkaen testin loppuun pinnan vaihtelu oli erittäin voimakasta. Tulosten yhteenvedossa esitettynä kuva koeajon kalvoista.



Kuva 60. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

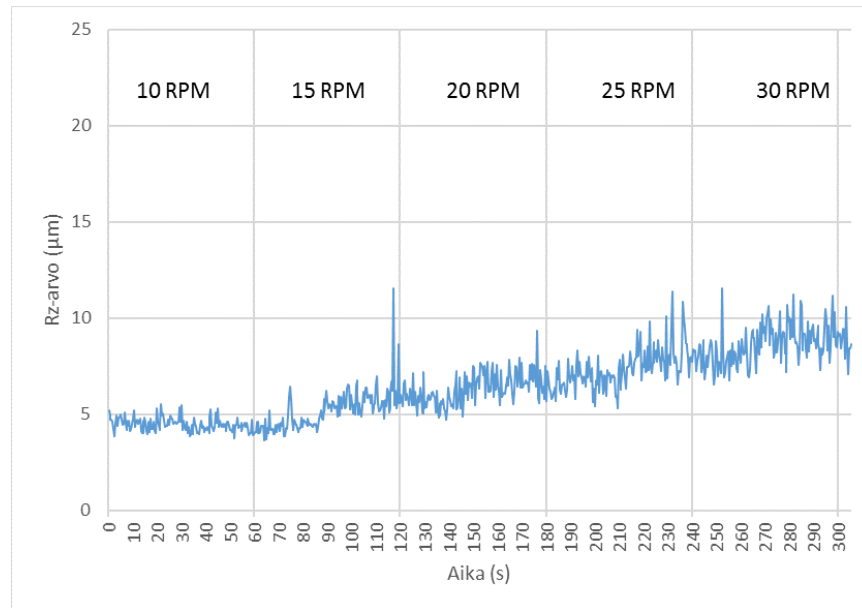
Koeajo 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti porrasmaisen nousevan pinnan-
karheuskäyrän. 150 s kohdalla tuntemattomasta syystä esiintyvä 35 µm suuruinen vir-
hepiikki. Kuvaaja rajattu 25 µm:iin jatkuvuuden takia.



Kuva 61. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

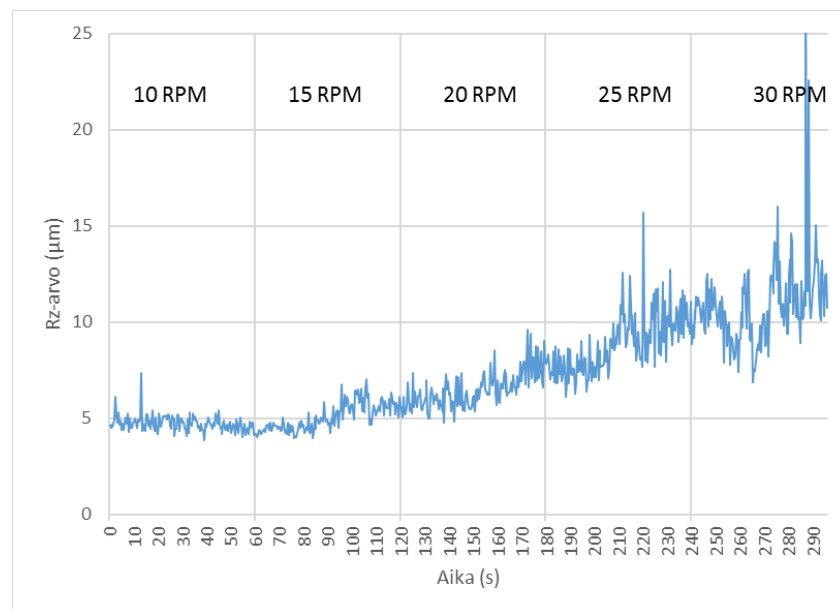
Koeajo 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti tasaisen nousevan pinnan-
karheuskäyrän. Käyrän varianssi kasvaa ruuvinpyörimisnopeuden noustessa.

7.4.3 Värjätty LLDPE 210°C lämpötilassa



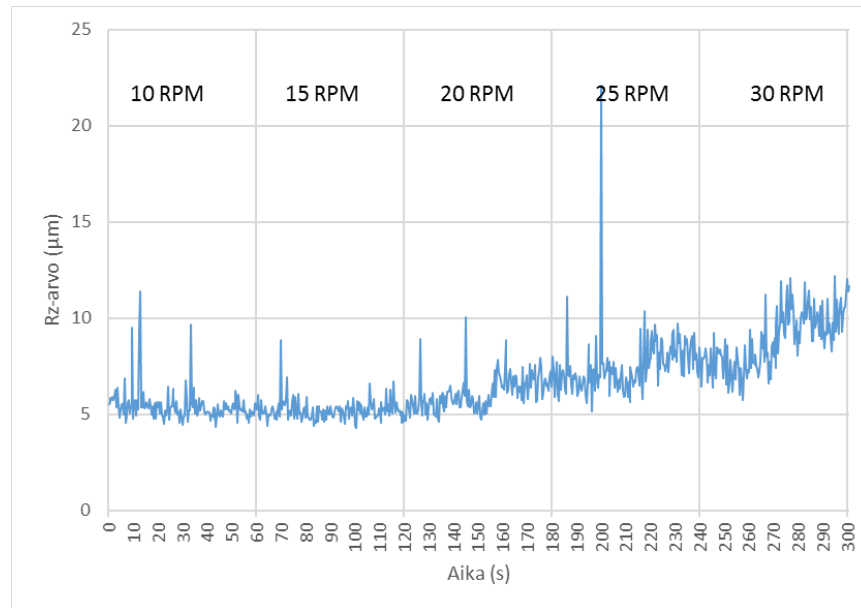
Kuva 62. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 20

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 tuotti tasaisen käyrän 120 s asti. Tämän jälkeen ruuvinpyörimisnopeuden kasvaessa yli 20 alkoi erittäin voimakas kasvu pinnan- karheudessa, joka näkyi suurina vaihteluna käyrässä. Ei merkittäviä muutoksia havait- tavissa silti silmämääräisesti kalvon laadussa.



Kuva 63. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 25

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 25 tuotti tasaisesti nousevan pinnankar- heuskäyrän. Käyrän varianssi kasvoi ruuvinpyörimisnopeuden noustessa. Lisäksi lopus- sa havaittavissa voimakas piikki 290 s kohdalla.



Kuva 64. Rz arvon muuttuminen 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 30

Koeajo 210 °C lämpötilassa vetonopeudella 30 tuotti muutamia piikkejä sisältävän käyrän, joka oli muutoin melko tasainen. 200 s kohdalla tuntematon 22 µm virhepiikki, joka ei näkynyt kalvonlaadussa.

7.5 Koeajojen laskennalliset luvut

Tässä kappaleessa tarkastellaan tarkemmin koeajoista saatuja tuloksia. Raakadatasta saadusta tiedosta on laskettu pinnankarheuden Ra- ja Rz-arvojen aritmeettiset keskiarvot ja lisäksi samoista arvoista on otettu myös keskihajonnat.

Materiaali	LDPE								
Lämpötila (°C)	160			175			190		
Vetonopeus	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Ra keskiarvo (µm)	1.932	1.912	1.255	1.021	1.108	0.883	0.716	0.982	0.691
Ra keskihajonta (µm)	1.039	1.027	0.496	0.516	0.432	0.288	0.260	0.432	0.200
Rz keskiarvo (µm)	15.785	15.185	9.705	8.676	8.603	6.824	6.567	7.610	5.670
Rz keskihajonta (µm)	6.865	6.771	3.222	3.879	2.420	2.122	2.336	2.526	1.237

Taulukko 6. LDPE:n pinnankarheuden laskennalliset arvot

Ensimmäisenä materiaalina on mittausten mukaisesti värjäämätön LDPE. Niin Rz- kuin Ra-arvojen pinnankarheuden keskiarvot pienenevät niin vetonopeuden kuin lämpötilan kasvaessa. Suurempi vetonopeus orientoi kalvoa tehokkaammin sekä tasaa ruuvipyörimisnopeuden kasvattamisesta johtuvaa kalvon paksuuntumista. Sulalämpötilaa kasvatamalla muovin virtaavuus paranee, jolloin prosessoitavuus myös tehostuu.

Materiaali	LLDPE								
	180			195			210		
Lämpötila (°C)	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Vetonopeus	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Ra keskiarvo (µm)	1.069	1.637	1.011	1.103	1.219	1.032	1.036	0.922	0.850
Ra keskihajonta (µm)	0.264	0.591	0.279	0.424	0.324	0.228	0.506	0.347	0.202
Rz keskiarvo (µm)	8.643	12.967	8.165	9.100	9.872	8.419	8.008	7.054	6.733
Rz keskihajonta (µm)	2.374	4.475	1.803	3.497	2.598	1.722	3.831	2.227	1.380

Taulukko 7. LLDPE:n pinnankarheuden laskennalliset arvot

LLDPE ei vaikuta olevan yhtä lämpötilariippuvainen kuin LDPE. Lämpötilan kasvaessa pinnankarheus pysyi melko vakiona, mutta keskiarvot sekä keskihajonnat olivat jo alusta alkaen LDPE:ia alhaisemmat. Tämä tulee hienoisena yllätyksenä, sillä oletuksena oli, että LLDPE:n prosessointi olisi LDPE:ia haasteellisempaa. Vetonopeuden kasvatuksella ei ole myöskään ole merkittävää vaikutusta Ra- tai Rz-keskiarvoille, mutta keskihajonta on huomattavasti pienempi.

Materiaali	Värjätty LDPE								
	160			175			190		
Lämpötila (°C)	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Vetonopeus	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Ra keskiarvo (µm)	1.135	0.803	0.640	0.850	0.778	0.631	0.681	0.687	0.641
Ra keskihajonta (µm)	0.590	0.344	0.206	0.472	0.323	0.199	0.391	0.285	0.224
Rz keskiarvo (µm)	8.667	6.057	4.672	6.496	5.723	4.656	5.738	5.225	4.874
Rz keskihajonta (µm)	4.459	2.438	1.240	3.210	1.903	1.143	3.003	1.649	1.227

Taulukko 8. Värjätyin LDPE:n pinnankarheuden laskennalliset arvot

Värjättyllä LDPE:lla oli huomattavasti paremmat pinnankarheuden arvot verrattuna värjäämättömään LDPE:hen erityisesti alemmilla vetonopeuksilla. Vaikutti että Masterbatchin lisääminen muoviin auttoi siinä suhteessa muovin prosessoitavuutta. Myös värjätty LDPE oli siinä suhteessa lämpötilariippuvaista, että sulalämpötilan kasvaessa pinnankarheus pieneni.

Materiaali	Värjätty LLDPE								
	180			195			210		
Lämpötila (°C)									
Vetonopeus	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Ra keskiarvo (µm)	1.062	1.157	0.935	1.507	1.117	0.878	1.506	1.011	0.894
Ra keskihajonta (µm)	0.489	0.484	0.340	0.920	0.562	0.279	0.963	0.462	0.280
Rz keskiarvo (µm)	8.631	8.527	6.837	10.712	8.019	6.434	10.229	7.137	6.629
Rz keskihajonta (µm)	4.070	3.131	2.115	6.394	3.778	1.740	5.925	2.725	1.798

Taulukko 9. Värjätyin LLDPE:n pinnankarheuden laskennalliset arvot

Viimeisenä mitatulla värjättyllä LLDPE:lla ei ollut merkittävää eroa värjäämättömään LLDPE:hen laskennallisia tuloksia tarkastellessa. Kumpikaan LLDPE ei merkittävästi muuttunut lämpötilan kasvaessa. Vetonopeuden kasvattamisella oli suurempi merkitys pinnankarheuden pienenemisessä kuin värjäämättömällä LLDPE:lla, mutta toisaalta myös tulokset olivat huonompia. Laskennallisista tuloksista ei myöskään käy ilmi, että värjätty LLDPE tuotti silmämääräisesti huonolaatuisinta kalvoa, jos ottaa huomioon pintavirheiden esiintymisen koeajoissa.

Lopuksi on hyvä koota vielä yhteen taulukkoon materiaalivertailuun niin värjätty kuin värjäämättömät materiaalit.

Materiaali	LDPE	LLDPE	Värjätty LDPE	Värjätty LLDPE
Ra keskiarvo (µm)	1.167	1.098	0.761	1.119
Ra keskihajonta (µm)	0.521	0.352	0.337	0.531
Rz keskiarvo (µm)	9.403	8.774	5.790	8.129
Rz keskihajonta (µm)	3.486	2.656	2.252	3.519

Taulukko 10. Laskennallisten tulosten vertailu eri materiaalien kesken

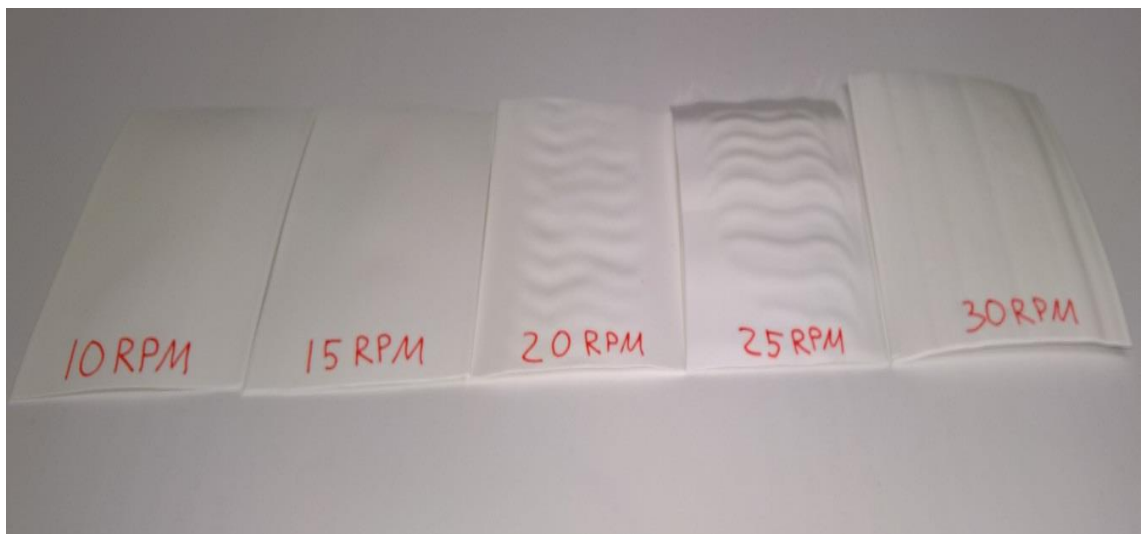
Tulokset vahvistavat johtopäätökset, jotka tehtiin materiaalikohtaisissa laskennallisen lukujen pohdinnoissa. Värjättyllä LDPE:lla oli alhaisimmat pinnankarheuden arvot vertailussa muihin käytettyihin materiaaleihin. Masterbatchin lisäämisellä LLDPE:hen ei ollut prosessoinnin kannalta oletettua vaikutusta, päinvastoin pinnankarheusarvot olivat jopa hieman korkeammat kuin värjäämättömällä LLDPE:lla.

7.6 Pohdintaa tuloksista

Mittavien koeajojen tulosta on haasteellista pyrkiä tuomaan lyhyesti esille. Tavoitteena oli määrittää laitteen kyky mitata kalvon pinnankarheutta. Tässä tavoitteessa onnistuttiin, vaikka kaikki mittaukset eivät täysin onnistuneetkaan. Huomattiin että laitteen mitausväli ei mahdollisesti ole riittävä mittaamaan kaikkea, mitä kalvonvalmistuksessa voi tapahtua. Tähän ei kuitenkaan välttämättä ole edes tarvetta, sillä kyseessä on kuitenkin

tarkka mittalaite, joka on tarkoitettu toimimaan huipputeknologian omaavassa tuotantoympäristössä. Lisäksi silminnähtävän huonon kalvolaadun toteamiseen ei tarvitse mittaanturia eikä näin tarvitse ollakaan.

Toinen tavoite oli saada esille kalvonvalmistuksessa tulevia pintavirheitä, erityisesti sharkskinia sekä pintasulamurtumaa. Tässäkin onnistuttiin vaihtelevalla menestyksellä, sillä vaikka pintavirheitä saatiin esiintymään, mittausten toistettavuus voidaan asettaa kyseenalaiseksi. Tämä johtuu ensinnäkin koeajolaitteistosta, joka on tarkoitettu pienien näytteiden valmistukseen. Tulokset eivät siis välttämättä ole suoraan verrannollisia suuremman mittakaavan kalvonvalmistukseen. Alla olevassa kuvassa esitettynä kalvon pinnankarheuden vaihtelua sekä sharkskinia värjätyyn LLDPE:n koeajosta 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 20.

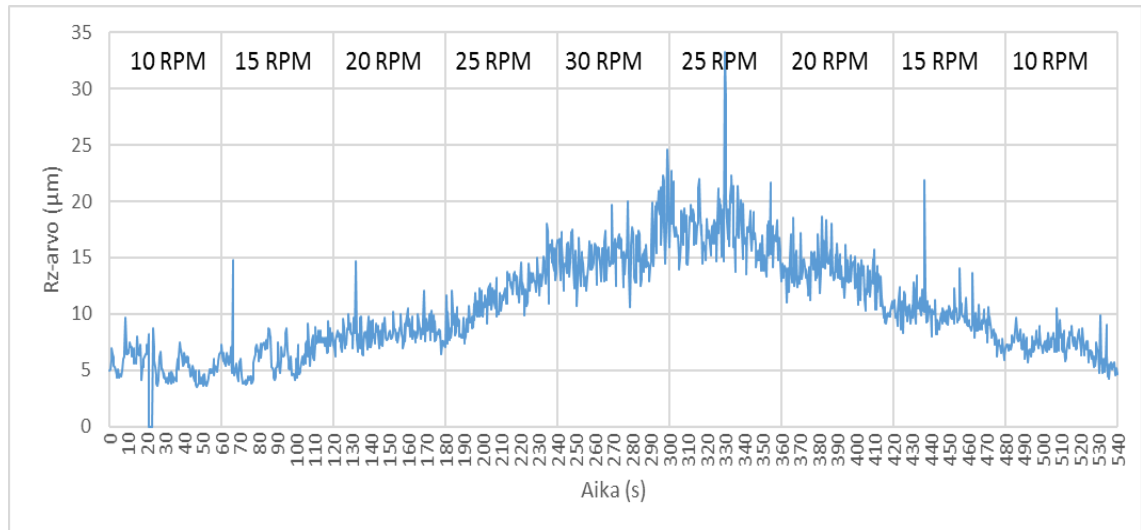


Kuva 65. Näytekuva esiintyvistä pintavirheistä värjätyyn LLDPE:n koeajosta.

Kuten kuvasta nähdään, on kalvon pinnalla tapahtuva pinnanvaihtelu erittäin suurta ja todellisuudessa näin huonolaatuinen kalvo ei todennäköisesti koskaan päätyisi tuotantoon asti. Ottaen huomioon käytettävissä olevan prosessointilaitteiston oli kuitenkin käytettävä suuria vaihteluita prosessiparametreissa, jotta saadaan silmin nähtävien erilaisten kalvotyyppien. Kyseisessä koeajossa 120 s jälkeen eli kun ruuvinpyörimisnopeus on alkaen 20 rpm alkoi kalvossa esiintyä voimakkaana pintavirheinä kalvon pinnalla. Mittauksen edetessä kalvon paksuus kasvoi lisääntyneen sulavirran myötä, joka lisäsi pintavirheen määrää. Viimeinen näyte onkin jo paksuudeltaan niin suuri, että sitä ei välttämättä edes perinteisten termien mukaan voi kutsua enää kalvoksi.

Vaikka mittalaite määrittää keskiarvoja asetulta mittausväliltä, tuloksiin päätyi silti virhemittauksia. Nämä voidaan tulkita virheellisiksi varmuudella, koska raakadatassa lukemat ovat joko negatiivisia tai erittäin suuria yli mittatarkkuuden. Nämä täytyy ottaa huomioon ja mahdollisesti korjata lopputuloksissa.

Mittaustuloksia tarkastellessa on otettava huomioon vaihtuvat prosessointiolosuhteet. Koeajojen aikana kasvatettiin ajan funktiona ekstruuderin ruuvin pyörimisnopeutta, joka sai aikaan pinnankarheudessa nousevan trendin. Vastaavasti pienentämällä ruuvinpyörimisnopeutta saadaan aikaan laskeva trendi pinnankarheudessa. Selvyyden vuoksi on suoritettu vielä koeajo palautuvana eli ruuvin pyörimisnopeutta on alkuun kasvatettu ja sitten vastaavalla koeajojen tahdilla pienennetty takaisin lähtötilanteeseen. Alla esitettyinä kuvassa 66 palautuva koeajo.



Kuva 66. Rz arvon muuttuminen 195 °C lämpötilassa vetonopeudella 20 palautuvana koeajona

Kuvaajasta nähdään, että pinnankarheus laskee takaisin aloitustasolle ruuvinpyörimisnopeutta pienentämällä. Mittauksia voidaan siis suorittaa prosessiparametreja säätämällä haluttuun suuntaan.

8. OPTISEN MITTA-ANTURIN POTENTIAALI

Laitteen mittatarkkuus on erinomainen, se kykenee mittaamaan muovikalvon pinnan-
karheuden mikrometrien tarkkuudella mikä on mittaustekniikan tasolla erinomainen
suoritus. Tarkkuuden mukana tulee kuitenkin yleensä herkkyys ja niin tässäkin tapauk-
sessa. Työn aikana ongelmaksi tulivat mittavirheet, mitkä syntyivät kahdesta syystä.
Ensinnäkin vetonopeutta muuttaessa kalvon paksuus muuttuu, joka vaatii reagointia
mitta-pisteen säädön osalta. Prosessoitaessa kalvoa myös ruuvin pyörimisnopeus vaikut-
taa syntyvään sulavirtaan ja sitä myötä kalvon paksuuteen. Toisaalta myös haetut pinta-
virheet kalvoissa synnyttävät paksuusvaihtelua kalvolle, jonka kone tulkitsee virheeksi
ja pahimmassa tapauksessa sammuttaa mittalaitteen tuhoten siihen mennessä saadun
datan.

8.1 Kehitysideat optiselle mitta-anturilaitteelle

Diplomityön aikana optinen mitta-anturi tuli hyvin tutuksi ja pyynnöstä on tähän koottu
kehittämisehdotuksia laitteen jatkokehitystä ajatellen.

8.1.1 Mittausten herkkyys etäisyydestä

Erilaiset kalvot vaativat prosessiparametreista riippuen eri säädöt, mikä edellyttää käyt-
täjältä tarkkuutta laitteen korkeussäädön suhteen. Jos korkeussäätö ei ole integroituna
laitteeseen, on tarkan mittauksen aikaansaanti erittäin haastavaa. Jotta laitteesta saadaan
täysi potentiaali irti, on huomioitava asiakkaan tarpeet erilaisissa tuotantoympäristöissä
ja tarjottava mahdollisimman helposti integroitavissa oleva pakettiratkaisu tai kattava
palvelutarjonta tuotteen ympärille.

Mittalaitteen on tarkoitus helpottaa tuotantoympäristön toimintaa ja siksi ylimääräiset
säädöt ovat ristiriidassa tuotteen päätarkoituksen kanssa. On pystyttävä tarjoamaan mit-
tausta, joka pystyy huomioimaan erilaiset vaihtelut tuotantoympäristössä ja reagoimaan
niihin ilman häiriötä mittaustuloksiin.

8.1.2 Valmiin raportin tuottaminen

Mittalaitteille kriittinen arviointikriteeri ilmeisen päätarkoituksen eli tarkan ja luotetta-
van mittaustuloksen lisäksi on myös saadun tiedon esittäminen ja muokattavuus. Nykyisel-
lään ohjelma tarjoaa huomattavan määrän mittaustuloksia, mutta nykyisenä tiedon aika-
kautena tiedon täytyy olla mahdollisimman helposti saatavilla. Käyttäjän vastuulle jää

muokata tiedosta haluamansa kokonaisuus, mikä ei teollisessa ympäristössä ole loppujen lopuksi kovin kestävä ratkaisu. Raakadata on toki tärkeä olla saatavilla, mutta mitaustuloksista olisi hyvä olla myös mahdollista saada raportti. Raporttiin olisi hyvä sisältää ainakin seuraavat asiat mittausten osalta.:

- Mittausten keskiarvo sekä keskihajonta
- Minimi ja maksimi arvot mittauksen aikana
- Kuvaaja Rz- ja/tai Ra-arvojen käyttäytymisestä mittauksen datasta
- Kommenttimahdollisuus sekä koeajojen nimeämismahdollisuus

Alla esitetty taulukossa 11 esimerkkiraportti, josta tulee suoraan esille mittauksen tärkeimmät tiedot.

Koeajon tiedot		Kuvaaja	
Materiaali	Borealis FA5223 LDPE		
Koeajon nimi	LDPE_koeajo_1_1		
Testin ajankohta	6/6/2016, 13:01:48		
Koeajon kesto (s)	302		
Prosessiparametrit	190 °C, 25 RPM, 25 V		
Koeajon tulokset			
Ra keskiarvo	0.982		
Ra keskihajonta	0.432		
Ra maksimiarvo	1.903		
Ra minimiarvo	0.369		
Rz keskiarvo	7.61		
Rz keskihajonta	2.526		
Rz maksimiarvo	15.191		
Rz minimiarvo	2.954	Kommentti:	Ei ongelmia mittauksessa

Taulukko 11. Esimerkkiraportti koeajon tulosten esityksestä

8.2 Laitteen potentiaali teollisuudessa

Laitteelle on varmasti kysyntä muovikalvoa valmistavissa yrityksissä, kunhan laitteen ulosanti sekä mittatarkkuus saadaan hiottua sekä pidettyä korkealla tasolla. Yrityksen täytyy kuitenkin olla riittävän suuri, jotta investointi laitteistolle voidaan perustella. Lisäksi tuotteen vaatimusten täytyy olla riittävän korkeat, jotta optisen mitta-anturin käyttö vaaditaan. Erityisesti lääketieteen ja elektroniikan alalla on useita sovelluskohteita, joissa tarkka pinnankarheus on eilinehto tuotteen käytettävyyden kannalta. Myös yleisille käyttöesineille voi olla perusteltua hyödyntää pinnanlaadun nykyistä laajempaa pinnanlaadun tarkastelua esimerkiksi turhan muovijätteen syntymisen välttämiseksi.

8.2.1 Teollisen Internetin applikaatiot

Teollinen Internet on nykypäivän suuri ilmiö. Enää ei ole riittävää saada tieto koneen ja ihmisen välille, vaan tiedon täytyy olla siirrettävissä ja jaettavissa mahdollisimman yksinkertaisesti. Laitteella on huomattava potentiaali toimia Internet of Things-

ympäristössä (IoT), sillä kerätty data on mahdollista siirtää verkon välityksellä välittömästi mobiili- tai työpäätteille erilliseen sijaintiin. Teollisessa ympäristössä prosessien jatkuva monitorointi yhdistettynä tarkkaan tietoon prosessin kulusta on kullanarvoista. Valvojan on mahdollista nähdä prosessin kulku reaaliajassa ja tulevaisuudessa mahdollisesti jopa muuttaa parametreja mobiilisti.

Laitteella on mahdollisuus mullistaa laitevalmistus integroitumalla valmistusyksikköön. Teknologia mahdollistaa koneälyn, jonka voimin laitteisto pystyisi itse analysoimaan omaa tekemistään ja reagoida mahdollisiin pintavirheisiin asetettujen algoritmien mukaisesti.

8.2.2 Mittaustekniikan sovellukset

Tarkoille mittauslaitteille on aina kysyntää, siksi on tärkeää ottaa huomioon mahdolliset erilaiset tekniikan alan sovellukset. Kyseessä olevan luokan tarkkuudelle on kysyntää mittaustekniikan sovelluksissa.

Laitteen potentiaali tiedetään jo kaapelien sekä muovipullojen pinnankarheuden sekä paksuuden tarkastelussa. Seuraava applikaatio voisi olla esimerkiksi suurta tarkkuutta vaativien mekaanisten kulutusosien kuten hammaspyörien tai elektroniikan sovellusten tarkastelu laitteen mittatarkkuutta hyödyntäen.

9. YHTEENVETO

Kaiken kaikkiaan työ onnistui hyvin, sillä laitteen tutkimuspotentiaali tuli todettua ja kalvonvalmistuksessa esiintyviä laatuvirheitä saatiin esiintymään. Toki jälkikäteen ajateltuna asioita olisi voinut tehdä hieman eri tavalla, mutta nykyinen toimintatapa oli perusteltua. Lisäksi tiede ei olisi tiedettä, jos aina saataisiin halutut tulokset ilman yllättäviä tekijöitä.

Laitteen mittatarkkuus on erinomainen, se kykenee mittaamaan muovikalvon pinnan karheuden mikrometrien tarkkuudella mikä on mittaustekniikan tasolla erittäin hyvä suoritus. Tarkkuuden mukana tulee kuitenkin yleensä herkkyys ja niin tässäkin tapauksessa. Työn aikana ongelmaksi tulivat mittavirheet, mitkä syntyivät kahdesta syystä. Ensinnäkin vetonopeutta muuttaessa kalvon paksuus muuttuu, joka vaatii reagointia mitta-pisteen säädön osalta. Prosessoitaessa kalvoa myös ruuvin pyörimisnopeus vaikuttaa syntyvään sulavirtaan ja sitä myötä kalvon paksuuteen. Toisaalta myös haetut pintavirheet kalvoissa synnyttävät paksuusvaihtelua kalvolle, joka vaikeuttaa mittausten suoritusta. Valituilla parametreilla on suuri vaikutus mittausten onnistumiseen, siksi hyvin suunniteltu koeajo on olennaista onnistuneen lopputuloksen kannalta.

Erilaiset kalvot vaativat prosessiparametreista riippuen eri säädöt, mikä edellyttää käyttäjältä tarkkuutta laitteen korkeussäädön suhteen. Jos korkeussäätö ei ole integroituna laitteeseen, on tarkan mittauksen aikaansaanti erittäin haastavaa. Jotta laitteesta saadaan täysi potentiaali irti, on huomioitava asiakkaan tarpeet erilaisissa tuotantoympäristöissä ja tarjottava mahdollisimman helposti integroitavissa oleva pakettiratkaisu tai kattava palvelutarjonta tuotteen ympärille. Mittalaitteen on tarkoitus helpottaa tuotantoympäristön toimintaa ja siksi mittausten suoritusten on oltava mahdollisimman helppokäyttöistä ja sovellettavissa eri käyttökohteisiin. On pystyttävä tarjoamaan mittausta, joka pystyy huomioimaan erilaiset vaihtelut tuotantoympäristössä ja reagoimaan niihin ilman häiriötä mittaustuloksiin.

LÄHTEET

- [1] Giles Jr., H.F., Wagner Jr., J.R. & Mount III, E.M. 1 - Extrusion Process. In: Giles, H.F., Wagner, J.R. & Mount, E.M. (ed.). Extrusion. Norwich, NY 2005, William Andrew Publishing. pp. 1-8.
- [2] Rauwendaal, C. 3 - Extruder Hardware. In: Rauwendaal, C. (ed.). Polymer Extrusion (Fifth Edition). 2014, Hanser. pp. 49-83.
- [3] Seppälä, J., Polymeeriteknologian perusteet. Otatieto Oy, 1997.
- [4] Campbell, G.A. & Spalding, M.A. Single-Screw Extrusion: Introduction and Trouble-shooting. In: Campbell, G.A. & Spalding, M.A. (ed.). Troubleshooting and Analysis of Single-screw Extrusion. 2013, Hanser. pp. 1-22.
- [5] Rauwendaal, C. 2 – Different types of extruders. In: Rauwendaal, C. (ed.). Polymer Extrusion (Fifth Edition). 2014, Hanser. pp. 11-33.
- [6] Heldman, D. & Singh, R. 2014. Introduction to Food Engineering. USA: Elsevier. pp. 743-763
- [7] Sarioglu, A., Hagstrand, P., Månson, J. Fiber Orientation in Multilayer Tubes Processed by a Conical Extruder. Polymer Composites 25(2004) 3. Society of Plastic Engineers. Pp. 331-341.
- [8] Mount III, E. Chapter 6 - Coextrusion equipment for multilayer flat films and sheets. In: Wagner, J.R. (ed.). Multilayer Flexible Packaging. Boston 2010, William Andrew Publishing. pp. 75-95.
- [9] Koekstruuder [WWW] [Viitattu 13.4.2016] Saatavilla:
<http://www.slideshare.net/Instron/fundamentals-of-rheologyprivate>
- [10] Tabatabaei, S., Carreau, P., Abdellah, A. Microporous membranes obtained from PP/HDPE multilayer films by stretching. Journal of Membrane Science 345(2009) 1-2. Pp. 148-159
- [11] Hatzikirioglu, S. G., Migler, K. B. Polymer Processing Instabilities: Control and Understanding. 2005, Marcel Dekker. Pp. 383-426.
- [12] Schöppner, V. & Kloke, P. Compounding. In: Anonymous (ed.). Encyclopedia of Polymer Science and Technology. 2002, John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Maier, C., Haber, T. Polypropylene: The definitive User`s Guide and Databook. 1998, William Andrew Inc. 452p.

- [14] Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Fei, M., Kelly, A., Vera-Sorroche, J., Coates, P. & Brown, E. 2013. Low-cost process monitoring for polymer extrusion. *Transactions of the Institute of Measurement and Control* 0, 0, pp. 382–390.
- [15] Gao, R.X., Tang, X., Gordon, G. & Kazmer, D.O. 2014. Online product quality monitoring through in-process measurement. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63,1, pp. 493–496.
- [16] Rajan, V.V., Wäber, R. & Wieser, J. 2010. Online Monitoring of the Thermal Degradation of POM During Melt Extrusion. *Journal of Applied Polymer Science* 115, pp. 2394–2401.
- [17] Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M., 1999. *Muovitekniiikan perusteet*. Hakapaino Oy
- [18] Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. 2000. *Ruiskuvalu*. Tampere, Plastdata Oy. 358 s.
- [19] Amorfisen ja osakiteisen muovin rakenne. [WWW] [Viitattu 17.7.2016] Saatavilla: <http://www.plasticsdecorating.com/stories/022015/sabreen.shtml#.V5yoGXpdOBk>
- [20] Muovien luokittelu. [WWW] [Viitattu 13.6.2016] Saatavilla: http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/
- [21] Hyvä tietää Muovista Osa 2: Valtamuovit [WWW] [Viitattu 20.7.2016] Saatavilla: <http://polymerik.pp.fi/pdf/Osa2-Valtamuovit.pdf>
- [22] Polyeteenin perusrakenne [WWW] [Viitattu 19.7.2016] Saatavilla: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>
- [23] Polyetyleenilaatujen haarautuneisuus. [WWW] [Viitattu 13.6.2016] Saatavilla: <http://www.ptonline.com/columns/density-molecular-weight-in-polyethylene>
- [24] Järvinen, P. *Muovin suomalainen käsikirja*. 2000. Porvoo. WS Bookwell Oy. 173s.
- [25] Polyeteenin kierrättäminen. [WWW] [Viitattu 26.7.2016] Saatavilla: http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit_ja_ymparisto/muovien_kierratys/
- [26] Witschnigg, A., Laske, S., Kracalik, M., Feuchter, M., Pinter, G., Maier, G., Märzinger, W., Haberkorn, M., Langecker, G.R. & Holzer C. 2010. In-line characterization of polypropylene nanocomposites using FT-NIR. *Journal of Applied Polymer Science* 117, pp. 3047–3053.

- [27] Polypropeenin yleiskaava. [WWW] [Viitattu 24.7.2016] Saatavilla: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polypropylene>
- [28] Polypropyleenin käyttökohteet. [WWW] [Viitattu 25.6.2016] Saatavilla: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polypropene.html>
- [29] Karjalainen, L.& Ramsland, T. Pakkausalan perusoppikirja. 1992. Helsinki. Pakkausteknologiaryhmä Ry. 275 s.
- [30] PET:n rakennekaava. [WWW] [Viitattu 28.7.2016] Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate
- [31] PVC:n rakennekaava. [WWW] [Viitattu 29.7.2016] Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyvinyl_chloride
- [32] Hyvä tietää muoveista Osa 3. Valtamuovit ja muita muoveja. [WWW] [Viitattu 29.7.2016] Saatavilla: <http://polymerik.pp.fi/pdf/Osa3-Valtamuovit-ja-muita-muoveja.pdf>
- [33] Yleisimpien polyamidityyppien rakennekaavat. [WWW] [Viitattu 30.7.2016] Saatavilla: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PA6-PA66.png>
- [34] Murphy, J. Additives for Plastics Handbook (2nd Edition). 2001, Elsevier. 515 p.
- [35] Dealy, J.M& Wissbrun, K.F. Melt Rheology and its Role in Plastic Processing: Theory and Applications. The Netherlands 1999, Kluwer Academic Publishers. 665 p.
- [36] Arkun, Y. & Kayihan, F. A novel approach to full CD profile control of sheet-forming processes using adaptive PCA and reduced-order IMC design. Computers & Chemical Engineering 22(1998)7–8, pp. 945-962.
- [37] Abdel-Bary, E. Handbook of Plastic Films. Smithers Rapra. 2003. pp. 38-243
- [38] Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- [39] Ekstruusiopäällystysprosessi. [WWW] [Viitattu 26.6.2016] Saatavilla: http://www.safepack.com/extrusion_laminate_products.asp
- [40] McKeen, L.W, Film Properties of Plastics and Elastomers. Elsevier Inc. 2012. 77 p.
- [41] Vasile, C., Pascu, M. Practical Guide to Polyethylene. Rapra Technology Limited. 2005. pp. 15-19

- [42] Georgiou, G. Stick-Slip Instability. In: Hatzikiriakos, S.G, Migler, K.B. (eds). Polymer Processing Instabilities: Control and Understanding. 2005. New York, Marcel Dekker. 470 p.
- [43] Shore, J., Ronis, D., Piche, L. & Grant, M. Theory of melt fracture instabilities in the capillary flow of polymer melts. Physical Review E (Statistical, nonlinear, and soft matter physics) Vol. 55, no. 3 (1997) pp. 2976-2992
- [44] Tao, Z. & Huang, J. Observation of melt fracture of polypropylene resins in capillary flow. Polymer 44(2003)3, pp. 719-727.
- [45] Agassant, J.F, Arda, D.R., Combeaud, C., Merten, A., Münstedt, H., Mackley, M.R, Robert, L. & Vergnes, B. (2006). Polymer Processing Extrusion Instabilities and Methods for their Elimination or Minimisation. International Polymer Processing: Vol. 21, No. 3, pp. 239-255
- [46] Muoviteollisuuden jakautuminen maailmassa eri teollisuussegmenttien välillä. [WWW] [Viitattu 30.7.2016] Saatavilla: <http://worldofchemicalsmedia.blogspot.fi/2014/03/chemistry-of-plastics-polymer.html>
- [47] Grover, A., Gupta, A., Chandra, S., Kumari, A. & Khurana, S.M. Polythene and environment. International Journal of Environmental Sciences 5.6 (2015): 1091-1105.
- [48] Muovikalvon valmistuksen tuotantomäärien ennusteraportti. [WWW] [Viitattu 31.7.2016] Saatavilla: <http://www.marketresearchstore.com/news/global-plastic-films-and-sheets-market-142>
- [49] Optisen on-line mittalaitteen teknologia. [WWW] [Viitattu 10.4.2016] Saatavilla: <http://www.focalspec.com/technology/>
- [50] Pinnankarheuden Ra- ja Rz-arvot. [WWW] [Viitattu 30.5.2016] Saatavilla: http://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf
- [51] Koeajoissa käytetyn LDPE Borealis FA5223:n tekniset tiedot. [WWW] [Viitattu 25.4.2016] Saatavilla: <http://www.borealisgroup.com/en/polyolefins/products/Others/FA5223>
- [52] Koeajoissa käytetyn LLDPE Borealis Borstar FB4230:n tekniset tiedot. [WWW] [Viitattu 25.4.2016] Saatavilla: <http://www.borealisgroup.com/en/polyolefins/products/Borstar/Borstar-FB4230/>

- [53] Koeajoissa käytetyn ekstruuderin Extrudex ED-N 30 tekniset tiedot. [WWW]
[Viitattu 27.7.2016] Saatavilla:

<http://www.tut.fi/fi/tietoayliopistosta/laitokset/materiaalioppi/tutkimus/tutkimuslaitteet/polymeerien-prosessointi/extrudex-ekstruuder/index.htm>