

Muoviteollisuusyrityksen tuotantoprosessin kehittäminen

Rosa Ekman

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2024

Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

EKMAN, ROSA:
Muoviteollisuusyrityksen tuotantoprosessin kehittäminen

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Huhtikuu 2024

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää vaihteluvälit ekstruuderin sylinterin ja suuttimen lämmitysvastusten lämpötiloille ekstruusioprosessin energia-, kustannus- ja materiaalitehokkuuden parantamiseksi ja valmistettujen tuotteiden laadun stabiloimiseksi. Sulattamislämpötila vaikuttaa merkittävästi valmiin tuotteen laatuominaisuuksiin, kuten iskulujuuteen, lommahdukseen sekä rengasjäykkyyteen. Syöttölämpötilat vaihtelevat raaka-aineittain, eli lämpötilaikkunat täytyy laskea tuotekohtaisesti. Työn toimeksiantaja oli muoviteollisuusyritys Jita Oy.

Lähtötilanteessa toimeksiantajan ekstruuderiiin säädetyt vastusten lämpötilat vaihtelevat satunnaisesti operaattorikohtaisesti, mikä johtaa valmiiden tuotteiden laatuominaisuuksien vaihteluun. Tavoitteena oli laskea optimaaliset lämpötilat, jotka tuotantolinjaston operaattorit jatkossa asettavat ekstruuderiiin. Aineistona käytettiin tuotetestausten perusteella erityisen hyvälaatuisten tuotteiden ajoarvoportteja, joihin on kirjattu ylös tuotekohtaiset prosessiarvot. Aineisto sisälsi neljällä eri raaka-aineella valmistettuja tuotteita.

Tulosten perusteella ekstruusioprosessin vastuskohtaiset lämpötilaikkunat ovat melko pienet, eli laadukkaan tuotteen valmistamiseksi prosessin lämpötilat täytyy säätää tarkasti. Joillekin vastuksille on säädetty hyvin vaihtelevia arvoja, mistä kertoo suuri lämpötilojen keskivaihtelu. Ekstruuderin alku- ja loppupään lämpötilat vaihtelivat raaka-aineella A enemmän keskiosaan nähden, ja lisäksi ekstruuderin ulommaisiin lämmitysvastuksiin on säädetty hieman alhaisempi lämpötila ekstruuderin sulatus- ja sekoitusvyöhykkeen vastuksiin nähden.

Tulosten luotettavuus voi parantua huomattavasti otosten määrän kasvaessa. Opinnäytetyön tutkimusta varten käytettävissä oleva aineisto sisälsi vain muutamman B-, C- ja D-raaka-aineiden ajoarvoportin, joten näiden raaka-aineiden analyysit ovat hyvin yksipuoliset.

Asiasanat: ekstruusio, suulakepuristus, korrukointi, polypropeeni, polyeteeni

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Bioproduct engineering

EKMAN, ROSA:
Developing a Production Process for a Plastic Industry Company

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 5 pages
April 2024

The aim of the thesis was to determine the ranges for the extruder's adjustable temperatures specified by the product. Adjusting the temperatures of the extruder heating resistors affects efficiency of the process and the quality characteristics of the finished product. This thesis was commissioned by Jita Oy.

At first, the process operators adjust random temperatures to the extruder resulting in variations in the quality characteristics of the finished products. Based on the given product-specific process values reports, optimal temperatures were calculated. The reports included only those products for which the product testing results were excellent.

For some resistors, very variable values have been set. With polypropylene A the first and last temperatures of the extruder varied more compared to the central part. In addition, the outer heating resistors of the extruder have been adjusted to slightly lower temperatures compared to the resistors in the extruder melting and mixing zone.

Based on the results, the resistance-specific temperature windows of the process are quite small, but for some resistors have been set variable temperatures. The reliability of the results would be greatly improved as the number of samples increased since there were only few process reports for B, C and D polypropylenes.

Key words: extrusion, corrugation, polypropylene, polyethylene

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	JITA OY	8
3	MUOVITUOTTEIDEN VALMISTUS EKSTRUUSIOLLA	9
	3.1 Muovien jaottelu ja työstämismenetelmät	9
	3.2 Putkiekstruusiosprosessi	10
4	POLYPROPEENI JA POLYETEENI	15
	4.1 Polypropeeni (PP)	16
	4.2 Polyeteeni (PE-HD).....	17
5	RAAKA-AINEIDEN JA TUOTTEIDEN TESTAAMINEN	19
	5.1 Muovituotteiden testaaminen	19
	5.1.1 Rengasjäykkyys.....	20
	5.1.2 Iskulujuus	21
	5.1.3 Lommahduskoe	22
	5.1.4 Uunikoe	22
	5.1.5 Dimensiot	23
	5.1.6 Korkean lämpötilan jaksot	23
	5.1.7 Virumiskestävyys.....	24
	5.2 Raaka-aineen testaaminen	24
	5.2.1 Lämpötila.....	24
	5.2.2 Sulaindeksi	26
	5.2.3 Sisäinen paineenkestävyys	27
	5.2.4 Hapettumisaika.....	27
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	29
7	AJOARVORAPORTIT	30
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	31
	LÄHTEET.....	32
	LIITTEET	34
	Liite 1. Ajoarvoraportin mallikappale	34
	Liite 2. Materiaalin A taulukko	35
	Liite 3. Materiaalin B taulukko	36
	Liite 4. Materiaalin C taulukko.....	37
	Liite 5. Materiaalin D taulukko.....	38

ERITYISSANASTO

Amorfinen	kiinteä materiaali, jonka rakenne ei ole kiteinen
Ekstruusio	muovintyöstömenetelmä, jossa ekstruuderin sisällä pyörivä ruuvi ja lämpövastukset sulattavat muovin, minkä jälkeen muovi puristetaan suuttimesta läpi haluttuun muotoon
Granulaatti	rakeisessa muodossa oleva muovimassa
Hopperi	ekstruuderin kartion mallinen syöttöastia
Inertti	aine, joka ei reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa
Plastisointi	muovimassan saattaminen sulaan, muovattavaan muotoon
Reologia	materiaalin virtausta ja muodonmuutosta tutkiva oppi
Termoplastinen	lämmön avulla muovattava materiaali
Viruminen	materiaalin hidas, palautumaton muodonmuutos

1 JOHDANTO

Muovituotteita voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, kuten ekstruusiolla, rotaatiovalulla, puhallusmuovauksella tai lastuavalla työstöllä. Ekstruusiomenetelmä sopii tuotteille, kuten viemäröintiputkille tai kalvoille, joille halutaan toistuvan muotoinen profiili. Ekstruusioprosessissa muoviraaka-aine syötetään ekstruuderin, jonka sisällä pyörivä ruuvi ja lämpövastukset sulattavat ja työntävät muovisulan ekstruuderin suuttimen läpi haluttuun muotoon. Ekstruuderin jälkeen tuotantolinjassa sijaitsevat esimerkiksi korrukaattori putken aaltomaisen profiilin muovaamiseen sekä jäähdytysallas muoviputken jäähdyttämiseen kiinteäksi. (Järvinen 2016; Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 1999)

Ekstruuderin ja muiden tuotantolinjaston laitteiden säätäminen tuote- ja raaka-ainekohtaisesti on tärkeää prosessin optimointia varten. Tärkeimmät säädettävät prosessiarvot ovat ekstruuderin lämpövastukset, sillä vääränlaiset lämpötilasäädöt aiheuttavat esimerkiksi ekstruuderin nykimistä johtaen epätasaiseen putken seinämän paksuuteen, heikentyneen putken lämmönkestävyyden, putkiprofiilin painumisen, karheen ulko- tai sisäpinnan putkeen tai liian suuren lämmönpoiston prosessista. (Giles, Wagner & Mount 2005)

Jita Oy:n putkiekstruusioprosessien prosessiarvot kirjataan ylös ajoarvoraportille prosessin hallinnan ja tuotekohtaisten ominaisuuksien tarkastelemiseksi. Ajoarvoraporttiin kirjataan esimerkiksi prosessoitavan massan paine ja lämpötila sekä ekstruuderin sylinterin ja työkalujen lämpötilat, jotka säädetään prosessioperaattorien toimesta. Säädettävät lämpötilat vaihtelevat nykytilanteessa operaattorin asettamien satunnaisten arvojen mukaisesti, mikä saattaa johtaa valmiin tuotteen laatuominaisuuksien vaihteluun. Laatuominaisuudet selvitetään raaka-aineesta, toimeksiantajan tapauksessa polyeteenistä (PE) ja polypropeenista (PP), ja valmiista tuotteista standardien mukaisilla mittauksilla, joista tärkeimpiä ovat esimerkiksi rengasjäykkyys, iskulujuus, lommahduskoe sekä sulaindeksi.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ne ekstruuderin sylinterin ja työkalujen käsin säädettävien lämpötilojen keskiarvot, joiden sisällä valmistettu tuote on saanut tärkeimmistä standardien mukaisista tuotetesteistä erinomaisen tuloksen.

Opinnäytetyössä tutkitaan laadullisesti erinomaisten tuotteiden ajoarvoraportteja, joista taulukoidaan ekstruuderien sylintereille ja työkaluille säädetyt lämpötilat ja lasketaan niiden keskiarvot ja keskihajonnat. Laskelmien perusteella saadaan lämpötilavyöhykkeet, eli ne arvot, joilla jatkossa prosessioperaattorit aloittavat uudet vastaavan tuotteen prosessiajot. Keskiarvot ja keskivirheet lasketaan myös korrukaattorin paineen syöttöarvoille. Syöttöarvojen optimointi on tulevaisuudessa suunnitteilla myös muille Jitan tuotantolinjoille. Opinnäytetyö parantaa tuotantoprosessin tehokkuutta, sillä laskettujen lämpötilavyöhykkeiden ylläpitäminen prosessissa stabiloi valmistettujen tuotteiden laatua ja ekstruuderin hyötysuhdetta.

2 JITA OY

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Virroilla sijaitseva muoviteollisuusyritys Jita Oy. Vuonna 1979 perustettu yritys valmistaa pääasiassa muoviputkia, maanrakennuskaivoja sekä jätevesijärjestelmiä, minkä lisäksi muita yrityksen tuotteita ovat kompostorit, kuivakäymälät sekä laiturit. Tärkeimmät yrityksen asiakkaat ovat infrarakentamisessa, pohja- ja tienrakentamisessa, yksityistaloudessa sekä maataloudessa. (Jita n.d.)

Alun perin Jita on keskittynyt massiiviseinämaisten eli yksikerroksisten muoviputkien valmistukseen, mutta 1980-luvun lopulla yrityksessä aloitettiin lisäksi tuplarakenteisten muoviputkien ja maanrakennuskaivojen tuottaminen. Massiiviseinämaisten putkien raaka-aineena käytettiin alun perin polyvinyylidikloridia PVC:tä, jonka käyttö väheni uusien tuotteiden siirtyessä tuotevalikoimaan. Nykyään Jitan valmistamien tuotteiden raaka-aineita ovat ainoastaan korkeatiheyksinen polyeteeni PE-HD ja polypropeeni PP. (Jita n.d.)

Vuonna 1990 Jita Oy liitettiin Uponor-konserniin, joka on yksi Euroopan johtavista käyttövesi-, lämmitysjärjestelmä- sekä yhdyskuntatekniikan toimittajia. Uponorin Suomen toiminta jakautuu talotekniseen sekä yhdyskuntatekniseen tuotevalmistukseen, ja näistä Jita Oy kuuluu Uponor Infra Oy:n yhteyteen. (Jita n.d.)

Vuonna 2022 yrityksen liikevaihto oli 20,1 miljoonaa euroa, joka on 3,8 % vähemmän kuin edellisellä vuonna. Liikevoiton määrä samana vuonna oli 1,6 miljoonaa euroa. Yrityksen omavaraisuusaste kasvoi 50 prosenttiin vuonna 2022 edellisen vuoden 42 prosentista. (Asiakastieto n.d.)

3 MUOVITUOTTEIDEN VALMISTUS EKSTRUUSIOLLA

3.1 Muovien jaottelu ja työstämismenetelmät

Muovit voidaan jakaa esimerkiksi työstö- ja rakenneominaisuuksien mukaan kerta- ja kestopuoveihin. Kesto- eli termoplastisia muoveja voidaan paineen ja lämmön avulla sulattaa ja muotoilla uudelleen halutuksi tuotteeksi, mutta kertamuovien rakenne estää niiden uudelleenmuotoilun. Kertamuovin kovettuessa muodostuu siihen kemiallinen rakenne, joka uudelleen lämmitettäessä rikkoutuu niin, ettei sen ole mahdollista palautua alkuperäiseksi muovin jäähdytyä. (Järvinen 2016)

Kestomuovit voidaan edelleen jakaa amorfisiin ja osakiteisiin muoveihin, sekä kerta- ja kestopuovit valtamuoveihin, teknisiin muoveihin sekä erikoismuoveihin. Osakiteisillä muoveilla on kiinteässä muodossa polymeereille tyypillinen kiteinen rakenne, mutta amorfisille muoveille kiderakennetta ei muodostu. Amorfisia valtamuoveja ovat esimerkiksi polyvinyylidikloridi PVC ja polykarbonaatti PC ja osakiteisiä valtamuoveja ovat esimerkiksi polyeteeni PE ja polypropeeni PP. Kertamuoveista käytetyimmät valtamuovit ovat tyydyttämätön polyesteri UP ja bakeiliitti PF. Opinnäytetyössä tutkitaan polyeteeniä ja polypropeenaa. (Järvinen 2016)

Muovia voidaan työstää erilaisilla menetelmillä riippuen esimerkiksi käytetystä raaka-aineesta ja valmiin muovikappaleen käyttökohteesta. Muovintyöstömenetelmiä ovat ekstruusio, puhalluskalvoekstruusio, puhallusmuovaus, reaktiovalu, ruiskuvalu, rotaatiovalu, 3D-tulostus, tyhjiö- ja lämpömuovaus, solumuovituotteiden valmistus sekä muovien lastuava työstö ja syväveto. (Järvinen 2016)

Termoplastisten muovien muovauksen peruseriaatteena on kiinteässä olomuodossa olevan raaka-aineen sulatus ja jäähdytys haluttuun muotoon (kuvio 1). Muovausprosessia voidaan toistaa useasti, kuitenkin huomioiden raaka-aineen laatuominaisuudet, jotka voivat heikentää prosessoinnin tai tuotteen käytön aikana. (Rao 2014, s.11)



KUVIO 1. Termoplastisen muovin yksinkertainen muovausprosessi

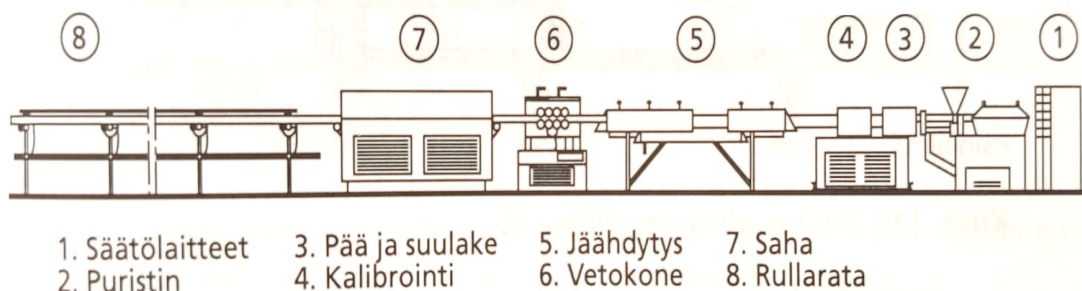
3.2 Putkiekstruusiosprosessi

Ekstruusio- eli suulakepuristusmenetelmä tarkoittaa jatkuvaa muovinvalmistusta, jonka eri tyyppejä ovat puhalluskalvo-, tasokalvo-, levy-, putki-, profiili-, letku- ja kaapeliekstruusio. Ekstruusiossa valmistetaan pääasiassa putkia (kuva 1), profiileja, kaapeleita, filmejä ja tankoja. (Järvinen 2016). Tässä kappaleessa keskitytään ensisijaisesti putkiekstruusioon.



KUVA 1. Erityyppisiä korrukoituja putkia (Jita n.d.)

Eri ekstruusio menetelmien linjastot poikkeavat toisistaan, mutta niitä kaikkia yhdistää ekstruuderin. Ekstruusion periaatteena on puristaa ekstruuderin sisällä sijaitsevalla ruuvilla massaa suulakkeen läpi haluttuun muotoon. Suulakepuristusmenetelmällä valmistettavien putkien konelinjasto (kuva 2) koostuu ekstruuderista, jäähdytysosasta, vetäjästä, putken katkaisulaitteesta sekä putkipöydästä. Lisäksi konelinjastoon kuuluu korrukaattori, mikäli putket korrukoidaan eli putkien pinta muokataan aaltomaiseksi. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 1999, s. 98)



KUVA 2. Konelinjasto putkiekstruusiolle (Kurri ym. 1999, s. 113)

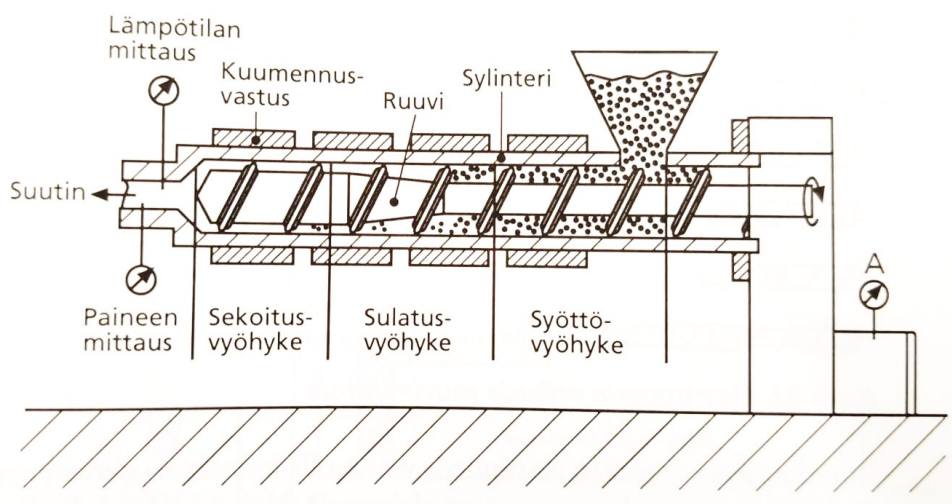
Ennen muovin työstämistä polymeeriin sekoitetaan vaadittavat lisäaineet ja massa tarvittaessa kuivataan. Joissakin tilanteissa lisäaineet sekoitetaan muovi-raaka-aineeseen ekstruuderin sisällä. Lisäaineita voivat olla esimerkiksi UV-säteilyn tai lämmön stabilisaattorit, väriaineet, antistaatit, täyteaineet, palonestoaineet tai lujiteaineet. Mikäli muoviraaka-aine säilytetään muussa kuin huoneenlämpötilassa, täytyy se kuivata mahdollisen kondensaatioveden poistamiseksi. (Kurri ym. 1999, s. 25–33)

Muovi syötetään ekstruuderin yleensä granulaatteina. Yleisimmät ekstruuderityypit ovat painovoimaisesti toimivia ratkaisuja, joissa työstettävä materiaali imeetään alipaineella säiliöistä ja syötetään valmiiksi sekoitettuna hopperiin ekstruuderin syöttöaukon yläpuolelle, jolloin materiaali kulkeutuu ekstruuderin sisälle. Kuvassa 3 on granulaattien ja lisäaineiden syöttöön tarkoitettuja laitteistoja. (Gilles, Wagner & Mount 2005, s. 35 ja 83)



KUVA 3. Granulaattien ja lisäaineiden syötön laitteistoja (Kuva: Rosa Ekman)

Ekstruuderin plastisoi sinne syötetyn muovin tasaiseksi materiaalisulaksi. Ekstruuderin sylinterin sisällä on pyörivä ruuvi, jonka pyörimisen aiheuttama kitka sekä ekstruuderin sisällä vallitseva paine ja sylinterin seinämissä sijaitsevat kuumennusvastukset sulattavat muovin (kuva 4). Ruuvi pyöriessään sekoittaa sulanutta muovimassaa ja ruuvien suutinta kohden pienenevät kiertet nostavat sulan muovin painetta. Ekstruuderin seinämien lämmittimet ohjaavat massan lämpötilaa ekstruuderin eri vyöhykkeissä, jotta muovisula ei ylikuumene. Ekstruuderin vyöhykkeet hopperista suuttimelle ovat syöttövyöhyke, sulatusvyöhyke ja sekoitusvyöhyke. Syöttövyöhykkeessä siirretään ja esilämmitetään raaka-aineita, sulatusvyöhykkeessä plastisoidaan ja puristetaan raaka-ainetta ja sekoitusvyöhykkeessä sekoitetaan ja kuljetetaan muovisulaa suuttimelle. (Järvinen 2016; Giles, Wagner & Mount 2005, s. 16; Rao 2014, s. 28–29)



KUVA 4. Ekstruuderin rakenne (Kurri ym. 1999, s.99)

Ekstruuderissa täytyy olla lopputuotetta vastaava suutin sekä kalibroitilaite. Suutin on tuotteen muotoa vastaava työstöväline, jonka läpi kulkiessaan profiili saa melkein lopullisen kokonsa ja muotonsa. Suuttimesta putkiprofiili kulkeutuu kalibroitityökaluun, jossa putki kalibroidaan ylipaine-, alipaine- tai vetokalibroinnilla. Kalibroinnin lopputuloksena putken lopullinen tarkka koko ja muoto määräytyvät. (Kurri ym. 1999, s. 113–115) Korrukoidun putken kalibrointi tapahtuu korrukaattorissa (kuva 5), joka muovaa putken profiiliin aaltomaista kuviota korrukointimuottien ja paineen avulla. Korrukointimuottien alipaine ja työntävä ylipaine saavat sulan muovimassan vetäytymään muotopaloja vasten kunnes massa on

jäähtynyt. Korrukaattorin keskellä on hylsy, jonka ympärillä kulkevan putken sisäosa muovautuu samalla sileäksi. (Lamminmäki 2024)



KUVA 5. Korrukaattorista vedettävä putki aaltomaisella profiililla (Kuva: Rosa Ekman)

Korrukaattorin jälkeen putki vedetään jäähdytysaltaan läpi, jossa jäähdytys tapahtuu suihkuttamalla putken päälle kylmää vettä tai harvemmin ilmaa. Putki tulee ehdottomasti jäähdyttää tasaisesti ja huolellisesti käyrityksen estämiseksi, sillä jäähtyessään muovimassa kutistuu hieman. Liian nopea ja epätasainen jäähdytys muodostaa osakiteisille muoveille alhaisen ja pienen kiderakenteen. Tällöin putken mahdollisesti lämmitessä myöhemmin kiteiden koko kasvaa, mikä johtaa tilavuuden ja koon muutokseen sekä mahdolliseen käyritykseen. Lisäksi pieni kiderakenne heikentää valmiin tuotteen kestävyysominaisuuksia. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 6–7)

Sulaa putkea vedettäessä putken polymeerirakenteen molekyyliketjut ohjautuvat konelinjaston suuntaisiksi, jolloin putkella on paremmat taivutus- ja veto-ominaisuudet poikkisuuntaan verrattuna. Vetämiseen tarkoitetun laitteen vetonopeus ja massan kulkemisnopeus ekstruuderissa vaikuttavat valmiin putken kokoon ja yhtenäiseen muotoon: mikäli putki esimerkiksi liukuu tai vetäjä vetää putkea epätasaisesti, putken paksuusprofiili ei ole tasainen tai putki voi olla vääntynyt. Mikäli putken vetäjä on tuotantolinjassa vasta jäähdytysaltaan jälkeen, muovi on jo kiinteää, eikä muovin polymeeriketjuja voida enää suunnata linjan suuntaisiksi. Tällöin muovimassan lopullinen muoto saavutetaan jo korrukaattorissa. Vetäjä vetää

putken ekstruusiolinjaston läpi, minkä jälkeen putki ajetaan edelleen katkaisulaitteelle ja sieltä lopuksi käsittelypöydälle. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 5–7)

Putkiverkostoja muodostetaan kiinnittämällä putkia toisiinsa muhveilla. Muhvi on kahden putken välinen muovinen liitinosa, jolla putkien liitoskohta saadaan hiekkatiiviiksi. Vesitiiviin liitännän aikaansaamiseksi muhvauksen yhteydessä täytyy liitokseen lisätä tiiviste. Yleinen muhvausmenetelmä on kitkahitsaus, jolloin muhvi saatetaan nopeaan pyörimisliikkeeseen ja työnnetään hitaasti putken päälle. Tällöin pyörimisliikkeen muodostava kitka muhvin ja putken pintojen välille sulattaa pintojen muovia. Kun muhvi on työnnetty tarpeeksi syvälle putken päälle, pysäytetään muhvin pyöriminen, jolloin pinnoista sulanut muovi jäähtyy muodostaen yhtenäisen ja rajattoman rakenteen. Muita usein käytettyjä muhvin hitsausmenetelmiä ovat esimerkiksi muhvin ruiskuvalaminen valmiin putken päähän tai muhvin muovaaminen putkeen tuotantolinjan korrukaattorissa. Lisäksi on mahdollista ainoastaan työntää putken päähän hiekkatiivis kynsimuhvi. (Lamminmäki 2024)

Lisäksi linjaston lopussa putket sahataan halutun pituisiksi kappaleiksi. Muita toissijaisia käsittelyitä tuotteille on reikien poraaminen tai viiltäminen (salaojaputket), pintojen merkkimaalaus tai etikettien liimaus. Valmis putki ohjataan ratapöydälle (kuva 6) varastointia, pakkausta ja lähetystä varten. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 7)



KUVA 6. Valmis putki ratapöydällä varastointia varten (kuva: Rosa Ekman)

4 POLYPROPEENI JA POLYETEENI

Jitan kolmannella konelinjastolla valmistettavista korrukoiduista putkista kaikki valmistetaan polypropeenista. Muilla konelinjastoilla tuotteiden raaka-aineena käytetään polypropeenin lisäksi myös polyeteeniä.

Raaka-aineille on useita raaka-ainetoimittajia, joten toimeksiantajan käyttämien materiaalien koostumus vaihtelee hieman toisiinsa nähden. Raaka-aineiden koostumus, kuten lisäaineet ja niitä raaka-aineeseen lisätty määrä, vaikuttaa esimerkiksi raaka-ainemassan sulamislämpötilaan ja kiteisyyteen. Mikäli prosessiarvot säädetään jokaiselle raaka-aineelle samanlaisiksi huomioimatta niiden koostumusta, vaihtelevat myös valmiiden tuotteiden tuoteominaisuudet huomattavasti.

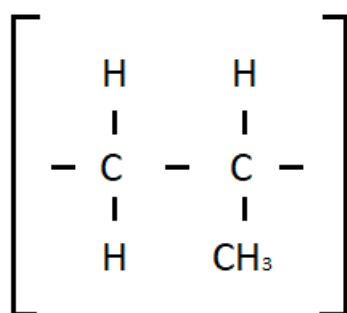
Mitä pienempi kide on, sitä tiheämpi koostumus kiteellä myös on. Kidekoon suurentuessa muovituotteen iskulujuus, jäykkyys ja myötölujuus siis laskevat, mutta toisaalta kimmoisuus kasvaa. Kidekokoon voidaan vaikuttaa jäähdyttämisen nopeudella: nopea jäähdytys takaa pienen kiteen ja hitaasti jäähdyttämällä kidekoko kasvaa. Kun osittain kiteinen polymeeri lämmitetään riittävän paljon, rikkoutuvat kiteet ja siten polymeerin fysikaaliset ominaisuudet, kuten viskositeetti ja tiheys, muuttuvat. Pienet kiteet hajoavat matalammassa lämpötilassa. Liian lyhyt jäähdytys johtaa tuotteen kiteytymisen jatkamiseen, mikä johtaa tuotteen mittojen kutistumiseen. (Kurri ym. 1999, s. 44–50)

Kiteisyyden lisääminen nostaa tuotteen sulamislämpötilaa, vetolujuutta, jäykkyyttä ja kovuutta, parantaa kemikaalien kestokykyä sekä lisää jännityssäröilyä, tiheyttä ja kutistumaa. Toisaalta kiteisyyden lisääminen huonontaa kaasujen ja vesihöyryn läpäisevyyttä, iskusitkeyttä ja läpinäkyvyyttä. Tuotteiden kiteisyyteen ja siten tuotteen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa valitsemalla tuotteelle ja prosessiin sopivia raaka-aineita. Kiteisyyttä vähentävät esimerkiksi pehmittimet, lujitteet, väriaineet, stabilisaattorit, seosaineet sekä polymeerin haaroittunut rakenne. (Kurri ym. 1999, s. 50)

4.1 Polypropeeni (PP)

Polypropeeni (PP) on valtamuoveihin kuuluva osakiteinen muovi. Polypropeeni on myös kestumuovi, eli sitä voidaan lämmön tai paineen avulla muovata uudelleen haluttuun muotoon. Polypropeeni muistuttaa ominaisuuksiltaan hyvin paljon korkeatiheyksistä polyeteeniä, mutta on paremmin prosessoitavissa ja kestää paremmin lämmönvaihteluita. Polypropeeni on hyvin monipuolinen muovi, ja nykyään polypropeenista valmistetaan erityisesti auton sisäosia, erilaisia kuituja sekä pakkauksia. Polypropeenikuiduista voidaan valmistaa esimerkiksi mattoja, teollisuussäkkejä, köysiä tai huonekalukankaita. (Järvinen 2008)

Polypropeenit (kuva 7) jaetaan homopolymeereihin, blokkikopolymeereihin ja satunnaiskopolymeereihin. Polypropeenin perinteinen homopolymeerimuoto muistuttaa ominaisuuksiltaan korkeatiheyksistä polyeteeniä, mutta on vähemmän liukas ja kestää paremmin lämpöä. Lisäksi polypropeeni kestää huonosti pakkasta, mutta toisaalta sillä on erinomaiset saranaominaisuudet. Polypropeenia työstehtään useimmiten ruiskuvalu- tai ekstruusiomenetelmällä: ekstruusiassa käytetään yleensä polypropeenin homopolymeerityyppejä ja ruiskuvalumenetelmässä blokki- ja satunnaiskopolymeerejä. Joissakin tapauksissa ekstruusioprosesseissa voidaan käyttää kopolymeerejä niiden hyvän iskulujuuden takia. (Järvinen 2016)

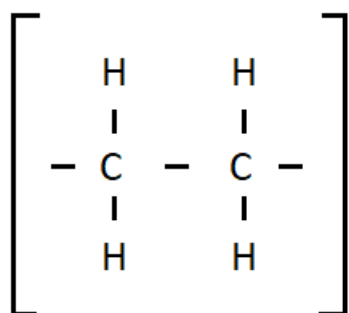


KUVA 7. Polypropeenin molekyylikaava

Polypropeeni ei ime itseensä kosteutta, joten huoneenlämmössä varastoitua materiaalia ei tarvitse kuivata ennen ekstruusiota. Polypropeenilla on erittäin hyvä kemikaalien ja lämmön kestävyys ja sillä on hyvät iskulujuus- ja jäykkyysominaisuudet. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 213)

4.2 Polyeteeni (PE-HD)

Polyeteeni on maailmanlaajuisesti käytetyin muovilaji. Rakenteensa takia polyeteeni on hyvin monikäyttöinen raaka-aine, sillä polyeteenin rakenne koostuu vain yksinkertaisesta hiilivetyketjusta (kuva 8). Polyeteenin yksinkertainen hiilivetyrakenne on vahva kovalenttinen molekyyllisidos, joten polyeteeni reagoi harvoin muihin aineisiin.



KUVA 8. Polyeteenin molekyylikaava

Polyeteenit jaetaan pienitiheyksisiin (PE-LD), keskitiheyksisiin (PE-MD) ja suuritiheyksisiin (PE-HD) polyeteeneihin. Pienitiheyksisen polyeteenin tiheys vaihtelee 0,91–0,93 g/cm³ välillä ja suuritiheyksisen 0,95–0,98 g/cm³ välillä (Järvinen 2016). Toimeksiantajayritys käyttää tuotteissaan vain suuritiheyksistä polyeteeniä. Seuraavassa kappaleessa keskitytään PE-HD:n tarkasteluun.

PE-HD:n tärkeimmät käyttökohteet ovat ruiskuvalu- ja puhallusmuovatuut tuotteet sekä putket, profiilit ja kalvot. Erityisesti putkiekstruusioon suuritiheyksinen polyeteeni sopii hyvin. Polyeteeni ei ole hygroskooppinen, eli se ei kerää itseensä kosteutta. Yleensä polyeteenigranulaatteja ei tarvitse siis kuivata ennen ekstruusiota. Profiilikstruusiota varten muovimassan täytyy olla pintaominaisuuksiltaan laadukas, levitä myös kapeisiin tiloihin sekä olla sulalajuudeltaan riittävän hyvä. Prosessissa käytettävä lämpötila valitaan raaka-aineen ominaisuuksien mukaan. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 211)

Polyeteenin tyypillisiä ominaisuuksia ovat hyvä kemikaalien kestävyys, poissulkevien voimakkaat hapot, hyvä sähköneristävyys ja kuumasaumautuvuus. Poly-

eteenistä valmistetut tuotteet ovat usein kevyitä ja sitkeitä sekä soveltuvia elintarvikepakkaamiseen. Toisaalta polyeteenillä on alhainen lämmönkestävyys ja se kellastuu UV-säteilyn takia. Lisäksi polyeteenistä valmistetun tuotteen pinta on usein hyvin liukas ja hylkivä, mikä vaikuttaa negatiivisesti tuotteen liimaamiseen, pinnoitukseen ja painamiseen. (Järvinen 2008)

5 RAAKA-AINEIDEN JA TUOTTEIDEN TESTAAMINEN

Muovien testaaminen on tärkeässä osassa tuotteiden laadunvalvontaa, uusien materiaalien kehittämistä, tuotteiden lujuuslaskelmia, valmistusprosessin ajoarvojen optimointia sekä niiden valvontaa (Kurri ym. 1999, s. 188). Seuraavissa kappaleissa esitellään testimenetelmät, joiden mukaan on toimeksiantajan valmistamia tuotteita testattu. Tuotteiden testituloksia ei erikseen esitellä, vaan niiden perusteella on valittu hyvälaatuiset tuotteet laskelmia varten.

Jita Oy on osoittanut valmistavansa laadukkaita tuotteita yritykselle myönnettyillä laatusertifikaateilla ja -merkeillä, kuten ISO 9001- ja ISO 14001- sertifikaateilla, Nordic Poly Mark -merkillä, Avainlippu-merkillä, CE-merkillä sekä Uponor-konsernin uusiutuvan energian sertifikaatilla (Jita n.d.). Nordic Poly Mark on Euroopan Unionin sisällä rekisteröity tavaramerkki muoviputkituotteille ja muoviputkijärjestelmille. INSTA-CERT:n myöntämä merkki kertoo tuotteen täyttävän erityiset laatuvaatimukset pohjoismaisille käyttöolosuhteille. (Nordic Poly Mark n.d.)

5.1 Muovituotteiden testaaminen

Muovituotteita voidaan testata useilla eri testausmenetelmillä, jotka jakautuvat reologisiin, mekaanisiin, termisiin, sähköisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Lisäksi muita mitattavia ominaisuuksia ovat optiset ominaisuudet, kalvon mittaukset sekä putkien painetestit. Muoveja testataan ISO- ja EN-standardeja käyttäen, mikä parantaa mittaustulosten luotettavuutta ja vertailukelpoisuutta. (Kurri ym. 1999, s. 188)

Mittausmenetelmät voidaan jakaa raaka-ainetta koskeviin mittauksiin, valmiin tuotteen mittauksiin sekä dimensioiden selvitykseen. Seuraavissa kappaleissa esitellään toimeksiantajayrityksen putkituotteiden kriittisimmät valmistusprosessin aikana ja laboratoriossa tehtävät mittaukset. Tärkeimmät mittaukset valmiille putkille järjestyksessä ovat rengasjäykkyys, iskulujuus, lommahduskoe, uunikoe sekä virumisen määrittäykset.

5.1.1 Rengasjäykkyys

Putken rengasjäykkyys (englanniksi ring stiffness) selvitetään mittaamalla putken puristukseen käytettävä voima sekä putken puristuman suuruus. Putkea puristetaan levyjen välissä (kuva 9) tasaisella voimalla, kunnes putken profiili painuu kasaan kolme prosenttia sisähalkaisijastaan. Puristusnopeus riippuu putken halkaisijasta. (SFS-EN ISO 9969 2016)



KUVA 9. Rengasjäykkyyden määrittämiseen käytettävä testilaitteisto (Kuva: Rosa Ekman)

Ennen testin aloittamista valmistellaan koekappaleet ja niiden halkaisija ja pituus määritetään standardien mukaisesti. Mikäli putket ovat korrukoidut tai niissä on muita vastaavia säännöllisiä rakenteita, täytyy koekappaleet katkaista rakenteen keskikohdasta. Testitulosten mukaan putken rengasjäykkyys lasketaan lopuksi työohjeistuksessa esitetyllä kaavalla. (SFS-EN ISO 9969 2016)

5.1.2 Iskulujuus

Muoviputken iskunkestävyys (engl. resistance to external blows, impact strength) mitataan iskemällä koekappaletta tietyllä voimalla. Koekappaleen päälle pudotetaan moukari, jonka massa ja muoto vaihtelevat koekappaleiden ominaisuuksien mukaan. Koelaitteistossa (kuva 10) on aputangot, joita pitkin moukarin annetaan pystysuoraan ja vapaasti pudota koekappaleen päälle. Koekappaleet leikataan satunnaisesta kohdasta putkea ja leikatessa putkea on hyvä huomioida, että koekappaleiden reunojen täytyy olla suorat, puhtaat ja vahingoittumattomat. Jokaiseen koekappaleeseen saa kohdistaa vain yhden iskun. (SFS-EN ISO 11173 2017)



KUVA 10. Putken iskulujuuden testilaitteisto (Kuva: Rosa Ekman)

Mittaus jaetaan alkutestiin sekä varsinaiseen mittaukseen. Alkutestillä etsitään se moukarin putoamiskorkeuden raja-arvo, millä koekappaleet ensimmäisen kerran vahingoittuvat. Varsinaisessa iskulujuusmittauksessa edellä selvitettyä putoamiskorkeutta lasketaan hieman ja moukari pudotetaan nollassa celsiusasteissa säilytettyjen koekappaleiden päälle. Mittauksia toistetaan laskien tai nostaten putoamiskorkeutta, riippuen moukarin aiheuttamista vahingoista koekappaleelle. (SFS-EN ISO 11173 2017)

5.1.3 Lommahduskoe

Lommahduskokeella (engl. ring flexibility) tutkitaan putken rengasjoustavuuden suuruutta, eli kokeella määritellään voima, jolla putki antaa taipuen periksi. Putkea puristetaan ISO 9969 -standardin mukaisella testilaitteella, jolloin putkiprofiili taipuu. Koetta jatketaan, kunnes putken profiili vaurioituu tai tietty määritelty taipumispiste on saavutettu. Kuvassa 11 puristetaan putkea kunnes sen ulkohalkaisija puristuu 30 %. (SFS-EN ISO 13968 2009)



KUVA 11. Lommahduskoe putkelle (Kuva: Johanna Lamminmäki)

Kokeen aikana seurataan ja kirjataan ylös putken reagointia puristukseen ja taipumisen etenemistä. Testin edetessä koekappaleeseen ilmestyvät mahdolliset halkeamat, säröilyt, kerrosten irtoaminen toisistaan sekä putken lommot kirjataan ylös. Kokeen perusteella muodostetaan taulukko, jossa esitetään putken lommahduksen suuruus tietyn puristavan voiman vallitessa. (SFS-EN ISO 13968 2009)

5.1.4 Uunikoe

Uunikoe (engl. oven test) on tarkoitettu korrukoiduille tai muille rakenteisille termoplastisille putkille. Kokeella selvitetään putken kestävyys korkeissa lämpötiloissa, mikä osoittaa putken käytettävyyden sille tarkoitetuissa olosuhteissa. (ISO 12091 1995)

Koekappale sijoitetaan uuniin tuotteen ominaisuuksien mukaan tietyksi ajaksi ja tiettyyn lämpötilaan, minkä jälkeen koekappaleita tutkitaan mahdollisten rakennemuutoksien vuoksi. Putken rakennemuutokset ovat moniseinämäisen putken seinämien irtoaminen toisistaan, kuplien muodostuminen seinämään sekä murtumat ja muut fyysiset virheet. Virheistä, uunin lämpötilasta ja kuumennusajasta raportoidaan kokeen jälkeen. (ISO 12091 1995)

5.1.5 Dimensiot

Mittasuhteiden määrytyksistä tärkeimmät ovat putken ulko- ja sisähalkaisijan määrytykset, muhvin sisähalkaisijan mittausta, sisäseinämän paksuus sekä putken pituusmassa. Korrukoiduille putkille mitataan sisä- ja ulkomittojen lisäksi uuman suuruus eli putken paksuus aaltoprofiilin matalimmasta kohdasta. Ulkoseinästä mitataan paksuus sekä sisäseinämästä paksuus ja uuman suuruus. Putkituotteiden mittasuhteita selvitetään usein muita laskelmia varten, esimerkiksi putken sisä- ja ulkohalkaisija mitataan esimerkiksi rengasjäykkyyttä tai iskulujuutta varten.

Muoviputkien mittojen määrytyksiä varten käytetään standardia ISO 3126. Standardissa esitellään tarkat mittavälineet ja mittaussuunnitelmat erilaisille määriteltäville suureille, kuten putken pituudelle, pyöreydelle ja halkaisijoille. (SFS-EN ISO 3126 2005)

5.1.6 Korkean lämpötilan jaksot

Korkeiden lämpötilojen jaksotusmenetelmällä (engl. elevated temperature cycling) määritellään termoplastisten putkistojen lämmönvaihteluiden kestävyys. Menetelmää käytetään paineettomille, rakennusten sisällä tai maan alla sijaitseville ratkaisuille. (SFS-EN ISO 13257 2018)

Kokeessa tutkitaan putken ulkohalkaisijan, profiilin painumisen ja laajenemisen muutoksia. Koekappaleeseen annetaan virrata tasaisella virtausnopeudella vuorotellen kylmää ($15 \pm 5 \text{ °C}$) ja kuumaa ($93 \pm 2 \text{ °C}$) vettä jaksoittain 1500 kertaa, minkä jälkeen tarkistetaan putkiliitosten tiiveys sekä edellä mainitut muutokset. (SFS-EN ISO 13257 2018)

5.1.7 Virumiskestävyys

Materiaalin rakenteen pysyvä heikkeneminen eli viruminen johtuu jatkuvasta jännityksen aiheuttamasta kuormituksesta. Maanalaisesti asennetun putken rakenteen muodonmuutoksen suuruus voi riippua ympäröivän maan laadusta, lämpötilasta sekä kuluneesta ajasta. Putken virumisen suuruus (engl. creep ratio) analysoidaan mittaamalla ja laskemalla. (SFS-EN ISO 9967 2016)

Koekappale asetetaan kahden puristavan tason väliin noin tuhanneksi tunniksi (n. 41,7 päivää), minkä aikana säännöllisin aikaväleihin tutkitaan ja kirjataan ylös putken rakenteen poikkeamat. Tulosten perusteella lasketaan putken viruminen lineaarisesti seuraavan kahden vuoden ajalle. (SFS-EN ISO 9967 2016)

5.2 Raaka-aineen testaaminen

Raaka-aineen mittauksia ovat esimerkiksi sulaindeksi, paineenkesto sekä hapettumisenkesto. Dimensioilla selvitetään putkien ja muhvien fyysisiä mittasuhteita. Raaka-aineen tärkeimmät mittaukset ovat sulaindeksi ja vetomoduuli.

Yleisstandardilla EN 13476-3:2018 määritellään laatu- ja ominaisuuskriteerit paineettomille, maanalaisille, viemäröintiin ja salaojitukseen tarkoitetuille putkistoille, joissa on sileä sisäpinta ja profiloitu ulkopinta. Standardissa kuvataan yleisesti polypropeenin, polyeteenin ja polyvinyylidikloridin vaatimukset esimerkiksi sisäiselle paineenkestävyydelle, sulavirralle ja hapettumisajalle sekä valmistettavan putken sallituille profiilityypeille. Standardissa EN 13476-3:2018 esitetään myös kaikki muut standardit, joita noudatetaan tuotteiden laatuvaatimusten täyttämiseen ja niiden määrittämiseen.

5.2.1 Lämpötila

Muovin altistaminen eri lämpötiloille vaikuttaa muovin ominaisuuksiin. Vallitseva lämpötila sekä vaikutusaika ovat tässä kriittisiä muuttujia: muovin ollessa pitkään korkeassa lämpötilassa sen fysikaalinen rakenne ja kemiallinen koostumus muuttuvat merkittävästi. Kestomuovien lyhytaikaiset lämpötilaolosuhteet saisivat olla maksimissaan 60–200 °C ja pitkäaikaiset 60–150 °C. (Kurri ym. 1999, s. 59)

Eri muovilajien lämmönkestävyyteen vaikuttaa muovin sisäinen rakenne sekä ominaisuudet. Lämpötilan kestävyteen vaikuttaa myös tuotteen jännitykset, kemikaalit, kaasut ja kosteus, joiden suuruuksia on hyvin vaikea arvioida ilman asianmukaisia mittauksia. Korkeissa lämpötiloissa kestumuovien mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuudet ja jäykkyydet, putoavat jopa viidesosaan. Osakiteiset kestumuovit alkavat pehmetä vasta lämpötilan lähestyessä sulamislämpötilaa, joten ne pysyvät yleensä käytössä jäykkänä ja lujana. Kylmässä lämpötilassa muovi alkaa haurastua eli sen rakenne murtuu. Haurastumislämpötila vaihtelee suuresti eri muovilajien mukaan. (Kurri ym. 1999, s. 59–61)

Muoviseoksen sulamislämpötilan hallinta on tärkeää ekstruusioprosessin kustannus- ja materiaalitehokkaassa ylläpidossa. Valmistusprosessia voidaan optimoida ekstruuderin sylinterin ja suuttimen lämpötiloja muuttamalla ja ruuvien pyörimisnopeutta säätämällä. Ainoastaan tietyillä lämpötilaprofiileilla ja muilla prosessiolosuhteilla valmis tuote täyttää laatuvaatimukset: toimivaan lämpötilaprofiiliin vaikuttaa pääasiassa prosessoitava muovi, muovimassan viskositeetti, ruuvi-tyyppi sekä massan nopeus ekstruuderissa. Halkaisijaltaan pienten putkien raaka-aineen (polyeteeni) yleisesti suositeltu sulamislämpötila vaihtelee 193–216 °C välillä ja suurien putkien raaka-aineen 232–260 °C välillä. Lämpötilat ovat kuitenkin vain arvioita, joten tarkat lämpötilat tulee tarkistaa raaka-ainetoimittajan ohjeistuksista. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 65 ja 212)

Mikäli kaikki ekstruuderin vyöhykkeet on asetettu samaan lämpötilaan, ei ekstruuderin lämpötilan säätelymahdollisuutta voi hyödyntää. Tällöin syöttövyöhykkeen lämpötila on usein liian suuri ja suuttimen lämpötila liian pieni, mikä johtaa suuttimen liialliseen lämmönpoistoon prosessista. Tasainen lämpötila kaikissa ekstruuderin vyöhykkeissä ei lisäksi edistä muoviseoksen sulattamista siirtövyöhykkeessä. Vääränlaiset lämpötilasäädöt ekstruuderissa voi aiheuttaa ekstruuderin nykimistä, mikä johtaa epätasaiseen putken seinämän paksuuteen. Korkea sulatuslämpötila johtaa heikentyneeseen lämmönkestävyyteen ja putki-profiilin painumiseen, joka toisaalta voi aiheutua myös liian vähäisestä jäähtymisestä. Liian matala sulatuslämpötila muodostaa karhean ulko- tai sisäpinnan putkeen. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 66; Qenos n.d.)

Ekstruusioprosessin optimaaliset lämpötilaprofiilit ovat usein kerrottu materiaali-toimittajien tiedostoissa, mutta ne voidaan myös selvittää esimerkiksi arkistoidun tuotantoprosessihistorian kautta. Kaikki prosessiarvot tulisikin kirjata ylös myöhempää analysointia varten. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 65) Raaka-aineelle A ekstruuderin prosessointilämpötilojen suositukset ovat seuraavat: sylinterille 200–220 °C, suutin 210–220 °C, pää 210–220 °C, sulamislämpötila 210–230 °C (Salassapidettävä lähde). Polyeteenille PE-HD on esitetty yleisesti seuraavat ekstruuderin tavoitelämpötilat: 1. vyöhyke 149–171 °C, 2. vyöhyke 177–199 °C, 3. vyöhyke 199–216 °C, 4. vyöhyke 199–216 °C ja suutin 199–216 °C (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 212). Tarkemmat ekstruuderin vyöhykkeiden lämpötilat tulee tarkistaa käytettävän raaka-aineen toimittajan välittämistä ohjeistuksista.

5.2.2 Sulaindeksi

Sulaindeksi, eli englanniksi melt flow rate (MFR) tai melt flow index (MFI), kertoo muovin juoksevuudesta. Sulaindeksin arvo esitetään virtaavan muovimassan määränä tarkastellun ajan kuluessa, jolloin yksikkönä yleensä on g/10 min. Mitä isompi sulaindeksin arvo on, sitä pienempi viskositeetti ja molekyylimassa on tarkastellulla muovilla. Sulaindeksin tavoiteltu arvo profiiliekstruusioprosessille vaihtelee 0,1–1 g/10 min välillä, mutta todellinen arvo riippuu muoviraaka-aineesta. Sulaindeksin suuruus tutkitaan ja raportoidaan ISO 1133-1 -standardin mukaisesti. (Rao 2014, s.19–20)

Sulaindeksiä voidaan mitata laitteistolla (kuva 12), jossa mäntä puristaa muovinäytettä kapean lämmitettävän sylinterin läpi. Näyte sijoitetaan ensin sylinteriin ja sylinteriä lämmitetään hetki, minkä jälkeen männän päälle sijoitetaan paino. Mäntä työntää näytettä sylinterin läpi, jolloin putken alaosasta ulos puristuneen näytemassan määrä mitataan. (Giles, Wagner & Mount 2005, s. 171)



KUVA 12. Sulaindeksin määrittämiseen käytettävä laitteisto (Kuva: Rosa Ekman)

5.2.3 Sisäinen paineenkestävyys

Nesteiden kuljettamiseen tarkoitettujen putkien sisäinen paineenkestävyys (engl. resistance to internal pressure) selvitetään tutkimalla putken kestävyyttä tietyssä vedenpaineessa ja lämpötilassa. Mittaus voidaan tehdä vaihtelevissa olosuhteissa, jolloin koekappaleen ulkopuolella on vettä, ilmaa tai nestettä. Putkien sisäinen paineenkestävyys voidaan selvittää sekä ruiskupuristetuista että suulakepuristetuista tuotteista. (SFS-EN ISO 1167-1 2006)

Mittaus suoritetaan joko vesialtaassa tai uunissa. Koekappaleiden valmistelun jälkeen niiden sisälle asetetaan ennalta määrätty vedenpaine tietyksi ajaksi tai kunnes koekappaleen seinämä murtuu. (SFS-EN ISO 1167-2 2006)

5.2.4 Hapettumisaika

Hapettumisaika (engl. oxidation induction time, OIT) kertoo stabiloidun materiaalin hapettumisen suhteellisesta kestävydestä. Hapettumisaika (min) suoritetaan tietyssä lämpötilassa ja ilmanpaineessa ja tuloksia tutkitaan kalorimetrisella mit-

talaitteella (engl. differential scanning calorimeter). Testituloksiin vaikuttaa mittauslämpötila ja mittausolosuhteiden happipitoisuus: korkea lämpötila ja happipitoisuus lyhentävät hapettumisaikaa. (SFS-EN ISO 11357-6)

Tutkittava kappale lämmitetään tasaisesti inertissä kaasuvirtauksessa, kuten puhtaassa typpikaasussa, kunnes tavoiteltu lämpötila saavutetaan. Lämpötilan saavuttamisen jälkeen mittausolosuhteita muutetaan, jolloin kappaleeseen virtaava kaasu koostuu hapestä tai paineistetusta kuivasta ja öljyttömästä ilmasta. Näytettä pidetään vakiolämpötilassa, kunnes hapettumisreaktio näkyy lämpökäyrällä. Hapettumisaika on aika, joka kuluu hapettumisreaktion alkamiseen happipitoisen virtauksen aloittamisesta. (SFS-EN ISO 11357-6)

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

Jitan tuotteiden valmistusprosesseista täytetään liitteen 1 mukainen ajoarvora-portti, johon kerätään prosessin hallitsemisen ja laadunvarmistamisen kannalta tärkeimpiä prosessiarvoja. Osa prosessiarvoista on säädettävissä hallintalaitteilla, kuten ekstruuderin vyöhykkeiden lämpötilat. Alkutilanteessa Jitan prosessioperaattorit ovat asettaneet prosessinhallintalaitteisiin oman kokemuksen ja näkökulman perusteella sopivimmat asetusarvot, mikä johtaa epätasalaatuisiin tuotteisiin. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tärkeimmistä prosessiarvoista optimaaliset asetusarvot ja analysoida määrättyjen mittausarvojen korrelaatiota keskenään.

Tutkimus ja kehitys -osioon on valittu neljällä raaka-aineella, A, B, C ja D, valmistettuja tuotteita. Tuotteet on valmistettu pääosin toimeksiantajayrityksen asettamien sääntöjen mukaisesti, kuitenkin niin, että prosessioperaattorit ovat itse valinneet säädettävät prosessiarvot. Jokaisesta tuotekohtaisesta prosessista on otettu näytekappaleita, joita testataan laboratoriossa aikaisemmassa kappaleessa kuvatuilla testimenetelmillä. Testien, etenkin putken iskulujuuden, rengasjäykkyyden ja lommahduksen, tulosten perusteella talletetaan erityisen laadukkaat tuotteet ja näiden valmistuksen aikaiset prosessiarvot. Näiden tuotteiden ajoarvora-porttien prosessiarvoja analysoidaan seuraavissa kappaleissa.

Ajoarvora-porteista on otettu ylös sylinterin ja työkalujen lämpötilojen lisäksi toimeksiantajan mainitsemat tärkeimmät prosessiarvot, kuten korrukaattorin muotopalojen ja hylsyn paineet. Korrukaattorin paineista sekä ekstruuderin lämpötiloista on laskettu keskiarvot ja keskivaihtelut Excel-sovelluksella. Laskelmat sekä tärkeimmät prosessiarvot ovat liitetty omiin taulukkoihinsa, jotka ovat opinnäytetyön liitteinä.

Laskelmien tulokset ja niiden paikkansapitävyys on käyty läpi toimeksiantajan edustajan kanssa. Tulokset ovat luotettavia ja jatkossa käytettävissä valmistusprosesseissa.

7 AJOARVORAPORTIT

Seuraavissa laskelmissa on käyty läpi kolmen viimeisimmän vuoden ajalta ajoarvoraportit niistä tuotteista, jotka laatu- ja ominaisuusmittausten perusteella ovat erinomaisia. Ajoarvoraporteista on muodostettu Excel-taulukko, johon on kirjattu ylös ulkokuoren ja sisäkuoren ekstruuderien sylinterien ja työkalujen (lämmitin, lämpövyöhyke) asetuslämpötilat (°C) ja kuormitukset (%) sekä niissä muovattavan massan lämpötila (°C) ja paine (bar), ajonopeus (m/min), koneiston syöttölämpötila (°C), ulkokuoren ajopaine (bar) sekä korrukaattorin muotopalojen (psi) ja hylsyn (inHg) alipaineet kolmesta eri portaittain nostettavasta vaiheesta.

Ajoarvoraporteista voi huomata, että käytettyjä polypropeenipohjaisia raaka-aineita on neljä erilaista: A, B, C ja D. Jokaiselle raaka-aineelle on muodostettu omat taulukot, sillä ekstruusioprosessin optimaaliset ajoarvot vaihtelevat merkittävästi raaka-aineiden ominaisuuksien mukaan.

Putken ulko- ja sisäkuoren ekstruuderien lämpötiloja säädetään useista eri säätimistä: ulkokuoren sylinterille on viisi ja työkaluille kahdeksantoista säädintä, ja sisäkuoren sylinterille neljä ja työkaluille viisitoista säädintä. Lisäksi korrukaattorissa käytettävät paineet ovat säädettävissä, jolloin säätöarvoja on korrukointimuoteille kolme ja hylsulle kolme. Näistä säätöarvoista on laskettu keskiarvot sekä keskihajonnat taulukoihin. Taulukot, sisältäen laskelmat, ovat liitteissä 2, 3, 4 ja 5. Ulkokuoren työkalun kuudes, sisäkuoren sylinterin viides sekä sisäkuoren työkalun kuudes säädin eivät ole käytössä, joten niille ei ole laskettu tuloksia.

Loput kappaleesta on salassa pidettävää tietoa.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Ekstruusioprosessin tehostamiseksi on hyvä löytää prosessille optimaaliset säätölämpötilat. Ekstruuderin sylinterin ja suuttimen lämmitysvastusten lämpötilojen raaka-aine- ja tuotekohtaisella valinnalla voidaan vaikuttaa prosessin energia-, kustannus- ja materiaalitehokkuuteen sekä tuotteen laatuominaisuuksiin. Korkea lämpötila voi johtaa esimerkiksi putken heikentyneisiin kestävyysominaisuuksiin tai putkiprofiilin taipumiseen ja matala lämpötila voi aiheuttaa putkelle karheen pinnan. Toimimattomat säätölämpötilat myös voivat johtaa putken seinämän paksuuden epätasaisuuksiin.

Ekstruuderin syöttöarvojen optimointi on tulevaisuudessa suunnitteilla myös muille Jitan tuotantolinjoille. Tuotantolinjoilla ja linjojen välillä valmistetaan toisistaan raaka-aineiltaan ja käyttökohteiltaan huomattavasti poikkeavia tuotteita, joten syöttölämpötilat on hyvä laskea tuotekohtaisesti. Ekstruuderin syöttövyöhykkeen ensimmäisiin lämmitysvastuksiin ja suuttimen ulommaisiin lämmitysvastuksiin on hyvä säätää hieman alhaisempi lämpötila ekstruuderin sulatus- ja sekoitusvyöhykkeeseen nähden.

Prosesseissa toteutuneet lämpötilat vastaavat ohjeistusarvoja melko hyvin. Alhaisemmat toteutuneet lämpötilat johtuvat prosessikohtaisista eroavaisuuksista, kuten putken ominaisuuksista tai raaka-aineen koostumuksesta. Syöttölämpötiloja optimoidessa muille konelinjoille on siis tärkeää huomioida tuotekohtaiset eroavaisuudet, eikä raaka-ainetoimittajan ilmoittamat ohjeistusarvot välttämättä ole päteviä. Opinnäytetyön tulokset on käyty läpi yrityksen edustajan kanssa, ja tulokset ovat luotettavia ja käytettävissä jatkossa.

Jatkossa prosessiarvojen ja tuotteen laadun välistä yhteyttä kannattaa tutkia, mikäli valmistettujen tuotteiden laatu vaihtelee huomattavasti. Laadun vaihtelun voi huomata jatkamalla systemaattista laadunvalvontaa sekä noudattamalla ohjeistuksia ekstruusioprosessissa ja tuotetestauksessa. Raaka-ainetoimittajien prosessoinnin ohjeistusarvoja voi pitää suuntaa antavina, mutta optimaalisiin prosessiarvoihin vaikuttaa huomattavasti raaka-aineen koostumus. Tulosten luotettavuus paranisi huomattavasti suuremmalla otosmäärällä.

LÄHTEET

Asiakastieto. n.d. Taloustiedot Jita Oy. Verkkosivu. Viitattu 5.1.2024. <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/jita-oy/08369996/yleiskuva>

Giles, H., Wagner, J. & Mount, E. 2005. Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook. E-kirja. Norwich: William Andrew Inc. Viitattu 15.1.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.sciencedirect.com/book/9780815514732/extrusion#book-info>

ISO 12091. 1995. Structured-wall thermoplastics pipes – oven test. Geneve: International Organization for Standardization. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Jita. n.d. Kestävästi muovista – Putket, kaivot. Tuote-esite. Viitattu 21.2.2024. https://jita.fi/wp-content/uploads/2022/09/Jita_Putket_Kaivot_2023_netti.pdf

Jita. n.d. Yritysesittely. Verkkosivu. Viitattu 5.1.2024. <https://jita.fi/yritys/yritysesittely/>

Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.

Järvinen, P. 2016. Muovit ja muovituotteiden valmistus. Porvoo: Bookwell Oy.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 1999. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.

Lamminmäki, J. kehitys- ja markkinointipäällikkö. Haastattelu 7.2.2024. Jita Oy.

Nordic Poly Mark. n.d. Mikä on Nordic Poly Mark (NPM)?. Verkkosivu. Viitattu 21.2.2024. <https://nordicpolymark.com/fi-start/>

Qenos. n.d. Pipe and tubing extrusion – Technical guide. Kirjallinen opas. Viitattu 20.2.2024. [https://www.qenos.com/internet/home.nsf/\(LUImages\)/TG7Pipe/\\$File/TG7Pipe.pdf](https://www.qenos.com/internet/home.nsf/(LUImages)/TG7Pipe/$File/TG7Pipe.pdf)

Rao, N. 2014. Diagnostics of Extrusion Processes. E-kirja. Ohio: Hanser Publishing. Viitattu 8.1.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://app.knovel.com/hot-link/toc/id:kpDEP00011/diagnostics-extrusion/diagnostics-extrusion>

SFS-EN 13476-3 + A1:2020. 2018. Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage. Structured-wall piping systems of unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U), polypropylene (PP) and polyethylene (PE). Part 3: Specifications for pipes and fittings with smooth internal and profiled external surface and the system, Type B. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 11173. 2017. Thermoplastic pipes. Determination of resistance to external blows. Staircase method. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 11357-6. 2018. Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Part 6: Determination of oxidation induction time (isothermal OIT) and oxidation induction temperature (dynamic OIT). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 23.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 1167-1. 2006. Kestomuoviputket, -putkiyhteet ja -asennusyhdistelmät nesteiden johtamiseen. Sisäisen paineenkestävyyden määrittäminen. Osa 1: yleinen menetelmä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 1167-2. 2006. Kestomuoviputket, -putkiyhteet ja -asennusyhdistelmät nesteiden johtamiseen. Sisäisen paineenkestävyyden määrittäminen. Osa 2: putkikoekappaleiden valmistelu. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 13257. 2018. Thermoplastics piping systems for non-pressure applications. Test method for resistance to elevated temperature cycling. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 13968. 2009. Muoviputkijärjestelmät. Kestomuoviputket. Rengasjoustavuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 3126. 2005. Muoviputkijärjestelmät. Muovikomponentit. Mittojen määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 9967. 2016. Thermoplastics pipes. Determination of creep ratio. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN ISO 9969. 2016. Thermoplastic pipes. Determination of ring stiffness. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. Viitattu 2.2.2024. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

LIITTEET

Liite 1. Ajoarvoraportin mallikappale

LINJA 3 **AJOARVORAPORTTI** **PUTKIKOKO:** _____
 pvm: _____ Town: **Virrat, Finland** Vuoromiehet: _____
RAAKA-AINE: _____ Iso tupla EN 13476

ULKOKUOREN extr. Type:

sylinteri	s1	s2	s3	s4	s5						
Tod. [°C]											
Asetus											
Työkalu:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tod. [°C]											
Asetus											
Työkalu:	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Tod. [°C]											
Asetus											

Gravimetri	pääaine	sivuaine	väri	Ulkokuoren paino [kg/m]
kg/h				
rpm				
%				
Ruuvien kierrokset [rpm]:				Kuormitus %
Massan paine [bar]:	P1	P2		Massan lämpö [°C]
				Gravimetrin nopeus

SISÄKUOREN extr. Type:

sylinteri	s1	s2	s3	s4	s5						
Tod. [°C]											
Asetus											
Työkalu:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tod. [°C]											
Asetus											
Työkalu:	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Tod. [°C]											
Asetus											

Gravimetri	pääaine	sivuaine	väri	Sisäkuoren paino [kg/m]
kg/h				
rpm				
%				
Ruuvien kierrokset [rpm]:				Kuormitus %
Massan paine [bar]:	P1	P2		Massan lämpö [°C]

Putken metripaino: _____ Nokkavastukset [°C] _____ Raitaväri _____

ILMA Ulkokuori [bar]: _____ Muhvipaine [karta]: _____

BOE TEMP: Syöttöpaine [bar]: _____ Syöttölämpötila [°C] _____

Virtaus [l/h]: _____ Poistolämpötila [°C] _____

KORRUKAATTORI: Type: _____ Nopeus [m/min] _____

Current [A] _____

Alipaine [psi]: I: _____ II: _____ III: _____

Hylsy alipaine [inHg]: I: _____ II: _____ III: _____

Liite 2. Materiaalin A taulukko

Liite 3. Materiaalin B taulukko

Liite 4. Materiaalin C taulukko

Liite 5. Materiaalin D taulukko