



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURA-KAISA AALTONEN
TEKNISTEN MUOVIEN KIERRÄTYS
Diplomityö

Tarkastaja: professori Pentti Järvelä,
DI Tiina Malin
Tarkastajat ja aihe hyväksytty Tek-
nisten tieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 15. tammikuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

AALTONEN, LAURA-KAISA: Teknisten muovien kierrätys

Diplomityö, 98 sivua, 15 liitesivua

Huhtikuu 2014

Pääaine: Tekniset polymeerimateriaalit

Tarkastaja: professori Pentti Järvelä, DI Tiina Malin

Avainsanat: mekaaninen kierrätys, tekniset muovit, kierrätysmuovi, modifiointi, lisäaineistus

Tämä diplomityö on tehty osana projektia ”Uusiomuovien vaikutukset valmistusprosessiin, tuotteiden ominaisuuksiin ja käyttöön”. Diplomityö keskittyy teknisten muovien mekaaniseen kierrätykseen ja menetelmiin, joilla voitaisiin modifioida mahdollisimman käyttökelpoista kierrätysmuovia.

Työn teoriaosuudessa käydään läpi yleisimmät tekniset muovilajikkeet, joista useimmat ovat myös osana kokeellista osuutta. Lisäksi tarkastellaan muovin kierrätettävyyteen vaikuttavia tekijöitä ja lainsäädännön asettamia vaatimuksia muovijätteen kierrätykselle. Teoriaosuuden pääpaino on mekaanisen kierrätyksen eri vaiheilla, joilla kierrätysmuovia voidaan modifioida. Mekaanisen kierrätyksen vaiheet voidaan jakaa mekaanisiin työvaiheisiin ja sulaprosessointiin. Mekaanisten työvaiheiden tarkoituksena on homogenisoida ja muokata materiaalia sulaprosessointia varten. Sulaprosessointiin kuuluvat granulointi, seostus neutraaliseen muoviin, uudelleenprosessointi ja lisäaineistus. Modifioinnin ja kierrätyksen vaikutusta kierrätysmuovien ominaisuuksiin käsitellään tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen perusteella.

Työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan taajuusmuuttajien muoviosien kierrätettävyyttä ja saatavan kierrätysmuovien ominaisuuksia sekä styreenipohjaisen termoelastin tuotantojäterouheen vaikutusta materiaalin ominaisuuksiin sekoitettaessa sitä neutraaliseen granulaattiin eri sekoitussuhteilla. Taajuusmuuttajien muoviosat jaetaan kuuteen materiaaliryhmään, jotka ovat polyamidi (PA), musta polykarbonaatti (PC musta), kirkas polykarbonaatti (PC kirkas), polykarbonaatin ja akrylinitriilibutadieenistyreenin seos (PC/ABS), maalattu polystyreeni (PS+maali) ja polystyreeni (PS).

Verrattaessa taajuusmuuttajien muoviosista saadun kierrätysmuovien ominaisuuksia kirjallisuudesta otettuihin vertailuarvoihin, on kaikille materiaaleille yhteistä vetomodulin aleneminen ja sulaindeksin kasvaminen. Lähes kaikilla materiaaleille myös murtovenymä ja iskulujuus laskivat. Tulokset ovat kierrätysmateriaaleille tyypillisiä. Iskulujuuden ja murtovenymän lasku viittaa materiaalin haurastumiseen. Sulaindeksin kasvaminen taas viskositeetin laskemiseen, joka on luultavasti seurausta muun muassa käytön ja kierrätyksen aikana tapahtuneesta molekyyliketjujen katkeilemisesta

Termoelasteille tehdyissä mittauksissa hajonta eri sarjojen välillä on pientä, eikä huomata ominaisuuksien heikkenemistä tuotantojätteen määrän kasvaessa, vaan erot eri sarjojen välillä ovat satunnaisia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Material Science

AALTONEN, LAURA-KAISA: Recycling of Engineering Plastics

Master of Science Thesis, 98 pages, 15 Appendix pages

April 2014

Major: Polymeric Materials

Examiner: Professor Pentti Järvelä, M. Sc. Tiina Malin

Keywords: mechanical recycling, engineering plastics, recycled plastic, modification, additives

This thesis is a part of the project called "Uusiomuovin vaikutukset valmistusprosessiin, tuotteiden ominaisuuksiin ja käyttöön". This thesis focuses on mechanical recycling of engineering plastics and modification methods, that can help to modify as usable recycled plastics with as good quality as possible.

The most common engineering plastics are examined in the theoretical part. Most of these plastics are also discussed in the experimental part. Factors which affect recyclability of the plastics and the legislation about the plastics waste recycling are discussed. The main point of the theoretical part is to discuss the processes of mechanical recycling. With these processes recycled plastic can be modified. The processes of mechanical recycling can be divided mechanical treatments and melt processing. Mechanical treatments homogenize plastic. Melt processing consists of pelletizing, mixing with virgin plastic, re-processing and additives compounding. The effects of the recycling and modification on properties of plastics are examined with earlier studies.

The goal of the experimental part is to examine recyclability of the plastic parts of the used frequency converter and characterize the properties of the recycled plastic. The plastic parts of the frequency converter are divided into six groups: polyamide (PA), black polycarbonate (PC black), clear polycarbonate (PC clear), a blend of polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene (PC/ABS), painted polystyrene (PS+paint) and polystyrene (PS). There is also another case in the experimental part, where processing waste of a styrene based thermoplastic elastomer is mixed with virgin material with different mixing ratios, and properties are characterized.

Properties of the recycled plastics from the plastic parts of the frequency converter are compared to reference values from literature. Materials melt flow rate increases and tensile modulus decreases. An increase of melt flow rate tells that viscosity decreases which can be caused by molecular chain scission during the use and re-processing. Strain at break and impact strength of almost every material decrease that suggest the brittleness of the materials. Results like these are typical for recycled plastics.

Deviation between different test series of thermoplastics elastomers is small and there cannot be seen a connection of deterioration in properties if the amount of the processing waste increases.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty touko-joulukuun 2013 välisenä aikana Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitokselle. Diplomityö on osa Ympäristöministeriön rahoittamaa projektia ”Uusiomuovin vaikutukset valmistusprosessiin, tuotteiden ominaisuuksiin ja käyttöön.” (PCPR-projekti), joka toteutetaan yhdessä Lahden ammattikorkeakoulun ja Muovipoli Oy:n kanssa.

Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat professori Pentti Järvelä ja DI Tiina Malin. Heitä haluan kiittää työn aiheen tarjoamisesta sekä ehdotuksista ja neuvoista työn aikana. Työn rahoituksesta kiitokset kuuluvat Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiölle. Lahden ammattikorkeakoulusta tahtoisin kiittää yhteistyöstä ja avustuksesta kokeellisen osuuden kanssa erityisesti Pirkko Järvelää ja Iris Söderholmia sekä Muovipoli Oy:stä Sauli Eerolaa ja Ville Leiniötä. Kiitokset avusta kokeellisen osuuden toteuttamisessa kuuluvat myös TTY:n Polymeerihallin henkilökunnalle. Kokeellisen osuuden materiaaleista kiitokset kuuluvat ABB:lle ja Trelleborgille. Kiitokset myös projektin ohjausryhmän jäsenille Vesa Palojoelle, Sirpa Rivinojalle, Tarja-Riitta Blaubergille, Liisa Lehtiselle, Senja Jouttimäelle ja Hanna Pynnöselle arvokkaista neuvoista ja erilaisista näkökulmista.

Eryiskiitokset lounas- ja kahviseuraa kuuluvat Jarkolle, Jesselle ja Riinalle. Lisäksi haluan kiittää kaikkia, jotka ovat jaksaneet kuunnella ajatuksiani diplomityöstä, mutta samalla eivät ole kyselleet, kun en ole siitä halunnut puhua. Sekä totta kai kiitokset vanhemmilleni ja Jussille tuesta koko opiskelujen ajan.

Tampereella 19.2.2014

Laura-Kaisa Aaltonen

SISÄLLYS

Abstract	ii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Tekniset muovit	2
2.1 Polystyreeni (PS)	2
2.2 Akrylinitriilibutadienistyreeni (ABS)	3
2.3 Polykarbonaatti (PC)	4
2.4 Polyeteenitereftalaatti (PET)	4
2.5 Polybuteenitereftalaatti (PBT)	5
2.6 Polyamidit (PA)	5
2.7 Termoelastit (TPE)	6
2.8 Teknisten muovien kierrätys	8
3 Muovin kierrätettävyys	11
3.1 Lainsäädännön asettamat vaatimukset	11
3.2 Tuotesuunnittelun vaikutus kierrätettävyteen	12
3.3 Kierrätettävyyttä rajoittavat materiaaliominaisuudet	13
3.4 Modifiointimenetelmät ja saavutettavat edut	14
4 Mekaaninen kierrätys	15
4.1 Mekaaniset työvaiheet	16
4.1.1 Palakoon pienentäminen	16
4.1.2 Pesu ja kuivaus	18
4.1.3 Muovien tunnistaminen ja lajittelu	21
4.2 Sulaprosessointi	23
4.2.1 Uudelleengranulointi	23
4.2.2 Seostus neitseelliseen muoviin	25
4.2.3 Uudelleenprosessointi	25
4.3 Lisäaineistus	27
4.3.1 Hapettumisenestoaineet eli antioksidantit	27
4.3.2 UV-stabilaattorit	27
4.3.3 Palonestoaineet	28
4.3.4 Täyteaineet	32
4.3.5 Lujitteet	35
4.3.6 Apuaineet	35
4.3.7 Lisäaineiden kompaundointi	36
4.3.8 Lisäaineiden vaarat ja ympäristövaikutukset	37
4.3.9 Kierrätysmuovin lisäaineistus	38
5 Kierrätyksen ja modifioinnin vaikutus ominaisuuksiin	42
5.1 Seostus neitseelliseen muoviin	42
5.2 Täyteaineiden tai lujitteiden käyttö	44
5.3 Kompatibilisaattorien käyttö	46

6	Kierrätysmuovin käyttökohteet.....	48
7	Kokeellinen osuus.....	50
	7.1 Taajuusmuuttajat ja niiden muoviosat.....	50
	7.2 Purkuanalyysi.....	54
	7.3 Työvaiheet.....	55
	7.3.1 Pesu ja rouhiminen.....	55
	7.3.2 Koekappaleiden valmistaminen.....	57
	7.4 Termoelastit.....	57
	7.4.1 Koekappaleiden valmistaminen.....	58
	7.5 Testaus.....	58
	7.5.1 Vetokoe.....	58
	7.5.2 Iskukoe.....	59
	7.5.3 Kovuus.....	59
	7.5.4 Tiheys.....	60
	7.5.5 Palonkesto.....	60
	7.5.6 Öljynkesto.....	61
	7.5.7 DSC.....	62
	7.5.8 Reologiamittaukset.....	62
8	Tulokset ja niiden tarkastelu.....	64
	8.1 Taajuusmuuttajien muovit.....	64
	8.1.1 Vetokoe.....	64
	8.1.2 Iskukoe.....	68
	8.1.3 Kovuus.....	69
	8.1.4 Tiheys.....	69
	8.1.5 Reologiamittaukset.....	70
	8.1.6 Palonkesto.....	74
	8.1.7 DSC.....	75
	8.1.8 Vertailu neutseellisiin materiaaleihin.....	75
	8.2 Termoelastit.....	81
	8.2.1 Vetokoe.....	81
	8.2.2 Kovuus.....	85
	8.2.3 Tiheys.....	86
	8.2.4 Palonkesto.....	87
	8.2.5 Öljynkesto.....	87
	8.2.6 Reologiamittaukset.....	88
	8.2.7 Yhteenvedo tuloksista.....	91
9	Yhteenvedo.....	92
	Lähteet.....	94
	LIITE 1. RUISKUVALUPÖYTÄKIRJA	
	LIITE 2. RUISKUVALUPÖYTÄKIRJA TERMOELASTIT	
	LIITE 3. ISKUKOEPÖYTÄKIRJA	
	LIITE 4. KOVUUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA	

LIITE 5. PALONKESTOTESTAUKSIEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

LIITE 6. SULAINDEKSIMITTAUSPÖYTÄKIRJA

LIITE 7. DSC-KUVAAJAT

LIITE 8. KOVUUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA TERMOELASTIT

LIITE 9. ÖLJYNKESTOTESTAUSTEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni
ASA	Poly(akryylinitriilistyreeniakrylaatti)
ATH	Alumiinitriihydraatti. Palonestoaine.
DC	Direct current, tasavirta.
DSC	Differentiaalinen pyyhkäisykalometria. Terminen analyysimenetelmä.
DBDE	Dekabromidifenyylieetteri. Bromattu palonestoaine.
e	euro
EuPR	Plastic Recyclers Europe
EUPc	European Plastics Converter
HBCD	Rasva-hakuinen heksabromidisykloheksaani. Alifaattinen palonestoaine.
MAP	Maleenianhydridillä oksastettua polypropeeni. Kompatibilisaattori,
MFR	Melt flow rate, massavirta.
MI	Melt index, sulaindeksi.
MVR	Melt volume rate, tilavuusvirta.
MDH	Magnesiumhydroksidi. Palonestoaine.
OBDE	Oktabromidifenyylieetteri. Bromattu palonestoaine.
PA	Polyamidi
PE	Polyeteeni
PE-HD	Suuritiheksinen polyeteeni
PE-LD	Korkeatiheksinen polyeteeni
PeBDE	Pentabromidifenyylieetteri. Bromattu palonestoaine.
PBT	Polybuteenitereftalaatti
PC	Polykarbonaatti
PC/ABS	Polykarbonaatin ja akryylinitriilubutadieenistyreenin blendi. Virallisesti PC+(A/B/S).
PET	Polyeteenitereftalaatti
PET-A	Amorfinen polyeteenitereftalaatti
PET-C	Kiteinen polyeteenitereftalaatti
POM	Polyasetaali
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
PP	Polypropeeni
PPE	Polyfenyylieetteri
PS	Polystyreeni
PS-E	Solustettu polystyreeni
PS-HI	Iskunkestävä polystyreeni
PS-X	Suulakepuristettu polystyreeni
PU	Polyuretaani

PVC	Polyvinyylikloridi
SAN	Styreeniakrylinitriili
UP	Tyydyttymätön polyesteri
TPE	Termoelasti
Blendi	Polymeeriseos
Heterogeeninen	Epäyhtenäinen. Esimerkiksi heterogeeninen jätevirta voi sisältää useita materiaaleja ja epäpuhtauksia.
Homogeeninen	Tasalaatuinen ja samanlaisia osasia sisältävä.
Kopolymeeri	Polymeeri, jonka molekyylin rakenneyksikköinä on vähintään kahdenlaisia monomeerejä
Kompaundointi	Lisäaineiden sekoitus polymeeriin
Kontaminaatio	Ei-toivotun osatekijän läsnäolo materiaalissa. Epäpuhtaus.
Mekaaninen kierrätys	Jätteen muuttaminen uudelleenkäytettävään muotoon mekaanisten prosessien avulla.
Modifiointi	Materiaaliominaisuuksien tai prosessoitavuuden parantamista ja vakioimista eri menetelmin
POP-yhdisteet	Pysyvät orgaaniset yhdisteet
Post-consumer-jäte	Kulutuksen tuottama jäte
Pre-consumer-jäte	Tuotantojäte
Primäärinen kierrätys	Mekaanista kierrätystä, jossa kierrätysmuovin ominaisuudet eivät merkittävästi heikkene
Rabinowitsch-korjaus	Korjaa kapillaarireometriviskositeettimittauksissa saatuja arvoja epänewtonisille nesteille oikeellisimmiksi.
REACH-asetus	Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista
RoHS-direktiivi	Euroopan unionin säännös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.
Sekundäärinen kierrätys	Mekaanista kierrätystä, jossa kierrätysmuovin ominaisuudet heikkenevät jonkin verran
Tekninen muovi	Yleinen, käyttömäärältään valtamuovia pienempi muovi
Termoelasti	Termoplastinen elastomeeri. Elastomeeri, jolla on kumaimainen luonne, mutta prosessointi on mahdollista kestopuovien prosessointimenetelmin
Valtamuovi	Käyttömäärältään suuri kestopuovi

1 JOHDANTO

Euroopan jätehierarkian mukaan ensisijainen kierrätysmuoto syntyvälle jätteelle on kierrätys materiaalina eli mekaaninen kierrätys, joka pätee myös muovijätteelle. Myös Suomessa vuonna 2012 voimaan tullut jätelaki pyrkii tehostamaan muovijätteen mekaanista kierrätystä. [1]

Jotta muovijätteen mekaaninen kierrätys olisi mielekästä, on kierrätysmuoville löydettävä käyttökohde, jolla on markkinat. Käyttökohde voi olla sama kuin neitseellisen muovin tai jokin muu, mutta kierrätysmuovin ominaisuusprofiiliin tulisi vastata mahdollisimman hyvin valitun hyötykäyttökohteen vaatimusprofiiliin. Kierrätysmuovin ominaisuuksia ja prosessoitavuutta voidaan muokata sekä vakioda modifioinnilla vastaamaan paremmin muoviteollisuuden materiaalivaatimuksiin. Modifiointiin voidaan ajatella kuuluvaksi sekä mekaanisen kierrätyksen mekaaniset vaiheet että sulaprosessointi ja lisääaineistus.

Tämä työ keskittyy teknisten muovien kierrätykseen ja niiden modifiointimahdollisuuksiin. Työn teoriaosuudessa käsitellään tärkeimmät tekniset muovilajikkeet, tarkastellaan muovin kierrätettävyyteen vaikuttavia tekijöitä ja lainsäädännön vaikutusta kierrätykseen. Lisäksi käsitellään mekaanisen kierrätyksen vaiheet, joilla kierrätysmuovia voidaan modifioida. Työssä käsitellään myös kierrätyksen ja modifioinnin vaikutusta kierrätysmuovin laatuun ja ominaisuuksiin tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen perusteella.

Työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan käytettyjen taajuusmuuttajien muoviosien kierrätettävyyttä ja saatavan kierrätysmuovin ominaisuuksia. Kokeellisen osuuden toisessa tapauksessa tutkitaan termoelastien prosessoinnissa syntyvän tuotantojätteen vaikutusta materiaalin ominaisuuksiin.

2 TEKNISET MUOVIT

Muovit voidaan jaotella kahteen ryhmään, kertamuoveihin ja kestopuoveihin, niiden valmistusprosessien ja uudelleenprosessoitavuuden perusteella. Kertamuoveja ei voida muovata uudelleen lämmön avulla, koska se johtaa muovin kemialliseen hajoamiseen. Kestomuoveja taas voidaan muokata lämmön ja paineen avulla useita kertoja. Niiden molekyylijä yhdessä pitävät voimat heikkenevät lämmitettäessä ja taas vahvistuvat jäädytettäessä. Kestomuovit voidaan edelleen jakaa valtamuoveihin, teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin niiden käyttömäärien mukaan. [2, 3]

Suurin osa maailmanlaajuisesta muovin tuotannosta koostuu valtamuoveista. Määrä vaihtelee hiukan riippuen esimerkiksi siitä lasketaanko amorfinen PET, jota käytetään virvoitusjuomapullojen materiaalina, valtamuoveihin vai teknisiin muoveihin. Vuonna 2011 muovia valmistettiin maailmanlaajuisesti 233 miljoonaa tonnia, josta valtamuovien osuus oli noin 85 %, johon on laskettu mukaan amorfinen PET [4]. Valtamuovit ovat edullisia materiaaleja, joiden mekaaniset ominaisuudet eivät ole kovin hyvät, mutta useisiin sovelluksiin riittävät [5].

Loput noin 15 % koostuu teknisistä muoveista sekä erikoismuoveista. Erikoismuovit ovat ominaisuuksiltaan parempia kuin tekniset muovit ja valtamuovit ja niillä on yleensä jokin erikoisominaisuus, esimerkiksi todella hyvä lämmönkesto. Erikoismuovien osuus kaikista muoveista on vain muutama prosentti. [6]

Tekniset muovit ovat ominaisuuksiltaan valta- ja erikoismuovien väliltä. Monipuolisen ominaisuusjakaumansa takia tekniset muovit soveltuvat käytettäväksi monissa erilaisissa sovelluksissa. Lisäksi niitä seostetaan paljon toisten muovien kanssa entistä parempien ominaisuuksien saavuttamiseksi. Niiden merkittävimmät käyttökohteet ovat prosessiteollisuuden valmisteissa (putket, levyt, kalvot, säiliöt), autoteollisuudessa sekä sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. Teknisistä muoveista valmistetaan myös jonkin verran kulutushyödykkeitä. [6]

Seuraavaksi perehdytään muutamiin tämän työn kokeellisen osuuden kannalta oleellisiin teknisiin muovilajikkeisiin paremmin.

2.1 Polystyreeni (PS)

Polystyreeni luokitellaan perinteisesti valtamuoveihin, mutta iskuluja polystyreeni eli styreenibutadieeni (PS-HI) ja polystyreenin kopolymeerit akryliniitriilibutadieenisty-

reeni (ABS), styreeniakryylinitriili (SAN) ja poly(akryylinitriilistyreeniakrylaatti) (ASA) ovat teknisiä muoveja. [6] Polystyreeniä käsitellään kuitenkin tässä vaiheessa, koska se on oleellinen muovi tämän työn kokeellisen osuuden kannalta ja polystyreeniä käytetään myös teknisissä sovelluksissa.

Normaali polystyreeni on amorfinen lasinkirkas materiaali. Se on jäykkää, mutta haurasta. Lisäksi se on herkkä monille kemikaaleille ja UV-säteilylle. Jos polystyreenistä halutaan valmistaa muita kuin läpinäkyviä tuotteita, voidaan sitä värjätä. Sillä on alhainen veden absorptio, hyvät sähköiset eristysominaisuudet ja alhainen muottikutistuma. Polystyreeni pehmenee jo noin 75 °C:ssa, joten sen käyttölämpötila-alue on melko rajoitettu. Se myös palaa helposti. [6, 7]

Polystyreeniä käytetään muun muassa levyekstruusiossa. Levyistä valmistetaan lämpömuovaamalla monenlaisia pakkaustuotteita kuten jogurttipurkkeja ja kertakäyttöastioita. Ruiskuvalamalla polystyreenistä valmistetaan elektronisten laitteiden kuoria. Siitä valmistetaan myös monia arkisia esineitä, kuten kyniä, henkareita ja CD-levyjen koteloita. [6]

Iskunkestävää polystyreeniä valmistetaan lisäämällä polystyreeniin kumia tai butadieenikopolymeeriä, jolloin sitkeys ja iskulujuus kasvavat. Iskunkestävää polystyreeniä käytetään tyypillisesti sovelluksissa, joissa ei vaadita niinkään lujuutta vaan iskunkestävyyttä. [6]

2.2 Akryylinitriilibutadieenistyreeni (ABS)

ABS on rakenteeltaan kolmikomponenttinen styreenimuovi, joka on kopolymerisoitu polystyreenistä, butadieenistä ja akryylinitriilistä. Se voi olla joko seka- tai lohkokopolymeeri. Butadieenistä johtuen on ABS:ssä elastomeerifaasi, jolla on suuri vaikutus sen ominaisuuksiin. Ilman elastomeerifaasia styreenistä ja akryylinitriilistä kopolymeroitua muovia kutsutaan styreeniakryylinitriiliksi (SAN). ABS ja SAN muodostavat yhdessä ASA:n (Poly(akryylinitriilistyreeniakrylaatti)) kanssa ryhmän styreenin kopolymerit. Vuonna 2010 teknisten muovien kulutus maailmassa oli noin 21,5 miljoona tonnia, josta styreenin kopolymerit muodostivat noin 40 %. [4, 8, 9]

ABS:n kauppalajikkeiden välillä voi olla suuriakin ominaisuuksien vaihteluja, koska sen komponenttien suhteelliset osuudet vaihtelevat. Tyypillinen koostumus on 20–30 % akryylinitriiliä, 20–30 % butadieenia ja 40–60 % styreeniä. Butadieenifaasi takaa hyvän iskulujuuden myös alhaisissa lämpötiloissa. Lisäksi amorfinen ABS on sitkeää. Sillä on hyvä pinnankovuus ja pinnanlaatu, pieni työstökutistuma ja se on helposti pinnoitettavissa. ABS on edelleen melko edullinen tekninen muovi, vaikka sen hinta on ollut nousussa vuosien 1996 ja 1997 notkahduksen jälkeen. Halvimmillaan luonnonväriäinen ABS on maksanut 1,4 e/kg ja kalleimmillaan noin 2 e/kg. Musta ABS on tyypillisesti kym-

menen senttiä kalliimpi kiloa kohti kuin luonnonvärinen ja muut värit vähintään 0,5 euroa enemmän kilolta kuin luonnonvärinen. ABS:ää voidaan prosessoida kaikilla kestomuovien prosessointimenetelmillä. Sen heikkoja ominaisuuksia ovat huono säänkesto, rajallinen liuotinkesto sekä alhainen pehmenemislämpötila. ABS:ää käytetään tyypillisesti seostettuna muiden muovien kanssa, jolloin valmistettujen tuotteiden lämmönkesto, iskulujuus ja työstettävyys paranevat. Eniten käytetty seos on polykarbonaatin kanssa. ABS:ää käytetään muun muassa elektroniikkalaitteiden kuorissa ja koteloissa (kännykät, tietokoneet, keittiökoneet), auton näkyvissä muoviosissa ja pistorasioissa. [6, 9]

2.3 Polykarbonaatti (PC)

Polykarbonaatti ja sen seokset ovat yksi nopeimmin kasvava ryhmä teknisten muovien alueella. Vuosien 1990 ja 2010 välillä niiden markkinat ovat kasvaneet noin 9 % vuosittain ja niiden odotetaan kasvavan edelleen 5 % vuodessa vuosina 2010–2015.

Polykarbonaatti on amorfinen lasinkirkas kestomuovi. Se on lujaa, kovaa, jäykkää ja sitkeää. Sillä on laaja käyttölämpötila-alue. Se kestää jatkuvaa 130 °C lämpötilaa eikä syty helposti ja on itsestään sammuva. Sillä on myös hyvä kemiallinen kestävyys, naarmuuntumisenkesto sekä sähköneristävyys. Polykarbonaatin heikkoja ominaisuuksia ovat huono UV-valonkesto ilman stabilointia ja veden kesto korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi se on lovi- ja jännityssäroilyherkkä. Polykarbonaatin käyttökohteita ovat muun muassa CD-levyt, suojalevyt, ikkunalasit, murron- ja luodinkestävät lasit ja erilaiset suojavarusteet. [9]

Polykarbonaatin hinta on laskenut 2000-luvun alusta, toisin kuin monien muiden muovien. Vuoden 2008 alussa sen hinta oli hiukan alle 3 e/kg. Vuonna 2008 Euroopassa oli vain kolme polykarbonaatin raaka-ainevalmistajaa, joka on vähän verrattuna useisiin muihin teknisiin muoveihin. Polykarbonaatti on selkeästi suosituin tekninen seosmuovi. Sitä seostetaan niin osakiteisiin kuin amorfisiin muoveihin. Euroopassa käytetystä polykarbonaattista 20 % käytetään muoviseoksissa. Yleisin käytetty seos on jo aiemmin mainittu seos ABS:n kanssa. Seoksen erikoisominaisuus on, että se on yleensä sitkeämpi kuin seostamaton polykarbonaatti tai ABS. Muita yleisesti polykarbonaatin kanssa seostettavia muoveja ovat ASA ja PBT (polybuteenitereftalaatti). [6]

2.4 Polyeteenitereftalaatti (PET)

Polyeteenitereftalaatti on eniten käytetty termoplastisista polyestereistä. Siitä on olemassa amorfinen ja kiteinen lajike. Amorfista PET:ä (PET-A) käytetään nykyisin niin paljon, että se luokitellaan usein valtamuoviksi. Amorfinen PET on sitkeä ja lasinkirkas muovi, jonka tunnetuin käyttökohde on virvoitusjuomapullot. Amorfinen PET soveltuu erityisen hyvin lämpö- ja puhallusmuovaukseen. [6]

Kiteinen PET (PET-C) on perusväriltään valkoinen hyvän lämmönkeston omaava tekninen muovi. Sen ominaisuudet ovat lähellä toista kiteistä polyesteriä, polybuteenitereftalaattia. PET:n prosessointi on vaikeampaa, koska se vaatii suuremmat prosessointilämpötilat, mutta toisaalta sen lämmönkestävyys on parempi. PET:ä seostetaan usein PBT:n kanssa parempien lämmönkesto-ominaisuuksien ja sileän pinnan saavuttamiseksi. Sitä prosessoidaan yleisesti ruiskupuristuksella tai lastuamalla puolivalmisteesta. [6]

2.5 Polybuteenitereftalaatti (PBT)

Polybuteenitereftalaatti on ottanut kiteisen PET:n paikan monissa tuotteissa. Se on sitkeä, jäykkä, iskunkestävä, lämmönkestävä ja luja eikä ime vettä. Se on kuitenkin hydrolyysiherkkä ja kuivattava hyvin ennen prosessointia. PBT:n käyttökohteet ovat yleensä sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa, ja sitä käytetään silloin kun polykarbonaatin tai polyamidin lämmönkestävyys tai mittapysyvyys ei riitä. Se on korvannut polyamidin käyttöä myös autoteollisuudessa, koska se on mittapysyvä myös kosteissa olosuhteissa. Mittapysyvyytensä ansiosta se soveltuu hyvin tarkkamittaisiin, liikkuviin mekanismioisiin. PBT:tä prosessoidaan tyypillisesti ruiskuvalulla. [6]

PBT:tä seostetaan polykarbonaatin tai PET:n kanssa ja sitä voidaan lujittaa lasikuiduilla. Sen sähkö- ja elektroniikkateollisuuden käyttökohteiden takia siihen kompaundoidaan usein palonestoaineita. Verrattuna moniin muihin teknisiin muoveihin, käytetään PBT:tä melko vähän. Sen käyttö on kuitenkin lisääntynyt 2000-luvulla vuosittain noin 6 %. Käytön lisääntymiseen ovat vaikuttaneet kehittyneet lujitteet, palonestoaineet ja uudet seokset eri muovien kanssa. PBT:n hinta on pysynyt lähes samana noin 3 e/kg vuosina 2000–2008. [6]

2.6 Polyamidit (PA)

Polyamidit ovat nykyään eniten käytettyjä teknisiä muoveja. Ne ovat vanha ja laaja muoviryhmä. Ensimmäinen polyamidityyppi (PA 66) kehitettiin vuonna 1935. Sen kaupp nimi Nylon on jäänyt laajalti käyttöön koko polyamidiryhmälle. Aluksi polyamideita käytettiin tekokuituna tekstiiliteollisuudessa. Niille oli kuitenkin tarvetta myös teknisenä muovina niiden jäykkyyden, sitkeyden ja pienen kitkakertoimen ansiosta. Polyamidi-lyhenteen jäljessä oleva numero ilmaisee toistuvan jakson hiiliatomien määrän. Polyamidien molekyyliketjut voivat sisältää joko yhtä monomeeria kuten PA 6, PA 11 ja PA 12, tai kahta monomeeria, kuten PA 66, PA 69 tai PA 610. [6, 10]

Eniten käytettyjä teknisiä polyamidityyppejä ovat alifaattiset polyamidit. Ne ovat osittain kiteisiä valkoisia materiaaleja. Mitä pidempi vety-hiiliketju amidiryhmien välissä on, sitä matalampia ovat sulamislämpötila, vetolujuus, kimmomoduli sekä veden absorptio. Toisaalta taas iskulujuus ja venymä kasvavat vety-hiiliketjun pidentyessä. Toinen polyamidityyppi on aromaattiset polyamidit, jotka ovat kirkkaita. Aromaattisten

polyamidien jokainen rakenneyksikkö sisältää aromaattisen renkaan. Tunnetuimpia aromaattisia polyamideja ovat lujitteina käytetyt aramidikuidut. [6, 10]

Polyamidien tyypillisiä ominaisuuksia ovat korkea lujuus, jäykkyys ja kovuus. Ne kestävät hyvin kemikaaleja sekä iskuja ja kulutusta. Ne ovat myös kaasutiiviitä, myrkyttömiä ja niillä on hyvä prosessoitavuus. Polyamidit säilyttävät taipuisuutensa ja sitkeytensä myös korkeissa lämpötiloissa lähellä sulamispistettä. Polyamidien heikko ominaisuus on niiden korkea veden absorptio, joka vaikuttaa ominaisuuksiin esimerkiksi jäykkyyteen ja sitkeyteen sekä mittapysyvyyteen. Veden absorptio vaikuttaa myös prosessoitavuuteen ja polyamidit on tärkeää kuivata hyvin ennen prosessointia. Prosessoinnin jälkeen kaikki polyamidilajit ovat lujia ja hauraita. Jotta polyamideista saadaan jälleen sitkeitä ja kulumisenkestäviä, ne vaativat kosteuskäsittelyn. Polyamideita voidaan prosessoida kaikilla kestopuovien prosessointimenetelmillä, mutta suurin osa noin 75 % prosessoidaan ruiskuvalulla. [6, 10]

Käytetyimpiä polyamideja ovat osakiteiset polyamidit 6 ja 66. Niiden veden absorptio ilmasta on 2-3 %, joka on korkea myös polyamidien ryhmässä. Veden absorptio pienee, kun hiiliketju pitenee. Muita polyamideja kutsutaan erikoispolyamideiksi. Niiden osuus polyamidien markkinoista on vajaa kymmenen prosenttia. Niitä käytetään käyttökohteissa, joihin peruslaadut eivät sovi esimerkiksi läpinäkymättömyyden, korkean veden absorptio tai kemikaalien kestävyuden vuoksi. Polyamideilla 610 ja 612 on pieni veden absorptio ja ne sopivat mittapysyvyyttä vaativiin ruiskuvalukappaleisiin. Joitain polyamidityyppejä voidaan seostaa toistensa kanssa. Muiden muovien kanssa polyamidit ovat harvoin yhteensopivia tai ainoastaan heikosti yhteensopivia. Niitä lujitetaan usein lasikuidulla. [6, 10]

Polyamidien pääasialliset käyttökohteet ovat autoteollisuudessa sekä sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. Lisäksi niitä käytetään paljon kalvonvalmistukseen. Autoteollisuudessa polyamia käytetään kohteissa, joissa polypropeenin iskulujuus tai lämmönkestävyys ei ole riittävä, esimerkiksi koristekapselit tai air bag-kotelo. Lasikuitulujitettu polyamidi korvaa kevytmetallien käyttöä autoissa ollessaan yleensä halvempi ratkaisu, joka lisäksi laskee auton massaa. Sähköteollisuudessa polyamia käytetään paljon koteloidissa ja kytkimissä. Pakkausteollisuus käyttää pääasiassa PA 6:a monikerroskalvoissa yhdessä PE-LD:n kanssa, jolloin saavutetaan sekä hyvä kaasutiiviyttä vesihöyrytiiviyys. [6, 10]

2.7 Termoelastit (TPE)

Termoelastit eli termoplastiset elastomeerit kuuluvat elastomeereihin kuten myös kumit, joten niillä on kumimainen luonne. Kumien kovalenttisiä silloitussidoksia vastaavat termoelasteissa reversiibelit fysikaaliset sidokset. Termoelastien ero kumeihin verrattuna on niiden lämpömuovattavuus, joka mahdollistaa niiden prosessoinnin kestopuovien

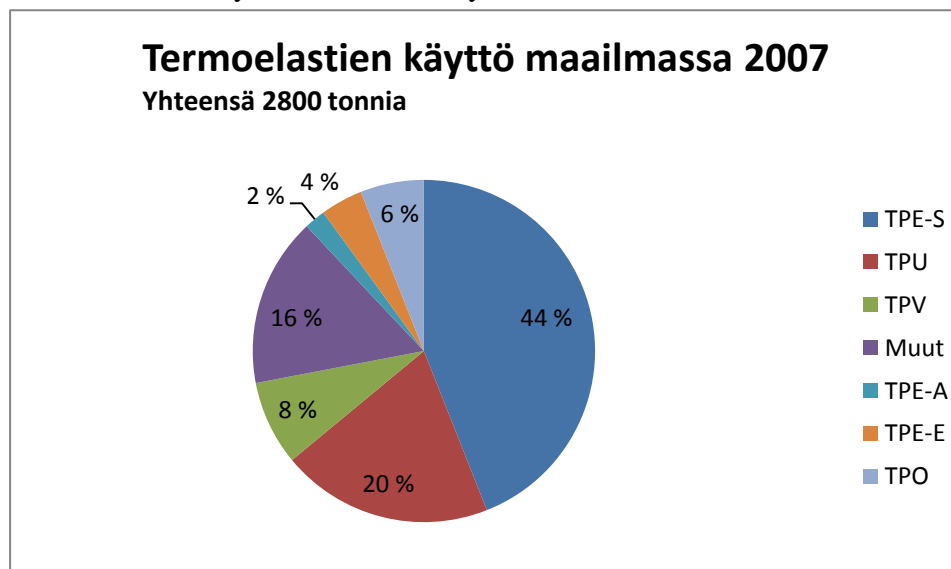
prosessointimenetelmillä. Termoelastit ovat siis lämpömuovattavia sopivassa lämpötilassa, mutta muotopysyviä käyttölämpötila-alueella. Niiden rakenne koostuu jäykistä kestopuovisegmenteistä ja pehmeistä kumisegmenteistä. Kestomuovisegmentit voivat joko muodostaa matriisin, johon kumipartikkelit ovat dispergoituneena tai ne voivat muodostaa blokkikopolymeerin yhdessä elastomeeriblokin kanssa. [6, 11]

Termoelastit ovat laaja materiaaliryhmä, joiden keskeisiä ominaisuuksia ovat erinomaiset kulumisenkesto- ja vaimennusominaisuudet, hyvä kemiallinen kestävyys sekä ominaisuuksien säilyminen myös matalissa lämpötiloissa. Kumeihin verrattuna niiden käyttöä rajoittaa suhteellisen alhainen ylin käyttölämpötila ja pehmeiden tyyppien valikoiman pienuus ja korkea hinta. Termoelasteja voidaan seostaa muihin muoveihin iskulujuuden lisäämiseksi, ja ne ovat myös hyvin käytettyjä muovien kanssa kaksikomponenttiruiskuvalussa. [6, 11]

Termoelastit ovat nopeasti kasvanut materiaaliryhmä, joiden nimeämistapa ei ole vielä täysin vakiintunut ja myös lyhenteitä on useita. Rakenteensa mukaan termoelastit voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- Kopolymeereihin, joihin kuuluvat
 - o Termoplastiset polyuretaanit, TPU, TPE-U
 - o Styreeniblokkipolymeerit, TPE-S
 - o Kopolyesterielastit, TPE-E, TPC, COPE
 - o Kopolyamidielastomeerit, TPE-A, TPA, COPA
 sekä
- Muovin ja elastomeerin seoksiin, joihin kuuluvat
 - o Polyolefiinielastit, TPO, TOE
 - o Termoplastiset vulkanaatit, TPV, DVR
 - o Sulatyöstettävät elastomeerit, MPR
 [11]

Kuvassa 1 on esitetty termoelastien käyttösuhteet maailmassa vuonna 2007.



Kuva 1. Eri termoelastien käyttösuhteet maailmassa vuonna 2007 [6]

Eniten käytettyjen styreeniblokkikopolymeerien rakenteessa kahta polystyreenilohkoa erottaa toisistaan polydieenilohko. Ryhmän tärkeimmät muovit ovat SBS ja SEBS, joissa polydieenilohkona on butadieeni ja eteenibutadieeni. Niillä on hyvä sähköneristävyyys, korkea vetolujuus- ja moduli sekä kulutuksenkestävyys. SBS:n lämmönkesto ja kemikaalien kesto on melko heikko. SEBS:llä nämä ovat paremmat sen tyydyttyneen rakenteen ansiosta, mutta SEBS on myös kalliimpi. Styreeniblokkikopolymeerejä prosessoidaan yleensä ruiskuvalulla tai kaksikomponenttiruiskuvalulla, ja niitä käytetään esimerkiksi erilaisiin tarroihin, sähköteollisuuden eristeisiin, käyttöesineiden pehmytösiin sekä jalkineisiin. [6, 11]

2.8 Teknisten muovien kierrätys

Teknisten muovien käyttömäärät ovat huomattavasti pienemmät kuin valtamuovien, joten myös teknistä muovijätettä syntyy vähemmän kuin valtamuovijätettä. Tästä johtuen niiden kierrätysmahdollisuuksia ei ole tutkittu, eikä niistä ole raportoitu yhtä laajalti kuin valtamuovien. Teknisten muovien kierrätyksessä olisi kuitenkin potentiaalia, koska vaikka niitä syntyy vähemmän kuin valtamuoveja, on niiden hinta vastaavasti korkeampi. Valtamuoveja kierrätettäessä ongelmana saattaa olla se, että kierrätysmuovin hinta nousee yhtä korkeaksi tai jopa korkeammaksi kuin neitseellisen muovin, jolloin kierrättäminen ja kierrätysmuovin käyttäminen eivät ole taloudellisesti kannattavaa. [12]

Teknisiä muoveja käytetään monenlaisissa sovelluksissa, mutta niiden käyttömäärät ovat kuitenkin melko pieniä, ja syntyvät jätevirrat ovat osittain melko hajallaan. Lisäksi teknisiä muoveja käytetään pääasiassa pitkän käyttöiän sovelluksissa, joten niitä ei poisteta käytöstä yhtä usein kuin esimerkiksi pakkauksissa käytettäviä valtamuoveja. Merkittävä osa teknisten muovien jätteestä tulee PET-kuitutuotannosta. Muut teknisten muovien jäteosuudet muodostuvat pääasiassa rakennus-, auto-, sähkö- ja elektroniikkateollisuuden komponenteista. Syntyvä muovijäte sisältää kuitenkin yleensä aina useampaa kuin yhtä eri muovilajiketta sekä mahdollisesti myös muita materiaaleja kuten metalleja. Lisäksi teknisten muovien kierrätystä vaikeuttavat erityisesti sähkö- ja elektroniikkalaitteissa palonestoaineina käytetyt halogeeniyhdisteet, joista osa ei ole enää sallittuja EU:n alueella, mutta niitä esiintyy edelleen vanhoissa tuotteissa. Kyseisiä yhdisteitä sisältäviä muoveja ei saa kierrättää. [13]

Vuonna 2008 sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa syntyvän muovijätteen määräksi EU:ssa, Sveitsissä ja Norjassa arvioitiin 1,4 miljoonaa tonnia. Tästä määrästä kaatopaikalle päätyi 55,2 % ja energiaksi polttoon 36,2 %. Mekaanisen kierrätyksen osuus oli ainoastaan 7,6 %. Sähkö- ja elektroniikkalaitteiden (SER-laitteet) käyttöikä on keskimäärin 3-12 vuotta. Suurempien laitteiden käyttöikä on pidempi kuin pienien. Taulukossa 1 on esitetty yleisimpiä sähkö- ja elektroniikkateollisuuden jätelähteitä ja niiden sisältämiä muovilajikkeita. [13]

Taulukko 1. Yleisimpiä sähkö- ja elektroniikkalaitteiden sisältämiä muovilajikkeita [13]

SER-laite	Muoviosuudet
Tulostin	PS (80%), PS-HI (10 %), SAN (5 %), ABS, PP
Matkapuhelin	ABS (80 %), PC/ABS (13 %), PS-HI, POM
TV	PPE/PS (63 %), PC/ABS (32 %), PET (5 %)
Lelut	ABS (70 %), PA (5 %), PP, PVC
Näyttö	PC/ABS (90 %), ABS (5 %), PS-HI (5 %)
Tietokone	ABS (50 %), PC/ABS (35 %), PS-HI (15 %)
Pienet kodinkoneet	PP (43 %), PA (19 %), ABS&SAN (17 %), PC (10 %), PBT, POM
Jääkaappi	PS&PS-E (31 %), ABS (26 %), PU (22 %), UP (9 %), PVC (6 %)
Astianpesukone	PP (69 %), PS (8 %), ABS (7 %), PVC (5 %)

Taulukosta 1 huomataan sähkö- ja elektroniikkalaitteiden monimutkaisuus, sillä kaikki taulukon laitteet sisältävät vähintään kolme eri muovilajiketta. Pienet kodinkoneet voivat sisältää jopa kuutta eri muovilajiketta. [13]

Vuonna 2008 autoteollisuudessa syntyvän muovijätteen määrä EU:ssa, Norjassa ja Sveitsissä oli 1,2 miljoonaa tonnia, josta kaatopaikalle päätyi 79,8 %, energiaksi polttoon 11,1 %, kemialliseen kierrätykseen 0,5 % ja mekaaniseen kierrätykseen 8,6 %. Yleisesti käytöstä poistuvien autojen materiaalit kierrätetään tai hyödynnetään energiana tehokkaasti, kuten renkaat ja metallit. Muovien kierrätysprosentti on kuitenkin alhainen verrattuna muihin materiaaleihin. Yksi suurimmista syistä tähän on useiden eri muovilajikkeiden käyttö autoissa. Eri muovilajikkeiden tunnistaminen on ratkaisevaa mekaanisen kierrätyksen onnistumisen kannalta. Direktiivin 2003/139/EY mukaan autoteollisuudessa muoviosat, joiden massa on yli 100g, ja kumiosat, joiden massa on yli 200g, muovilajike on merkittävä identifiointikoodilla. Tämä helpottaa muovien tunnistusta, jos lajittelu tehdään manuaalisesti. Auton käyttöikä on keskimäärin 13,5 vuotta. [13] Taulukossa 2 on esitetty auton eri komponenttien sisältämät muovilajikkeet ja niiden keskimääräiset massat tyypillisessä autossa. Tässä taulukossa ei ole huomioitu autojen renkaita.

Taulukko 2. Tyypillisen auton sisältämät muovilajikkeet ja määrät eri komponenteissa [13]

Komponentti	Sisältämät muovilajikkeet	Massa (kg)
Etupuskuri	PP, ABS, PC/PBT	10
Istuin	PU, PP, PVC, ABS, PA	13
Kojelauta	PP, ABS, SMA, PPE, PC	7
Polttoainesäiliö	HDPE, POM, PA, PP, PBT	6
Paneelit	PP, PPE, UP	6
Moottoritila	PA, PP, PBT	9

Sisäverhoilu	PP, ABS, PET, POM, PVC	20
Elektroniikka	PP, PE, PBT, PA, PVC	7
Ulkoverhoilu	ABS, PA, PBT, POM, ASA, PP	4
Valaistus	PC, PBT, ABS, PMMA, UP	5
Nestesäiliöt	PP, PE, PA	1

Muoveja käytetään autoissa muun muassa niiden hyvän isku- ja korroosiokestävyyden vuoksi, mutta tärkeimpinä ominaisuuksina ovat kuitenkin niiden keveys. Taulukosta 2 nähdään, että muoveja käytetään eniten sisätilan verhoilussa (47 %), rungossa (29 %), moottoritilan osissa (12 %) ja polttoainejärjestelmissä (7 %). Teknisten muovien lisäksi autoissa on paljon valtamuoveja kuten polypropeenia, polyeteeniä ja polyvinyylidikloridia. Muovien osa koko auton massasta on noin 9-12 % eli noin 150–180 kg. Tästä määrästä noin 20 % on komposiittimateriaaleja. [13]

3 MUOVIN KIERRÄTETTÄVYYS

Kierrätysmuoveille ei ole yleisesti määriteltyjä vaatimuksia laadun, koostumuksen tai muiden tekijöiden suhteen. Kierrätysmuovimarkkinoilla on kuitenkin asetettu tietyt kriteerit esimerkiksi epäpuhtauksien määrälle. Myös jotkut järjestöt ovat antaneet suosituksia kierrätysmuoville, mutta kuitenkin loppujen lopuksi kierrätysmuovin laatu ja koostumus ovat ostajan ja myyjän välisiä sopimuksia. [14]

Jotta kierrätysmuovia voitaisiin hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti, pitäisi kierrätysmuovin ominaisuusprofiilin vastata höytykäyttökohteen vaatimusprofiilia mahdollisimman hyvin. Kierrätysmuovin laatuvaatimukset riippuvat siis sen tulevasta käyttökohteesta. [15]

Tässä luvussa käsitellään muovien kierrätykseen ja kierrätysmuoveihin liittyvää tai jollakin tavalla suomen- tai euroopanlaajuisesti vaikuttavaa lainsäädäntöä, kierrätettävyyteen vaikuttavia materiaaliominaisuuksia, kierrätettävyyteen vaikuttamista tuotesuunnittelulla sekä kierrätysmuovin modifiointimenetelmiä ja niillä saavutettavia etuja.

3.1 Lainsäädännön asettamat vaatimukset

EU:n viisiportaisen jätehierarkian mukaan jätteen syntyä on ensisijaisesti ehkäistävä, kun jätettä kuitenkin syntyy, on se pyrittävä mahdollisuuksien mukaan käyttämään uudestaan tai kierrättämään materiaalina. Jos kierrättäminen ei ole mahdollista, tulisi jäte hyödyntää energiana, ja vasta viimeinen vaihtoehto on sen kaatopaikkasijoitus. EU:n lainsäädännössä ei kuitenkaan varsinaisesti säädelä muovijätettä. Ainoastaan pakkausdirektiivissä 94/62/EY annetaan kierrätystavoite muovipakkauksille, joka on 22,5 %. Tämä täyttyy Suomessa, mutta suurimmilta osin se on palautuspullojärjestelmän ansiota. Lisäksi jätealan puitedirektiivissä 2008/98/EY annetaan yleinen kierrätystavoite kotitalousjätteelle, joka kattaa myös muovijätteen. Jätealan puitedirektiivissä on myös säädös jätehierarkiasta. Lainsäädäntövaatimusten ja todellisen jätehuoltokäytännön välillä on kuitenkin iso ero: Jätehierarkia ei toteudu useissa EU:n jäsenvaltioissa, vaan kaatopaikkasijoitus on vallitsevin jätehuoltomuoto. Lisäksi osa kaatopaikoista on laittomia ja jätteiden sijoitus laittomasti luontoon yleistä. [16]

Suomen uusi jätelaki [1] astui voimaan 1.5.2012. Uuden jätelain tavoitteena on tehostaa jätehierarkian noudattamista. Lisäksi tärkeimpänä muutoksena verrattuna vanhaan jätelakiin, on tuottajavastuu jätehuollossa. Tuottajavastuun piiriin kuuluvat tällä hetkellä romurenkaat, romuautot, sähkö- ja elektroniikkaromu, paristot ja akut, keräyspaperi

sekä pakkaukset. Tuottajavastuulla tarkoitetaan tuottajien velvollisuutta huolehtia käytöstä poistuvien tuotteiden jätehuollosta. Tuottajan on järjestettävä käytöstä poistuvien tuotteiden vastaanottoaikoja, jonne tuotteen maksutta ja vaivattomasti luovuttaa.

Kemikaalilainsäädännön REACH-asetus liittyy joiltakin osin muovien kierrätykseen. REACH-asetus (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) on Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus N:o 1907/2006 kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista. REACH-asetus kieltää muun muassa jo kiellettyjä lisäaineita sisältävien muovien kierrätyksen. Jokainen EU:ssa valmistettu ja sinne tuotava kemiallinen aine on rekisteröitävä kemikaalivirastoon. Tämä koskee myös kierrätysmateriaaleja, paitsi jos kierrätysprosessissa syntyvä aine tai seos on sama kuin jo rekisteröity aine tai seos. Jätteet ovat REACH-asetuksen ulkopuolella, eikä myöskään sivutuotteita tarvitse rekisteröidä, jollei niitä saateta markkinoille. Kun jäte lakkaa olemasta jäte tai sivutuote toimitetaan hyötykäyttöön, on se rekisteröitävä REACH-asetuksen mukaisesti. Ongelmia saattaa syntyä esimerkiksi, kun jätettä ostava taho ostaa materiaalia, jonka he haluavat saattaa markkinoille, mutta he eivät saa REACH-asetuksen mukaista käyttöturvallisuustiedotetta. Plastic Recyclers Europe (EuPR), European Plastics Converter (EuPC), PlasticsEurope ja Vinyl 2010 ovat luo- neet palvelun helpottamaan kierrätysmateriaalien rekisteröintiä. Palvelun avulla yritykset voivat luoda kierrätysmateriaalille REACH-asetusta noudattavan, materiaalin mukaan räätälöidyn käyttöturvallisuustiedotteen kierrätettävän materiaalin tietojen perusteella. [16, 17, 18]

Muovijäte luokitellaan vaarattomaksi jätteeksi, joten sitä voidaan viedä EU:n ulkopuoli- siin maihin jätteensiiroasetuksessa säädetyn menettelyn avulla, ellei määräämä kiellä sen tuontia. EU:sta viedään muovijätettä muihin maihin, pääasiassa Aasiaan. Kokonais- vientimäärä viisinkertaistui vuosina 1999–2011. Laillisen muovijätteen lisäksi EU:n ulkopuolelle siirretään laittomia jätteitä, kuten sähkö- ja elektroniikkaromua, joka sisäl- tää paljon muovia. Mailla, joihin jätettä siirretään, ei yleensä ole riittäviä jätteenhuolto- järjestelmiä, joten jäte lisää ympäristökuormitusta. [16]

Euroopan Komission tänä vuonna julkaisema Vihreä kirja – Ympäristössä olevaa muo- vijätettä koskevasta eurooppalaisesta strategiasta [16] pyrkii herättämään keskustelua, miten muovijätteestä aiheutuviin julkispoliittisiin haasteisiin voitaisiin vastata. Jatko- toimenpiteet liittyvät jätelainsäädännön uudelleentarkasteluun. On tärkeää pohtia nykyi- siä jätteiden hyödyntämisen ja kaatopaikkasijoituksen tavoitteita ja miten ne saataisiin toteutettua nykyistä paremmin.

3.2 Tuotesuunnittelun vaikutus kierrätettävyyteen

Tuotteen tai komponentin suunnitellulla voidaan vaikuttaa suhteellisen pienellä vaivalla ja helposti sen kierrätettävyyteen verrattuna työhön, joka kierrätyksestä muussa tapauk-

nessa syntyisi. On olemassa joitakin yleispäteviä perusohjeita liittyen esimerkiksi materiaaleihin tai rakenteeseen, joilla voidaan vaikuttaa tuotteen tai komponentin kierrätettävyyteen, vaikka tietysti jokaisella tuotteella ja komponentilla on olemassa omat vaatimuksensa ja käyttökohteensa, jotka on huomioitava suunnittelussa. [19]

Materiaalien valinnassa pitäisi pyrkiä mahdollisimman helposti kierrätettäviin materiaaleihin. Parhaiten tähän päästään, kun käytetään niin vähän eri materiaaleja kuin mahdollista. Mitä enemmän eri materiaaleja tuotteessa on, sitä vaikeampaa ja kalliimpaa niiden erottaminen toisistaan on. Muovituotteissa olisi parasta mahdollisuuksien mukaan käyttää vain yhtä muovilajiketta tai keskenään yhteensopivia muovilajikkeita, jotka voitaisiin kierrättää yhdessä. Maalien ja pinnoitteiden käyttäminen tulisi välttää. Myrkyllisten materiaalien käyttöä tulisi välttää, sillä ne aiheuttavat ympäristöongelmia ja vaikeuttavat kierrätystä. Materiaalit olisi hyvä merkitä identifiointikoodeilla niiden tunnistamisen helpottamiseksi. Merkinnöillä ei ole merkitystä, jos kierrätysprosessin on automaattinen, mutta manuaalisessa erottelussa ne ovat suuressa roolissa. Muutenkin tuotteen kierrätettävyyden suunnittelun kannalta on merkitystä millaisella prosessilla se aiotaan kierrättää. Kierrätyksen taloudellisen kannattavuuden kannalta materiaaliksi kannattaa valita materiaali, jolla on arvoa kierrätysmateriaalimarkkinoilla. [19, 20]

Tuotteen rakenteella ja sillä, kuinka helppo se on purkaa, on vaikutusta tuotteen kierrätettävyyteen. Erilaiset pikaliitokset helpottavat eri materiaalien erottelua ja tuotteen purkamista huomattavasti verrattuna valettuihin liitoksiin tai liimoihin. Jos liimoja käytetään, olisi mahdollisuuksien mukaan parasta käyttää vesiliukoisia liimoja. Muovituotteissa olisi hyvä välttää valettuja ja liimattuja metalliosia. Tuotetta ei voida kuitenkaan suunnitella ainoastaan sen kierrätettävyyden kannalta, vaan sen toiminnallisuus ja kuluttajaystävällisyys ovat pääosassa. Joskus kokoonpanoystävällisen tuotteen suunnittelu voi olla ristiriidassa sen kierrätettävyyden ja helpon purkamisen kanssa. [19, 20]

3.3 Kierrätettävyyttä rajoittavat materiaaliominaisuudet

Kontaminaatiolla tarkoitetaan epäpuhtautta muovissa. Kontaminaatioiden määrä ja tyyppi riippuu muun muassa muovijätteen muovilajikkeesta, keräystavasta ja käyttökohteesta. Esimerkkejä kontaminaatiosta ovat metallit, hiekka ja muu lika, lisäainejäämät, muut polymeerit, painomusteet ja öljyt. Muovien onnistunutta kierrätystä ja kierrätysmuovin hyvää laatua varten olisi muovin oltava mahdollisimmat tasalaatuista eli homogeenistä ja mahdollisimman vähän kontaminaatioita sisältävää. Kontaminaatioiden määrän lisäksi, kierrätysmuovin laatuun vaikuttaa kontaminaation kemiallinen rakenne eli kuinka hyvin se on yhteensopiva muovin kanssa ja miten se käyttäytyy prosessoitaessa. [21, 22]

Kontaminaatio teknisissä muoveissa on erilainen kuin valtamuoveissa, joita käytetään esimerkiksi pakkauksissa. Pakkauksissa kontaminaatiota aiheutuu pakkauksen sisällös-

tä, etiketeistä, muista muoveista, esimerkiksi pullonkorkit ovat yleensä eri muovia kuin itse pullo. Teknisten muovien käyttökohteet eivät yleensä ole pakkauksissa vaan esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkasovelluksissa tai autoteollisuudessa. Kontaminaatiot ovat tyypillisesti muita materiaaleja esimerkiksi metalleja, kuten lyijyä tai kuparia, happoa, rasvaa tai likaa. Lisäksi ne voivat olla lisäainejäämiä muovissa. Vaikka suurin osa halogenoiduista palonestoaineista on nykyisin kielletty, voi niitä silti edelleen olla poistuvissa tuotteissa. Halogenoidut palonestoaineet saattavat muodostaa myrkyllisiä kaasuja korkeissa lämpötiloissa. [21] Myös muut lisäaineet voivat aiheuttaa ongelmia kierrätysmuovin prosessoinnissa, niistä on kerrottu enemmän luvussa 4.3.

Liangin [22] tutkimuksessa on testattu eri puhtausasteen omaavien kierrätetyn PC:n ja kierrätetyn ABS:n ominaisuuksia. Materiaalit ovat eroteltu näytöistä ja tulostimista. Kumpaakin materiaalia on testattu kolmella eri puhtausasteella (PC >99 %, 99 %, 98 % ja ABS 99,9 %, 96 % ja 88 %). Materiaalien sisältämät kontaminaatiot ovat muita muoveja. Tuloksista selviää, että toiset ominaisuudet ovat herkempiä materiaalin puhtausasteen vaihtelulle ja heikkenevät kontaminaatioiden määrän lisääntyessä. Näitä ominaisuuksia ovat iskulujuus ja murtovenymä. Toisiin ominaisuuksiin, kuten reologisiin ominaisuuksiin, kovuuteen ja murtolujuuteen, materiaalin puhtausasteella ei ole juurikaan vaikutusta. [22]

3.4 Modifiointimenetelmät ja saavutettavat edut

Modifioinnilla tarkoitetaan eri materiaaliominaisuuksien tai prosessoitavuuden parantamista eri menetelmin. Modifioinnilla pyritään muokkaamaan muovia siten, että kierrätysmuovi vastaisi paremmin muoviteollisuuden materiaalivaatimuksiin. Sillä pyritään parantamaan materiaaliominaisuuksia sekä prosessoitavuutta, mutta myös vakioimaan ominaisuuksia. Jos kierrätysmuovin ominaisuudet vaihtelevat paljon, sen uusiokäyttömahdollisuudet heikkenevät, koska prosessointi vaikeutuu. Modifioinnilla kierrätysmuovin ominaisuuksia voidaan muokata käyttökohdelähtöisesti, mikä voi helpottaa uusiokäyttöä. [15]

Kierrätysmuovin modifiointimenetelmille ei löydy selkeää jakoa kirjallisuudesta. Niihin voidaan kuitenkin ajatella kuuluvaksi kaikki mekaanisen kierrätyksen vaiheet. Mekaaninen kierrätys voidaan jakaa mekaanisiin työvaiheisiin ja sulaprosessointiin. Mekaaniset työvaiheet homogenisoivat muovivirtaa ja valmistelevat sitä sulaprosessointia varten. Mekaanisiin työvaiheisiin kuuluvat palakoon pienentäminen (rouhinta), pesu ja kuivaus sekä muovien erottelu muista materiaaleista ja eri muovilajikkeiden lajittelu erilleen. Sulaprosessointiin kuuluvat granulointi, seostus neutraaliseen muoviin sekä lisäaineistus. [23] Mekaanista kierrätystä ja sen vaiheita eli modifiointimenetelmiä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

4 MEKAANINEN KIERRÄTYS

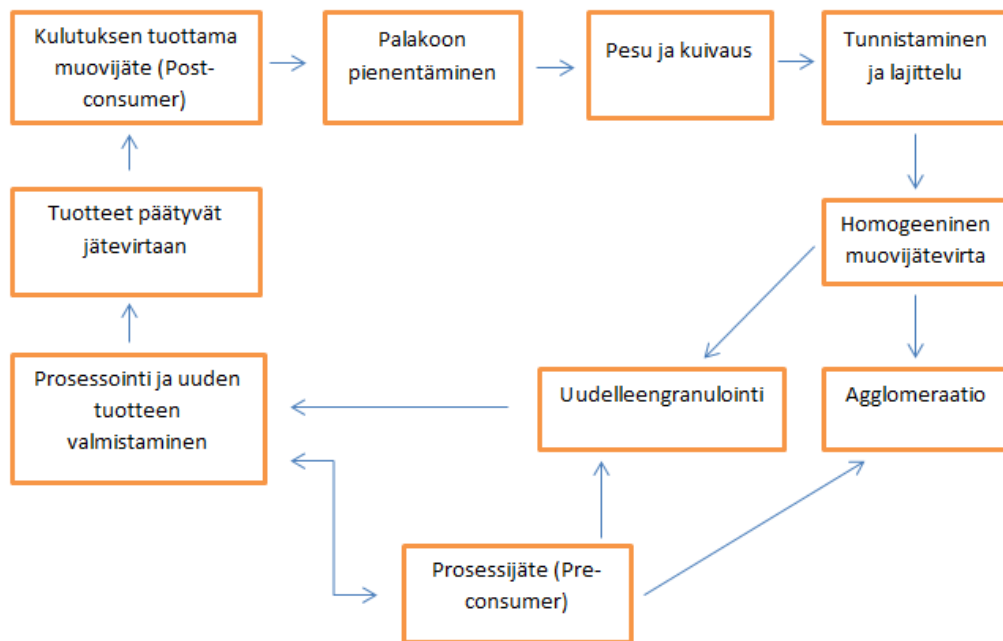
Muovijäte voidaan hyödyntää joko tuotteena, materiaalina, raaka-aineena (kemiallisesti) tai energiana. Kierrätysmenetelmät voidaan jaotella primääriseen, sekundääriseen, tertiääriseen sekä kvartiääriseen menetelmään. Primäärisessä menetelmässä muovijäte käytetään uudelleen sellaisenaan tai alkuperäisen tarkoituksen raaka-aineena ilman arvonnetystä, esimerkiksi PET-pullon kierrättäminen uudeksi vastaavaksi PET-pulloksi tai tuotantojätteen kierrättäminen yrityksen sisällä. Sekundäärinen menetelmä tarkoittaa muovin talteenottoa tai muokkausta uusien tuotteiden raaka-aineeksi. Sekundäärisessä menetelmässä kierrätysmuovin ominaisuudet tyypillisesti heikkenevät jonkin verran. Tertiäärinen menetelmä tarkoittaa muovin kemiallista kierrätystä tai raaka-ainekierrätystä (feedstock recycling). [23] Kemiaallinen kierrätys on muovin hajottamista monomeereiksi lämmön, kemikaalien tai katalyyttien avulla. Syntyneistä monomeereista voidaan uudelleen polymeroimalla valmistaa alkuperäistä polymeeriä. Raaka-ainekierrätyksessä materiaalista valmistetaan kemikaaleja, joita voidaan käyttää teollisuuden jatkojalostusprosesseissa tai polttoaineissa. Kvartiäärinen menetelmä tarkoittaa muovijätteen hyödyntämistä energiana eli polttamalla. [24]

Tässä diplomityössä keskitytään muovien mekaaniseen kierrätykseen. Mekaaniseen kierrätykseen voidaan laskea primääriset ja sekundääriset menetelmät, mutta suora uudelleenkäyttö (esim. muoviset pullokorit) ei varsinaisesti ole mekaanista kierrätystä, koska tuotteita ei voida laskea jätteeksi ja mekaaniset työvaiheet puuttuvat. Mekaaninen kierrätys voidaan lisäksi luokitella avoimeksi (open-loop) tai suljetuksi (closed-loop) kierrätykseksi. Joista avoin kierrätys tarkoittaa sekundääristä menetelmää ja suljettu kierrätys puolestaan primääristä menetelmää. [24, 25]

Mekaanisen kierrätyksen vaiheet voidaan jakaa kahdenlaisiin prosesseihin: mekaanisiin käsittelyihin, jotka homogenisoivat muovivirtaa, sekä sulaprosesseihin. Mekaanisiin vaiheisiin kuuluvat palakoon pienentäminen, pesu ja kuivaus sekä muovien tunnistus ja lajittelu. Sulaprosesseihin lukeutuvat uudelleengranulointi, lisääaineistus, seostus neutraaliseen materiaaliin sekä uudelleenprosessointi. Kaikki vaiheet eivät ole aina tarpeellisia ja niiden järjestys voi vaihdella. Tarvittaviin vaiheisiin vaikuttaa huomattavasti muovijätteen puhtaus ja sisältö (monia muovilajikkeita vai vain yhtä). [23]

Muovijätteet voidaan jakaa tuotannon sivuvirtoihin (pre-consumer) ja kulutuksen tuotamaan jätteeseen (post-consumer). Sillä mistä muovijäte on peräisin, on suuri merkitys kierrätyksen kannalta. Kierrätys helpottuu, jos tiedetään esimerkiksi, onko materiaalia

uudelleenprosessoitu aikaisemmin, mikä sen käyttökohde on ollut ja kuinka paljon se on hajonnut (degradation). [23] Tuotannon sivuvirroista syntyvän teollisuuden prosessijätteen koostumus on tarkasti tiedetty ja se on puhdasta, joten sen hyödyntämistä tuotantolaitosten sisällä on korkea. Kuluttajajäte on sekalaista, usein likaista ja syntyvät yhteinäiset jätevirrat ovat volyymiltaan suhteellisen pieniä. Tämä asettaa haasteensa sen kierrätykselle. Kuvassa 2 on esitetty mekaanisen kierrätysprosessin vaiheet ja vaihtoehdot sekä sekalaiselle kuluttajajätteelle että tuotannon sivuvirtojen prosessijätteelle.



Kuva 2. Mekaanisen kierrätysprosessin vaiheet kuluttajajätteelle ja tuotantojätteelle. Mukailtu lähteestä [23]

4.1 Mekaaniset työvaiheet

Mekaanisten työvaiheiden tarkoituksena on homogenisoida ja muokata materiaalia sulaprosessointiin sopivaksi. Seuraavaksi esitellään mekaanisen kierrätyksen mekaaniset työvaiheet.

4.1.1 Palakoon pienentäminen

Palakoon pienentäminen on tarpeellista myöhempää uudelleenprosessointia varten. Yleensä palakoko pienennetään kaksivaiheisesti ensin esiprosessoinnilla ja sitten rouhimalla. Esiprosessoinnin jälkeen palakoko on noin 25–50 mm. Esiprosessoinnin tärkeyttä aliarvioidaan usein, mutta se valmistaa materiaalia myöhempää palakoon pienentämistä varten ja helpottaa prosessin automatisoitavuutta myöhemmässä vaiheessa. [21, 23]

Esiprosessoinnissa käytettäviä laitteita ovat leikkurit (shredders), giljotiinit (guillotine shears) ja käsisakset (hand shears). Giljotiinissa terät painetaan hydraulisesti leikkauspalkkia (cutting bar) vasten. Giljotiini soveltuu sitkeille tuotteille, esimerkiksi kiristekalvojen ja paaleissa olevien muiden bulkkimateriaalien esikäsittelyyn. Käsisaksissa mekaanisesti tai hydraulisesti liikkuva terä leikkaa kiinteää terää vasten. Se soveltuu profiileille ja ekstruusiotuotteille. [21]

Leikkureissa yhteen kytkeytyvät leikkausakselit (cutting shafts) leikkaavat ja repivät materiaalia akselien välillä tai kiinteää leikkuupalkkia vastaan. Ruuvileikkureissa on yksi tai useampi ruuvi, jonka hampaat hienontavat ruuville syötettävää materiaalia. Leikkureissa voi olla yksi tai kaksi akselia. Yksiakselisia leikkureita käytetään leikkauksessa suuritulavuuksisia tuotteita, kuten autojen puskureita. Kaksiakseliset leikkurit sopivat hyvin epäpuhtauksia sisältävän materiaalin leikkaamiseen. Ylipäättään leikkurit soveltuvat kaikille leikattaville tuotteille ja ne ovat eniten käytettyjä esiprosessointilaitteistoja. Leikkureilla olevat terät ovat vaihdettavissa ja niiden järjestys on muutettavissa materiaalista riippuen. Leikkureista saatava palakoko ei ole yleensä tasainen, mutta lopullista palakokoa voidaan säädellä leikkuriin asennettavan sihdin avulla. [21, 26]

Esiprosessoinnin jälkeen materiaali hiutaloidaan entistä pienempään palakokoon. Tähän käytetään yleisimmin rouhimia (grinders), jotka irrottavat pieniä paloja suuremmista komponenteista, kunnes haluttu palakoko on saavutettu. Tyypillisesti haluttu palakoko on noin 0,5-1,3 cm. Rouhimen valintaan vaikuttaa käsiteltävän materiaalin tyyppi ja sen likaisuus. Likaisen muovijätteen rouhintaan tarvitaan vahvempia rouhimia kuin puhtaan prosessijätteen. Rouhimia käytetään muoviteollisuudessa tuotantojätteen rouhimiseen sen uudelleenkäyttöä varten. Puhtaan prosessijätteen kierrätyksessä ei tarvita muita vaiheita kuin rouhinta, koska se on puhdasta ja ominaisuudet ovat tunnetut, eivätkä ne ole heikentyneet käytön aikana. Tyypillistä muoviteollisuuden tuotantohylkyä ovat esimerkiksi aloitukset, purseet ja reunanauhat. [27]

Muovien rouhimiseen käytetään yleisimmin leikkuria pyörivillä terillä (rotary cutter). Ne ovat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan melko yksinkertaisia laitteita, jotka koostuvat roottorista, pyörivistä teristä (rotating knives), liikkumattomista teristä (stationary knives), jauhinkammioista (grinding chamber) ja sihdistä (screen). Materiaalin liikkuaessa pyörivien ja liikkumattomien terien välissä, ne leikkaavat sen pienemmiksi partikkeleiksi. Suurimmassa osassa on avoin tai puoliavoin roottori, jolloin sen ympärillä on tilaa materiaalin sekoitukseen ja jäähtymiseen. Ne ovat mekaanisesti kestäviä ja tehokkaita laitteita, jotka soveltuvat myös likaisen materiaalin käsittelyyn. Niiden puhdistus ja terien vaihto on helppoa. [21]

Rouhimet voidaan jakaa kuiva- ja märkärouhimiin. Kuivarouhimia voidaan käyttää tapauksissa, joissa muovi on riittävän puhdasta eli sitä ei tarvitse pestä. Pääasiassa kuivarouhimet soveltuvat siis tuotantojätteen rouhimiseen. Niiden käyttö on myös mahdollis-

ta, jos muovit on jo pesty ja kuivattu ennen rouhimista. Rouhimien terät ovat herkkiä kulumiselle, jota voi aiheuttaa esimerkiksi metallit, jos materiaali on jo puhdasta, ei kontaminaatioiden pitäisi aiheuttaa ongelmia rouhimisessa. Kuivarouhimet eivät ruostu ja niiden laakerit kestävät pitkään, koska ne eivät ole kosketuksissa veden kanssa. [21]

Märkärouhinta on osa materiaalin pesuprosessia, eikä materiaalia ole tarpeellista kuivata sen jälkeen, koska pesuprosessi jatkuu seuraavassa pesuvaiheessa. Märkärouhinnassa veden läsnäolosta ja materiaalin puhdistumisesta johtuen terät eivät ole niin herkkä kulumiselle kuin kuivarouhinnassa. Materiaali puhdistuu jo märkärouhinnan aikana, koska suurin osa energiasta muuttuu kitkaksi, jolla on yhdessä veden kanssa materiaalia pesävä vaikutus. Lisäksi leikkauspaikalla ei tapahdu paikallista lämmön nousua, joten lian kiinnittyminen materiaalin pintaan vähenee. Märkärouhin voidaan myös yhdistää materiaalin erotteluun, jolloin pinnalla oleva raskas lika saadaan eroteltua materiaalista ja terien kulumisen vähenee. [21]

4.1.2 Pesu ja kuivaus

Pesulla tarkoitetaan materiaalissa kiinni olevan lian irrottamista uudelleenprosessointia varten. Pesu voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: lian liottaminen ja pehmentäminen, lian irrottaminen muovin pinnalta ja lian erottaminen pestystä muovista. Pesun onnistumiseksi vaaditaan, että lian fyysinen sidos pesuaineeseen on voimakkaampi kuin pestävään materiaaliin. Pesuprosessiin teollisuudessa käytetään hyvin monipuolisia ja erilaisia laitteistoja, eikä ole välttämätöntä, että kaikki pesuvaiheet suoritetaan samalla koneella. [21]

Pinttyneen lian irrottaminen materiaalista vaatii joko pitkän liotusajan tai materiaalin kierron. Käytettäessä pitää liotusaikaa, säästetään mekaanista energiaa. Lian pehmentämiseksi muovi upotetaan pesunesteeseen. Liotusaikaan vaikuttaa lian määrä ja tyyppi. Liotus tehdään yleensä avoimessa tai suljetussa sekoitusaltaassa (stirring vessel) tai suuritulavuudellisessa ruuvikuljettimessa (screw conveyor) hitaalla nopeudella. Ruuvikuljettimella on tasaisempi upotusaika altaassa, koska materiaali kulkee jatkuvasti sekoitusaltaan kautta, on upotusaika aina suunnilleen sama. Sekoitusaltaassa upotusaika ei ole tasainen, koska toiminta on enemmän panostyypistä kuin jatkuvaa. Jos materiaali on erityisen likaista, voi olla järkevää erottaa liottaminen ja materiaalin kierto eri vaiheisiin eli lika pehmenetään ruuvikuljettimeen yhdistetyssä altaassa ja materiaalin sekoittaminen tehdään eri altaassa toisessa pesuvaiheessa. [21]

Lian irrottaminen muovin pinnalta tarvitaan intensiivistä nesteen ja materiaalin kiertoa. Tähän käytetään yleensä kitkapesuria, joka irrottaa epäpuhtaudet muovin pinnalta voimakkaan sekoituksen ja suurten leikkausvoimien avulla. Kitkapesuri käyttää suuria sekoitusnopeuksia, ja materiaalia ladataan ja poistetaan siitä jatkuvatoimisesti. Pesuvaikutusta voidaan tehostaa asettamalla kitkapesureita sarjaan siten, että pestävä materiaali ja pesuneste virtaavat eri suuntiin. [21]

Pesuprosessin kolmas vaihe lian erottaminen pestävästä muovista voidaan jakaa epäorgaanisen (mineral) ja orgaanisen (non-mineral) lian erottamiseen. Pesusysteemi suunnitellaan pääasiassa epäorgaanisen lian, kuten hiekka, multa tai kivet poistamiseen sedimentoimalla se erilleen pesuaineesta pesualtaan pohjalla olevaan kaukaloon. Orgaaninen lika poistetaan yhdessä pesuveden kanssa ja mekaanisen kuivauksen avulla. Pesuvesi voidaan yleensä kierrättää. [21]

Kun materiaali on pesty, täytyy se myös kuivata, koska kosteus materiaalissa voi aiheuttaa ongelmia myöhemmissä prosessointivaiheissa. Kosteus materiaalissa tai sen pinnalla voi vaikuttaa materiaalin sulaviskositeettiin ja sitä kautta muihin prosessiparametreihin. Lisäksi kosteus aiheuttaa ongelmia veden höyrystyessä prosessoinnin aikana ja sulamislämpötilan yläpuolella se voi aiheuttaa hydrolyysia, joka vaikuttaa muun muassa moolimassaan, sulaviskositeettiin ja lujuuteen. [21, 28]

Kosteus ilmaisee veden tai vesihöyryn määrää materiaalissa, ja kuivauksen tavoitteena on laskea sitä. Kosteuden määrä muovissa riippuu sen kemiallisesta rakenteesta. Vesimolekyylit ovat pooliset molekyylit, joten se muodostaa mielellään sidoksia poolisten muovien kanssa eli imeytyy niihin. Poolisia muoveja kutsutaan hygroskooppisiksi eli kosteutta imeviksi ja poolittomia puolestaan ei-hygroskooppisiksi. Poolisuus ei riipu pelkästään polymeerin rakenteesta, sillä vaikka polymeeri olisi pooliton, voi muovi olla poolinen, jos se sisältää poolisia lisäaineita. Hygroskooppisia polymeerejä ovat esimerkiksi polyamidit (PA), polykarbonaatti (PC) ja akrylinitriilibutadieenistyreeni (ABS). Ei-hygroskooppisia polymeerejä ovat esimerkiksi yleisimmät valtamuovit polyeteeni (PE) ja polypropeeni (PP). [29]

Hygroskooppisissa materiaaleissa vesi imeytyy granulaatin tai rouheen sisälle ja muodostaa kemiallisia sidoksia polymeerimolekyylien kanssa. Ei-hygroskooppisissa materiaaleissa vesi jää muovin pinnalle. Myös kertaalleen kuivatussa (dewatered) rouheessa tai granulaatissa kosteus tarttuu pääasiassa sen pinnalle. Mitä suurempi ominaispinta-ala rouheella tai granulaatilla on, sitä paremmin kosteus tarttuu siihen. Ominaispinta-alaan puolestaan vaikuttavat kidekoko ja sen muoto. Kosteusprosentti täytyy saada riittävän alhaiselle tasolle ennen prosessointia kuivauksen avulla. Kuivaustavan valinta riippuu muovista, sen prosessointitavasta ja loppukäyttökohteesta. Esimerkiksi ruiskuvaluprosessissa sallittu kosteusprosentti on 0,1-0,02 %. [28]

Kierrätysmuovien kuivausmenetelmät voidaan jakaa termisiin ja mekaanisiin menetelmiin. Mekaanisissa menetelmissä nestemäiset ja kiinteät partikkelit pyritään erottamaan toisistaan keskipakois- ja painovoiman avulla. Mekaaniset menetelmät pystyvät poistamaan vain osan kosteudesta. Termisissä menetelmissä käytetään lämpöä haihuttamaan neste. Termiset menetelmät kuluttavat huomattavasti enemmän energiaa kuin mekaaniset menetelmät niissä tapahtuvan faasimuutoksen takia, joten tyypillisesti energian sääs-

tämiseksi käytetään ensin mekaanista menetelmää ja sen jälkeen vielä termistä menetelmää. [21]

Mekaanisessa kuivauksessa muovi kuivataan aluksi karkeasti erottamalla vesi ja siihen liuenneet epäpuhtaudet ja pienet partikkelit liikkuvien tai paikallaan olevien sihtien avulla. Veden erottamiseen voidaan käyttää myös vedenpoistoruuvia, joka tunnetaan myös nimellä kitkaerotin. Se on rakenteeltaan kalteva ruuvikuljetin, jonka avoimeen yläpäähän on asetettu sihtilevy. Vedenpoistoruuvien lisäksi voidaan käyttää myös erityyppisiä sihtejä, kuten kaltevaan kulmaan asetettuja kiinteitä sihtejä tai liikkuvia täryseuloja. Veden karkean erottelun jälkeen kosteuspuiteisuus on noin 7-8 %. [21]

Karkean kuivauksen jälkeen mekaanista kuivausta jatketaan yleensä sentrifugaalikuivauksella. Kuivaimia on erilaisia, mutta ne kaikki perustuvat pyöriviin sihtikoreihin, joiden kierrosnopeudet vaihtelevat roottorin koon mukaan. Sentrifugaalikuivaimen tehokkuus riippuu laitteen ominaisuuksista pääasiassa roottorin kierrosnopeudesta ja käsitte-lyajasta. Kuivattavan materiaalin ominaisuuksista kuivaustehokkuuteen vaikuttavat materiaalin pinta-ala, partikkelien muoto, tiheys ja hydrofobisuus. Sentrifugaalikuivain voi toimia esimerkiksi jatkuvatoimisesti, jolloin materiaalia syötetään nopeasti pyörivään sihtikoriin, johon on yhdistetty hitaammin pyörivä ruuvi, joka kierrättää materiaalia ja lopulta poistaa sen. Erotettu vesi poistetaan omista poistoaukoistaan. [21]

Kuumailma-kuivaus soveltuu ei-hygroskooppisille muoveille pintakosteuden poistoon. Kuivain koostuu lämmittimestä ja puhaltimesta. Yksinkertainen rakenne takaa myös melko edullisen hinnan. Myös kuumailma-kuivaimen toimintaperiaate on yksinkertainen: Puhallin puhaltaa esilämmitettyä ilmaa granulaattien tai rouheen läpi alhaalta ylöspäin, esilämmitetty kuumailma sitoo kosteuden itseensä ja se johdetaan kuivurista ulos. [28]

Kuivailma-kuivaus on yleisin terminen kuivausmenetelmä, joka soveltuu sekä hygroskooppisille että ei-hygroskooppisille muoveille. Hygroskooppiset muovit vaativat kuitenkin lähes aina kuuma-kuivailma-kuivausta. Riittävän alhaisen kosteuspuiteisuuden saavuttamiseksi on muovi altistettava kuivailmalle matalan kastepisteen (-40 °C) ympäristössä. Kuivailma esikuivataan alumiinisilikaattisten molekyyli-seulojen avulla ennen sen johtamista rouheen tai granulaattien sekaan. Kuivailma-kuivaus on taloudellinen menetelmä, jolla on suuri kuivausnopeus. [28]

Alipaine-kuivaus perustuu veden kiehumispisteen alenemiseen paineen laskiessa. Kuivuriin muodostetaan alipaine, jossa vesi kiehuu jo huoneenlämmössä, jolloin vesi höyrystyy ja se johdetaan ulos kuivurista. Alipaine-kuivaus on kustannustehokas menetelmä, jolla on pitkät huoltovälit, mutta sen kuivausteho on heikko. [28]








4.1.3 Muovien tunnistaminen ja lajittelu

Jotta kierrätysmuovia voidaan uudelleenprosessoida ja saavuttaa riittävät ominaisuudet korkealaatuisiin sovelluksiin, on muovijätteen oltava homogeenista eli sisällettävä ainoastaan yhtä muovilajiketta. Lajittelu voidaan jakaa kahteen osioon: muovien ja muiden materiaalien erottamiseen toisistaan esimerkiksi partikkelikoon perusteella ja eri muovilajikkeiden toisistaan erottamiseen niiden ominaisuuksien perusteella.

Muovien lajittelun paikka kierrätysprosessissa riippuu voimakkaasti esimerkiksi jätteen keräystavasta. Muovien syntypaikkalajittelu helpottaa kierrätysprosessia ja lajittelua myöhemmässä vaiheessa. Kuluttajilta kerätty syntypaikkalajiteltu jäte vaatii kuitenkin lisälajittelua ja puhdistusta riittävän homogeenisten muovijakeiden tuottamiseksi keräilytavasta riippumatta. Muiden materiaalien, esimerkiksi metallien, erottaminen jätevirrasta on usein kannattavampaa tehdä jo ennen palakoon pienentämistä, jotta ne eivät pääse vahingoittamaan teriä rouhintavaiheessa. [24]

Eri polymeerilajikkeet voidaan erotella toisistaan joko makro- tai mikrolajittelulla. Makrolajittelussa muovit lajitellaan kokonaisina tai lähes kokonaisina tuotteina, kun taas mikrolajittelussa muovi on jo rouhittu tai muuten pienennetty pienempään palakokoon. Makrolajittelu voidaan tehdä manuaalisesti, jolloin siihen tarvitaan paljon työvoimaa, eivätkä käsiteltävät muovimäärät voi olla kovin suuria. Manuaalinen lajittelu perustuu pääasiassa muovien identifiointikoodeihin ja tuotteen ulkonäköön, joten virheitä saattaa esiintyä. [30] Yhdysvaltalainen Society of the Plastics Industry-järjestö (SPI) on luonut muovien tunnistamista ja kierrättämistä helpottavan identifiointikoodi- ja numerointisysteemin jo vuonna 1988. Pakkausmateriaalien tunnistamisesta ja merkitsemisestä on säädös valtioneuvoksen päätöksessä pakkauksista ja pakkausjätteestä. Sääöksessä on määritelty eri pakkausmateriaaleille, mukaan lukien muovi, oma tunnistusjärjestelmä. [31] Tunnistusjärjestelmän käyttäminen on kuitenkin vapaaehtoista EU:ssa, mutta monet eurooppalaiset muovijärjestöt, myös PlasticEurope, suosittelivat sen käyttöä. Tunnistusjärjestelmän mukaiset koodit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Valtioneuvoksen päätöksen 23.10.1997/962 mukainen pakkausmuovien ja SPI:n suosittama tunnistusjärjestelmä. Mukailtu lähteestä [32]

Materiaali	Lyhenne	Numero	Identifiointikoodi
Polyeteenitereftalaatti	PETE/PET	1	
Korkeatiheyspolyeteeni	PE-HD/HDPE	2	
Polyvinyylikloridi	PVC	3	
Matalatiheyspolyeteeni	PE-LD/LDPE	4	
Polypropeeni	PP	5	
Polystyreeni	PS	6	
Muut	OTHERS	7	

Myös kansainvälisissä ISO-standardeissa on määritelty muoveja koskevia merkintätapoja. Näitä merkintätapoja käsitellään standardeissa ISO-1043-1 Plastics-Symbols and abbreviated terms-Part 1: Basic polymers and their special characteristics, ISO-1043-2 Plastics-Symbols and abbreviated terms-Part 2: Fillers and reinforcing materials, ISO-1043-3 Plastics-Symbols and abbreviated terms-Part 3: Plasticizers, ISO-1043-4 Plastics-Symbols and abbreviated terms-Part 4: Flame Retardants sekä SFS-EN ISO-11469

Muovit. Muovituotteiden tunnistaminen ja merkintä. Eri teollisuuden aloilla ja eri käyttökohteissa on erilaiset säädökset ja suositukset koskien muoviosien merkitsemistä. Esimerkiksi autoteollisuudessa direktiivin 2003/138/EY [33] mukaan muoveja koskevia standardeja käytetään muoviosien merkitsemiseen, jos osan massa on yli 100 g. Komission päätöksen 2000/40/EY [34] mukaan kylmälaitteiden yli 50 g:n muoviosissa on oltava standardin ISO-11469 mukaiset merkinnät.

Suurilla volyyymeilla muovien lajitteluun polymeerilajikkeittain makrolajittelulla voidaan käyttää automaattilajittelua. Automaattilajittelun investointikustannukset ovat suuret, mutta käyttökustannukset ovat manuaalista lajittelua halvemmat. Lajittelu perustuu yleensä spektroskopiaan tai konenäköön. Materiaali siis tunnistetaan sen spektrin tai värin ja muodon perusteella. Muovit voidaan ohjata tunnistimelle yksittäin eli tuotteittain, jolloin tunnistin tunnistaa muovin ja ohjaa sen oikeaan virtaan. Massatunnistuksessa muovit levitetään kerroksena tunnistimelle ja ne erotetaan esimerkiksi ilmavirran avulla. Lajittelu voi olla joko positiivista tai negatiivista. Positiivisessa lajittelussa tunnistettu muovi poistetaan linjalta kun taas negatiivisessa lajittelussa muut kuin tunnistetut muovit poistetaan materiaalivirrasta. [30]

Mikrolajittelulla voidaan erotella sekä eri polymeerilajikkeita toisistaan että poistaa muita materiaaleja materiaalivirrasta. Mikrolajittelu perustuu eri ominaisuuksiin kuten tiheyteen, sähköisiin ominaisuuksiin, kemiallisiin ominaisuuksiin, optisiin ominaisuuksiin tai magneettisuuteen. Suurin osa metalleista voidaan poistaa helposti, koska ne ovat magneettisia. Ei-magneettisen metallien poistaminen ei ole yhtä yksinkertaista. [23]

4.2 Sulaprosessointi

Mekaanisten työvaiheiden jälkeen seuraa muovin sulaprosessointi. Jotta sulaprosessointi olisi mielekästä, ovat mekaaniset työvaiheet tehtävä huolellisesti ja materiaalin oltava mahdollisimman puhdasta.

4.2.1 Uudelleengranulointi

Mekaanisten työvaiheiden jälkeen muovi on rouheena, jonka palakoko- ja muoto eivät ole vakioita. Rouheen bulkkitiheys on usein matala ja sen reologiset ominaisuudet heikot. Varsinkin kevyttä muovijaetta kuten muovikalvot on tarpeen tiivistää eli nostaa sen bulkkitiheyttä eli agglomeroida ennen granulointia, koska se helpottaa materiaalin syöttöä granulaattoriin. Rouhe on halvempaa kuin granulaatti ja sitä käytetään ”heikommissa” sovelluksissa. Usein rouhe halutaan granulaattimuotoon uudelleenprosessointia varten. Granulointi lisää kierrätysmateriaalin kustannuksia, mutta myös lisää sen arvoa. Granulointi myös parantaa homogenisointia. Granulointi tehdään ekstruuderilla, jossa samalla sekoitetaan halutut lisäaineet kierrätysmuoviin. Lisäaineita käsitellään tarkemmin luvussa 4.3. Granulointiin voidaan käyttää yksi- tai kaksiruuviekstruudereita ja erilaisia ruuveja riippuen prosessoitavasta muovista. [35]

Granulointitekniikoita on olemassa useita, mutta niistä eniten käytettyjä muoviteollisuudessa ovat nauhagranulointi (strand pelletizing) ja vedenalainen granulointi (underwater pelletizing). Nauhagranuloinnissa suulakkeelta tuleva sula vedetään nauhaksi, joka leikataan lyhyiksi sylinterimäisiksi granulaateiksi vasta sen jähmettymisen ja jäähtymisen jälkeen. Jäähdytys ja jähmettäminen tehdään vesialtaassa. Vedenalaisessa granuloinnissa suutin on kokonaan veden alla, joten muovin työntyessä ulos suuttimesta, joutuu se heti kosketuksiin veden kanssa ja pyörivät terät katkaisevat materiaalin välittömästi. Vedenalaisesta granuloinnista saatavat granulaatit ovat muodoltaan pyöreitä, koska ekstruuderin suutin on pyöreä ja myös suutinreiät ovat ympyrän muodossa. Suutin ja leikkurit ovat suunniteltu liitettävän yhteen muodostaen suljetun laatikon, jossa vesi kiertää sekä kuljettaakseen että jäähdyttääkseen granulaatteja. Molemmilla tekniikoilla valmistuteista granulaateista poistetaan vesi ja vääränkokoiset granulaatit täryseuloilla, minkä jälkeen granulaatit on vielä kuivattava ennen pakkaamista. [36]

Sekä nauhagranuloinnin että vedenalaisen granuloinnin kapasiteetti on maksimissaan noin 11 000 kg/h. Vedenalaisen granulaattorin tuottavuus on hieman suurempi kuin nauhagranulaattorin, mutta nauhagranulaattorin peruskustannukset ovat hiukan alemmat. Molemmilla tekniikoilla voidaan valmistaa erikokoisia granulaatteja, mutta vedenalaiseen granulaattoriin on saatavissa suuttimia, joiden reikien halkaisija on pienempi, joten sillä saadaan valmistettua pienempiä granulaatteja, halkaisijaltaan 0,2-0,3 mm. [6, 36]

Granulointi voidaan tehdä myös hotfacecut-tekniikalla, jossa sula leikataan granulaateiksi välittömästi sen saavuttua suuttimelle. Granulaatit jäähdytetään suuttimelle suihkutettavalla vedellä tai kaasulla. [6]

Pääasiallisesti kierrätysmateriaalissa olevat kontaminaatiot olisi syytä saada poistettua mahdollisimman hyvin jo ennen granulointivaiheita, mutta jos niitä on vielä materiaalin seassa pieniä määriä, voidaan niiden poistamiseen käyttää suodatin- ja kaasunpoistojärjestelmiä. Tässä vaiheessa epäpuhtaudet ovat jonkin muun aineen kuin polymeerin kiinteitä partikkeleja tai polymeeripartikkeleja, jotka eivät ole sulaneet. Epäpuhtauksien poistoon käytetään pääasiassa erilaisia sihtejä. Sihti sijoitetaan ekstruuderissa sylinterin jälkeen ennen suutinta, ja se tuetaan reikälevyllä, joka on itsessään harva seula. Yksinkertaisimmillaan sihti on halkaisijaltaan noin sylinterin kokoinen verkkolevy. Sihdeillä on yleensä verkkomainen rakenne ja ne ovat kuitukankaita tai huokoisia materiaaleja, jotka on tuettu tukikankaalla. Jos materiaali sisältää paljon epäpuhtauksia, ne voivat tukkia sihdin. Tukkeutuminen nostaa painetta ekstruuderissa, jolloin materiaaliin kohdistuu suuria leikkausvoimia, jotka saattavat johtaa materiaalin hajoamista ja ominaisuuksien heikkenemistä sekä muuttavat reologisia ominaisuuksia. Kaasunpoistojärjestelmä poistaa vettä ja muita helposti haihtuvia yhdisteitä kuten painovärejä ja liuottimia. [21, 23]

4.2.2 Seostus neutseelliseen muoviin

Kierrätysmuovin ominaisuudet ovat tyypillisesti heikentyneet jonkin verran sen käytön ja kierrätyksen aikana, ja siksi sen käyttäminen yhdessä neutseellisen muovin kanssa on varteenotettava vaihtoehto kierrätyksen lisäämiseksi. Kierrätysmuovin ominaisuudet saattavat olla sen verran erilaiset neutseelliseen muoviin verrattuna, että niiden yhteensopivuuden parantamiseksi on käytettävä kompatibilisaattoria, vaikka ne olisivat samaa polymeerilajiketta. Tyypillisesti esimerkiksi moolimassa ja moolimassajakauma saattavat olla hyvinkin erilaiset kuin neutseellisellä muovilla. Seostamalla kierrätysmuovia neutseelliseen muoviin voidaan saavuttaa riittävät ominaisuudet moniin sovelluksiin. [37]

Kierrätysmuovin mahdollinen määrä tuotteessa riippuu siitä millaiset ominaisuudet halutaan saavuttaa ja mikä käyttökohde on. Tällä hetkellä muoviteollisuudessa yleisenä ohjeena pidetään, että kierrätettyä materiaalia voi olla vain 20–30 painoprosenttia. Käytännöllä ei kuitenkaan aina ole prosessointiin tai käyttökohteisiin perustuvia lähtökohtia. Joillakin teollisuudenaloilla kierrätysmuovilla on ehdoton käyttökielto. Näihin kuuluvat lääketeollisuus sekä osa elektroniikan sovelluksista. [15]

4.2.3 Uudelleenprosessointi

Kierrätysmuovia voidaan prosessoida samoilla menetelmillä kuin neutseellistä muovia. Mitä homogeenisempaa muovi on, sitä helpompaa sitä on prosessoida. Sopivan prosessointimenetelmän valintaan vaikuttaa uusiomuovin käyttökohde eli millainen tuote halutaan valmistaa. [23]

Ekstruusiolla voidaan valmistaa jatkuvia profiileja kuten nauhoja, putkia tai levyjä. Ekstruuderin rakenne on samanlainen kuin granuloinnissa. Sylinterissä pyörivä ruuvi tai ruuvit plastisoivat muovin, jonka jälkeen se pakotetaan haluttuun muotoon suuttimessa. Muovi jäähdytetään ulkoisessa jäähdytysyksikössä eli yleensä joko vesialtaassa tai vettä suihkuttamalla. Lopuksi leikkuuyksikössä ekstrudoitu kappale leikataan haluttuun muotoon. [23]

Ruiskuvalu on yksi eniten käytetyistä muovien prosessointimenetelmistä nykyään. Sillä voidaan valmistaa monimutkaisia kappaleita moniin eri käyttökohteisiin, mutta se on taloudellisesti järkevä vain suurilla tuotantovolyyymeilla. Ruiskuvalussa muovi plastisoidaan, homogenisoidaan ja ruiskutetaan muottiin. Plastisointiin käytetään ruuvia kuten ekstruusiossa. Kierrätysmuovia voidaan käyttää esimerkiksi monikomponenttiruiskuvalussa, jossa kappaleen pintakerros on neutseellistä muovia ja ydin kierrätysmuovia. Tällöin ydinmateriaalina on mahdollisuus käyttää myös kontaminoitunutta ja sekalaista muovijätettä, jonka ulkonäöllä ei ole merkitystä. [23]

Muovituotteiden valmistuksessa syntyy aina tuotantojätettä eli hävikkiä. Hävikki on keskimäärin 5 %, mutta ruiskuvalussa se voi olla jopa 12 %. Hävikki muodostuu sekä raaka-aineen että puolivalmisteiden ja valmiiden tuotteiden menettämisestä. Hävikkiä syntyy muun muassa virheellisistä tuotteista, ruiskuvalun valutapeista, raaka-aineen likaantumisen ja ajon aloituksissa. Muoviteollisuudessa raaka-aineen osuus koko tuotteen hinnasta on tyypillisesti lähes puolet, joten raaka-aine pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. [6]

Hävikki saadaan minimoitua tehokkaimmin, jos tuotantojäte kierrätetään sisäisesti. Tällöin raaka-aine syötetään takaisin tuotantoprosessiin ilman välivarastointia. Raaka-aineen likaantumista on vältettävä, jotta se voidaan yksinkertaisesti rouhia ja syöttää takaisin prosessiin. Granulointi ei ole tarpeellista, koska lisäaineistusta ei tarvitse uusia. Tuotantojäte voidaan kierrättää myös ulkoisen tahon avulla, jolloin tuotantojäte otetaan talteen syntypaikalla ja kuljetetaan uusimuoviyritykseen. Muovin talteenotossa on kiinnitettävä huomiota puhtauteen ja eri muovilajien erillään pitämiseen. Uusimuovi voidaan palauttaa takaisin alkuperäiseen yritykseen tai se voidaan myydä kolmannelle yritykselle kotimaassa tai ulkomailla. Joskus yritys ei löydä käyttöä uusimuoville tai sen ei ole mahdollista hyödyntää sitä kaikkea esimerkiksi tuotanto-ongelmista johtuen. Nykyisellä muoviraaka-aineen hinnalla kierrätysliiketoiminta on kannattavaa. Muoviraaka-aineiden hinnat eivät todennäköisesti enää laske niin alas, että kierrätysmuovin hinta olisi liian lähellä neitseellisen muovin hintaa. [6]

Myös heterogeenisille ja kontaminoituneelle muoville on löydetty muutamia prosessointitekniikoita. Valmistettavien tuotteiden laatuvaatimukset eivät tällöin ole yhtä korkeat kuin homogeenisella muovilla. Valmistettavat tuotteet ovat usein suuria ja paksuseinäisiä, mikä kompensoi heterogeenisen muovin heikkoja ominaisuuksia. Käytössä olevia menetelmiä ovat juokutusruiskuvalu (intrusion moulding), siirtopuristus ja sintrausvalu. Juokutusruiskuvalussa plastisoitu muovi pakotetaan muottiin ja jäädytetään esimerkiksi vesijäähdetyksellä. Kierrätysmuovin epäpuhtauksien määrä voi olla jopa 20 paino-%. Jos materiaalissa olevien epäpuhtauksien sulamispiste on korkeampi kuin käytettävä prosessointilämpötila, ne jäävät plastisoidun materiaalin sekaan kiinteinä ja asettuvat muottiinvalussa profiilien sisään. Valmistettavat tuotteet ovat suuria, geometrisesti yksinkertaisia kappaleita, kuten profiileja ja paneeleja, joita käytetään puun korvikkeena esimerkiksi aidoissa ja lasten leikkivälineissä. Siirtopuristus on yhdistelmä ruiskuvalun ja puristusmuovauksen ominaisuuksia. Se perustuu alun perin puristusmuovaukseen, mutta sillä voidaan valmistaa monimutkaisempia kappaleita, jotka voivat sisältää esimerkiksi koloja ja inserttejä. Muovi plastisoidaan ja avoin muotti täytetään matalalla paineella. Sen jälkeen muotti puristetaan kiinni ja kappaleen annetaan jäähtyä. Siirtopuristuksella valmistetaan esimerkiksi erilaisia lavoja. Sintrausvalussa voidaan käyttää epäpuhtaampaa muovia kuin muissa edellä mainituissa menetelmissä. Siinä muovihutaleet plastisoidaan lämmitetyssä muotissa paineen alaisena. [23]

4.3 Lisäaineistus

Suurin osa neitseellisistä muoveista sisältää lisäaineita. Lisäaineiden osuus muovissa vaihtelee muutamasta prosentista useaan kymmeneen prosenttiin. Lisäaineilla pyritään muokkaamaan muovin ominaisuuksia tai lisäämään stabiiliutta esimerkiksi käytön ja prosessoinnin aikana. Tällä pyritään pidentämään muovin käyttöikä ja tätä kautta vähentämään uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä. Lisäksi optimaalisella lisäaineiden määrällä voidaan usein vähentää raaka-aineen määrää ja käyttää sitä tehokkaammin ja taloudellisemmin esimerkiksi ohentamalla seinämäpaksuutta. Lisäaineet voidaan jaotella funktionaalisiin lisäaineisiin, apuaineisiin, täyteaineisiin, lujitteisiin, epäpuhtauksiin ja nanoseosaineisiin. Funktionaalisilla lisäaineilla on jokin funktionaalinen tehtävä ja ne vaikuttavat muovin ominaisuuksiin. Funktionaalisia lisäaineita ovat esimerkiksi palonestoaineet, antioksidantit, väriaineet ja stabilisaattorit. Apuaineilla ei ole vaikutusta muovin ominaisuuksiin, mutta ne helpottavat prosessoitavuutta. Täyteaineille pyritään alentamaan muovin hintaa eli edellytyksenä on, että täyteaine on halvempaa kuin polymeeri. Niillä on myös usein vaikutusta muovin ominaisuuksiin. Lujitteita eli useimmiten lujitekuituja käytetään parantamaan muovin mekaanisia sekä termisiä ominaisuuksia. Epäpuhtaudet ovat jäänteitä polymerisoinnista esimerkiksi katalyyttejä. Näiden määrä muovissa on todella pieni. [21, 38] Seuraavaksi kerrotaan tarkemmin muutamista tärkeimmistä ja yleisimmistä lisäaineista.

4.3.1 Hapettumisenestoaineet eli antioksidantit

Useimmat polymeerit ovat alttiita hapettumiselle johtuen niiden kemiallisesta rakenteesta, joka sisältää paljon vapaita radikaaleja. Hapettumista voi esiintyä muovin elinkaaren kaikissa vaiheissa eli polymeerin valmistamisen ja varastoinnin aikana, prosessoinnin aikana sekä lopullisessa käyttökohteessa. Hapettuminen aiheutuu hapen ja lämmön yhteisvaikutuksesta ja johtaa muovin hajoamiseen. Hapettuminen ilmenee myös mekaanisten ominaisuuksien heikkenemisenä. Hapettuminen on melko monimutkainen ketjureaktio. [39]

Hapettumista voidaan estää tai hidastaa antioksidanteilla. Antioksidantit jakautuvat primaarisiin ja sekundäärisiin, joita käytetään yleensä yhdessä, koska ne täydentävät toisiaan. Primääriset antioksidantit, jotka ovat yleensä fenoleita, neutraloivat ensimmäiset hapettumistuotteet, jolloin ketjureaktio estyy ja hapettuminen pysähtyy. Sekundääriset antioksidantit, yleensä fosfiitteja, estävät eri hajoamisreaktioita kuin primääriset. [6, 21]

4.3.2 UV-stabilisaattorit

UV-stabilisaattorit ehkäisevät UV-valosta johtuvaa muovin hapettumista. Hapettumisen lisäksi UV-valo voi johtaa myös värimuutoksiin muovissa. UV-stabilisaattoreiden käyttö on oleellista, jos muovin käyttökohde on ulkosovelluksissa. UV-stabilisaattorit toimivat kolmella perusmekanismilla. UV-säteilyä absorboivat stabilisaattorit ovat vanhimpia UV-

stabilaattoreita. Ne absorboivat eli imevät UV-säteilyn ja muuttavat sen lämpöenergiaksi. Yksi tähän ryhmään kuuluvista stabilaattoreista on hiilimusta, jota käytetään myös täyteaineena. Mustan värinsä ansiosta se absorboi UV-säteilyä tehokkaasti. Sammuttajat (quenchers) pysäyttävät energian ennekuin se ehtii rikkoa molekyylisidoksia. Kaupallisesti tunnetuimpia sammuttajia ovat nikkelseokset. UV-säteily edistää vapaiden radikaalien muodostumista muovissa, jotka puolestaan edistävät hapettumista. Radikaaliansat (radical trap) estävät vapaiden radikaalien muodostumisen. [39]

4.3.3 Palonestoaineet

Muovin palamiseen vaaditaan kolme välttämätöntä vaihetta, joista jonkin puuttuessa muovi ei pala. Nämä kolme vaihetta ovat kuumeneminen, lämpöhajoaminen ja syttyminen. Muovin palaminen riippuu myös muovilajikkeesta, lisäaineista sekä valmistustavasta. Myös ulkoisilla tekijöillä eli olosuhteilla on merkitystä esimerkiksi ilman kosteudella ja hapen määrällä. Muovikappaleen koko ja muoto vaikuttavat myös palamiseen, ohuempi ja pienempi kappale syttyy herkemmin ja palaa nopeammin. [40]

Muovien palo-ominaisuuksista voidaan standardoiduilla palokokeilla testata syttymisherkkyyttä, palamista ja palon leviämisenopeutta sekä savun ja palokaasujen muodostumista. Syttymisherkkyuden testaamiseen on olemassa useita standardoituja syttymiskokeita riippuen muovilajikkeesta, käyttötarkoituksesta sekä kappaleen koosta. Kaikissa peruseriaate on kuitenkin sama eli näyte asetetaan lämmönlähteen läheisyyteen ja mitataan syttymiseen kuluva aika. Ennen muovin syttymistä muovi kuumenee ja lämpöhajoaminen alkaa. Liekehtiminen voi alkaa, kun lämpöhajoamisen seurauksena on syntynyt riittävästi palavien kaasujen. Syttymisen aiheuttaa lämpö, joka voi olla peräisin lämpösäteilystä, ulkopuolisesta lähteestä, liekistä tai kosketuksesta kuumien esineiden kanssa. Palon leviämisenopeutta testataan tunnelitestillä, jossa koekappale asetetaan tunnelin muotoiseen testauslaitteeseen ja sytytetään palamaan, minkä jälkeen voidaan selvittää liekkien leviämisenopeus. Liekkien leviämisenopeuden mittaamiseen on useita standardeja, esimerkkinä ASTM E 84, BS 476 ja ISO 843. Palon leviämisenopeus on erittäin oleellinen ominaisuus palon vaarallisuuden kannalta ja totta kai palon toivotaan leviävän mahdollisimman hitaasti. Palamiskokeista käytetyin on bunsenliekkikoe, jonka toteuttamiseen on kaksi standardia ISO 1210 ja ASTM D 635. Muovien palaessa syntyy tyypillisesti paljon paksua savua, jolla on heikentävä vaikutus muovien paloturvallisuuteen. Savun ja palokaasujen muodostukseen vaikuttavat palavan materiaalin kemiallinen rakenne sekä materiaalin happi- ja kosteuspitoisuus ja ympäristöolosuhteet. Savun lisäksi muovit vapauttavat palaessaan usein myrkyllisiä kaasuja kuten häkää. Savunmuodostusta voidaan mitata myös palon leviämisenopeuden mittaamiseen käytetyllä tunnelitestillä. Lisäksi sitä voidaan mitata mittaamalla savun optista tiheyttä standardien SFS 4878 ja ASTM 662 mukaan. [40, 41]

Lähes kaikki muovit koostuvat hiilivedyistä, joten ne ovat luonnostaan palavia. Useissa käyttökohteissa, kuten lentoteollisuudessa, sähkö- ja elektroniikkalaitteissa, rakennuk-

sisä sekä muissa rakennusmateriaaleissa ja julkisissa liikennevälineissä, muovien on turvallisuussyistä oltava ei-palavia tai vähintään vaikeasti syttyviä ja palavia. Palamattomuus saadaan aikaan palonestoaineilla. [39]

Palonestoaineisiin kuuluu noin 350 erilaista ainetta [42]. Palonestoaineet toimivat eliminoimalla jonkun palamiseen tarvittavan tekijän eli lämmön, hapen tai polttoaineen. Ne voivat sammuttaa liekin poistamalla hapen, absorboimalla lämpöä tai tuottamalla vettä, joka laskee lämpötilaa. Palonestoaineita käytetään yhä enemmän yhdessä toisten palonestoaineiden kanssa niiden synergisen vaikutuksen takia. Palonestoaineen valintaan eniten vaikuttavat palonestoaineen terminen stabiilius ja polymeerin hajoamislämpötila. Ideaalisti palonestoaine aktivoituu lämpötilassa, joka on hieman alle polymeerin hajoamislämpötilan. [39]

Palonestoaineet nostavat tuotteen hintaa, koska ne ovat yleensä selvästi kalliimpia kuin polymeeri ja myös niiden prosessointi saattaa vaatia lisäkäsittelyjä ja kalliimpia koneita. Useilla palonestoaineilla on vaikutusta muovin prosessointiin. Vaikutukset voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia, sillä polymeeriä pehmittävät palonestoaineet saattavat parantaa prosessointiominaisuuksia, mutta polymeeriä kovettavat palonestoaineet vaikeuttavat prosessointia ja esimerkiksi prosessointilämpötila saattaa nousta huomattavasti. Muovin muihin ominaisuuksiin ne vaikuttavat yleensä heikentämällä mekaanisia ominaisuuksia. [38]

Palonestoaineet voidaan jakaa reaktiivisiin ja additiivisiin palonestoaineisiin. Reaktiiviset palonestoaineet lisätään jo polymerointivaiheessa kopolymeroimalla ne yhteen monomeerien kanssa, joten niillä ei ole merkittävää vaikutusta muovin mekaanisiin ominaisuuksiin. Reaktiiviset palonestoaineet muodostavat kemiallisen sidoksen polymeerin kanssa. Niitä käytetään kertamuoveissa, kuten tyydyttymättömissä polyestereissä ja epokseissa. Additiiviset palonestoaineet seostetaan polymeeriin kuten muutkin lisäaineet tai ne voidaan lisätä jälkikäteen esimerkiksi polymeerin pintaan. Additiiviset palonestoaineet voivat kulkeutua muovin rakenteessa, mutta se on yleensä hidasta tai ei tapahdu ollenkaan niiden suuren molekyylikoon takia. Additiiviset palonestoaineet ovat enemmän käytettyjä kuin reaktiiviset palonestoaineet. [39, 42, 43] Toinen jaottelutapa perustuu palonestoaineiden kemialliseen rakenteeseen. Ne voidaan jakaa halogeeniyhdisteihin ja halogeenittomiin palonestoaineisiin. Molemmissa ryhmissä on sekä reaktiivisia että additiivisia palonestoaineita. Halogeenittomat palonestoaineet voidaan edelleen jaotella kolmeen ryhmään: epäorgaanisiin yhdisteisiin, fosfori- ja fosforityypipohjaisiin yhdisteisiin ja kuplautuviin kemiallisiin yhdisteisiin. [42]

Alumiinitrihydraatti (ATH) on volyymiltaan eniten käytetty palonestoaine, ja se lukeutuu halogeenittomiin epäorgaanisiin yhdisteisiin. Paloneston lisäksi se myös ehkäisee savun muodostumista (smoke suppressant). Toimiakseen mahdollisimman tehokkaasti sitä vaaditaan suuri määrä, tyypillisesti 40–60 paino- %. Se toimii siis myös täyteainee-

na ja vaikuttaa muovin mekaanisiin ja sähköisiin ominaisuuksiin. Se on edullinen ja myrkytön, mutta sitä voidaan käyttää vain sovelluksissa, jotka sallivat suuren täyteainemäärän. Lisäksi sen ylin mahdollinen prosessointilämpötila on melko alhainen, noin 200 °C. Sen toiminta perustuu endotermiseen dehidraatioon, jolloin se absorboi palamisen ylläpitämiseen tarvittavan lämpöenergian ja vapauttaa vesihöyryä, joka laimentaa palamiskaasuja. Veden vapauduttua jäljelle jäävät reagoimattomat metallioksidit muodostavat hiilen kanssa palamattoman ja suojaavan kerroksen muovin pinnalle. Lisäksi palonestoaineen suuri määrä laimentaa polttoaineena olevaa muovia. Toinen samalla periaatteella toimiva palonestoaine on magnesiumhydroksidi (MDH). Sen suurin etu verrattuna alumiinitrihydraattiin on sen korkeampi hajoamislämpötila, noin 330 °C, joka mahdollistaa korkeammat prosessointilämpötilat kuin alumiinitrihydraatilla. Suurin osa alumiinitrihydraatista käytetään lasikuitulujitetussa tyydyttymättömässä polyesterissä ja muissa kertamuoveissa. Lisäksi alumiinitrihydraattia käytetään kaapeli- ja johtosovelluksissa muun muassa PVC:ssä ja PE-LD:ssä. Magnesiumhydroksidia käytetään pääasiassa polypropeenisovelluksissa, mutta myös kaapeleissa elastomeerien kanssa. [39, 42]

Muita epäorgaanisia palonestoaineita ovat oksidit, silikaatit tai muut mineraalit ja boraaetit. Sinkkiboraattia ja bariummetaboraattia käytetään yleensä yhdessä antimonioksidin kanssa. Antimoni ja sen yhdisteet ovat myrkyllisiä ja niiden epäillään aiheuttavan syöpää [44]. Antimonia ja sen yhdisteitä käytetään useiden palonestoaineiden kanssa niin sanottuna tehoaineena. Yksinään niiden palonesto-ominaisuudet eivät ole merkittävät. [43] Erilaisia molybdeeni- tai rautapohjaisia palonestoaineita käytetään yksin tai yhdessä muiden palonestoaineiden kanssa. [42]

Fosforipohjaiset palonestoaineet muodostavat kumentuessaan kiinteitä yhdisteitä hajoavan polymeerin kanssa ja edistävät hiilikerroksen syntymistä. Hiilikerros on fyysinen este, joka vaikeuttaa palon etenemistä. Lisäksi fosforipohjaiset palonestoaineet hillitsevät savun muodostumista estämällä polymeerin hajoamista palaviksi osasiksi. Typpi-pohjaisia palonestoaineita ei käytetä yleensä yksinään vain ainoastaan yhdessä fosforipohjaisten kanssa. Tärkeimmät fosforipohjaiset palonestoaineet ovat amorfinen punainen fosfori, orgaaniset fosforiyhdisteet sekä kuplautuviin palonestoainesiin lukeutuvat fosfaattipitoiset yhdisteet. [42]

Amorfinen punainen fosfori on erittäin herkästi syttyvä aine, mutta sitä voidaan kuitenkin käyttää palonestoaineena, koska se ei syty itsestään huoneenlämpötilassa vaan kipinäistä, sähkövarauksista tai kuumennettaessa. Suurilla määrillä sen palonestovaikutus katoaa ja muovin paloajat pitenevät. Optimaalinen käyttömäärä on noin 8 paino-%. Lisäksi punainen fosfori rajoittaa muovin prosessointia, sillä prosessointilämpötila ei saa ylittää fosforin itsesyttymislämpötilaa, joka on noin 250 °C. [42]

Orgaanisia fosforiyhdisteitä käytetään palonestoaineina polyuretaanivaahdoissa ja polyfenyleenioksidissa sekä lisäksi plastisoijina polyvinyylikloridissa (PVC). Niiden ongelmana on niiden huono terminen stabiilisuus, ja prosessointilämpötiloissa ne ovat nesteitä, joka vaikeuttaa niiden seostamista muovisiin. [42]

Kuplautuvat palonestoaineet soveltuvat hyvin muun muassa polyolefiineille. Myös ne muodostavat hiilikerroksen, mutta lisäksi kerros myös turpoaa kuumentuessaan jopa 50–200-kertaiseksi. Kerroksen suoja- ja eristysominaisuuksien kannalta tärkeintä on kerroksen suuri tilavuus, pinnalle muodostuvan karstakerroksen paksuus ja jatkuvuus sekä sen alle muodostuva kiinteää vaahtoa muistuttava suljettu solukkorakenne. Kuplautuvat palonestoaineet vähentävät myös savunmuodostusta ja muodostuvat palavat kaasut laimenevat syttymättömien kaasujen, yleensä veden, vapautuessa. Kuplautuvat palonestoaineet koostuvat kolmesta vaikuttavasta aineryhmästä: fosfaatit tai boraatit muodostavat hajotessaan happoa ja poistavat vettä, polyolit muodostavat hiiltä ja melamiini-, triasiini- tai isosyaaniuraattiyhdisteet kupluttavat rakenteen. [42]

Halogenoiduista palonestoaineista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä bromattuja ja kloorattuja palonestoaineita. Ne ovat kaasufaasissa toimivia eli estävät polymeerin hajoamista ja muodostavat raskaita kaasumaisia yhdisteitä, jotka jäävät lähelle materiaalin pintaa estäen hapen pääsyn palavalle alueelle. Yksinään käytettynä halogenoidut palonestoaineet antavat vain rajoitetun paloneston, ja niitä käytetäänkin yleensä yhdessä erilaisten antimonisestosten kanssa. Halogenoidut palonestoaineet ovat olleet taloudellisesti tärkeimpiä palonestoaineita, mutta niiden käyttöä on kielletty ja rajoitettu voimakkaasti viime vuosina johtuen niistä johtuvista terveyshaitoista ja negatiivisista ympäristövaikutuksista. [39, 42]

Bromattujen palonestoaineiden maailmanlaajuisesta kulutuksesta yli 50 % on käytetty sähkö- ja elektroniikkalaitteiden palonsuojaukseen. Bromattujen palonestoaineiden valmistuskustannukset ovat alhaiset verrattuna muihin palonestoaineisiin eikä niitä tarvita niin suurina määrinä kuin esimerkiksi alumiinirihihydraattia tai magnesiumhydroksidia vaadittavan paloturvallisuuden saavuttamiseksi. Polybromidifenyylieetterien seokset ovat olleet paljon käytettyjä bromattuja palonestoaineita. Ne on nimetty sen mukaan, mitä kongeneeria seoksessa on eniten, paitsi poikkeuksena oktobromidifenyylieetteri (OBDE), jossa on eniten heptakongeneeria. Muut kaupallisesti saatavilla olevat seokset ovat pentabromidifenyylieetteri (PeBDE) ja dekabromidifenyylieetteri (DBDE). Rasvahakuinen heksabromidisikloheksaani (HBCD) on alifaattinen palonestoaine, josta 90 % käytetään lämmöneristyslevyjen (PS-E ja PS-X) suojaamiseen. [44]

Bromattujen palonestoaineiden käyttöä rajoittavat RoHS-direktiivi, WEEE-direktiivi, sekä POP- ja REACH-asetukset. Polybromidifenyylieettereistä ensin kiellettiin PeBDE:n ja OBDE:n käyttö. Niiden käyttö kiellettiin vuonna 2004 EU:ssa ja niitä ei ole saanut tuoda EU:n alueelle vuoden 2005 jälkeen. DBDE ei ole tutkimusten mukaan ter-

veydelle haitallinen, mutta sen hajotessa eli debrominaatiossa syntyy haitallisia yhdisteitä ja alemman bromausasteen PBDE-kongeneereja. Sen käyttöä on rajoitettu EU:ssa, mutta sitä on saanut käyttää sähkö- ja elektroniikkalaitteissa vuoteen 2008 asti. Kaikilla maailmassa DBDE ei ole kielletty ja sille on ollut hankala löytää korvaavaa palonestoainetta. [44] HBCD ollaan kieltämässä maailmanlaajuisesti. Sen valmistusta, vientiä, tuontia ja käyttöä rajoitetaan, mutta käyttö sallitaan vielä 5-10 vuoden ajan eristelevyjen palonestoaineena, kunnes korvaava palonestoaine saadaan markkinoille. [45]

Suomessa ei ole valmistettu bromattuja palonestoaineita, mutta niitä on käytetty erityisesti lämpöeristeissä ja sähkö- ja elektroniikkalaitteiden muoveissa. Suurin osa palonestoaineista on kuitenkin päätynyt Suomeen valmiiden materiaalien, laitteiden ja niiden osien tuonnin mukana. Kiellettyjä palonestoaineita esiintyy edelleen käytössä olevissa tuotteista. POP-asetuksen mukaan kiellettyjä palonestoaineita sisältävien tuotteiden käyttö on sallittua, jos ne ovat olleet käytössä ennen 25.8.2010. Kiellettyjä palonestopaineita sisältäviä tuotteita ei siis tarvitse poistaa käytöstä ennen kuin niiden käyttö alkuperäisessä tarkoituksessa päättyy. Aikaan, jossa tuotteet poistuvat käytöstä, vaikuttaa niiden käyttökohde. Lyhyin käyttöikä on sähkö- ja elektroniikkalaitteilla ja pisin rakennustarvikkeilla. Bromatut palonestoaineet vaikeuttavat materiaalin kierrättämistä, koska esimerkiksi Suomessa bromattuja palonestoaineita sisältävät muovit on poistettava erikseen kerättävästä sähkö- ja elektroniikkaromusta, koska niiden kierrättäminen on kielletty. [44]

4.3.4 Täyteaineet

Täyteaineiden pääasiallinen tehtävä on alentaa seoksen hintaa eli vähentää kalliimman polymeerin määrää. Yleensä täyteaineet ovat siis painavampia kuin polymeeri eli niillä on suurempi tiheys, mutta joitakin täyteaineita on kehitetty myös laskemaan seoksen massaa. Nykyisin täyteaineet usein myös parantavat mekaanisia ominaisuuksia, UV-valonkestoa, lämmönkestoa, sähköisiä ominaisuuksia, mittapysyvyyttä tai palonkestoa. [39]

Esimerkiksi iskulujuutta ja taivutuskerrointa voidaan parantaa valitsemalla epäorgaanisia täyteaineita. Partikkelien muoto on oleellisessa osassa näiden ominaisuuksien parantamisessa. Kuitumainen wollastoniitti parantaa tyypillisesti taivutuskerrointa kun taas kuutiomainen kalsiumkarbonaatti voi parantaa sekä taivutuskerrointa että iskulujuutta. Täyteaineiden lämmönjohtavuus on yleensä noin 20 kertaa korkeampi kuin muoveilla. Korkeampi lämmönjohtavuus on hyödyksi esimerkiksi prosessoinnin aikana, ja se lyhentää sykliäikää. [39] Täyteaineet heikentävät yleensä muovin läpinäkyvyyttä, koska valo siroaa täyteainepartikkeleista. [46]

Täyteaineet voidaan jakaa epäorgaanisiin eli mineraalitäyteaineisiin ja synteettisiin täyteaineisiin. Mineraali on puhdas, yleensä kiteinen, luonnossa esiintyvä materiaali, jolla on tunnettu koostumus. Mineraaleja saadaan useimmiten kivistä ja malmista, ja ne voi-

vat vaihdella puhtaasta mineraalista monimutkaisiin seoksiin. Mineraalit louhitaan, mitä seuraa useita prosessivaiheita kuten hienontaminen, puhdistaminen, pintakäsittely ja kuivaaminen. Useat mineraalit täyttävät muovisovellusten vaatimukset. Ne ovat edullisia, värittömiä, inerttejä ja helposti valmistettavissa useissa partikkelikoissa ja muodoissa. Synteettiset täyteaineet valmistetaan kemiallisilla synteeseillä. Suurin osa prosesseista perustuu erotukseen liuoksesta tai kaasufaasista. Synteettisiä täyteaineita käytetään, kun haluttua mineraalia ei ole helposti saatavilla tai kun täyteaineelta vaaditaan korkeaa puhtautta, erikoista muotoa tai hienompaa partikkelikokoa, kuin hienonnuksella on saavutettavissa. [47]

Kalsiumkarbonaatti on tärkein ja eniten käytetty mineraalitäyteaineista. Muovien lisäksi se on laajalti käytetty myös kumeissa ja maaleissa. Kalsiumkarbonaatilla on kolme kiteistä muotoa, mutta ainoastaan niistä yleisintä kalsiittia käytetään täyteaineissa. Kalsiittia voidaan valmistaa kolmesta eri mineraalilähteestä: liidusta (chalk), kalkkikivestä (limestone) ja marmorista (marble). Liituesiintymät ovat puhtaimpia näistä kolmesta. Ne ovat mereneliöiden kuorien tai luurankojen kerrostuneita jäänteitä. Ne ovat suhteellisen pehmeitä ja koostuvat löyhästi sitoutuneista, lähes tasaisista, noin 3 mikronin kokoisista kiteistä. [39, 47]

Savi on laaja termi, jolla kuvataan laajalti esiintyviä vesipitoisia alumiinisilikaatteja, jotka saadaan maaperästä. Muoviteollisuudessa käytetyin savimineraaleihin kuuluva täyteaine on kaoliniitti ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), joka tunnetaan myös nimillä kaoliini tai posliinisavi (china clay). Kaoliini on täyteaineena hyvin vanha, mutta sitä on kehitetty vuosien aikana ja nykyiset kaoliinilajit antavat hyvän veto- ja repimislujouden ja kulumisenkeston. Kaoliini on anisotrooppinen, josta johtuen sillä on suurempi vaikutus muovin ominaisuuksiin kuin isotrooppisilla täyteaineilla kuten kalsiumkarbonaatilla. Kaoliinit toimivat usein myös kytkeäineinä prosessoitavuutta helpottaen. Kaoliinien pääkäyttökohde on elastomeereissä, mutta sen käyttö muovien lisäaineena kasvaa koko ajan. [39, 47]

Wollastoniitti on kalsiumsilikaatin yksi muoto. Se on valkoinen ja rakenteeltaan neulasmainen. Sillä on matala veden absorptio. Wollastoniittia tutkitaan paljon ja pohditaan olisiko sen mahdollista korvata kalsinoituja (vesi poistettu) savia ja muita mineraaleja täyteaineina. Sen olisi myös mahdollista korvata lasikuitua lujitteena joissakin sovelluksissa. Sen kehityksellä pyritään saavuttamaan suurempi sivujen välinen suhde (aspect ratio) eli muoto neulamaisemmaksi. Kun sivujen välinen suhde on suurempi, on lujittava vaikutus suurempi, mutta myös wollastoniitin valmistaminen on silloin kalliimpaa. Lisäksi suurempi sivujen välinen suhde kasvattaa myös taivutuslujuutta ja taivutuskerrointa sekä parantaa mittapysyvyyttä. [39, 47]

Hiilimusta eli noki on synteettinen täyteaine, joka valmistetaan helposti haihtuvien orgaanisten materiaalien yleensä öljyjen ja kaasujen epätäydellisellä palamisella. Se on

todella tärkeä täyteaine erityisesti kumiteollisuudessa. Muoviteollisuudessa sen käyttöä rajoittaa hieno partikkelikoko ja musta väri. Muoviteollisuudessa sitä käytetään useimmiten pigmenttinä ja parantamaan sähköjohtavuutta. Se on kemiallisesti inerti, suhteellisen edullinen ja saatavilla pienissä partikkelikoissa. [39, 47]

Nanotäyteaineet ovat hienojakoisia täyteaineita, joissa jokin dimensio on nanomittakaavassa (alle 100 nm). Nanotäyteaineet voivat olla pallomaisia, kuitumaisia tai levymäisiä. Ne ovat pääasiassa samoja materiaaleja kuin perinteiset täyteaineet ainoastaan pienemmässä partikkelikoossa. Pallomaisilla nanotäyteaineilla kaikki dimensiot ovat nanokokoluokassa. Pallomaisia nanotäyteaineita ovat muun muassa noki, metallioksidit, kalsiumkarbonaatti ja sooli-geeli-menetelmällä valmistettu silika. Kuitumaisilla nanotäyteaineilla kaksi dimensiota on nanokokoluokassa. Niihin kuuluvat esimerkiksi hiilinanoputket, jotka ovat erittäin lujia sylinterimäisiä fullereeneja. Levymäisillä nanotäyteaineilla yksi dimensio on nanokokoluokkaa, ja niitä ovat erilaiset savimineraalit. Savimineraalit ovat käytetyimpiä nanotäyteaineita johtuen niiden nanotäyteaineiksi edullisesta hinnasta (noin 25 e/kg), niiden helposta saatavuudesta maaperästä ja niiden modifioitavuudesta. Lähes kaikki kaupalliset nanosavet ovat orgaanisesti modifioituja, koska hydrofiilisen saven ja usein hydrofobisen polymeerin yhteensopivuus on huono, joten riittävän sekoittumisen ja adheesion takaamiseksi savi tarvitsee pintakäsittelyä. Pintakäsittely perustuu kerrosten välissä olevien kationien (Na^+ ja Ca^+) korvaamisesta muilla ioneilla. Mitä pidempiketjuisia korvaavat ionit ovat, sitä kauemmaksi silikaattilevyt työntyvät toisistaan, jolloin polymeerin tai adheesionedistäjän on helpompi tunkeutua kerrosten väliin. Korvaavina ioneina on kokeilta useita eri ioneja ja suosituimpia ovat erilaiset alkaaliammonium-ionit. [46]

Nanotäyteaineita on tutkittu paljon viime vuosina, mutta ne eivät ole vielä saavuttaneet kovin laajaa markkina-aluetta. Nanotäyteaineiden suurin etu on parantaa mekaanisia ominaisuuksia huomattavasti pienemmillä pitoisuuksilla kuin perinteiset täyteaineet. Nanotäyteaineiden käytössä suurin ongelma on hienojakoisen täyteaineen ja matriisimateriaalin, polymeerin, riittävän sekoittumisen takaaminen. Verrattuna perinteisiin täyteaineisiin nanotäyteaineilla voidaan saavuttaa helpompi prosessoitavuus, parempi lujuus/paino-suhde, paremmat optiset ominaisuudet ja kevyempiä materiaaleja menettämättä tuotteen jäykkyys- ja tiiveysominaisuuksia. Tarkkaa syytä, miksi mekaaniset ominaisuudet paranevat nanotäyteaineiden vaikutuksesta ei tiedetä, mutta siihen vaikuttavat todennäköisesti useat tekijät. Mekaanisten ominaisuuksien paranemiseen voivat vaikuttaa nanotäyteaineen ja polymeerin väliset vuorovaikutukset, suuri vuorovaikutuspinta-ala, vetysidokset, polymeeriketjujen liikkuvuuden vaikeutuminen, nanotäyteaineen edullinen suuri sivusuhte ja pintamodifioitajien funktionaalisten ryhmien kyky siirtää voimia polymeeristä nanotäyteaineeseen. Optiset ominaisuudet riippuvat täyteaineesta, sen määrästä ja dispergoitumisesta matriisiin. Tyypillisesti osakiteisten muovien optiset ominaisuudet paranevat nanotäyteaineita lisättäessä. Nanotäyteaineita lisättäessä

läpinäkyvyys säilyy paremmin kuin perinteisiä täyteaineita lisättäessä, mutta usein muovi värjäytyy. [47]

4.3.5 Lujitteet

Lujitteita käytetään sekä kerta- että kestopuoveissa parantamaan pääasiassa mekaanisia ominaisuuksia, veto- ja taivutuslujuutta sekä modulia, mutta myös termisiä ominaisuuksia kuten lämmönkestävyyttä. Tavoitteena on usein metallin korvaus eli saavuttaa metallimaiset ominaisuudet, mutta samalla säilyttää muovin tiheys ja prosessoitavuus. Lujitteet ovat yleensä kuituja tai filamentteja. Lujituksen määrään vaikuttaa lujitteen lujuus ja pituus. Pidemmät kuidut ovat lujempia, mutta toisaalta kuitupituuden kasvaessa prosessoitavuus tyypillisesti vaikeutuu. Kuitupituus kompaundissa on tyypillisesti 100–300 µm. Prosessoinnissa on tärkeää saada riittävä adheesio eli tarttuminen kuitujen ja matriisin välille. Kuitujen pitää kostua riittävästi adheesioon takaamiseksi. Kaupalliset kuidut ovat yleensä pintakäsitelty paremman adheesioon takaamiseksi. [38, 39]

Kuitujen lujittava vaikutus perustuu jännityksen siirtämiseen heikommalta matriisilta vahvemmalle kuidulle. Kuidun venymän on oltava pienempi ja jäykkyyskertoimen suurempi kuin matriisin. Jännityksen siirtämistä voidaan parantaa liimoilla, sidonta-aineilla ja kytkentäaineilla. Myös kuidun halkaisijalla on suuri merkitys jännityksen siirrossa. Pienempi halkaisija antaa suuremman pinta-alan massayksikköä kohti, mikä helpottaa jännityksen siirtoa. [39]

Lasikuidut ovat eniten käytettyjä lujitteita sekä kerta- että kestopuoveissa. Yhdessä niiden hyvä vetolujuus ja pieni venyvyys antavat poikkeukselliset veto-, puristus- ja iskuominaisuudet, suhteellisen korkean kimmomodulin ja hyvän taivutuslujuuden. Lisäksi lasikuiduilla on hyvä lämmönkestävyys. Niiden heikkouksia ovat niiden korkea massa, ja ne kuluttavat työstölaitteita. [39]

Aramidi- ja hiilikuidut ovat lasikuituja huomattavasti kalliimpia ja niiden käyttökohteet ovat vaativammassa (high-performance) sovelluksissa. Hiilikuidut voivat olla lujempia kuin teräs, kevyempiä kuin alumiini ja jäykempiä kuin titaani. Lisäksi ne ovat sähköjohtavia. [39]

4.3.6 Apuaineet

Apuaineet ovat yleensä prosessointia helpottavia aineita kuten plastisoijia, vaahdotusaineita, vaahdonestoaineita, voiteluaineita tai kompatibilisaattoreita. [6]

Blendit eli muovien seokset yleistyvät jatkuvasti, koska niitä voidaan räätälöidä monipuolisiin käyttökohteisiin yhdistelemällä eri polymeerilajikkeiden hyviä ominaisuuksia. Suurin osa eri polymeerilajikkeista ei kuitenkaan luonnollisesti sekoitu toisiinsa johtuen niiden erilaisista rakenteista, ja niitä yritettäessä sekoittaa saavutettavat ominaisuudet

saattavat olla huonommat kuin kummallakaan sekoitettavista polymeereistä yksinään. Toisiinsa sekoittumattomien polymeerien sekoittuvuutta voidaan parantaa kompatibilisaattoreilla eli sopeutteilla. Kompatibilisaattorit luovat molekulaarisia siltoja yleensä sitoutumattomien molekyylien välille. Ne voivat muokata toisen polymeerin kemiallista rakennetta siten, että sen on mahdollista sitoutua toiseen polymeeriin. Kompatibilisaattorit voivat myös olla aineita johon kumpikin polymeeri pystyy sitoutumaan ja tätä kautta ne parantavat polymeerien sekoittuvuutta. Niiden käyttö ei kuitenkaan automaattisesti paranna blendin ominaisuuksia, vaan osa ominaisuuksista saattaa edelleen jäädä heikoiksi. Kompatibilisaattoreita on saatavissa kaupallisesti useille polymeeripareille. Kompatibilisaattorit ovat tarpeellisia myös helpottamaan täyteaineiden ja muiden lisäaineiden sekoittumista muoviin. [21, 39]

4.3.7 Lisäaineiden kompaundointi

Lisäaineiden sekoitusta polymeeriin kutsutaan myös nimellä kompaundointi (compounding). Kompaundoinnin tavoitteena on dispergoida lisäaineet kantoaineeseen eli polymeeriin mahdollisimman tasaisesti. Lisäksi on tärkeää välttää polymeerin tai lisäaineen terminen hajoaminen. Kompaundin laatuun vaikuttaa koostumuksen lisäksi, miten hyvin se on sekoitettu. Yleensä kompaundointiprosessissa aluksi polymeeri ja lisäaineet esisekoitetaan. Esisekoituksella (dispersive mixing) suurimmat lisäaineagglomeraatit pyritään rikkomaan ja lisäaine pyritään saamaan mahdollisimman tasaisesti polymeerin pinnalle. Seuraavaksi lisäainepartikkelit on kostutettava polymeerilla. Leikkausvoimien on vaikutettava lisäaineagglomeraatteihin, jotta lisäaine hajoaa mahdollisimman pieneen partikkelikokoon. Leikkausvoimat pääsevät vaikuttamaan lisäainepartikkeleihin, kun polymeerisula korvaa ilman lisäaineen pinnalta. Lopulta kaikki ilma poistuu ja lisäainepartikkelit kostuvat täydellisesti. Riittävät leikkausvoimat saadaan aikaan valitsemalla laitteistoon soveltuvat sekoitusosat, säätämällä koneen lämmitys sopivaksi, jotta se yhdessä kitkalämmön kanssa sulattaa polymeerin sopivan juoksevaksi, ja säätämällä viipymäaika laitteistossa sopivaksi. Lopuksi tehdään jakava sekoitus (distributive mixing) eli kompaundin homogenisointi, jolla pyritään saavuttamaan tasalaatuinen koostumus koko kompaundissa. [6]

Useimpia lisäaineita ei pystytä sekoittamaan sellaisenaan riittävän tasaisesti muoviin. Tällöin lisäaineet voidaan esisekoittaa muoviin. Tätä seosta kutsutaan masterbatsiksi eli tiivisteeksi, jossa lisäainepitoisuus vaihtelee muutamasta prosentista aina 80 % asti. Masterbatsi sisältää peruspolymeerin lisäksi yhtä tai useampaa lisäainetta. Sitä lisätään 1-5 % muovin joukkoon työstökoneessa. Lopulliset lisäainepitoisuudet muovissa ovat tällöin melko pieniä, joskus vain prosentin kymmenyksiä. [6]

Muovien kompaundointiin on erilaisia laitteistoja, jotka yleisemmin jaetaan eräsekoitimiin (batch mixers) tai jatkuvatoimisiin sekoitimiin (continuous mixers). Kestomuovien kompaundoinnissa käytetään yleensä ekstruusiolaitteistoa, jossa muovi granuloidaan kompaundoinnin yhteydessä. Ekstruusiolaitteistot ovat jatkuvatoimisia sekoit-

timia, joissa on joko yksi tai kaksi ruuvia. Ne voidaan siis jaotella yksi- ja kaksiruuvisekoittimiin. Yksiruuvisekoittimet ovat vanhimpia jatkuvatoimisia sekoittimia ja ne ovat edelleen eniten käytettyjä kestumuovien kompaundoinnissa. Niiden rakenne on yksinkertaisempi kuin kaksiruuvisekoittimilla, ja ne ovat kestäviä. Yksiruuvisekoittimen ruuveja on rakenteeltaan monenlaisia, mutta yhteistä niille on, että ruuvin kierre on katkaistu 120 asteen välein. Ruuvin lisäksi sekoittimessa on vaippa, ja sekoitus tapahtuu vaipan tappien ja hampaiden välissä ruuvin liikkua edestakaisin. Kaksiruuvisekoittimen rakenne on monimutkaisempi. Se takaa tasalaatuisen polymeerin ja lisäaineiden syötön sekä tehokkaan kaasunpoiston sulatilassa. Sen ruuvit ja vaippa koostuvat eri osista, mikä mahdollistaa ruuvin helpon muuntelemisen. Ruuvien pyörimissuuntaa voidaan vaihtaa eli ne voivat pyöriä joko samaan suuntaan (co-rotating) tai eri vastakkaisiin suuntiin (counter-rotating). Lisäksi niiden paikkaa voidaan vaihtaa eli ne voivat olla joko vierekkäin tai lomittain (intermeshing). [6, 39, 48]

Raaka-aineiden annosteluun käytetään pääasiassa gravimetrisiä eli painoon perustuvia annostelijoita. Kaikki lisäaineet eivät ole kiinteässä muodossa, vaan osa on nestemäisiä tai niin alhaisessa lämpötilassa sulavia, että ne on sulatettava ja pumpattava ekstruuderiiin. Lisäaineita ja muovia työstettäessä niistä vapautuu usein kosteutta tai muita alhaisissa lämpötiloissa haihtuvia yhdisteitä. Niiden poistamiseen ekstruuderista tarvitaan vakuumpumppua. [6]

Lisäaineista erityisesti täyteaineita ja lujitteita voidaan lisätä muoviiin suhteellisen suurii määrii, pitoisuus voi olla jopa 70 % [6]. Kun lisäaineita sekoitetaan muoviiin suurii määrii, on tasaisen sekoittumisen ja riittävän hyvän adheesioin polymeerin ja täyteaineen välille saaminen vaikeampaa kuin alhaisimmilla täyteainemäärillä. Tällöin syöttöjärjestelmään tarvitaan useampia syöttökanavia täyteaineelle. Riittävän adheesioin ja sekoittumisen takaamiseksi on polymeerisulan kostutettava täyteaine riittävän hyvin ja esisekoituksessa täyteaine on saatava mahdollisimman tasaisesti muovii pinnalle. Suurien täyteainemääriin kompaundointiiin sopii siis kaksiruuviekstruuderii. [39]

4.3.8 Lisäaineiden vaarat ja ympäristövaikutukset

Lisäaineella voi olla ympäristövaikutuksia ja vaaroja sen kaikkien elinkaaren vaiheiden aikana. Elinkaari alkaa lisäaineen valmistuksesta ja jatkuu aina sen hävittämiseen asti. Erityisen oleellisia elinkaaren vaiheita, joissa saattaa syntyä ympäristövaikutuksia tai vaaroja, ovat lisäaineen valmistus, sen kompaundointii muoviiin ja muovituotteen valmistus, muovituotteen käyttö ja muovituotteen sekä lisäaineen hävittäminen. Vaarojen kohteena voi olla valmistus- ja hävittämisvaiheessa työntekijät ja käyttövaiheessa käyttäjät. [39, 49]

Lisäaineiden suurien määrän ja niiden erilaisten kemiallisten rakenteiden vuoksi niiden ominaisuudet vaihtelevat todella paljon, osa on myrkyllisiä ja osa ei, joten myös ympäristövaikutukset ja vaarallisuus vaihtelevat. Haittaa voi syntyä joko ihmisille tai ympä-

ristölle. Syntyviä haittoja voivat olla esimerkiksi ihoärsytys, hengitysvaikeudet, myrkyllisten kaasujen muodostuminen, raskasmetallit, lisäaineen haihtuminen ilmaan ja ympäristön kontaminoituminen lisäaineen vaikutuksesta. Esimerkkejä edellisiä haittoja aiheuttavista lisäaineista ovat hiilimusta, titaanidioksidi, palonestoaineet, lasikuitu ja isosyanaatit. Nykyisin lisäaineet ovat kuitenkin saatavilla melko turvallisissa muodoissa granaatteina, kapsleina, nesteinä ja masterbatseina. [39, 49]

4.3.9 Kierrätysmuovin lisäaineistus

Kierrätysmuovin tarvittavaan lisäaineistukseen vaikuttavat merkittävästi sen elinkaaren aikaisemmat vaiheet. Muoveilla on taipumus vanhenemiseen lämpötilan, ilman, valon ja muiden ympäristötekijöiden vaikutuksesta. Vanheneminen näkyy muovin mekaanisissa ominaisuuksissa sekä ulkonäössä. Vanhenemista voidaan ehkäistä lisäaineilla, pääasiassa stabilaattoreilla. Vanhenemisen määrä riippuu neitseellisen muovin käyttökohteesta, muovilajista ja lisäaineistuksesta. Lyhyen käyttöiän sovelluksissa, kuten pakkauksissa, käytettyjen muovien lisäainepitoisuus on luonnollisesti alhaisempi kuin esimerkiksi pitkän käyttöiän ulkosovelluksissa. Teknisten muovien käyttökohteet ovat usein pitkän käyttöiän sovelluksissa. On mahdollista, että kierrätysjakeessa on sekä lyhyen että pitkän käyttöiän muoveja, joiden stabilointiaste on erilainen. Ylipäätään lisäaineiden määrää kierrätysmuovissa on vaikeaa selvittää. Niiden käyttö vaihtelee valmistajakohtaisesti. Käytön aikaisen vanhenemisen lisäksi kierrätysprosessin aikana muovissa voi ilmetä hajoamista, koska esimerkiksi granuloinnin aikana muoviin vaikuttavat suuret leikkausvoimat ja lämpötila on korkea. Niiden vaikutuksesta muovissa ilmenee molekyyli-tason vaurioitumista kuten ristosilloittumista ja molekyyli- ketjujen lyhentymistä. Kierrätysmuovin lisäaineistuksella voidaan nostaa kierrätysmuovin arvoa ja saavuttaa paremmat mahdollisuudet käyttää kierrätysmuovia korkeampilaatusissa sovelluksissa. [21]

Stabilointi on usein optimoitu kestämään vain yhden muovin käyttöiän, eikä stabilointiaineiden teho välttämättä riitä enää kierrätysmateriaalin stabilointiin, vaan ne on uudelleen stabiloitava. Uudelleen stabilointiin käytetään samoja lisäaineita kuin neitseellisen muovin stabilointiin eli pääasiassa antioksidanteja, lämpöstabilaattoreita ja UV-stabilaattoreita. Kuitenkin kierrätysmateriaalin stabiloinnissa täytyy kiinnittää huomiota materiaalin hajoamisprofiiliin ja räätälöidä stabilointi sen mukaan. Parhaan mahdollisen stabilointituloksen aikaansaamiseksi olisi muovin oltava puhdasta ja samaa lajiketta sekä alkuperäisten stabilointiaineiden määrä olisi tunnettava. Uudelleen stabilointi olisi suositeltavaa tehdä ennen jokaista prosessointivaihetta eikä ainoastaan ”yli-stabiloida” ennen ensimmäistä vaihetta. Stabilointia tehtäessä täytyy kiinnittää huomiota kierrätysmateriaalin tulevaan käyttökohteeseen (lyhyen vai pitkän käyttöiän, ulkona vai sisällä), koska se vaikuttaa voimakkaasti tarvittavan stabiloinnin määrään. [21, 49]

Stabiloinnin tehokkuutta ja onnistumista voidaan testata samoilla menetelmillä sekä neitseellisessä että kierrätysmateriaalissa. Prosessointistaabiliutta voidaan testata tois- tamalla ekstruusiosyklejä ja tutkia materiaalin ominaisuuksia niiden jälkeen. Pitkäkes-

toista lämpöstabiliutta testataan yleensä vanhenemistestillä uunissa muovin sulamislämpötilan alapuolella. Lämpöstabiliutta testataan tyypillisesti olosuhdetestillä. Siihen voidaan käyttää joko sääkaappia, jossa voidaan säätää muun muassa kosteutta, valon intensiteettiä sekä spektriä, tai testi voidaan suorittaa todellisissa ulko-olosuhteissa. [21]

Stabilointiaineiden lisäksi kierrätysmateriaaliin voidaan lisätä myös muita lisäaineita, joita on käsitelty edellisissä kappaleissa. Jos kierrätysmateriaalin prosessointimenetelmää vaihdetaan toiseksi, millä neitseellinen materiaali on prosessoitu, on sen reologia ominaisuuksia kuten sulaindeksiä ja sulalujuutta mahdollisesti modifioitava uuteen prosessointimenetelmään sopiviksi. Riippuu uudesta prosessointimenetelmästä ja materiaalista halutaanko sulaindeksiä laskea vai nostaa ja kuinka se tehdään. Esimerkiksi kierrätetyn polypropeenin (PP) sulaindeksi on matalampi kuin neitseellisen, mutta sitä voidaan nostaa lisäämällä peroksidia. Peroksidi kuitenkin hajottaa PP:tä, jolloin on lisättävä antioksidanteja tai muita stabilisaattoreita. Polyeteenin (PE) sulaindeksiä ei taas voida kasvattaa peroksidia lisäämällä, koska sen lisääminen aiheuttaa ristosilloittumista, jolloin viskositeetti kasvaa eli sulaindeksi laskee. PE:n sulaindeksiä voidaan kasvattaa pienissä määrin lisäämällä PE-vahoja. Suurempi sulaindeksin kasvu saadaan aikaan lisäämällä neitseellistä PE:tä, jolla on korkea sulaindeksi. [49]

Neitseellisen muovin lisäaineet voivat myös aiheuttaa ongelmia kierrätyksessä. Vaikka myrkyllisten halogenoitujen palonestoaineiden käyttö on nykyään kielletty, on niitä käytössä olevissa tuotteissa. Ne vapauttavat uudelleenprosessoinnissa myrkyllisiä kaasuja. UV-stabilaattoreissa käytetyt Ni-kompleksit ja väriaineissa käytettävät metallikompleksit voivat hajota korkeissa lämpötiloissa metalli-ioneiksi, jotka nopeuttavat muovin oksidatiivista hajoamista. Apuaineina käytettävät voiteluaineet voivat hapettua korkeissa lämpötiloissa, jolloin ne muodostavat hajuja aiheuttavia yhdisteitä. Lisäksi väriaineet värjäävät kierrätysmuovin todella helposti jo pienillä pitoisuuksilla. [49]

Kuluttajilta kerätty muovijäte koostuu useista muovilajikkeista, jotka on hankala erottaa toisistaan. Näistä muoveista voidaan valmistaa kierrätysmuoviblendejä kompatibilisaattorien avulla. Kuitenkin vaikka muovit saataisiin sekoittumaan toisiinsa, jos niiden ominaisuudet ovat kovin erilaiset, ilmenee ongelmia esimerkiksi erilaisista sulamispisteistä. Jos seoksen jokin komponentti hajoaa sellaisessa lämpötilassa, jossa toinen komponentti ei ole vielä edes sulanut, on prosessointi haastavaa. Sulamattomat partikkelit ovat epä-jatkuvuuskohtia, jotka vaikuttavat mekaanisiin ominaisuuksiin, koska esimerkiksi säröjen eteneminen helpottuu. Kompatibilisaattoreita saatetaan tarvita myös käytettäessä kierrätysmateriaalia yhdessä neitseellisen materiaalin kanssa, vaikka ne olisivatkin samaa polymeerilajiketta. [23, 49]

Taulukossa 4 on esitetty kierrätysmuovien yleisimpiä ongelmia esimerkiksi ominaisuuksissa ja ulkonäössä, ongelmien syitä ja mahdollisia ratkaisuja. Ratkaisut perustuvat lisäaineiden käyttöön tai muihin modifiointimenetelmiin.

Taulukko 4. Kierrätysmuovien ongelmia, niiden syitä ja mahdollisia ratkaisumahdollisuuksia. Mukailtu lähteestä [49]

Ongelma	Syy	Mahdollinen ratkaisu
Polyolefiinien, PS:n ja PET:n haalistuminen	Hapettuminen, kaksoissidokset	Stabilaattorin käyttö
Sulaindeksi ei ole vakio	Ristisilloittuminen, hajoaminen	Prosessistabilaattorin käyttö
Sulaindeksi on liian matala (polyolefiinit)	Materiaali on eri sovelluksesta, mihin kierrätysmateriaali on tarkoitettu, ristisilloittuminen	Sekoittaminen korkean sulaindeksin omaavan materiaalin kanssa, prosessointistabilisaattorin avulla enemmän ristisilloittumisen välttäminen, hajoamisen kontrollointi peroksidien avulla PP:llä
Sulaindeksi on liian korkea (polyolefiinit)	Materiaali on eri sovelluksesta, mihin kierrätysmateriaali on tarkoitettu, hajoaminen (molekyyliketjujen katkeaminen)	Hajoamisen välttäminen prosessistabilisaattorin avulla, korjaavien molekyylien käyttö
Moolimassa on liian matala (PET,PA)	Hajoaminen	Esikuivaus, prosessistabilaattori, korjaavien molekyylien käyttö
Hajujen muodostuminen	Epäpuhtaudet, hajoaminen	Tyhjiön käyttö prosessin aikana, prosessistabilaattorin käyttö hajoamisen estämiseksi
Blendien jakautuminen lamelleihin	Komponenttien yhteensopimattomuus	Suuremmat leikkausvoimat prosessissa, stabilaattorin tai kompatibilisaattorin käyttö
Virheet materiaalin pinnassa	Makroskooppiset epäpuhtaudet, haihtuvat aineet, hajoaminen	Suodatinjärjestelmät, prosessointi tyhjiössä, esikuivaus, prosessointistabilaattorin käyttö
Riittämättömät mekaaniset ominaisuudet (yksi muovilajike)	Epäpuhtaudet, hajoaminen	Makroskooppisten epäpuhtauksien tarkastaminen, suodatinjärjestelmät, esikuivaus, prosessistabilaattorin käyttö

Riittämättömät mekaaniset ominaisuudet (blendi)	Komponenttien yhteensopimattomuus	Sopiva kompatibilisaattori
Värien heikkeneminen johtuen vanhenemisesta	Riittämätön valostabilointi	Valostabilaattorien tai valonkestävien pigmenttien käyttö

5 KIERRÄTYKSEN JA MODIFIOINNIN VAIKUTUS OMINAISUUKSIIN

Muovin käytön ja kierrätyksen aikana sen rakenne ja jossain tapauksissa myös morfologia muuttuvat. Rakenteen muuttumisella tarkoitetaan pääasiassa molekyyliketjujen lyhenemistä, mutta myös ristosilloittumista, ketjujen haaroittumista ja uusien funktionaalisten ryhmien muodostumista. Osittain kiteisten polymeerin kiteisyys voi muuttua johtuen moolimassan muutoksista. Muutokset johtuvat termomekaanisesta jännityksestä, polymeerien polykondensoitumisesta, hapen läsnäolosta ja veden sekä muiden pienimolekyylisten yhdisteiden läsnäolosta sulaprosessoinnin aikana. Muutokset sekä morfologiassa että rakenteessa vaikuttavat voimakkaasti muovin ominaisuuksiin. Erityisesti vaikutukset näkyvät mekaanisissa ja reologisissa ominaisuuksissa sekä ulko-olosuhteiden kestossa ja termisessä stabiiliudessa. [50]

Kierrätyksen aiheuttamat muutokset muovissa riippuvat paljolti muovilajikkeesta eli polymeerin rakenteesta. Jos ketjujen katkeaminen on suurempaa kuin ristosilloittuminen, laskee muovin moolimassa ja tätä kautta viskositeetti. Mitä matalampi viskositeetti on, sitä helpommin muovi virtaa, joten prosessointi on helpompaa. Jos ristosilloittumista tapahtuu enemmän kuin ketjujen katkeamista, viskositeetti kasvaa. Tyypillisesti kierrätysmuovien mekaaniset ominaisuudet ovat heikommät kuin neitseellisten. Esimerkiksi iskulujuus voi laskea, jolloin materiaalista tulee hauraampi. Tyypillisesti myös lämmönkestävyys laskee. [50]

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan kierrätyksen ja erilaisten modifiointimenetelmien vaikutusta muovien ominaisuuksiin julkaistujen tutkimusten perusteella. Modifiointimenetelmillä voi olla erilainen vaikutus eri muovilajikkeisiin riippuen niiden rakenteesta. Kaikki seuraavaksi tarkasteltavat muovilajikkeet eivät ole teknisiä muoveja, mutta tarkasteluilla pyritään saamaan mahdollisimman monipuolinen kuva modifioinnin vaikutuksista kierrätysmuovien ominaisuuksiin niiden tutkimustulosten perusteella, joita on saatavilla.

5.1 Seostus neitseelliseen muoviin

Kierrätysmuovien seostuksesta neitseelliseen muoviin on tehty useita tutkimuksia, joissa tutkitaan muovien ominaisuuksia eri kierrätysmuovien ja neitseellisen muovien suhteilla. Kierrätysmuovi/neitseellinen muovi –blendi on monimutkainen systeemi rakenteeltaan ja komponenttien käyttäytymiseltään. Ideaalitulanteessa kierrätysmuovien määrää saatai-

siin kasvatettua ilman merkittävää ominaisuuksien heikkenemistä. Usein kuitenkin osa muovin ominaisuuksista heikkenee, mutta osa puolestaan paranee kierrätysmuovin määrän kasvaessa. Tyypillisesti paranevat ominaisuudet ovat heikentyvien ”vastaominaisuuksia”. Esimerkiksi iskulujuuden heikentyessä materiaali haurastuu ja kovuus kasvaa. Jos ominaisuudet muuttuvat paljon, ei kierrätysmuovia välttämättä enää voida tai ei ole kannattavaa käyttää samassa käyttötarkoituksessa kuin neitseellistä muovia on käytetty.

Marulandan [37] tutkimuksessa tutkitaan kierrätysmuovin prosentuaalisen osuuden vaikutusta kierrätysmuovi/neitseellinen muovi –blendin ominaisuuksiin matalatiheys polyeteenillä (PE-LD), polyeteenitereftalaatilla (PET) ja polyvinyylidikloridilla (PVC). Kierrätysmuovi/neitseellinen muovi –blendin ominaisuudet riippuvat voimakkaasti kierrätysmuovin ominaisuuksista ja tätä kautta kierrätysmuovin määrästä. PE-LD:n ominaisuuksista iskulujuus laskee ja kovuus nousee kierrätysmuovin määrän kasvaessa. Tällöin materiaali haurastuu. Lisäksi materiaalin sisältämät kontaminaatiot (1,44 %) voivat helpottaa murtumien etenemistä materiaalissa. Murtolujuus kasvaa muutamia megapascalaita, mitä voidaan selittää kontaminaatioiden aiheuttamalla muutokselle materiaalin tiheydessä, mikä johtaa ketjujen liukumiseen, millä on lujittava vaikutus. [37]

PET:n ominaisuudet muuttuvat täysin vastakkaisesti kuin PE-LD:n. Sen iskulujuus kasvaa ja kovuus laskee kierrätysmuovin määrän kasvaessa. Kierrätetty PET on enemmän amorfinen kuin neitseellinen PET. Muutokset kiteisyydessä voidaan selittää moolimassan pienenemisellä kosteuden läsnä ollessa, kierrätetyn ja neitseellisen materiaalien erilaisella mekaanisella ja termisellä historialla ja epäpuhtauksilla materiaalissa. PET:n amorfiset osiot parantavat sen energianabsorbointikykyä ja siksi iskulujuutta. Myös murtovenymä kasvaa kierrätysmateriaalin määrän kasvaessa amorfisien osien sitkistävän vaikutuksen ansioista. [37]

PVC:n lisäaineina käytetään tyypillisesti plastisoijia sekä helpottamaan prosessoitavuutta että aikaansaamaan pehmeä ja sitkeä materiaali. Plastisoijien vaikutus heikkenee käytön ja kierrätyksen aikana ja kierrätetty PVC muistuttaa ominaisuuksiltaan puhdasta PVC:tä eli se on jäykkää huoneenlämmössä, sillä on pieni venymä ja se on hauraampaa kuin plastisoitu PVC. PVC:n iskulujuus laskee ja kovuus nousee voimakkaasti kierrätysmateriaalin määrän kasvaessa. Kovuuden kasvamiseen voi vaikuttaa kierrätetyn PVC:n jäykkyys verrattuna pehmeään ja elastisempaan neitseelliseen PVC:hen. Haurastumisen myötä myös iskulujuus pienenee. Vetolujuus puolestaan kasvaa voimakkaasti kierrätysmateriaalin määrän kasvaessa. Neitseellisen PVC:n vetolujuus on noin 8 MPa, kun puolestaan 100 % kierrätysmateriaalin noin 47 MPa. Lujuuden nousu johtuu kierrätysmateriaalin muuttuneesta rakenteesta. Puhdas PVC sisältää vahvoja sekundaarisidoksia, joita plastisoijat heikentävät. Plastisoijien vaikutuksen heikentyessä sekundaarisidokset ovat vahvoja, jolloin jäykkyys ja lujuus kasvavat. [37]

Chenin [51] tutkimuksessa on tutkittu kierrätetyn ABS:n lisäämistä neutraaliseen (2 materiaalia) eri määrillä ja sen vaikutusta materiaalin eri ominaisuuksiin. Tutkimuksessa käytetty kierrätetty ABS on peräisin sähkö- ja elektroniikkalaitteista. Kierrätysmuovin määrä vaihtelee 0-50 % välillä. Kierrätysmuovin määrän kasvulla ei ole merkittävää vaikutusta vetolujuuteen, taivutuslujuuteen tai myötövenymään. Sulaindeksi kasvaa hiukan kierrätysmuovin määrän kasvaessa (18,5→19,8 g/10 min ja 50,2→52 g/10 min) eli viskositeetti laskee hiukan. Tätä vahvistaa myös ruiskutuspaineen aleneminen tiettyissä määriteltyissä ruiskuvaluolosuhteissa, koska viskositeetin laskiessa, ei ruiskutukseen tarvita niin suurta ruiskutuspainetta. Kierrätysmuovin määrällä on myös jonkin verran vaikutusta lasisiirtymälämpötilaan. Pienillä määrillä, alle 15 %, lasisiirtymälämpötila pysyy vakiona, mutta välillä 15–50 % se nousee molemmilla materiaaleilla hieman (99→100,3 °C ja 102→103,5 °C). Iskulujuus vaihtelee hieman eri kierrätysmuovin määrillä, mutta siinä ei tapahdu merkittävää muutosta. Kovuus nousee kierrätysmuovin määrän kasvaessa, mikä viittaa materiaalin haurastumiseen. Tässä tutkimuksessa kierrätysmateriaalia on lisätty enintään 50 %, ja sitä lisättäessä aina 100 %:in asti, saattaisivat muutokset ominaisuuksissa olla erilaisia ja suurempia. [51]

5.2 Täyteaineiden tai lujitteiden käyttö

Kierrätysmuovia voidaan modifioida esimerkiksi täyteaineiden tai lujitteiden avulla. Kierrätysmuovin modifiointia on kokeiltu ja tuloksista raportoitu muun muassa epäorgaanisilla täyteaineilla ja niiden nanopartikkeleilla kuten kalsiumkarbonaatilla, wollastoniitilla ja sinkkioksidilla, lasikuiduilla, puukuiduilla ja elastomeereillä. Epäorgaaniset täyteaineet ja lujitekuidut parantavat muovin elastista modulia, mittapysyvyyttä ja lämmönkestävyyttä. Elastisen modulin kasvaessa materiaalin taipumus elastiseen (palautuvaan) muodonmuutokseen pienenee eli sen jäykkyys kasvaa. La Mantian [50] tutkimuksessa kierrätetyn polypropeenin taipumislämpötila eli HDT (heat distortion temperature) kasvaa yli kaksinkertaiseksi lisättäessä 20 paino- % lasikuitua ja lähes kaksinkertaiseksi lisättäessä saman verran wollastoniittia. Epäorgaaniset täyteaineet ja lujitekuidut nostavat muovin viskositeettia, mikä vaikeuttaa prosessointia vaatien suuremmat jännitykset prosessoinnissa, mikä johtaa helpommin materiaalin hajoamiseen. Lisäksi ne laskevat murtovenymää, mikä haurastuttaa muovia. Täyteaineiden vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin riippuu niiden pituus/halkaisija-suhteesta, mitä suurempi suhde on, sitä suurempi on vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi lasi- ja puukuitujen vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin on siis suurempi kuin pallomaisten kalsiumkarbonaattipartikkelien. La Mantian [50] tutkimuksessa tulee kuitenkin ilmi, että puukuitujen vaikutus kierrätetyn PE/PP-blendin ominaisuuksiin ei ole yhtä suuri kuin lasikuitujen. Tämä selittyy puukuitujen ja polyeteenin sekä polypropeenin erilaisella kemiallisella rakenteella, sillä poolisten puukuitujen ja poolittomien polyeteenin ja polypropeenin välillä on heikko adheesio. [50]

Elastomeerit kierrätysmuovin täyteaineina vaikuttavat kierrätysmuovin ominaisuuksiin melko erilailla kuin epäorgaaniset täyteaineet ja lujitekuidut. Elastomeerit tyypillisesti kasvattavat murtovenymää eli sitkistävät materiaalia ja siten parantavat iskulujuutta. Elastinen moduli eli jäykkyys ja lämmönkesto puolestaan yleensä laskevat. Elastomeerit sopivat siis kierrätysmuovien sitkistämiseen, jos ei tavoitella lujittavaa vaikutusta. [50, 52]

ABS:n ominaisuuksista käytön ja kierrätyksen myötä tyypillisesti eniten heikkenee iskulujuus. Iskulujuuden heikkenemisen suurin tekijä on polybutadieeniketjun kaksoisidoksen tyydyttyminen valon vaikutuksesta (photo degradation), jolloin tapahtuu ristisilloittumista ja kumifaasi katoaa. Käyttö ja kierrätys saattavat aiheuttaa muutoksia ABS:n ulkonäössä sen kellastumisen myötä. Kellastumisen (yellowing) aiheuttaa karbonyylirakenteen reagoiminen uusien ryhmien, kuten aldehydit, ketonit ja peroksidit, jotka syntyvät vanhenemisen seurauksena. [52]

Liun [52] tutkimuksessa kierrätettyä ABS:ää on seostettu kolmella eri elastomeerillä. Elastomeereinä on käytetty jauhattua ABS:ää, jossa butadieenin osuus on 70 paino- % butadieenikumia ja styreenibutadieenikumia. Jauhetulla ABS:llä on parempi yhteensopivuus kierrätetyn ABS:n kanssa samanlaisen rakenteensa takia kuin kahdella muulla elastomeerilla, joten sen kanssa seostettaessa sitkistävä vaikutus on suurin. Jos kasvatetaan jauhetun ABS:n määrää kierrätysmuovissa, kasvaa iskulujuus, mutta vetolujuus ja jäykkyys laskevat. Kuitenkin iskulujuuden kasvu on suurempi kuin vetolujuuden ja jäykkyyden lasku. Esimerkiksi kun jauhetun ABS:n määrä on 5 paino- %, kasvaa iskulujuus noin 35 % ja vetolujuus ja moduli puolestaan laskevat noin 2 %. Jos elastomeeriä lisätään enemmän, on vaikutus vetolujuuteen ja jäykkyyteen suurempi. [52]

Nanotäyteaineiden vaikutusta kierrätysmuovin ominaisuuksiin on tutkittu muun muassa Liun [52] ja Mahantan [53] tutkimuksissa. Liun tutkimuksessa nanopartikkeleina on käytetty epäorgaanista piidioksidia, sinkkioksidia ja titaanidioksidia, joita on seostettu kierrätettyyn ABS:än. Niillä pitäisi olla mahdollista kasvattaa kierrätetyn ABS:n jäykkyyttä ja sitkeyttä. Kaikilla testatuilla nanopartikkeleilla, joilla oli sama partikkelikoko (50 nm), oli samat vaikutukset kierrätetyn ABS:n ominaisuuksiin. Niiden todettiin nostavan iskulujuutta, mutta vaikutus ei ollut yhtä suuri kuin elastomeereillä. Myös jäykkyys kasvoi jonkin verran, mutta yleisesti ottaen vaikutukset ominaisuuksiin olivat pienet. Nanopartikkelien koolla todettiin olevan vaikutusta ominaisuuksiin. Kun käytettiin halkaisijaltaan 200 nm piidioksidia iskulujuus heikkeni, mutta halkaisijan ollessa 50 nm iskulujuus kasvoi tiettyyn pisteeseen saakka. ABS:ää koetettiin myös seostaa sekä piidioksidilla ja jauhetulla ABS:llä yhdessä, jotta voitaisiin parantaa sekä iskulujuutta että jäykkyyttä. Kaikista optimaalisimmat ominaisuudet saavutettiin, kun jauhattua ABS:ä lisättiin 6 paino- % ja piidioksidia 3 paino- %. Tällöin jäykkyys ja sitkeys saatiin lähes neutraalisen ABS:n tasolle. [52]

Mahantan [53] tutkimuksessa orgaanisesti modifioituja nanosavia C15A ja C30B seostetaan kierrätettyjen ABS:n ja PC:n blendiin, jota on kompatibilisoitu maleiininhydridillä oksastetulla polypropeenilla ja epoksilla (rPC/rABS/MAP/ER/80/20/5/2). Kompatibilisointia käsitellään paremmin seuraavassa luvussa. Molempien nanosavien lisääminen kasvattaa sekä modulia että vetolujuutta, mutta laskee murtovenymää ja iskulujuutta. Kun verrataan modulia kierrätettyihin PC:hen ja ABS:ään, moduli kasvaa 87 % ja 120 % ja neitseellisiin verrattuna 84 % ja 83,4 %. Iskulujuuden ja murtovenymän lasku viittaa haurastumiseen, joka saattaa johtua nanosaven huonosta dispersiosta, joka voi johtaa halkeiluun paljon PC:tä sisältävässä seoksessa.

5.3 Kompatibilisaattorien käyttö

Mahantan [53] tutkimuksessa on tutkittu kierrätetystä PC:stä ja ABS:stä eri suhteilla seostetun blendin ominaisuuksia (vetolujuus, moduli, murtovenymä ja iskulujuus) ilman kompatibilisaattoria sekä yhdellä tai kahdella kompatibilisaattorilla. Tutkimuksessa käytetyt PC ja ABS on saatu sähkö- ja elektroniikkalaitteista. Ilman kompatibilisaattoria seostetuilla blendeillä kaikki muut tutkitut ominaisuudet paitsi jäykkyys olivat heikompia kuin neitseellisillä PC:llä ja ABS:llä. Myös jäykkyys oli heikompi kuin neitseellisellä PC:llä. Kun PC:n osuutta blendissä kasvatettiin, paranivat jäykkyys ja iskulujuus. Kompatibilisaattorina on käytetty maleenianhydridillä oksastettua polypropeenaa (MAP) (maleic anhydride-grafted polypropylene) sekä kiinteää epoksia. Kompatibilisaattorien kanssa testattavaksi blendeiksi valittiin yksi enemmän ABS:ää sisältävä (rABS/rPC/60/40) ja yksi enemmän PC:tä sisältävä (rABS/rPC/20/80) blendi.

Kun enemmän ABS:ää sisältävään blendiin lisättiin 5 % MAP:a, paranivat vetolujuus, murtovenymä ja iskulujuus verrattuna kompatibilisoimattomaan blendiin, mutta moduli laski hieman. MAP alentaa rajapintajännityksiä ABS:n ja PC:n välillä reagoiden dispergoituneen PC-faasin ketjun päissä olevien OH-ryhmien kanssa. Samalla poolisten ABS:n ja MAP:n välillä on vuorovaikutuksia. Alentuneet rajapintajännitykset johtavat parempaan adheesioon ABS:n ja PC:n välillä, jolloin ominaisuudet paranevat. Kun tähän blendiin lisättiin MAP:n lisäksi kiinteää epoksia 0,5 %, paranivat ominaisuudet entisestään ja myös moduli eli jäykkyys parani. Kasvatettaessa epoksin määrää 1 %:iin ja 2 %:iin, moduli paranee entisestään, mutta 2 %:n kohdalla iskulujuus ja murtovenymä laskevat. Kuitenkin iskulujuus ja murtovenymä ovat edelleen paremmat kuin kompatibilisoimattomalla blendillä. Niiden lasku voi johtua epoksin aiheuttamasta hauraudesta blendissä. [53]

Myös enemmän PC:tä sisältävään blendiin lisättäessä 5 % MAP:a vetolujuus, murtovenymä ja iskulujuus paranivat, mutta tässä tapauksessa myös moduli kasvoi. Iskulujuuden kasvu oli myös paljon suurempi kuin enemmän ABS:ää sisältävällä blendillä (55 → 101 vs. 36 → 41 J/m). Lisättäessä epoksia iskulujuus laskee hiukan, mutta se on kuitenkin edelleen parempi kuin kompatibilisoimattomalla blendillä. Myös moduli laskee

hiukan, mutta se paranee kun epoksin määrää kasvatetaan. Vetolujuus ja murtovenymä paranevat. Kun kiinteää epoksia seostetaan blendiin, se reagoi PC-faasin kanssa, jossa PC-segmenttien ja epoksin hydroksyyliyhmiin välillä tapahtuu vaihtoesteröinti-reaktio, joka muuttaa PC:n aromaattisen karbonaatin suoraketjuiseksi karbonaatiksi, mikä saattaa edistää blendin sitkistymistä. [53]

6 KIERRÄTYSMUOVIN KÄYTTÖKOHTEET

Jotta muovien kierrätys saataisiin vakaaksi ja toimivaksi pitkällä aikavälillä, on löydettävä tasapaino kierrätystekniikkojen, taloudellisuuden ja ympäristötekijöiden välillä. Tarvitaan kannattavia lajittelu- ja kierrätysmenetelmiä, joilla saadaan tuotettua laadukasta kierrätysmuovia. Jo tuotesuunnitteluvaiheessa pitäisi kiinnittää huomiota komponenttien kierrätettävyyteen ja purettavuuteen. Kierrätysmuoville on löydettävä käyttökohteita, jolla on kysyntää eli markkinat. Kierrätysmuovin käyttökohteita voi olla sama kuin neitseellisen materiaalin, jolloin myös sen ominaisuudet ovat pysyneet lähes vastaavina (primaarikierrätys) tai sitä voidaan käyttää eri sovelluksissa, jolloin ominaisuudet ovat tyypillisesti heikenneet käytön ja kierrätyksen aikana (sekundaarikierrätys). [23] Nykyiset kierrätysmuovien tuotesovellukset lähtevät yleensä asiakkaiden tarpeesta, mutta tarvittaisiin myös muita sopivia sovelluksia. Kierrättäminen vain kierrättämisen vuoksi ei kuitenkaan ole järkevää. [12]

Euroopassa suurin osa kierrätysmuovista (vuonna 2002), noin 40 %, käytetään jakelutuotteiden, kuten kalvojen ja pussien valmistamiseen. Rakennustarvikkeiden, kuten putkien ja eristeiden valmistamiseen käytetään noin 30 %. Kotitaloustuotteiden valmistamiseen käytetään noin 20 % ja loput noin 10 % kuluu muihin sovelluksiin, kuten viherkenttien rakentamiseen ja tekstiiliteollisuuteen. [54]

Joillekin mekaanisesti kierrätetyille muovilajikkeille on jo olemassa vakiintuneita käyttökohteita. Nämä muovit ovat pääasiassa valtamuoveihin kuuluvia. PE-HD:tä käytetään muun muassa ei-elintarviketeollisuuden pulloissa, kuten pesuainepulloissa, putkisovelluksissa, roska-astioissa ja penkeissä. PE-LD:stä tehdään pakkauskalvoa, muovikasseja, maatalousmuoveja ja muovilautaa. PET:stä tehdään uusia muovipulloja ja lisäksi sitä voidaan käyttää myös uusien polyesterikuitujen valmistamiseen, joista voidaan valmistaa materiaaleja esimerkiksi sisustustuotteisiin, mattoihin, vaatteisiin sekä kuitukankaisiin. PS:tä voidaan tehdä esimerkiksi pakkausten ja rakennusten eristeitä, henkareita ja kukkaruukkuja. PP:stä voidaan tehdä kasvatusalustoja, kukkaruukkuja, putkia, säilytysrasioita, muovilautaa ja puistonpenkkejä. Sekalaisesta heterogeenisestä kierrätysmuovista voidaan käyttää puumuovikomposiiteissa ja muovisahatavarassa. Kierrätysmuovia on käytetty myös betonin täyteaineena. [55]

Suomessa kierrätysmuovien käyttökohteet ovat melko rajoittuneet kuten myös kierrätysmuovimarkkinat. Kierrätysmuoveja käytetään pääasiassa kierrätysmuovipulloissa, muovipusseissa, putkissa, levytuotteissa ja rakennuseristeissä. Lisäksi kierrätysmuovista

voidaan valmistaa muoviprofiilia, jota voidaan käyttää esimerkiksi aitoihin tai puistokaluksiin. Suomessa muovien mekaanista kierrätystä rajoittavat pienet yhtenäiset jättemäärät, pitkät välimatkat, valtakunnallisen muovijätekeräyksen sekä kierrätysliiketoiminnan puuttuminen. Kierrätysliiketoimintaa ei kannata aloittaa, jos kierrätykseen sopivaa materiaalia ei ole saatavilla riittävästi. Lisäksi vaihtelevat jättemäärät vaikeuttavat materiaalin saatavuuden takaamisen sen käyttäjälle. Saatavuusongelmia ei helpota se, että muovin määrää tuotteissa pyritään vähentämään ja esimerkiksi pakkauskalvot ovat ohuempia kuin ennen. Saatavuuden lisäksi muovin pieni määrä tuotteessa voi aiheuttaa ongelmia pesu- sekä kuivausprosesseissa. [14]

Euroopan tasolla kierrätysmateriaalin saatavuusongelmaan vaikuttaa kierrätyskelpoisen muovijätteen kuljettaminen halvemman työvoiman maihin Kaukoitään, erityisesti Kiinaan. Muovijätettä kuljetetaan Euroopan ulkopuolelle, jos likaisen muovijätteen lajittelu ja myynti tulisi kalliimmaksi kuin kuljetus. Tämä ei kannusta uusiin kierrätyslinjoihin investointiin Euroopassa, vaikka niillä olisi työllistävä vaikutus, ja tuotto jäisi paikalliseen käyttöön. [12]

Kierrätysmuovin hinta korreloi neitseellisen muovin hinnan kanssa, joka puolestaan on sidoksissa öljyn hintaan. Kierrätysmuovin hintaa nostavat kierrätysprosessista syntyvät kustannukset. Mitä enemmän prosessivaiheita tarvitaan, sitä korkeammaksi hinta nousee. Kun kierrätysmuovin hinta lähenee neitseellisen materiaalin hintaa, ei sen käyttöä nähdä enää mielekkäänä. [12] Tekniset muovit ovat kalliimpia kuin valtamuovit, joten niillä kierrätysmuovin hinta ei saavuta yhtä helposti neitseellisen muovin hintaa. Teknisten muovien käyttöosuus muovien kokonaistuotannosta on kasvussa. Teknologian kehittyessä tuotteiden materiaaliominaisuuksille asetetaan uusia vaatimuksia, joihin perinteisesti käytössä olleet materiaalit eivät pysty vastaamaan. Kansainvälisen markkinatutkimusyhtiön mukaan teknisten muovien liikevaihto maailmanlaajuisesti oli vuonna 2011 noin 34,9 miljardia euroa, ja sen arvellaan kasvavan 59,3 miljardiin euroon vuonna 2017. [56] Käyttömäärien kasvaessa myös kierrätettyjen teknisten muovien kysynnän luulisi kasvavan.

Muovien mekaanisen kierrätyksen ja kierrätysmuovituotteiden käytön lisäämiseksi tulisi lisätä kuluttajien tietoutta muovien kierrättämisestä. Kuluttajien mielikuva kierrätysmuovituotteista saattaa olla jonkin verran negatiivinen ja kuvitellaan, että kierrätysmuovista ei voida valmistaa laadukkaita tuotteita. Mielikuvaa olisi saatava positiivisemmaksi ja kuluttajia kiinnostumaan kierrätysmuovituotteista. [12]

7 KOKEELLINEN OSUUS

Tämän työn kokeellisessa osuudessa tutkitaan käytettyjen taajuusmuuttajien muoviosien kierrätettävyyttä ja tunnistettavuutta sekä saatavan kierrätysmuovin ominaisuuksia. Materiaalit kierrätetään laboratoriomittakaavassa, mutta teollisuusmittakaavan kierrätysmenetelmiä jäljitellen, jonka jälkeen niistä valmistetaan koekappaleita, joista testataan muun muassa mekaanisia ja reologisia ominaisuuksia. Kierrätysmateriaalin ominaisuuksien perusteella voidaan arvioida sen uusiokäyttömahdollisuuksia.

Kokeellisen osuuden toinen osuus keskittyy taajuusmuuttajien termoelastiosien kierrätettävyyteen. Tässä tapauksessa tutkittavana materiaalina on termoelastiosien valmistuksessa syntyvä tuotantojäte.

7.1 Taajuusmuuttajat ja niiden muoviosat

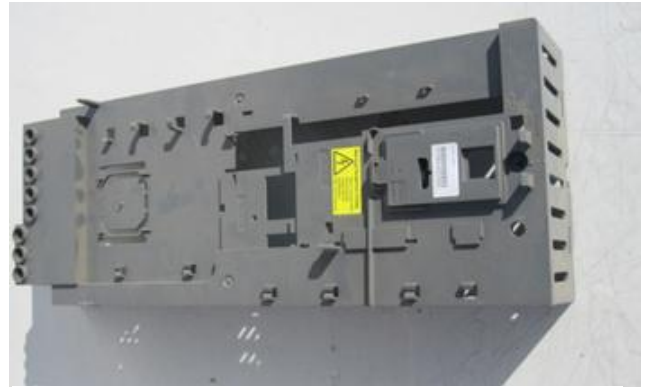
Taajuusmuuttaja on laite, joka säätelee moottorien pyörimismomenttia ja vääntömomenttia. Taajuusmuuttajan avulla moottori saadaan pyörimään prosessin tarpeen mukaisella nopeudella. Moottoreita ja tätä kautta myös taajuusmuuttajia käytetään monilla teollisuuden aloilla ja myös arkielämässä esimerkiksi jätevesipumpuissa, hiihtohisseissä ja paperikoneissa. [57] Taajuusmuuttajia on monenkokoisia.

Taajuusmuuttajissa käytettäviä muovilajikkeita ja niiden ominaisuuksia on käsitelty perusteellisemmin jo luvussa 2. Taajuusmuuttajien suurin muovijae on niiden kotelot, jotka ovat nykyisin PC/ABS –blendiä. Tässä työssä käsitellyssä ovat myös vanhat kotelot, jotka ovat polystyreeniä, joiden pinnassa on metallimaali.

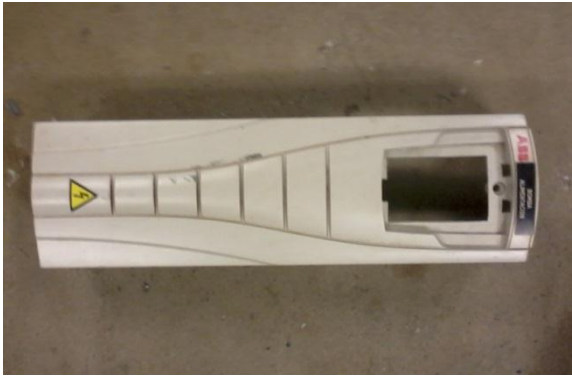
Kaikissa PC/ABS –koteloissa oli materiaalimerkintä (>PC/ABS<) (kuva 3), joten niiden manuaalinen tunnistus oli helppoa. Koteloita oli erimuotoisia ja erikokoisia, kuten taajuusmuuttajakin. Kotelot olivat harmaita tai valkoisia. PC/ABS –koteloissa olevat kontaminaatiot olivat pääosin pölyä, likaa ja tarroja sekä teippejä. Erilaisia PC/ABS-koteloita on kuvissa 4-6.



Kuva 3. Materiaalimerkintä PC/ABS-kotelossa



Kuva 4. Harmaa PC/ABS-kotelo



Kuva 5. Valkoinen PC/ABS-kotelo



Kuva 6. Valkoinen PC/ABS-pohjakotelo

Vanhat kotelot, joita ei enää valmisteta, mutta joita on edelleen käytössä, ovat polystyreeniä. Etukoteloissa (kuva 7 ja 8) oli metallimaali, mutta samojen taajuusmuuttajien pohjapaneelissa metallimaalia ei ollut (kuva 9). Metallimaalatut PS-kotelot ja maalaimattomat pohjat käsitellään omina jakeinaan. Kaikki PS-kotelot olivat väriltään vaaleita, ja ne sisälsivät materiaalimerkinnän. Niiden sisältämät kontaminaatiot olivat pölyä, likaa, tarroja, metallimaalia sekä tiivisteitä. Myös näissä koteloidissa oli punaisella yrityksen logo sekä mustalla taajuusmuuttajan mallinumero.



Kuva 7. PS-etukotelo ulkopuolelta

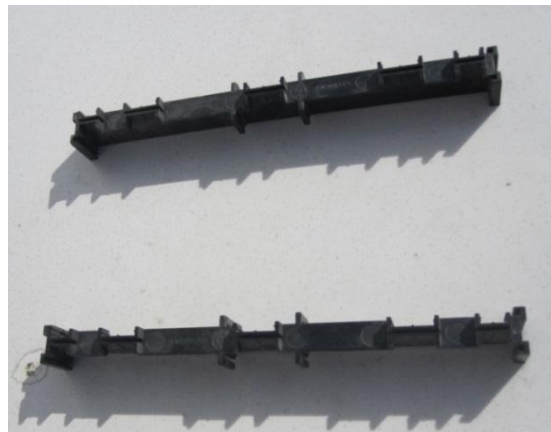


Kuva 8. PS-etukotelo sisäpuolelta



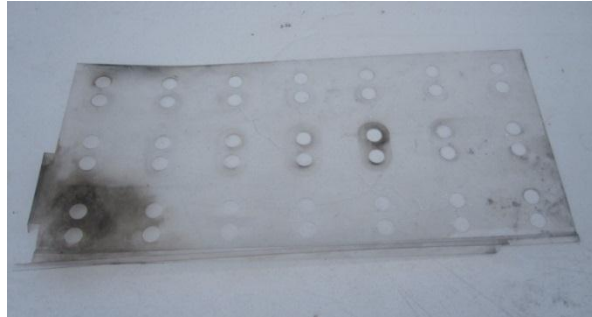
Kuva 9. PS-pohjakotelo sisäpuolelta

Polykarbonaatista valmistetut 10–20 cm pitkät mustat kappaleet ovat puolijohteiden ja hilaohjainkorttien välille tulevia mekaanisia ohjainosia (kuva 10). Näissä kaikissa oli materiaalimerkinnot, joten manuaalinen tunnistus oli helppoa. Kappaleet olivat melko puhtaita ja ainoat kontaminaatiot olivat pölyä. Ne sijaitsevat taajuusmuuttajassa sen sisäpuolella.



Kuva 10. Polykarbonaattisia ohjainosia

Edellä mainittujen osien lisäksi saatiin kahta materiaalia, joissa ei ollut materiaalimerkintöjä. Nämä materiaalit tunnistettiin DSC:llä polykarbonaatiksi ja polyamidiksi (612). Polykarbonaattia käytetään taajuusmuuttajien sisällä DC-kiskojen välillä eristeenä. Kyseinen polykarbonaatti on läpinäkyvää levyä (kuva 11). Eristelevyt olivat saaduista materiaaleista selkeästi likaisimpia. Kontaminaatiot olivat nokea ja muuta likaa. Kontaminaatioita oli osassa levyistä enemmän ja toisissa ei lähes ollenkaan. Eristelevyt ja mekaaniset ohjainosat käsiteltiin omina jakeinaan, vaikka ne molemmat ovat polykarbonaattia. Niiden käyttökohde ja ominaisuudet ovat kuitenkin hyvin erilaiset. Eristelevyissä käytetty polykarbonaatti on ekstruusiolaatua kun taas ohjainosissa on käytetty ruiskuvalulaatua. Lisäksi ne ovat erivärisiä, ja eristelevyt olivat huomattavasti likaisempia kuin ohjainosat.



Kuva 11. Likainen PC-eristelevy

Polyamidista tehdyt osat ovat mekaanisia kiinnitysmuttereita DC-kondensaattoreille (kuva 12). Näissä esiintyvät kontaminaatiot olivat pääasiassa rasvaa ja muuta likaa. Osa muttereista oli huomattavasti likaisempia kuin toiset.



Kuva 12. Polyamidinen kiinnitysmutteri

Taajuusmuuttajat sisältävät myös muita muoviosia, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 7.2, mutta tässä työssä keskitytään näihin kuuteen muovilajikkeeseen, jotka ovat:

1. PA
2. PC musta
3. PC kirkas
4. PC/ABS
5. PS+maali
6. PS

Muoviosien määrä vaihtelee taajuusmuuttajan koon ja mallin mukaan siten, että laitteiden tehon (koon) kasvaessa osien määrä kasvaa, toisaalta taas todella suuritehoisissa taajuusmuuttajissa esimerkiksi kuoret ovat metallia muovin sijaan.

Kaikissa etu- sekä pohjakoteloidessa oli aikakello, josta pystyttiin näkemään kotelon valmistusvuosi. Maalautut PS-etukotelot sekä PS-pohjakotelot olivat vuosilta 1996–2001. PC/ABS-kotelot olivat nykyisenä kotelomateriaalina uudempia vuosilta 2006–2011.

7.2 Purkuanalyysi

Koska kokeellisessa osuudessa käytettävät taajuusmuuttajien muoviosista suurin osa kerättiin jätelavalta, ei saatu kovin selkeää kuvaa, kuinka paljon muovia taajuusmuuttaja sisältää ja kuinka helposti muoviosat voidaan erotella taajuusmuuttajasta. Siksi yhdelle taajuusmuuttajalle tehtiin purkuanalyysi, jolla selvitettiin muovin määrää taajuusmuuttajassa sekä arvioitiin sen purettavuutta.

Taajuusmuuttajia on erikokoisia ja myös muovikomponenttien määrä vaihtelee. Purkuanalyysissä käytetty taajuusmuuttaja oli malliltaan ACS 600. Sen massa oli 51,4 kg, josta muovin osuus oli 1,8 kg eli 3,5 %. Muoveihin ei laskettu mukaan elektronisissa komponenteissa kiinteästi kiinni olevia muoveja esimerkiksi johtojen pinnoitteita. Taajuusmuuttajan muoviosat punnittiin kahdeksassa eri ryhmässä seuraavan jaottelun mukaan, jossa suluissa olevan numero kertoo osien lukumäärän taajuusmuuttajassa:

1. PS-pohja (1)
2. Metallimaalattu PS-etukotelo (1)
3. PC-eristelevyt (2)
4. PA-kiinnitysmutterit (3)
5. PC-ohjainosa (1)
6. Valkoiset tiivisteet
7. Mustat tiivisteet
8. Harmaat tiivisteet

Jätelavalta kerätyt ja laitteista puretut muoviosat sisälsivät ryhmiä 1-5. Ryhmät 6-8 ovat termoelasteja. Seuraavassa taulukossa 5 on esitetty eri muoviosien massat ja niiden osuus prosentteina koko taajuusmuuttajan sisältämästä muovimäärästä.

Taulukko 5. Taajuusmuuttajan muoviosat, niiden massat ja osuudet koko muovimäärästä

Muoviosat	Massa (g)	Osuus muoveista (%)
PS-pohja	194.3	10.7
Metallimaalattu PS-etukotelo	950.0	52.4
PC-eristelevyt x2	333.3	18.4
PA-kiinnitysmutterit x3	29.4	1.6
PC-ohjainosa	26.2	1.4
Valkoiset tiivisteet	123.5	6.8
Mustat tiivisteet	79.1	4.4
Harmaat tiivisteet	75.8	4.2
Yhteensä	1811.6	
Muovien osuus (%)	3.5	

Muovien määrä voi massalta kuvattuna kuulostaa melko pieneltä niiden keveyden takia, mutta muovien osuus taajuusmuuttajan tilavuudesta on huomattavasti suurempi.

Suurin osa taajuusmuuttajan muoviosista koostuu koteloista. Etu- ja pohjakotelo ovat massaltaan yli 60 % taajuusmuuttajan muoviosista. Uudemmissa taajuusmuuttajissa nämä ovat PC/ABS:ää PS:n sijaan. Kaikkien tiivisteiden eli termoelastiosien yhteenlaskettu osuus taajuusmuuttajan muoviosista on 15,4 %.

Etu- ja pohjakotelot olivat helppoiten purettavissa, joko napsauttamalla tai muutaman ruuvin irrotuksella. Muut muoviosat sijaitsivat taajuusmuuttajan sisällä, eivätkä ne olleet näkyvillä, kun kansi poistettiin. Taajuusmuuttajaa piti purkaa pidemmälle, jotta muihin muoviosiin päästiin käsiksi. Suurin osa taajuusmuuttajan osista oli ruuveilla kiinni toisistaan. Muoviosien irrottaminen ei ollut kovin helppoa, sillä monet niistä olivat useiden muiden osien alla, jotka täytyi irrottaa ensin.

7.3 Työvaiheet

Kaikki työssä käytettävät materiaalit saatiin taajuusmuuttajia valmistavalta yritykseltä. Suurin osa saaduista materiaaleista oli jo yrityksessä lajiteltu muovijätteeseen, joka sisälsi kaiken yrityksessä syntyvä kovan muovijätteen. Osa koteloista purettiin huoltoon menevistä laitteista.

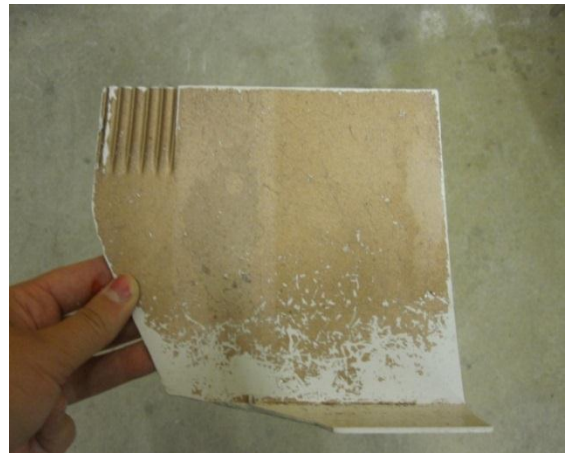
7.3.1 Pesu ja rouhiminen

Materiaalien pesu ja rouhiminen tehtiin TTY:n Polymeerihallilla. Kontaminaatioiden poistamiseksi materiaalit pestiin pesukoneessa. Osa materiaaleista sahattiin pienemmäksi ennen niiden pesemistä, jotta ne mahtuivat pesukoneeseen. Lisäksi materiaaleista poistettiin niiden sisältämät tarrat, teipit ja tiivisteet.

Pesutulokset olivat vaihtelevia. Paras pesutulos saatiin polykarbonaatista valmistetuille mekaanisille ohjainosille, mutta ne eivät myöskään sisältäneet muita kontaminaatioita kuin pölyä. Mustan värinsä takia on tosin mahdollista, että likaa ei vain havaittu yhtä helposti kuin vaaleissa kappaleissa. Kaikkiin tarroja sisältäviin osiin (kotelot) jäi liimajälkiä edelleen pesun jälkeen (kuva 13). Metallimaalatuista PS-koteloista maali irtosi osittain pesukoneessa (kuva 14), mikä viittaa siihen, että maali olisi suhteellisen helppoa irrottaa koteloista oikeanlaisilla menetelmillä teollisuusmittakaavassa. Osaan kirkkaista PC-eristelevyistä jäi nokea pesun jälkeen. Kaikista nokisimpia levyjä ei rouhittu (kuva 15). Kiinnitysmutterit olivat myös pesun jälkeen osa selkeästi tummempia kuin toiset. Korkeampaan puhtausasteeseen luultavasti päästäisiin, jos käytettäisiin oikeanlaisia pesuaineita ja pesulinjoja.



Kuva 13. Pesty PC/ABS-kotelo, jossa näkyy edelleen liimajälkiä



Kuva 14. Osa pestyä PS-kotelo, josta on irronnut maalia



Kuva 15. Esimerkki pesusta puhdistumattomasta PC-levystä

Pesun jälkeen materiaalit rouhittiin. Ennen rouhimista materiaaleja pidettiin pakastimes-
sa yön ylitse rouhimisen helpottamiseksi. Muovit haurastuvat lämpötilan laskiessa, jol-
loin rouhimen on helpompi murtaa ja pilkkoa ne. Lisäksi kylmät muovit hillitsevät rou-

himen ylikuumentumista ja tukkeutumista. Rouhiminen tehtiin Rapid granulator-rouhimella. Kaikkien muiden materiaalien rouhiminen onnistui ongelmitta, mutta PC-levyjen rouhiminen oli hankalaa, ja rouhin tukkeutui sekä ylikuumentu helposti.

7.3.2 Koekappaleiden valmistaminen

Koekappaleet valmistettiin Lahden ammattikorkeakoululla. Ennen ruiskuvalua kirkas ja musta PC-rouhe sekä PC/ABS-rouhe kuivattiin uunissa noin 90 °C:ssa yli kaksi tuntia. PA-rouhe kuivattiin ensin 90 °C:ssa yli kaksi tuntia ja sen jälkeen vielä viikonlopun yli 60 °C:ssa ja kaksi tuntia ennen ajamista 80 °C:ssa. PS- ja PS+maali-rouheita ei kuivattu.

Koekappaleet ruiskuvalettiin standardin ISO 527-2 mukaisiksi yleiskoekappaleiksi. PS:stä, metallimaalattua PS:stä, PC/ABS:stä ja PA:sta saatiin valettua hyviä, tasalaatuisia koesauvoja, joissa ei esiintynyt pintavirheitä. Sekä mustiin että kirkkaisiin PC-sauvoihin tuli pintaan raitoja. Lisäksi kirkkaisiin PC-sauvoihin tuli joitakin ilmakuplia koesauvojen sisään. Raitojen mahdollinen aiheuttaja voi olla materiaaliin jäänyt jäännöskosteus tai lisäaineet, kuten palonestoaineet.

Ruiskuvalussa ongelmia aiheutti liian suurikokoinen rouhe, joka tukki syöttösuppiloa ja materiaalin saaminen ruuville oli hankalaa. Rouhe oli liian suurikokoista PC/ABS:llä, PS+maalilla sekä kirkkaalla PC:llä. Kirkas PC piti rouhia uudestaan ennen ruiskuvalua. PS+maalin sekä PC/ABS:n tapauksessa materiaalin syöttöä piti auttaa suppiloa ravistelemalla sekä PC/ABS:llä materiaalia jouduttiin lisäksi painamaan ruuville asti.

Ruiskuvalupöytäkirjat ovat liitteessä 1 ja niissä on esitetty ruiskuvalussa käytettyjä ajo-parametrejä.

7.4 Termoelastit

Termoelasteja käytetään taajuusmuuttajissa muun muassa tiivisteissä ja läpivienneissä. Tutkittavana materiaalina on styreeniblokkipolymeeri. Materiaali oli yrityksen tuotantojätettä eli puhdasta ja käyttämätöntä, joten sitä ei tarvinnut pestä. Materiaali saatiin rouheena.

Tahdottiin selvittää, kuinka tuotantojätteen lisääminen neutraalisen materiaalin sekaan vaikuttaa materiaaliominaisuuksiin ja paljonko sitä olisi mahdollista käyttää, jotta ominaisuudet kuitenkin säilyisivät riittävinä. Valmistettiin kuusi koesarjaa eri neutraalisen materiaali/kierrätysmateriaali – suhteilla mekaanisesti sekoittamalla tuotantojäterouhetta ja neutraalista granulaattia. Sekoitussuhteet olivat 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 ja 0/100.

7.4.1 Koekappaleiden valmistaminen

Koekappaleet ruiskuvalettiin suoraan mekaanisista seoksista standardin ISO 527-2 mukaisiksi yleiskoekappaleiksi Fanuc Roboshot alfaC30 ruiskuvalukoneella. Kaikki seokset ajettiin samoilla prosessointiparametreilla. Ruiskuvalupöytäkirja on liitteessä 2. Saatiin tasalaatuisia koesauvoja.

7.5 Testaus

Taajuusmuuttajien muoviosien mekaaniset testit sekä sulaindeksimittaus tehtiin Muovi-polilla Nastolassa. Ennen mekaanisia testejä kaikki näytteet vakioitiin vakioolosuhdelaboratoriossa (+23 °C ±2 °C, 50±5 % RH) vähintään 16 tunnin ajan. Palonkestotestit ja reologiamittaukset kapillaarireometrillä tehtiin TTY:llä. DSC tehtiin Lahdessa LAMK:lla. Termoelastien kaikki testaukset tehtiin TTY:llä. Seuraavissa kappaleissa on tarkasteltu teoriaa ja standardeja eri mittausten menetelmien taustalla sekä kerrottu mittausten kulusta.

7.5.1 Vetokoe

Vetokokeessa koesauvaa venytetään vakionopeudella ja mitataan venymää vastustava voima F . Tuloksena saadaan voima-siirtymäkäyrä, josta voidaan laskea jännitys-myötymäkäyrä. Jännitys voidaan laskea kaavan 1 mukaan, kun tiedetään alkuperäisen poikkileikkauksen pinta-ala ja venytystä vastustava voima.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

missä σ on jännitys, F on venytystä vastustava voima ja A koesauvan poikkileikkauksen pinta-ala ennen vetoa. Venymä saadaan laskettua kaavalla 2.

$$\varepsilon(\%) = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0}, \quad (2)$$

missä L_0 on vetovälin mittapituus ja ΔL_0 sauvan pituuden lisäys. Vetokokeella voidaan määrittää materiaalin myötöjännitys, myötövenymä, vetokimmomoduli, vetomurtolujuus ja murtovenymä. Näiden perusteella voidaan arvioida materiaalin sitkeyttä, jäykkyyttä ja lujuutta.

Taajuusmuuttajien muoveille vetokokeet tehtiin standardin ISO 527-1 mukaisesti Lloyd EZ20-vetokoneella, jonka tarkkuusluokka on 1 (ISO 7500-1). Vetokokeet tehtiin viidelle rinnakkaiselle näytteelle. Tulosten perusteella näytteille määritettiin vetokimmomoduli, myötölujuus, myötövenymä, murtolujuus ja murtovenymä. Vetonopeus oli 50 mm/min ja venymä määriteltiin nimellisenä venymänä kiinnitysleukojen siirtymästä.

Termoelastien vetokokeet suoritettiin standardin ISO 527-1 mukaisesti Messphysik-vetokoneella. Vetokokeet tehtiin viidelle rinnakkaiselle näytteelle. Käytettiin 1 kN:n voimaselliä ja vetonopeus oli 500 mm/min.

7.5.2 Iskukoe

Iskukokeella voidaan arvioida materiaalin kestävyyttä iskumaisessa kuormituksessa sekä materiaalin haurautta tai lujuutta. Loveamattomien koekappaleiden Charpy-iskulujuus kilojouleina neliömetriä kohti saadaan laskettua kaavalla 3

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hb} \times 10^3, \quad (3)$$

missä E_c on koekappaleen murtamisen absorboima energia, h on koekappaleen paksuus ja b koekappaleen leveys.

Lovityypillä A, B tai C lovetun koekappaleen Charpy-iskulujuus saadaan laskettua muuten vastaavalla kaavalla kuin loveamattoman, mutta koekappaleen leveyden tilalla on koekappaleen jäännösleveys, b_N loven kohdalta mitattuna.

Murtumat voidaan jakaa neljään tyyppiin, jotka merkitään seuraavilla kirjaintyypeillä C, H, P ja N. Täydellisessä murtumassa (C) koekappale hajoaa kahteen tai useampaan osaan. Saranamurtuma (H) on epätäydellinen murtuma, jossa koekappaleen osia pitää yhdessä ohut saranamainen kuorikerros. Standardin mukaan saranamurtuma kuitenkin sisältyy täydelliseen murtumaan. Osittainen murtuma (P) on epätäydellinen murtuma, joka ei vastaa saranamurtuman määritelmää. Merkintä N tarkoittaa, että koekappaleessa ei ole murtumaa, mutta se voi olla taipunut tai työntynyt tukien läpi.

Taajuusmuuttajan muoveille tehtiin iskukokeet. Iskukoekappaleet valmistettiin vanesahalla vetokoesauvoista. Iskukokeet tehtiin lovetuille huoneenlämpöisille sekä loveamattomille pakastetuille kappaleille standardin ISO 179 mukaisesti. Lovetut näytteet lovettiin lovityypillä C. Loveamattomattomia näytteitä pidettiin pakastimessa -25 °C :ssa vähintään 16 tunnin ajan. Lovetut näytteet iskettiin 0,5 J iskuvasaralla ja loveamattomat 5 J tai 2 J iskuvasaralla. Näytteistä tehtiin kymmenen rinnakkaista mittausta.

7.5.3 Kovuus

Kovuusmittauksessa mitataan tietyn suuruisen painon aiheuttaman painauman syvyyttä näytteen pinnalla. Standardin ISO 868 mukainen Shore-kovuus mitataan painamalla mittauspään eli durometrin pohjalevy näytekappaleen pintaan, jolloin siinä oleva mittakärki painuu materiaaliin. Mittaustulos on painauman syvyys tietyn ajan kuluttua, mikä vastaa suoraan materiaalin Shore-kovuutta. Materiaali on sitä pehmeämpi mitä pienempi lukema saadaan. Durometrejä on kahta tyyppiä ja valinta kumpaa käytetään, riippuu materiaalin kovuudesta. A-tyypin durometria käytetään pehmeämmille materiaaleille, jos D-tyypin durometrin arvo on alle 20. D-tyypin durometri sopii siis kovemmille materiaaleille ja sitä käytetään, jos A-tyypin durometrin arvo on yli 90.

Kovuus mitattiin standardin ISO 868 mukaisesti tyypin D durometrillä. Kovuus mitataan viidestä eri pisteestä vetokoesauvan suurimmalta pinnalta 1 s ja 15 s mittausajoilla. Painona käytettiin 5 kg punnusta.

Termoelastien kovuus mitattiin A-tyypin durometrillä viidestä eri pisteestä koesauvan päistä mahdollisimman kaukaa kappaleen reunoista 1 s ja 15 s mittausajoilla.

7.5.4 Tiheys

Taajuusmuuttajan muoviosien tiheys määritettiin standardiin ISO 1183 pohjautuvan Sartorius-menetelmän mukaisesti. Testausliuksena käytettiin tislattua vettä. Tiheys määritettiin koesauvan kapeasta, suorasta osuudesta kahden mittauksen keskiarvona.

Termoelastien tiheys määritettiin ominaispainomenetelmää käyttäen standardin ISO 1183 mukaisesti. Mittaus suoritettiin Wallace X21B Electronic Densimeter – laitteistolla. Koekappaleina käytettiin koekappaleiden päätyjä ja tehtiin kaksi rinnakkaista mittausta (yhden koekappaleen molemmat päädyt).

7.5.5 Palonkesto

UL 94 paloluokitukset määritettiin standardia UL 94 V mukaillen. Pystysuorassa palonkestotestissä (vertical test) näyte asetetaan pystysuoraan asentoon ja se altistetaan liekkiä, joka sijaitsee sen alapuolella, 10 sekunnin ajaksi, minkä jälkeen liekki poistetaan ja mitataan aika, jonka näyte liekehtii liekin poistamisen jälkeen. Kun näyte sammuu, toistetaan sama uudelleen.

Taulukossa 6 on esitetty UL 94 V:n mukaiset paloluokitukset

Taulukko 6. UL 94 V:n mukaiset paloluokitukset [58, 59]

UL 94 V-luokka	Vaatimukset
V-0	<ul style="list-style-type: none"> - Testikappale saa liekehtiä maksimissaan 10 s - Viiden testikappaleen liekehtimisaika ei saa ylittää 50 s - Mistään testikappaleesta ei saa tippua palavaa materiaalia, joka sytyttää pumpulin - Jälkihehku ei saa kestää yli 30 s, kun testikappale on poistettu liekistä
V-1	<ul style="list-style-type: none"> - Testikappale saa liekehtiä maksimissaan 30 s - Viiden testikappaleen liekehtimisaika ei saa ylittää 250 s - Mistään testikappaleesta ei saa tippua palavaa materiaalia, joka sytyttää pumpulin - Jälkihehku ei saa kestää yli 60 s, kun testikappale on poistettu liekistä
V-2	<ul style="list-style-type: none"> - Testikappale saa liekehtiä maksimissaan 30 s - Viiden testikappaleen liekehtimisaika ei saa ylittää 250 s - Testikappaleesta saa tippua jonkin verran palavaa materiaalia - Jälkihehku ei saa kestää yli 60 s, kun testikappale on poistettu liekistä

Palonkestotestit tehtiin viidelle rinnakkaiselle näytteelle. Taajuusmuuttajan muoveille tehtiin lisäksi testit viikon uunitetuille (70 °C) näytteille, jotta voitiin sulkea kosteuden vaikutus tuloksiin pois.

7.5.6 Öljynkesto

Termoelasteista testattiin niiden öljynkestoja. Mittaus suoritettiin standardin UL 157 mukaan tilavuudenmuutostestinä. Näytteet olivat 3,0 mm paksuja neliöitä, joiden sivun pituus oli 254 mm. Näytteet punnittiin ennen altistusta ilmassa ja vedessä. Punnitusten välissä ne kastettiin alkoholiin. Näytteet altistettiin öljylle (IRM 903) 70 tunniksi, jonka jälkeen ne punnittiin jälleen ilmassa ja vedessä. Rinnakkaisia mittauksia tehtiin kolme. Näytteiden tilavuuden muutos prosentteina voidaan laskea kaavalla 4

$$\Delta V\% = \frac{((M_3 - M_4) - (M_1 - M_2)) \times 100}{M_1 - M_2}, \quad (4)$$

jossa

M_1 on näytteen massa ilmassa ennen altistusta

M_2 on näytteen massa vedessä ennen altistusta

M_3 on näytteen massa ilmassa altistuksen jälkeen

M_4 on näytteen massa vedessä altistuksen jälkeen

7.5.7 DSC

Differentiaalinen pyyhkäisykalometria (Differential Scanning Calorimetry) eli DSC on terminen analyysimenetelmä. Sillä mitataan näytteeseen kulkevaa ja näytteestä poistuvaa lämpövirtaa, jonka perusteella voidaan selvittää lasinsiirtymä- ja sulamislämpötilaa, kiteisyyttä, koostumusta ja hapettumisilmiöitä. Kun materiaalia lämmitetään tai jäähdetetään, näkyvät materiaalissa tapahtuvat lämpökapasiteetin muutokset lämpövirrassa. Tapahtuvat reaktiot voivat olla joko endotermisiä, kuten sulaminen, tai eksotermisiä, kuten kiteytyminen. [60]

Taajuusmuuttajien muoveille ajettiin DSC LAMK:lla. DSC tehtiin rouheille. Pyyhkäisyvälinä kaikille materiaaleille käytettiin $-60-300$ °C. Tuloksina saatiin kuvaajat lämpövirrasta lämpötilan funktiona. Kuvaajista kullekin materiaalille voitiin määrittää lasinsiirtymälämpötila sekä osakiteiselle polyamidille myös sulamislämpötila.

7.5.8 Reologiamittaukset

Polymeerisulien reologisia ominaisuuksia eli virtausominaisuuksia voidaan tutkia erilaisilla mittausrakenteilla, joista tässä työssä käytettiin kapillaarireometriä sekä sulaindeksilaitetta.

Materiaalin sulaindeksi (MI, melt index) voidaan määrittää sulaindeksilaitteella. Sulaindeksi kertoo, kuinka paljon materiaalia grammoina tulee ulos kapillaarista 10 minuutin aikana. Sulaindeksi on käänteinen arvo materiaalin leikkausviskositeetille. Sulaindeksi kertoo kuitenkin leikkausviskositeetin arvon vain yhdessä leikkausnopeuspisteessä, joka määräytyy käytetystä painosta sekä kapillaarin halkaisijasta ja pituudesta. [61]

Sulaindeksiä mitattaessa materiaali laitetaan sulaindeksilaitteen sylinteriin, joka on lämmitetty haluttuun lämpötilaan. Kun materiaali on sulanut, asetetaan sylinteriin määntä, jonka päällä on tietynkokoinen paino. Sylinterin toisessa päässä on kapillaari, jonka reiän läpi paino puristaa sulan. [61]

Kapillaarireometrillä voidaan mitata materiaalin leikkausviskositeettia korkeilla leikkausnopeuksilla, joten sillä saadaan hyvin prosessointiolosuhteita vastaavaa tietoa. Mitattava materiaali laitetaan sylinteriin, jossa sen annetaan sulaa ja saavuttaa tasainen lämpötila. Sen jälkeen materiaalia työnnetään kapillaarin läpi männällä, jota säädellään joko hydraulisesti tai mekaanisesti. Kapillaarin yli syntyvä painehäviö määritetään mittaamalla sylinterissä vallitseva paine paineanturilla. Kun tiettyä leikkausnopeutta eli vastaavaa männännopeutta vastaava paine on tasoittunut, voidaan siirtyä mittaamaan seuraavaa pistettä muuttamalla männännopeutta. [61, 62]

Taajuusmuuttajien muoveille tehtiin reologiamittaukset Göttert Rheograph 6000 kapillaarireometrillä. Mittaukset suoritettiin leikkausnopeuksilla 10–10 000 1/s kolmessa eri lämpötilassa. Lämpötilat olivat ruiskuvalulämpötila sekä ruiskuvalulämpötila ± 20 °C. Sulaindeksi määritettiin standardin ISO 1133 menetelmän B mukaisesti tilavuusvirtana (MVR). Massavirta (MFR) määritettiin punnitsemalla mittauksessa syntynyt ekstrudaatti.

Myös termoelastien reologiamittaukset tehtiin Göttert Rheograph 6000 kapillaarireometrillä. Mittaukset tehtiin kolmessa eri lämpötilassa (ruiskuvalulämpötila ± 20 °C) leikkausnopeuksilla 100–1000 1/s.

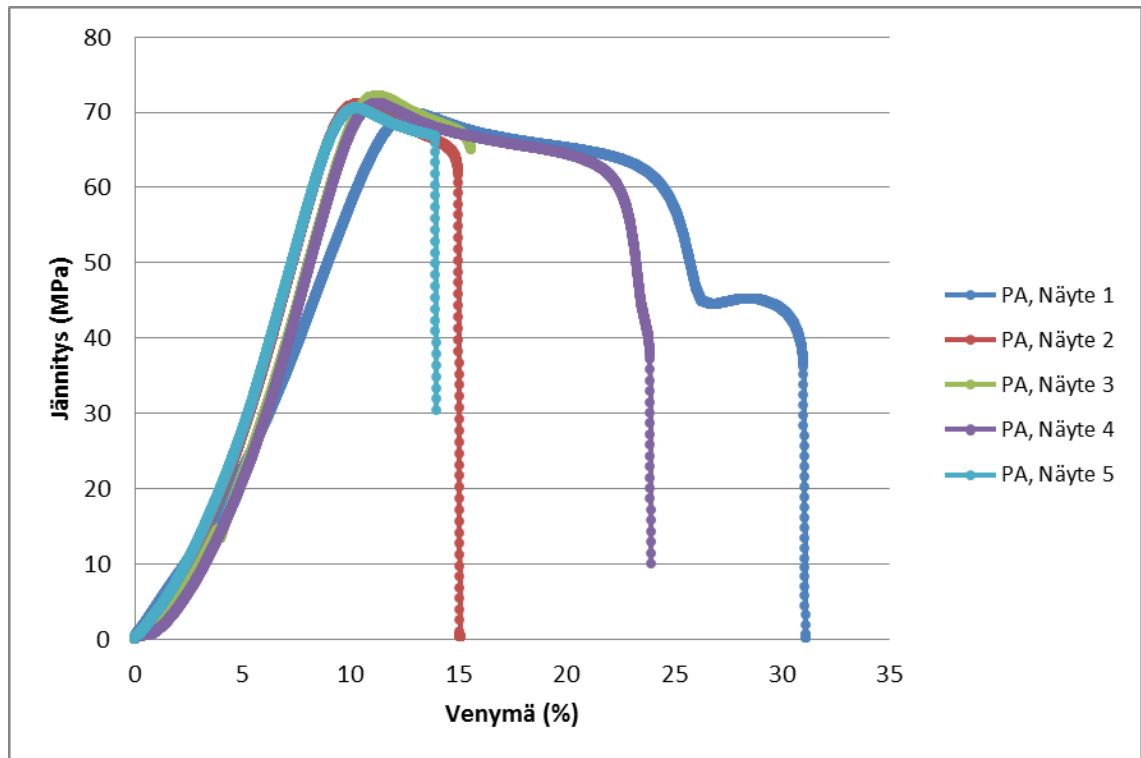
8 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

8.1 Taajuusmuuttajien muovit

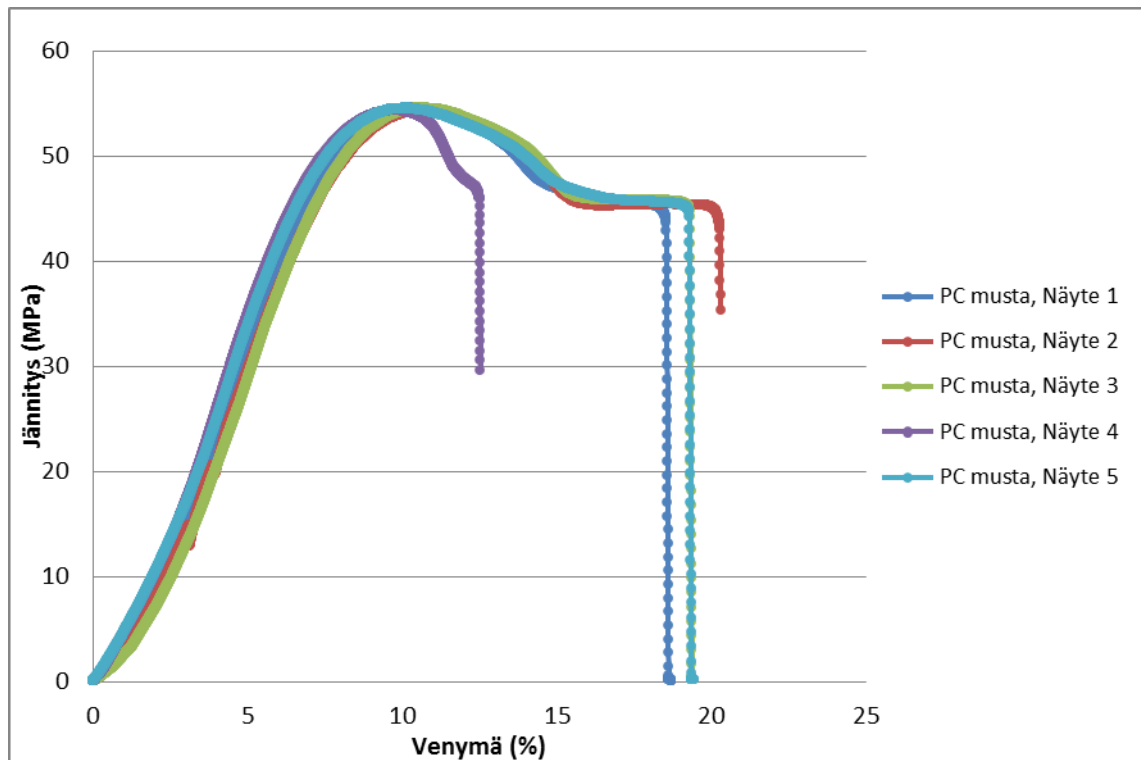
Seuraavissa alaluvuissa on esitelty taajuusmuuttajien muoveille tehtyjen testausten tuloksia. Lopuksi niitä on myös vertailu neitseellisiin materiaaleihin ja pohdittu käytön ja kierrätyksen vaikutuksia muovien ominaisuuksiin ja pohdittu mahdollisuuksia parantaa ominaisuuksia.

8.1.1 Vetokoe

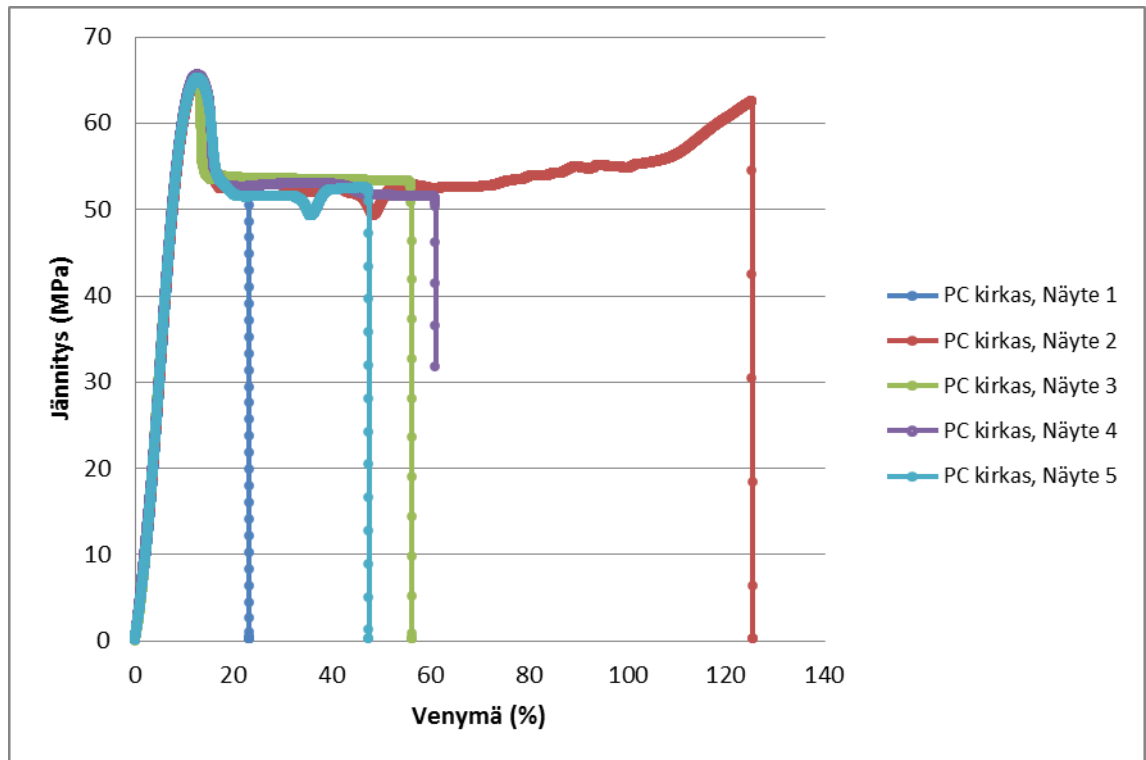
Vetokokeiden tuloksissa hajonta oli suurta erityisesti modulien osalta. Hajontaan vaikutti mahdollisesti koekappaleiden päädyissä olevat ulostyöntötapeista syntyneet kohoumat, joiden takia koekappale luisti kiinnitysleuoissa, ennekuin kohoumat ovat puristuneet kasaan, mistä johtuen jännitys-venymäpiirrokset lähtevät loivaan nousuun ja suoristuvat vasta noin 3-4 % venymän kohdalla. Lisäksi moduleiden hajontaan vaikuttaa myös vetonopeus, joka oli koko ajan 50 mm/min. Moduleiden määrittämiseen sopisi parhaimminkin pieni vetonopeus. Materiaalien jännitys-venymäpiirrokset on esitetty kuvissa 16–21. Yhdessä kuvaajassa on viiden rinnakkaisten vetokokeen tulokset yhdelle materiaalille.



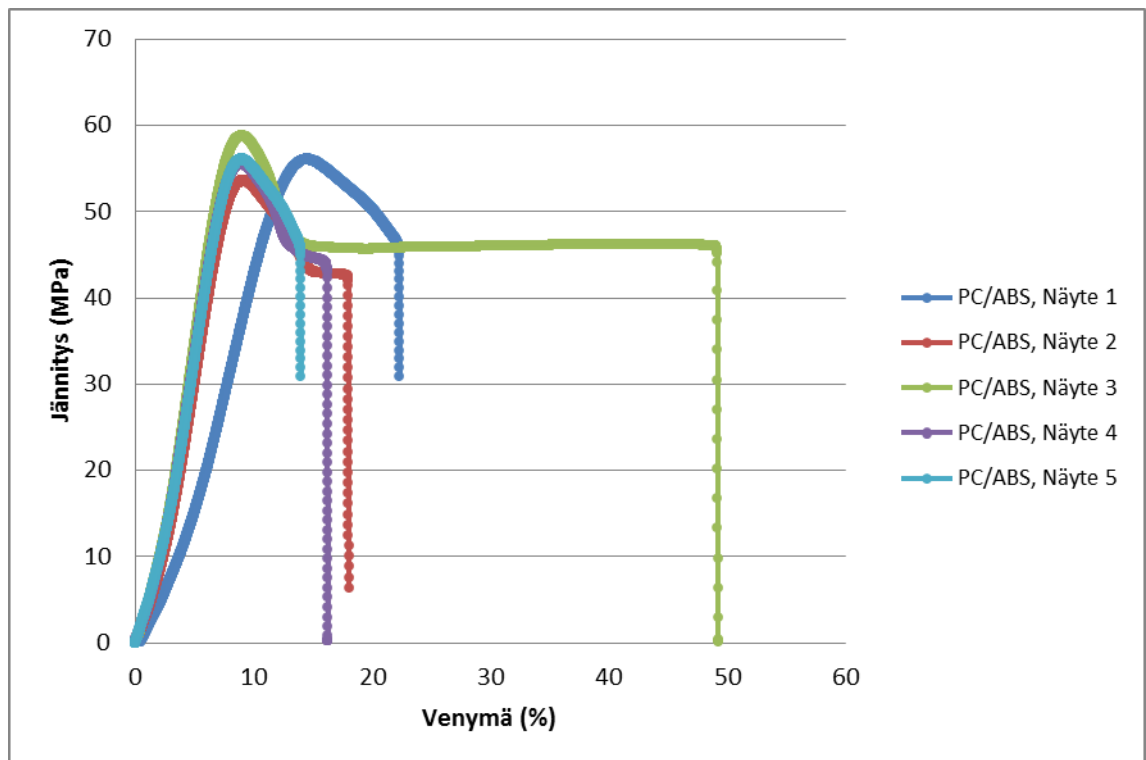
Kuva 16. Polyamidin jännitys-venymäpiirros



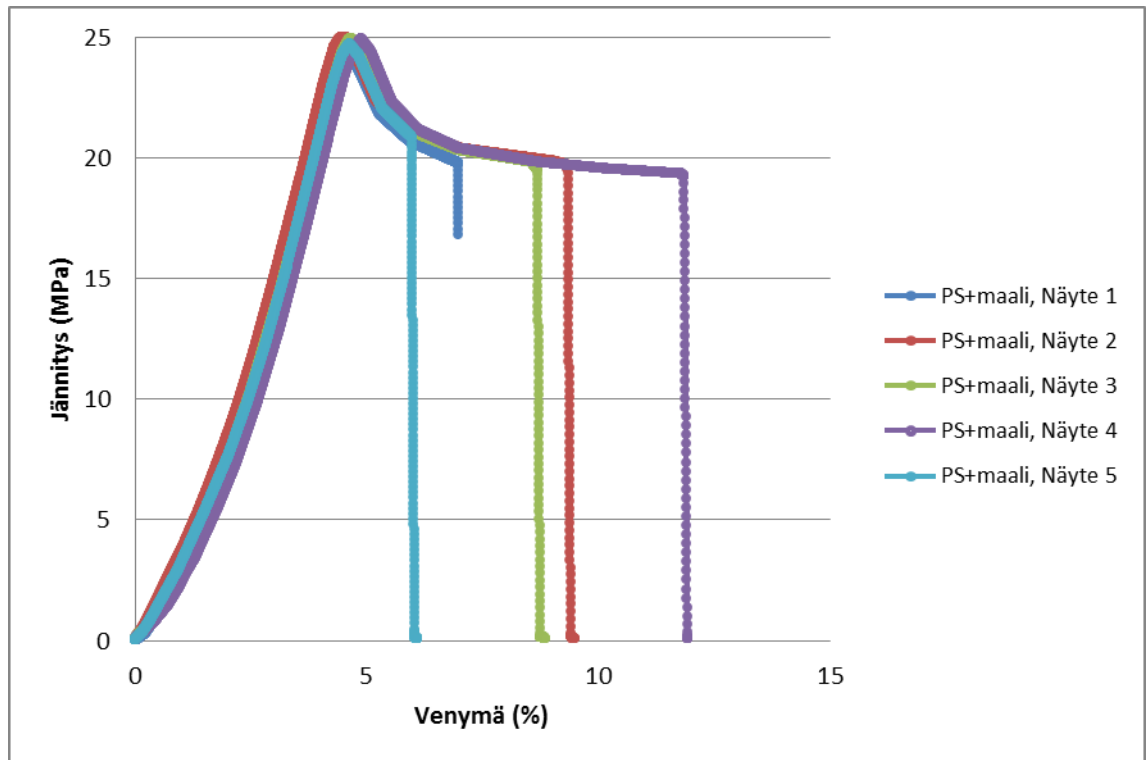
Kuva 17. Mustan polykarbonaatin jännitys-venymäpiirros



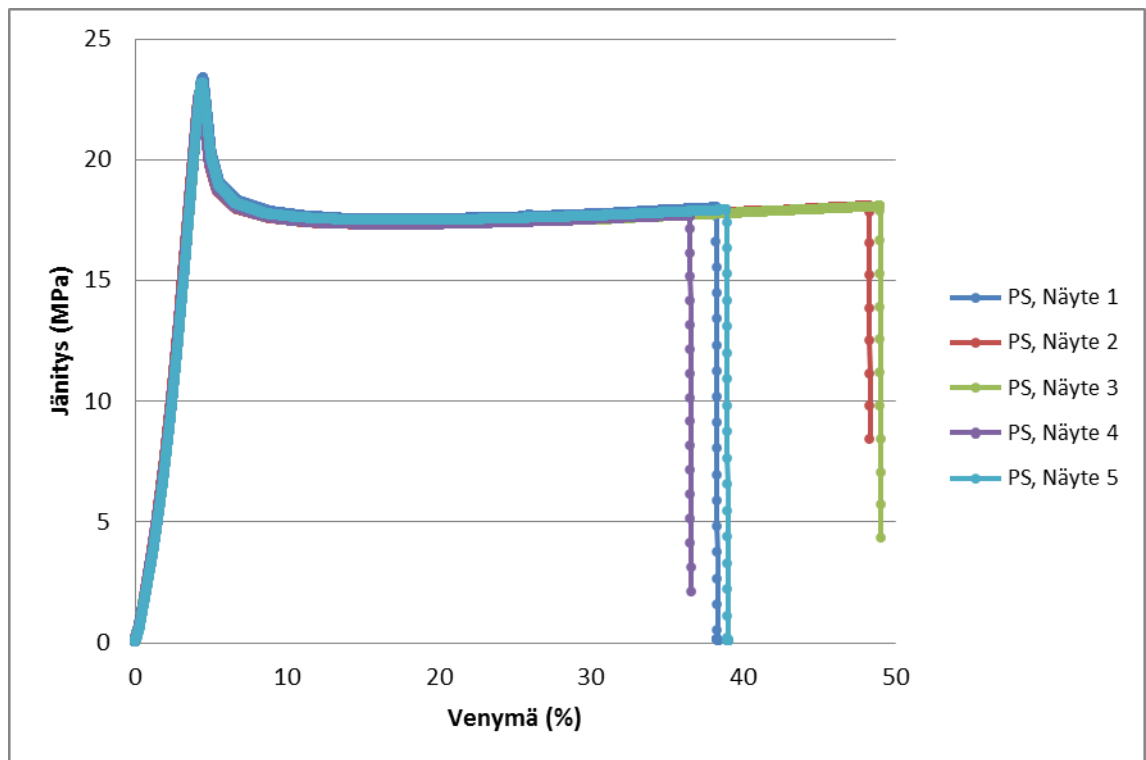
Kuva 18. Kirkkaan polykarbonaatin jännitys-venymäpiirros.



Kuva 19. Polykarbonaatti/akryliniitriilibutadienistyreenin jännitys-venymäpiirros



Kuva 20. Maalattun polystyreenin jännitys-venymäpiirros



Kuva 21. Polystyreenin jännitys-venymäpiirros

Kuvaajista nähdään, että hajontaa koekappaleiden välillä on erityisesti murtovenymässä. PC/ABS:n ja PC kirkkaan kohdalla erityisen suurta keskihajontaa murtovenymässä aiheuttavat yhdet koekappaleet, jotka kuroutuivat ja venyivät huomattavasti enemmän kuin muut neljä koekappaletta. PC/ABS:llä esiintyy eroja myös näytteiden myötökäyt-

täytymisessä. Hajonnat voivat olla seurausta esimerkiksi koekappaleiden epähomogeenisyydestä. Vetokokeiden perusteella määritetyt vetomodulit, myötö- ja murtolujuudet, myötö- ja murtovenymät on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Vetokokeiden tuloksia

Näyte	Vetomoduli (MPa)		Myötölujuus (MPa)		Myötövenymä (%)		Murtolujuus (MPa)		Murtovenymä (%)	
	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.	ka.	kh.
1. PA	991.7	124.62	70.96	0.86	11.13	1.07	58.51	11.45	19.60	7.26
2. PC musta	938.5	101.45	54.48	0.13	10.34	0.25	45.42	0.95	17.89	3.13
3. PC kirkas	810.5	14.89	65.28	0.25	12.53	0.02	54.34	4.59	62.54	37.97
4. PC/ABS	939.5	44.00	56.64	2.30	8.99	0.10	44.55	1.61	23.80	14.44
5. PS+maali	786.7	14.39	24.83	0.23	3.72	0.12	19.97	0.64	8.46	2.28
6. PS	757.4	12.37	23.00	0.28	4.65	0.15	17.94	0.18	42.21	5.97

Maalattun polystyreenin myötövenymä ja erityisesti murtovenymä ovat huomattavasti alhaisempia verrattuna maalaamattomaan. Maalattun polystyreenin pieni murtovenymä viittaa sen haurauteen, josta voidaan päätellä, että maalipartikkelit toimivat murtuman ydintäjinä ja helpottavat murtuman etenemistä materiaalissa.

8.1.2 Iskukoe

Iskukokeet tehtiin lovetuille koekappaleille huoneenlämpötilassa ja loveamattomat koekappaleet jäähdytettiin -25 °C:ssa, mutta varsinainen iskukoe tehtiin huoneenlämmössä. Kaikki lovetut koekappaleet murtuivat. Kaikki muut koekappaleet murtuivat täysin, paitsi neljä kymmenestä PC/ABS-koekappaleesta murtuivat saranamekanismilla (H), joka tosin standardin mukaan luetaan myös kokonaan murtuneiden luokkaan (C). Loveamattomista jäähdytetyistä murtuivat PA sekä PS ja PS+maali. PC musta ja kirkas sekä PC/ABS eivät murtuneet (N, no break).

Iskukokeiden kymmenen rinnakkaisen mittauksen keskiarvot keskihajontoineen on esitetty taulukoissa 8 ja 9. Mittauspöytäkirja on liitteessä 3.

Taulukko 8. Loveamaton iskukoe, jäähdytetty -25 °C

Näyte	Iskulujuus ka. (kJ/m ²)	kh.	Murtumatyyppi
1. PA	52.02	18.39	C
2. PC musta	127.04	0.49	N
3. PC kirkas	128.43	0.55	N
4. PC/ABS	126.71	0.64	N
5. PS+maali	9.86	1.53	C
6. PS	38.79	3.72	C

Taulukko 9. Lovettu iskukoe +23 °C

Näyte	Iskulujuus ka. (kJ/m ²)	kh.	Murtumatyyppi
1. PA	3.87	0.41	C
2. PC musta	8.97	0.57	C
3. PC kirkas	7.77	0.44	C
4. PC/ABS	19.26	6.76	C
5. PS+maali	2.10	0.31	C
6. PS	5.87	0.11	C

Jos verrataan PS:n ja maalatun PS:n iskulujuuksia, huomataan maalaamattoman PS:n iskulujuuksien olevan moninkertaiset molemmissa testeissä. Maalatun PS:n murto-venymä suhteessa PS:n viittaa maalista johtuvaan haurauteen, jolloin on loogista, että myös iskulujuudet ovat matalampia.

8.1.3 Kovuus

Taulukossa 10 on esitetty materiaalien Shore D/15-kovuudet keskihajontoineen eli durometrin lukema 15 sekunnin päästä kärjen painamisesta. Mittauspöytäkirjat ovat liitteessä 4.

Taulukko 10. Shore D/15-kovuudet keskihajontoineen

Näyte	ka., Shore D/15	kh.
1. PA	76.2	0.84
2. PC musta	81.0	0.71
3. PC kirkas	81.8	0.84
4. PC/ABS	77.4	1.14
5. PS+maali	76.0	1.23
6. PS	75.0	1.14

8.1.4 Tiheys

Taulukossa 11 on esitetty materiaalien tiheydet keskihajontoineen.

Taulukko 11. Materiaalien tiheydet keskihajontoineen

Näyte	ka., Tiheys (g/cm ³)	kh.
1. PA	1.132	0.001
2. PC musta	1.257	0.003
3. PC kirkas	1.282	0.001
4. PC/ABS	1.192	0.000
5. PS+maali	1.194	0.001
6. PS	1.184	0.001

Maalattulla PS:llä on suurempi tiheys kuin maalaamattomalla eli maalipartikkelit nostavat tiheyttä eli niillä on suurempi tiheys kuin polystyreenillä

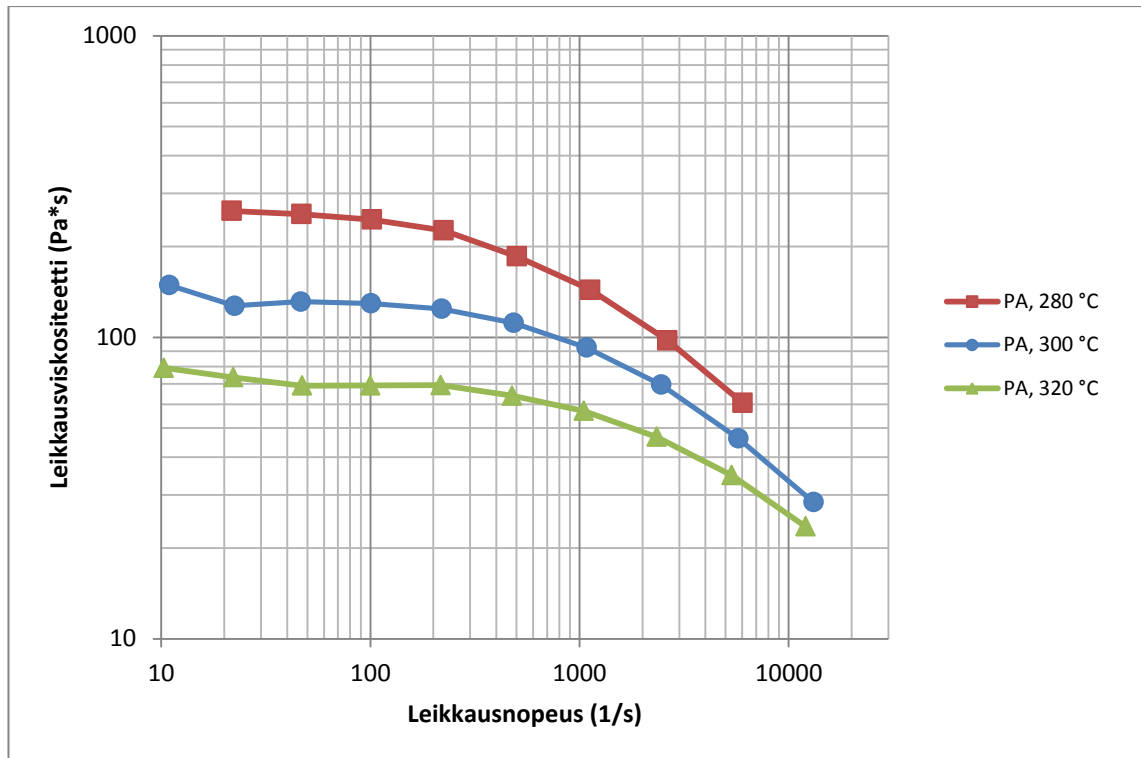
8.1.5 Reologiamittaukset

Taulukossa 12 on esitetty materiaalien sulatilavuus- ja massavirrat sekä mittausparametrit. Sulatilavuusvirrat ovat kymmenen mittauksen keskiarvoja. Mittauspöytäkirja on liitteessä 4.

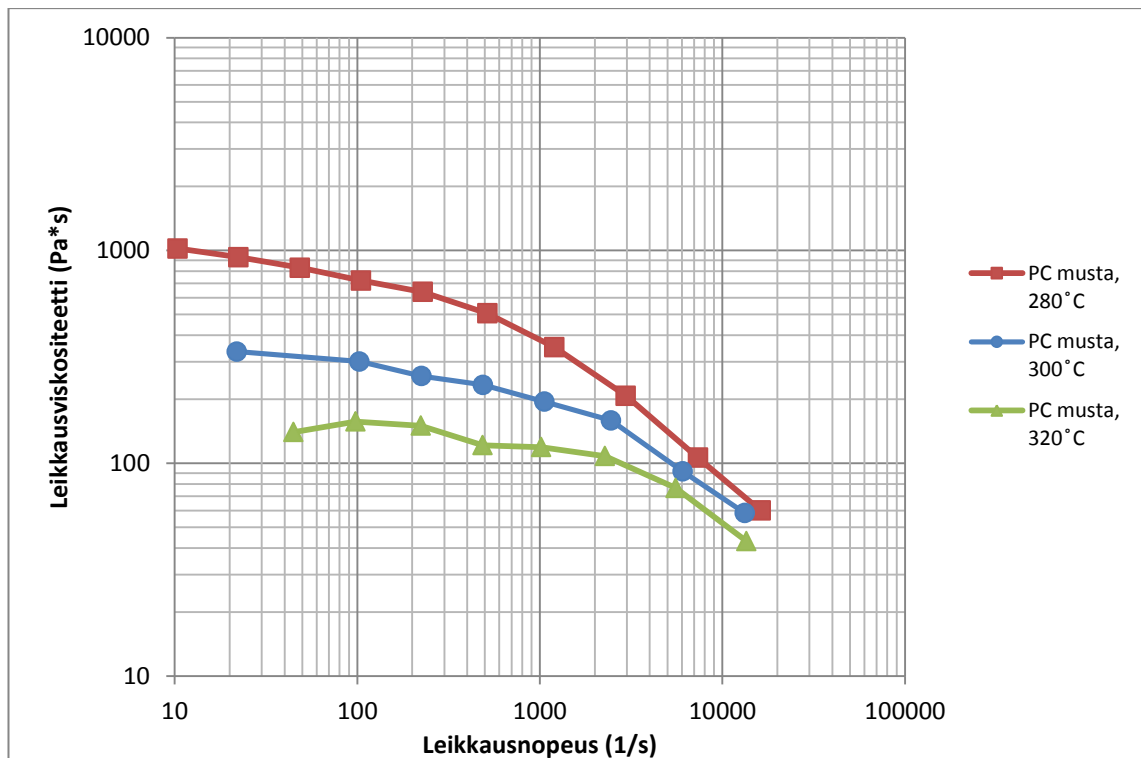
Taulukko 12. Materiaalien tilavuusvirrat keskihajontoineen ja niistä lasketut massavirrat

Näyte	MVR (cm ³ /10 min)	kh.	MFR (g/10 min)	Parametrit
1. PA	45.5	0.430	45.2	230 °C / 2,16 kg
2. PC musta	23.2	0.260	25.9	300 °C / 1,2 kg
3. PC kirkas	15.1	0.180	17.3	300 °C / 1,2 kg
4. PC/ABS	17.1	0.499	18.7	250 °C / 2,16 kg
5. PS + maali	12.3	0.313	13.6	200 °C / 5 kg
6. PS	13.1	0.629	16.8	200 °C / 5 kg

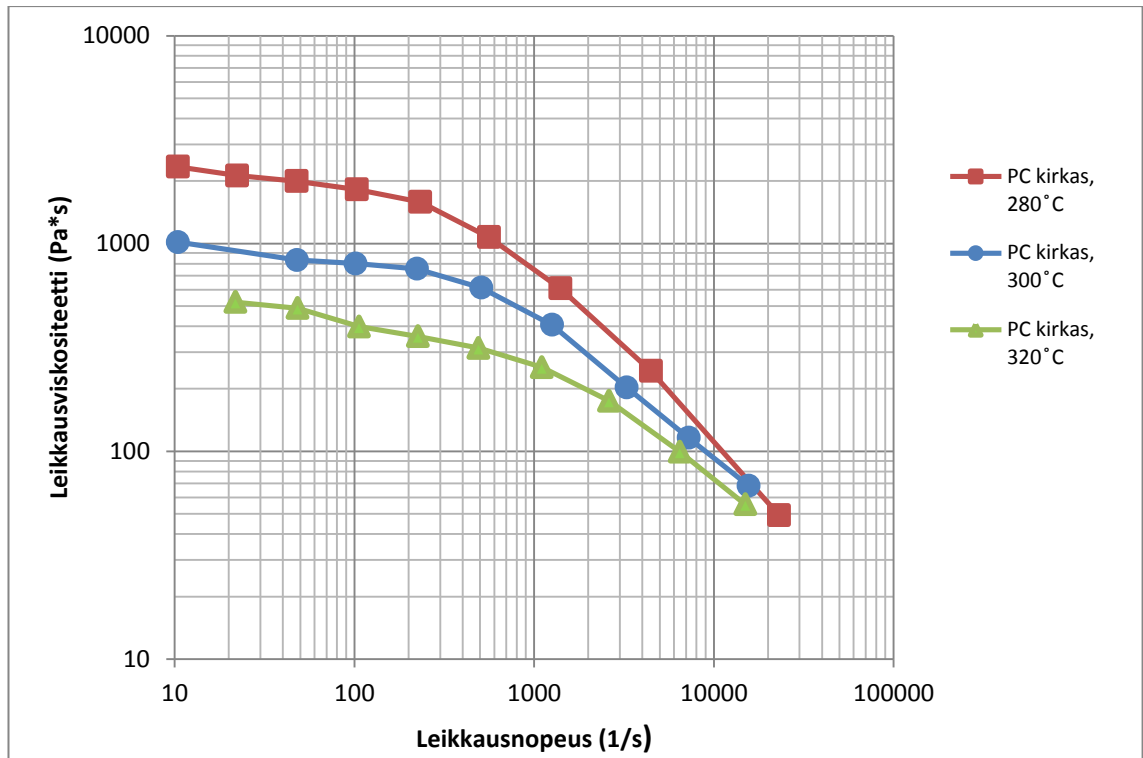
Kuvissa 22–27 on esitetty materiaalien viskositeetit leikkausnopeuden funktiona kolmessa eri lämpötilassa. Molemmat akselit ovat logaritmisia. Mittauslämpötilat ovat kunkin materiaalin ruiskuvalulämpötila sekä sitä 20 °C suurempi ja pienempi lämpötila. Kuvaajien arvot ovat Rabinowitsch-korjauksella korjattuja arvoja.



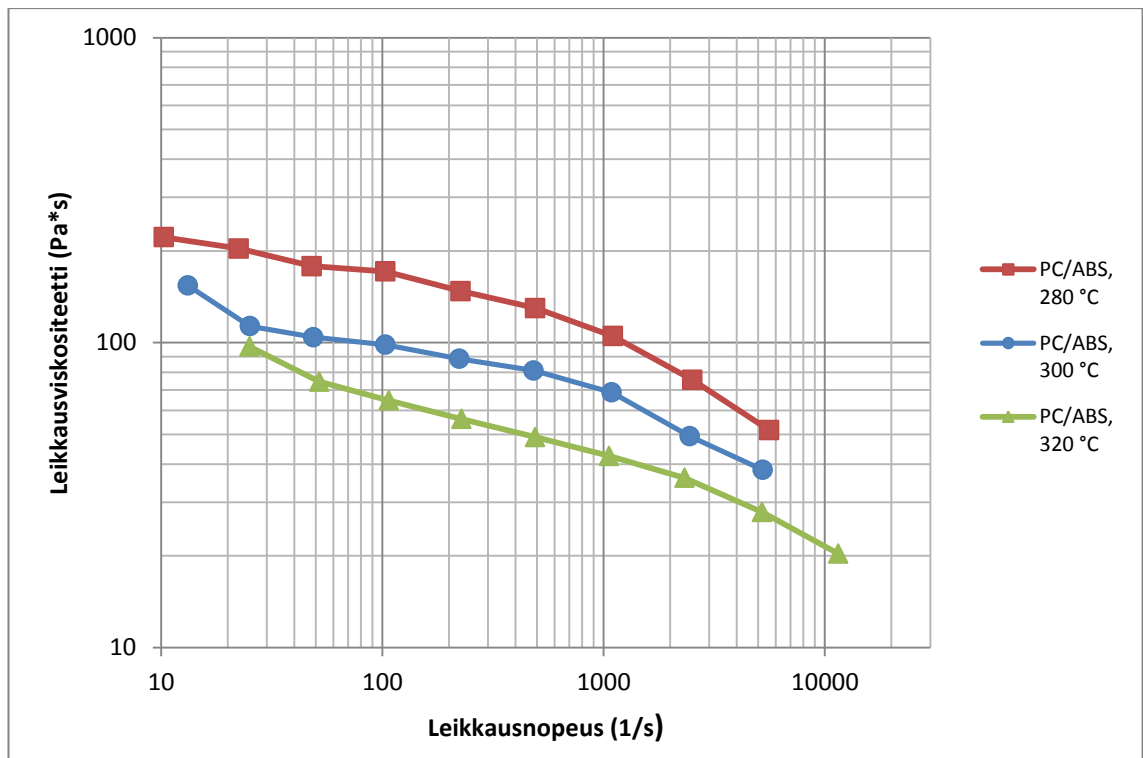
Kuva 22. Polyamidin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



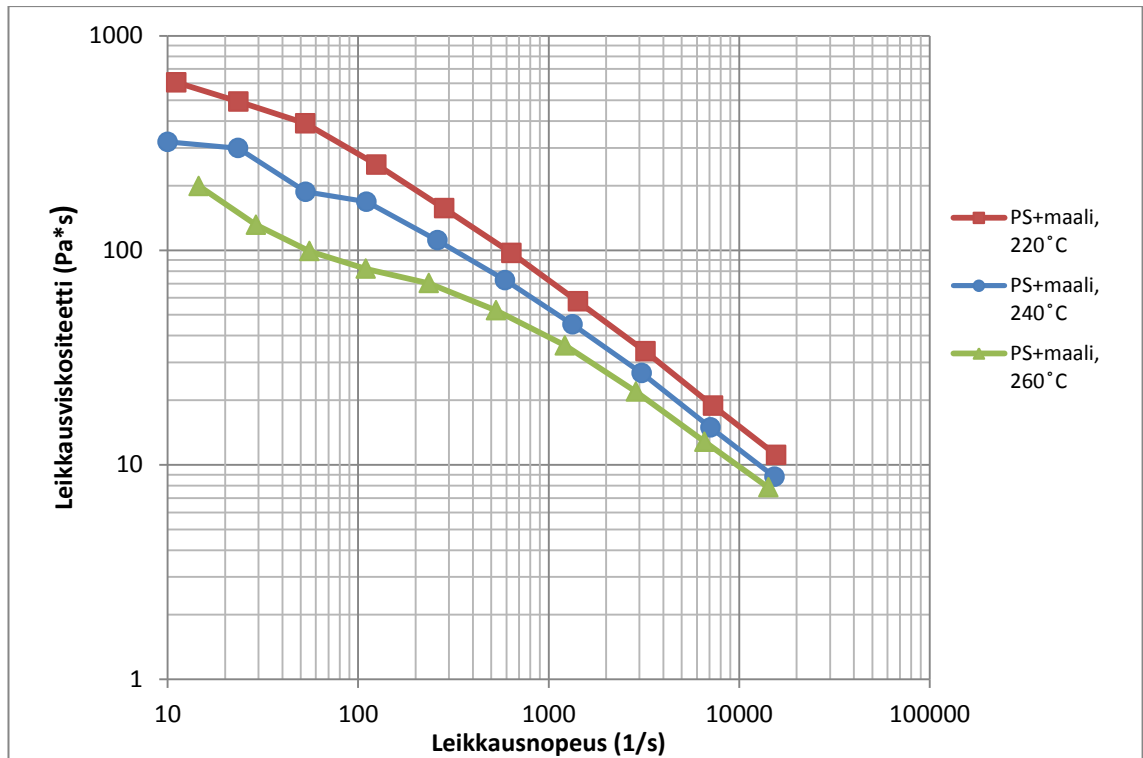
Kuva 23. Mustan polykarbonaatin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



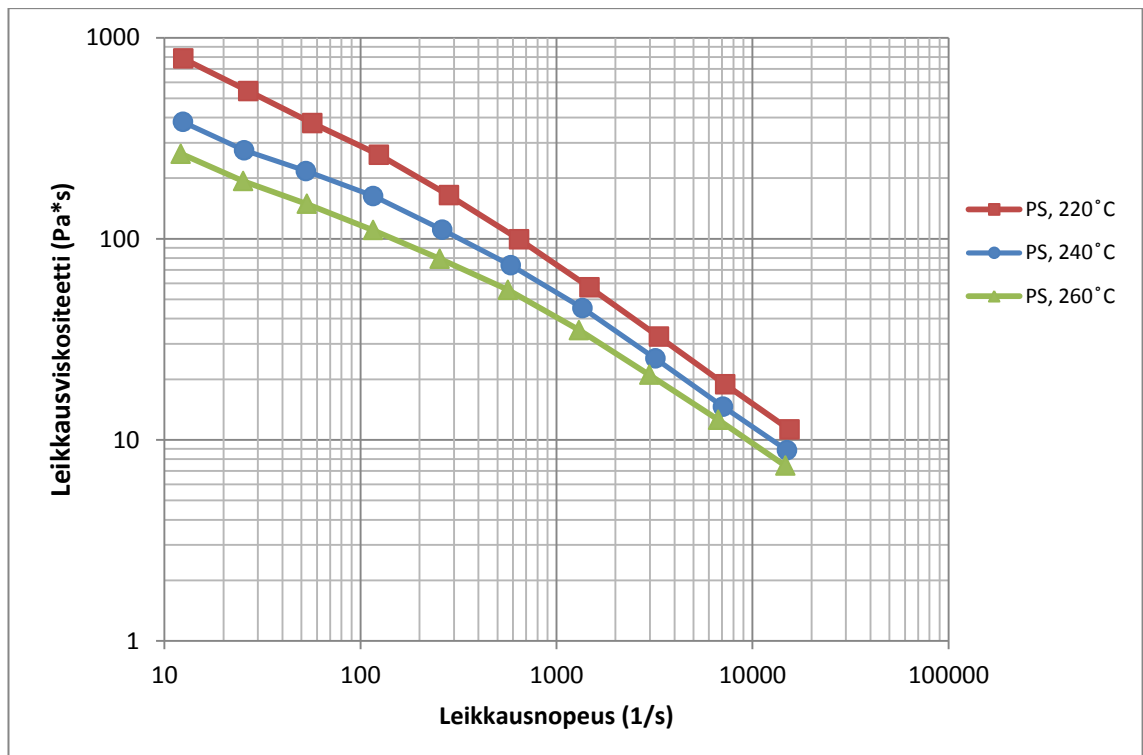
Kuva 24. Kirkkaan polykarbonaatin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 25. Polykarbonaatti/akryliniitrilibutadienistyreenin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 26. Maalattun polystyreenin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 27. Polystyreenin leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona

Polymeerisulien käyttäytyminen on leikkausohenevaa eli leikkausviskositeetti laskee leikkausnopeuden kasvaessa. Korkeimmat mitatut leikkausnopeudet vastaavat prosessointiolosuhteita. Viskositeetti on lämpötilariippuvainen suure, kuten kuvaajista huomataan mitä korkeampi lämpötila on, sitä alempi on viskositeetti.

Kuvaajista huomataan myös, että näytteiden käyttäytyminen ei ole kovin tasaista. Osa näytteistä oli haastavia mitattavia, joka viittaa kierrätysmuovien epähomogeenisuuteen. Reologiakäyrät ovat tasaisimpia polystyreenillä.

Korkein sulaindeksi on mitattu polyamidille. Kun katsotaan polyamidin reologiakäyriä ja verrataan muihin materiaaleihin, niin huomataan, että myös viskositeetin arvot ovat selkeästi alimmat. Yllättävän alhaiset viskositeetin arvot ovat PC/ABS:llä (20–220 Pa*s). Esimerkiksi mustan polykarbonaatin sulaindeksi on korkeampi kuin PC/ABS:n, joten olisi voinut olettaa sen viskositeettien olevan myös alemmat. PC/ABS:n sulaindeksimittaus on tehty 250 °C:ssa, kun taas sen viskositeettimittaukset on tehty korkeammissa lämpötiloissa 280–320 °C:ssa. Kun tiedetään viskositeetin laskevan lämpötilan noustessa, voidaan tällä selittää eroa sulaindeksin ja viskositeetin välillä.

8.1.6 Palonkesto

Palonkestotesteissä UL-94 palonkestoluokka saatiin määritettyä muille materiaaleille paitsi polyamidille. Polyamidin palonkestoluokkaa ei saatu määritettyä, koska se tiputti palavaa materiaalia sytyttäen alla olevan pumpulin ja samalla sammuttaen näytteen. Taulukossa 13 on esitetty materiaalien palonkestoluokat. Mittauspöytäkirja on liitteessä 5.

Taulukko 13. Materiaalien paloluokitukset

Materiaali	Paloluokitus
1. PA	ei luokitusta
2. PC musta	V-0
3. PC kirkas	V-0
4. PC/ABS	V-1
5. PS+maali	V-0
6. PS	V-0

Polykarbonaatit ja polystyreenit kuuluivat edelleen parhaaseen palonkestoluokkaan V-0. PC/ABS:n palonkestoluokka on tippunut V-1:een kun neutseelliselle materiaalille se on tyypillisesti V-0. Kokonaisliekehtimisaika PC/ABS-näytteille oli 55 s ja uunitetuille näytteille 65 s. V-0 luokassa viiden näytteen kokonaisliekehtimisaika saa olla korkeintaan 50 s. Lisäksi useiden yksittäisten näytteiden liekehtimisaika ylitti 10 s, ja V-0 luokassa se saa olla korkeintaan 10 s.

PC/ABS:n heikentyneestä palonkestoluokasta voidaan päätellä, että sen lisäaineistus ainakin palonestoaineiden osalta on heikentynyt käytön ja kierrätyksen vaikutuksesta. Sähkö- ja elektroniikkateollisuuden sovelluksissa hyvä palonkesto on erittäin tärkeä. Jos

PC/ABS:ää käytettäisiin jatkossakin sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa, vaatisi se uutta lisääineistusta.

8.1.7 DSC

Taulukossa 14 on esitetty materiaalien DSC:llä määritetyt lasisiirtymä- ja sulamislämpötilat. Ainoastaan polyamidilla on sulamislämpötila, koska muut materiaalit ovat amorffisia muoveja. PC/ABS:llä on kaksi lasittumislämpötilaa, joista matalampi on akryylinitriilibutadieenistyreenin ja korkeampi polykarbonaatin. Materiaalin DSC-kuvaajat ovat liitteessä 6.

Taulukko 14. DSC:llä määritetyt lasisiirtymä- ja sulamislämpötilat

Näyte	T _g (°C)	T _m (°C)
1. PA	52.75	218.91
2. PC musta	147.13	
3. PC kirkas	151.86	
4. PC/ABS	113.27, 168.86	
5. PS+maali	89.38	
6. PS	92.02	

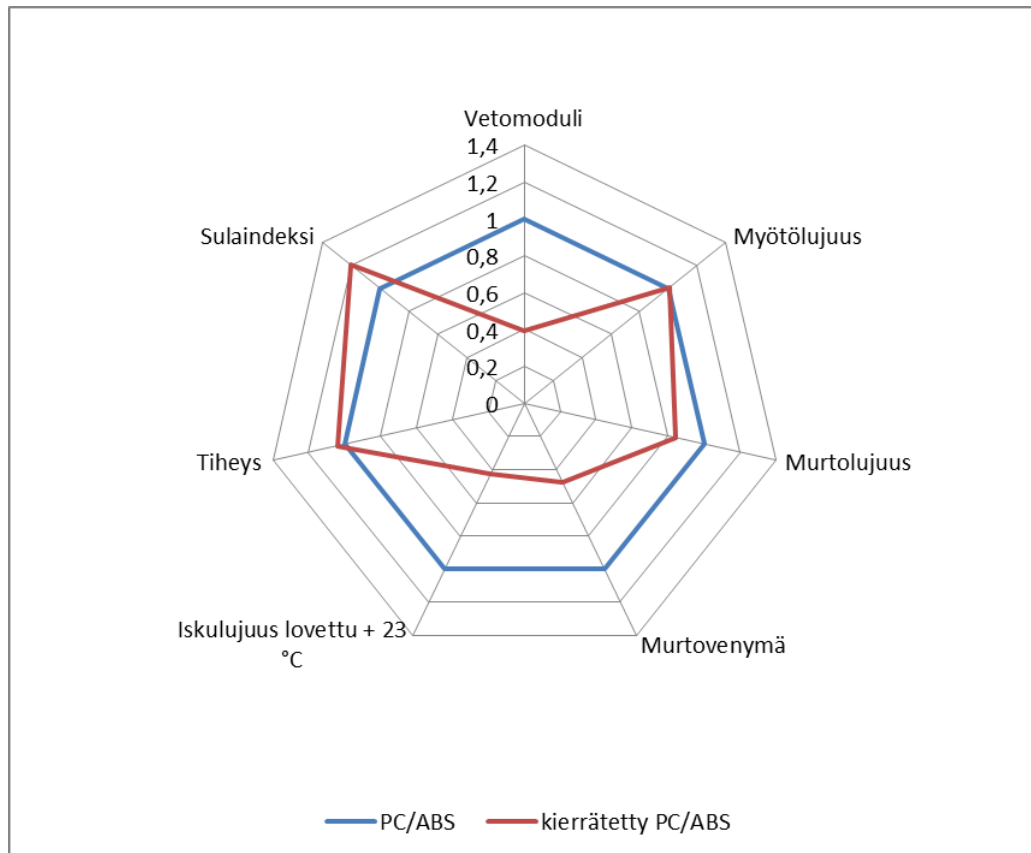
8.1.8 Vertailu neutseellisiin materiaaleihin

Jotta saadaan konkreettista tietoa käytön ja kierrätyksen aikaisista vaikutuksista materiaaleihin, vertaillaan niiden ominaisuuksia neutseellisten materiaalien vastaaviin. Ominaisuuksien muutosten perusteella voidaan pohtia kierrätysmateriaalille mahdollisia uusia käyttökohteita, jos ominaisuudet eivät ole enää riittävät alkuperäiseen käyttökohteeseen. PC/ABS-kotelot ovat olleet käytössä 2–7 vuotta ja PS-kotelot 11–17 vuotta, joten oletettavasti ominaisuuksien heikkenemistä on tapahtunut. Muiden materiaalien käyttöiästä ei ole varmaa tietoa, mutta niiden voidaan olettaa olleen noin yhtä kauan käytössä kuin koteloiden. Koteloiden käyttöiän perusteella on mahdollista, että niissä on käytetty nykyisin kiellettyjä halogenoituja palonestoaineita, joiden kierrättäminen ei ole sallittua. Jos taajuusmuuttajien muoviosia alettaisiin kierrättää, olisi selvitettävä mitä palonestoaineita ne sisältävät.

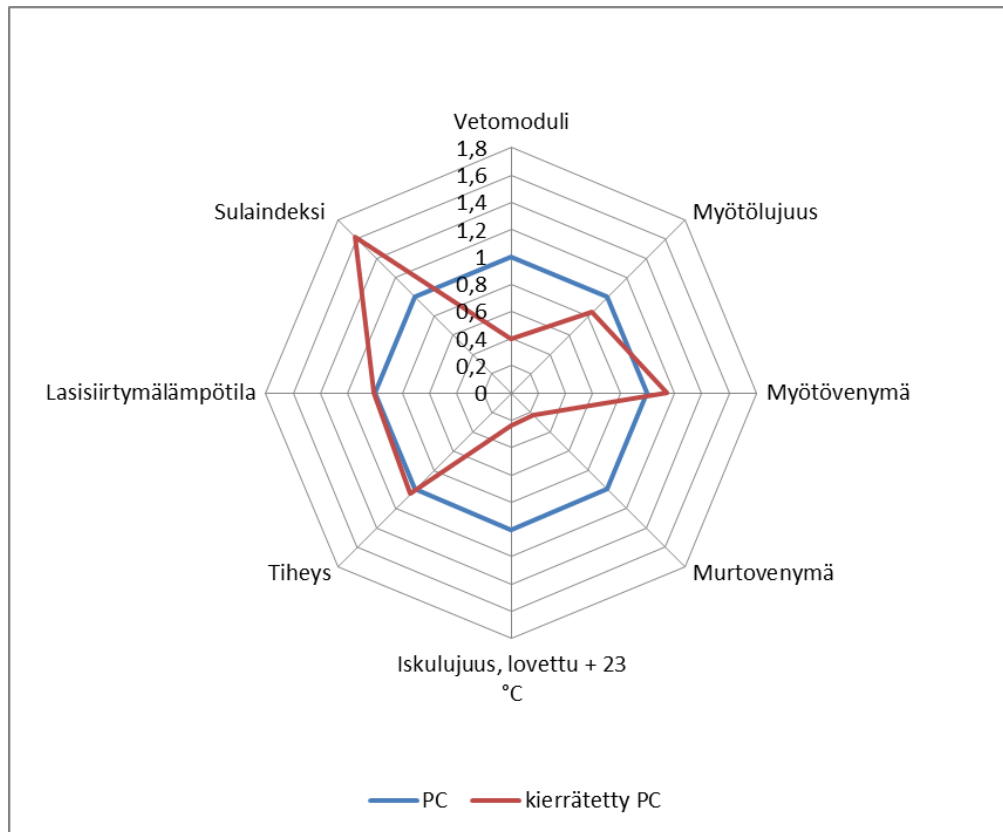
PC/ABS:n kohdalla oli saatavilla materiaalidatatietaa taajuusmuuttajissa käytetyistä kauppalajikkeista. Vertailuarvoina on käytetty näiden keskimääräisiä materiaaliominaisuuksien arvoja. Muista materiaaleista ei ollut saatavilla alkuperäisten materiaalien tietoja, joten vertailuarvoina on käytetty keskimääräisiä kirjallisuusarvoja [63, 64, 65].

Seuraavissa kuvissa 28–33 on vertailtu kierrätetyn materiaalin eri materiaaliominaisuuksia suhteessa neutseellisen materiaalin vastaaviin ominaisuuksiin. Vertailumateriaalien materiaaliominaisuuksien arvoille on annettu suhdeluku yksi, joihin verrataan kier-

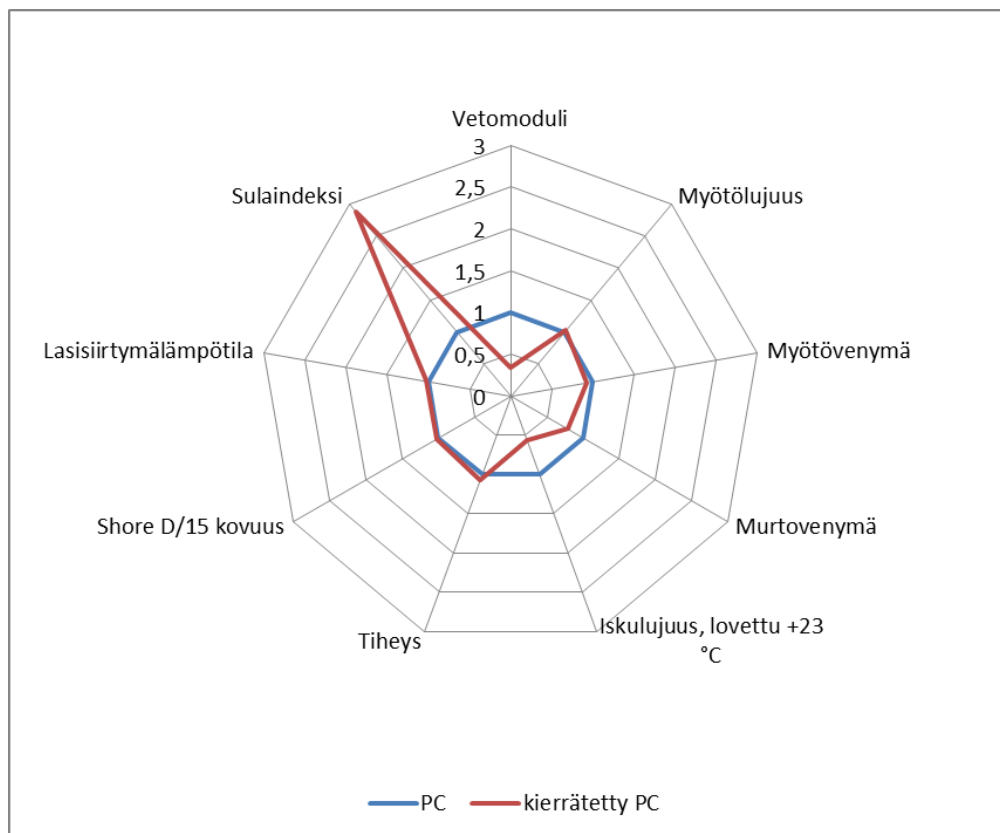
rätysmateriaalien materiaaliominaisuuksien arvoja. Kierrätysmateriaalin ominaisuuden arvo on siis prosentuaalinen osuus neitseellisen materiaalin ominaisuudesta arvosta.



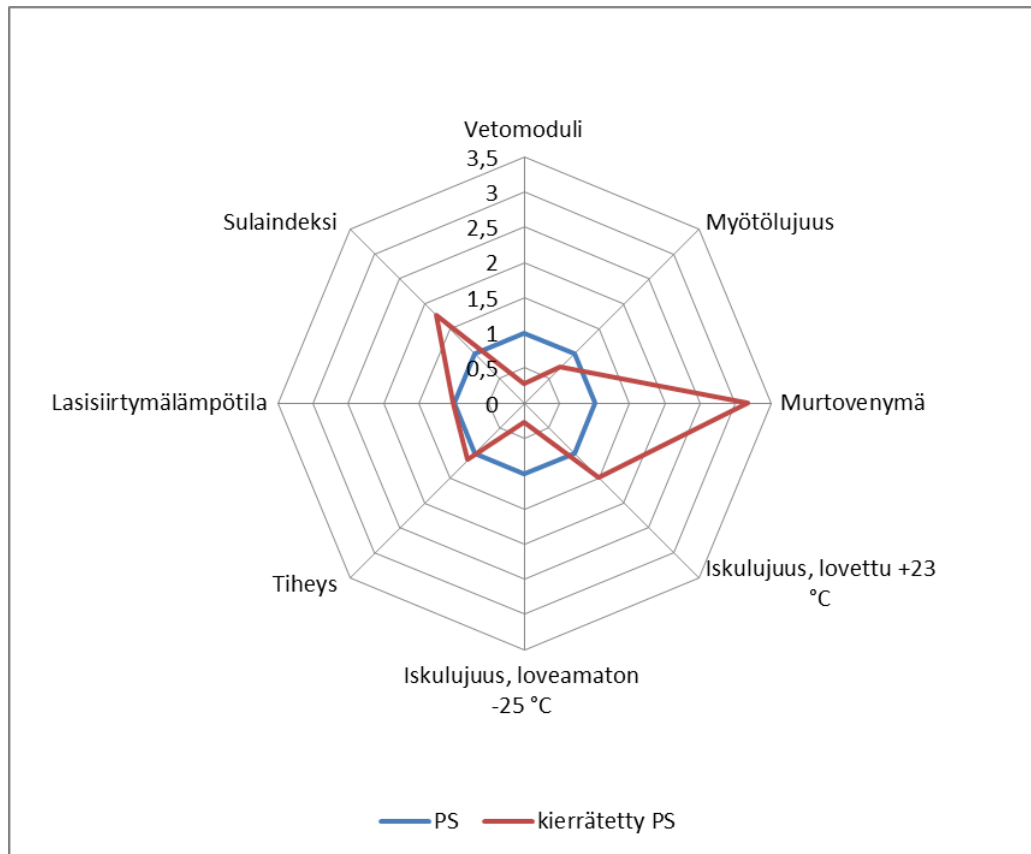
Kuva 28. Kierrätetyn PC/ABS:n ominaisuuksien vertailu neitseellisiin ominaisuuksiin (Lupoy GN5001R/GN5001RFH, Bayblend T65, CYCOLOY Resin C1200HF/C2950, Polyblend 45FS)



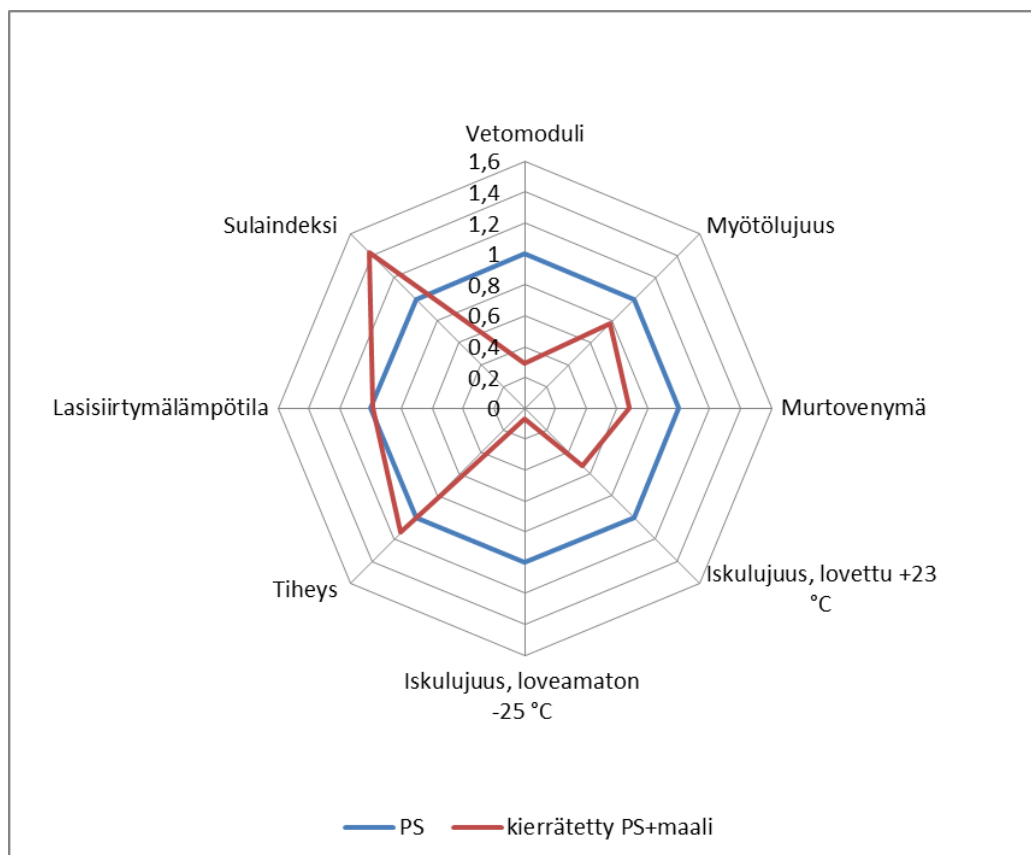
Kuva 29. Kierrätetyn mustan PC:n ominaisuuksien vertailu neitseellisen ominaisuuksiin [63]



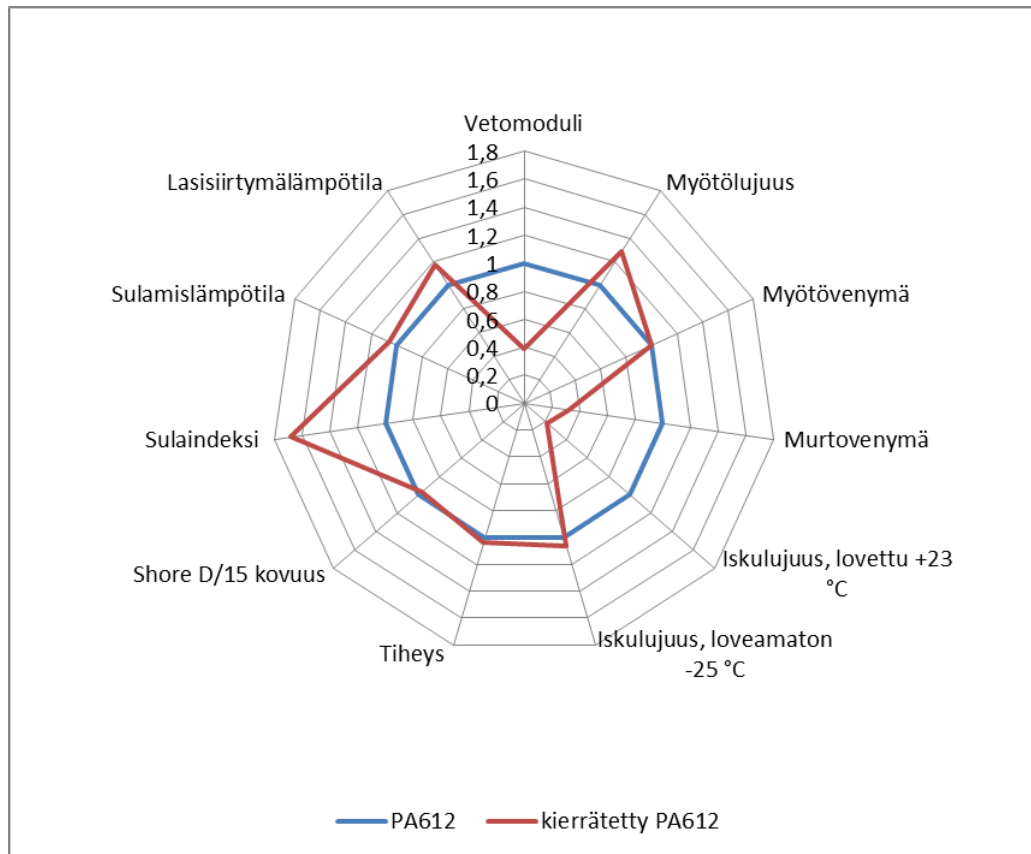
Kuva 30. Kierrätetyn kirkkaan PC:n ominaisuuksien vertailu neitseellisen ominaisuuksiin [64]



Kuva 31. Kierrätetyn PS:n ominaisuuksien vertailu neitseellisen ominaisuuksiin [65]



Kuva 32. Kierrätetyn maalatun PS:n ominaisuuksien vertailu neitseellisen PS:n ominaisuuksiin [65]



Kuva 33. Kierrätetyn PA:n ominaisuuksien vertailu neitseelliseen [66]

Kaikille kierrätysmateriaaleille yhteistä on matalampi vetokimmokerroin verrattuna vertailumateriaaleihin. Myös iskulujuus ja murtovenymä ovat matalampia kaikilla muilla paitsi PS:llä. Sulaindeksi nousee kaikilla materiaaleilla, joka tarkoittaa, että viskositeetti laskee eli materiaaleista tulee juoksevia. Viskositeetin lasku on tyypillisesti seurausta molekyyliketjujen katkeilemisesta ja moolimassan laskusta. Myös kaikkien materiaalien tiheys on hieman suurempi verrattuna vertailumateriaaleihin, joka myös viittaa molekyyliketjujen katkeamiseen.

PC/ABS:n myötölujuus, joka on tässä tapauksessa myös vetolujuus, säilyy neitseellisen materiaalin tasolla. Murtolujuus on kierrätysmateriaalilla noin 16 % pienempi kuin neitseellisen materiaalin, mutta muoveilla ei yleensä ole käyttöä myötörajan jälkeen, joten ei murtolujuudella ole tässä tapauksessa niin suurta merkitystä.

Mustan PC:n myötölujuus on noin 16 % pienempi kuin neitseellisen materiaalin, kun taas myötövenymä on noin 14 % suurempi kuin neitseellisen.

Kirkkaan PC:n sulaindeksi on 188 % suurempi kuin neitseellisen materiaalin. Molekyyliketjujen katkeaminen on siis todennäköisesti suurta. Lujuusominaisuudet säilyvät hyvin: Myötölujuus on 2 % suurempi kuin neitseellisen materiaalin.

Kierrätetyn PS:n ominaisuudet verrattuna neitseellisen ominaisuuksiin ovat eniten poikkeavat ja myös kierrätysmateriaalille hieman epätyypilliset, koska murtovenymä ja lovettu iskulujuus ovat suuremmat kuin neitseellisen vertailumateriaalin. Täytyy kuitenkin muistaa, että vertailumateriaalina on käytetty polystyreenin keskimääräistä ruiskuvalulajia, joten kierrätysmateriaalin ominaisuuksien todellisista muutoksista ei voida olla varmoja. Kun lisäksi otetaan huomioon, että polystyreeniä käytetään paljon ei-teknisissä, eikä niin hyviä ominaisuuksia vaativissa sovelluksissa, voidaan olettaa referenssimateriaalin ominaisuuksien olevan hiukan heikommät kuin taajuusmuuttajassa käytetyn polystyreenin ominaisuudet neitseellisenä.

Maalatus kierrätetyn PS:n ominaisuuksiin vaikuttavat maalipartikkelit. Materiaali on heterogeenisempää johtuen maalipartikkeleista, mikä johtaa ominaisuuksien heikkeneeseen. Sen lujuusominaisuudet verrattuna neitseelliseen materiaalin ovat heikommät kuin muilla kierrätysmateriaaleilla. Myötölujuus on 22 % pienempi kuin vertailumateriaalilla. Tiheys on 13 % suurempi, joka johtuu maalipartikkeleista. Aikaisemmin tulosten esittelyssä verrattiin maalatus PS:n ominaisuuksia maalaamattoman ominaisuuksiin ja huomattiin murtovenymän ja iskulujuuksien olevan huomattavasti pienempiä.

Kierrätetyn PA:n ominaisuudet ovat kierrätysmateriaalille tyypilliset. Verrattuna vertailumateriaaliin on sen murtovenymä 68 % pienempi ja lovettu iskulujuus 78 % pienempi, jotka viittaavat haurastumiseen. Sulaindeksi on 69 % suurempi, joka viittaa molekyyliketjujen katkeilemiseen. Lujuusominaisuudet säilyvät hyvin, mutta vetomoduli on 61 % pienempi kuin vertailumateriaalilla.

Jos haluttaisiin kierrätysmateriaalien ominaisuuksien olevan samansuuntaiset kuin vertailumateriaalien, olisi erityisesti niiden vetomodulia, sulaindeksiä, murtovenymää sekä iskulujuutta parannettava. Epäorgaanisilla täyteaineilla voitaisiin nostaa materiaalien vetomodulia sekä kasvattaa viskositeettiä eli laskea sulaindeksiä. Kuitenkin epäorgaaniset täyteaineet tyypillisesti haurastuttavat muovia, mikä vaikuttaa negatiivisesti murtovenymään ja iskulujuuteen. Elastomeeritäyteaineilla puolestaan voidaan sitkistää materiaalia eli murtovenymä ja iskulujuus paranevat. Elastomeeritäyteaineet kuitenkin tyypillisesti laskevat vetomodulia. Kaikkien vertailumateriaaleja heikompien ominaisuuksien parantaminen on siis hankalaa, joten on päätettävä mihin ominaisuuksiin tahdotaan keskittyä. Haluttuun ominaisuusprofiiliin vaikuttaa kierrätysmateriaalin tuleva käyttökohde.

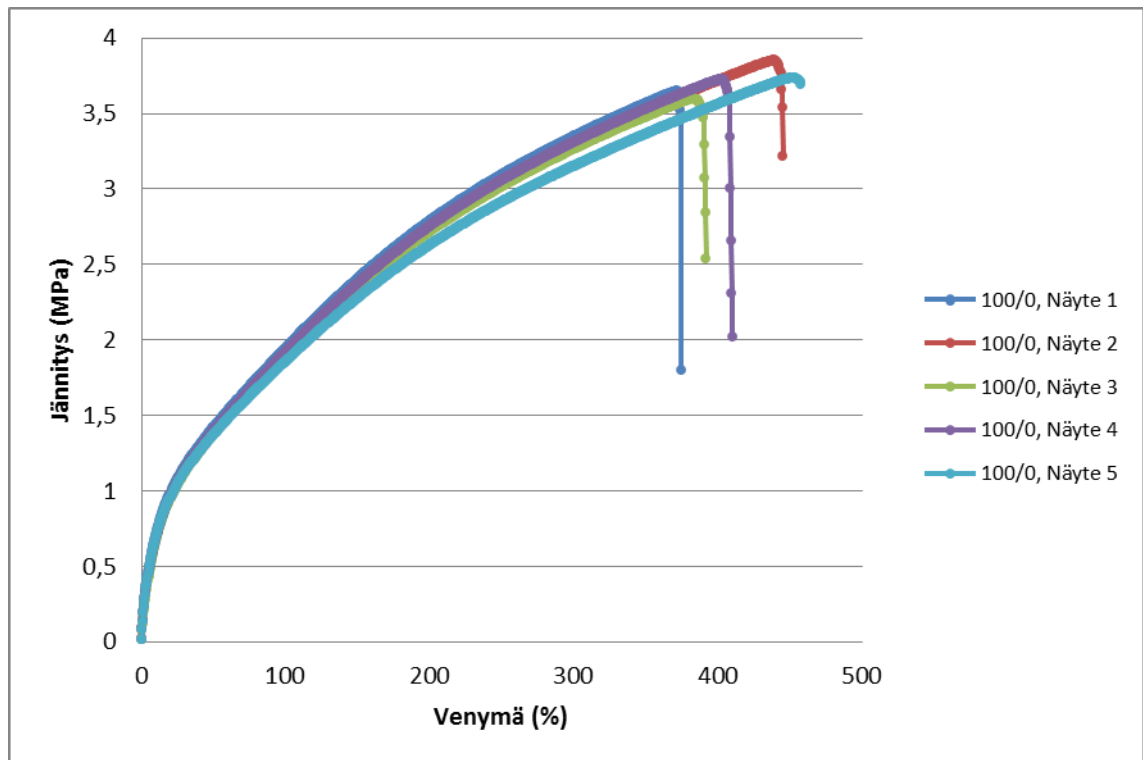
Kierrätysmateriaaleille tyypillistä on heterogeenisuus. Esimerkiksi PC/ABS:n vetoko-keiden tuloksista huomattiin, että eri ominaisuuksissa koekappaleiden välillä oli hajontaa. Homogeenisuutta voidaan parantaa granuloinnilla, mutta toisaalta granulointi aiheuttaa yhden sulaprosessointikerran lisää, mikä saattaa aiheuttaa lisää molekyyliketjujen katkeilua muovissa.

8.2 Termoelastit

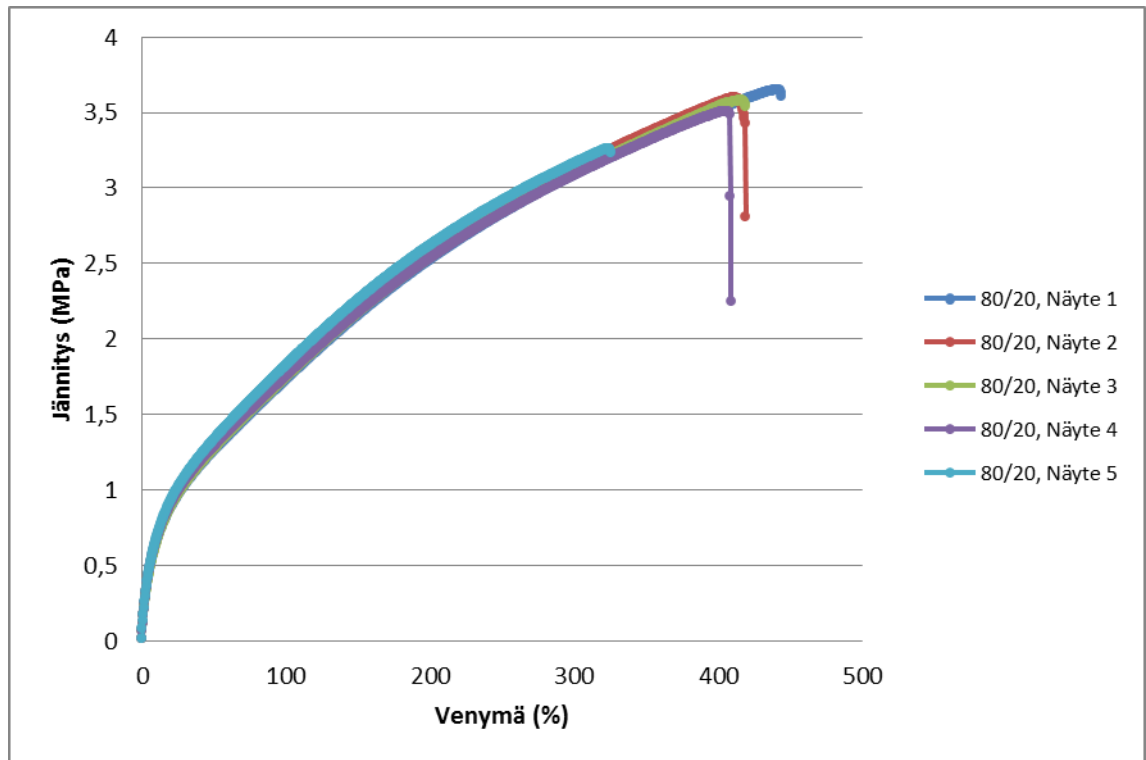
Seuraavissa alaluvuissa on esitelty eri neutseellinen materiaali/tuotantojäte -suhteilla styreenipohjaisille termoelasteille tehtyjen testausten tuloksia. Niiden perustella arvioidaan tuotantojätteen vaikutusta termoelastien ominaisuuksiin ja laatuun.

8.2.1 Vetokoe

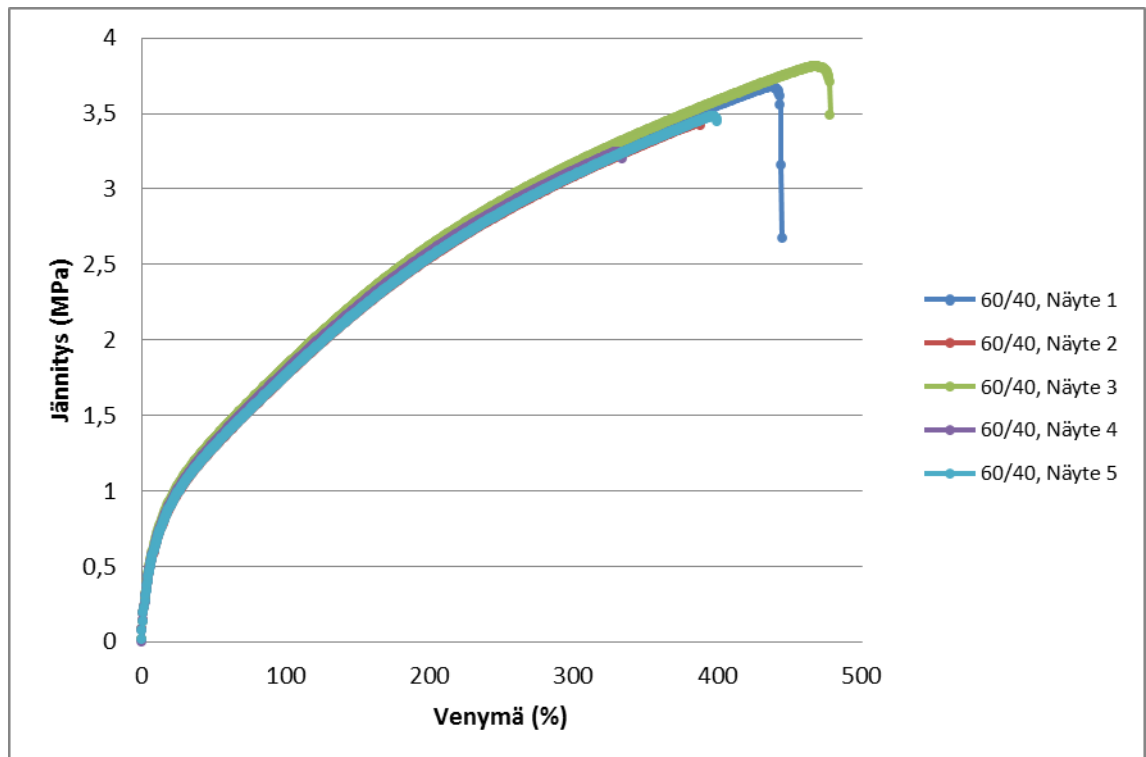
Kuvissa 34–39 on esitetty eri sarjojen jännitys-venymäpiirroksot viidelle rinnakkaiselle vetokokeelle.



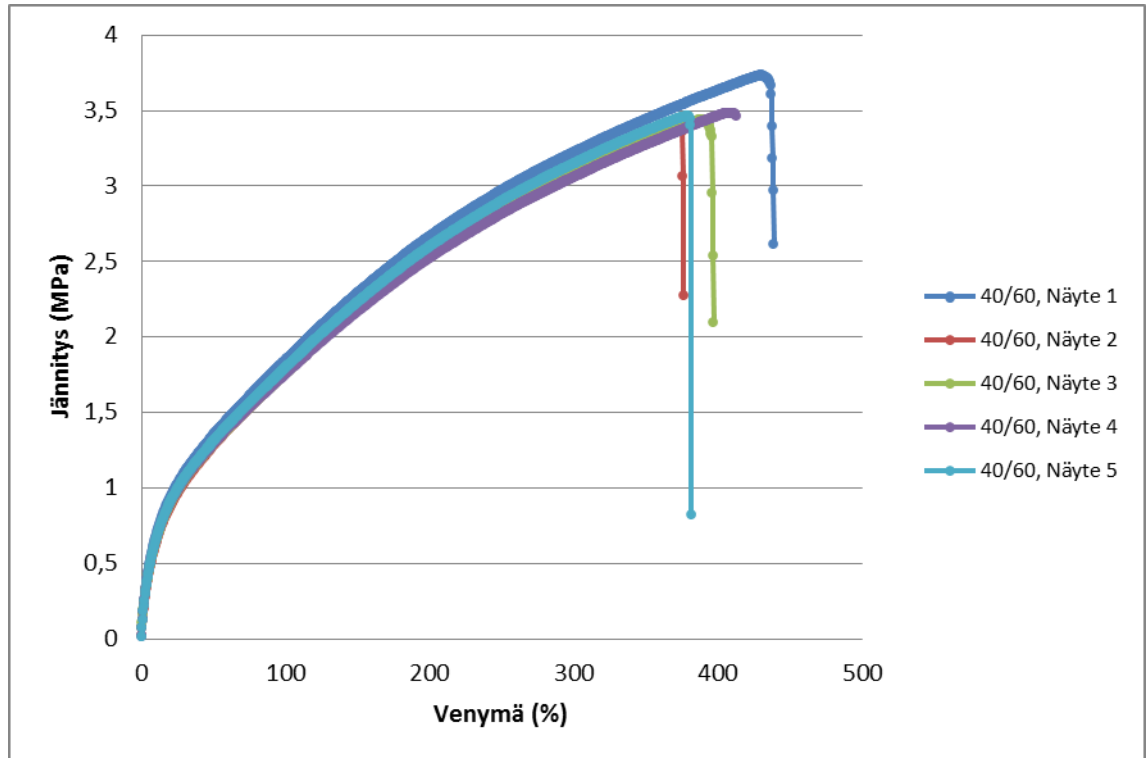
Kuva 34. 100/0-sarjan jännitys-venymäpiirros



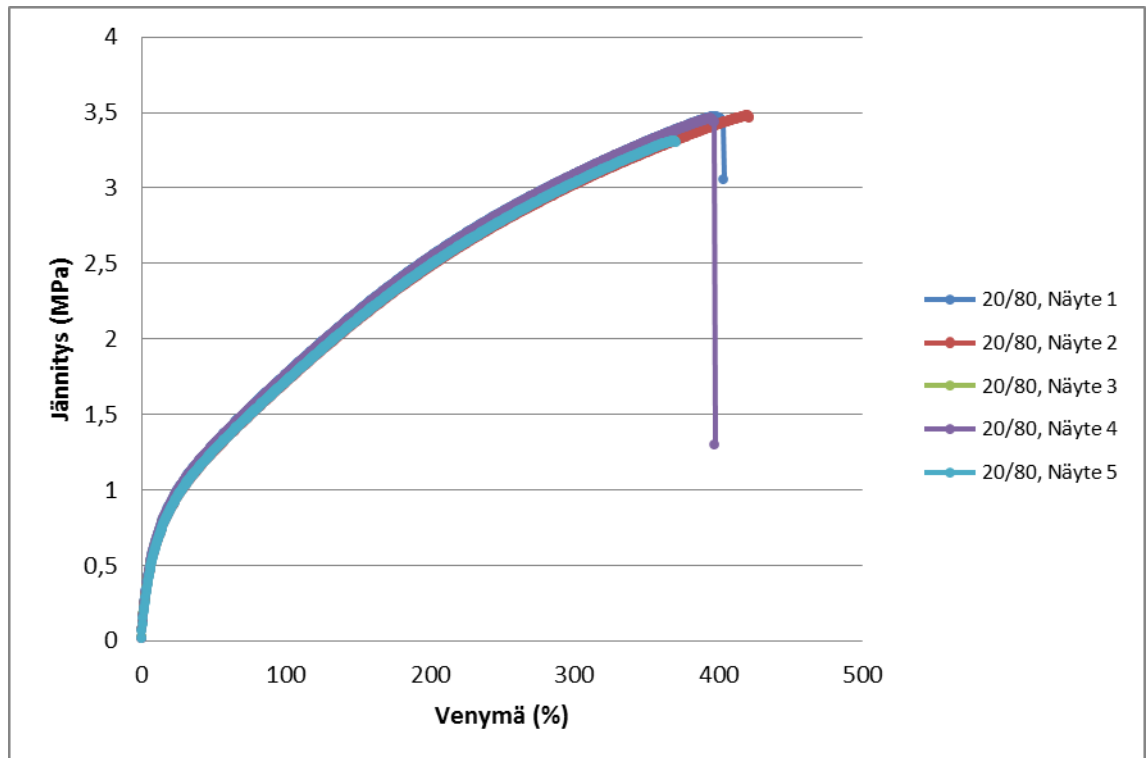
Kuva 35. 80/20-sarjan jännitys-venymäpiirros



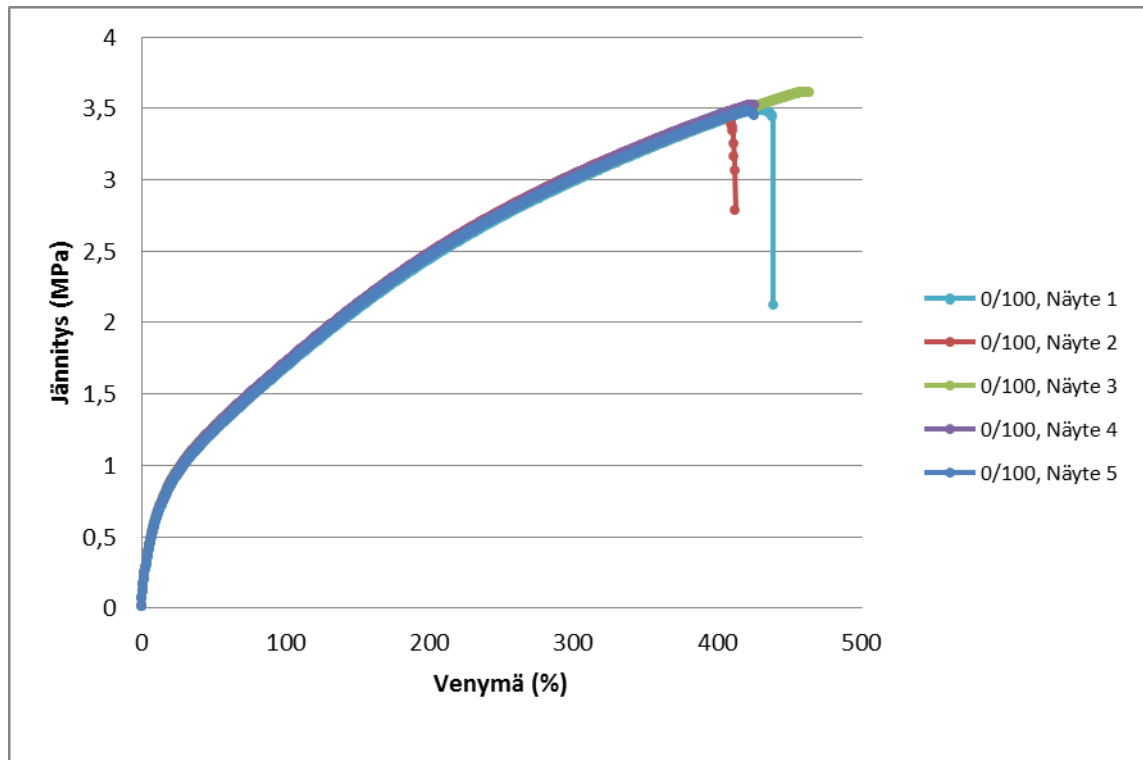
Kuva 36. 60/40-sarjan jännitys-venymäpiirros



Kuva 37. 40/60-sarjan jännitys-venymäpiirros



Kuva 38. 20/80-sarjan jännitys-venymäpiirros



Kuva 39. 0/100-sarjan jännitys-venymäpiirros

Kuvaajista huomataan, että näytteiden käyttäytyminen eri sarjoissa on todella tasaista pienemmillä venymillä, mutta lopulta murtovenymässä- ja lujuudessa esiintyy jonkin verran eroja. Hajonnat ovat kuitenkin paljon pienempiä kuin käytetyillä taajuusmuuttajan muoveilla. Eri sarjojen vertailun helpottamiseksi ovat taulukossa 15 esitetty keskimääräiset murtolujuudet, murtovenymät, murtovoimat sekä vetolujuudet 100 ja 300 % venymällä keskihajontoineen.

Taulukko 15. Vetokokeiden tuloksia

Näyte		Murtolujuus (MPa)	Murtovenymä (%)	Vetolujuus 100%(MPa)	Vetolujuus 300%(MPa)	Murtovoima (N)
100/0	ka.	3.59	414.89	1.90	3.27	138.75
	kh.	0.12	35.35	0.03	0.07	4.73
80/20	ka.	3.44	403.54	1.76	3.11	132.76
	kh.	0.15	45.14	0.04	0.03	5.89
60/40	ka.	3.44	408.66	1.78	3.12	132.96
	kh.	0.23	54.77	0.03	0.03	8.87
40/60	ka.	3.42	400.58	1.78	3.12	132.03
	kh.	0.13	24.98	0.04	0.06	5.00
20/80	ka.	3.33	391.39	1.74	3.06	128.76
	kh.	0.10	24.33	0.02	0.03	3.92
0/100	ka.	3.44	433.59	1.70	3.01	132.87
	kh.	0.09	19.67	0.01	0.02	3.65

Kunkin sarjan sisällä hajonnat ovat melko pieniä lujuuksien kesken, mutta murtovenymässä on suurempaa hajontaa. Murtolujuuksissa hajonta hieman on suurempaa kuin vetolujuuksissa 100 % ja 300 % venymällä. Sarjoista suurimmat lujuusarvot ovat kokonaan neutseellisellä materiaalilla, mutta erot ovat kuitenkin pieniä. Suurin murtolujuus on noin 8 % suurempi kuin pienin murtolujuus (20/80). Lujuusarvoissa ei nähdä yhteyttä tuotantojätteen määrään. Esimerkiksi murtolujuus on sama sarjoilla 80/20, 60/40 ja 0/100.

Suurin murtovenymä on tuotantojätteellä valmistetulla sarjalla, joka on noin 10 % suurempi kuin pienin murtovenymä (20/80). Myöskään murtovenymän ei nähdä olevan yhteydessä tuotantojätteen määrään, vaan arvot vaihtelevat hyvin satunnaisesti, esimerkiksi suurin ja pienin murtovenymä ovat sarjoilla, joissa on eniten ja toiseksi eniten tuotantojätettä.

Jos verrataan neutseellisestä granulaatista valmistettua sarjaa tuotantojäterouheesta valmistettuun sarjaan, on murtolujuus noin 4 %, vetolujuus 100 ja 300 % venymällä 12 % ja 8,5 % suurempia neutseellisellä sarjalla. Murtovenymä puolestaan on noin 4,5 % suurempi tuotantojättesarjalla. Erot ovat pieniä, joten voidaan sanoa, että tuotantojäterouheen ominaisuudet näiltä osin vastaavat riittävän hyvin neutseellisen granulaatin ominaisuuksia.

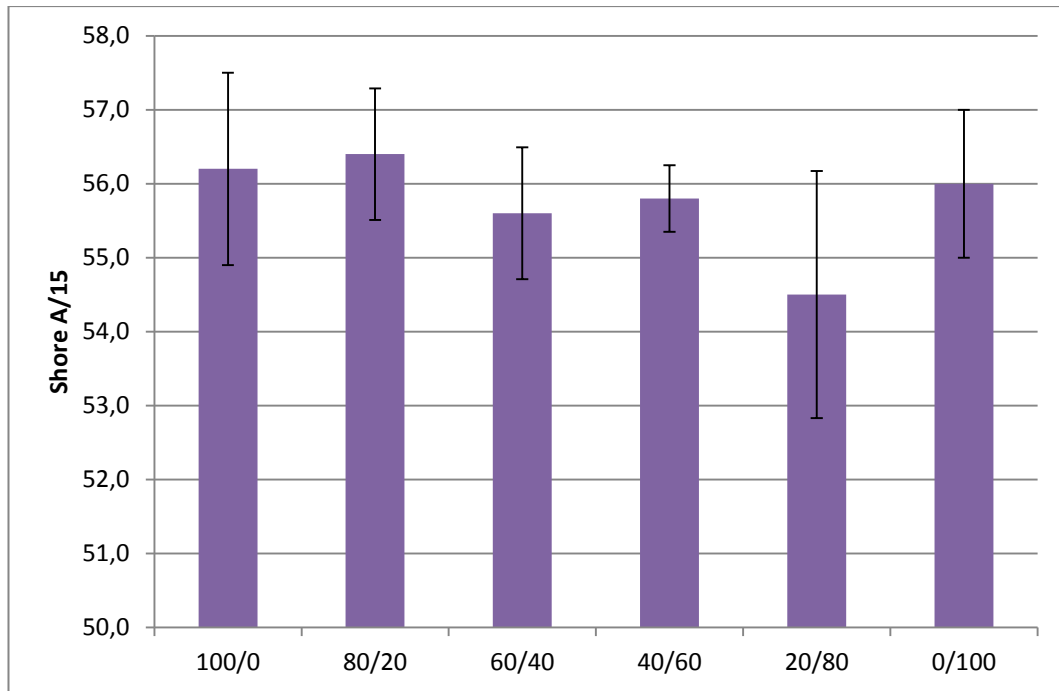
Neitseellisen materiaalin materiaalidatassa ilmoitettu murtolujuus on 4,50 MPa, vetolujuudet 100 ja 300 % venymällä 1,95 MPa ja 2,84 MPa sekä murtovenymä 400 %. Mittauksista saadut tulokset mukailevat suhteellisen hyvin näitä ja pieniä eroja voidaan selittää esimerkiksi sillä, että materiaalidatan arvot on saatu standardin ISO 37 mukaisen mittausten mukaan, missä käytetään erikokoista koesauvaa.

8.2.2 Kovuus

Taulukossa 16 on esitetty sarjojen kovuudet viiden mittauksen keskiarvona keskihajontoihin. Kuvassa 40 on esitetty sarjojen kovuudet pylväsdiagrammissa sarjojen vertailun helpottamiseksi. Mittauspöytäkirja on liitteessä 7.

Taulukko 16. Sarjojen kovuudet keskihajontoihin

Näyte	ka., Shore A/15	kh.
100/0	56.2	1.30
80/20	56.4	0.89
60/40	55.6	0.89
40/60	55.8	0.45
20/80	54.5	1.67
0/100	56.0	1.00



Kuva 40. Sarjojen Shore A/15 kovuudet ja keskihajonnat

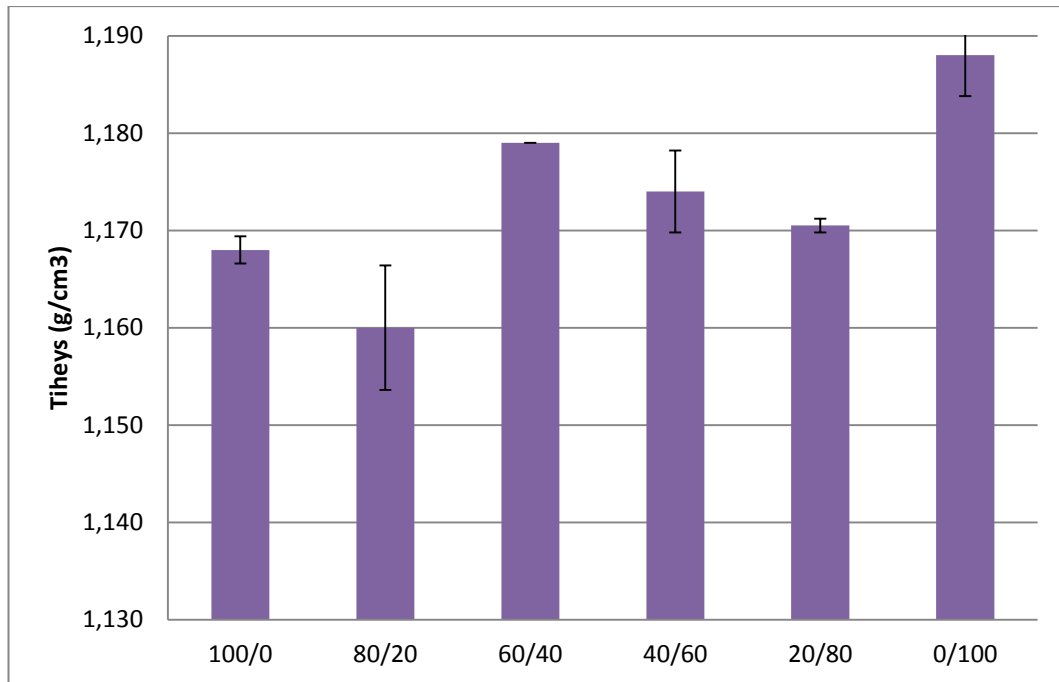
Kaikkien sarjojen kovuudet ovat todella lähellä toisiaan. Kovimman sarjan (80/20) kovuus on vain noin 3 % suurempi kuin pehmeimmän sarjan (20/80). Sarjojen välillä ei nähdä vaikutusta kovuuteen tuotantojätteen määrän kasvaessa. Käytetty kovuusmittausmenetelmä on melko virhealtis, joten voidaan sanoa, että tuotantojätteen määrällä ei ollut vaikutusta kovuuteen. Neitseellisen materiaalin ilmoitettu Shore A-kovuus materiaalidatatioissa on 60.

8.2.3 Tiheys

Taulukossa 17 on esitetty sarjojen tiheydet kahden mittauksen keskiarvona keskihajontoihin. Kuvassa 41 on esitetty sarjojen tiheydet pylvädiagrammissa sarjojen vertailun helpottamiseksi.

Taulukko 17. Sarjojen tiheydet keskihajontoihin

Näyte	ka., Tiheys (g/cm ³)	kh.
100/0	1.168	0.001
80/20	1.160	0.006
60/40	1.179	0.000
40/60	1.174	0.004
20/80	1.171	0.001
0/100	1.188	0.004



Kuva 41. Sarjojen tiheydet keskihajontoineen

Myös tiheydet ovat todella lähellä toisiaan suurin tiheys (0/100) on vain noin 2,5 % suurempi kuin pienin tiheys (80/20). Tuloksissa ei nähdä tuotantojätteen määrän vaikutusta tiheyteen ja tiheyksien väliset erot ovat pieniä. Neitseellisen materiaalin ilmoitettu tiheys on $1,20 \text{ g/cm}^3$.

Jos verrataan vain neitseellisen sarjan ja tuotantojättesarjan tiheyksiä, on tuotantojättesarjan tiheys korkeampi. Korkeampaa tiheyttä voitaisiin selittää molekyyliketjujen katkeamisella prosessoinnin aikaisten suurien leikkausvoimien ja korkeiden lämpötilojen takia. Tiheys ei kuitenkaan kaikkien sarjojen välillä kasva tuotantojätteen määrän kasvaessa.

8.2.4 Palonkesto

Tuotantojätteen lisäämisellä neitseellisen materiaalin joukkoon ei ollut vaikutusta termoplastien palonkesto. Kaikkien näytteiden palonkestoluokka säilyi V-0:na ja ne sammuivat välittömästi liekin poiston jälkeen.

8.2.5 Öljynkesto

Öljynkestotestien tulokset on esitetty taulukossa 18. Mittauspöytäkirja on liitteessä 8.

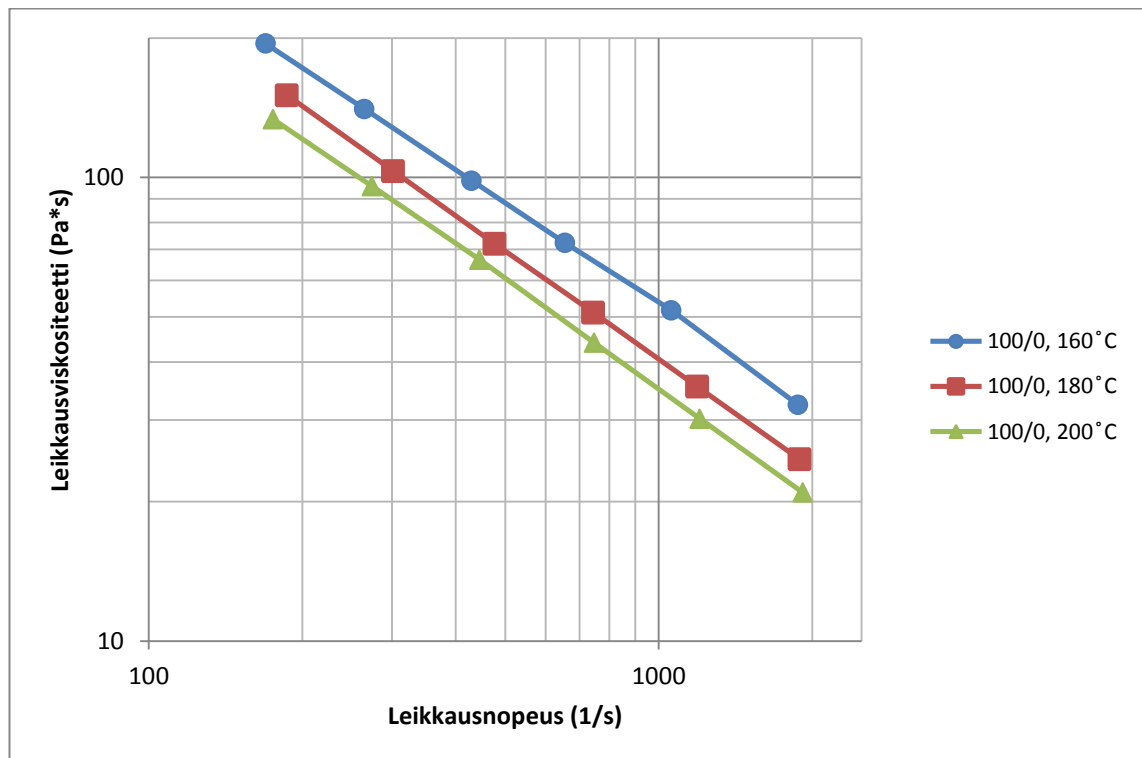
Taulukko 18. Sarjojen tilavuudenmuutos prosentteina keskihajontoiheen öljynkestotestissä

Näyte	ka. ΔVol (%)	kh.
100/0	25.67	1.40
80/20	25.05	2.50
60/40	25.81	4.11
40/60	25.19	1.93
20/80	25.59	2.87
0/100	24.16	1.53

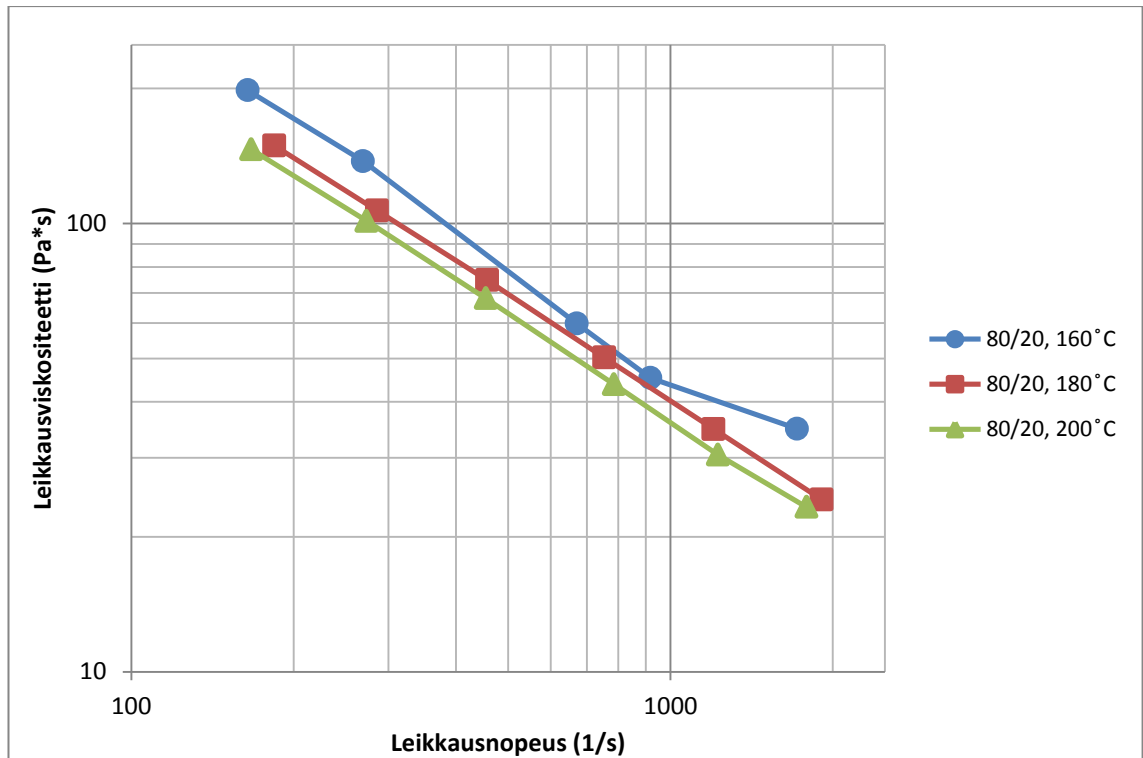
Tilavuudenmuutokset ovat hyvin lähellä toisiaan, eikä voida nähdä yhteyttä tuotantojätteen määrään. Voidaan sanoa öljynkeston säilyvän tuotantojätteen määrän kasvaessa.

8.2.6 Reologiamittaukset

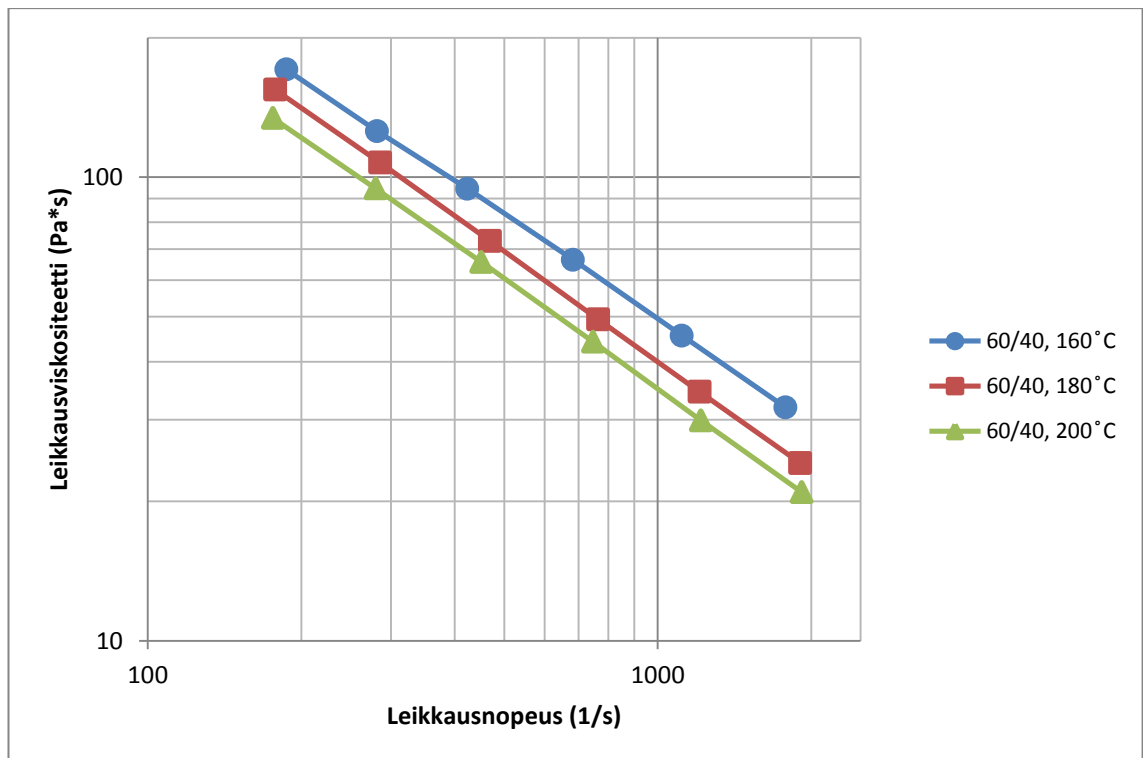
Seuraavissa kuvissa 42–47 on esitetty eri sarjojen leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona. Mittaukset suoritettiin lämpötiloissa 160 °C, 180 °C ja 200 °C. Kuvajien akselit ovat logaritmisia ja arvoille on suoritettu Rabinowitch-korjaukset.



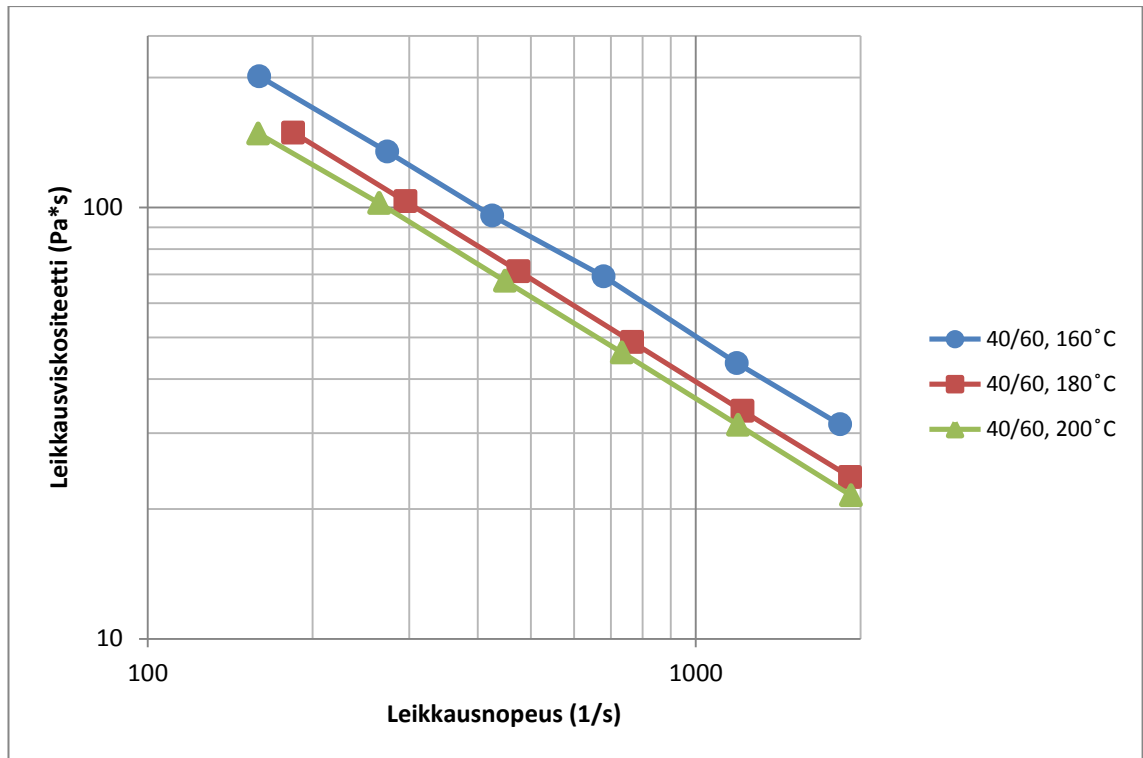
Kuva 42. 100/0-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



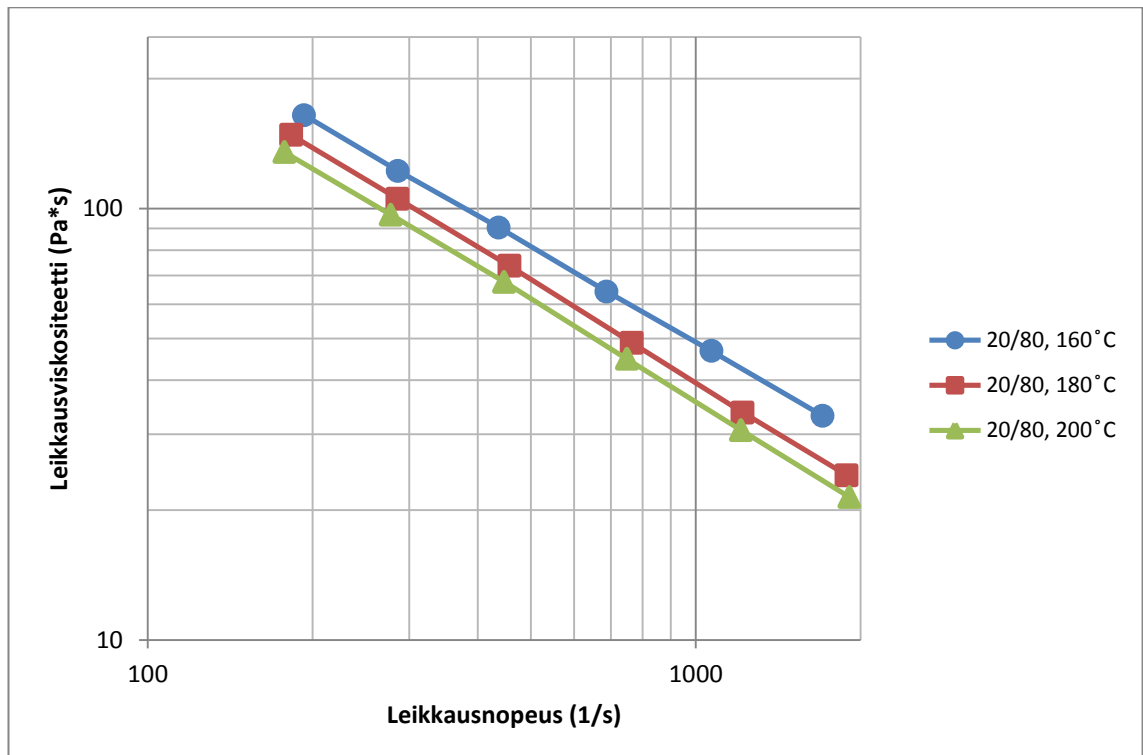
Kuva 43. 80/20-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



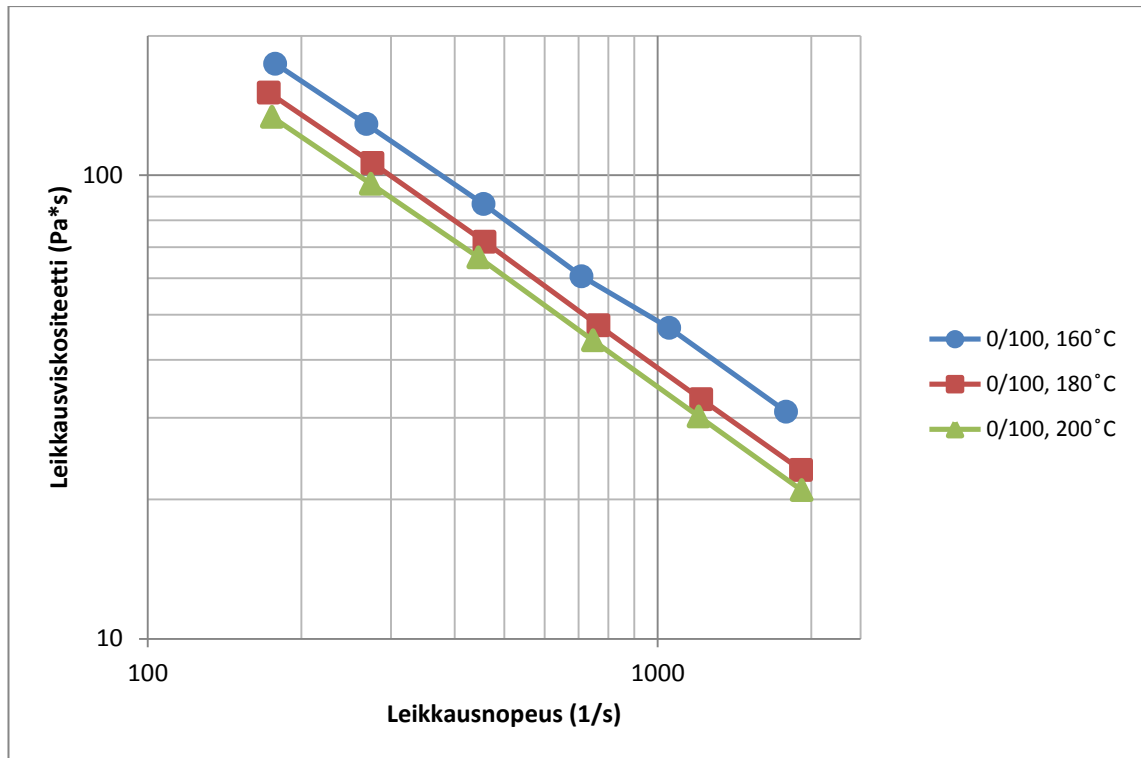
Kuva 44. 60/40-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 45. 40/60-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 46. 20/80-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona



Kuva 47. 0/100-sarjan leikkausviskositeetti leikkausnopeuden funktiona

Logaritmiasteikolla termoelastien leikkausviskositeetti laskee lineaarisesti leikkausnopeuden funktiona ja laskee lämpötilan noustessa. Jälleen erot eri sarjojen välillä ovat hyvin pieniä. Vain 80/20-sarjalla 160°C:ssa esiintyy pientä hajontaa, jossa on voinut tapahtua mittausvirhe.

8.2.7 Yhteenveto tuloksista

Ruiskuvalussa tuotantojätettä syntyy muun muassa valutapeista, virheellisistä tuotteista ja ajon aloituksissa. Saatu termoelastituotantojäte oli puhdasta ja rouheena, neitseellinen materiaali saatiin granulaatteina.

Kaiken kaikkiaan erot kaikissa mitatuissa ominaisuuksissa eri sarjojen välillä ovat hyvin pieniä, eivätkä ominaisuudet heikkene mentäessä sarjoissa enemmän tuotantojätettä sisältävään päin. Näiden tulosten perusteella tuotantojätettä voitaisiin käyttää tuotteiden valmistuksessa myös ilman neitseellistä materiaalia. Kuitenkin, jos sama materiaali joutuisi uudelleen tuotantojätteeksi useita kertoja, voisivat sen ominaisuudet heikentyä useiden prosessointisykliä vaikutuksesta.

9 YHTEENVETO

Työn kokeellinen osuus jakautui kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tutkittiin käytettyjen taajuusmuuttajien muoviosien kierrätettävyyttä ja saadun kierrätysmuovin ominaisuuksia. Muoviosat jaettiin kuuteen materiaaliryhmään, jotka olivat polyamidi (PA), musta polykarbonaatti (PC musta), kirkas polykarbonaatti (PC kirkas), polykarbonaatin ja akryylnitriilibutadieenistyreenin seos (PC/ABS), maalattu polystyreeni (PS+maali) ja polystyreeni (PS). Toisessa osassa tutkittavana materiaalina oli styreenipohjaisen termoelastin tuotantojäterouhe, jota sekoitettiin mekaanisesti neitseellisen granulaatin kanssa eri suhteilla ja arvioitiin sen vaikutusta materiaalin ominaisuuksiin.

Taajuusmuuttajien muoviosat pestiin ja rouhittiin, jonka jälkeen niistä valmistettiin koekappaleita ruiskuvalamalla. Koekappaleista tuli pääasiassa tasalaatuisia ja hyvän näköisiä, mutta molemmista polykarbonaateista valmistettujen koekappaleiden pinnassa oli raitoja ja kirkkaiden polykarbonaatti-koekappaleiden sisässä näkyi myös ilmakuplia. Koekappaleille tehtiin veto- ja iskukokeet, kovuus- ja tiheysmittaukset sekä niistä testattiin palonkesto. Rouheista mitattiin sulaindeksi sekä reologiamittaukset kapillaarireometrillä ja niille ajettiin DSC. Saatuja mittaustuloksia verrattiin pääasiassa kirjallisuusarvoihin.

Termoelasteista valmistettiin mekaanisesti sekoittamalla kuusi koesarjaa seuraavilla neitseellinen materiaali/tuotantojäte –suhteilla: 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80, 0/100. Koekappaleet ruiskuvalettiin suoraan mekaanisesta raaka-aineseoksesta. Koekappaleille tehtiin vetokokeet, kovuus- ja tiheysmittaukset, reologiamittaukset kapillaarireometrillä sekä testattiin palon- ja öljynkestoa.

Kun verrattiin taajuusmuuttajien muovien ominaisuuksia vertailumateriaaleihin, oli kaikille yhteistä vetomodulin aleneminen ja sulaindeksin kasvaminen. Lähes kaikilla materiaaleille myös murtovenymä ja iskulujuus laskivat. Tulokset ovat kierrätysmateriaaleille tyypillisiä. Iskulujuuden ja murtovenymän lasku viittaa materiaalin haurastumiseen. Sulaindeksin kasvaminen taas viskositeetin laskemiseen, joka on luultavasti seurausta muun muassa käytön ja kierrätyksen aikana tapahtuneesta molekyyliketjujen katkeilemisesta.

Termoelasteille tehdyissä mittauksissa hajonta eri sarjojen välillä oli pientä, eikä huomattu ominaisuuksien heikkenemistä tuotantojätteen määrän kasvaessa, vaan erot eri sarjojen välillä olivat satunnaisia. Näiden tulosten perusteella tuotantojätettä voidaan

huoletta käyttää neitseellisen materiaalin seassa kuinka paljon tahansa. Kuitenkin on mahdollista, jos sama materiaali päätyy tuotantojätteeksi useita kertoja eli kiertää prosessissa useita prosessointisyklejä, että sen ominaisuudet heikentyvät.

Käytettyjen taajuusmuuttajien muoviosista saatu kierrätysmuovi oli huomattavasti heterogeenisempaa kuin termoelastien tuotantojäterouhe. Vaikka taajuusmuuttajien muoviosat pestiin, niin ne sisälsivät kuitenkin kontaminaatioita ja myös käytön jäljet näkyivät muovin ulkonäössä. Siksi taajuusmuuttajien muovien mittauksissa saman materiaalin eri koekappaleiden välillä oli enemmän hajontaa, esimerkiksi vetokokeessa, kuin termoelasteilla. Tuotantojäterouheen kierrättäminen yrityksen sisällä on esimerkki primäärisestä kierrätyksestä, jossa kierrätysmateriaalien ominaisuudet eivät merkittävästi heikkene ja sitä voidaan käyttää alkuperäisen tarkoituksen raaka-aineena. Taajuusmuuttajien muoviosien kierrättäminen on sekundääristä kierrätystä, sillä niiden ominaisuudet heikkenevät sen verran, että on tarpeen kehittää uusi käyttökohde.

Tämä projekti ja työskentely taajuusmuuttajien muoviosien parissa jatkuvat edelleen. Jatkossa on tarkoituksena kehittää osalle taajuusmuuttajien muoveista mahdollisia hyötykäyttökohteita ja modifioida niitä hyötökäyttökohteen vaatimusprofiiliin vastaaviksi pääasiassa lisäaineistuksella. Myös kierrätysmuovin prosessoitavuutta pyritään parantamaan sekä ominaisuuksia vakioimaan.

LÄHTEET

- [1] L 17.6.2011/646. Jätelaki.
- [2] Muovimuotoilu. Kestomuovit. [WWW]. [viitattu 17.5.2013]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/147/211/>.
- [3] Muovimuotoilu. Kertamuovit. [WWW]. [viitattu 15.5.2013]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/148/212/>.
- [4] Bayer. Plastics Industry and its Role in our Society. [WWW]. 26.3.2012. [viitattu 28.11.2013]. Saatavissa: <http://www.yumpu.com/en/document/view/8705130/plastics-industry-and-its-role-in-our-society>.
- [5] Muovimuotoilu. Valtamuovit. [WWW]. [viitattu 17.3.2013]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/32/63/>.
- [6] Järvinen, P. Uusi muovitieto. Porvoo 2008, WS Bookwell Oy. 263 s.
- [7] Nykänen, S. Polystyreeni (PS). Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 16.7.2013]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PS_FI.pdf.
- [8] Chrisochoou, A., Dufour, D. Styrenic Copolymers. Shrewsbury 2003, Smithers Rapra. 180 p.
- [9] Muovimuotoilu. Tekniset muovit. [WWW]. [viitattu 21.5.2013]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/33/62/>.
- [10] Nykänen, S. Polyamidit (PA). Tampereen teknillinen yliopisto. [viitattu 15.7.2013]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PA_FI.pdf.
- [11] Muovimuotoilu. Termoelastit (TPE). [WWW]. [viitattu 19.8.2013]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/39/71/>.
- [12] How to increase the mechanical recycling of post consumer plastics. Brussels 2010, European Plastics Recyclers, 22 p. Saatavissa: <http://pieweb.plasteurope.com/members/pdf/p215500b.PDF>.
- [13] European Commission DG ENV. Plastic waste in the environment, Revised final report. 2011..
- [14] Hiipakka, M. Muovien kierrätys. Tampere, 2011. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. 130 s.
- [15] PCPR-hankkeen hankesuunnitelma. Tampereen teknillinen yliopisto. 7 s.
- [16] VIHREÄ KIRJA - Ympäristössä olevaa muovijätettä koskevasta eurooppalaisesta

strategiasta. Bryssel 2013, Euroopan Komissio.

- [17] Plastics Recyclers Europe. REACH for plastics recyclers. [WWW]. [viitattu 3.7.2013]. Saatavissa: <http://www.plasticsrecyclers.eu/reach-plastics-recyclers>.
- [18] Alaranta, J. Kierrätysmateriaali on haastava Reach-tapaus. Uusiouutiset 24(2013)4, s. 20-21.
- [19] Masanet, E., Auer, R., Tsuda, D., Barillot, T., Baynes, A. An Assessment and Prioritization of "Design for Recycling" Guidelines for Plastic Components. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (2001) pp. 5-10.
- [20] Wei Chen, R., Dundee, N-C., Prinz, F. Product Design for Recyclability: A Cost Benefit Analysis Model its Application. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (2003), pp. 178-183.
- [21] Brandrup, J. Recycling and Recovery of Plastics. München 1996, Hanser Verlag. 893 p.
- [22] Liang, R., Gupta, R K. The effect of residual impurities on the rheological and mechanical properties of engineering polymers separated from mixed plastics. ANTEC 2001 Annual Technical Conference, Dallas, USA, May 6-10, 2001., Brookfield Center, US 2001. Society of Plastics Engineers. 5 p.
- [23] Goodship, Vanessa. Introduction to Plastics Recycling (2th Edition). Shrewsbury 2007, Smithers Rapra. 187 p.
- [24] Meinander, M., Punkkinen, H., Vähä-Nissi, M., Kortet, S. Muovipakkausten kierrätettävyyden edistäminen Suomessa. Helsinki 2012, Työ- ja elinkeinoministeriö. 118 s.
- [25] Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. Plastic recycling: challenges and opportunities. Philosophical transactions of the Royal Society of London 364(2009)1526, pp. 2115-2126.
- [26] Jordan Reduction Solutions. Shredders.[WWW]. [viitattu 3.12.2013]. Saatavissa: <http://jordanreductionsolutions.com/plastic-shredder.html>.
- [27] Jordan Reduction Solutions. Grinders. [WWW]. [viitattu 3.12.2013]. Saatavissa: <http://jordanreductionsolutions.com/product-grinder.html>.
- [28] Kurri, V., Malen, T., Sandell, R., Virtanen, M. Muovitekniikan perusteet. 4. painos. 2008, Edita Prima. 237 s.
- [29] Aaltonen, K. Muovit ja kustaus. Tampere, 2012. Powerpoint-esitys. 20 s.
- [30] Harper, C. Handbook of Plastics Technologies: The Complete Guide to Properties and Performance. 2006, McGraw Hill Professional. 900 p.
- [31] VNP 23.10.1997/962. Valtioneuvoston päätös pakkauksista ja pakkajätteestä.
- [32] Good practices guide on waste plastics recycling guide by and for local and regional. 2004. Association of Cities and Regions for Recycling (ACRR). 99 p.
- [33] 2003/138/EY. Komission päätös ajoneuvojen osien ja materiaalien koodausstandardien vahvistamisesta romuajoneuvoista. 27.3.2003.

- [34] 2000/40/EY. Komission päätös ekologisista arviointiperusteista yhteisön ympäristömerkin myöntämiseksi kylmäsäilytyslaitteille. 16.12.1999.
- [35] Müller, H. How to select a right pelletizer. *Plastics Technol* (2011) May.
- [36] Free, D. Pelletizing your compound: what are your option?. *Plastic additives & compounding* 8(2006)1. pp. 42-43.
- [37] Marulanda, D., Pérez, M., Correa, L. Influence of the percentage of recycled material on the mechanical properties of low-density polyethylene, polyethylene terephthalate, and polyvinyl chloride. *Journal of Elastomers and Plastics* 45(2013)4. pp. 1-13.
- [38] Erikoismuovit ja lisäaineet. Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 46 s.
- [39] Murphy, J. *Additives for Plastics Handbook* (2nd Edition). 2001, Elsevier. 515 p.
- [40] Polymeerit. Tampere, 2005. TTY Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorio. Luentomoniste. 241 s.
- [41] Seppälä, J. *Polymeeritekniikan perusteet*. 6. painos. Helsinki, 2008. Otatieto. 346 s.
- [42] Kallio, M., Nurmi, V-P., Kolari, M., Säskilahti V-M. *Sähkölaitteiden palonestoaineet*. Helsinki 2001, Tukes. 38 s.
- [43] Dufton, P. *Flame Retardants for Plastics*. Shrewsbury 2003, Smithers Rapra. 158 p.
- [44] Retkin, R. Bromattujen palonestoaineiden rajoitusten vaikutus jätteiden hyödyntämiseen ja käsittelyyn. [WWW]. Helsinki 2012, Suomen ympäristökeskus. 57 s. [viitattu 5.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=139038&lan=fi>.
- [45] Ympäristöministeriö. Palonsuoja-aine HBCD kielletään maailmanlaajuisesti. [WWW]. Valtioneuvosto. 11.5.2013. [viitattu 5.6.2013]. Saatavissa: <http://valtioneuvosto.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tiedote/fi.jsp?oid=385105>.
- [46] Vuorinen, J., Nevalainen, K., Eteläaho, P. *Muovit ja nano*. 2007, TTY, Muovi- ja elastomeeritekniikka. 96 s.
- [47] Rothon, R. *Particulate Fillers for Polymers*. Shrewsbury 2002, Smithers Rapra. 162 p.
- [48] White, J., Kwang-Jea, K. *Thermoplastic and Rubber Compounds - Technology and Physical Chemistry*. 2008, Hanser Publisher. 355 p.
- [49] Zweifel, H., Maier, R., Schiller, M. *Plastic Additives Handbook*. 6th Edition. Munich 2009, Carl Hanser Verlag.
- [50] La Mantia, P. Effect of Fillers on the Properties of Recycled Polymers. *Macromol. Symp.* 194(2003), pp 101-110.
- [51] Chen, S-C., Liao, W-H., Chien, R-D., Lin, S-H. Influence of Recycled ABS Added to Virgin Polymers on the Physical, Mechanical Properties and Molding Characteristics. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 50(2011)3, pp.

306-311.

- [52] Liu, B., Lei, H. Recycled Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer Resin Strengthened and Toughened by an Elastomer/Inorganic Nanoparticles Complex. *Journal of Applied Polymer Science* (2013) pp. 2458-2467.
- [53] Mahanta, M., Dayanidhi, A., Mohanty, S., Nayak, S. Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Recycled Polycarbonate/Recycled Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Blend Nanocomposites. *Polymer Composites* 33(2012)12 pp.2114-2124.
- [54] *Plastics in Europe. An analysis of plastics consumption and recovery in Europe 2002 & 2003.* Brussels 2004, PlasticsEurope, 20 p.
- [55] *Potential markets for recovered plastics.* London 2002, Environment agency, 45 p. Saatavissa: <http://londonremade.com/wp-content/uploads/2013/04/potentialmarketsforrecoveredplastics.pdf>.
- [56] *MarketsandMarkets. Global Engineering Plastics Market (2012-2017).* [WWW]. [viitattu 21.8.2013]. Saatavissa: <http://es.slideshare.net/marketreports/global-engineering-plastics-market-2012-2017>.
- [57] ABB. Mikä taajuusmuuttaja on?. [WWW]. [viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: <http://www.abb.fi/cawp/db0003db002698/d5b664f5dd909412c1257291003ef7cc.aspx>.
- [58] UL IDES. UL 94 Flame rating. [WWW]. [viitattu 26.8.2013]. Saatavissa: http://www.ides.com/property_descriptions/UL94.asp.
- [59] APSTEK. Palonkestoluokat UL. [WWW]. [viitattu 26.8.2013]. Saatavissa: <http://www.apstek.com/Usein-kysytyt/Palonkestoluokat-UL>.
- [60] Perkin Elmer. DSC A Beginner's Guide. [WWW]. [viitattu 16.10.2013]. Saatavissa: www.perkinelmer.com/2FCMSResources/2FImages/2F44-74542GDE_DSCBeginnersGuide.pdf.
- [61] *Polymeerimateriaalien perusteet osa 2.* 2010, Teknologiateollisuuden 100-vuotissäätiö. Luentomoniste. 146 s.
- [62] Syrjälä, S. *Polymeerien reologia.* 2011, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 25s.
- [63] MatWeb. Overview of materials for Polycarbonate, Molded. [WWW]. [viitattu 28.11.2013]. Saatavissa: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84b257896b674f93a39596d00d999d77>.
- [64] MatWeb. Overview of materials for Polycarbonate, Extruded. [WWW]. [viitattu 28.11.2013]. Saatavissa: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=501acbb63cbc4f748faa7490884cdbca>.
- [65] MatWeb. Overview of materials for Polystyrene, Molded, Unreinforced .

[WWW]. [viitattu 28.11.2013]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=df6b1ef50ce84e7995bdd1f6fd1b04c9>.

[66] MatWeb. Overview of materials for Nylon 612, Unreinforced. [WWW]. [viitattu 18.12.2013]. Saatavissa:

<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e25096d5ee584fedbd6269aa1914672b>.

Liite 1. Ruiskuvalupöytäkirja

PS

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaineaika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	230 °C
Vyöhyke 1	240 °C
Vyöhyke 2	230 °C
Vyöhyke 3	230 °C

PS + maali

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaineaika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	230 °C
Vyöhyke 1	240 °C
Vyöhyke 2	230 °C
Vyöhyke 3	230 °C

PC musta

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaine aika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	300 °C
Vyöhyke 1	300 °C
Vyöhyke 2	290 °C
Vyöhyke 3	280 °C

PC kirkas

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaine aika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	300 °C
Vyöhyke 1	300 °C
Vyöhyke 2	290 °C
Vyöhyke 3	280 °C

PC/ABS

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaine aika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	300 °C
Vyöhyke 1	300 °C
Vyöhyke 2	290 °C
Vyöhyke 3	280 °C

PA

Jälkipaine	300 bar
Jälkipaine aika	15 s
Jäähdytysaika	30 s
Jaksoaika	54 s

Lämpötilat	
Suutinlämpötila	250 °C
Vyöhyke 1	240 °C
Vyöhyke 2	230 °C
Vyöhyke 3	230 °C

Liite 2. Ruiskuvalupöytäkirja termoelastit

RUISKUVALUPÖYTÄKIRJA			
sarjan nimike:	termoelastit		
Ruiskuvalukone:		Fanuc	
aika:		18/10/2013	työnsuorittaja: JH
paikka:		Poly	
materiaali:		termoelastit	
koesarja:			
ruiskutusnopeus:	(mm/s)	100	
ruiskutuspaine	(bar)	800	
painneenvaihto	hydr.(bar)		
	matka(mm)	13	
jälkipaine	(bar)	400	
jäähdytysaika	(s)	20	
jälkipaineaika	(s)	4	
annostusmatka	(mm)	82+4	
annostusnopeus	(rpm)	120	
vastapaine	(bar)	30	
tyyny(mitattu)	(mm)	4	
sylinterilämmöt	1.(C)	180	
	2.	175	
	3.	170	
	4.	165	
muottilämpötilat		40	
huomautukset,kommentit:			

Liite 3. Iskukoepöytäkirja

ISO 179

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PA (lov.)	Iskuenergia(J) 0,5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.09	3.92	1	0.137	C	4.32
2	10.06	3.92	2	0.112	C	3.54
3	10.09	3.94	3	0.132	C	4.14
4	10.06	3.92	4	0.122	C	3.86
5	10.10	3.93	5	0.118	C	3.71
6	10.09	3.93	6	0.118	C	3.71
7	10.12	3.93	7	0.108	C	3.38
8	10.20	3.93	8	0.111	C	3.44
9	10.05	3.93	9	0.148	C	4.68
10	10.15	3.93	10	0.126	C	3.93
				Keskiarvo		3.873
				Keskihajonta		0.409

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC musta (lov.)	Iskuenergia (J) 0,5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.09	3.93	1	0.292	C	9.18
2	10.12	3.92	2	0.262	C	8.23
3	10.08	3.93	3	0.323	C	10.17
4	10.10	3.92	4	0.268	C	8.44
5	10.12	3.92	5	0.287	C	9.02
6	10.01	3.92	6	0.296	C	9.43
7	10.08	3.93	7	0.266	C	8.38
8	10.11	3.92	8	0.290	C	9.12
9	10.11	3.93	9	0.285	C	8.94
10	10.14	3.93	10	0.281	C	8.78
				Keskiarvo		8.970
				Keskihajonta		0.571

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC kir- kas(lov.)	Iskuenergia (J) 0,5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.08	3.89	1	0.232	C	7.38
2	10.00	3.88	2	0.250	C	8.05
3	10.02	3.90	3	0.252	C	8.06
4	9.97	3.89	4	0.237	C	7.64
5	10.05	3.90	5	0.223	C	7.10
6	9.98	3.90	6	0.224	C	7.20
7	10.04	3.90	7	0.243	C	7.75
8	10.01	3.90	8	0.249	C	7.97
9	10.01	3.90	9	0.264	C	8.45
10	9.99	3.90	10	0.253	C	8.12
				Keskiarvo		7.773
				Keskihajonta		0.438

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC/ABS (lov.)	Iskuenergia (J) 2J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.09	3.91	1	0.399	C	12.61
2	10.10	3.93	2	0.386	C	12.13
3	10.08	3.93	3	0.918	H	28.91
4	10.07	3.93	4	0.489	C	15.42
5	10.10	3.93	5	0.806	H	25.32
6	10.13	3.93	6	0.864	H	27.04
7	10.09	3.93	7	0.482	C	15.16
8	10.12	3.93	8	0.455	C	14.26
9	10.09	3.93	9	0.849	H	26.70
10	10.18	3.93	10	0.485	C	15.09
				Keskiarvo		19.264
				Keskihajonta		6.789

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PS+maali (lov.)	Iskuenergia (J) 0,5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.09	3.94	1	0.078	C	2.45
2	10.18	3.93	2	0.057	C	1.77
3	10.16	3.94	3	0.058	C	1.80
4	10.10	3.94	4	0.072	C	2.26
5	10.12	3.90	5	0.052	C	1.64
6	10.13	3.94	6	0.072	C	2.25
7	10.14	3.94	7	0.058	C	1.81
8	10.17	3.94	8	0.075	C	2.33
9	10.17	3.94	9	0.076	C	2.36
10	10.19	3.94	10	0.076	C	2.36
				Keskiarvo		2.102
				Keskihajonta		0.306

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PS (lov.)	Iskuenergia (J) 0,5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.10	3.93	1	0.193	C	6.06
2	10.10	3.94	2	0.186	C	5.83
3	10.14	3.93	3	0.188	C	5.88
4	10.10	3.94	4	0.189	C	5.92
5	10.16	3.94	5	0.191	C	5.94
6	10.13	3.94	6	0.184	C	5.74
7	10.17	3.94	7	0.183	C	5.69
8	10.07	3.93	8	0.185	C	5.83
9	10.14	3.94	9	0.188	C	5.86
10	10.14	3.94	10	0.192	C	5.99
				Keskiarvo		5.874
				Keskihajonta		0.111

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PS+maali pakastettu	Iskuenergia (J) 2J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.08	3.93	1	0.343	C	8.66
2	10.15	3.93	2	0.411	C	10.30
3	10.12	3.93	3	0.436	C	10.96
4	10.09	3.93	4	0.401	C	10.11
5	10.09	3.93	5	0.318	C	8.02
6	10.07	3.93	6	0.307	C	7.76
7	10.08	3.93	7	0.492	C	12.42
8	10.08	3.93	8	0.410	C	10.35
9	10.06	3.94	9	0.345	C	8.70
10	10.14	3.93	10	0.452	C	11.34
				Keskiarvo		9.863
				Keskihajonta		1.529

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PS pakastettu	Iskuenergia (J) 2J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.08	3.93	1	1.682	C	42.46
2	10.06	3.94	2	1.435	C	36.20
3	10.07	3.93	3	1.687	C	42.63
4	10.17	3.92	4	1.443	C	36.20
5	10.08	3.93	5	1.255	C	31.68
6	10.16	3.93	6	1.525	C	38.19
7	10.09	3.93	7	1.617	C	40.78
8	10.10	3.93	8	1.428	C	35.98
9	10.07	3.93	9	1.690	C	42.70
10	10.11	3.94	10	1.635	C	41.05
				Keskiarvo		38.786
				Keskihajonta		3.724

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PA pakastettu	Iskuenergia (J) 5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.12	3.92	1	1.846	C	46.53
2	10.08	3.92	2	2.596	C	65.70
3	10.06	3.91	3	1.595	C	40.55
4	10.08	3.92	4	4.993	N	126.36
5	10.08	3.92	5	1.502	C	38.01
6	10.10	3.94	6	2.345	C	58.93
7	10.17	3.92	7	1.976	C	49.57
8	10.16	3.92	8	3.613	C	90.72
9	10.06	3.93	9	2.008	C	50.79
10	10.06	3.92	10	1.079	C	27.36
				Keskiarvo		59.452
				Keskihajonta		29.212

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC musta pakastettu	Iskuenergia (J) 5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.01	3.91	1	4.993	N	127.57
2	10.12	3.92	2	4.993	N	125.86
3	10.01	3.92	3	4.993	N	127.25
4	10.02	3.91	4	4.833	C	123.36
5	10.03	3.92	5	4.993	N	126.99
6	10.03	3.92	6	4.993	N	126.99
7	10.04	3.91	7	4.993	N	127.19
8	10.02	3.92	8	4.993	N	127.12
9	10.03	3.92	9	4.993	N	126.99
10	10.02	3.91	10	4.993	N	127.44
				Keskiarvo		126.676
				Keskihajonta		1.253

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC kirkas pakastettu	Iskuenergia (J) 5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	9.98	3.90	1	4.993	N	128.28
2	10.01	3.89	2	4.993	N	128.23
3	9.95	3.90	3	4.993	N	128.67
4	9.97	3.90	4	4.993	N	128.41
5	9.94	3.89	5	4.993	N	129.13
6	10.02	3.89	6	4.993	N	128.10
7	9.93	3.89	7	4.993	N	129.26
8	10.01	3.90	8	4.993	N	127.90
9	10.04	3.90	9	4.993	N	127.52
10	9.99	3.88	10	4.993	N	128.81
				Keskiarvo		128.430
				Keskihajonta		0.545

Iskukoe	Mitatut dimensiot (cm)		PC/ABS pakastettu	Iskuenergia (J) 5J vasara	Murtotyyppi	Iskulujuus (kJ/m ²)
	lev	pak				
1	10.02	3.92	1	4.991	P	127.07
2	10.08	3.92	2	4.993	N	126.36
3	10.01	3.91	3	4.993	N	127.57
4	10.03	3.91	4	4.993	N	127.32
5	10.07	3.92	5	4.993	N	126.49
6	10.02	3.92	6	4.993	N	127.12
7	10.04	3.92	7	4.993	N	126.86
8	10.05	3.93	8	4.993	N	126.42
9	10.01	3.94	9	4.993	N	126.60
10	10.14	3.93	10	4.993	N	125.29
				Keskiarvo		126.710
				Keskihajonta		0.641

Liite 4. Kovuusmittauspöytäkirja

ISO 868 Shore D-kovuus

PS

Näyte	0 s	15 s
1	78	77
2	77	75
3	77	75
4	77	75
5	74	73
KA	76.6	75
KH	1.517	1.414

PS+maali

Näyte	0 s	15 s
1	78	76
2	79	77
3	78	76
4	79	77
5	76	74
KA	78	76
KH	1.225	1.225

PC kirkas

Näyte	0 s	15 s
1	83	82
2	84	83
3	82	81
4	84	82
5	83	81
KA	83.2	81.8
KH	0.837	0.837

PC musta

Näyte	0 s	15 s
1	82	81
2	82	81
3	82	81
4	83	82
5	82	80
KA	82.2	81
KH	0.447	0.707

PC/ABS

Näyte	0 s	15 s
1	78	76
2	80	77
3	82	78
4	81	79
5	79	77
KA	80	77.4
KH	1.581	1.140

PA

Näyte	0 s	15 s
1	79	77
2	80	77
3	78	76
4	79	76
5	77	75
KA	78.6	76.2
KH	1.140	0.837

Liite 5. Palonkestotestauksien mittauspöytäkirja UL 94 V

	t(1), s	t(2), s	jälkihehku, s	huomiot
PA				
1	7		-	tiputti palavaa materiaalia sytyttäen alla olevan pumpulin samalla sammuttaen näytteen
2	6		-	"
3	7		-	"
4	7		-	"
5	7		-	"
PC musta				
1	2	2	-	
2	1	3	-	
3	1	1	-	
4	1	1	-	
5	1	1	-	
PS+maali				
1	0	0	-	palaa liekissä "iloisesti", sammutuu kun liekin vetää pois
2	0	0	-	"
3	0	0	-	"
4	0	0	-	"
5	0	0	-	"
PC/ABS				
1	15	7	-	
2	2	9	-	
3	1	4	-	
4	2	9	-	
5	1	5	-	
PC kirkas				
1	0	0	-	
2	0	0	-	
3	0	0	-	
4	0	0	-	
5	0	0	-	
PS				
1	0	0	-	
2	0	0	-	
3	0	0	-	
4	0	0	-	
5	0	0	-	

UUNITETUT

PC kirkas				
1	0	0	-	
2	0	0	-	
3	0	0	-	
4	0	0	-	
5	0	0	-	
PC/ABS				
1	0	1	-	
2	1	12	-	
3	0	27	-	
4	3	15	-	
5	0	6	-	
PS+maali				
1	3	2	15	palaa liekissä "iloisesti", sammuu kun liekin vetää pois
2	1	1	2	"
3	0	1	15	"
4	0	1	7	"
5	0	3	10	"
PC musta				
1	0	1	-	
2	0	2	-	
3	0	2	-	
4	0	3	-	
5	0	2	-	
PS				
1	0	0		
2	0	0		
3	0	0	5	
4	0	0		
5	0	0		
PA				
1	5	-	-	tiputti palavaa materiaalia sytyttäen alla olevan pumpulin samalla sammuttaen näytteen
2	6	-	-	"
3	7	-	-	"
4	6	-	-	"
5	7	-	-	"

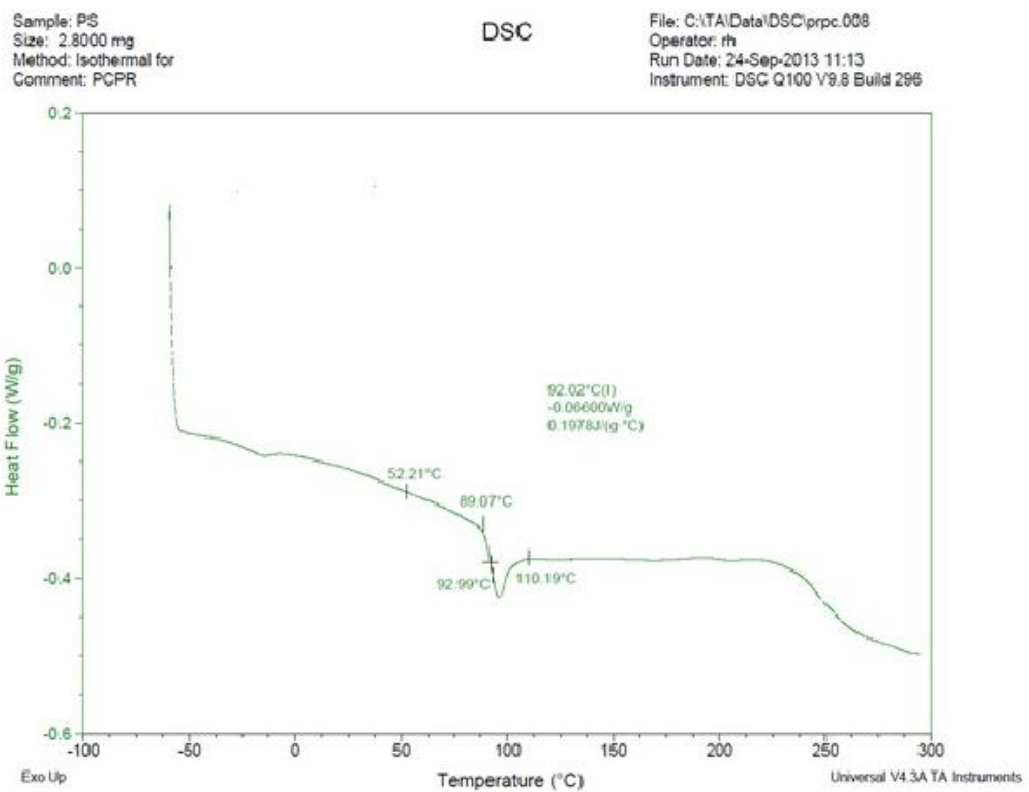
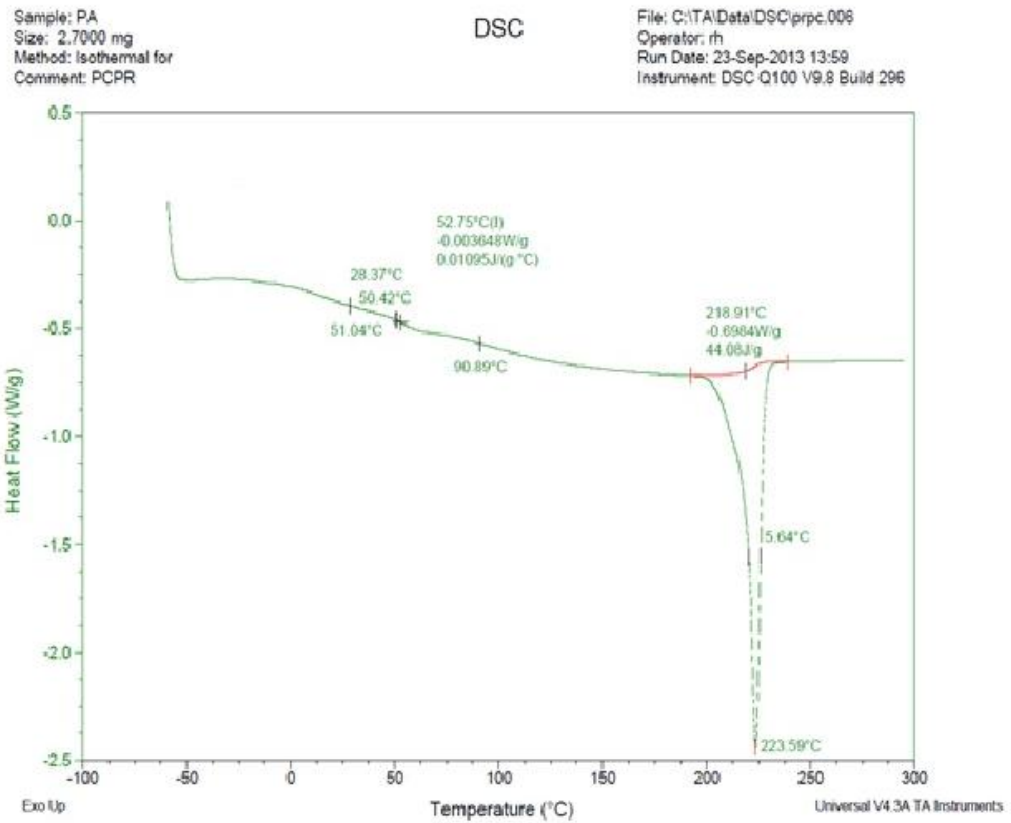
Liite 6. Sulaindeksimittauspöytäkirja

ISO 1133 menetelmä B

MVR (cm³/10 min)

Näyte	PA	PC kirkas	PC musta	PC/ABS	PS	PS+maali
1	45.047	14.93	23.417	16.256	12.127	11.995
2	44.724	14.73	23.589	16.5	12.263	11.995
3	45.323	15.136	22.932	16.839	12.592	12.039
4	45.339	15.206	23.256	17.011	12.687	12.129
5	45.971	15.348	22.932	17.279	13.25	12.448
6	45.339	15.136	23.417	17.102	13.25	12.173
7	45.955	15.136	25.593	17.555	13.41	12.495
8	45.339	15.065	23.252	17.649	13.633	12.786
9	45.971	14.93	23.09	17.555	13.803	12.544
10	45.818	15.244	22.94	17.706	13.851	12.792
ka.	45.5	15.1	23.4	17.1	13.1	12.3
kh.	0.430	0.180	0.790	0.499	0.629	0.313

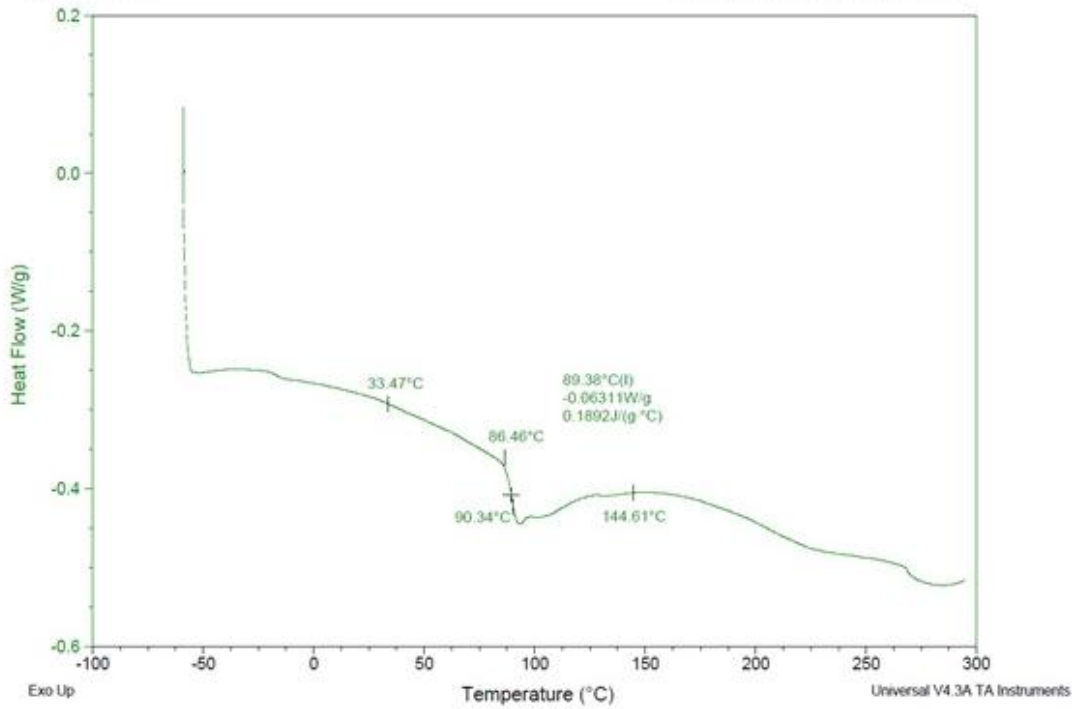
Liite 7. DSC-kuvaajat



Sample: PSmaali
 Size: 2.5000 mg
 Method: Isothermal for
 Comment: PCPR

DSC

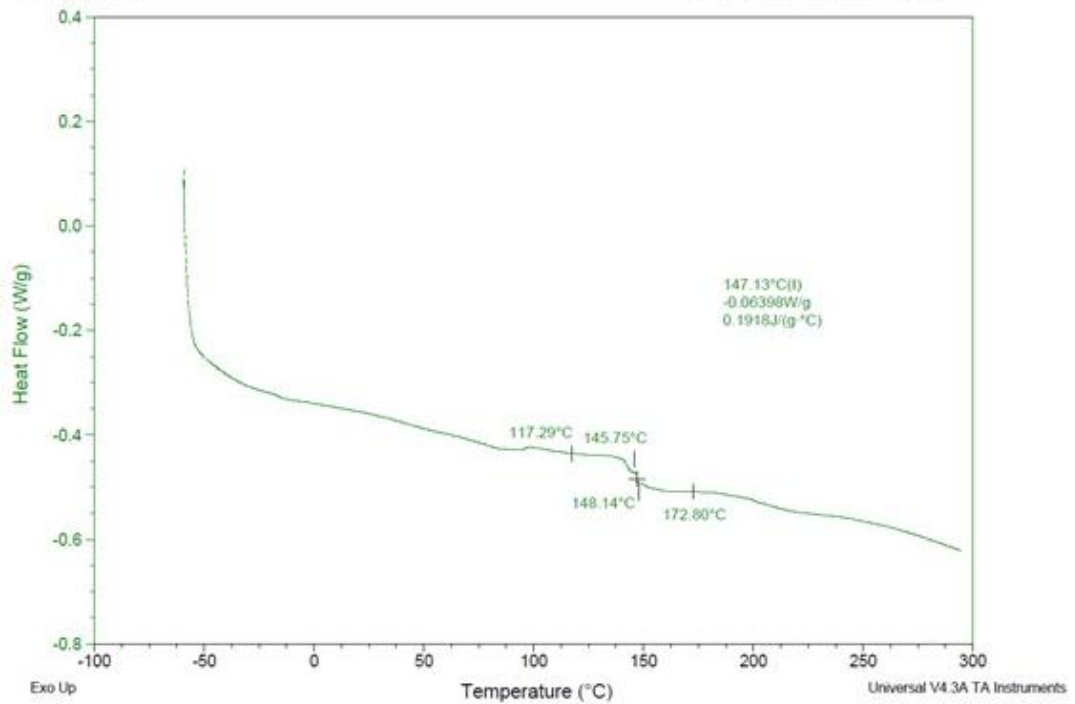
File: C:\TA\Data\DSC\prpc.005
 Operator: rh
 Run Date: 23-Sep-2013 13:31
 Instrument: DSC Q100 V9.8 Build 296



Sample: PCmusta1
 Size: 2.8000 mg
 Method: Isothermal for
 Comment: PCPR

DSC

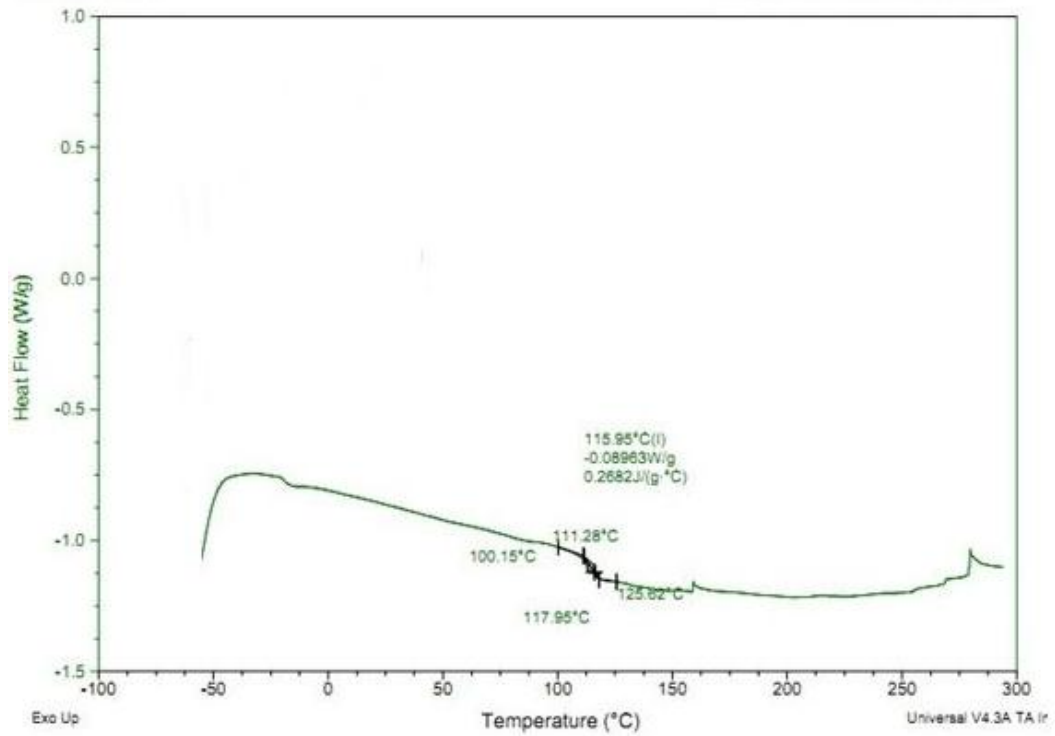
File: C:\TA\Data\DSC\prpc.007
 Operator: rh
 Run Date: 24-Sep-2013 10:42
 Instrument: DSC Q100 V9.8 Build 296



Sample: PC/ABS2
 Size: 3.0000 mg
 Method: Isothermal for
 Comment: PCPR

DSC

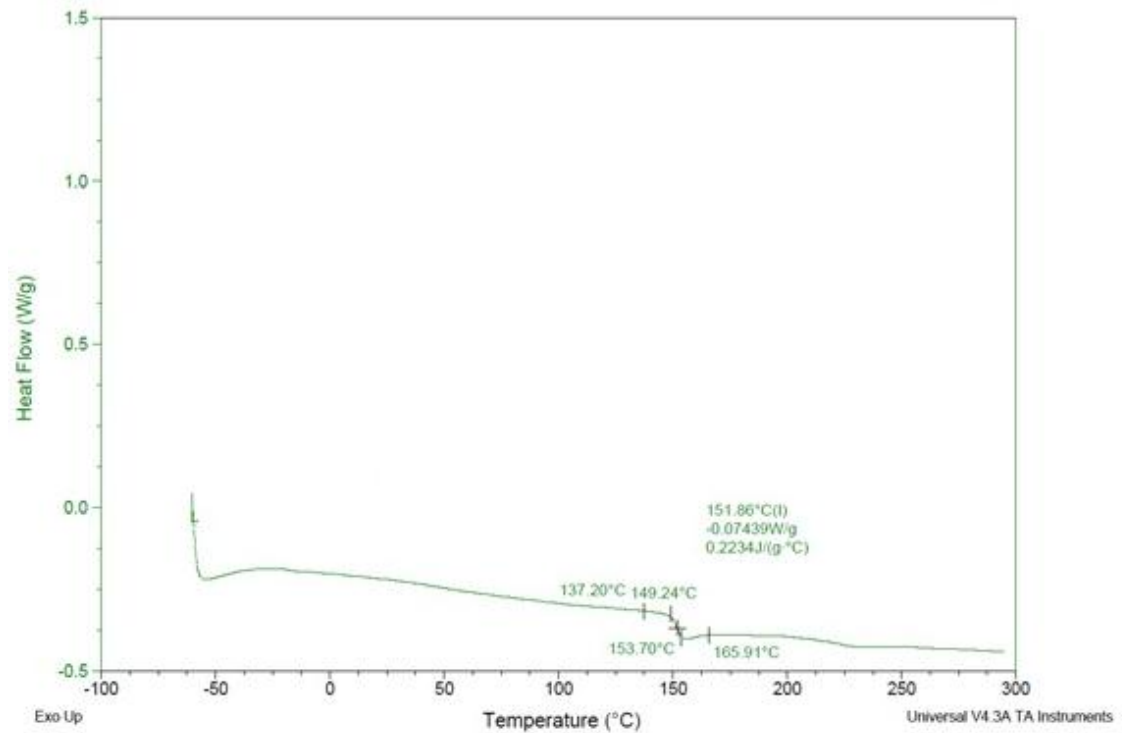
File: C:\TA\Data\DSC\prpc.010
 Operator: rh
 Run Date: 03-Oct-2013 09:34
 Instrument: DSC Q100 V9.8 Build 296



Sample: PCläpinäkyvä
 Size: 2.6000 mg
 Method: Isothermal for
 Comment: PCPR

DSC

File: C:\TA\Data\DSC\prpc.002
 Operator: rh
 Run Date: 23-Sep-2013 11:57
 Instrument: DSC Q100 V9.8 Build 296



Liite 8. Kovuusmittauspöytäkirja termoelastit ISO-868 Shore A-kovuus

100/0	1 s	15 s
1	62	57
2	61	57
3	61	57
4	59	54
5	59	56
KA	60.4	56.2
KH	1.342	1.304

80/20	1 s	15 s
1	59	57
2	59	57
3	59	57
4	58	56
5	57	55
KA	58.4	56.4
KH	0.894	0.894

40/60	1 s	15 s
1	60	56
2	60	56
3	59	56
4	59	56
5	59	55
KA	59.4	55.8
KH	0.548	0.447

60/40	1 s	15 s
1	57	55
2	59	56
3	59	57
4	59	55
5	58	55
KA	58.4	55.6
KH	0.894	0.894

20/80	1 s	15 s
1	59	57
2	59	54
3	59	55
4	58	53
5	58	53
KA	58.6	54.4
KH	0.548	1.673

0/100	1 s	15 s
1	58	55
2	59	55
3	59	56
4	60	57
5	61	57
KA	59.4	56
KH	1.140	1.000

Liite 9. Öljynkestotestausten mittauspöytäkirja UL 157

11.11-14.11

Code of test piece	Näyte	Weight (g)										Δ Vol (%)	Average ΔVol (%)	SD.
		Before Immersion					After Immersion							
		air	water	water	water	Av. Water	air	water	water	water	Av. Water			
100/0	1	2,505	0,662	0,659	0,658	0,660	2,974	0,643	0,646	0,646	0,645	26,210		
	2	2,519	0,657	0,660	0,654	0,657	2,978	0,646	0,647	0,645	0,646	25,242	25,726	0,685
80/20	3	2,451	0,618	0,619	0,619	0,619	2,880	0,608	0,608	0,609	0,608	23,977		
60/40	5	2,453	0,626	0,624	0,626	0,625	2,922	0,614	0,611	0,611	0,612	26,391		
	6	2,468	0,630	0,629	0,628	0,629	2,935	0,484	0,477	0,483	0,481	33,424	29,907	4,973
40/60	7	1,463	0,482	0,482	0,480	0,481	2,676	0,485	0,484	0,484	0,484	123,260		Virhe!
	8	2,494	0,683	0,679	0,740	0,701	2,946	0,698	0,656	0,655	0,670	26,933	75,096	68,113
20/80	9	2,469	0,629	0,629	0,629	0,629	2,953	0,600	0,602	0,603	0,602	27,790		
0/100	11	2,488	0,648	0,647	0,647	0,647	2,932	0,632	0,631	0,633	0,632	24,955		
	12	2,481	0,656	0,654	0,654	0,655	2,929	0,640	0,639	0,640	0,640	25,351	25,153	0,280

15.11-18.11

Code of test piece	Näyte	Weight (g)										Δ Vol (%)	Average ΔVol (%)	SD.
		Before Immersion					After Immersion							
		air	water	water	water	Av. Water	air	water	water	water	Av. Water			
100/0	1	2,498	0,658	0,657	0,656	0,657	2,986	0,643	0,645	0,642	0,643	27,250		
	2	2,499	0,657	0,659	0,658	0,658	2,937	0,656	0,655	0,653	0,655	23,972	25,611	2,317
80/20	3	2,444	0,621	0,622	0,621	0,621	2,937	0,605	0,606	0,606	0,606	27,908		
	4	2,556	0,656	0,655	0,655	0,655	2,967	0,623	0,625	0,625	0,624	23,255	25,581	3,290
60/40	5	2,464	0,621	0,623	0,624	0,623	2,952	0,600	0,611	0,610	0,607	27,353		
	6	2,467	0,629	0,628	0,629	0,629	2,896	0,622	0,622	0,622	0,622	23,699	25,526	1,254
40/60	7	2,468	0,634	0,635	0,634	0,634	2,890	0,589	0,588	0,588	0,588	25,523		
	8	2,494	0,664	0,664	0,665	0,664	2,900	0,637	0,651	0,654	0,647	23,119	24,321	1,700
20/80	9	2,471	0,636	0,633	0,638	0,636	2,869	0,632	0,620	0,619	0,624	22,339		
	10	2,472	0,636	0,635	0,636	0,636	2,941	0,599	0,622	0,626	0,616	26,629	24,484	3,033
0/100	11	2,488	0,657	0,655	0,657	0,656	2,924	0,645	0,647	0,645	0,646	24,386		
	12	2,485	0,653	0,654	0,654	0,654	2,877	0,645	0,643	0,644	0,644	21,933	23,159	1,734