



**LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
*Lahti University of Applied Sciences*

# PE:n lujittaminen PET-kuidulla

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Muovitekniikan koulutusohjelma  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Jenni Simonen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Muovitekniikan koulutusohjelma

SIMONEN, JENNI:

PE:n lujittaminen PET-kuidulla

Muovitekniikan opinnäytetyö, 22 sivua, 3 liitesivua

Kevät 2015

TIIVISTELMÄ

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia kestumuovikomposiitin valmistettavuutta sekä ominaisuuksia. Matriisimuoviksi valittiin korkeatiheuspolyeteeni ja lujitteeksi polyeteenitereftalaatista valmistettavat tekstiilikuidut. Työ tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun Tekniikan laitokselle.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käydään lyhyesti läpi muovikomposiittien, korkeatiheuspolyeteenin ja polyeteenitereftalaatin ominaisuuksia. Lisäksi tutustutaan työssä käytettyjen valmistus- ja testausmenetelmien perusteisiin. Valmistusmenetelminä käytettiin ekstruusiota ja ruiskuvalua sekä koekappaleiden testaukseen käytettiin veto- ja iskukoetta.

Kokeellisessa osuudessa kerrotaan raaka-aineen valmistuksesta, koesauvojen ruiskuvalamisesta sekä koekappaleille tehtyjen veto- ja iskukokeiden tuloksista. Iskulujuudessa ei ollut havaittavissa suuria eroja lujitettujen ja lujittamattomien koekappaleiden välillä. Kuitulujitus heikensi kuitenkin hiukan vetolujuutta.

Asiasanat: polyeteenitereftalaatti, korkeatiheuspolyeteeni, ekstruusio, ruiskuvalu, vetokoe, iskukoe, vetolujuus

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in plastics engineering

SIMONEN, JENNI:

Hardening Polyethylene with  
Polyethylene terephthalate

Bachelor's Thesis in plastics engineering,

22 pages, 3 pages of  
appendices

Spring 2015

ABSTRACT

---

The purpose of this study was to examine the manufacturability and properties of thermoplastic composite. The plastic matrix was High Density Polyethylene and the reinforcement material was Polyethylene terephthalate. The study was made for the Faculty of Technology of Lahti University of Applied Sciences.

The theory part deals with the properties of plastic composites, High Density Polyethylene and Polyethylene terephthalate. The study also deals with the manufacturing and test methods. Manufacturing methods were extrusion and injection molding. Test specimens were tested by tensile and impact tests.

The practical part deals with the manufacture of raw material and test specimens and the test results. In Izod impact strength tests there were no differences in the results between hardened and non-hardened test material. The only differences were found in tensile strength tests: reinforcement weakened tensile strength.

Key words: High Density Polyethylene, Polyethylene terephthalate, Izod, tensile strength

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KOMPOSIITTI	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Matriisi	2
2.3	Lujitteet	3
3	TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	4
3.1	Korkeatiheyspolyeteeni (PE-HD)	4
3.2	Polyeteenitereftalaatista valmistettavat tekstiilikuidut	5
4	TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT JA LAITTEITOT	7
4.1	Ekstruusio	7
4.2	Ruiskuvalu	8
4.3	Optinen mikroskopia	9
4.4	Iskukoe	9
4.5	Vetokoe	10
5	TUTKIMUS JA TESTITULOKSET	13
5.1	Raaka-aineen valmistus	13
5.2	Koesauvojen ruiskuvalaminen	14
5.3	Koesauvojen kutistumat	16
5.4	Optinen mikroskopia	16
5.5	Iskukoe	17
5.6	Vetokoe	20
6	YHTEENVETO	22
	LÄHTEET	23
	LIITTEET	25

## 1 JOHDANTO

Komposiitiksi kutsutaan kahden fyysisiltä ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan erilaisen materiaalin muodostamaa toimivaa kokonaisuutta, jossa materiaalit eivät ole lienneet toisiinsa. Komposiitti koostuu yleensä polymeeripohjaisesta matriisista sekä kuitulujitteesta. (Muoviteollisuus ry 2015.) Tämän työn matriisimuoviksi valittiin Borealixen BL1481-korkeatiheyspolyeteeni. Kuidut valmistettiin tekstiilijätteeksi kelpaavasta fleece-kankaasta, jota voidaan valmistaa virvoitusjuomapullojen uudelleen valmistukseen soveltumattomasta polyteenitereftalaatista valmistettavista kuiduista.

Komposiittien tyypillisiä ominaisuuksia ovat mm. keveys, korkea lujuus suhteessa painoon sekä hyvä iskulujuus ( Muoviteollisuus ry 2015). Työn tarkoituksena oli tutkia kestumuovikomposiitin valmistettavuutta sekä ominaisuuksia. Työssä otettiin huomioon myös ympäristöystävällisyys, sillä lujitekuituna käytettiin kierrätettyä kuitua.

## 2 KOMPOSIITTI

### 2.1 Yleistä

Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman materiaalin yhdistelmiä, joissa materiaalit vaikuttavat yhdessä, mutta jotka eivät ole liuenneet toisiinsa.

Mikroskooppitarkastelussa komposiitin aineet voidaan nähdä omina faaseinaan.

Komposiitissa yhdistyvät sen materiaalien parhaat ominaisuudet.

Komposiittitekniikalla pyritään parantamaan mm. lujuutta, sitkeyttä, jäykkyyttä sekä keventämään rakennetta. Komposiitin ominaisuudet riippuvat matriisin, seosaineen ja niiden välisen rajapinnan ominaisuuksista, seosaineen määrästä, jakautumasta ja suunnasta sekä komposiitin valmistusmenetelmästä. (Koivisto, Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka & Tuomikoski 2010, 218-220.)

Kompaundilla tarkoitetaan komposiittia, jossa muoviin on seostettu pieniä kiinteitä partikkeleita tai lyhyitä lujitekuituja. Muovien lujittamisen tarkoituksena on lähinnä vetolujuuden ja kimmomoduulin suurentaminen. Seosaineilla pyritään parantamaan iskusitkeyttä, kovuutta ja kulutuskestävyyttä. Muovikomposiittien käyttökohteita ovat mm. urheilu- ja autoteollisuuden tuotteet. (Koivisto ym. 2010, 220.)

### 2.2 Matriisi

Matriisilla tarkoitetaan komposiitin kokonaisuudeksi sitovaa aineosaa. Matriisin yhteen sitomat muut aineosat voivat olla esimerkiksi hienojakoisia partikkeleita tai kuituja. Muovikomposiiteissa muoviaine toimii komposiitin matriisina.

Matriisimuovi voi myös olla kahden tai useamman muovin seos. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars & Komppa 2007, 17.)

Kertamuovit käyvät lujitemuovisovelluksiin erittäin hyvin. Kertamuoveilla tarkoitetaan polymeerejä, jotka kovettuvat nestemäisestä hartsista kiinteäksi aineeksi kovettumisreaktiossa. Lujitteiden ja täyteaineiden osuus on yleensä 30–70 p% koko kertamuovituotteesta. Eniten käytettyjä kertamuoveja ovat tyydyttämättömät polyesterit, epoksit ja vinyyliesterit. Kertamuovien työstö on helppoa, jos niiden korroosionkestävyys ja lämmönkestävyys ovat pääsääntöisesti

paremmat kuin kestopuoveilla. Lisäksi mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat paremmat kuin kestopuoveilla. Kertamuovien huonoja puolia ovat heikko iskunkestävyys ja pidemmät valmistusajat verrattuna kestopuovituotteisiin. Lisäksi kertamuoveja ei voida enää muovata lämmön avulla uudelleen. (Saarela ym. 2007, 35.)

Kestomuoveja käytetään myös muovikomposiittien matriisina. Kestomuoveilla tarkoitetaan muoveja, joita voidaan uudelleen muovata lämmön avulla rakenteen muuttumatta. Eniten käytettyjä kestopuoveja ovat polypropeeni ja polyamidi. Lujitettujen kestopuovien työstö, ominaisuudet ja sovelluskohteet ovat erilaisia verrattuna lujitettuihin kertamuoveihin. Lujitettuja kestopuoveja käytetään prepregeinä tai lyhyitä lujitekuituja sisältävinä granulaatteina. Granulaatteja työstetään pääasiallisesti ruiskuvalamalla. Prepregit työstetään puristamalla, kelaamalla tai pultruusiolla. (Saarela ym. 2007, 53.)

### 2.3 Lujitteet

Lujitteiden tarkoitus on kantaa komposiittiin kohdistuvat kuormitukset. Muovien varsinaisiksi lujitteiksi katsotaan kuidut. Yleisimpiä kuituja ovat esimerkiksi lasi-, hiili- ja aramidikuidut. Täyte- ja muilla lisäaineilla voidaan myös parantaa mekaanisia ominaisuuksia. (Saarela ym. 2007, 74.)

Yksittäiset lujitekuidut ovat ohuita, ja ne kootaan jatkojalostuksessa kierteettömiksi kuitukimpuiksi tai kierretyiksi langoiksi. Kuitukimppuja ja lankoja voidaan käyttää sellaisenaan, mutta moniin valmistusmenetelmiin soveltuvat paremmin kuitukimpuista ja langoista tuotetut jatkojalosteet. Eniten muovikomposiittituotteiden valmistuksessa käytetään tasolujitteita, joista yleisimpiä ovat lujitematot ja lujitekankaat. Lujitteiden muita käyttömuotoja ovat esimerkiksi punokset sekä neulomalla valmistetut tuotteet. (Saarela ym. 2007, 19-20.)

### 3 TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

#### 3.1 Korkeatiheyspolyeteeni (PE-HD)

Eteeniä polymeroimalla voidaan valmistaa polyeteeniä. Polyeteeni voidaan jaotella eri luokkiin tiheyden ja haarautuneisuuden perustuen. PE-HD:llä ketjujen haarautuminen on vähäistä ja kiteisyys on 75-85%. Polyeteeni on yksi eniten käytetyistä muoveista. PE-HD:tä käytetään erilaisissa tuotteissa ja pakkauksissa, kuten roskapöntöissä ja pesuainepulloissa. Polyeteeniä voidaan prosessoida mm. ekstruusiolla, ruiskuvalulla sekä tyhjiömuovauksella. (Kolev 2015.)

PE-HD:n etuja ovat hyvä kemiallinen kestävyys, hyvät sähköiset eristysominaisuudet sekä edullisuus. Rajoituksia ovat huono lämmönkesto, suhteellisen alhaiset mekaaniset ominaisuudet sekä vahamainen pinta. Taulukossa 1 on esitetty työssä käytettävän Borealiksen BL1481-korkeatiheyspolyeteenin ominaisuuksia. Taulukossa 2 on esitetty PE-HD:n kirjallisuudesta löytyviä ominaisuuksia. (Kolev 2015; British Plastics Federation 2015.)

TAULUKKO 1. BL1481-korkeatiheyspolyeteenin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet (MatWeb, LLC 2015)

Tiheys	948 kg/m <sup>3</sup>
Sulamassavirtaluku (190°C/21,6kg)	7g/10 min
Vetokimmomoduuli	1 Gpa
Venymä myötörajalla	10,00 %
Jännitys myötörajalla	24 Mpa
Kovuus, Shore D	62
Charpy lovettu iskulujuus (23°C)	2,5 J/cm <sup>2</sup>



TAULUKKO 2. Korkeatiheyspolyeteenin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet (Valtanen 2010, 954-955)

Tiheys	940-965 kg/m <sup>3</sup>
Lineaarinen kutistuma valussa	2-5 %
Vetokimmomoduuli	410-1400 N/mm <sup>2</sup>
Murtovenymä	20-1000%
Vetolujuus	22-35 N/mm <sup>2</sup>
Kovuus, Shore D	60
Izod lovettu iskulujuus (23°C)	0,3-10,7 J/cm <sup>2</sup>

### 3.2 Polyeteenitereftalaatista valmistettavat tekstiilikuidut

Polyesterimuoveista puhuttaessa tarkoitetaan tavallisesti tereftaalihapon ja eteeniglykolin polymerointituotetta polyeteenitereftalaattia. Polyeteenitereftalaatti soveltuu kalvojen ja kuitujen valmistukseen. Suurin osa polyeteenitereftalaatin käytöstä menee virvoitusjuomapullojen valmistukseen. (Seppälä 2008, 207.)

Tekstiilimateriaalina polyesterillä tarkoitetaan suoraketjuisia polymeerejä, joiden ketjuissa on vähintään 85 painoprosenttia jonkin diolin ja tereftaalihapon estereitä. Tekstiilimateriaaleissa käytetään lyhennettä PES, PL tai PET. Muovitekniikassa käytetään lyhennettä PET. Fleece-kankaita valmistetaan virvoitusjuomapullojen uudelleen valmistukseen soveltumattomasta PET:stä valmistettavista kuiduista. (Polyko 2010.)

Polyeteenitereftalaatin parhaita ominaisuuksia lujuuden ohella on hyvä vedenkesto. PET kestää myös hyvin UV-valon ja muiden säteekijöiden vaikutusta. Polyeteenitereftalaatin edut ja rajoitukset on koottu taulukkoon 3. (Polyko 2010.)

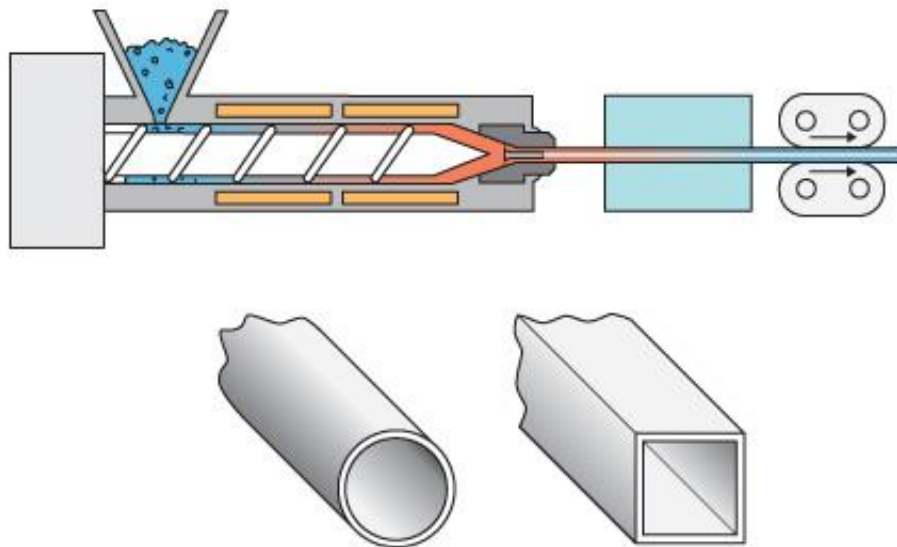
TAULUKKO 3. Polyeteenitereftalaatin edut ja rajoitukset (Polyko 2010)

<b>Hyviä ominaisuuksia</b>	<b>Rajoituksia</b>
<b>Suuri lujuus ja jäykkyys</b>	<b>Pieni iskulujuus</b>
<b>Hyvä mittapysyvyys</b>	<b>Huono hydrolyysin kesto</b>
<b>Hyvä sään- ja säteilyn kestävyys</b>	<b>Prosessointi vaatii huolellisuutta</b>
<b>Hyvä luisto- ja kulumisomin.</b>	<b>Rajoitettu kemikaalinkestävyys</b>
<b>Hyvä värjättävyys</b>	
<b>Läpinäkyvyys</b>	
<b>Pieni veden absorptio</b>	
<b>Pieni kaasujen läpäisevyys</b>	
<b>Hyvä sähköneristävyys</b>	

## 4 TYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT JA LAITTEITOT

### 4.1 Ekstruusio

Ekstruusiossa eli suulakepuristuksessa muovigranulaatti sulatetaan, sekoitetaan mahdollisten lisäaineiden kanssa ja työnnetään muotoillun suulakkeen läpi. Ekstruusio on usein osa isompaa kokonaisuutta, jossa tuotteelle annetaan lopulliset mitat ja tarkka muoto. Menetelmällä valmistettavia tuotteita ovat mm. putket, levyt ja kalvot. Kuviossa 1 on esitetty ekstruuderin toiminta. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2002, 98.)

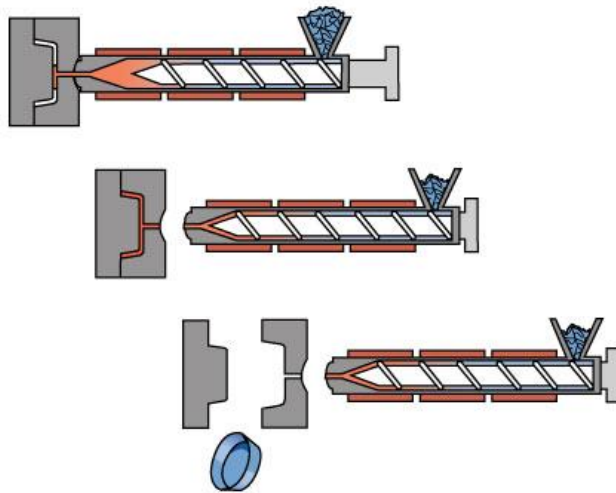


KUVIO 1. Ekstruuderin toiminta (Vienamo & Nykänen 2015a)

Ekstruuderin plastisointiyksikön muodostavat sylinteri ja ruuvi. Ruuvin tarkoituksena on sulattaa, kuljettaa ja homogenisoida muovigranulaatit ennen suutinta. Sylinterin ympärillä olevilla kuumennusvastuksilla voidaan säätää haluttu lämpötilaprofiili. Lämmitysvyöhykkeisiin on myös yleensä kytketty jäähditysmahdollisuus. Ruuvin ja suuttimen välillä olevan sihtipakan tarkoituksena on suodattaa epäpuhtaudet pois muovimassasta, nostaa painetta sopivaksi sylinterissä sekä auttaa pysäyttämään turbulenssi sulassa raaka-aineessa. Suuttimessa sula muovimassa saa halutun poikkileikkausmuodon. (Seppälä 2008, 263-266.)

## 4.2 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yksi käytetyimmistä muovituotteiden valmistusmenetelmistä ja sitä käytetään suurten sarjojen valmistamiseen. Sillä voidaan valmistaa mm. kojelautoja, purkkeja ja pelivälineitä. Menetelmässä muovigranulaatti plastisoidaan paineen, kitkan ja lämmön avulla sulaksi massaksi, joka ruiskutetaan ruuvin avulla suljettuun muottiin. Kuviossa 2 on esitetty ruiskuvalun yksi valu ja muotin tyhjennys. (Vienamo & Nykänen 2015c.)



KUVIO 2. Ruiskuvalun jaksonajan vaiheet: muotin sulkeutuminen ja täyttyminen, muovin jäähtyminen sekä muotin avautuminen ja tuotteen poisto muotista (Vienamo & Nykänen 2015c)

Ruiskuvalun annosteluvaiheessa muovi sulatetaan sylinterissä homogeeniseksi massaksi lämmön ja kitkan avulla ruuvin vetäytyessä taakse ja työntäessä sulan muovimassan eteen. Ruiskutusvaiheessa ruuvi siirtyy eteenpäin puristaen sulan massan suurella paineella ja yleensä suurella nopeudella suuttimen kautta suljettuun muottiin. Ruiskutuksen loppuvaiheessa vaihdetaan pienempään jälkipaineeseen, joka korvaa jäähtyneen materiaalin kutistumisesta johtuvan tilavuuden. Jäähdytyksen aikana muovisula jähmettyy muottipesän muotoiseksi. Kappaleen jäähtyttyä muottipuoliskot avataan, ja valmis kappale työnnetään ulos muotista. Muotti suljetaan ja ruiskuvaluprosessi voidaan aloittaa uudelleen. (Seppälä 2008, 277-278.)

### 4.3 Optinen mikroskopia

Valo- eli Optista mikroskopiaa käytetään mm. laadunvalvonnassa, koska menetelmän avulla voidaan selvittää mm. suurikokoisten partikkeleiden jakauma näytteessä ja kappaleiden rakennevirheitä. Menetelmän avulla voidaan tarkastella ohuita näytteitä läpivalaisten sekä kappaleiden pintoja. Optisella mikroskopiolla voidaan näytteestä havaita makroskooppisia ja sferuliittisiä piirteitä. (Seppälä 2008, 114.)

Valomikroskoopin erotuskyky on parhaimmillaan noin 30 nm ja suurennus 2000-kertainen. Valomikroskopia perustuu vuorovaikutukseen valon ja näytteen välillä. Muoveja tutkittaessa käytetään läpivalaisumikroskopiaa, jossa on tärkeää valmistaa ohuita näytteitä (10-100  $\mu\text{m}$ ). Kontrastin parantamiseksi voidaan käyttää erilaisia tekniikoita kuten esimerkiksi selektiivistä värjäystä. (Seppälä 2008, 114-115.)

### 4.4 Iskukoe

Iskulujuuskokeessa koesauvat kiinnitetään heilurivasaralla varustettuun laitteeseen vasaran katkaistaviksi. Iskurin katkaistua koesauvan saadaan katkaisussa kulunut energia mitattua iskun jälkeisestä iskurin heilahduksesta. Eri menetelmät eroavat toisistaan kiinnitystavoistaan. (Kurri ym. 2002, 192.)

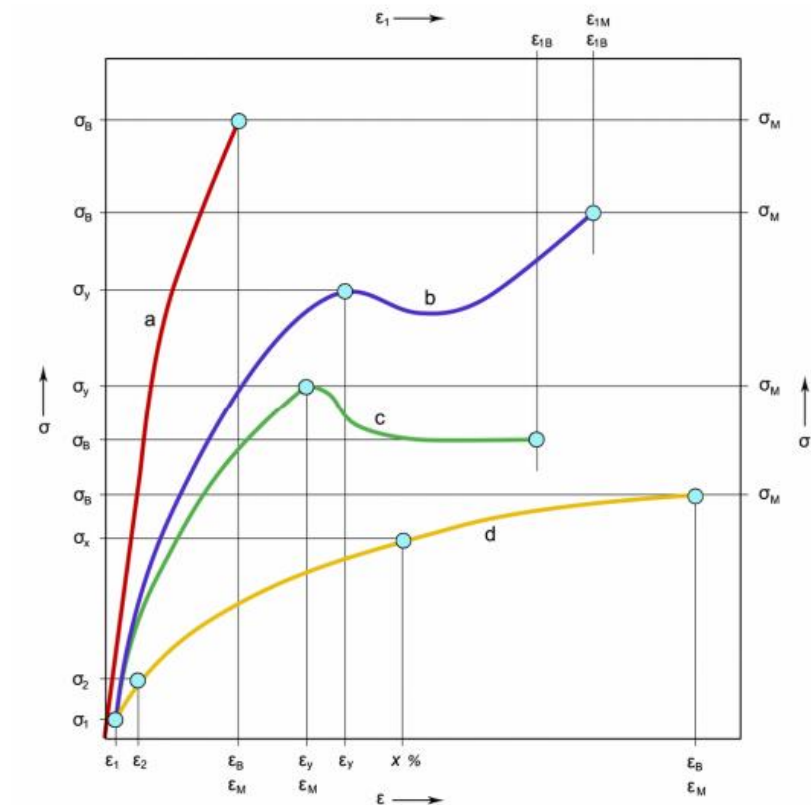
Izod-iskulujuuskokeessa koesauva kiinnitetään pystysuoraan mittauslaitteeseen. Heilurin isku kohdistuu sauvan vapaaseen päähän loven yläpuolelle. Menetelmällä saadaan tuloksia lovetetun ja loveamattoman koekappaleen Izod-iskulujuudesta. Koekappaleena käytetään yleiskoekappaleen keskiosaa. Iskulujuus ilmaistaan katkaisuun kuluneena työnä jaettuna koekappaleen läpileikkauksen pinta-alalla ( $\text{kJ/m}^2$  tai  $\text{mJ/mm}^2$ ). Lovetetussa kappaleessa poikkileikkauspinta-ala määrätään loven kohdalta. (Seppälä 2008, 78-79.)

#### 4.5 Vetokoe

Vetolujuusmittauksella saadaan tietoa materiaalin lujuus- ja sitkeysikäytymisestä sekä jäykkyydestä. Vetolujuusmittaus on yleisimmin käytetty polymeerien mekaanisten ominaisuuksien mittaamenetelmä. Standardeissa ISO 527-1:1993 – ISO 527-5:1997 vetolujuutta määritetään venyttämällä koekappaletta vakionopeudella ja rekisteröimällä samalla siihen tarvittava voima. Tuloksena saadaan vetolaitteen piirturin piirtämä voima-venymä -diagrammi. (Seppälä 2008, 69.)

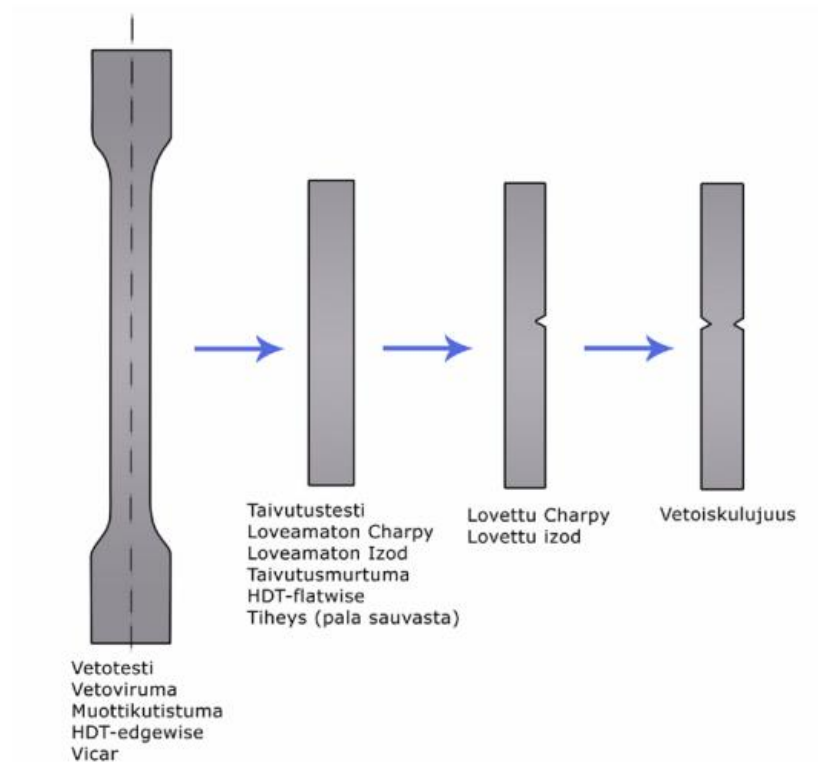
Voima-venymä -käyrän avulla voidaan laskea jännitys-venymä -käyrä. Jännitys ( $\sigma$ ) voidaan laskea jakamalla vetokokeesta saatu voima kappaleen alkuperäisellä poikkipinta-alalla. Venymä ( $\epsilon$ ) voidaan laskea jakamalla koekappaleen pituuden lisäys mittamerkkien välissä koekappaleen alkuperäisellä mittamituudella. Venymäärvo voidaan ilmoittaa laaduttomana suhteenä tai prosentteina. (Kurri ym. 2002, 191.)

Jännitys-venymä -käyrästä voidaan lukea erilaisia parametrejä kuten vetomurtolujuus ja sitä vastaava venymä. Vetokimmomoduuli mitataan käyrän lineaariselta alkuosuudelta venymävälillä 0,05-0,25 % ja se on jännityksen suhde vastaavaan venymään. Jännitys-venymä -käyrien avulla voidaan verrata eri muoveja keskenään, sillä käyrän muoto riippuu muovin ominaisuuksista. Kuviossa 3 on esitetty erilaisille polymeereille tyypillisiä jännitys-venymä -käyriä. (Seppälä 2008, 70-72.)



KUVIO 3. Polymeerien jännitys-venymä -käyriä. a) hauraat polymeerimateriaalit b) ja c) sitkeät muovit, joilla on myötöraja d) sitkeät polymeerimateriaalit, joilla ei ole selkeää myötörajaa (Polyko 2009)

Koekappaleen muoto ja mitat vaikuttavat aineenkoetuksessa käytettävien testien tuloksiin. Vetokokeessa suositellaan käytettäväksi standardin ISO 3167 mukaista yleiskoekappaletta. Standardien mukaisten koekappaleiden valmistuksessa voidaan käyttää mm. ruiskuvalua, mekaanista työstöä sekä stanssausta. Kuviossa 4 on esitetty standardin ISO 3167 mukainen yleiskoekappale. (Polyko 2009.)



KUVIO 4. Standardin mukainen yleiskoe-kappale (Polyko 2009)



## 5 TUTKIMUS JA TESTITULOKSET

### 5.1 Raaka-aineen valmistus

Fleece-kankaasta leikattiin saksilla pieniä paloja, jotka eivät sisältäneet vaatteessa olevia saumoja. Kankaan palat murskattiin Rapid-murskaimella. Murskaimen terien tukkeutuminen pyrittiin estämään tekemällä kankaan palasista mahdollisimman pieniä. Osa kankaasta jäi kuitenkin jumiin murskaimen, koska kuidut tukkivat terät. Tukokset poistettiin terien välistä ja syötettiin uudelleen murskaimen. Kuitumurskaa kerättiin tyhjennysastiasta ja koneen sisältä terien välistä. Kuitumurska sekoitettiin PE-HD:n kanssa ja sekoitettu materiaali sisälsi 5 p% kuitua. Kuvassa 1 on esitetty korkeatiheuspolyeteenigranulaatteja sekoitettuna kuitumurskaan.



KUVA 1. Korkeatiheuspolyeteenigranulaatteja sekä kuitumurskaa

Kuitumurska ja korkeatiheuspolyeteenigranulaatit ajettiin Brabender-ekstruuderilla nauhaksi, jotta materiaali olisi tarpeeksi homogeenistä ruiskuvalua varten. Syöttösuppiloon laitettiin pieni määrä raaka-ainetta kerrallaan ja raaka-aineen holvaantuminen pyrittiin estämään syöttösuppiloa ravistamalla. Ekstruuderista tuleva 165 asteinen nauha katkaistiin pieniksi paloiksi ja palojen annettiin jäähtyä. Lopuksi nauhan palat murskattiin pieneksi rouheeksi. Kuvassa 2 on esitetty valmis materiaali ruiskuvalua varten.



KUVA2. Valmis raaka-aine

## 5.2 Koesauvojen ruiskuvalaminen

Koesauvojen materiaalina käytettiin Borealiksen BL1481-korkeatiheuspolyeteeniä, jonka sekaan oli lisätty 5 p% kuitua. Vertailunäytteeksi valmistettiin neitseellistä raaka-ainetta sisältävät koesauvat. Sauvoja valmistettiin veto- ja iskukokeita varten KraussMaffei-ruiskuvalukoneella.

Ruiskuvalukoneen ajo-olosuhteet säädettiin materiaaleille sopiviksi ennen varsinaisten koesauvojen valmistamista. Työstölämpötiloina käytettiin samoja arvoja kuin ekstruusiossakin muovien vaatimien prosessointilämpötilojen mukaisesti. Taulukkoon 4 on listattu koesauvojen valmistuksessa käytettävät ajoarvot.

TAULUKKO 4. Ruiskuvalun ajoarvot

Ruiskuvalu ajoarvot		
Lämpötilat	Syöttövyöhyke	160°C
	Sylinteri 1	170°C
	Sylinteri2	180°C
	Suutin	180°C
Jälkipaine	Paine	700 bar
	Aika	10s
Ruiskutus	Nopeus	50s
	Paine	1200 bar
Plastisointi	Pyörimisnopeus	200 r/min
	Paine	0 bar
Muotinlämpötila		30°C

Ennen varsinaisten koesauvojen valmistamista sulaa muovimassaa ajettiin suuttimen läpi, jotta valmiisiin kappaleisiin ei jäisi edellisen ajon materiaalia. Kappaleiden ruiskuvalaminen onnistui ilman suurempia ongelmia. Koesauvoja valmistettiin noin kolmekymmentä kappaletta molemmista materiaaleista aineenkoetuskokeita varten. Kuvassa 3 on esitetty ruiskuvaletut yleiskoe-kappaleet, jotka ovat standardin SFS-EN ISO 3167 mukaisia.



KUVA 3. Ruiskuvaletut koesauvat

### 5.3 Koesauvojen kutistumat

Muovit kutistuvat jäähtyessään. Muottikutistumalla tarkoitetaan lopullisen tuotteen ja kappaleen valmistukseen käytetyn muotin välistä tilavuuseroa. Osakiteisillä muoveilla kutistuminen saattaa jatkua jopa seuraavaan päivään. Tällöin puhutaan jälkikutistumasta. Muottikutistumaan vaikuttavat monet tekijät kuten esimerkiksi muottilämpötila, jälkipaineaika sekä muovilaji ja sen kiteisyysaste. (Vienamo & Nykänen 2015b.) Muottikutistuman ja jälkikutistuman yhteisvaikutuksella tarkoitetaan kokonaiskutistumaa.

Kutistuman laskemista varten molemmista materiaaleista valmistetuista koesauvoista valittiin viisi koesauvaa. Sauvoista mitattiin pituudet muutaman päivän jälkeen ruiskuvalusta. Kutistumaa laskettaessa koesauvan alkuperäiseksi kokonaispituudeksi oletettiin 169,8 mm. Taulukossa 5 on esitetty viiden rinnakkaismittauksen kutistumien keskiarvot ja keskihajonnat.

TAULUKKO 5. Kutistumien keskiarvot ja keskihajonnat

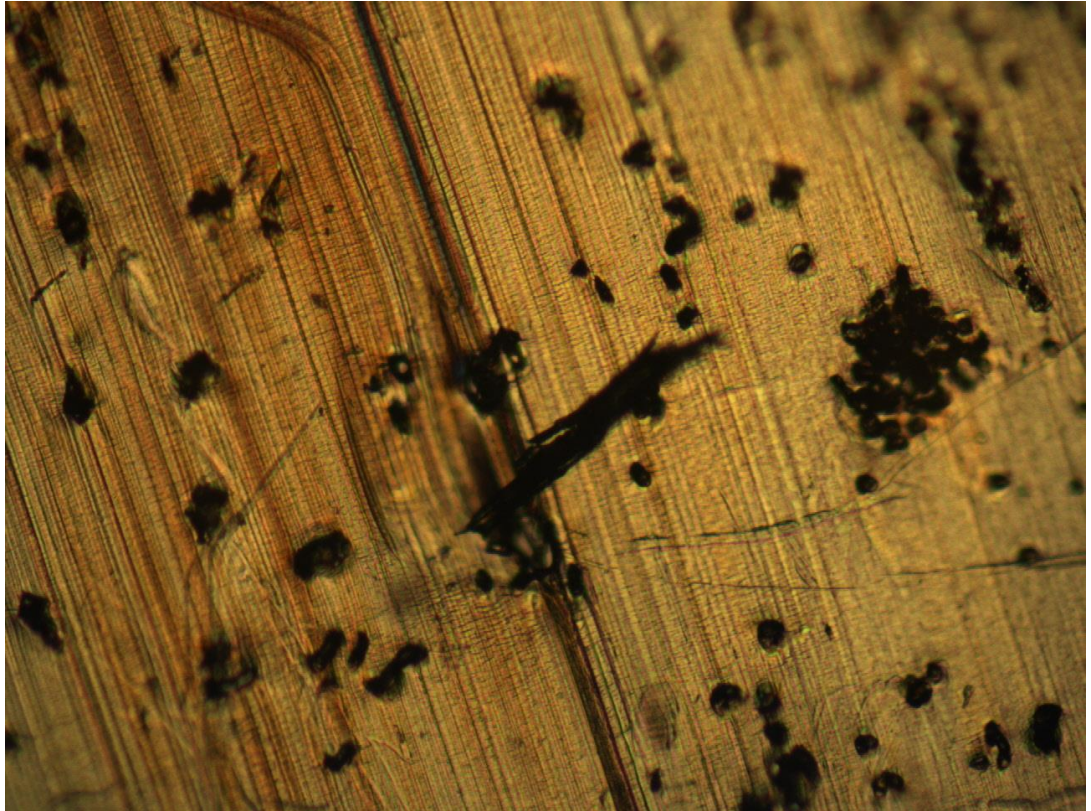
Koesauvojen kutistumat		
Materiaali	Kutistuma (%)	
	ka.	kh.
PE-HD	3,13	0,09
PE-HD + PET	3,1	0,16

Molemmilla materiaaleilla tapahtui jonkin verran muutoksia dimensioissa kutistumaa mitattaessa. PET-kuidulla ei ollut kuitenkaan suurta vaikutusta kutistumaan. Molemmat materiaalit kutistuivat melkein saman verran. Korkeatiheyspolyeteenin lineaarinen kutistuma valussa on 2-5% (taulukko 2). Näin ollen saatujen mittausten keskiarvo 3,13% vaikuttaa siis luotettavalta.

### 5.4 Optinen mikroskopia

Optisen mikroskoopin avulla tutkittiin komposiitin rakennetta. Kuvassa 4 on esitetty mikroskooppikuva muovikomposiitista. Lujitekuidut ovat kestäneet hyvin prosessointilämpötilat. Komposiitissa on nähtävissä kuitukimppuja sekä

yksittäisiä kuituja. Kuitujen epätasainen jakautuminen matriisiin saattaa heikentää komposiitin mekaanisia ominaisuuksia, sillä paljon kuitukimppuja sisältävässä rakenteessa kuormitus ei pääse siirtymään tehokkaasti matriisilta kuitujen kannettavaksi. Myöskin matriisin ja lujitteiden välinen adheesio eli luja kiinnittyminen toisiinsa on tärkeää.



KUVA 4. Mikroskooppikuva komposiitista

### 5.5 Iskukoe

Materiaaleista tehtiin Izod-iskukoelaitteella viisi rinnakkaiskoetta lovetuille koekappaleille ja viisi rinnakkaiskoetta loveamattomille koekappaleille. Kaikki lovetut koekappaleet murtuivat kahteen osaan. Kuvassa 5 on esitetty lovetut koekappaleet, jotka murtuivat täydellisesti. Ylempänä kuvassa on kuitulujitettu koekappale ja alempana on lujittamaton koekappale. Loveamattomat koekappaleet murtuivat epätäydellisesti. Kuvassa 6 on esitetty loveamattomat koekappaleet. Ylempänä kuvassa on kuitulujitettu koekappale ja alempana kuvassa on lujittamaton koekappale.



KUVA 5. Lovetut koekappaleet iskukokeen jälkeen



KUVA 6. Loveamattomat koekappaleet iskukokeen jälkeen

Iskukokeiden viiden rinnakkaiskokeen tuloksien keskiarvot ja keskihajonnat on esitetty taulukoissa 6 ja 7. Lujittamattomilla ja lujitetuilla koekappaleilla ei ollut paljon eroa Izod-iskulujuusarvoissa. Loveamattomilla koekappaleilla oli kuitenkin suuremmat Izod-iskulujuusarvot kuin lovetuilla.

TAULUKKO 6. Lovetettujen koekappaleiden iskulujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat

Materiaali	Iskulujuus (KJ/m <sup>2</sup> )	
	ka.	kh.
PE-HD	36,56	0,86
PE-HD + PET	36,88	11,35

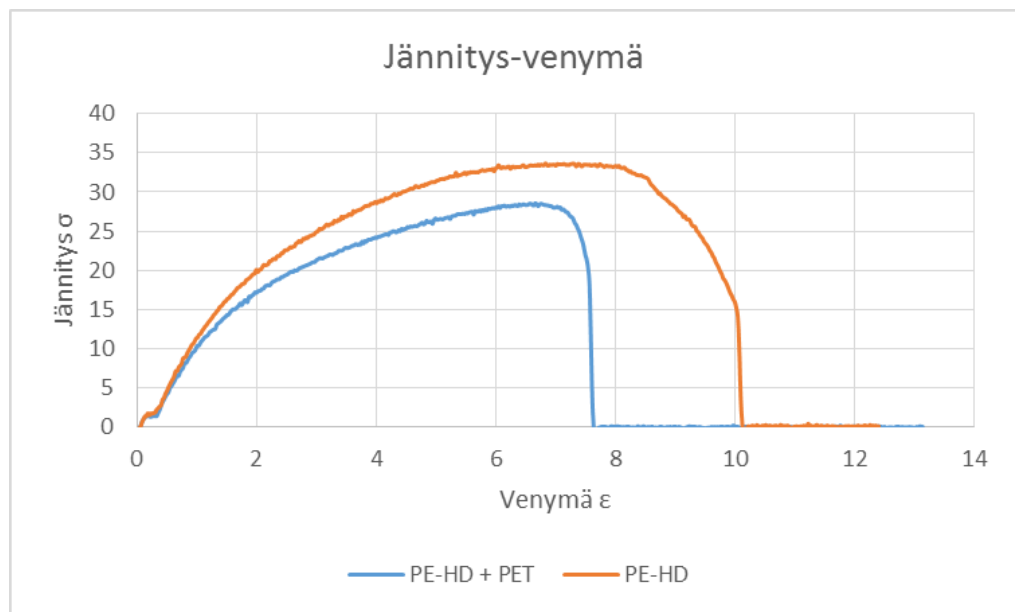
TAULUKKO 7. Loveamattomien koekappaleiden iskulujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat

Materiaali	Iskulujuus (KJ/m <sup>2</sup> )	
	ka.	kh.
PE-HD	60	1,53
PE-HD + PET	58,75	8,39

Kuitulujitetuilla koekappaleilla esiintyi suurta hajontaa mittaustuloksissa, sillä kuidut eivät olleet tasaisesti sekoittuneet valmistuksen aikana matriisimuoviin. Tästä johtuen koekappaleista oli vaikea saada vertailukelpoisia tuloksia. Kokeessa esiintyvien epävarmuustekijöiden takia koetuloksien hyödyntäminen rajoittuu paremminkin materiaalivertailuihin. Materiaalin valmistajan Charpy-iskukoemenetelmällä saatu tulos 25 kJ/m<sup>2</sup> korkeatiheuspolyeteenille (taulukko 1) eroaa saatujen mittausten keskiarvosta 36,56 kJ/m<sup>2</sup>. Korkeatiheuspolyeteenin Izod-iskulujuus lovetulle koekappaleelle on 3-107 kJ/m<sup>2</sup> (taulukko 2). Näin ollen saatujen mittausten keskiarvo vastaa kuitenkin korkeatiheuspolyeteenin kirjallisia Izod-iskulujuusarvoja.

## 5.6 Vetokoe

Materiaaleista tehtiin Shimadzu-vetokoneella viisi rinnakkaiskoetta koesauvoille. Vetonopeutena kaikissa kokeissa käytettiin 50 mm/min. Kimmokerrointa määritettäessä vetokoneen nopeuden tulisi kuitenkin olla huomattavasti pienempi eli 1 mm/min. Kokeesta saatujen voima- ja venymäarvojen perusteella voitiin laskea jännitys-venymä -käyrät. Kuviossa 5 on esitetty kahden koesauvan jännitys-venymä-kuvaajat, jotta saatuja tuloksia voitiin vertailla keskenään.



KUVIO 5. Lujitetun ja lujittamattoman koesauvan jännitys-venymä-kuvaaja

Molemmat materiaalit ovat ominaisuuksiltaan sitkeitä. Murtoraja voidaan havaita käyrän muuttuessa pystysuoraksi viivaksi. Lujittamattoman PE-HD:n käyrä nousee jyrkemmin, jolloin materiaalin jäykkyyttä kuvaava parametri kimmokerroin on arvoltaan suurempi. Lujittamattomalla materiaalilla on myös hiukan suurempi vetolujuus ja venymä.

Saaduista vetokoneen tuloksista voitiin laskea testattujen koesauvojen vetolujuus, venymä ja vetokimmomoduuli. Taulukkoon 8 on listattu vetokokeen tulosten keskiarvot ja keskihajonnat. Korkeatiheyspolyeteenin vetolujuus on 22-35 N/mm<sup>2</sup> (taulukko 2). Näin ollen saatujen mittausten keskiarvo 32,9 N/mm<sup>2</sup> vaikuttaa siis luotettavalta. Vetokimmomoduulien keskiarvot eivät ole vertailukelpoisia



kirjallisuuden arvoihin, sillä vetokimmomoduulien laskemiseen käytetyt pisteet on valittu käyrän alkuosalta siten, että kuvaajaa pystyi lukemaan. Tuloksiin voi vaikuttaa myös vetokokeessa käytetty suurempi vetonopeus. Materiaalin valmistajan antama vetokimmomoduulin arvo 1 GPa (taulukko 1) eroaa saatujen mittausten keskiarvosta 1,3 Gpa. Korkeatiheyspolyeteenin vetokimmomoduuli 0,41-1,4 Gpa (taulukko 2). Näin ollen saatujen mittausten keskiarvo vastaa kuitenkin korkeatiheyspolyeteenin kirjallisia vetokimmomoduuliarvoja.

TAULUKKO 8. Vetokokeen tulosten keskiarvot ja keskihajonnat

Materiaali	Vetolujuus (MPa)		Venymä (%)		Vetokimmomoduli (MPa)	
	Ka.	Kh.	Ka.	Kh.	Ka.	Kh.
PE-HD	32,9	1,1	8,26	1,22	1340	201
PE-HD + PET	29,34	0,72	7,34	0,96	1100	136

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin PET-kuidun vaikutuksia muovituotteen ominaisuuksiin sekoitettaessa sitä neutraaliin korkeatiheuspolyeteenigranulaattiin. Testauksissa käytettiin 5% seostuksella PET –kuitua.

Tutkimusten perusteella PET-kuitu ei vaikuttanut paljon materiaalin ominaisuuksiin. Kutistumamittauksissa kuidulla ei ollut vaikutusta materiaalin kokonaiskutistumaan. Iskukokeessa lujitetulla ja lujittamattomalla koekappaleilla ei ollut paljon eroa Izod-iskulujuusarvoissa. Vetokokeen tulosten perusteella kuitulujitus heikensi hiukan vetolujuutta, venymää sekä vetokimmomoduulia. Koekappaleiden ominaisuudet olisivat voineet muuttua paremmiksi, jos koesauvat olisi ruiskuvalettu hieman korkeammilla lämpötiloilla.

Tutkimustulosten perusteella polyeteenitereftalaatista valmistettavia tekstiilikuituja voidaan käyttää muovikomposiitin lujitteena. PET-kuiduilla ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa saavutettu parempia materiaaliominaisuuksia, kuitujen ja polyeteenin huonon sekoittumisen takia.

Jatkossa voitaisiin tutkia, onko korkeammissa lämpötiloissa ajetuilla koesauvoilla ominaisuuksissa eroja. Korkeammilla lämpötiloilla ajettaessa polyeteeni voi sekoittua paremmin polyeteenitereftalaatin kanssa, ja juoksevamman matriisimuovin ansiosta muovit saattaisivat tarttua toisiinsa paremmin. Lisäksi raaka-aineen voisi valmistusvaiheessa ajaa useamman kerran ekstruuderin ja silppurin läpi, jolloin saavutetaan lyhyemmät kuidut sekä parempi sekoittuminen kuitujen ja matriisimuovin kesken.

Valmistettua lujitettua materiaalia voi käyttää samoihin tuotteisiin kuin lujittamattomaakin PE-HD:tä. Lujitetun materiaalin ominaisuuksia voi parantaa erilaisilla adheesiota lisäävillä lisäaineilla, jolloin materiaalista saisi mahdollisesti lujempaa kuin lujittamaton PE-HD.

## LÄHTEET

### PAINETUT LÄHTEET

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2002. Muovitekniikan perusteet. 3. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Seppälä, J. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. 6. painos. Helsinki: Otatieto.

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa V. 2007. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. 2010. Konetekniikan materiaalioppi. 12.-13. painos. Helsinki: Edita Publishing.

Valtanen, E. 2010. Tekniikan taulukkokirja. 18. painos. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

### SÄHKÖISET LÄHTEET

Kolev, M. 2015. Polyeteeni (PE). Gabrovo: Technical University of Gabrovo [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa:

[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PE\\_FL.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FL.pdf)

British Plastics Federation. 2015. Polyethylene (High Density) HDPE [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa: <http://www.bpf.co.uk/Plastipedia/Polymers/HDPE.aspx>

MatWeb, LLC. 2015. Borealis BL1481 High Density Polyethylene [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa:

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=2cacd15d17da45ae912dfbd85d748ce8>

Muoviteollisuus ry. 2015. Komposiitit [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa:

<http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitiето/muovit/komposiitit/>

Polyko. 2010. Muovit vaatetustekniikassa. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa:

<https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/LAMK/pruju.pdf>

Polyko. 2009. Polymeerimateriaalien perusteet. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa: [https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/TTY/Perus/PPDF/Polymeerimateriaalienperusteet\\_30\\_1\\_2009.pdf](https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/TTY/Perus/PPDF/Polymeerimateriaalienperusteet_30_1_2009.pdf)

Vienamo, T. & Nykänen, S. 2015a. Ekstruusio eli suulakepuristus [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/50/83/>

Vienamo, T. & Nykänen, S. 2015b. Muottikutistuma [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/107/151/>

Vienamo, T. & Nykänen, S. 2015c. Ruiskuvalu [viitattu 13.1.2015]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/150/214/>

## LIITTEET

LIITE 1. TESTIKAPPALEIDEN MITAT

LIITE 2. ISKUENERGIAT

LIITE 3. JÄNNITYS-VENYMÄ KÄYRÄT

## LIITE 1. TESTIKAPPALEIDEN MITAT

	Lujittamaton	lujitettu
1	164,5	164,5
2	164,7	164,4
3	164,3	164,3
4	164,5	164,5
5	164,4	165

## LIITE 2. ISKUENERGIAT

Koekappale	Lovettu PE-HD+PET	Lovettu PE-HD
1	0,75	1,15
2	1,65	1,20
3	1,05	1,15
4	1,00	1,20
5	1,45	1,15
Keskiarvo	1,18	1,17
Keskihajonta	0,36	0,03

Koekappale	Loveamaton PE-HD+PET	Loveamaton PE-HD
1	2,50	2,35
2	1,95	2,40
3	2,10	2,50
4	2,80	2,40
5	2,40	2,35
Keskiarvo	2,35	2,40
Keskihajonta	0,34	0,06

### LIITE 3. JÄNNITYS-VENYMÄ KÄYRÄT

