



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Minna Kotola

VAIHTOEHTOINEN POLYMEERIERISTE-
MATERIAALI TAAJUUSMUUTTAJA
TUOTANTOON

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Minna Kotola
Opinnäytetyön nimi	Vaihtoehtoinen polymeerieristemateriaali taajuusmuuttaja tuotantoon
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	52 + 15 liitettä
Ohjaaja	Osku Hirvonen

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ja testata eri polymeeri-muovilaaduista valmistettuja eristemateriaaleja Danfoss Drives Vaasan tehtaan taajuusmuuttajatuotantoon. Tutkimuksiin valittiin kolme eri muovilaatua, jotka ovat polykarbonaatti, polyeteenitereftalaatti ja polypropeeni.

Opinnäytetyön aikana eristemateriaaleille suoritettiin useita materiaalitestejä eri standardien mukaisesti. Materiaalitestauksen avulla saatiin paljon hyödyllistä tietoa materiaalien ominaisuuksista sekä niiden käyttäytymisestä eri olosuhteissa.

Materiaalitutkimusten ja standardien mukaisten testien jälkeen voitiin todeta materiaalien olevan laadukkaita. Yhtä materiaalia lukuunottamatta materiaalit olivat soveltuvia taajuusmuuttaja teollisuuteen.

ABSTRACT

Author	Minna Kotola
Title	Alternative polymer insulation material for frequency converter production
Year	2022
Language	Finnish
Pages	52 + 15 Appendices
Name of Supervisor	Osku Hirvonen

The purpose of this thesis was to study and test insulation materials made of different polymer plastic grades for the frequency converter production at Danfoss Drives Vaasa plant. Three different plastic grades were selected for the studies, which are polycarbonate, polyethylene terephthalate and polypropylene.

During the thesis, several material tests were performed on insulating materials according to different standards. The material testing provided a lot of useful information about the properties of materials as well as their behavior under different conditions.

After material studies and tests compliant with standards, the materials could be found to be of high quality. Except for one material, the materials were suitable for the frequency converter industry.

Keywords Polymer, polycarbonate, polyethylene terephthalate, and polypropylene

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	VACON OY JA DANFOSS DRIVES VAASA	9
3	TAAJUUSMUUTTAJA.....	10
4	POLYMEERI	11
	4.1 Kesto- ja kertamuovipolymeerit	12
5	MATERIAALIT	13
	5.1 Polykarbonaatit.....	13
	5.1.1 HY9170	14
	5.1.2 PC1860	14
	5.1.3 DFR117	14
	5.1.4 EFR95.....	15
	5.2 Polyeteenitereftalaatti.....	15
	5.2.1 Mylar	16
	5.2.2 Melinex339.....	16
	5.3 Polypropeeni.....	17
	5.3.1 Formex GK-17.....	17
6	TEORIATAUSTA	18
	6.1 Työstömenetelmä	18
	6.2 Materiaaliominaisuudet.....	20
	6.2.1 Muovien lämmönkesto	20
	6.2.2 Muovien kylmänkesto.....	21
	6.2.3 Kosteuden vaikutus.....	22
	6.2.4 Kemikaalien vaikutus	22
	6.2.5 UV-valon vaikutus	23
7	TESTIMENETELMÄT JA TESTITULOKSET	25

7.1	FTIR-SPEKTROSKOPIANALYYSIKOE.....	25
7.1.1	Kokeen suoritus ja analyysi	25
7.2	VETOLUJUUSKOE.....	27
7.2.1	Kokeen suoritus ja analyysi	28
7.3	SEM-EDX-testimenetelmä.....	33
7.3.1	Kokeen suoritus ja analyysi	34
7.4	DSC–Differentialiskannauskalorimetri	35
7.4.1	Kokeen suoritus ja analyysi	36
7.5	Hehkulankakoe	38
7.5.1	Kokeen suoritus ja analyysi	39
7.6	Kovuusmittaus	42
7.6.1	Kokeen suoritus ja analyysi	42
7.1	Materiaalien kosteuden imeytymisominaisuusanalyysi.....	44
7.1.1	Kokeen suoritus ja analyysi	45
8	OMAT PÄÄTELMÄT	47
8.1	Päätelmät testitulosten lopputuloksista.....	47
8.2	Tehtyjen materiaalitestien luotettavuus	48
8.3	Testimenetelmien hyödyntäminen jatkossa	48
	LÄHTEET	49
	LIITTEET	52

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Värisävyn vaihteluita.....	19
Kuva 2. Leikkauksesta aiheutuneet säröt.	19
Kuva 3. FT-IR Spektrometri.	26
Kuva 4. Isommat eristearkit.....	29
Kuva 5. Työstetyt koekappaleet.	29
Kuva 6. Koekappaleiden merkinnät.....	30
Kuva 7. Zwick/Roell-vetotestikone.	31
Kuva 8. Katkennut PC1860-testikappale.	32
Kuva 9. Elektronimikroskooppi elektronisäde.....	34
Kuva 10. Differentiaaliskannauskalorimetria Mettler AT250.....	37
Kuva 11. Hehkulankatesteri.....	39
Kuva 12. Polykarbonaattikappaleet testin jälkeen.....	41
Kuva 13. Polyeteenitereftalaatti- ja polypropeenikappaleet testin jälkeen.	42
Kuva 14. Kovuusmittauslaite, Zwick Shore-D.	43
Taulukko 1. FTIR-analyysitulokset.	26
Taulukko 2. SEM-EDX-analyysi.	35
Taulukko 3. Polykarbonaattitulokset.....	37
Taulukko 4. Polyeteenitereftalaatti- ja Polypropeenitulokset.	37
Taulukko 5. Hehkulankakoetulokset.	40
Taulukko 6. Kovuusmittaustulokset.	43
Taulukko 7. Imeytymisominaisuusanalyysitulokset.	45

LIITELUETTELO

LIITE 1. FTIR, Polykarbonaattinäytteiden kuvaajat.

LIITE 2. FTIR, Polykarbonaattinäytteiden kuvaajat.

LIITE 3. FTIR, Polyeteenitereftalaattinäytteiden kuvaajat.

LIITE 4. FTIR, Polypropeeninäytteiden kuvaajat.

LIITE 5. Vetolujuus, EFR95- ja DFR117-kuvaajat.

LIITE 6. Vetolujuus, HY9170- ja PC1860-kuvaajat.

LIITE 7. Vetolujuus, Mylar- ja Melinex-kuvaajat.

LIITE 8. Vetolujuus, Formex GK-17 -kuvaajat.

LIITE 9. SEM-EDX, Polykarbonaattinäytteiden kuvaajat.

LIITE 10. SEM-EDX, Polyeteenitereftalaatti- ja Polypropeeninäytteiden kuvaajat.

LIITE 11. DSC, EFR95- ja HY9170-näytteiden kuvaajat.

LIITE 12. DSC, PC1860- ja DRF117-näytteiden kuvaajat.

LIITE 13. DSC, Mylar- ja Melinex-näytteiden kuvaajat.

LIITE 14. DSC, Formex GK-17 -näytteiden kuvaajat.

LIITE 15. Water absorption, Testitulosten kuvaaja

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantona on uuden eristysmateriaalin löytäminen tuotantoon, materiaalin olisi tarkoitus olla vähintään vaihtoehtoinen materiaali nykyisten käytössä olevien materiaalien rinnalle. Mikäli materiaali todetaan ominaisuuksiltaan toimivammaksi kuin nykyiset materiaalit, voidaan se ottaa myös jatkuvaan käyttöön. Työn aikana tutustutaan ja tutkitaan ennalta valittuja eristemateriaaleja ja testataan niiden sopivuutta taajuusmuuttaja tuotantoon. Työssä keskitytään myös tutkimaan eristemateriaalien eroja muovityyppien välillä sekä myös kaupallisten materiaalien välillä.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia materiaaleja ja tutustua niiden ominaisuuksiin, käyttämällä erilaisia testimenetelmiä valituille materiaaleille. Työssä keskitytään tutkimaan polykarbonaattikalvoja jonka kaupallisista versioista opinnäytetyöhön valittiin HY9170, PC1860, DFR117 ja EFR95. Polyeteenitereftalaattikalvoja joista valittiin Mylar ja Melinex339. Lisäksi tutkitaan polypropeenikalvoja joista kaupallisia versioita on sekä suomessa, että kiinassa valmistetut Formex GK-17 -kalvot. Materiaaleille tehtävien testien tavoitteena on tutkia materiaalin koostumusta, jotta se vastaa sitä mitä tuotteesta luvataan. Lisäksi tavoitteena on löytää materiaaleista heikkouksia sekä vahvuuksia ja rajata materiaalivalintaa niiden perusteella. Osa tutkittavista materiaaleista on jo tuotannon käytössä, mutta testien avulla varmistetaan niiden olevan edelleen laadukkaita ja samalla näistä materiaaleista saadaan hyvä vertailukohde uusille materiaaleille. Testattavista materiaaleista tuotannon käytössä on polykarbonaateista EFR95, polyeteenitereftalaateista Mylar ja Polypropeenista Formex GK-17 Fin, joten jokaisesta materiaaliluokasta löytyy yksi aikaisemmin hyväksytty materiaali vertailukohteeksi muille uusille materiaaleille.

2 VACON OY JA DANFOSS DRIVES VAASA

13 intohimoista yrittäjää perusti Vacon Oy:n vuonna 1993 Vaasassa. Yrittäjien tavoitteena heti alusta saakka oli kehittää taajuusmuuttajia, sekä nostaa niiden markkinat täysin uudelle tasolle. Vacon Oy:n ensimmäinen taajuusmuuttaja tuotesukupolvi julkaistiin vuonna 1995. Yhtiön valmistamat taajuusmuuttajat ovat laitteita, joiden käyttö perustuu sähkömoottoreiden kierrosnopeuden säätöön. Taajuusmuuttajien yleisiä käyttökohteita ovat eri teollisuuden alat sekä eri yhdyskuntatekniikat¹.

2000-luvulla joulukuussa yhtiö listautui Helsingin pörssiin ja tähän aikaan yhtiöllä oli jo kymmenessä maassa tytäryhtiöitä, noin 300 työntekijää sekä 80 miljoonan vuosittainen liikevaihto. Samana vuonna Vacon esitteli VACON®NX -sarjan tuotteet sekä kahta vuotta myöhemmin Vacon toi markkinoille suuritehoisen nestejäähdytteisen VACON® NXP Liquid Cooled taajuusmuuttaja sarjan. Tämä taajuusmuuttajasarja toi mukanaan suuret markkinat, varsinkin meriteollisuuden jossa tuotteen pieni koko ja tehokas suojaus ovat avaintekijöitä¹.

Vuonna 2014 Vaconista tuli osa Danfoss-konsernia, kun se yhdistyi vuonna 1933 perustetun perheyritys Danfossin kanssa. Yhdistyessään yritykset yhdessä luovat pohjoismaisen globaalim toimijan taajuusmuuttajamarkkinoille sekä saavuttavat entistä vahvemman markkina-aseman¹.

Danfossin täysin taajuusmuuttaja markkinaaan keskittyvä segmentti on Danfoss Drives jossa vuonna 2022 on 4400 työntekijää, 9 eri tehtaassa jotka sijaitsevat 7 eri maassa. Suomessa Danfoss Drivesin alaisuudessa työskentelee 991 työntekijää joista Vaasan tehtaalla 622².

¹ Vacon Oyj_n vuosikertomus 2013

² Danfoss Vaasa site

3 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttajat ovat moottoriohjaukseen perustuvia laitteita, joiden avulla ohjataan erilaisten moottoreiden nopeutta, muuttamalla moottorin tehonsyötön taajuutta ja jännitettä. Moottoreiden nopeudenohjausta taajuusmuuttaja tekniikan avulla käytetään, sillä sen avulla saavutetaan useita hyötyjä, kuten energiansäästö, järjestelmän tehokkuuden parantaminen, matalampi melutaso sekä moottoreiden mekaanisen rasituksen vähentäminen ja käyttöiän pidentäminen³.

Opinnäytetyössä tutkittavia eristeitä käytetään taajuusmuuttaja tuotannossa ja eristeet asennetaan usein erilaisten kondensaattoreiden, piirikorttien tai erilaisten kiskojen väliin. Eristeitä käytetään taajuusmuuttajissa sähköneristysmateriaalina suojaamaan herkkiä elektronisia komponentteja dielektrisiltä- sekä ympäristövaurioilta. Lisäksi kalvoja käytetään usein myös fyysisenä esteenä, suojaamaan käyttäjiä sähköisesti varautuneilta komponenteilta. Myös laitteen rakenteesta saadaan eristeiden avulla tiiviimpi asentamalla eriste kahden jännitteisen osan väliin, jolloin osien välistä vaadittua ilmaväliä voidaan pienentää.

³ Danfoss, what is a variable frequency drive

4 POLYMEERI

Polymeerit on toisiinsa yhteen liittyneistä monomeereista koostuvia suurempia molekyylejä. Rakenneyksiköiden eli monomeerien lukumäärä polymeerimolekyylissä on yleisesti vähintään satoja tai tuhansia rakenneyksiköitä toisiinsa liittyneinä. Monomeereista koostuva polymeerimolekyylin muoto ja koko voivat vaihdella suurestikin, sekä polymeerimolekyylin koostumusta voidaan mukauttaa käyttämällä eri koostumuksellista monomeeri tyyppiä. Polymeerimolekyylin koostumuksella ja koolla on suuri rooli kun mietitään polymeerin ominaisuuksia ja sitä mitä polymeeriltä käyttötilanteessa vaaditaan. Useimmiten polymeereihin lisätään sekoittamalla lisäaineita joilla saavutetaan halutut fysikaaliset, kemialliset ja muovattavat ominaisuudet⁴.

Polymeeri molekyylin moolimassa vaikuttaa muovin ominaisuuksiin, kun polymeroimalla valmistetaan muovimateriaalia, syntyy prosessissa eri suuruisia polymeerimolekyylejä joten myös niiden moolimassat vaihtelevat. Mitä suurempi polymeerimolekyylin moolimassa on, sitä korkeampi voi olla muovin sulamispiste. Lisäksi korkea moolimassa tuo muoville paremman isku- ja vetolujuuden sekä kasvattaa sään- ja jännityssäroilynkestoa. Myös pienempi moolimassajakauma voi parantaa muovin iskulujuutta, lisätä kiiltoa sekä jännityssäroilynkestoa⁴.

Moolimassan suuruus vaikuttaa myös polymeerin viskositeettiin, sillä viskositeetti suurenee jos moolimassa kasvaa. Viskositeetti voi kasvaa myös paineen ja täyteaineiden vaikutuksesta sekä vähentyä erilaisten liuottimien, pehmittimien ja lämpötilan nousun vaikutuksesta⁴.

⁴ Polymeeritekniikan perusteet, s.33–36

4.1 Kesto- ja kertamuovipolymeerit

Polymeerit voidaan jakaa usein eri tavoin eri ryhmiin niiden ominaisuuksien ja fyysisten erojen avulla. Yksi tapa jakaa polymeerit on jakaa ne kesto- ja kertamuoveihin.

Kestomuoveiksi luokitellaan muovit joilla on suorita eli lineaarisia tai haarautuneita polymeeriketjuja. Kestomuovien molekyyliketjuja poikittain toisiinsa yhdistävät voimat ovat heikkoja ja niitä kutsutaan sen vuoksi sekundäärisidoksiksi. Kun kestopuovia lämmitetään, sen polymeeriketjut alkavat liikkua ja muovista tulee pehmeämpää. Jos taas lämmitystä jatketaan muovi sulaa, koska sen molekyyliketjujen väliset poikittaiset sidokset katkeavat. Tästä syystä kestopuoveja voidaan sulattaa, muotoilla ja jähmettää toistuvasti⁵.

Kertamuoveihin kuuluvilla muoveilla polymeeriketjut liittyvät toisiinsa sekä pitkittäisillä sidoksilla, että poikittaisilla, lujilla kemiallisilla sidoksilla. Tätä kutsutaan ristisilloittumiseksi, kertamuovien ketjuja ei voida irrottaa toisistaan lämmön avulla kuten kestopuovilla. Kertamuovi on saatettava lopulliseen muotoonsa ennen täydellistä polymeroitumista eli kovettumista. Kertamuovit ovat kuitenkin verkkorakenteensa ansiosta hyviä mekaaniselta kestoaltaan sekä lämmönkestoaltaan⁵.

⁵ Muovitekniikan perusteet, s.23–24

5 MATERIAALIT

5.1 Polykarbonaatit

Termoplastinen polyesteri jossa happokomponenttina on hiilihappo. Polykarbonaatti on kova tekninen kestopuovi, joka tarjoaa erittäin korkean iskulujuuden, korkean kimmokertoimen ja hyvän säänkestävyyden. Polykarbonaatilla on myös ominaista hyvä sitkeys, joka säilyy kylmässäkin jopa -100 asteeseen saakka. Polykarbonaattimuovi kestää hyvin suolaliuoksia, vettä, laimeita happoja, öljyjä, rasvoja ja alkoholeja, metanolia lukuun ottamatta. Polykarbonaatti ei myöskään palon sattuessa ylläpidä palamista. Kaikki nämä ominaisuudet sekä matalan taajuuden ja korkean jännitteen eristysominaisuudet tekevät polykarbonaatista tärkeän materiaalin sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa⁶.

Vaikka polykarbonaatti sietää hyvin eri liuoksia, niin silti ammoniakki, lipeät ja amiinit vahingoittavat sitä ja useat eri orgaaniset liuottimet liuottavat sen. Polykarbonaatti on myös hyvin altis jännityssäröilylle⁶.

Polykarbonaatin kiteisyyttä voidaan lisätä orientoimalla kalvoa tai kuitua materiaalin lasittumislämpötilaa korkeammassa lämpötilassa. Kiteisyyden lisääminen parantaa huomattavasti polykarbonaatin mekaanisia lujuusominaisuuksia, korottaa sulamislämpötilaa, vähentää liukoisuutta sekä laskee lämpölaajenemiskerrointa⁶.

Lasikuitua voidaan lisätä polykarbonaattiin eri määrinä 10 prosentista jopa 40 prosenttiin, lasikuitua lisäämällä voidaan lisätä vetolujuutta, jäykkyyttä, puristuslujuutta ja laskea polykarbonaatin lämpölaajenemiskerrointa⁶.

⁶ Polymeeritekniikan perusteet, s.209–210

5.1.1 HY9170

Kalvoa on saatavilla rullina ja arkkeina, arkkeina saatavien kalvojen paksuudet vaihtelevat 0,3 mm – 1,0 mm väliltä. HY9170-kalvo on musta, mutta markkinoilla on myös HY9160-kalvoa joka on saatavilla luonnollisen värisenä. Tämä polykarbonaattikalvo on halogeeni vapaa, se ei sisällä myöskään rajoittamattomia raskasmetalleja eikä fosfaattisia palonestoaineita. HY9170-kalvon erinomaisen muovattavuuden, dielektrisen lujuuden ja sen hyvän palonesto ominaisuuksiensa ansiosta kalvo soveltuu hyvin erilaisiin sähköisiin sovelluksiin ja virtalähteisiin⁷.

5.1.2 PC1860

PC1860-kalvo on saatavilla luonnollisen läpinäkyvänä ja kalvon pinnoista toinen puoli on matta ja toinen samettinen. Kalvoa on saatavilla 0,05 mm – 1,5 mm väliltä ja sitä valmistetaan rullina ja arkkeina. PC1860 on halogeenivapaa palonestomuovi⁸.

5.1.3 DFR117

DFR117 on palonkestävä ja ympäristöystävällinen polykarbonaattikalvo, joka ei sisällä halogeeneja, rajoitettuja raskasmetalleja eikä fosfaattisia palonestoaineita. Kalvo noudattaa eurooppalaisia ympäristömääräyksiä ja se on kierrätettävissä. DFR117-kalvo on mustaa ja sitä on saatavilla eri paksuisina 0,4 mm – 1,7 mm väliltä. Kalvossa toinen puoli kalvopinnasta on matta ja toinen samettinen. DFR117-kalvoa käytetään laajalti erilaisissa virtalähteissä ja sähköneristys sovelluksissa. Tällä polykarbonaattikalvolla on erinomaiset mekaaniset- ja lämmönkesto ominaisuudet, hyvä dielektrinen lujuus ja hyvät palonesto ominaisuudet⁹.

⁷ HY91 flame retardant series

⁸ Longhua Polycarbonate film

⁹ Flame retardant polycarbonate film

5.1.4 EFR95

EFR95-kalvossa toinen puoli kalvopinnasta on samettinen ja toinen puoli hieno mattapintainen. Kalvoa on saatavilla eri paksuisina 0,178 mm – 0,762 mm väliltä ja kaikki kalvot on saatavilla mustana, mutta vain kolme paksuinta vaihtoehtoa on saatavilla myös läpinäkyvänä. EFR95-kalvoa käytetään useissa erilaisissa sähköneristys sovelluksissa sen erinomaisten ominaisuuksiensa ansiosta. Kalvo on helposti muovattavaa ja sillä on erityisen hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet. Kalvon mittatarkkuus on hyvä korkeissa lämpötiloissa ja sillä on korkea syttyvyysluokitus¹⁰.

5.2 Polyeteenitereftalaatti

PET eli polyeteenitereftalaatti on termoplastinen polyesteri, joka on tavallisesti tereftaalihapon ja eteeniglykolin polymerointituote. PET-muovi kuuluu teknisten muovien ryhmään ja sen tunnetuimpia ominaisuuksia ovat hyvä sähkö-, lämpö-, ja mekaaniset ominaisuudet ja siksi se onkin hyvin laajasti käytetty muovi. PET-muovilla on myös hyvä kuormituksen- ja kulutuksen kestävyys ja lisäksi materiaali omaa alhaisen kitkakertoimen. Koska materiaali imee hyvin vähän vettä itseensä, ei vesi pääse vaikuttamaan materiaalin sähköisiin tai mekaanisiin ominaisuuksiin. PET-muovin kuidut kestävät hyvin UV-valoa, laimeita happoja, alkaleja sekä muiden säättekijöiden vaikutusta. PET-muovilla on hyvä kestävyys sekä pieni viruma ja hyvä mittapitävyys. PET-muovin huomioon otettavat huonot ominaisuudet ovat, että se on hyvin lovi- ja säröherkkä muovi. PET ei kestä vahvoja liuotainaineita eikä väkeviä happoja. Lisäksi polyeteenitereftalaatti ei ole kovin usein käytetty kappaletuotteiden valmistuksessa, sen vaikean muovattavuuden johdosta, mutta markkinoilla on kuitenkin olemassa muokattu polyeteenitereftalaatti joka soveltuu sekä suulake-, että ruiskupuristukseen¹¹.

¹⁰ Lexan EFR95 film

¹¹ Polymeeritekniikan perusteet, s.207–209

PET-kalvot valmistetaan suulakepuristuksella sulasta muovimassasta. Kalvoa venytetään sekä pitkittäis- että poikittaissuunnassa kalvon ollessa vielä lämmin, näin kalvoista saadaan lujimpia olemassa olevia muovikalvoja¹¹.

5.2.1 Mylar

Mylar-kalvon ominaisuuksien epätavallinen tasapaino tekee siitä sopivan useisiin teollisiin sovelluksiin. Mylar-kalvoa käytetään sähköeristyksissä, toimistotarvikkeissa ja teollisuuslaminoineissa yhdessä muiden joustavien materiaalien kanssa. Mylar-kalvo on vahva, kova, sekä kestävä, mutta myös joustava. Mylar-kalvoa on tavallisesti saatavilla 0,012 mm – 0,5 mm paksuisena.¹²

Mylarille tyypillisiä ominaisuuksia ovat erinomainen kestävyys kosteudelle ja useimmille kemikaaleille. Mylar ei sisällä pehmittiä, joten se kestää myös hyvin lämpötilanvaihteluja -70 celsiusasteesta jopa +150 celsiusasteeseen. Normaaleissa olosuhteissa käytettynä Mylar ei ikääntyessään haurastu. Mylarin dielektrinen lujuus eli eristävän materiaalin sähköinen lujuus, joka on opinnäytetyössä tutkittavassa 0,5 mm paksuisessa kalvossa 20V¹².

5.2.2 Melinex339

Melinex339 on valkoinen läpinäkymätön polyesterikalvo, jolla on erinomaiset käsittelyominaisuudet. Melinex339 on lujaa, mekaanisesti ja kemiallisesti erittäin kestävä kalvo, jolla on myös erinomaiset sähköiset ja termiset ominaisuudet. Melinex339-kalvolla on korkea mittastabiilisuus sekä korkeissa, että matalissa lämpötiloissa. Kalvoa on saatavilla sekä arkkeina, että rullissa, kalvon paksuudet vaihtelevat 0,05 mm – 0,25 mm välillä. Melinex339-kalvo sopii erinomaisten ominaisuuksiensa ansiosta erilaisiin teollisiin ja elektronisiin sovelluksiin¹³.

¹² Stenbacka, Mylar polyester film

¹³ Folien-centrum, Melinex339

5.3 Polypropeeni

PP eli polypropeeni on termoplastinen polymeeri ja on yksi eniten käytetty teknisten polymeerien ryhmä. Polypropeeni on erityisesti tunnettu sen hyvästä kemiallisesta kestävydestä, polypropeeni on myös kovapintainen ja jäykkä muovimateriaali. Polypropeeni kestää korkeita lämpötiloja sekä sillä on hyvä sähköneristyskyky. Erilaiset hapettavat hapot vaikuttavat polypropeeniin hajottavasti ja lukuisten hiiliatomien vuoksi polypropeeni kestää huonosti UV-säteilyä ja ilman hapen vaikutusta, sen vuoksi polypropeeniin lisätäänkin aina stabilisaattoreita¹⁴.

Mikäli halutaan lisätä polypropeenin iskulujuutta ja alentaa sen lasittumislämpötilaa voidaan se kopolymeroida eteenin kanssa tai lisätä siihen synteettistä kumia. Polypropeenin muita lujuusominaisuuksia taas voidaan parantaa täyte- ja kuituaineilla, lasikuiduilla tai talkilla¹⁴.

5.3.1 Formex GK-17

Formex GK-17 -kalvo tarjoaa hyvän kosteuden ja kemiallisen kestävyden, kalvo tarjoaa myös poikkeuksellisen hyvän dielektrisen lujuuden ja korotetun lämpötila-arvon. Formex GK-17 on polypropeenikalvo, jota käytetään sähköneristysmateriaalina suojaamaan herkkiä elektronisia komponentteja dielektrisiltä- ja ympäristövaurioilta. Lisäksi kalvoa käytetään usein myös fyysisenä esteenä, suojaamaan käyttäjiä sähköisesti varautuneilta komponenteilta. Kalvoa voidaan helposti taittaa erilaisiin kolmiulotteisiin muotoihin, joka tekee siitä monipuolisen tuotteen. Formex GK-17 -kalvoa on saatavilla joko mustana tai luonnollisen värisenä, riippuen hieman minkä paksuisena kalvoa tarvitaan. Kalvoja löytyy useita eri paksuuksia, jotka sijoittuvat 0,127 mm – 1,57 mm mittavälille¹⁵.

¹⁴ Polymeeritekniikan perusteet, s.176–178

¹⁵ itw formex

6 TEORIATAUSTA

6.1 Työstömenetelmä

Pääsääntöisesti materiaaleja työstettäessä leikkaus tapahtuu terävällä veitsellä, laserilla tai työkalulla. Taivutuksia materiaaliin tehdään särmäyspuristimella. Yleisimmin materiaalien taivutukset tehdään kylmätaivutuksina, kylmätaivutuksessa materiaali taivutetaan ensimmäisen kerran ja heti perään toisen kerran materiaali taivutetaan hieman yli halutun kulman, jolloin palautuessaan materiaali jää haluttuun kulmaan. Taivutuksen aikana ei saa vähentää taivutuskulmaa, sillä muuten se voi jäädä vajaaksi. Materiaalia ei myöskään saa pakottaa haluttuun muotoon ja taivutusoperaatio tulisi suorittaa mahdollisimman nopeasti optimaalisten tulosten saavuttamiseksi¹⁶.

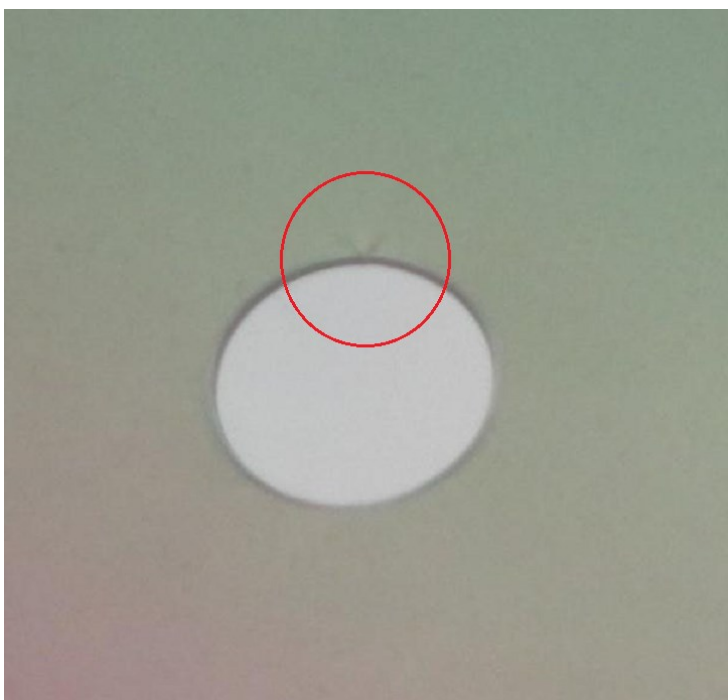
Eristemateriaalien työstämisessä ilmenee myös joitakin ongelmia, mitkä saattavat aiheuttaa materiaalin rasittumista tai myöhemmin säröilyä ja halkeilua. Kylmätaivutuksessa materiaalin yli-taivutuksen vuoksi siihen kohdistuu räsitusta taivutuskohtaan. Materiaali ohenee venyessään, jolloin riski jännityssäröilylle ja materiaalin halkeamiselle kasvaa merkittävästi. Värillisessä materiaalissa taivutuksen aikana ja sen jälkeen voi huomata **värisävyn vaihteluita** (kuva 1).

¹⁶ Polymer analysis



Kuva 1. Värisävyn vaihteluita.

Kun materiaaliin leikataan reikä terävällä veitsellä, tulee reiästä ikään kuin sydämen muotoinen, koska leikkauksen aloitus ja lopetuskohtaan tulee materiaaliin pienet **säröt** (Kuva 2) jo leikkausvaiheessa. Leikkauksesta aiheutuneet säröt ovat suuri riski materiaalin myöhemmälle halkeilulle rasituksessa.



Kuva 2. Leikkauksesta aiheutuneet säröt.

Kun työstetään yli 2 mm paksua polykarbonaattikalvoa, käytetään laserleikkausta. Kalvoa leikatessa laser polttaa leikkuujäljen reunaa, jolloin polykarbonaattikalvo tahtoo palaa ja siitä aiheutuu savukaasuja. Tämän vuoksi polykarbonaattikalvo laminoidaan ennen leikkausta suojakalvolla, joka estää savukaasujen tarttumisen tuotteeseen¹⁷.

Hankalasti taivutettavat muodot, useat taivutuskohdat sekä särmätyt ja puristetut eristeet kokevat jo työstövaiheessa suurta rasitusta. Tällaiset eristeet ovat rasituksessa hyvin alttiita jännityssäröilylle ja halkeilulle¹⁷.

6.2 Materiaaliominaisuudet

6.2.1 Muovien lämmönkesto

Lämpötilalla ja ajalla, jolla lämpötila vaikuttaa muoviin on keskeinen merkitys muovin teknisen käytön kannalta, sillä monet muovien ominaisuuksista muuttuvat huomattavasti lämpötilan muuttuessa. Erityisesti korkeat lämpötilat vaikuttavat muoviin ja mitä pidempään muovi on korkeassa lämpötilassa, sitä suurempia ovat muutokset sen fysikaalisessa rakenteessa ja lisäksi myös kemiallisessa koostumuksessa voi tapahtua muutoksia¹⁸.

Muoveille usein annetaan sallitut lyhyen- ja pitkänajan käyttölämpötilat, kestopuoville lyhytaikaiset sallitut maksimikäyttölämpötilat ovat yleensä 60–200 celsiusasteen välillä sekä pitkäaikaiset 60–150 celsiusasteen välillä. Kun kestopuovi on sen sallituissa korkeimmissa käyttölämpötiloissa sen mekaaniset ominaisuudet kuten lujuus ja jäykkyys putoavat noin viidesosan¹⁸.

Amorfisille kestopuoveille annetaan kaksi tärkeää muutoslämpötila-aluetta. Lasittumislämpötila, joka on lämpötila-alue jossa amorfinen muovi muuttuu kovasta, jäykästä ja lasimaisesta tilasta kumimaiseksi materiaaliksi. Muovien

¹⁷ Polymeeri materiaalien työstöongelmat

¹⁸ Polymeeriteknologian perusteet, s.58–66

korkein käyttölämpötila on sama kuin muovin lasittumislämpötila, koska jäykkyys pienenee huomattavasti lasittumislämpötilan kohdalla. Toinen muutoslämpötila-alue on alue jolla kestopuovi muuttuu käytännössä jopa juoksevaan muotoon. Jos muovi on osittain kiteinen vaikuttaa lasittumislämpötila ainoastaan muovin rakenteen amorfisiin osiin. Tästä johtuu, että osittain kiteiset muovit joiden lasittumislämpötila on matalampi kuin huoneen lämpötila pysyvät silti käytännön sovelluksissa lujina ja jäykkinä. Tällaiset osittain kiteiset muovit pehmenevät vasta lähempänä niiden sulamislämpötilaa¹⁸.

Polykarbonaatin mekaaniset ominaisuudet pysyvät lähes muuttumattomina 135 celsiusasteeseen saakka ja sen sulamislämpötila on noin 225 °C. Polyeteeniteraftalaatti kestää myös jatkuvasti jopa 130 celsiusasteen lämpötiloja ja sen sulamislämpötila on 250 °C, joka on hyvin lähellä polykarbonaatin sulamislämpötilaa. Polypropeeni puolestaan sulaa jo 160 celsiusasteessa¹⁹.

6.2.2 Muovien kylmänkesto

Muovien molekyyliketjujen liikkuvuus vähenee lämpötilan laskiessa ja muovi jäykistyy. Jos muovi on osakiteinen, sen amorfiset osat lasittuvat. Muovien alin käyttölämpötila määritellään sen perusteella, miten muovi alkaa haurastua missäkin lämpötilassa. Kun puhutaan haurastumislämpötilasta, tarkoitetaan lämpötilaa jossa tutkittavasta koekappaleesta puolet murtuu hauraasti jossakin tietyssä koeolosuhteessa, kuten esimerkiksi isku- tai pudotuskoe. Haurastumislämpötila ei kuitenkaan kerro suoraan polymeerien ominaisuuksien muutospisteestä, mutta antaa usein viitteen sille, että polymeeri on muuttunut hauraammaksi²⁰.

Muovien kylmänkesto-ominaisuuksissa on suuria eroja riippuen muovilajista, esimerkiksi Polypropeeni alkaa haurastua jo -20 celsiusasteessa,

¹⁹ Polymeeri teknologian perusteet, s.210,207,177

²⁰ Polymeeri teknologian perusteet, s.65

Polyeteenitereftalaatti kestää jo -60 celsiusasteeseen olevia käyttölämpötiloja ja polykarbonaatti säilyttää sitkeytensä jopa -100 celsiusasteeseen¹⁹.

6.2.3 Kosteuden vaikutus

Suurin osa yleisimmistä kestopuoveista absorboi eli imee vettä itseensä pieniä määriä, mutta määrä vaihtelee muovilajien kesken lämpötilasta riippumatta. Kun muovi absorboi vettä itseensä, voi se pehmittää muovin rakennetta ja vaikuttaa muovin ominaisuuksiin ja mittoihin. Lisäksi muovin absorboidessa vettä muovin kosteus lisääntyy ja siitä syystä sen vetolujuus, iskusitkeys ja kimmomoduuli pienenevät, murtovenymä kasvaa, lämmönjohtavuus lisääntyy, sähkönjohtavuus paranee ja muovin kyky eristää sähköä huononee. Opinnäytetyössä esiteltävien materiaalien veden imeytyvyys on tutkittu ja analysoitu myöhemmin tulevassa testiosuudessa.

6.2.4 Kemikaalien vaikutus

Polykarbonaatti on kemiallisesti kestävä, polykarbonaatti kestää hyvin monia happoja, hapettavia pelkistäjiä, neutraaleja ja happamia suolaliuoksia, rasvoja, öljyjä, pesuaineita, hiilivetyä ja alkoholia. Tapauksissa, joissa polykarbonaattikalvo altistuu kemikaaleille kuten etyleenikloridi, kloroformi, tetrakloorietaani, m-kresoli ja pyridiini voivat aiheuttaa polykarbonaatin osittaista liukenemistä. Aineita mitkä aiheuttavat polykarbonaattikalvolle turpoamista sekä mahdollisia värimuutoksia ovat klooribentseeni, bentseeni, tetraliini, asetoni, etyyliasettaatti, asetonitrili ja hiilitetrakloridi. Nämä vaikutukset eivät kuitenkaan aina johda tuotteen vikaantumiseen, varsinkaan varauksettomien polykarbonaattikalvojen osalta, kuitenkin levyn mekaaniset ominaisuudet voivat heikentyä. Polykarbonaattikalvon altistamisessa kemikaaleille suurin vaikutus on stressihalkeilu ja säröily, joiden suuruus vaihtelee paljaalla silmällä nähtävästä mikroskooppisen pieniin säröihin ja halkeamiin. Stressihalkeamat ja säröt joita

tavallisesti esiintyy ruuvien, kiinnikkeiden ja taitosten kohdalla, johtavat aina tuotteen vikaantumiseen²¹.

Polyeteenitereftalaatti on hyvin kemiallisesti kestävä muovi, se kestää hyvin mietoja happoja ja öljyjä. Vaikka polyeteenitereftalaatti kestää hyvin mietoja happoja, ei se kestä vahvempia happoja, emäksiä tai vahvoja alkoholeja. Polyeteenitereftalaatti ei kestä myöskään kuumaa yli 80°C vettä²².

Polypropeeni on kemiallisesti vähemmän kestävä kuin polyeteeni, polypropeeni tarjoaa hyvän vastustuskyvyn hapettumattomille hapoille ja emäksisille rasvoille ja useimmille orgaanisille liuottimille. Korotetussa lämpötilassa Polypropeeni voidaan liuottaa ei polaarisiin liuottimiin kuten, xyleeniin, tetraliiniin ja dekaliniin. Polypropeeni ei ole yhteensopiva voimakkaiden hapettimien kanssa. Polypropeeni kestää parhaiten vahvoja mineraalihappoja ja emäksiä. Lämpötila ja aineen polaarisuus ovat tärkeimmät tekijät, kun määritellään kemikaalien imeytymisen laajuutta polypropeeniin. Polypropeeniin imeytyy enemmän kemikaaleja jos lämpötila kasvaa ja polaarisuus väliaineessa on vähentynyt. Ei polaarisilla nesteillä kuten bentseenillä, hiilitetrakloridilla ja öljyetterillä on suurempi imeytymisnopeus polypropeeniin kuin polaarisilla nesteillä kuten etanoli ja asetoni. Polypropeeniin imeytyneen väliaineen määrästä ja aineen luonteesta riippuen vetolujuus laskee, taipuisuus ja murtovenymä jännitteessä kasvaa²³.

6.2.5 UV-valon vaikutus

UV-valo heikentää polykarbonaatin mekaanisia ominaisuuksia ja voi aiheuttaa värimuutoksia polykarbonaattikalvossa. Materiaalimuutosten estämiseksi polykarbonaattikalvoja voidaan pinnoittaa erilaisilla UV-valolta suojaavilla

²¹ Chemical resistance of polycarbonate products

²² Chemical resistance of polyethylene terephthalate

²³ Polypropylene chemical compatibility

pinnoitteilla. Pinnoitteista voi haihtua ilmakehään haitallisia aineita ja pinnoitteet voivat heikentää materiaalin iskunkestävyyttä²⁴.

Polyeteenitereftalaatti eli PET on herkkä UV-valolle, varsinkin korotetussa lämpötilassa ja kosteudessa sekä altistuessaan hapelle. UV-valon vaikutuksesta muoviin muodostuu vapaita radikaaleja, jotka aiheuttavat myöhempää hajoamista, myös ilmassa oleva happi lisää hajoamisvaikutuksia. UV-valosta aiheutuneet vapaat radikaalit reagoivat hapen kanssa, joista muodostuu hydroperoksiedeja ja ne voivat johtaa polymeeriketjun rikkoutumiseen²⁵.

Kemiallisen rakenteensa vuoksi polypropeenilla on korkea hajoamisnopeus, kun se altistetaan UV-valolle, kuten aurinko. UV-valo saa polymeeriä yhdessä pitävät sidokset rikkoutumaan, mikä heikentää muovia. Tämän vuoksi polypropeeni ei sovellu käyttötarkoituksiin, joissa se altistuu pitkäaikaisesti auringonvalolle. Altistettuna korkean intensiteetin UV-valolle polypropeenikuidut kestävät ainoastaan noin 6 päivää, ennen kuin ne menettävät 70% vahvuudestaan²⁶.

²⁴ Uv-light resistance of polycarbonate

²⁵ Polyethylene terephthalate light impacts

²⁶ UV-resistance of polypropylene

7 TESTIMENETELMÄT JA TESTITULOKSET

7.1 FTIR-SPEKTROSKOPIANALYYSIKOE

FTIR-spektroskopia on analyysimenetelmä, jossa tutkittava materiaali altistetaan infrapunaspektrille. Analyysissa mitataan materiaalin absorptio maksimia eli valon aallonpituutta, jolla aine absorboi valoa tehokkaimmin. Aallonpituusanalyysin avulla mitataan esimerkiksi materiaalin ainemääriä, sillä mitä suurempi analysoitavan aineen pitoisuus on, sitä suurempi on myös absorboitu valo määrä ja sitä suurempi myös absorbanssi²⁷.

Analyysin aikana materiaalin molekyylit alkavat värähdellä infrapunavalon absorbanssin vaikutuksesta eri tavoin, niiden molekyyli koostumuksesta sekä sidoksista riippuen. Analyysin aikana mitataan materiaaliin absorboituvaa sekä siitä emittoituvaa IR-valon määrää, joka siis aiheuttaa molekyyliessä värähtely liikkeen muutoksia. Erilaisilla kovalenttisilla sidoksilla on kullakin oma tyypillinen sidosvärähtelytaajuutensa. Sidoksiin absorboituneet aallonpituudet näkyvät IR-spektrissä alaspäin kääntyneinä piikkeinä. Piikit vastaavat aina tiettyä säteilytaajuutta ja tämän perusteella nähdään, mikä funktionaalinen ryhmä on kulloinkin kyseessä. Värähtelytaajuuden yksikkönä käytetään aaltolukua cm^{-1} , joka kuvaa kuinka monta infrapunasäteilyn aallonpituutta mahtuu yhden senttimetrin matkalle²⁷.

7.1.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Näytemateriaalien infrapunaspektrometriakoe suoritettiin $4000\text{--}650\text{cm}^{-1}$ infrapunaspektri alueella käyttämällä FTIR-infrapunaspektrometriaa ja ATR-vaimennettua kokonaisheijastustekniikkaa. Koe suoritettiin **FT-IR spektrometrillä** (Kuva 3), tarkemmin PerkinElmer Spectrum 100, jonka versio oli 10.03.06.0100 ja

²⁷ Mooli2, FTIR-spektroskopia, s.118–119

ohjelmisto Biorad KnowItAll IR Spectral Library; Vibrational spektroskopi edition 18.0.53.0²⁸.



Kuva 3. FT-IR Spektrometri.

Taulukko 1. FTIR-analysitulokset.

Sample	FTIR interpretation
EFR95	PC polycarbonate, possibly talc (silicate) filler
HY9170	PC polycarbonate, possibly talc (silicate) filler
PC1860	PC polycarbonate, possibly talc (silicate) filler and phosphite-type flame retardant
DFR117	PC polycarbonate, possibly talc (silicate) filler
Mylar	PET poly(ethylene terephthalate)
Melinex	PET poly(ethylene terephthalate)
Formex GK-17 FIN	PP polypropylene, possibly antimony trioxide flame retardant additive
Formes GK CHINA	PP polypropylene, possibly antimony trioxide flame retardant additive

Testatuista polykarbonaattinäytteistä (Taulukko 1) EFR95, HY9170 ja DFR117 ovat kaikki yhdenmukaisia sisältäen polykarbonaattia ja mahdollisesti talkkia täyteaineena (Liite 1-2). Polykarbonaateista PC1860 on muutoin yhdenmukainen

²⁸ Fourier-transform infrared spectroscopy

muiden polykarbonaattinäytteiden kanssa, sisältäen myös polykarbonaattia sekä talkkia, mutta lisäksi se sisältää fosfaatti tyypistä palonestoainetta. PC1860 fosfaattisen palonestoaineen voi havaita testituloksen kuvaajasta lisäpiikkinä noin 950cm-1 kohdalla (Liite 2)²⁸.

Polyeteenitereftalaattinäytteet (Taulukko 1) Mylar ja Melinex eivät sisällä lisäaineita, vaan ovat molemmat puhdasta polyeteenitereftalaattia. Tämä on havaittavissa myös testituloksen kuvaajista, jotka ovat keskenään lähes identtiset (Liite 3)²⁸.

Polypropeeninäytteet (Taulukko 4) Formex GK-17 Fin ja Formex GK-17 China sisältävät polypropeenaa ja mahdollisesti antimonitrioksidia lisäaineena (Liite 4). Antimonitrioksidi on muovin palamisen estoaine²⁸.

7.2 VETOLUJUUSKOE

Polymeerin mekaanisia tärkeimpiä ominaisuuksia ovat materiaalin lujuus-, sitkeys- ja jäykkyysominaisuudet. Vetolujuus mittauksessa käytetään useita keskenään samankokoisia koekappaleita joita venytetään yksi kerrallaan vakionopeudella. Mittaustulos saadaan diagrammina, jonka vetolaitteen piirturi piirtää vakionopeuden ja siihen tarvittavan vetovoiman suhteen. Vetolaitteen piirtämän käyrän arvojen perusteella voidaan laskemalla selvittää koekappaleen myötölujuus eli vetojännitys myötörajalalla, sekä murtojännitys ja vetolujuus eli kappaleen saavuttama korkein vetojännitys²⁹.

Käyrää jolta arvot saadaan kutsutaan jännitys-venymäkäyräksi, arvot ilmaistaan N/mm² tai Mpa:na, joka vastaa kappaleen jännitystä sekä l, joka vastaa venymää verrattuna koekappaleen alkuperäiseen pituuteen. Käyriltä voidaan jo ilman laskemistakin havaita eroja eri muovimateriaalien välillä, sillä eri muoveilla on erilaiset ominaisuudet. Lisäksi samallakin muovilla tehdyt kokeet eri

²⁹ Polymeeritekniikan perusteet, s.69–73

vetonopeuksilla saattavat antaa hyvinkin paljon toisistaan poikkeavat tulokset, mutta myös koekappaleen muoto vaikuttaa lopulliseen tulokseen²⁹.

Kun vetokoetta aletaan suorittamaan onkin tärkeä ottaa huomioon, että koekappaleet ovat keskenään saman muotoisia ja kappaleet on leikattu niin, että ne ovat suoraviivaisia eikä materiaalista löydy halkeamia, viiltoja tai epätasaista muotoa, jotka voisivat vaikuttaa mittauksen lopputulokseen merkittävästi. Koekappaleiden tulee olla myös materiaalia jota ei ole käsitelty esimerkiksi taivuteltu aikaisemmin, koska taivutus kohta on aina herkempi vedolle kuin käsittelemätön materiaali. Lisäksi vetokokeet on tehtävä kaikille koekappaleille samalla vetonopeudella jolloin käyrät ja tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään²⁹.

7.2.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Vetolujuus kokeeseen valmistautumisen aloitin perehtymällä vetolujuus mittauksen standardiin ja suunnittelemalla minkä kokoisilla kappaleilla vetotestit tullaan suorittamaan. Osa testattavista materiaaleista oli minulla isompina **arkkeina** (kuva 4), mutta osa Polypropeeni- ja Polykarbonaattikalvoista oli minulla yrityksen tuotekehitykseltä saatuja kappaleita, jotka olivat jo valmiiksi **työstettyjä** (Kuva 5) tuotantoon sopiviksi. Osa materiaaleista oli käsiteltyjä, joten täytyi tarkkaan miettiä testikappaleiden koko, jolla olisi mahdollista suorittaa testimenetelmä mahdollisimman standardoidusti ja koetulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään.



Kuva 4. Isommat eristearkit.



Kuva 5. Työstetyt koekappaleet.

Työstettyjen koekappaleiden (Kuva 5) koko vaihtoehdot olivat hyvin rajalliset, lopulta päädyin tekemään testikappaleista 150 mm x 15 mm kokoisia. Testikappaleiden koko osuu standardin antaman viiterajojen sisään, sekä tämä oli suurin mahdollinen testikappalekoko, joka oli saatavissa kaikista materiaaleista. Testikappaleet leikattiin käyttäen paperileikkuria, jonka avulla kappaleet pystyttiin asettamaan leikattaessa tarkasti, jolloin niistä tuli varmasti samankokoisia. Leikkurin terä oli myös riittävän terävä leikatakseen materiaaleja ilman turhaa hankausta ja kuormitusta. Kappaleista tuli keskenään samankokoisia ja leikkauks jälki oli tasainen, eikä leikkauksesta aiheutunut säröjä tai viiltoja materiaaleihin.

Ennen vetolujuustestien aloittamista varmistin vielä materiaalien paksuuden olevan se mitä toimittaja oli ilmoittanut. Jokaisen testikappaleen paksuus mitattiin ja kirjattiin tulos testien yhteydessä testiohjelmaan. Lopuksi jokaiseen **koekappaleeseen** (Kuva 6) merkattiin standardin osoittamalla tavalla ensin kaksi merkkiä 50 mm päähän toisistaan, mitattuna keskeltä kappaletta. Seuraavaksi merkinnät 100 mm päähän toisistaan, jättäen mittausalueen keskikohdan kappaleen keskelle. Merkinnät tein pehmeällä lyijykynällä, merkinnät olivat tärkeitä, koska niiden avulla kappaleet pystyttiin kohdistamaan vetokokeessa juuri samalla tavalla.



Kuva 6. Koekappaleiden merkinnät.

Vetokoetesti suoritettiin Zwick/Roell-**vetotestikoneella** (Kuva 7) ja siihen liitetyn tietokoneen TestXpertII ohjelman avulla. Vetokoneessa oli käytössä 2,5 kN anturi.



Kuva 7. Zwick/Roell-vetotestikone.

Testikappale asetettiin vetokoneen ylä- ja alaleukojen väliin niin, että leukojen väliin jäävä väli oli juuri 100 mm, joka on siis sama väli minkä merkitsin jokaiseen testikappaleeseen valmiiksi. Vetokoneen leuat piti asetella vain kerran tarkasti oikealle paikalleen, jonka jälkeen leukojen väli päivitettiin vetokoneen järjestelmään ja tämän jälkeen pystyi ajamaan koneen järjestelmän avulla aina tasan samaan paikkaan jokaisen vedon jälkeen. Kun kappale oli asetettu paikalleen leukojen väliin, nollattiin vetokoneen vetojännitys järjestelmän avulla.

Ennen vetotestin suorittamista testijärjestelmään täytyi asettaa haluttu esijännitys, vetonopeus sekä aika jonka vetokone kappaletta vetää. Esijännitykseksi asetin 5 N jonka jälkeen vetokone alkaa vetämään kappaletta 50 mm/min nopeudella. Testin kokonaisajaksi asetin 60 sekuntia. Suoritin vetotestit kaikille kappaleille samoilla asetuksilla, jolloin käyristä saadaan mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään.

Kuten vetotuloksista (Liite 5-6) voidaan huomata, polykarbonaateista EFR95-, DFR117- ja HY9170-kuvaajat ovat lähes yhdenmukaiset keskenään, mutta kaikki PC1860-testikappaleista venyivät ensin noin 520 N asti jonka jälkeen jokainen testikappale saavutti murtorajansa (Liite 6) ja **kappaleet katkesivat** (Kuva 8). Testituloksia analysoitaessa on kuitenkin tärkeää huomata, että kuten FTIR-spektroskopianalysissa selvisi, PC1860-kalvo sisältää palonestoaainetta, joka tekee kalvosta huomattavasti hauraampaa.



Kuva 8. Katkennut PC1860-testikappale.

Polyeteenitereftalaattikoekappaleiden vetotuloksista (Liite 7) voidaan huomata, että Mylarin myötöraja on noin 650 N, kun taas Melinexin myötöraja noin 400 N. Mylar-kalvojen paksuus oli 0,5 mm, kun taas Melinex-kalvojen 0,25 mm eli huomattavasti ohuempi, joka vaikuttaa lopputulokseen varmasti. Voidaankin

uskoa, että jos molemmat kalvot olisivat olleet keskenään samanpaksuisia, olisivat myös kuvaajat yhdenmukaisia.

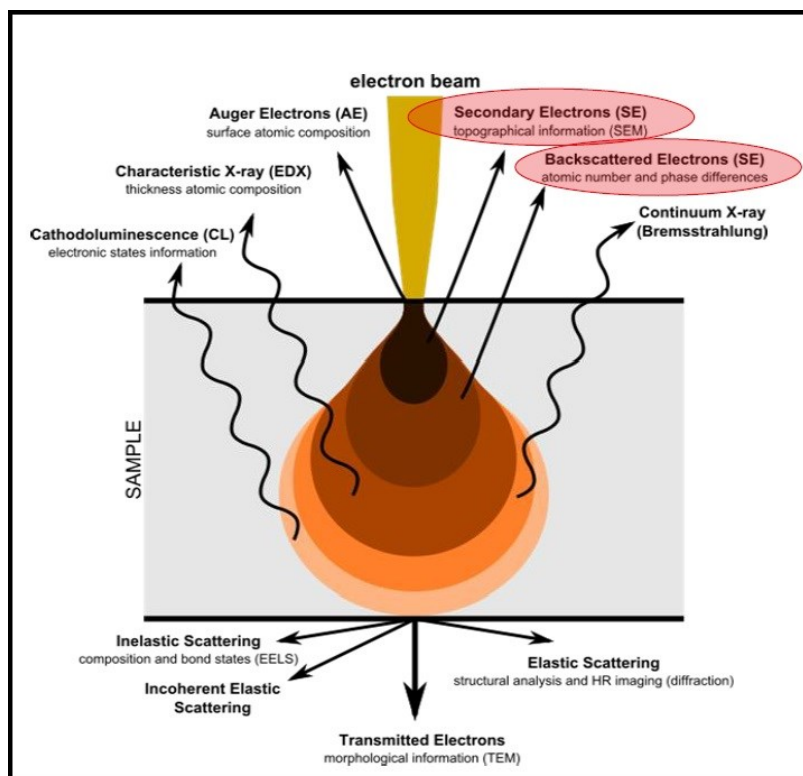
Polypropeenikalvojen Formex GK-17 Fin ja Formex GK-17 China, voidaan huomata, että testien kuvaajat (Liite 8) ovat lähes yhdenmukaiset, joskin hieman värähtelevät. Formex kappaleiden myötöraja oli noin 135 N. Kuvaajien epätasainen linja voi johtua siitä, että kappaleissa oli kalvoon painettu puristamalla teksti Formex. Kun kalvoa puristetaan, se ohenee puristuskohdasta ja kun sitä testitilanteessa vedetään jatkuvasti samalla voimalla, näkyy kappaleen ohuemmat kohdat myös kuvaajissa. Formexin matalaan myötörajaan vaikuttaa lisäksi materiaalin sisältämä palonestoaine, joka tekee siitä hauraampaa. Kuten kuvaajasta voidaan tarkkaan katsomalla nähdä, niin yksi testikappaleista saavutti murtorajansa testin aikana.

7.3 SEM-EDX-testimenetelmä

SEM–EDX on elektronimikroskopinen-skannaus varustettuna energian hajonta röntgenanalyysillä. Elektronimikroskoopi tuottaa kuvia skannaamalla pinnan, siihen kohdistetulla **elektronisäteellä** (Kuva 9). Tämä mahdollistaa kuvantamisen erittäin tarkkoilla suurennoksilla, tyypillisesti jopa noin 10–500 000 kertaisina³⁰.

Tyypillisiä ominaisuuksia, joita voidaan analyysin avulla tarkastella ovat materiaalivirheistä johtuvat murtumat sekä komponenttien pinnan laadun ominaisuudet. Energian hajonta röntgenanalyysiä käytetään materiaalien alkuainetunnistukseen ja kvantitatiivisen eli määrällisen koostumustiedon selvittämiseen³⁰.

³⁰ SEM-EDX-analyysi



Kuva 9. Elektronimikroskooppi elektronisäde.

7.3.1 Kokeen suoritus ja analyysi

SEM-EDX-koe on suoritettu polymeerinäytteen leikatulle pinnalle, kokeessa selvitettiin mitä lisäaineita materiaalinäytteet sisältävät. Kokeessa oli käytössä FEI Quanta 600, ohjelmistoversio 2.4, yhdessä Thermo NSS3 analysis system kanssa, jonka ohjelmistoversiona 3.3.94. Kokeessa täyteaineiden havaitsemisrajana oli 0.2painoprosenttia³¹.

³¹ Danfoss, SEM-EDX analyysi

Taulukko 2. SEM-EDX-analyysi.

Sample	Element					
	Mg	Si	P	Ti	Br	Sb
EFR95	X	X	-	-	-	-
HY9170	-	-	-	-	-	-
PC1860	X	X	X	-	-	-
DFR117	-	-	-	-	-	-
MYLAR	-	-	-	-	-	-
MELINEX	-	x	-	x	-	-
Formex GK-17 FIN	-	-	-	-	X	X
Formex GK CHINA	-	-	-	-	X	X

Polykarbonaattinäytteistä (Taulukko 2) EFR95 sisältää magnesiumia ja piitä, jotka ovat mahdollisesti peräisin magnesium silikaatti tyyppisestä täyteaineesta. HY9170- ja DFR117-materiaalinäytteet eivät sisällä ollenkaan täyteaineita. PC1860-polykarbonaatti sisälsi fosforia, joka on todennäköisesti peräisin fosforipohjaisesta palonestoaineesta. Lisäksi PC1860 sisältää EFR95 tavoin magnesiumia ja piitä (Liite 9)³¹.

Polyeteenitereftalaattinäytteistä (Taulukko 2) Mylar ei sisällä yhtään täyteaineita, mutta Melinex sisältää titaania, joka on peräisin pienestä määrästä TiO₂ titaanidioksidia, jolla saadaan materiaalista valkoisen väristä (Liite 10)³¹.

Formex GK-17 Fin- ja Formex-GK-17 China polypropeeninäytteet (Taulukko 2) sisälsivät molemmat samaa lisäainetta bromia, joka on peräisin bromiidusta antimonitrioksidi palonestoaineesta (Liite 10)³¹.

7.4 DSC–Differentialiskannauskalorimetri

DCS eli Differentialiskannauskalorimetri on usein käytetty analyysimenetelmä polymeeritutkimuksissa, menetelmän avulla saadaan olennaista tietoa, miten materiaali käyttäytyy eri lämpötiloissa. Menetelmällä voidaan tutkia materiaalin sisältävien komponenttien yhteensopivuutta, materiaalissa olevien lisäaineiden vaikutusta sekä materiaalin ominaista sulamis- ja lasittumislämpötilaa, kiteytymistä, amorfista ja kiteistä käyttäytymistä sekä kovettumiskäyttäytymistä.

Analyysimenetelmän avulla voidaan tutkia näytteen eri lämpötilasta riippuvia siirtymisiä lämpötilan tai ajan funktiona, mittaus alue on suhteellisen laaja, koska lämpömuutokset näytteessä voidaan mitata -80 celsiusasteesta jopa +300 celsiusasteeseen³².

7.4.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Näytemateriaalit analysoitiin differentiaaliskannauskalorimetrialla käyttäen dynaamista lämpöskannausta typpi-ilmakehässä. Suoritettiin standardisoitu analyysi seuraavasti: Näytteet lämmitettiin ensin 20°C/min, jota seurasi näytteiden jäähdytys 20°C/min ja sen jälkeen toinen lämmitys, jälleen 20°C/min³³.

Differentiaali skannauskalorimetri analyysissa polymeerinäytteen terminen historia poistetaan sulattamalla ja jäädyttämällä näyte ennen lopullista ajoa. Ensimmäisen lämmitysajon avulla poistetaan myös näytteistä mahdollisia epäpuhtauksia, jolloin seuraavalla lämmityskerralla voidaan saada mahdollisimman puhdas ja häiriötön kuvaaja. Ensimmäisen lämmitysajon jälkeen suoritetaan jäähdytysajo. Tämän jälkeen suoritetaan toinen lämmitysajo, joka näyttää polymeerimateriaalin ominaisuudet, kuten lasittumislämpötilan, kiteisen sulamispisteen ja materiaalin kemialliselle reaktiolle määritellyt entalpian muutokset. Analyysissä käytettiin differentiaaliskannauskalorimetria **Mettler AT250** (Kuva 10) laitetta, josta löytyy Trios v.5 ohjelmisto³³.

³² Measurlabs, Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria

³³ Danfoss DSC-analyysi



Kuva 10. Differentiaaliskannauskalorimetria Mettler AT250.

Taulukko 3. Polykarbonaattitulokset.

DSC step	Sample			
	EFR95	HY9170	PC1860	DFR117
First heating run				
Glass transition temperature [°C]	149.4	147.8	109.0	145.2

Taulukko 4. Polyeteenitereftalaatti- ja Polypropeenitulokset.

DSC step	Sample			
	Mylar	Melinex	Formex GK-17 FIN	Formex CHINA
First heating run				
Glass transition temperature [°C]	-	-	-	-
Cold crystallisation peak temperature [°C]	-	-	-	-
enthalpy [J/g]	-	-	-	-
Crystalline melting peak temperature [°C]	254.2	250.8	161.3	161.2
enthalpy [J/g]	54.4	57.2	73.7	76.7
Cooling run				
Crystallisation onset temperature [°C]	198.4	192.4	117.8	117.4
enthalpy [J/g]	40.0	40.4	72.8	75.3
Second heating run				
Glass transition temperature [°C]	82.5	81.1	-	-
Crystalline melting peak temperature [°C]	252.7	249.1	159.9	159.8
enthalpy [J/g]	43.3	41.8	75.4	78.3

Tarkasteltujen polykarbonaattinäytteiden (Taulukko 3) EFR95, HY9170, ja DRF117 lasittumislämpötilat ovat noin 150°C ja tuloksesta voidaan nähdä materiaalien olevan yhdenmukaisia toisiinsa nähden. PC1860-näytteen lasittumislämpötila on noin 109°C ja se on merkittävästi vähemmän verrattuna muihin polykarbonaattipohjaisiin materiaaleihin. PC1860-kalvon alempaan lasittumislämpötilaan on syynä siihen lisätty palonestoaine (Liite 11-12)³³.

Analysoitavien polyeteenitereftalaattinäytteiden (Taulukko 4) Mylar ja Melinex kiteinen sulamispiste on noin 250°C, vastaava kiteytymispiste noin 190°C ja lasittumispiste noin 80°C, nämä tulokset ovat yhdenmukaisia muihin polyeteenitereftalaatteihin verrattuna sekä materiaalit vaikuttavat olevan keskenään myös hyvin samankaltaisia (Liite 13)³³.

Testattujen Polypropeeninäytteiden (Taulukko 4) Formex GK-17 Fin ja Formex GK-17 China kiteinen sulamispiste on noin 160°C, ja vastaava kiteytymispiste noin 117°C. Materiaalit ovat yhdenmukaisia keskenään sekä vastaavat muita samantyyppisiä polypropeenimateriaaleja (Liite 14)³³.

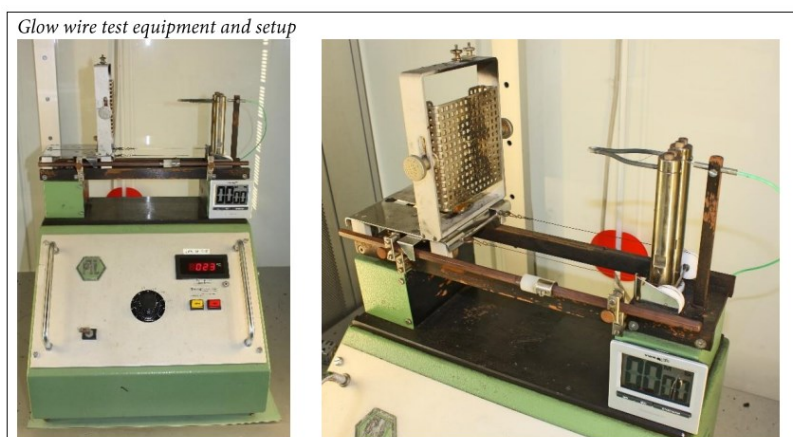
7.5 Hehkulankakoe

Hehkulankakoe on testimenetelmä jossa käytetään liekin sijaan jännitteistä nikromilankaa, jolla lämmitetään testattavaa kappaletta. Menetelmän avulla selvitetään materiaalien taipumusta vastustaa syttymistä ja jos syttyminen tapahtuu, menetelmän avulla selviää myös materiaalien kyky sammua itsestään. Lisäksi hehkulankakokeessa selviää levittääkö muovi tippuessaan paloa, mikäli muovi on syttynyt palamaan kokeen aikana. Erityisesti hehkulankakoetta käytetään simuloimaan esimerkiksi sähkölaitteen ylikuormittumisen tai viallisen komponentin aiheuttamaa ylikuumenemista³⁴.

³⁴ Glow wire testing

7.5.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Hehkulankakoe suoritettiin polymeerimateriaaleille noudattaen IEC 60695-2-11:2014 standardia. Ennen testin suorittamista materiaalinäytteitä säilytettiin 24 tuntia laboratorio ympäristössä. Näytekappaleita altistettiin jännitteiselle nikromilangalle 30 sekuntia, jonka jälkeen näytekappaleiden käyttäytymistä seurattiin toiset 30 sekuntia. Testinäytteiden alapuolelle asetettiin paperia, jotta saataisiin selville sytyttääkö mahdollinen tippuva sula muovi paperin tuleen. Materiaaleja testattiin kahdella eri lämpötilalla 750°C ja 850°C. Testissä käytettiin **hehkulankatesteriä** (Kuva 11) – PTL Dr.Grabenhorst GmbH T03.14³⁵.



Kuva 11. Hehkulankatesteri.

³⁵ Danfoss, Glow wire test analysis

Taulukko 5. Hehkulankakoetulokset.

Temperature [°C]	Sample	# plies	Ignition ?	t _i [s]	t _E [s]	Extinguished by withdraw ?	Totally Burned ?
750	EFR95	1	No	-	-	-	-
	HY9170	1	No	-	-	-	-
	PC1860	1	No	-	-	-	-
	DFR117	1	No	-	-	-	-
	MYLAR	1	Yes	0	1	No	No
	MELINEX	1	No	-	-	-	-
	FORMEX GK-17 FIN	1	Yes	1	1	-	-
	FORMEX GK CHINA	1	No	-	-	-	-
850	EFR95	1	Yes	1	28	No	No
	HY9170	1	Yes	1	38	No	No
	PC1860	1	Yes	1	17	No	No
	DFR117	1	Yes	1	30	Yes	No
	MYLAR	1	Yes	0	1	No	No
	MELINEX	1	Yes	0	1	No	No
	FORMEX GK-17 FIN	1	Yes	0	1	No	No
	FORMEX GK CHINA	1	Yes	0	1	No	No

(Taulukko 5) Parametrien kuvaus:

Ignition sarake kertoo, syttyikö testikappale palamaan.

t_i sarakkeessa on aika sekunteina, siitä kun jännitteinen hehkulangan kärki on asetettu kappaleen pinnalle, siihen kun näytekappale on syttynyt palamaan.

t_E on aika sekunteina kappaleen altistamisesta hehkulangan lämmölle, kappaleen sammumiseen asti.

Extinguished by withdraw sarake kertoo, sammuiko palamaan syttynyt testikappale, kun hehkulanka vedettiin pois näytteen pinnalta.

Totally burned sarakkeessa tieto siitä paloiko näytekappale täysin.

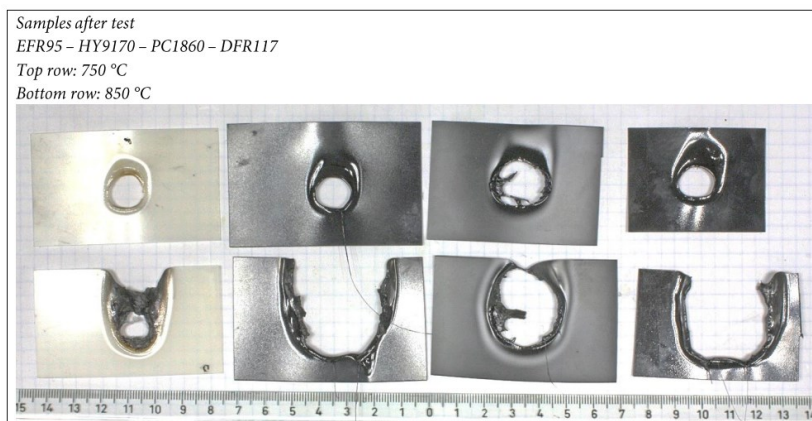
Ensimmäisistä testikappaleista, jotka altistettiin 750°C lämmölle (Taulukko 5) voidaan huomata, että ainoastaan Polyeteenitereftalaattia oleva Mylar syttyi välittömästi palamaan ja paloi sekunnin ennen sammumistaan. Polypropeenipohjainen Formex GK-17 Fin syttyi palamaan sekunnissa ja palaminen kesti sekunnin.

Seuraavat testikappaleet altistettiin 850°C lämmölle, tässä tapauksessa kaikki testikappaleet syttyivät palamaan. Polyeteenitereftalaatti- ja polypropeenikalvot

(Taulukko 5) syttyivät välittömästi, mutta polykarbonaattinäytteet vasta sekunnin jälkeen. Polykarbonaattikappaleet paloivat 17 sekunnista 38 sekuntiin, joista EFR95- ja PC1860-kappaleet sammuivat jo altistamisen aikana. DFR117-kappale sammui heti kun hehkulanka poistettiin kappaleen pinnalta ja HY9170-kappale jatkoi vielä palamista hehkulangan altistusajan jälkeen, palamatta kuitenkaan täysin. Polyeteenitereftalaatit Mylar ja Melinex sekä polypropeenit Formex GK-17 Fin- ja Formex GK-17 China koekappaleet sammuivat sekunnissa. Lopputuloksena voidaan todeta, että kaikki testikappaleet läpäisivät testivaatimukset molemmilla testilämpötiloilla.

Jokaiseen materiaaliin paloi kokeen aikana reikä, **polykarbonaateilla** (Kuva 12) ensimmäisen 750°C altistuksen jälkeen kalvoihin paloi vain pienet reiät, mutta 850°C lämmityskerralla kalvoihin paloi hieman suuremmat reiät.

Polyeteenitereftalaatti- ja polypropeenikalvoihin (Kuva 13) palaneet reiät olivat molemmilla lämmityskerroilla lähes samanlaiset kaikilla materiaaleilla.



Kuva 12. Polykarbonaattikappaleet testin jälkeen.



Kuva 13. Polyeteenitereftalaatti- ja polypropeenikappaleet testin jälkeen.

7.6 Kovuusmittaus

Kovuusmittaus on analyysimenetelmä, jota käytetään, kun halutaan saada tietoa kuinka kovaa tai pehmeää materiaali on. Menetelmän mittaus suoritetaan materiaalille soveltuvan mittausmenetelmän mukaan, mittausmenetelmät ovat standardisoituja ja mittauksessa käytetty mittauspää on näin standardisoitu. Mittaus suoritetaan suoraan materiaali levyn pinnalle painettavalla mittauspäällä, jota painetaan tietyllä voimalla. Tulokseksi saadaan materiaalin kovuusarvo, joka on yksikötön³⁶.

7.6.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Kovuusmittaus menetelmä tulee suoraan standardista, ja menetelmä on Shore-D. Mittauksessa käytettiin kartion mallista teräksistä mittapäätä. Ennen varsinaista mittausta näytekappaleet leikattiin ja pinottiin, jotta saavutettiin 6 mm kokonaispaksuus. Testi suoritettiin noudattaen ISO 868:2003 standardia. Kokeessa käytettiin kovuustestauslaitetta **Zwick Shore-D** (Kuva 14)³⁷.

³⁶ Polymeeriteknologian perusteet, s.82–84

³⁷ Danfoss, hardness analysis



Kuva 14. Kovuusmittauslaite, Zwick Shore-D.

Taulukko 6. Kovuusmittaustulokset.

	#	Sample	Hardness Shore-D	
			Maximum reading	Reading at 15 s
PC	1	EFR95	82	79
	2	HY9170	73	70
	3	PC1860	80	74
	4	DFR117	84	73
PET	5	Mylar	84	82
	6	Melinex	86	82
PP	7	Formex GK-17 FIN	69	61
	8	Formex GK CHINA	72	62

Sarake "Hardness Shore-D, Maximum reading" (Taulukko 6) osoittaa laitteen duromeetteristä saadun maksimilukeman ja sarake "Reading at 15 s" kertoo duromeetterin lukeman, kun on kulunut 15 sekuntia ensikosketuksesta näytteen pintaan.

Polykarbonaattinäytteiden (Taulukko 6) maksimaaliset lukemat verrattuna 15 sekunnin kohdalla rekisteröityihin lukemiin, eivät poikkea merkittävästi toisistaan. DFR117-koekappaleiden kohdalla on havaittavissa suurin ero näiden kahden lukeman välillä. Kun tarkastellaan näytteiden maksimaalista lukemaa, voidaan huomata poikkeavuutta ainoastaan HY9170-koekappaleiden kohdalla, jolla lukema on muita polykarbonaattimateriaaleja hieman pienempi.

Mylar ja Melinex polyeteenitereftalaattien (Taulukko 6) kaikki rekisteröidyt lukemat ovat hyvin yhdenmukaisia, tulosten perusteella voidaan todeta materiaalien olevan hyvin samanlaisia kovuusominaisuuksiltaan.

Polypropeenit Formex GK-17 Fin ja Formex GK-17 China (Taulukko 6) antavat keskenään lähes identtiset lukemat, mutta kummallakin materiaalilla on havaittavissa pientä eroavaisuutta 15 sekunnin jälkeen rekisteröidyssä lukemassa, verrattuna maksimaaliseen lukemaan. Materiaalien voidaan kuitenkin todeta olevan hyvin samankaltaisia keskenään.

7.1 Materiaalien kosteuden imeytymisominaisuusanalyysi

ISO 62:2008 on menetelmä, jolla määritetään kosteuden imeytymisominaisuudet tasaisten tai kaarevien kiinteiden muovien läpi. Menetelmä kertoo myös veteen upotetun muovin imeytyneen veden määrän, ennakkoon määritetyn ajan sisällä³⁸.

³⁸ SFS online, Water absorbtion

Tämä testimenetelmä on mahdollista homogeenisille materiaaleille sekä polymeerimatriisikomposiiteille, jotka on testattu lasittumislämpötilan alapuolella³⁸.

7.1.1 Kokeen suoritus ja analyysi

Materiaalinäytteiden kosteuden imeytymisominaisuus testi tehtiin noudattaen ISO 62 standardin kohtaa 6.3. Aluksi testinäytteitä kuivattiin uunissa 50 celsiusasteessa ja näytteiden painoa seurattiin, kunnes näytteiden massa oli vakio. Tämän jälkeen näytteet sijoitettiin säiliöihin, jotka oli täytetty demineralisoidulla vedellä, jonka lämpötila pidettiin 23 celsiusasteessa. Näytteiden oltua 24 tuntia upotettuna säiliössä olevaan veteen, näytteet nostettiin säiliöstä ja niistä poistettiin pintavesi kuivalla liinalla. Pintaveden huolellisen poistamisen jälkeen, näytteet punnittiin uudelleen. Näytteiden kyllästysvaiheessa näytteet upotettiin ja punnittiin uudelleen tietyn väliajoin vakiopainoon saakka. Testivälineenä käytettiin punnitsemisessa Mettler AT250, jonka mittaustarkkuus on $\pm 0.0005 \text{ g}$ ³⁹.

Taulukko 7. Imeytymisominaisuusanalyysitulokset.

Sample	Drying at 50 °C Weight change [%] after:			Water exposure at 23 °C Weight change [%] after:		
	24 h	48 h	120 h	24 h	48 h	96 h
PC EFR95	-0.048	-0.057	-0.057	0.39	0.40	0.36
HY9170	-0.049	-0.052	-0.056	0.38	0.36	0.34
PC1860	-0.040	-0.042	-0.047	0.31	0.30	0.29
DFR117	-0.040	-0.059	-0.059	0.38	0.37	0.38
PET Mylar	-0.069	-0.076	-0.086	0.43	0.50	0.58
Melinex	-0.060	-0.084	-0.088	0.50	0.52	0.59
PP Formex GK-17 FIN	-0.016	-0.025	-0.031	0.05	0.06	0.06
Formex GK CHINA	-0.013	-0.024	-0.029	0.05	0.05	0.06

³⁹ Danfoss, Water absorption analysis

Tuloksia tarkastelemalla (Taulukko 7) havaitaan, että uunissa kuivatuista polykarbonaateista PC1860-kalvon massan muutos oli pienin ja kolmen muun polykarbonaattinäytteen kuvaajat olivat lähes yhdenmukaisia. Tarkastellessa polykarbonaattien veden imeytyvyys kuvaajaa (Liite 15), havaitaan PC1860-näytteen sitovan hieman vähemmän kosteutta itseensä kuin muut polykarbonaattimateriaalit.

Polyeteenitereftalaattinäytteiden Mylar- ja Melinex-kuvaajista (Liite 15) ja tuloksista (Taulukko 7) voidaan havaita, että Melinex-kalvon massan muutos oli testin aikana hieman suurempi, mutta mittausvaiheiden lopullinen lukema kummallakin materiaalilla oli lähes yhdenmukainen.

Formex GK-17 Fin- ja Formex GK-17 China polypropeeninäytteiden kuvaajista (Liite 15) ja tuloksista (Taulukko 7), näkee selvästi materiaalien imeytyvyysominaisuuksien olevan lähes identtisiä, koko testin ajan.

8 OMAT PÄÄTELMÄT

8.1 Päätelmät testitulosten lopputuloksista

Tutustuttuani polyeteenitereftalaattien Mylarin ja Melinexin teknisiin tietoihin ja valmistuneisiin testituloksiin, voin todeta niiden olevan hyvin yhdenmukaisia ominaisuuksiltaan. Materiaalien suurin ero on, että Melinexiin on lisätty valmistettaessa lisäaine titaanioksidi, mutta lisäaineen määrä on hyvin pieni ja aine vaikuttaa materiaalin väriin, ei mekaanisiin ominaisuuksiin.

Jo ennen tutkimusten varsinaista aloittamista oli oletus, että Formex GK-17 Fin ja Formex GK-17 China ovat samaa materiaalia, mutta eri valmistajalta. Materiaalitestitulosten sekä polypropeenimateriaalien teknisten tietojen perusteella voinkin todeta oletuksen pitävän paikkansa, materiaalien testituloksissa ilmeni vain hyvin pieniä eroja. Uskon pienehköjen testitulosten erojen johtuvan siitä, että materiaaleilla on eri valmistaja ja näin ollen myös eri pituiset kuljetus- ja varastointiajat. Formex GK-17 -materiaalit nousivat kosteuden imeytymisominaisuustestissä esiin positiivisella tavalla, muihin materiaaleihin verrattuna Formex GK-17 veden imeytyminen oli vähäisintä. Materiaali nousi kuitenkin myös kahdessa muussakin testissä esille, kovuusmittauksessa Formexin kovuusarvo oli matalin ja vetolujuuskokeessa Formexin myötöraja oli vain noin 150 N. Formexin matala myötöraja voi johtua materiaalin sisältämästä palonestoaineesta, koska palonestoaineet vaikuttavat materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin tekemällä siitä hauraamman.

Polykarbonaattien testituloksista on helposti huomattavissa, että kolme neljästä polykarbonaatista ovat jokaisessa testissä lähes yhdenmukaisia keskenään. Yksi polykarbonaattimateriaali nousee kuitenkin esille useammassa testituloksessa. Esille nouseva materiaali on PC1860-kalvo, joka testitulosten perusteella tullaan hylkäämään taajuusmuuttajaan sopimattomana. PC1860-materiaalilla oli matala lasittumispiste ja sen lisäksi se sisältää fosfaattista palonestoainetta, joka haurastuttaa materiaalia. Materiaalin heikentyneet mekaaniset ominaisuudet

näkyivät vetokokeessa, kun materiaalin kaikki kappaleet katkesivat, muiden polymeerien ollessa sitkeitä.

8.2 Tehtyjen materiaalitestien luotettavuus

FTIR, SEM-EDX, DSC, hehkulankakoe, kovuusmittaus ja materiaalien kosteuden imeytymisominaisuuskokeet on suoritettu laboratorio-olosuhteissa ja noudattaen kullekin testimenetelmälle kuuluvaa standardia. Testien aikana käytössä olleet välineet ovat olleet kalibroituja, ja testit on suorittanut materiaalitestauksen ammattilainen, joten kaikkien näiden testien tuloksia voidaan pitää täysin luotettavina.

Suoritin vetolujuuskokeen itse noudattaen ISO 527 standardia. Testituloksissa saattaa olla joitakin virheitä, esimerkiksi joitain materiaaleja oli pakattu tiukasti kiristekalvolla tai niihin oli tehty jo taivutuksia. Lisäksi vetokoelaitteen kalibrointi oli myöhässä ja se saattaa aiheuttaa joitakin virheitä testituloksissa.

8.3 Testimenetelmien hyödyntäminen jatkossa

Opinnäytetyön aikana tehdyistä materiaalitesteistä saatiin paljon tarpeellista tietoa materiaalien ominaisuuksista ja yrityksen näkökulmasta materiaalitestausta tullaan hyödyntämään myös jatkossa.

Materiaalitestausta olisi hyvä hyödyntää aina uusia materiaali valintoja tehdessä, sekä aika-ajoin käytössä oleville materiaaleille laadun varmistamiseksi, erityisesti silloin kuin materiaalissa havaitaan poikkeamia.

LÄHTEET

Chemical resistance of polycarbonate products. Viitattu 29.4.2022. <https://www.bayplastics.co.uk/downloads/infobrochures/Bay%20Info%20Brochures/Polycarbonate%20Chemical%20Resistance%20Information.pdf>

Chemical resistance of polyethylene. Viitattu 29.4.2022. <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Chemical-Resistance-Chart>

Danfoss Vaasa site, julkaisematon materiaali.

Danfoss, DSC-analyysi. 2022. Julkaisematon materiaali.

Danfoss, SEM-EDX-analyysi. 2022. Julkaisematon materiaali.

Danfoss. Fourier-transform infrared spectroscopy. 2022. Julkaisematon materiaali.

Danfoss. Glow wire test analysis. 2022. Julkaisematon materiaali.

Danfoss. Hardness analysis. 2022. Julkaisematon materiaali.

Danfoss. Water absorption analysis. 2022. Julkaisematon materiaali.

DFR117 flame retardant polycarbonate film. Viitattu 15.4.2022. <https://m.made-in-china.com/product/Flame-Retardant-Polycarbonate-Film-and-Sheet-692529112.html>

Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria. Viitattu 13.5.2022. <https://measurlabs.com/fi/menetelmat/differentiaalinen-pyyhkaisykalorimetria-dsc/>

Folien-centrum, Melinex339 film. Viitattu 17.4.2022. <https://folienzentrum.com/en/pet-film-melinex-339-white-polished-polished-240000x1250mm-x0-175mm.html>

Glow wire testing. Viitattu 15.5.2022. <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=503-32020&DocType=Specification+Or+Standard&DocLang=EN>

HY9170 polycarbonate film. Viitattu 14.4.2022. <http://ishanyang.com/productshow.asp?ID=8>

itw formex. Viitattu 17.4.2022. <https://www.itwformex.com/products/formex-gk>

Kurri, V. & Malén, T. & Sandell, R. & Virtanen, M. 2008. Muovitekniikan perusteet. 4. painos. Helsinki. Edita Prima.

Lexan EFR95 film. Viitattu 15.4.2022. <https://ff.sabic.eu/uploads/resources/1608718402-61860809-LEXAN-EFR95-FILM-DATASHEET-2020.pdf>

PC1860 longhua polycarbonate film. Viitattu 14.4.2022. <https://www.ptsuk.com/longhua-pc-film/>

Polyethylene terephthalate light impacts. Viitattu 25.3.2022. <https://www.plastictechnologies.com/wp-content/uploads/2018/07/How-Light-Impacts-rPET-Characteristics.pdf>

Polypropylene chemical compatibility. Viitattu 30.4.2022. <https://www.calpaclab.com/polypropylene-chemical-compatibility-chart/>

SEM-EDX-analyysi. Viitattu 12.5.2022. <https://www.rotechlabs.co.uk/routine-metallurgical-services/metallography/sem-and-edx-analysis#:~:text=SEM%20%26%20EDX%20are%20analytical%20test%20techniques%20used,to%20understand%20material%20characteristics%20at%20a%20microscopic%20level>

Seppälä, J. 2005. Polymeeri tekngologian perusteet. 5. painos. Helsinki. Otatieto.

SFS online. Water absorption. Viitattu 4.5.2022. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/6/106127.html.stx>

Stenbacka, Mylar film. Viitattu 17.4.2022. https://stenbacka.fi/wp-content/uploads/sites/3/2019/08/Mylar-A-50A-125A-eng_19.pdf

Taajuusmuuttaja. Viitattu 16.4.2022. <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>

Tekniseri. Polymeeri materiaalien työstöongelmat. 2022. Julkaisematon materiaali.

Turpeenoja, L. & Lehtiniemi, K. 2016. Mooli 2. 1-9. painos. Helsinki. Otava.

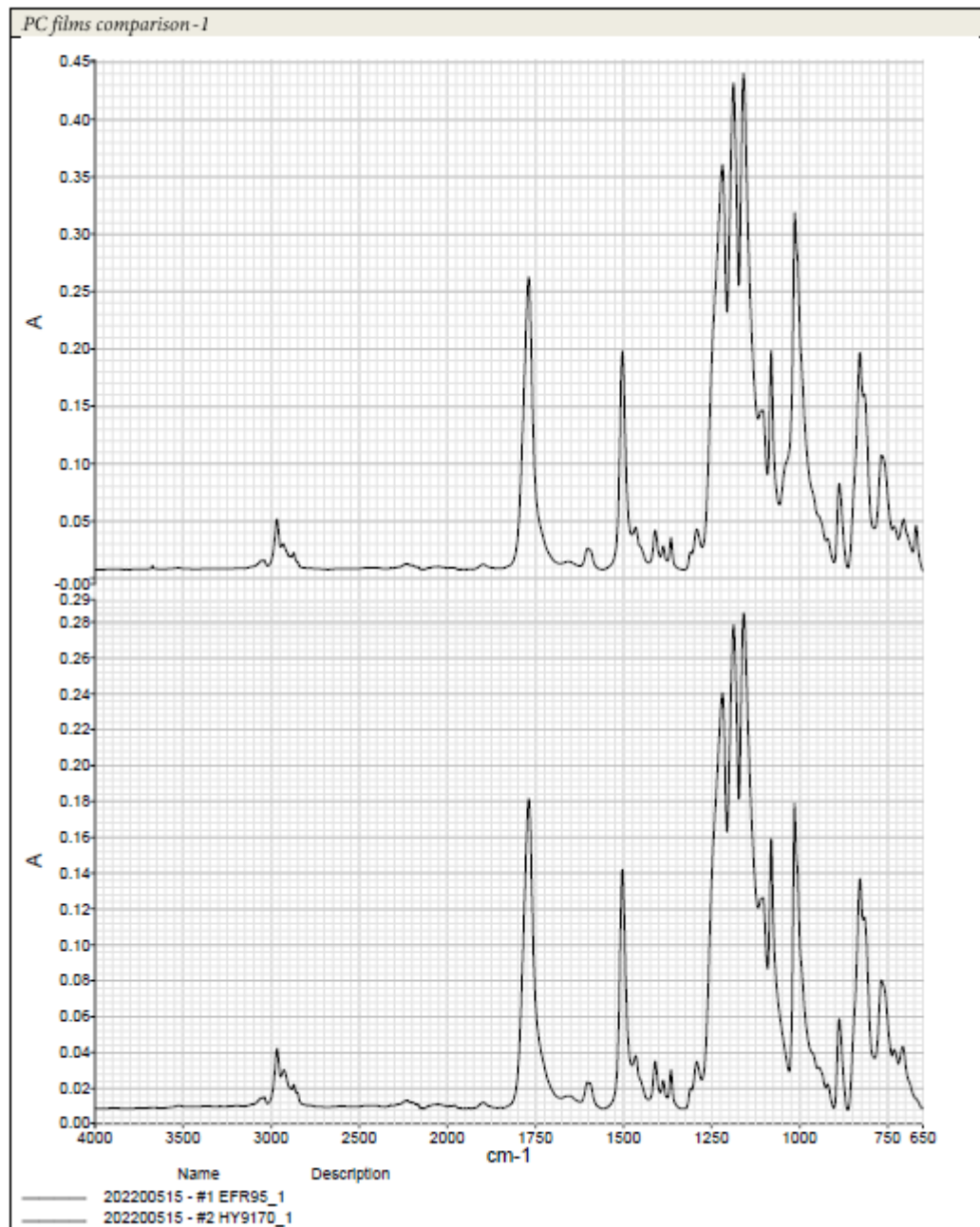
UV-light resistance of polycarbonate. Viitattu 25.3.2022. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17042-La-nueva-tecnologia-de-copolimero-mejora-la-resistencia-a-la-luz-UV-del-policarbonato.html>

UV-resistance of polypropylene. Viitattu 25.3.2022. <https://www.servicethread.com/blog/the-uv-resistance-of-polypropylene-and-polyester-explained>

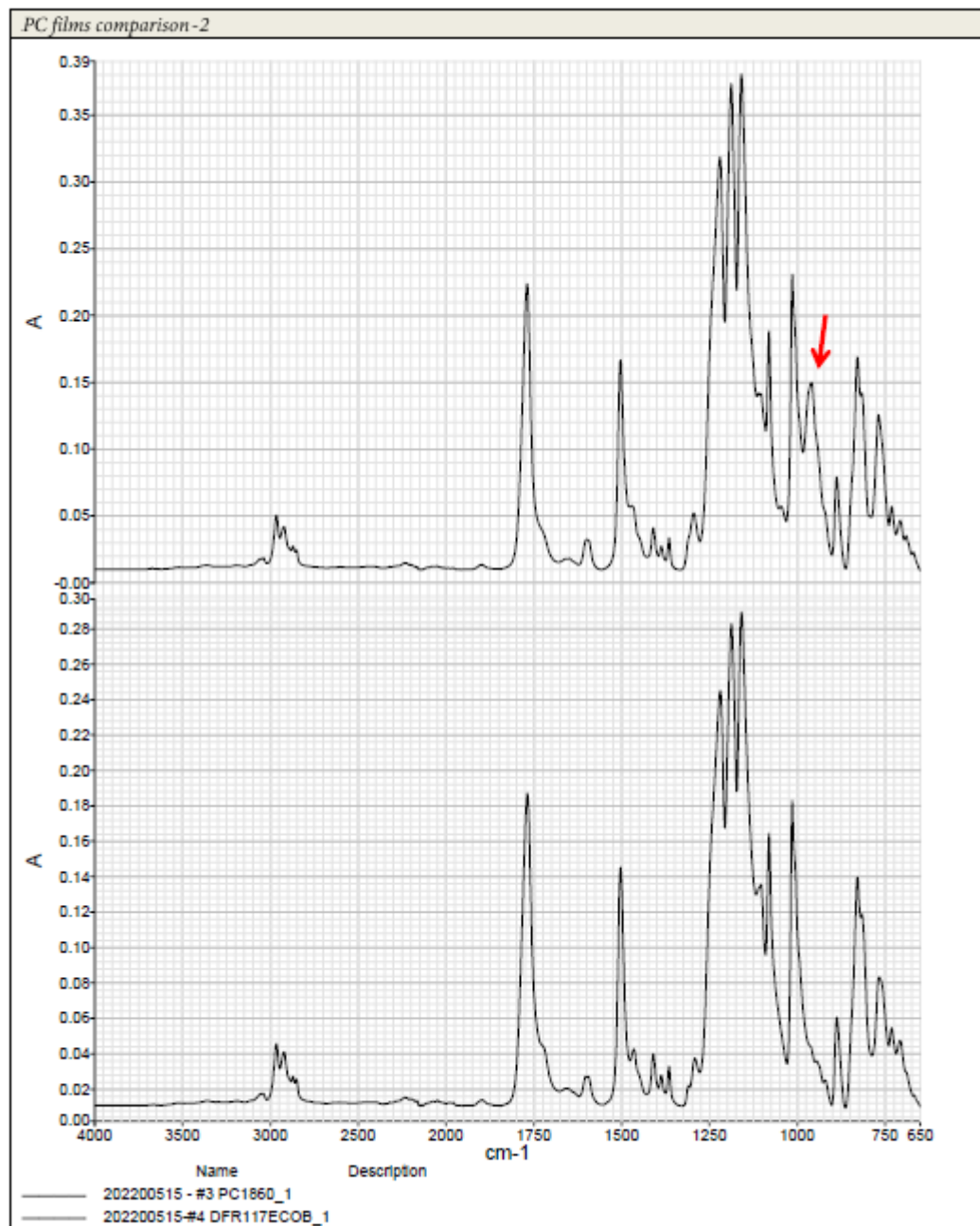
Vacon Oy vuosikertomus, 2013. Viitattu 5.4.2022. <https://www.globenewswire.com/news->

[release/2014/03/04/615418/0/fi/Vaconin-vuoden-2013-vuosikertomus-tilinp%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-ja-selvitys-hallinto-ja-ohjausj%C3%A4rjestelm%C3%A4st%C3%A4-julkaistu.html](https://www.vaconin.fi/2014/03/04/615418/0/fi/Vaconin-vuoden-2013-vuosikertomus-tilinp%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-ja-selvitys-hallinto-ja-ohjausj%C3%A4rjestelm%C3%A4st%C3%A4-julkaistu.html)

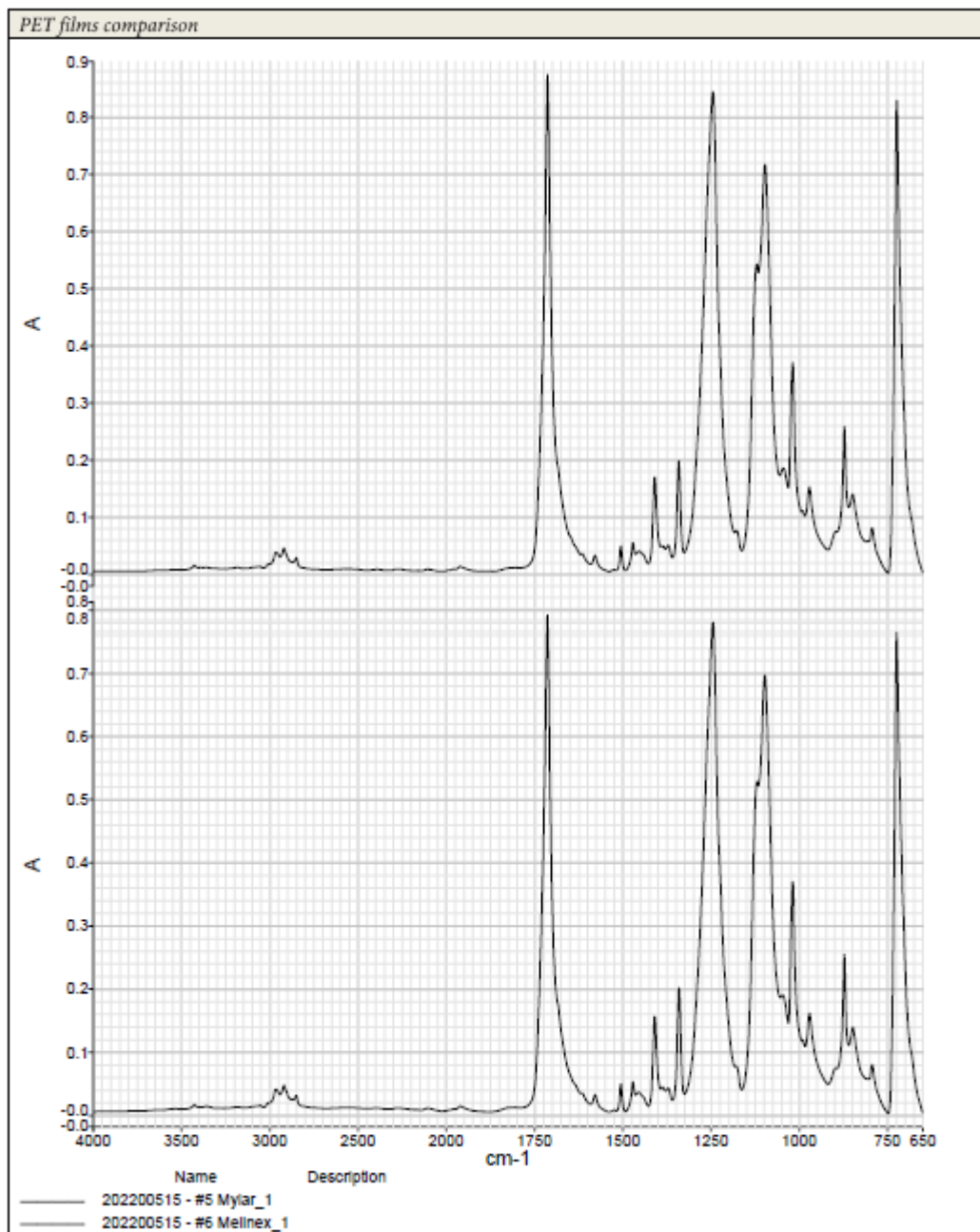
Välimäki, P. Polymer analysis. 2013. Julkaisematon materiaali.

LIITTEET**LIITE 1**

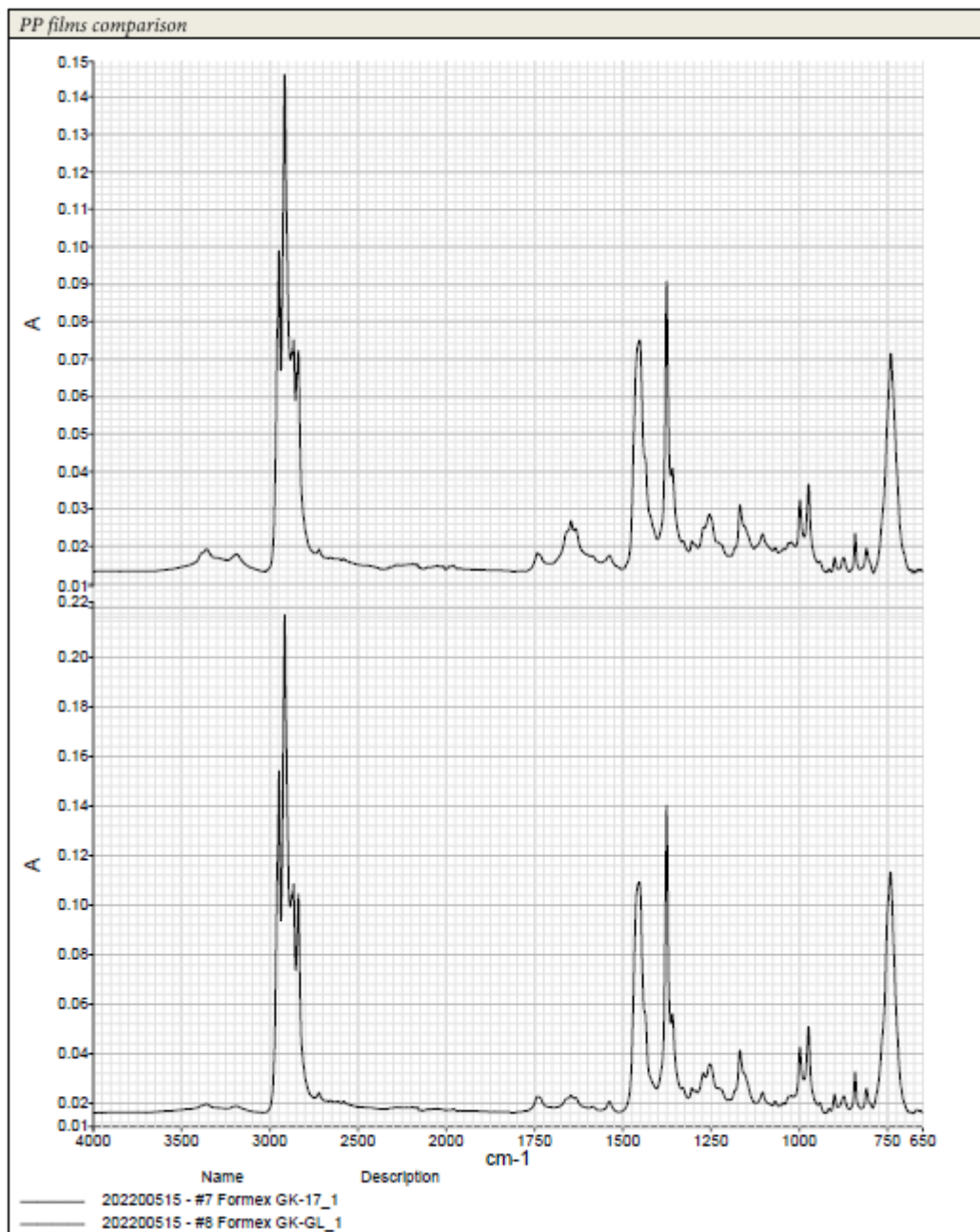
LIITE 2



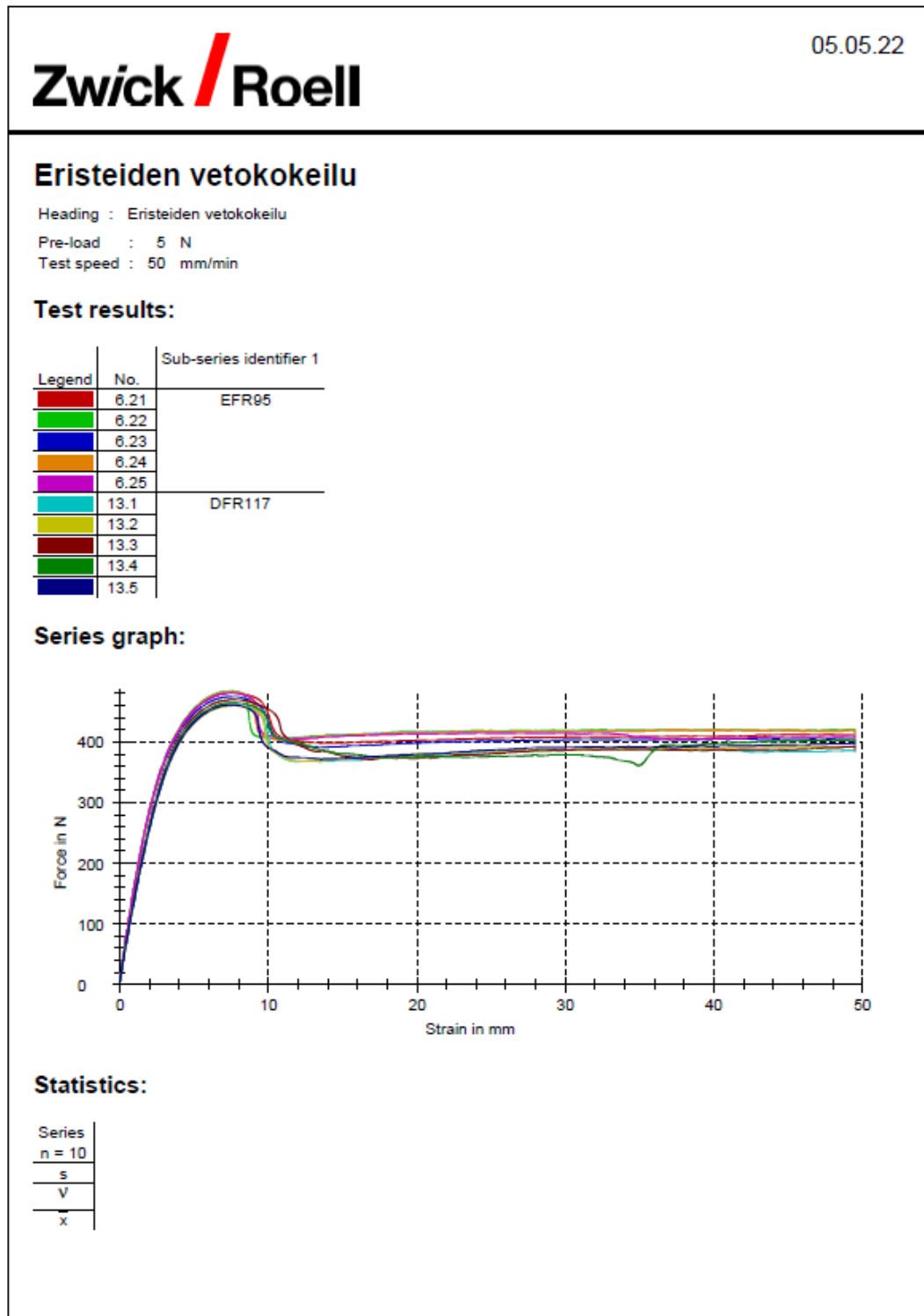
LIITE 3



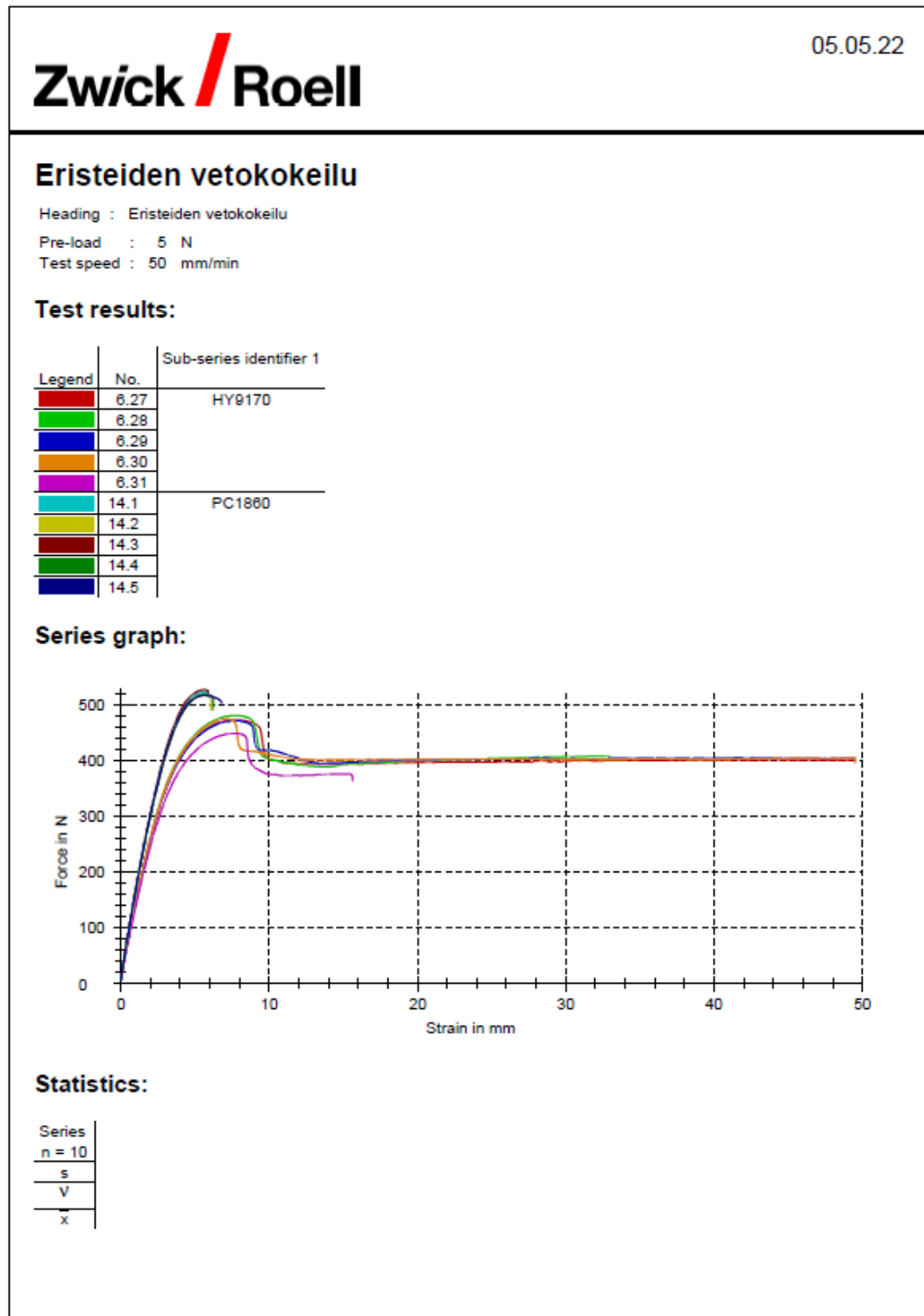
LIITE 4



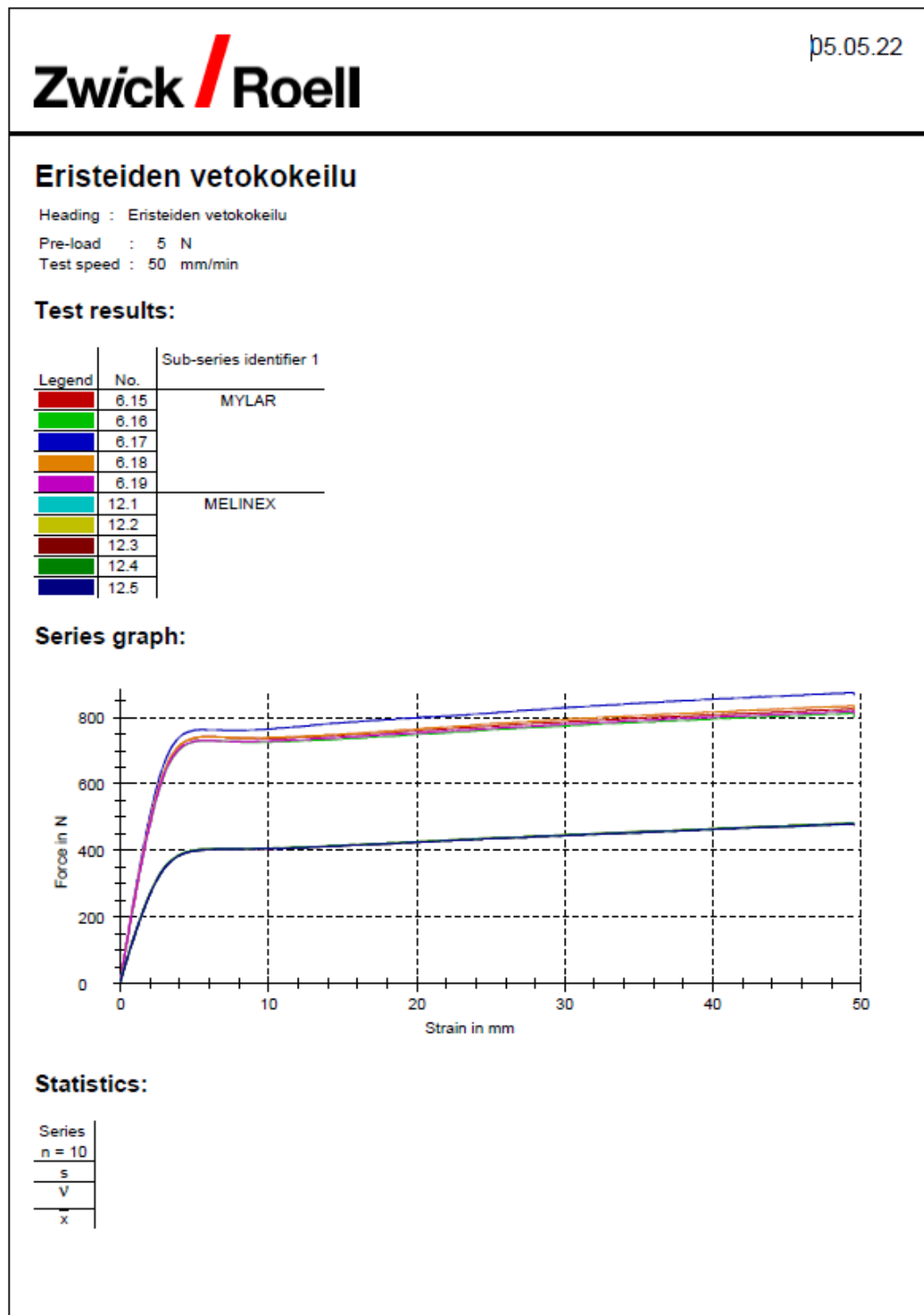
LIITE 5



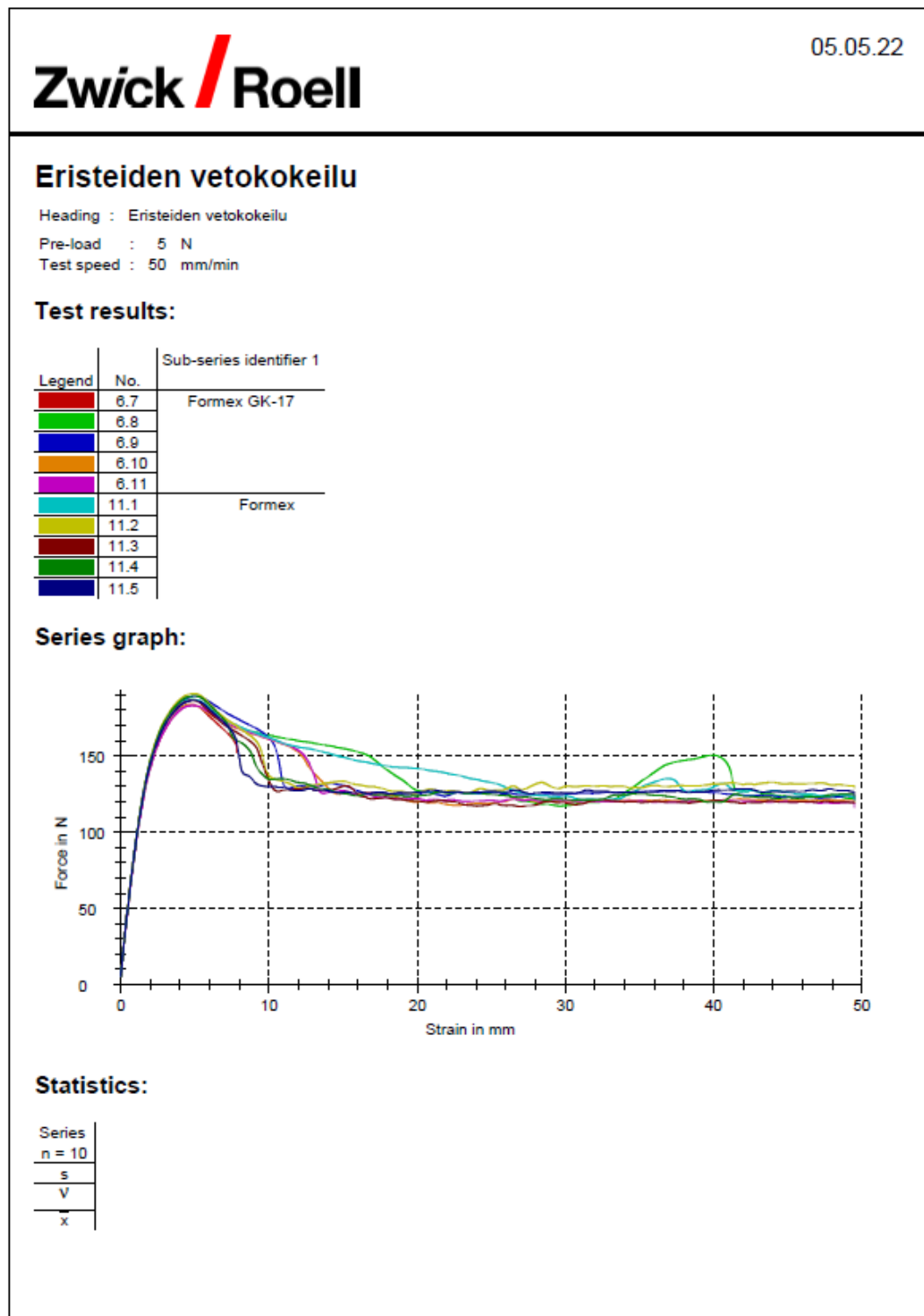
LIITE 6



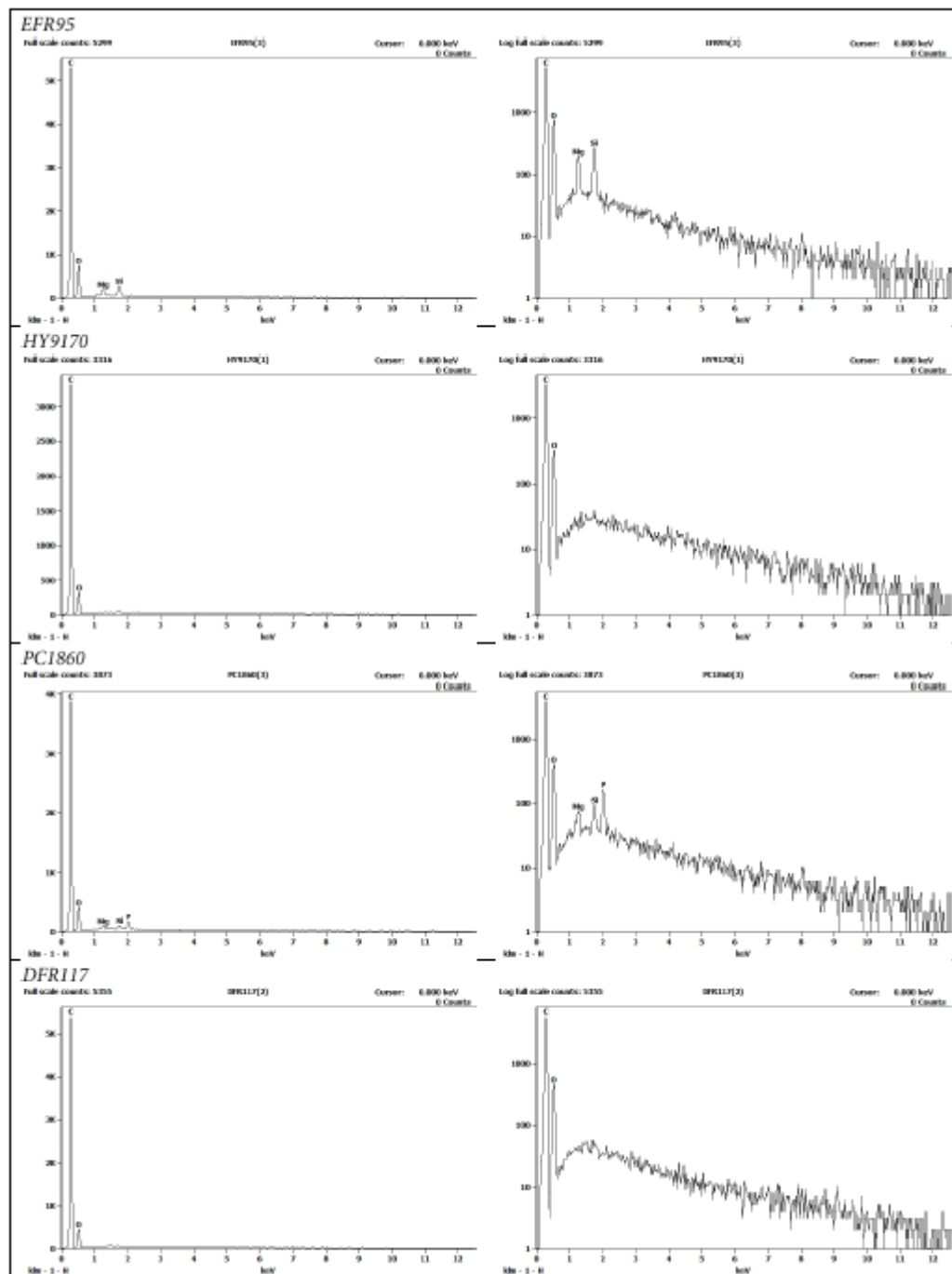
LIITE 7



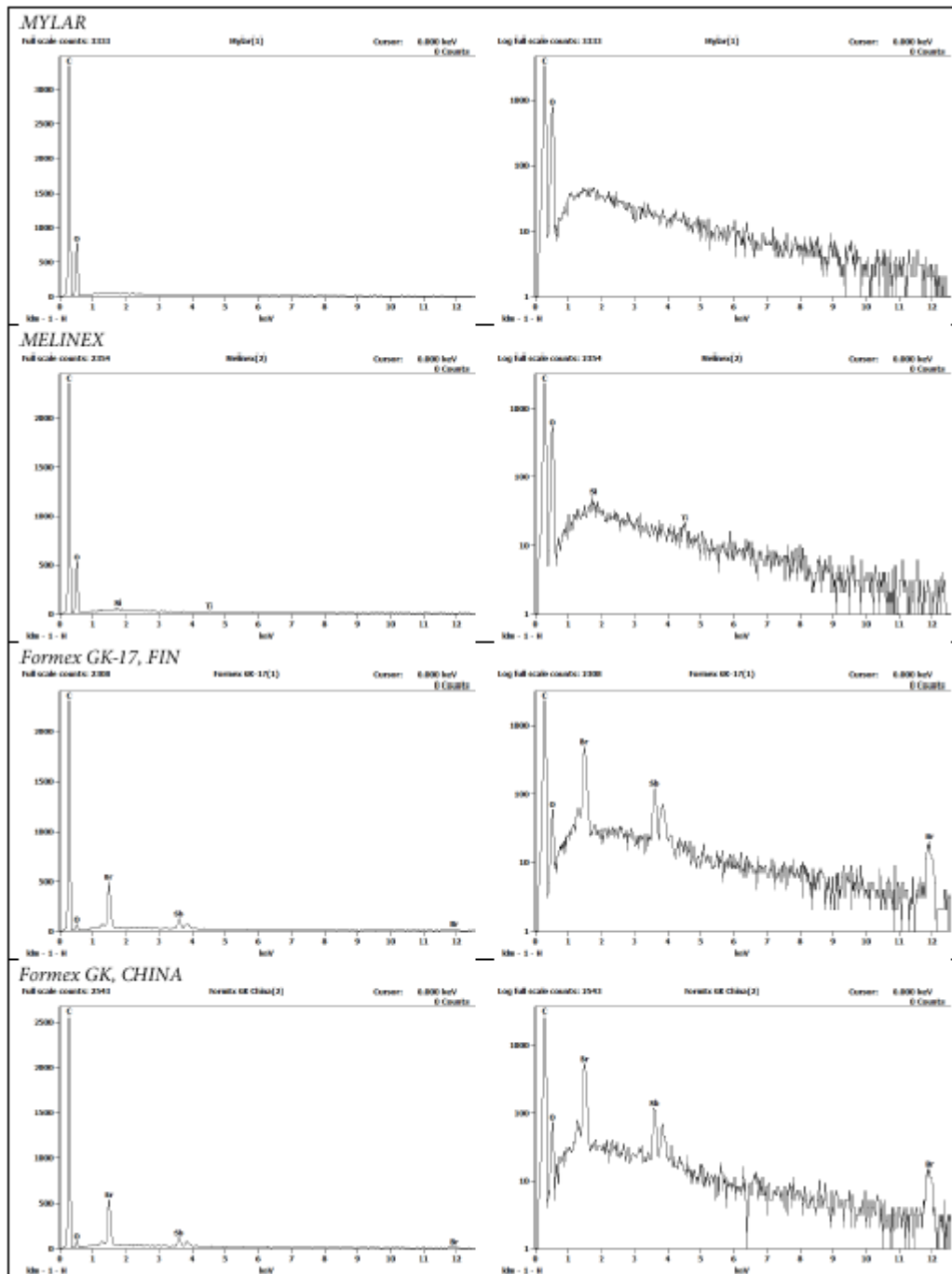
LIITE 8



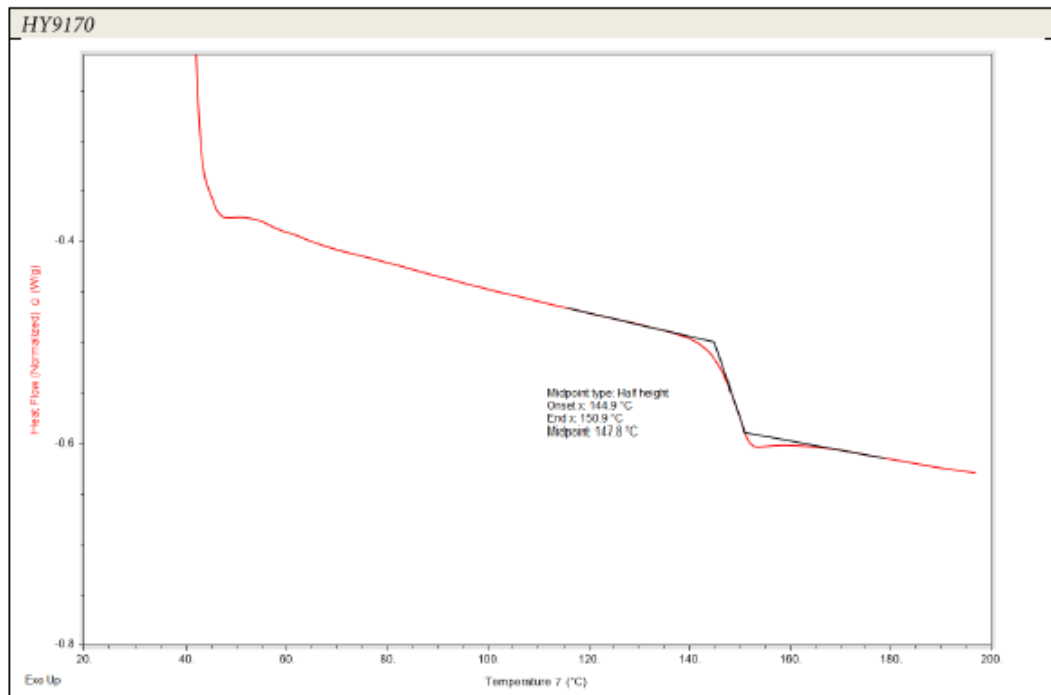
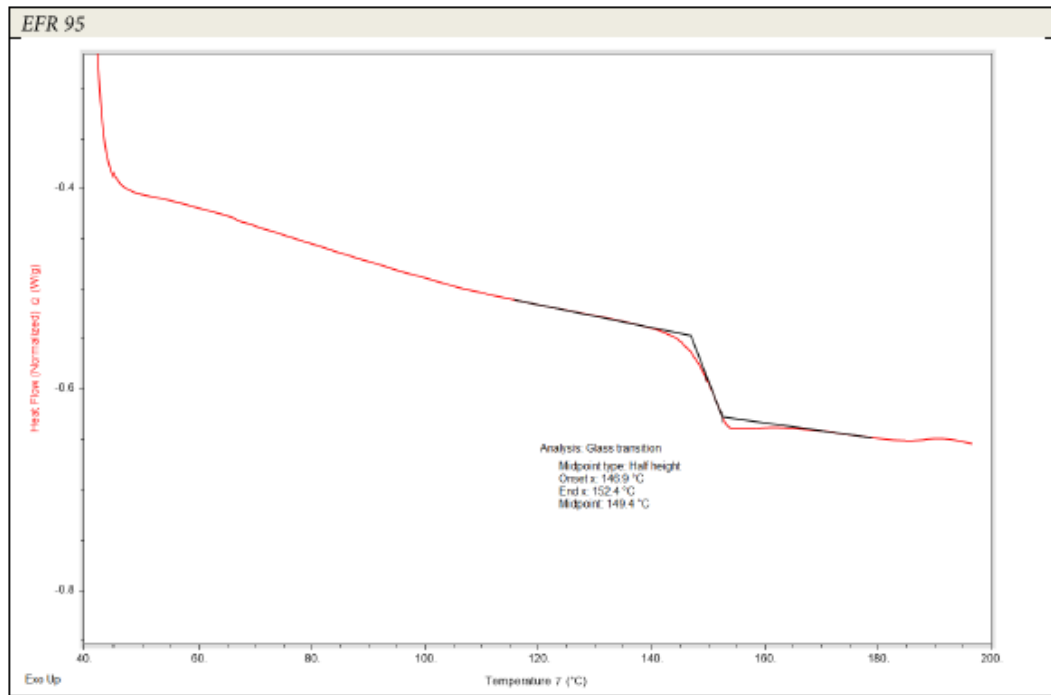
LIITE 9



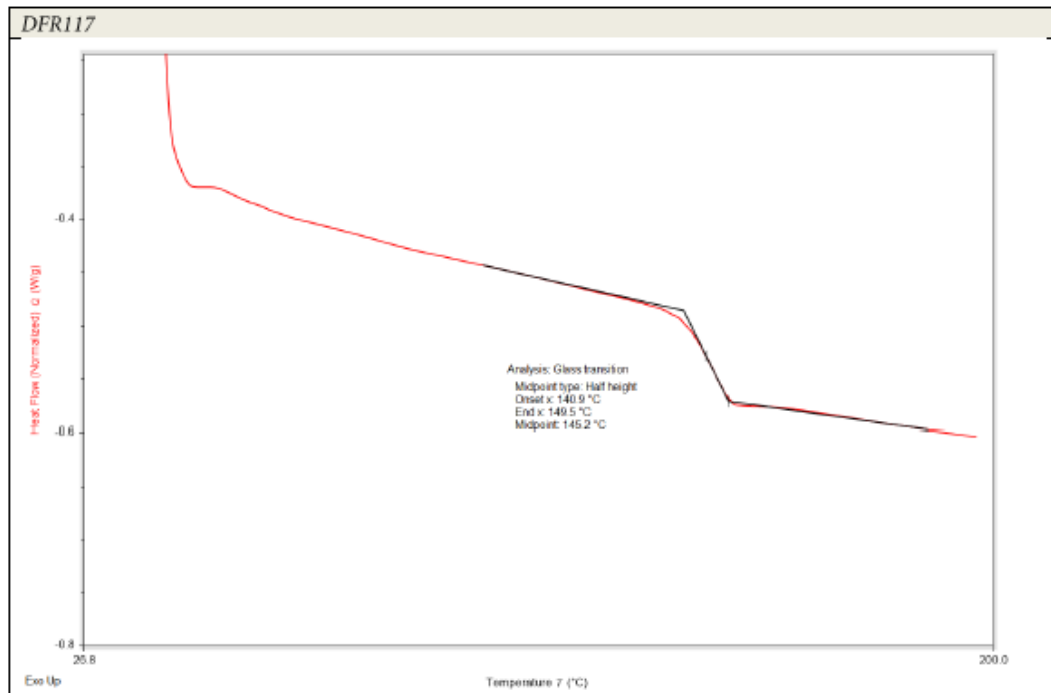
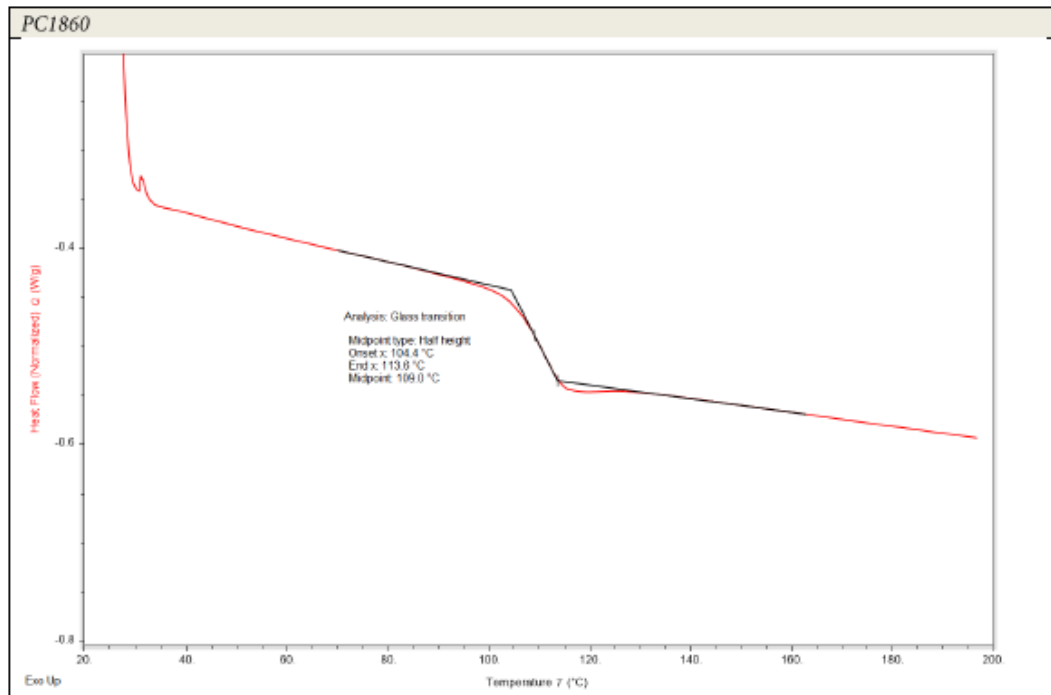
LIITE 10



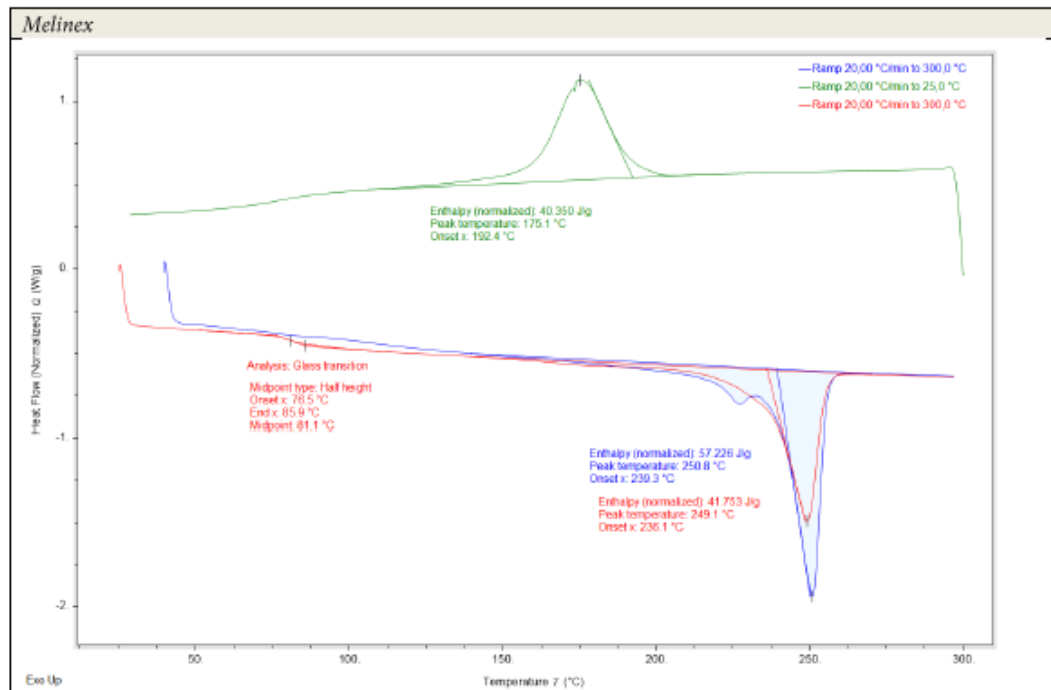
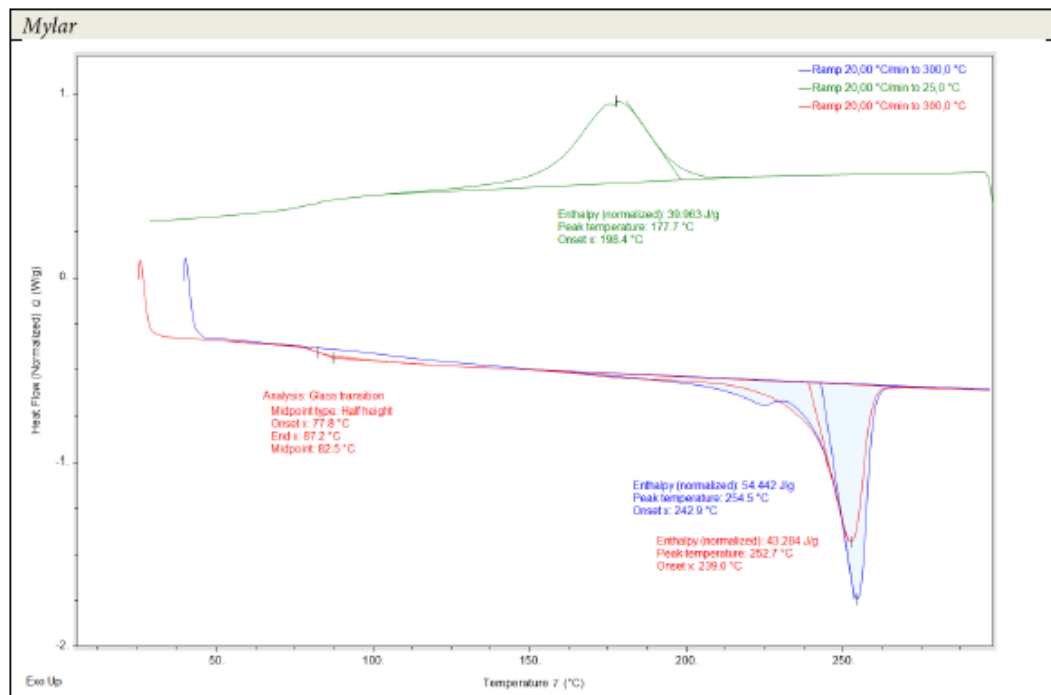
LIITE 11



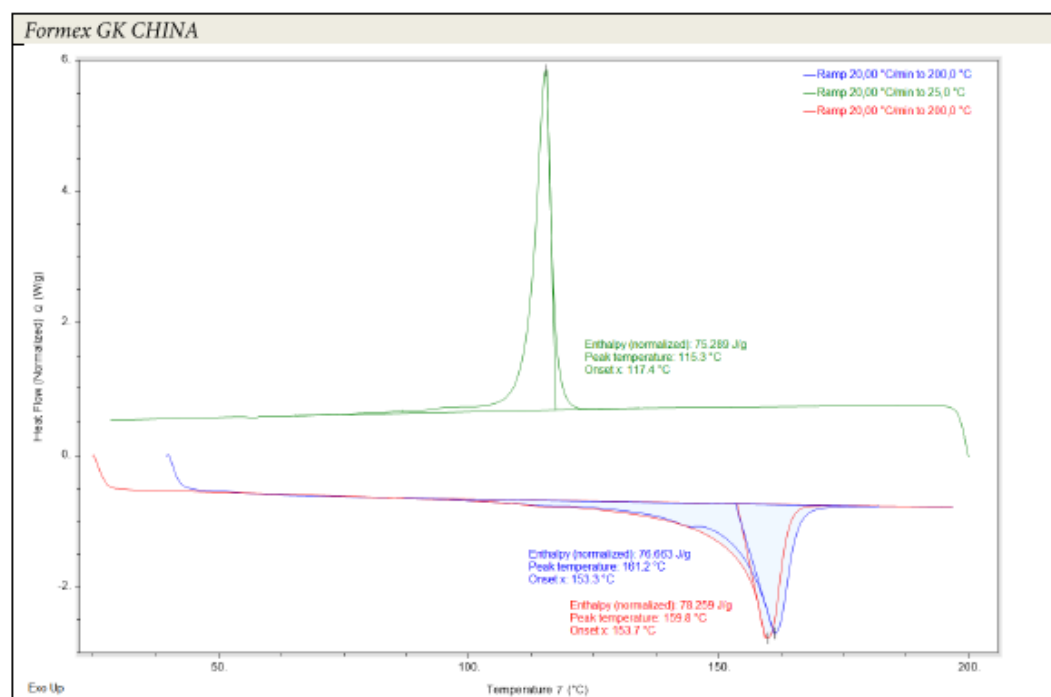
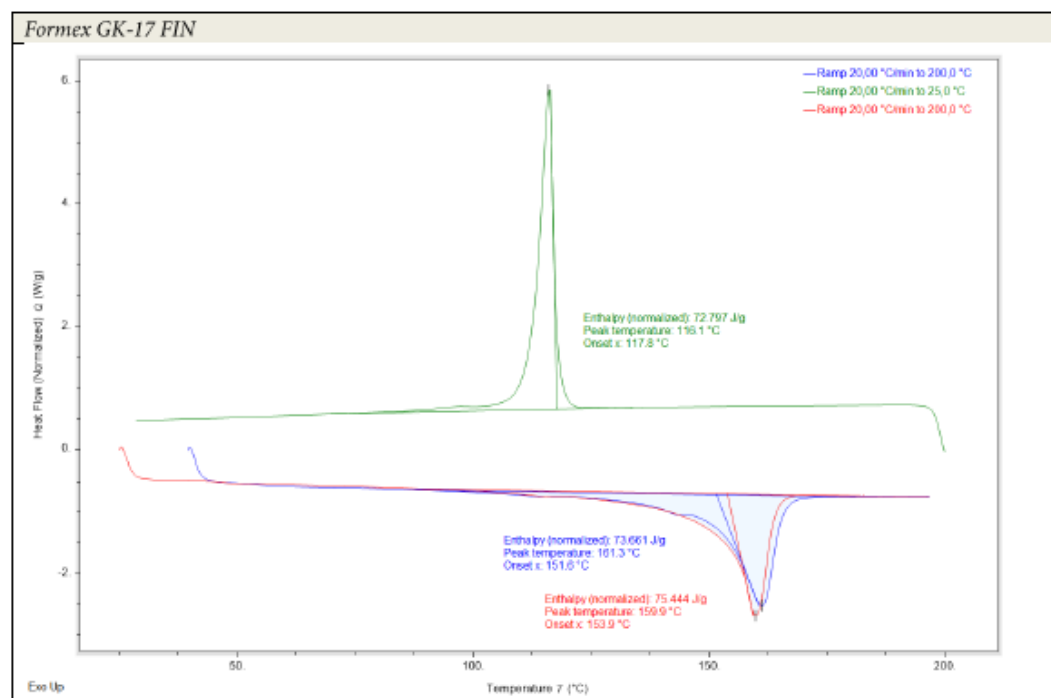
LIITE 12



LIITE 13



LIITE 14



LIITE 15

