

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022

Mikko Lehtinen

PVB-MUOVIN KIERRÄTYKSEN MAHDOLLISUUDET



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022 | Sivumäärä 33

Ohjaaja: Liisa Lehtinen

Mikko Lehtinen

PVB-muovin kierrätyksen mahdollisuudet

Opinnäytetyö tehtiin osana MuKi-hanketta, jonka tarkoituksena oli kehittää ja tehostaa muovien kierrätystä Vakka-Suomessa. Eräs hankkeen tarkasteltavista muoveista oli polyvinylibutyaali, jonka ylijäämämateriaalia syntyy erityisesti laminoitujen turvalasien tuotannossa.

Opinnäytetyön teoriaosassa keskitytään PVB-muovin valmistukseen, ominaisuuksiin sekä uusiokäytön ongelmakohtiin. Lisäksi MuKi-hankkeessa mukana olevilta yrityksiltä kerättiin PVB-muovin ylijäämämateriaalia, jonka prosessoitavuutta ja mekaanisia ominaisuuksia tutkittiin muovin työstömenetelmillä sekä vetotestilaitteella. Testattavina materiaaleina oli suoraan tuotannosta saatua ylijäämämateriaalia sekä ulko-olosuhteissa varastoitua ylijäämämateriaalia.

Tuloksien perusteella testattavissa materiaaleissa ei havaittu huomattavaa eroavaisuutta mekaanisten ominaisuuksien osalta. PVB-muovin uusiokäyttö yksinään on hankalaa, mutta sopivilla prosessointiparametreilla ja seoksina eri muovien kanssa sen uusiokäyttöä voidaan tehostaa.

Asiasanat:

polyvinylibutyaali, vetolujuus, ekstruusio, ahtopuristus, kierrätys

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Chemical and Materials Engineering

2022 | Total number of pages 33

Supervisor: Liisa Lehtinen

Mikko Lehtinen

Possibilities of PVB plastic recycling

The thesis was done as part of the MuKi project, which aimed to develop and increase the efficiency of plastic recycling in the Vakka-Suomi region. One of the plastics researched in the project was polyvinyl butyral. Surplus polyvinyl butyral is generated especially in the production of laminated safety glass.

The theoretical part of the thesis focuses on the production of PVB plastic, its properties, and issues with PVB recycling. In addition, surplus PVB plastic material was collected from the companies involved in the MuKi project, and its processability and mechanical properties were studied using plastic processing methods and tensile test equipment. The tested materials were surplus material obtained directly from production and surplus material stored outdoors.

Based on the results, no significant difference in mechanical properties was observed between the tested materials. The reuse of PVB plastic alone is difficult, but with suitable processing parameters and in mixtures with different plastics, its reuse can be made more efficient.

Keywords:

polyvinyl butyral, tensile strength, extrusion, compression moulding, recycling

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	7
1 Johdanto	8
2 MuKi-hanke	9
2.1 Turun ammattikorkeakoulu	9
2.2 Ukipolis Oy	10
3 PVB-muovi	11
3.1 Valmistus ja kemiallinen rakenne	11
3.2 Ominaisuudet	12
3.3 Käyttökohteet	13
4 PVB-muovin kierrätyksen ja uusiokäytön ongelmat	15
5 Kierrätetyn PVB-muovin koekappaleiden valmistus ja testaus	16
5.1 Ekstruusio	17
5.2 Ruiskuvalu	18
5.3 Ahtopuristus	19
5.4 Vetokoe	21
5.5 Tulokset	22
6 Loppupäätelmät	25
7 Yhteenveto	29
Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. Suoraan tuotannosta saadun PVB-muovin vetotestien tulokset

Liite 2. Ulko-olosuhteissa varastoidun PVB-muovin vetotestien tulokset

Kuvat

Kuva 1. PVB-muovin kemiallinen rakenne. Kuvassa PVB on jaettu kolmeen ryhmään, jotka ovat vinyylibutyyraali [x], vinyylialkoholi [y] ja vinyyliasetaatti [z]. (Carrot ym. 2015.)	12
Kuva 2. PVB-muovin ja lasin välisiä sidoksia. Keskellä kuvaa on esitettyä vetysidoksia sekä kuvan oikealla puolella kovalenttinen sidos. (Carrot ym. 2015.)	13
Kuva 3. Laminoidun turvalasin rakennekuva. Kahden lasikerroksen välissä on PVB-kalvo, joka kiinnitetään lasiin paineen ja lämmön avulla.	14
Kuva 4. Tuotannosta kerättyä puhdasta PVB-muovin ylijäämämateriaalia.	16
Kuva 5. Kaksiruuviekstruuderit Labtech LT20-44.	17
Kuva 6. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistettua filamenttia ja granulaattia. Ekstruusiolla valmistettiin filamenttia, joka granuloitiin pieniksi paloiksi.	18
Kuva 7. Ahtopuristin, Labtech Engineering, Hydraulic press LP-S-20.	19
Kuva 8. Ahtopuristimella valmistettu näytelevy suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista. Levyn koko 140x140x3 mm.	20
Kuva 9. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistetut koekappaleet. Materiaali on ahtopuristuksen jälkeen leikattu 1 cm levyisiksi kappaleiksi.	21
Kuva 10. Vetotestilaitte, Shimadzu AGS-X.	22

Kaaviot

Kaavio 1. PVB-näytteiden murtolujuuksien vertailu markkinoilla oleviin tuotteisiin. (Carrot ym. 2015 s. 114; Matweb 2022).	23
Kaavio 2. PVB-näytteiden murtovenymien vertailu markkinoilla oleviin tuotteisiin. (Carrot ym. 2015 s. 114; Matweb 2022).	24

Kuvaajat

Kuvaaja 1. Ulko-olosuhteissa varastoidusta PVB-muovista valmistettujen koekappaleiden jännitys-venymäkuvaajat.	25
Kuvaaja 2. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistettujen koekappaleiden jännitys-venymäkuvaajat.	27

Taulukot

Taulukko 1. Materiaalien mekaanisten ominaisuuksien vertailu.	23
---	----

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

kN	voiman yksikkö, kilonewton
MPa	paineen yksikkö, megapascal
PVA	polyvinyylialkoholi, polyvinyl alcohol
PVB	polyvinyylibutyraali, polyvinyl butyral
rpm	pyörimisnopeuden yksikkö, rotations per minute
vetolujuus	jännitys ensimmäisessä havaitussa paikallisessa maksimissa vetolujuusmittauksen aikana (Suomen standardisoimisliitto SFS 2019)

1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kierrätetyn polyvinylibutyraalin käyttömahdollisuuksia, tutkia sen mekaanisia ominaisuuksia ja uudelleenprosessoinnin parametreja. PVB-muovin suurimpia käyttökohteita ovat autoteollisuuden laminoidut turvalasit, joiden tuotannossa syntyy ylijäämämateriaalia. Tämän ylijäämämateriaalin kierrätys ja uusiokäyttö on hankalaa PVB-muovin ominaisuuksien ja laatuvaatimusten johdosta.

Opinnäytetyö tehtiin osana MuKi-hanketta, jonka tarkoituksena oli kehittää muovien kierrätystä erityisesti Vakka-Suomessa. Hankkeessa olivat mukana Ukipolis Oy, Turun ammattikorkeakoulu sekä useita teollisuusyrityksiä, joiden tuotannossa syntyy muovien ylijäämävirtoja. Työssä keskityttiin muutaman yrityksen tuotannossa syntyvään PVB-muovin ylijäämämateriaaliin, jonka kierrätystä ja uusiokäyttöä haluttiin tehostaa. PVB on herkkä kosteudelle ja lämmölle, mikä vaikeuttaa varastointia ja uusiokäyttöä.

Työssä keskityttiin PVB-muovin teoriaan ja sen kierrätyksen ja uusiokäytön ongelmakohtiin. Lisäksi yritysten ylijäämämateriaalista valmistettiin koekappaleita, joiden avulla selvitettiin ylijäämämateriaalin mekaanisia ominaisuuksia. Koekappaleita valmistettiin suoraan tuotannosta saadusta PVB-muovista sekä ulko-olosuhteissa varastoidusta PVB-muovista. Koekappaleiden valmistuksessa käytettiin yleisiä muovin työstömenetelmiä ekstruuderia ja ahtopuristinta sekä laadullisiin määrittäyksiin vetotestilaitetta.

2 MuKi-hanke

Muovin kiertotalouskeskittymän, eli MuKi-hankkeen pääasiallinen tarkoitus oli selvittää Vakka-Suomen ja sen lähialueen teollisuusyritysten muovisivuvirtojen määriä ja tehostaa materiaalikiertoa. MuKi-hankkeessa oli mukana useita lähialueen teollisuusyrityksiä, joiden tuotannossa syntyy muovin ylijäämävirtoja. Näiden ylijäämävirtojen hyödyntämistä haluttiin tutkia ja tehostaa. Lisäksi hankkeessa oli mukana Turun ammattikorkeakoulu sekä Ukipolis Oy.

MuKi-hanke jaettiin kahteen eri vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin mukana olevien yritysten muovien materiaalilaatuja ja -määriä. Toisessa vaiheessa keskityttiin ylijäämämateriaalien jatkokäsittelyn tehostamiseen ja toteutettiin siihen liittyvää tutkimustyötä. Näillä toimenpiteillä selvitettiin materiaalien soveltuvuutta uusioraaka-aineena ja löydettiin uusia käyttökohteita. (MuKi-hanke 2019.)

2.1 Turun ammattikorkeakoulu

Turun ammattikorkeakoulu oli mukana MuKi-hankkeessa TKI-toiminnan kautta. Turun ammattikorkeakoulussa tutkimus-, kehittämis- ja innovaatiotoimintaa (TKI) toteutetaan tutkimusryhmien kautta projektipainotteisena toimintana. Tutkimusryhmien avulla opiskelijoiden, projektiammattilaisten sekä yritysten osaaminen ja tarpeet saadaan sidottua yhteen. Projektien kautta saadaan tuotettua luotettavaa tutkimustyötä sekä kehitettyä tuotteita ja palveluja yritysten ja elinkeinoelämän tarpeeseen. (Turun ammattikorkeakoulu 2020.)

2.2 Ukipolis Oy

Ukipolis on erikoistunut yritysten liiketoiminnan kehittämiseen ja se tarjoaa yrityksille neuvontaa ja tietämystä esimerkiksi yrityksen rahoitukseen tai yritystoiminnan aloittamiseen. Ukipolis tekee yhteistyötä korkeakoulujen, tutkimuslaitosten ja osaamiskeskusten kanssa, mikä mahdollistaa yrityksiä ja oppilaitosten välisen saumattoman yhteistyön. (Ukipolis 2021.)

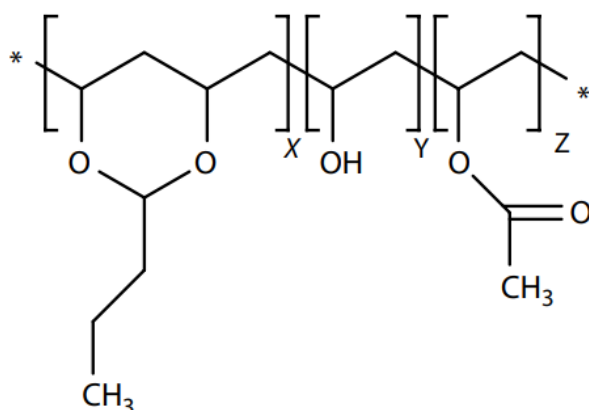
3 PVB-muovi

Polyvinyylibutyaali eli PVB on amorfinen polyvinyyliasetaaleihin kuuluva kestopuovi, jonka tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluvat sen vahva kiinnittymiskyky, sitkeys, iskunkestävyys sekä optinen kirkkaus. Näiden ominaisuuksien johdosta sen suurimpia käyttökohteita ovat auto- ja rakennusteollisuuden laminoidut turvalasit.

PVB kehitettiin 1920-luvulla, mutta sen käyttö kiihtyi huomattavasti 1940-luvulla sen syrjäyttäessä aikaisemmat materiaalit laminoiduissa turvalaseissa. Vuonna 2011 valmistetusta PVB-muovista 89 % käytettiin laminoituihin turvalaseihin. PVB on luonnostaan jäykkää ja taipumatonta materiaalia, mutta pehmentimien ja muiden lisäaineiden avulla sen ominaisuuksia voidaan kontrolloida käyttötarkoituksiinsa sopiviksi. (Carrot ym. 2015; Wade 2016.)

3.1 Valmistus ja kemiallinen rakenne

PVB-muovin valmistus tapahtuu kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa polyvinyyliasetaatista valmistetaan polyvinyylialkoholia hydrolyysin avulla. Toisessa vaiheessa polyvinyylialkoholi reagoi butaanieldehydin kanssa nukleofiilisen addition kautta muodostaen lopullisen tuotteen polyvinyylibutyaalin. Kuvassa 1 on esitetty PVB-muovin kemiallinen rakenne. Edellä mainitut reaktiot eivät tapahdu täydellisesti, vaan tuotteisiin jää lähtöaineita. Tästä syystä PVB on terpolymeeri, jonka kaikilla osilla on vaikutusta sen kemiallisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin.



Kuva 1. PVB-muovin kemiallinen rakenne. Kuvassa PVB on jaettu kolmeen ryhmään, jotka ovat vinyylibutyaali [x], vinyylialkoholi [y] ja vinyyliasettaatti [z]. (Carrot ym. 2015.)

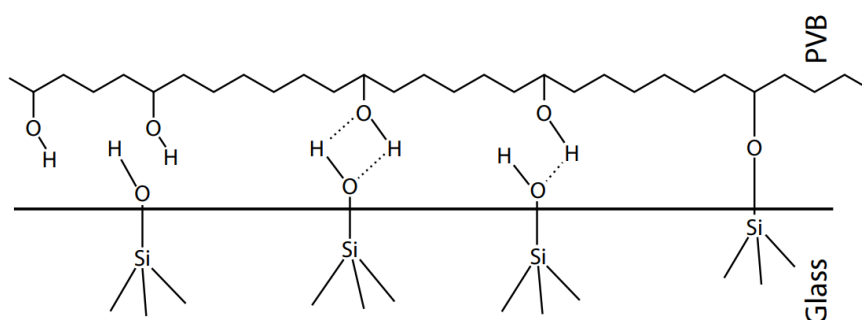
Laminoiduissa turvalaseissa käytettävässä PVB-muovissa on normaalisti vinyyliasettaattia 1–3 % ja vinyylialkoholia 18–23 %, loput ovat vinyylibutyaalia. Osien suhde vaihtelee käyttötarkoitusten mukaan ja niiden jakaumaa voidaan säätää pehmentimillä ja muilla lisäaineilla. Pehmentimien määrä PVB-muovissa on 15–30 %. (Carrot ym. 2015; Wade 2016.)

3.2 Ominaisuudet

PVB-muovin tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluvat vahva kiinnittymiskyky, iskunkestävyys, optinen kirkkaus sekä joustavuus. Suurin osa ominaisuuksista selittyy vinyylialkoholin hydroksyyliyhmiin avulla. Vinyylibutyaali-yksikkö on pooliton, joka ei reagoi helposti. Vinyylialkoholi on toisaalta hyvin poolinen ja reagoi herkästi eri aineiden kanssa, jolloin alkoholin OH-ryhmät voivat muodostaa vetysidoksia ja kovalenttisiä sidoksia. Kuvassa 2 on esitetty PVB-muovin ja lasin välisiä keskinäisiä sidoksia.

Hydroksyyliyhmiin osallistuvat sekä molekyylin sisäisten että useiden eri molekyylien välisten sidoksien muodostumiseen. Molekyylien väliset vetysidokset ovat tärkeässä roolissa, sillä ne sitovat makromolekyylit toisiinsa

estäen niiden erkaantumisen, mikä antaa materiaalille lujuutta ja sitkeyttä. Vinyylialkoholin pitoisuuden kasvaessa on materiaalissa enemmän OH-ryhmiä, minkä ansiosta materiaalin vetolujuus kasvaa huomattavasti. OH-ryhmien määrä kasvattaa myös materiaalin viskositeettia, jolloin esimerkiksi prosessoitavuus on haastavampaa. (Carrot ym. 2015; Wade 2016.)



Kuva 2. PVB-muovin ja lasin välisiä sidoksia. Keskellä kuvaa on esitettyä vetysidoksia sekä kuvan oikealla puolella kovalenttinen sidos. (Carrot ym. 2015.)

PVB-muovilla on hyvä UV-säteilyn kestävyys. Puhdas PVB ei pysty suojaamaan kaikelta UV-säteilyltä, minkä johdosta PVB-muovin valmistuksen aikana siihen lisätään usein UV-stabilointiaineita. Lisäksi laminoidussa turvalasissa lasin ja muovin yhteisvaikutuksen ansiosta osa säteilyn tehosta heikkenee huomattavasti. Edellä mainittujen asioiden johdosta laminoidut turvalasit pystyvät estämään 99 % alle 380 nanometrin UV-säteilystä ja esimerkiksi ajoneuvoissa estävät kankaiden ja esineiden värien haalistumisen. (Carrot ym. 2015.)

3.3 Käyttökohteet

PVB-muovin tärkeimpiä käyttökohteita ovat laminoidut turvalasit auto- ja rakennusteollisuudessa. Turvalaseissa on yleisesti PVB-kalvo kahden lasipinnan välissä, kuten kuvassa 3 on esitetty. Kalvon kiinnittymistä lasiin säädellään materiaalin OH-ryhmien määrää kontrolloimalla. Optimaalisessa tilanteessa turvalasin hajotessa lasien välissä oleva kalvo sitoo rikkoutuneet lasinsirpaleet

kiinni kalvoon sekä estää esineiden tunkeutumisen laminoidun turvalasin läpi. Mikäli OH-ryhmien määrä muovissa on liian suuri, on muovin ja lasin välinen kiinnittyminen liian voimakasta ja materiaalin iskunkestävyys heikkenee. Tällöin lasin rikkoutuessa myös muovi rikkoutuu ja repeää. Toisaalta, jos kiinnittymiskyky on liian vähäistä, eivät lasinsirpaleet kiinnity muoviin ja voivat aiheuttaa vahinkoa laajalle alueelle. (Carrot ym. 2015; Wade 2016.)



Kuva 3. Laminoidun turvalasin rakennekuva. Kahden lasikerroksen välissä on PVB-kalvo, joka kiinnitetään lasiin paineen ja lämmön avulla.

Muita käyttökohteita PVB-muoville ovat esimerkiksi maalit, musteet, dispersiot tekstiilien pinnoitukseen sekä sidosaineet. Tartuntapohjamaaleissa PVB antaa hyvän ruosteenestosuojan maalattavalle alustalle sekä luo tasaisen pinnan, johon voidaan levittää pintamaali. Pehmentimiä sisältävästä PVB-muovista voidaan tehdä dispersio, joka antaa hyvän kulutuskestävyyden kankaille. Dispersioon voidaan käyttää erityisesti kierrätettyä PVB-muovia siinä valmiina olevien pehmentimien ansiosta. PVB-muovia käytetään myös saviesineiden valamisessa. Se toimii sidosaineena savilietteelle, mikä palaa sintrauksen yhteydessä kokonaan pois.

PVB-muovia käytetään myös muiden kesto- ja kertamuovien seoksissa, jolloin pienetkin määrät PVB-muovia antavat seoksille sitkeyttä ja joustavuutta. Tällaisia seoksia ovat muun muassa PVB-muovin seokset polyuretaanin ja epoxin kanssa. Muita seoksia ovat polyvinyylidikloridi sekä polyamidi-6, joiden kanssa voidaan käyttää myös kierrätettyä PVB-muovia. (Carrot ym. 2015; Wade 2016.)

4 PVB-muovin kierrätyksen ja uusiokäytön ongelmat

PVB-muovin kierrätyksessä on yleisesti kaksi olennaista ongelma-kohtaa. Ne ovat rikkoutuneiden turvalasien erottaminen laminoidusta muovista sekä lämmön, kosteuden ja prosessoinnin vaikutus molekyylien hajoamiseen. PVB sitoo herkästi kosteutta itseensä, jolloin vesi reagoi vinyylialkoholien OH-ryhmien kanssa. OH-ryhmien vähentyminen vaikuttaa suoraan materiaalin kiinnittymiskykyyn ja vetolujuuksiin. PVB ei myöskään kestä korkeita lämpötiloja, sillä se hapettuu herkästi ja aiheuttaa molekyylien katkeamista. Amorfisen luonteensa ja kiinnittymiskykensä johdosta se takertuu helposti ja työstettävyys vaikeutuu. (Měřínská ym. 2009; Carrot ym. 2015.)

Useat uudelleenprosessoinnin parametrit voivat vaikuttaa materiaalin optisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin PVB-muovissa. Esimerkiksi korkeat prosessointilämpötilat hajottavat molekyyliä aiheuttaen materiaalin kellastumista. Värimuutos vaikuttaa suoraan materiaalin kirkkauteen ja se vähentää uusiokäytön mahdollisuuksia. Toisaalta, vesi voi toimia prosessoinnin aikana pehmentimenä. Se alentaa materiaalin viskositeettia ja estää molekyylien katkeamista, mutta vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin. Tästä syystä PVB-muovin altistusta kosteudelle halutaan minimoida. (Měřínská ym. 2009; Carrot ym. 2015.)

5 Kierrätetyn PVB-muovin koekappaleiden valmistus ja testaus

Opinnäytetyön tavoite oli määrittää ja tutkia hankkeessa mukana olevilta yrityksiltä saadun PVB-muovin ominaisuuksia ja selvittää materiaalin soveltuvuutta uusiokäyttöön. PVB-muovi oli tuotannon ylijäämämateriaalia, josta tutkittiin suoraan tuotannosta saatua hyvälaatuista materiaalia sekä ulko-olosuhteissa pidemmän aikaa varastoitua materiaalia. Ulko-olosuhteissa varastoitu PVB-muovi oli huonolaatuisempaa kuin suoraan tuotannosta saatu materiaali. Materiaalissa oli havaittavissa värinmuutosta sekä kovettumista. Kuvassa 4 on esitettyä tuotannosta kerättyä hyvälaatuista PVB-muovin ylijäämämateriaalia.



Kuva 4. Tuotannosta kerättyä puhdasta PVB-muovin ylijäämämateriaalia.

Koekappaleiden valmistuksessa käytettiin muovin työstömenetelmiä kuten ekstruusiota, ruiskuvalua, ahtopuristusta sekä laadullisiin määrittämiin vetokoetta. Koekappaleista määritettiin erityisesti murtolujuus ja murtovenymä ja tuloksia verrattiin kirjallisuuslähteisiin. Materiaaleista valmistettiin koekappaleita standardien SFS-EN ISO 527-1:2019, SFS-EN ISO 527-2:2012 sekä SFS-EN

ISO 293 mukaisesti (Suomen standardisoimisliitto SFS 2019; Suomen standardisoimisliitto SFS 2012; Suomen standardisoimisliitto SFS 2005).

5.1 Ekstruusio



Kuva 5. Kaksiruuviekstruuderin Labtech LT20-44.

Molemmista PVB-muoveista valmistettiin granulaattia ekstruusion avulla. Laitteena käytettiin kuvassa 5 esitettyä kaksiruuviekstruuderia, joka soveltuu kierrätetyn muovin käsittelyyn, sillä sen ruuvit kestävät korkeita kierrosnopeuksia ja pystyvät sekoittamaan erilaisia materiaaleja keskenään (Plastic Technology 2020). PVB-muovit esikäsiteltiin ekstruusioon soveltuvaan muotoon, minkä jälkeen testattiin erilaisia prosessointiparametreja. Lopullisiksi parametreiksi valittiin lämpötilaksi 160 °C ja ruuvien kierrosnopeudeksi 100 rpm. Korkeammassa lämpötilassa materiaalissa tapahtui selkeää hajoamista ja värinmuutosta. Kuvassa 6 on esitetty ekstruuderilla valmistettua granulaattia.



Kuva 6. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistettua filamenttia ja granulaattia. Ekstruusiolla valmistettiin filamenttia, joka granuloitiin pieniksi paloiksi.

5.2 Ruiskuvalu

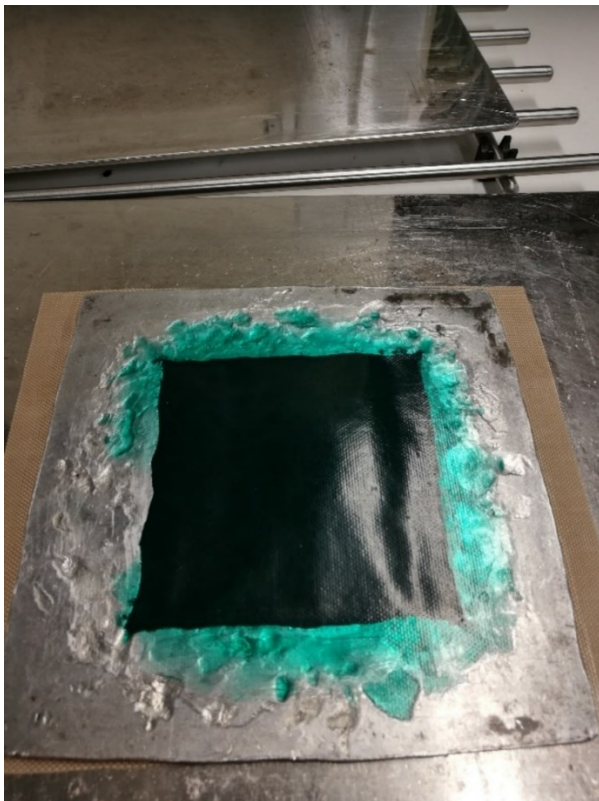
Ekstruusion avulla valmistetusta granulaatista valmistettiin standardin SFS-EN ISO 527-2:2012 mukaisia koekappaleita. Koekappaleiden valmistus yritettiin ensin toteuttaa ruiskuvalukoneella, mikä ei kuitenkaan onnistunut. Ongelmia aiheutti erityisesti PVB-muovin lämpöherkkyys. Materiaali muuttui liian nopeasti pehmeäksi ja tarrautui kiinni syöttösuppiloon sekä ruiskuvalun muottiin muotin temperoinnista huolimatta.

5.3 Ahtopuristus



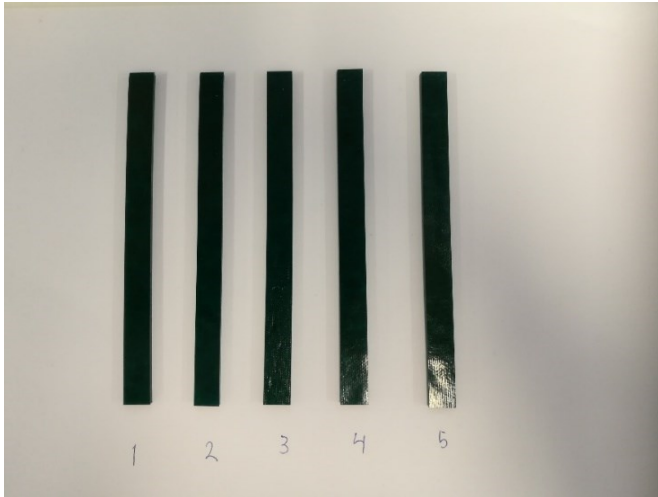
Kuva 7. Ahtopuristin, Labtech Engineering, Hydraulic press LP-S-20.

Koekappaleet päädyttiin valmistamaan ahtopuristimella (kuva 7) standardin SFS-EN ISO 293 mukaisesti. Ahtopuristimella valmistettiin näytelevyjä, joiden koko oli 140x140x3mm. Materiaali esilämmitettiin, jonka jälkeen sitä puristettiin 200 sekuntia 160 °C lämpötilassa ja 160 kN paineella. Kuvassa 8 on esitetty suoraan tuotannosta kerätyn PVB-muovin näytelevy.



Kuva 8. Ahtopuristimella valmistettu näytelevy suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista. Levyn koko 140x140x3 mm.

Edellä mainittuja näytelevyjä valmistettiin kummastakin materiaalista ja niistä leikattiin 1 cm kokoisia tasalaatuisia koekappaleita, jolloin näytteiden tarkat mitat olivat 140x10x3 mm, kuten kuvassa 9 on esitetty.



Kuva 9. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistetut koekappaleet. Materiaali on ahtopuristuksen jälkeen leikattu 1 cm levyisiksi kappaleiksi.

5.4 Vetokoe

Vetolujuustestit määritettiin molemmista eri näyttemateriaaleista noudattaen standardia ISO 527-1:2019. Kummastakin materiaalista testattiin viisi rinnakkaista näytettä ja niistä määritettiin murtolujuus, murtovenymä, myötölujuus ja myötövenymä. Testinopeudeksi määritettiin 100 mm/min. Vetotestilaite on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Vetotestilaite, Shimadzu AGS-X.

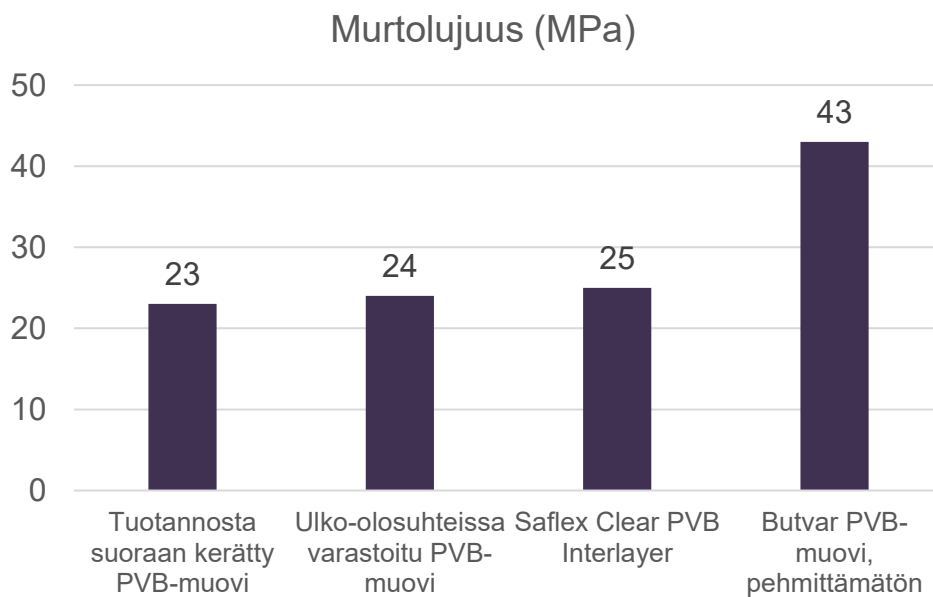
5.5 Tulokset

Taulukossa 1 on esitetty testattujen materiaalien vetotestien tulokset.

Tarkemmat testitulokset kaikista testien koekappaleista löytyvät liitteistä 1 ja 2.

Taulukko 1. Materiaalien mekaanisten ominaisuuksien vertailu.

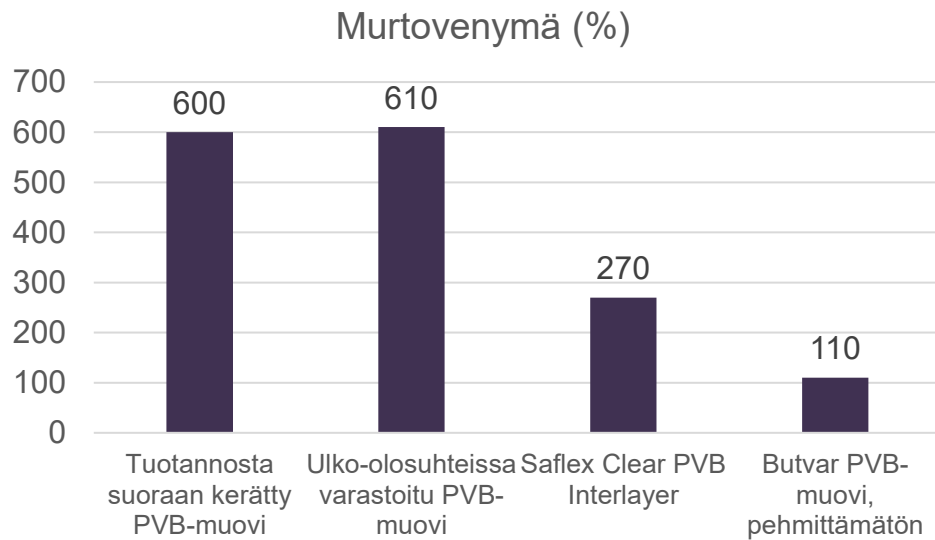
	Tuotannosta kerätty PVB	Ulko-olosuhteissa varastoitu PVB
Murtolujuus (MPa)	23	24
Myötölujuus (MPa)	4	4
Murtovenymä (%)	600	610
Myötövenymä (%)	150	130



Kaavio 1. PVB-näytteiden murtolujuuksien vertailu markkinoilla oleviin tuotteisiin. (Carrot ym. 2015 s. 114; Matweb 2022).

Kaavioissa 1 ja 2 on käytetty vertailumateriaaleina sekä vastaavaa PVB-muovia että pehmittämätöntä PVB-muovia. Saflex Clear PVB Interlayer on laminointiin tarkoitettu PVB-muovi, jonka murtolujuus on lähellä opinnäytetyössä testattuja materiaaleja. Butvar PVB-muovissa ei ole käytetty pehmittimiä, minkä johdosta

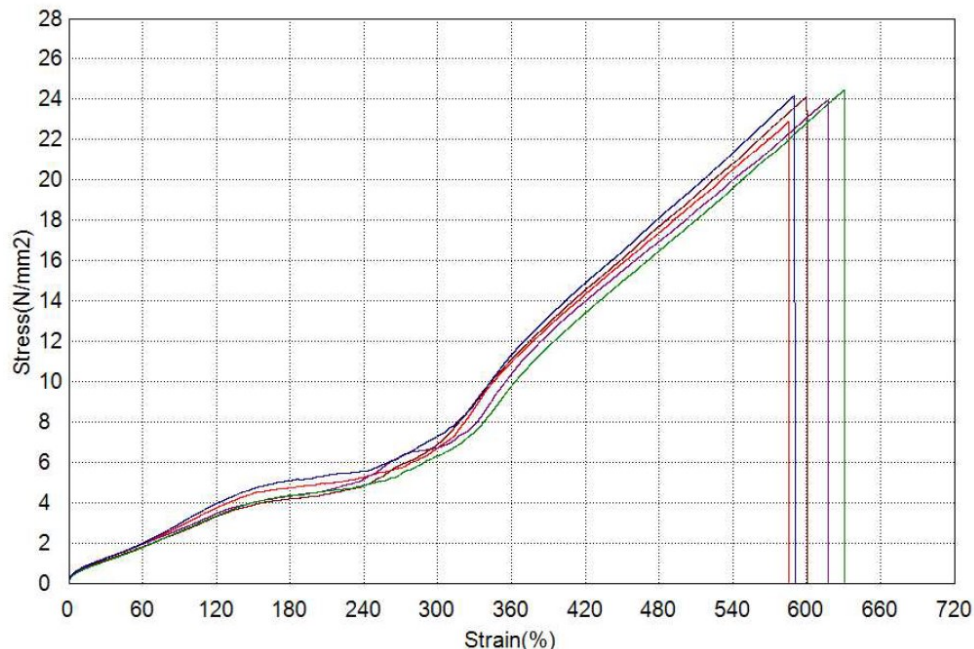
sen murtolujuus ja murtovenymä ovat selkeästi erilaisia verrattuna testattuihin PVB-muoveihin.



Kaavio 2. PVB-näytteiden murtovenymien vertailu markkinoilla oleviin tuotteisiin. (Carrot ym. 2015 s. 114; Matweb 2022).

6 Loppupäätelmät

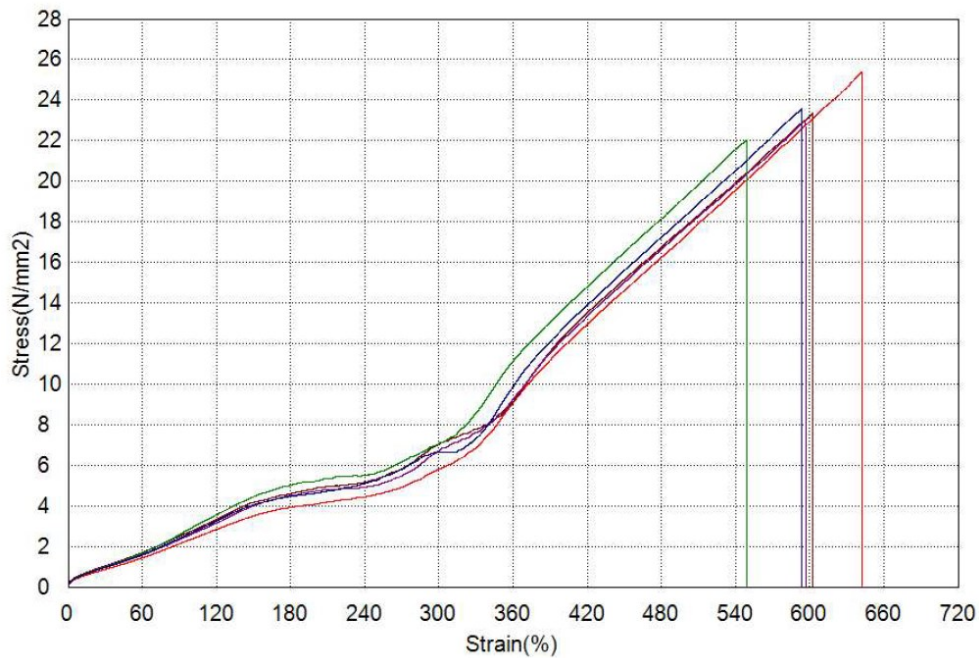
Tuloksien perusteella voidaan sanoa, ettei testattujen materiaalien välillä ole huomattavaa eroa. Taulukon 1 mukaan sekä suoraan tuotannosta kerätyn että ulko-olosuhteissa varastoidun PVB-muovin murtolujuus oli 23–24 MPa ja murtovenymä 600–610 %. Tuloksia verrattaessa muihin kaupallisiin tuotteisiin, kuten kaavioissa 1 ja 2 on esitetty, nähdään kuinka iso vaikutus esimerkiksi pehmentimillä on PVB-muovin ominaisuuksiin. Pehmittämättömän Butvar PVB-muovin murtolujuus on lähes kaksinkertainen verrattuna opinnäytetyössä testattuihin materiaaleihin. Pehmentimien sekä standardista poikkeavien koekappaleiden paksuuksien johdosta näyttemateriaalien murtovenymä oli huomattavasti suurempi verrattuna Butvar PVB-muoviin. Pehmentimet vähentävät materiaalin jäykkyyttä, kontrolloivat OH-ryhmien määrää ja vahvistavat iskunkestävyyttä sekä lisäävät sen elastisuutta huomattavasti (Carrot ym. 2015 s.117). On kuitenkin huomioitavaa, että kaavioiden 1 ja 2 kirjallisuusarvoissa on käytetty tässä opinnäytetyöstä poikkeavia standardeja ISO 527-3 ja ASTM D638-58T.



Kuvaaja 1. Ulko-olosuhteissa varastoidusta PVB-muovista valmistettujen koekappaleiden jännitys-venymäkuvaajat.

Koekappaleiden valmistuksessa ei pystytty täysin noudattamaan standardeja. PVB-muovista tehdyille koekappaleille olisi ollut parempi käyttää standardia ISO 527-3, mikä on tarkoitettu kalvoille, filmeille ja levyille. Ongelmia aiheuttivat testattavalle materiaalille vaikeasti soveltuvat vetotestilaitteen osat. Lisäksi PVB-muovi osoittautui vaikeasti työstettäväksi ruiskuvalukoneella, minkä takia koekappaleet valmistettiin ahtopuristuksella. Tästä syystä koekappaleiden tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, vaan suuntaa antavia.

Kuvaajista 1 ja 2 nähdään koekappaleiden jännitys-venymäkuvaajat. Kuvaajien perusteella on taulukkoon 1 laskettu myös testattavien materiaalien myötölujuudet ja myötövenymät, vaikka niiden määrittäminen elastisille materiaaleille on vaikeaa. Myötökohta on se kohta, jonka jälkeen materiaali ei pysty palautumaan alkuperäiseen tilaansa, vaan siinä tapahtuu plastista muodonmuutosta (Instron 2022). Kuvaajista nähdään myös selkeästi miten molekyylien väliset sidokset vaikuttavat voiman vastustamisessa. Molemmissa kuvaajissa 300 % venymän kohdalla nähdään selkeä vetolujuuden muutos, mikä johtuu polymeeriketjujen orientoitumisesta. Myötökohdan jälkeen materiaali ei pysty vastustamaan rasiutusta, jolloin ketjujen väliset sidokset katkeavat. Tämä johtaa polymeeriketjujen suuntautumiseen voiman myönteisesti, jolloin ne pystyvät paremmin vastustamaan voimistuvaa rasiutusta. (Wade 2016 s. 7–8.)



Kuvaaja 2. Suoraan tuotannosta kerätystä PVB-muovista valmistettujen koekappaleiden jännitys-venymäkuvaajat.

Tutkimusten mukaan vedellä voi olla positiivisia vaikutuksia PVB-muovin uusiokäytössä, vaikka yleisesti kosteutta halutaan välttää PVB-muovin kanssa. Siitä huolimatta, että vesi kilpailee PVB-muovin OH-ryhmien kanssa, voi PVB-muovissa olla jopa 8 % vettä, jolloin vesi toimii pehmentimenä parantaen prosessoitavuutta laskemalla viskositeettia sekä lisäämällä elastisuutta. (Měřínská ym. 2009.) Opinnäytetyössä saatujen tuloksien perusteella materiaalin mekaaniset ominaisuudet ovat hyvin samanlaiset keskenään, jolloin voidaan päätellä, ettei ulko-olosuhteissa varastoidussa PVB-muovissa ole normaalia enempää kosteutta. Materiaalin esikäsittelyn aikana materiaali oli myös käsin kosketeltaessa kuivaa.

Vaikka PVB-muovi on yleisesti altis kosteudelle ja lämmölle, kestää se yllättävän hyvin vaikeitakin olosuhteita. Ulko-olosuhteissa varastoidussa PVB-muovissa oli alussa hieman normaalia enemmän värinmuutosta, kovuutta ja takertuvuutta verrattuna suoraan tuotannosta saatuun materiaaliin. Prosessiparametrien säädöillä pystyttiin löytämään sopivat arvot, joissa materiaalin hajoamista sekä kellastumista tapahtui vähiten. Kellastumisen aiheuttaa PVB-muovilla yleensä

liian korkeassa lämpötilassa tapahtuva hapettuminen, mikä huomattiin ekstruusion aikana. Kuivalle PVB-muoville suositellaan alle 150 °C lämpötilassa tapahtuvaa prosessointia (Měřínská ym. 2009). Opinnäytetyössä prosessointilämpötila oli materiaalille korkeampi kuin 150 °C, sillä materiaalin kosteuspitoisuudesta ei ollut varmuutta.

Jatkoa ajatellen kiinnostavimmat ja potentiaalisimmat tutkimuskohteet kierrätetyille PVB-muoville ovat polyuretaanin tai polyamidi-6:n yhdisteet sekä kankaiden pinnoitukseen tarkoitettu dispersio. Erityisesti kankaiden pinnoituksella voi olla huomattavaa potentiaalia, sillä jo nyt useat yritykset käyttävät kyseiseen dispersioon laminoituista turvalaseista kierrätettyä PVB-muovia (Wade 2016 s. 16).

7 Yhteenveto

Opinnäytetyö tehtiin osana MuKi-hanketta, jonka tarkoituksena oli kehittää muovien kierrätystä erityisesti Vakka-Suomessa. Hankkeessa olivat mukana Turun ammattikorkeakoulu, Ukipolis Oy sekä useita teollisuusyrityksiä, joiden tuotannossa syntyy muovien ylijäämävirroja. Yrityksien ylijäämämateriaalin kierrätystä ja uusiokäyttöä haluttiin tehostaa. Hankkeen eräs tarkasteltavista muoveista oli polyvinyylibutyaali. Se on altis kosteudelle ja lämmölle, mitkä vaikuttavat sen optisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin.

PVB on amorfinen kestopuovi, jonka ominaisuuksiin kuuluvat vahva kiinnittymiskyky, sitkeys, iskunkestävyys sekä optinen kirkkaus. PVB-muovin yksi tärkeimmistä käyttökohteista on turvalasien laminoinnissa, missä PVB-muovin OH-ryhmät muodostavat sidoksia lasin kanssa.

PVB-muovin kierrätyksen ongelmakohtia ovat erityisesti kosteus ja lämpö. Vesi reagoi helposti materiaalin OH-ryhmien kanssa sekä lämpö hajottaa sen pitkiä polymeeriketjuja. Lisäksi hapettuminen sekä tietynasteinen altistus auringon säteilylle voivat aiheuttaa värinmuutosta materiaalissa, mikä hankaloittaa sen uusiokäyttöä.

Opinnäytetyössä testattavat materiaalit olivat yrityksien ylijäämämateriaalia, jotka olivat suoraan tuotannosta kerättyä hyvälaatuista PVB-muovia ja ulko-olosuhteissa varastoitua PVB-muovia. Materiaaleista valmistettiin koekappaleita muovin työstömenetelmillä ekstruusiolla ja ahtopuristuksella ja näytteiden laadullisia ominaisuuksia testattiin vetokokeella standardeja soveltaen.

Testatut materiaalit olivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia. Materiaalien murtolujuus oli 23–24 MPa sekä murtovenymä 600–610 %. Koekappalaiden valmistuksen aikaisten ongelmien takia standardeista jouduttiin poikkeamaan, mikä selittää saatuja suuria murtovenymän tuloksia. Tuloksia verrattaessa kirjallisuusarvoihin nähdään, kuinka suuri vaikutus pehmentimillä on PVB-muoviin. Tuloksien perusteella PVB-muovi säilyttää ominaisuutensa haastavissakin ympäristöissä.

Lähteet

Carrot, C.: Bendaoud, A. & Caroline, P. 2015: Handbook of Thermoplastics. Polyvinyl Butyral. s. 89–137 Viitattu 01.03.2022

<https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b19190-4>

Instron 2022. Myötökohdan määrittäminen. Viitattu 06.03.2022

<https://www.instron.com/en-gb/our-company/library/glossary/y/yield-point>

Měřinská, D.: Tupý, M.: Kašpárková, V.: Popelková, J.: Zvoníček, J.: Pištěk, D. & P Svoboda. 2009. Degradation of Plasticized PVB During Reprocessing by Kneading. Viitattu 04.03.2022 <https://www.intechopen.com/chapters/32564>

MuKi-hanke 2019. Viitattu 10.4.2021 <http://www.turkuamk.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hae-projekteja/muovin-kiertotalousosaamiskeskittyma-vakka-suomeen/>

Plastic Technology 2020. How and Where Twin-Screw Extruders Fit in Recycling. Viitattu 06.03.2022 <https://www.ptonline.com/blog/post/how-and-where-twin-screw-extruders-fit-in-recycling->

Matweb 2022. Eastman Saflex Clear PVB interlayer. Viitattu 06.03.2022

https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=72c49e61e1a1451cae34d94af478f0a8

Suomen standardisoimisliitto SFS 2019. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 1: Yleiset periaatteet (ISO 527-1:2019). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki 27.09.2019. Viitattu 06.03.2022

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen. Osa 2: Testausolosuhteet valettaville ja ekstrudoitaville muoveille (ISO 527-2:2012). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki 13.08.2012. Viitattu 06.03.2022

Suomen standardisoimisliitto SFS 2005. Muovit. Kestomuovisten koekappaleiden ahtopuristus (ISO 293). Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki 05.09.2005. Viitattu 06.03.2022

Turun ammattikorkeakoulu 2020. TKI-toiminta. Viitattu 12.4.2021

<https://www.turkuamk.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/tki-turun-ammattikorkeakoulussa/>

Ukipolis 2021. Viitattu 10.4.2021 <https://www.ukipolis.fi/>

Wade, B. 2016. Vinyl Acetal Polymers. Encyclopedia of Polymer Science and Technology, s. 1–22. Viitattu 01.03.2022
<https://doi.org/10.1002/0471440264.pst473.pub2>

Suoraan tuotannosta saadun PVB-muovin vetotestien tulokset

Name Parameters Unit	Max_Slope 3 Points N/mm2	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	Max_Strain Calc. at Entire Areas %	Break_Stress Sensitivity: 10 N/mm2
PVB väri 1	32,4003	25,3844	642,117	25,3844
PVB väri 2	41,9565	23,3673	602,392	23,3673
PVB väri 3	37,7023	22,9936	596,532	22,9936
PVB väri 4	41,1158	22,0317	549,024	22,0317
PVB väri 5	37,9818	23,5628	593,525	23,5628
Average	38,2313	23,4680	596,718	23,4680
Standard Deviation	3,75966	1,22267	33,0840	1,22267
Range	9,55620	3,35270	93,0930	3,35270

Name Parameters Unit	Break_Strain Sensitivity: 10 %	YP(Points)_Stress 2 Points N/mm2	YP(Points)_Strain 2 Points %	Max_Force Calc. at Entire Areas N
PVB väri 1	642,117	3,55921	153,062	719,649
PVB väri 2	602,392	4,11784	147,122	611,989
PVB väri 3	596,532	3,96606	148,461	645,661
PVB väri 4	549,024	4,15091	139,495	636,495
PVB väri 5	593,525	3,67571	134,574	668,004
Average	596,718	3,89395	144,543	656,360
Standard Deviation	33,0840	0,26506	7,40673	40,6785
Range	93,0930	0,59170	18,4880	107,660

Name Parameters Unit	Break_Force Sensitivity: 10 N	Max_Displ_Displ. mm	Gauge_Length mm	Width mm
PVB väri 1	719,649	301,281	46,9000	10,5000
PVB väri 2	611,989	282,052	46,8000	9,7000
PVB väri 3	645,661	283,487	47,5000	10,4000
PVB väri 4	636,495	279,570	50,9000	10,7000
PVB väri 5	668,004	288,571	48,6000	10,5000
Average	656,360	286,992	48,1400	10,3600
Standard Deviation	40,6785	8,63776	1,70088	0,38471
Range	107,660	21,7110	4,10000	1,00000

Name Parameters Unit	Thickness mm
PVB väri 1	2,7000
PVB väri 2	2,7000
PVB väri 3	2,7000
PVB väri 4	2,7000
PVB väri 5	2,7000
Average	2,7000
Standard Deviation	0,00000
Range	0,00000

Ulko-olosuhteissa varastoidun PVB-muovin vetotestien tulokset

Name Parameters Unit	Max_Slope 3 Points N/mm2	Max_Stress Calc. at Entire Areas N/mm2	Max_Strain Calc. at Entire Areas %	Break_Stress Sensitivity: 10 N/mm2
PVB kirkas 1	50,5989	22,8705	585,080	22,8705
PVB kirkas 2	47,0676	24,1253	600,076	24,1253
PVB kirkas 3	51,1687	23,9452	617,338	23,9452
PVB kirkas 4	43,2333	24,4764	630,476	24,4764
PVB kirkas 5	53,2985	24,1922	590,208	24,1922
Average	49,0734	23,9219	604,636	23,9219
Standard Deviation	3,95913	0,61804	18,9766	0,61804
Range	10,0652	1,60590	45,3960	1,60590

Name Parameters Unit	Break_Strain Sensitivity: 10 %	YP(Points)_Stress 2 Points N/mm2	YP(Points)_Strain 2 Points %	Max_Force Calc. at Entire Areas N
PVB kirkas 1	585,080	4,04684	132,451	654,554
PVB kirkas 2	600,076	3,50071	128,838	696,979
PVB kirkas 3	617,338	3,73305	132,379	646,521
PVB kirkas 4	630,476	3,81877	140,534	687,297
PVB kirkas 5	590,208	3,78081	114,650	672,786
Average	604,636	3,77604	129,770	671,627
Standard Deviation	18,9766	0,19547	9,47815	21,2804
Range	45,3960	0,54613	25,8840	50,4580

Name Parameters Unit	Break_Force Sensitivity: 10 N	Max_Disp_Displ. mm	Gauge_Length mm	Width mm
PVB kirkas 1	654,554	274,535	46,9000	10,6000
PVB kirkas 2	696,979	284,566	47,4000	10,7000
PVB kirkas 3	646,521	278,553	45,1000	10,0000
PVB kirkas 4	687,297	286,373	45,4000	10,4000
PVB kirkas 5	672,786	282,255	47,8000	10,3000
Average	671,627	281,256	46,5200	10,4000
Standard Deviation	21,2804	4,75961	1,20706	0,27386
Range	50,4580	11,8380	2,70000	0,70000

Name Parameters Unit	Thickness mm
PVB kirkas 1	2,7000
PVB kirkas 2	2,7000
PVB kirkas 3	2,7000
PVB kirkas 4	2,7000
PVB kirkas 5	2,7000
Average	2,7000
Standard Deviation	0,00000
Range	0,00000