

Polymeerimateriaalit

Tuula Höök – Tampereen teknillinen yliopisto

Polymeerien ominaisuuksia

Polymeerimateriaalit voidaan jaotella useilla eri tavoilla. Jaottelun tarkoituksesta riippuen ne voidaan jakaa esimerkiksi kerta- ja kestumuoveihin, orgaanisiin ja epäorgaanisiin materiaaleihin, kierrätettäviin tai kertakäyttöisiin, biohajoaviin ja hajoamattomiin, prosessointimahdollisuuksien mukaan ruiskuvalettaviin, puhallusmuovattaviin, lämpömuovattaviin, jne. materiaaleihin tai lopputuotteen käyttötarkoituksen mukaan erilaisiin materiaaliryhmiin. Tämä teksti käsittelee ruiskuvalettavaksi ja muulla tavoin muotilla muovattavaksi soveltuvia polymeerilaatuja.

Polymeerimateriaaleja on neljää tyyppiä:

- Termoplastiset polymeerit eli kestumuovit
- Termosettiset polymeerit eli kertamuovit
- Termoplastiset elastomeerit
- Kumit eli vulkanoidut (termosettiset) elastomeerit

Polymeeri on tietyn kemiallisen koostumuksen ja rakenteen omaavista, toisiinsa liittyneistä molekyyleistä koostuva ketjumainen, haaroittunut, dendriittinen, rengasmainen tai verkottunut rakenne. Yksittäinen polymeerimolekyyli koostuu kovalenttisilla sidoksilla toisiinsa liittyneistä monomeereista (myös: meereista). Jos polymeerissa on ainoastaan yhtä monomeerilaatua, siitä käytetään käsitettä homopolymeeri. Jos polymeerissa on kahta tai useampaa monomeerilaatua, siitä käytetään käsitettä kopolymeeri.

Termoplastiset polymeerit eli kestumuovit ovat uudelleen muovattavia. Ne voidaan saattaa toistuvasti juoksevaan muotoon lämmittämällä niitä tai altistamalla ne sopivalle kemikaalille. Kestumuoviraaka-aine hankitaan valmiiksi polymeroituna rakeena tai pellettinä, joka voidaan muuttaa juoksevaan muotoon ja valaa esimerkiksi ruiskuvalukoneella, puhallusmuovauskoneella tai lämpömuovaamalla. Kestumuoveja voidaan kierrättää suhteellisen helposti muovituotteita valmistavan yrityksen sisällä. Ne olisivat periaatteessa kierrätettävissä myös keräämällä kuluttajilta muovijäte ja uusiokäyttämällä se. Muovijätteen kierrättäminen on kuitenkin käytännössä hankalaa, koska muovilaatuja on erittäin suuri määrä ja sekamuovista valmistettavaksi soveltuvia tuotteita vain rajallisesti.

Termoplastiset polymeerit koostuvat ketjumaisista, haaroittuneista tai rengasmaisista molekyyleistä. Molekyylit sitoutuvat toisiinsa pääasiassa van der Waals -voimilla, dipoli-dipolisidoksilla, vetysidoksilla tai joissain harvoissa tapauksissa ionisidoksilla. Molekyylien välisiä kovalenttisia sidoksia on vain vähän, jos ollenkaan. Vety- ja ionisidokset ovat vahvimpia, van der Waals -voima heikoin. Van der Waals voima esiintyy sähköisesti neutraalien molekyylien välillä, muut edellyttävät polaarisuutta.

Elastomeeri on joustava ja venyvä polymeerirakenne. Se on jonkin verran verkottunut eli siinä olevien polymeerimolekyylien välille on muodostunut polymeroitumisen aikana kovalenttisia sidoksia. Polymeerien välisten kovalenttisten sidosten muodostumista kutsutaan ristisilloittumiseksi. Termoplastiset elastomeerit ovat uudelleen sulatettavia ja muovattavia sulassa tilassa kuten termoplastiset polymeerit. Kumi -käsitettä pidetään usein synonyymina elastomeerille. Sitä tulisi kuitenkin käyttää ainoastaan silloin, kun viitataan vulkanoituun elastomeeriin. Kumi muodostetaan ristisilloittamalla eli verkottamalla elastomeerin molekyylit kemiallisesti ja/tai lämmön avulla. Yleisimmin käytetään rikkiä, mutta myös peroksiedeilla voidaan ristisilloittaa.

Vulkanointi tarkoittaa kaiken tyyppisten polymeerien ristisilloitusta, ei yksinomaan kumin valmistukseen liittyvää.

Termosettisen polymeerin eli kertamuovin rakenne on myös verkottunut. Verkko on muodostettu ristisilloittamalla eli vulkanoimalla polymeerimolekyylit kemiallisesti ja/tai lämmön avulla. Ristisilloitettua rakennetta ei pysty sulattamaan uudelleen tai muovaamaan lämmön avulla. Se ei sula, vaan hajoaa tai tuhoutuu muulla tavoin. Termosettinen polymeeri ja termosettinen elastomeeri (kumi) ovat hyvin samankaltaisia. Erona on, että termosetti on huoneenlämpötilassa kovaa ja joustamatonta ainetta siinä missä kumi on elastista.

Kertamuovit muovataan menetelmillä, joissa polymeroitumisreaktio voi tapahtua muotin sisällä. Tällaisia menetelmiä ovat ahtopuristus, siirtopuristus ja esimerkiksi RIM.

Polymeerimateriaaleja voidaan paisuttaa ja vaahdottaa. Vaahdotettuja, muotilla muovattavissa olevia muovilaatuja ovat esimerkiksi polyuretaani, polypropeeni ja polystyreeni. EPS eli paisutettu polystyreeni tunnetaan myös nimellä styrox.

Polymeerimateriaalit voidaan toisaalta jakaa vielä neljään alaryhmään:

- Valtamuovit
- Käyttömuovit
- Tekniset muovit
- Erikoismuovit

Ryhmien välillä on eroja hinnan ja ominaisuuksien suhteen. Valtamuovit ovat edullisia ja niitä käytetään yleisesti muissa kuin teknisissä sovelluksissa. Ne sopivat hyvin käyttökohteisiin, joissa ei ole erityisiä vaatimuksia mekaanisen tai kemiallisen kestävyuden, sähkönjohtavuuden tai lämmönkeston suhteen. Jos vaatimukset kasvavat, muovi valitaan käyttömuovien tai teknisten muovien joukosta.

Polymeroitumisreaktiot

Monomeerit liittyvät polymeerimolekyyliksi useimmiten additio- tai kondensaatioreaktiolla, vaikka muitakin liittymisreaktioita tunnetaan. Additioreaktiolla polymeroituvissa molekyyleissä on atomien välillä yksi tai useampia sitoutumiskohtia, jotka avautuvat ja sitoutuvat viereiseen molekyyliin ilman, että sitoutumisreaktio vapauttaa niistä mitään ainesosia. Kondensaatioreaktiolla polymeroituvista molekyyleistä vapautuu sidoksen muodostuessa jokin pienimolekyylinen aine, esimerkiksi vesi (H₂O) tai metanoli (CH₃OH). Sitoutumiskohta voi olla merissä oleva funktionaalinen ryhmä, kovalenttinen kaksoissidos tai kovalenttinen kolmoissidos¹. Myös monomeerissa olevan rengasrakenteen avautuminen voi käynnistää polymeroitumisen.

Additioreaktio käynnistetään lisäämällä monomeerien joukkoon katalyyttia. Katalyytti voi toimia radikaalien, kationien tai anionien muodostajana. Vastaavat polymerointireaktioiden nimet ovat tällöin radikaalipolymerointi, kationinen polymerointi ja anioninen polymerointi. Katalyyttina voidaan käyttää myös metallooseenia (tai sen erikoistapausta eli Ziegler-Natta -katalyyttia), jolloin polymerointireaktio muodostaa rakenteeltaan säännöllisen polymeerin. Reaktiota kutsutaan

¹ Funktionaalilla ryhmällä tarkoitetaan orgaanisessa molekyyliässä olevaa atomiryhmää, joka osallistuu kemialliseen reaktioon tietyllä, ryhmän koostumuksesta ja rakenteesta riippuvalla tavalla. Orgaanisissa molekyyleissä - ja niihin kuuluvissa funktionaalisisissa ryhmissä - ovat atomit ovat sitoutuneet toisiinsa kovalenttisin sidoksin. Kovalenttinen sidos muodostuu, kun atomit jakavat vähintään yhden yhteisen elektroniparin uloimmalla elektronikuorellaan. Yksi yhteinen elektronipari muodostaa yksinkertaisen kovalenttisen sidoksen, kaksi yhteistä paria kaksoissidoksen ja kolme paria kolmoissidoksen. Yksinkertainen kovalenttinen sidos voi toimia polymeroitumisreaktiossa sitoutumispaikkana, jos se kuuluu rengasrakenteeseen. Kaksois- ja kolmoissidokset voivat toimia sitoutumispaikkoina useissa erityyppisissä rakenteissa.

koordinaatiopolymeraatioksi. Metalloseenit ovat metallin ja hiilen yhdisteitä. Ziegler-Natta - katalyytti on vastaava titaani- tai alumiiniyhdiste.

Katalyytti voidaan sekoittaa monomeereihin sellaisenaan tai liuoksen, seoksen, emulsion, suspension tai kaasun sisällä. Se muodostaa monomeereihin reaktioytimen, joka aktivoi läheisessä monomeerissa olevan funktionaalisen ryhmän ja käynnistää polymeraation ketjureaktiona. Kaikki polymeraatioreaktiot eivät toimi puhtaasti additiomekanismilla, jonka vuoksi menetelmiä on alettu kutsua yleisesti ketjupolymeroinniksi. Ketjupolymerointimenetelmällä valmistetaan valtaosa termoplastisista polymeereista, esimerkiksi seuraavat hiiliketjuun (C-C) rakentuneet homopolymeerilaadut:

- polyeteeni (PE)
- polypropeeni (PP)
- polyvinyylidikloridi (PVC)
- polystyreeni (PS)
- polymetyylipenteeni (TPX)
- polymetyylimetakrylaatti (PMMA)

Sekä esimerkiksi seuraavat homopolymeerit, joissa ketju perustuu hiilen lisäksi myös muille alkuaineille:

- polyasetaaali (POM-H), polyasetaaalia valmistetaan myös kopolymeerina (POM-C)
- polykaprolaktaami eli nylon 6

Sekä esimerkiksi seuraavat kopolymeerilaadut:

- styreeni-akrylonitriili (SAN)
- akrylonitriili-butadieeni-styreeni (ABS)
- styreeni-butadieeni kopolymeeri (SBC)

Lisäksi valmistetaan esimerkiksi polybutaania, joka on eräs tärkeimmistä synteettisistä kumilaaduista, styreenibutadieeni-kumia (SBR) ja polytetrafluorieteenia eli teflonia (PTFE).

Kondensaatiopolymerointi tapahtuu sekoittamalla reagoivat aineet keskenään joko suoraan tai liuoksina. Reagoivat aineet voivat olla samassa tai erillisissä liuottimissa. Reaktio voi tapahtua huoneenlämpötilassa, jolloin puhutaan matalan lämpötilan polymeroinnista. Reaktio voi tapahtua myös korotetussa lämpötilassa, jolloin puhutaan korkean lämpötilan polymeroinnista. Polymerointi tapahtuu vaiheittain ja samalla tavalla joka puolella reagoivia ainesosia. Reaktiota kutsutaan askelpolymeroinniksi. Askelpolymeraatio on yleistermi, joka kuvaa reaktion luonnetta paremmin kuin kondensaatiopolymeraatio-termi, koska kaikki askelpolymerointireaktiot eivät kondensoi yhdisteitä.

Askelpolymeraatioreaktiolla ketjuuntuvia termoplastisia polymeerejä ovat esimerkiksi

- polyakrylonitriili (PAN)
- polyfenyylioksidi (PPO, PPE)
- polyeteenitereftalaatti (PET)
- polybuteenitereftalaatti (PBT)
- polysulfoni (PSU)
- polyfenyylisulfoni (PPSU)
- polyamidi (PA) eli nylon
- polykarbonaatti (PC)
- iskunkestävä polystyreeni (HIPS)

Sekä esimerkiksi termosettiset polymeerit:

- fenoliformaldehydihartsit (PF) eli bakeliitti
- urea-formaldehydihartsit (UF)
- melamiini-formaldehydihartsit (MF)
- polyuretaanit (PUR)

Polymeroitumisreaktio voi periaatteessa muodostaa kuinka suuren polymeerimolekyylin tahansa. Käytännössä se muodostaa jonkin prosessille tyypillisen polymeerin koon ja muodon. Polymeerin kokoa kuvataan polymeroitumisasteella. Polymeroitumisaste on yhden polymeerimolekyylin moolimassa jaettuna yhden monomeerin moolimassalla. Polymeerimolekyylien koot muodostavat tietyn materiaalille ja sen valmistusprosessille tyypillisen jakauman. Kokojakauma on polymeroitumisasteen ohella tärkeä polymeerimateriaalien ominaisuuksia selittävä tekijä.

Polymeeriketjun rakenne

Polymeroitumisreaktio voi tuottaa monomeereista suoria, haaroittuneita, rengasmaisia, verkottuneita tai dendriittisiä polymeerimolekyylejä. Jos polymeerimolekyylien välille muodostuu reaktion aikana kovalenttisia sidoksia, rakenteesta tulee verkottunut. Muussa tapauksessa ketju on suora, rengasmainen tai eriasteisesti haaroittunut. Suora ketju ja rengas muodostuvat parhaiten monomeereista, joilla on ainoastaan yksi mahdollinen paikka sitoa seuraava meri itseensä. Haaroittunut tai dendriittinen polymeeriketju muodostuu parhaiten monomeereista, joilla on vähintään kaksi sitoutumispaikkaa. On kuitenkin mahdollista, että myös monomeerit, joilla on vain yksi sitoutumispaikka, haaroittuvat. Esimerkkinä polyeteeni, jonka monomeerissa on vain yksi kaksoissidos, mutta jota tunnetaan eriasteisesti haaroittuneita ja sen myötä tiheydeltään erilaisia laatuja, esimerkiksi: HDPE (High Density Polyethylene), MDPE (Medium Density Polyethylene) ja LDPE (Low Density Polyethylene). Pienitiheysiset laadut koostuvat haaroittuneista polymeeriketjuista.

Jos polymeeriketju voi muodostaa haaroittuneen rakenteen, on sen mahdollista muodostaa polymeroitumisprosessin aikana myös verkkomainen eli ristisilloitettu rakenne. Verkottumisen aste riippuu polymeroitumisprosessin ominaisuuksista ja polymeroituvista ainesosista. Verkottumistaipumusta hyödynnetään kertamuovien ja kumiin valmistuksessa. Polymeroitumisprosessi ei useimmiten verkota polymeerimolekyylejä tiheästi. Ristisilloitus tehdään erillisenä työvaiheena. Sopivin menetelmin on mahdollista ristisilloittaa myös polymeereja, jotka eivät luonnostaan ristisilloitu. Esimerkkinä polyeteenin ristisilloitettu laatu PEX (tai XLPE), johon prosessoidaan polymeerimolekyylien väliset kovalenttiset sidokset vasta valmiissa kappaleessa.

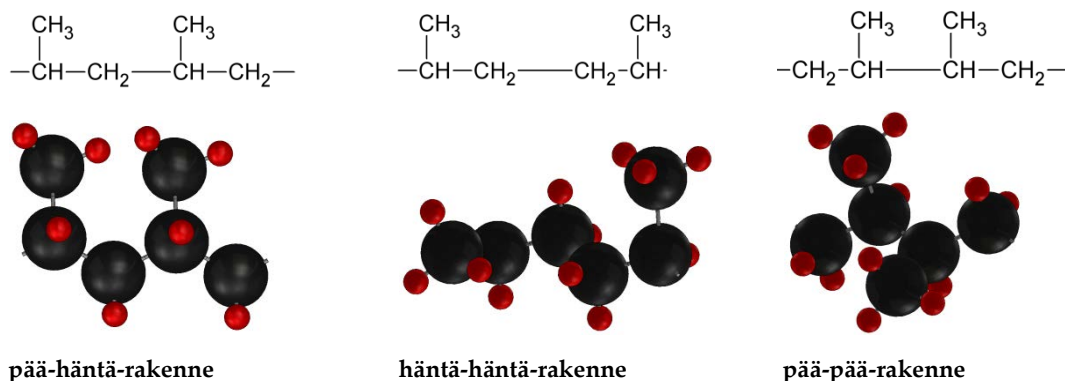
Polymeeriketjun konfiguraatiot ja isomeria

Useimmissa polymeereissa on keskellä hiiliatomeista tai esimerkiksi aromaattisista renkaista muodostunut ketju, jonka kyljille liittyy muita ainesosia kolmiulotteiseksi rakenteeksi. Monomeerit eivät useimmiten ole symmetrisiä, jonka vuoksi niillä on erilaisia mahdollisuuksia liittyä jatkamaan polymeeriketjua. Polymeroitumistapahtuman aikana muodostuneen ketjun kolmiulotteista rakennetta kutsutaan konfiguraatioksi.

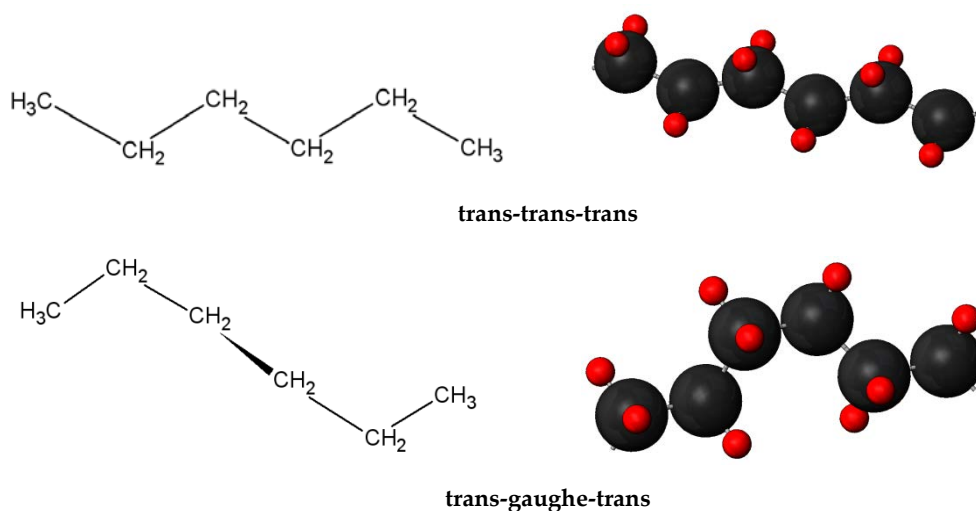
Konfiguraatio määrää suuren osan polymeerin ominaisuuksista. Polymeeriketju saadaan muodostettua halutunlaisena käyttämällä sopivaa katalyyttia, sopivia kemiallisia yhdisteitä ja/tai sopivaa polymerointimenetelmää. Kaikki polymeeriketjut eivät kuitenkaan muodostu samanlaisina, vaan tavoiteltu ominaisuus on esimerkiksi kolmessa polymeeriketjussa neljästä. Polymeerin valmistaja voi ilmoittaa esimerkiksi, että polyvinyylikloridi kauppanimellä supervinyl2 on 75 % syndiotaktinen.

Esimerkkejä konfiguraatioista ja isomeriasta

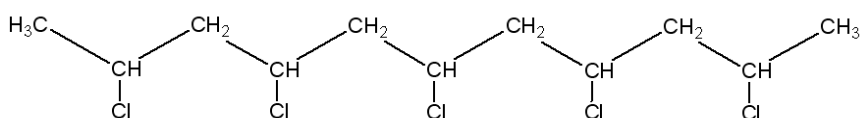
Epäsymmetrinen monomeeri voi liittyä viereiseen monomeeriin kummin päin tahansa. Esimerkkinä polypropeeni.



Hiiliketjussa oleva yksinkertainen sidos voi kiertyä 60 astetta, jolloin sidokset voivat asettua toisiinsa nähden samansuuntaisille tasoille *trans*-rakenteeksi tai kulmaan *gauche*-rakenteeksi. Kiertyviä sidoksia voi olla useampiakin. Esimerkkinä polyeteeni.



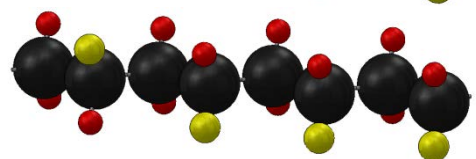
Monomeeri, jonka on mahdollista muodostaa stereorakenne, tuottaa polymeerirakenteeseen taktisuutta. Stereorakenteet voidaan nimetä kirjaimilla *m* (*meso*) ja *r* (*r*aseeminen, edellisen peilikuva). Jos kaikki monomeerit ovat samanlaisia, polymeeri on isotaktinen (mmmmmm, ↑↑↑↑↑↑ tai ↓↓↓↓↓↓). Jos polymeeri koostuu stereorakenteeltaan vuorottelevista monomeereista, se on syndiotaktinen (rrrrrr, ↓↑↓↑↓↑). Jos stereorakenteeltaan erilaisilla monomeereilla ei ole järjestystä, polymeeri on ataktinen. Vuorottelevien rakenteiden lisäksi tunnetaan erilaisia useammasta monomeerista muodostuvia vuorottelevia rakenteita, esimerkiksi heterotaktinen rmmrm, ↓↑↓↑↓↑ tai vailla erityisiä nimityksiä olevat mmr, ↑↑↑↓ tai ↓↓↓↑ sekä rrrm, ↓↓↑↑ tai ↑↓↑↓. Esimerkkinä polyvinyylikloridin kahdesta vuorottelevasta jaksosta muodostuva rakenne. Isotaktista polymeeria merkitään etuliitteellä *it*, esimerkiksi *it*-polyvinyylikloridi. Syndiotaktista polymeeria merkitään etuliitteellä *st*, esimerkiksi *st*-polyvinyylikloridi.



Polyvinylikloridin isotaktinen rakenne

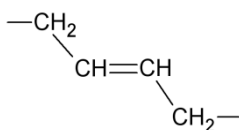


Polyvinylikloridin syndiotaktinen rakenne

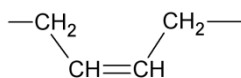


Polyvinylikloridin ataktinen rakenne

Monomeeri voi esiintyä erityyppisinä isomeroina. Kaksoissidos ei kierry, mutta se voi muodostaa stereorakenteen. Esimerkkinä cis- ja trans-polybutadieeni.

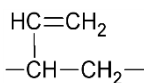


trans-polybutadieeni

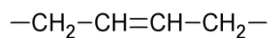


cis-polybutadieeni

Toinen esimerkki isomeriasta. Joissain tapauksissa polymeraation on mahdollista tapahtua useammalla eri tavalla, kuten polybutadieenin 1,2- ja 1,4-rakenteet.



1,2-polybutadieeni

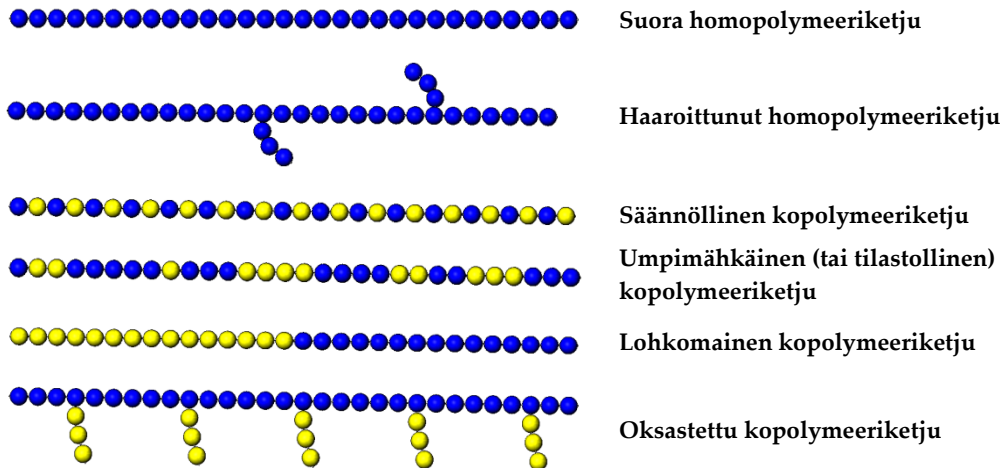


1,4-polybutadieeni

Homo- ja kopolymeerit, polymeeriketjujen rakenteet

Polymeerirakenne voi sisältää yhtä tai useampaa monomeeria. Jos rakenteessa on vain yhtä monomeeria, siitä käytetään käsitettä homopolymeeri. Jos rakenne sisältää vähintään kahta erilaista molekyyliä, käytetään siitä käsitettä kopolymeeri. Kopolymeerit voivat ottaa erilaisia muotoja. Muotoina erotetaan esimerkiksi tähtimäinen, dendriittinen ja ketjurakenne. Kopolymeerin ketjurakenne vastaa homopolymeerin ketjurakennetta, mutta kopolymeereilla voi olla useampia rakenteita siinä missä homopolymeerilla on vain yksi mahdollinen ketjumainen, eriasteisesti ja eri tavoin haaroittunut rakenne. Kopolymeerin ketjurakenteet voidaan nimetä sen mukaan, kuinka monomeerit ovat järjestyneet ketjun sisällä. Rakenne voi olla säännöllinen, umpimähkäinen, lohkomainen tai oksastettu (Kuva 1). Myös kopolymeeri voi haaroittua. Kuvassa esitettyjen

yksinkertaisten rakenteiden lisäksi polymeeri voi muodostaa dendriittisen tai tähtimäisen rakenteen.



Kuva 1 Homopolymeerien ja kopolymeerien ketjurakenteita

Polymeeriketjun rakennetta kuvaavat englanninkieliset termit ovat:

- homopolymer: homopolymeeri
- linear-chain polymer: suoraketjuinen polymeeri
- branched-chain polymer: haaraketjuinen polymeeri
- copolymer: kopolymeeri, poly(A-co-B)
- network (gel) polymer: verkottunut polymeeri, net-poly A, poly A-net-poly B
- crosslinked polymer: verkottunut (ristisilloitettu) polymeeri
- alternating copolymer: säännöllinen kopolymeeri, poly(A-alt-B)
- periodic copolymer: jaksollinen kopolymeeri, poly(A-per-B-per-C)
- random copolymer: umpimähkäinen kopolymeeri, poly(A-ran-B)
- statistical copolymer: tilastollinen kopolymeeri, poly(A-stat-B)
- block copolymer: lohkomainen kopolymeeri, poly(A-block-B)
- graft copolymer: oksastettu kopolymeeri, poly(A-graft-B)
- star polymer: tähtimäinen polymeeri, poly(A-star-B)
- dendritic polymer: dendriittinen polymeeri

Polymeerien kiteytyminen ja amorfisuus

Polymeerit voivat kiteytyä samoin kuin useat muutkin aineet. Yksikään polymeerilaatu ei kuitenkaan kiteydy täysin. Polymeerit jaetaan osakiteisiin ja amorfisiin laatuihin. Amorfiset laadut ovat kokonaan kiteytymättömiä tai ne kiteytyvät ainoastaan niin vähäisin määrin, että ne voidaan lukea amorfisiksi. Esimerkkinä PVC-muovit, joiden kiteisyys vaihtelee 5 – 25 % välillä. 5 – 10 % kiteytyvä PVC lasketaan amorfiseksi, mutta 20 – 25 % kiteytyvät laadut osakiteisiksi. Amorfinen rakenne koostuu toisiinsa sotkeutuneista polymeeriketjuista, joilla ei ole säännöllistä rakennetta. Mitä enemmän ketjut risteilevät toistensa lomitse, sitä lujempaa polymeerimateriaali on. Osakiteisessä polymeerissa on vuorotellen kiteytyntä ja amorfista ainetta. Parhaiten kiteytyvät rakenteeltaan symmetriset ja suoraketjuiset polymeerimolekyylit.

Polymeerien kiteytyminen ei tapahdu hetkessä. Siihen kuluu tietty, polymeerimateriaalin ominaisuuksista riippuva aika. Kiteytyminen vie pitemmän ajan kuin pienimolekyylisillä aineilla, esimerkiksi metalleilla. Jos materiaalia jäähdytetään liian voimakkaasti prosessoinnin aikana, se ei ennätä muodostaa kiderakennetta ja jää pakkotilaan. Toisinaan tilanne on suotuisa, mutta ei

läheskään aina. Pakkotilaan jäänyt rakenne voi hakeutua myöhemmin tasapainotilaan, jolloin kappaleessa tapahtuu mittamuutoksia ja vetelyä. Samasta polymeeristä valmistetaan toisinaan tavanomaisten laatuojen lisäksi nopeasti kiteytyviä laatuja, joilla voi nostaa valmistusprosessin kiertonopeutta.

Amorfisilla polymeereilla on tietty, usein kierteinen muoto, johon polymeeriketju mielellään hakeutuu. Jos amorfisesta polymeeristä valmistettu tuote jäähdytetään liian nopeasti siten, että polymeeriketjut jäävät venyneiksi, se voi vääntyillä tasapainotilaan hakeutumisen aikana vastaavalla tavalla kuin kiteisestä polymeeristä valmistettu kappale.

Amorfiset polymeerit kutistuvat vähemmän kuin osakiteiset polymeerit. Amorfisten polymeerien muottikutistumat ovat luokkaa 0,5 – 1 %. Osakiteisten polymeerien kutistuma on luokkaa 1 - 2,5 % (jopa 1 - 5 %). Useat polymeerit kutistuvat virtauksen suunnassa enemmän kuin virtaukseen nähden poikittaisessa suunnassa.

Polymeerien kutistumaa voi kompensoida jonkin verran kohdistamalla muotissa olevaan sulaan painetta, koska polymeerimateriaalit ovat kokoonpuristuvia. Menettelyllä on kuitenkin omat rajoitteensa. Muotin kapeissa kohdissa tapahtuu painehäviöitä ja paine pyrkii useimmiten olemaan suurin juuri portin edessä. Epätasainen painejakauma aiheuttaa myös vääntyilyä sekä mitta- ja muotomuutoksia kappaleeseen.

Lasimuutoslämpötila, pehmenemislämpötila, sulamislämpötila ja polymeerin hajoaminen

Polymeereillä voidaan erottaa neljä termodynaamisesti ja mekaanisesti tärkeää lämpötilaa: lasimuutoslämpötila (tai sen sijasta toisinaan käytettävä haurastumislämpötila), pehmenemislämpötila, sulamislämpötila ja hajoamislämpötilat.

Lasimuutoslämpötilalla viitataan lämpötilaan, jonka alapuolella polymeerin amorfisessa rakenteessa olevat molekyylit ketjut menettävät liikkuvuutensa. Lasimuutoslämpötilan yläpuolella ketjut pääsevät liikkumaan vapaasti, jolloin amorfinen rakenne muuttuu kumimaisen joustavaksi. Kun lämpötilaa nostetaan edelleen, amorfisen aineen viskositeetti pienenee asteittain siten, että jossain vaiheessa kumimainen aine muuttuu viskoosiksi nesteeksi. Lasimuutoslämpötilan sijasta käytetään toisinaan haurastumislämpötilaa. Haurastumislämpötila on lämpötila, jossa 50 % koekappaleista on rikki oltuna iskettäessä niitä 200 ± 20 cm/s nopeudella liikkuvalla iskurilla. Testi on määritetty standardissa ISO 974.

Pehmenemislämpötila on lämpötila, jossa polymeeri pehmenee tietyllä erikseen määritellyllä tavalla. Pehmenemislämpötilaa käytetään amorfisilla materiaaleilla sulamispisteen asemasta ja/tai määrittämään valettavalle muovikappaleelle sopiva ulostyöntölämpötila. Yleisimmät mittaamenetelmät ovat HDT (Heat Deflection Temperature) ja VICAT. VICAT -lämpötila on lämpötila, jossa 1 mm² poikkipinta-alainen, ympyrämainen tai neliön muotoinen tylppäkärkinen sauva tunkeutuu 1 mm syvyyteen materiaalin sisään, kun sitä painetaan 9,81 N (1kp) tai 49,05 N (5kp) voimalla. Pienempää voimaa käytetään VICAT A ja suurempaa VICAT B -testissä. Testit on määritelty standardissa ISO 306. HDT -lämpötila määritetään upottamalla 80 x 10 x 4 mm kokoinen koekappale lämmitettävään nesteeseen tukien päälle. Nestettä lämmitetään 2 celsiusasteen minuuttivauhdilla ja koekappaletta painetaan tukien väliin asetetulla kuormitetulla painimella, kunnes painin liikkuu standardissa ilmoitetulla tavalla lasketun standarditaipuman verran alaspäin. Lämpötila, jossa painin on liikkunut standarditaipuman verran, kirjataan HDT -lämpötilaksi. Tuet ja painimen pää on pyörästetty 3 mm säteellä. Painimen kuorma riippuu valitusta koeasetelmasta. Se valitaan siten, että taivutusjännitykseksi muodostuu 1,8 MPa (menetelmä A, suositeltava), 0,45 MPa (menetelmä B) tai 8,00 MPa (menetelmä C). HDT -testi on määritelty standardeissa ISO 75-1, -2 ja -3.

Sulamislämpötilalla viitataan lämpötilaan, jossa osakiteisen polymeerin kiderakenne hajoaa. Osakiteisten polymeerien prosessointilämpötila on 20 – 50 astetta sulamislämpötilan yläpuolella.

Hajoamislämpötilalla viitataan lämpötilaan, jossa polymeerin rakenne hajoaa. Hajoamista tapahtuu kuitenkin jo huomattavasti alhaisemmissa lämpötiloissa, jos altistus on riittävän pitkäkestoinen tai kemialliset olosuhteet suotuisat. Osa polymeereista reagoi prosessoinnin aikana muodostaen kaasuja ja erilaisia kemiallisia yhdisteitä. Yhdisteet voivat olla syövyttäviä. Esimerkiksi PVC muodostaa lämmön vaikutuksesta vetykloridia, joka reagoi kosteuden kanssa suolahapoksi.

Polymeerimateriaaleille määritetään usein maksimikäyttölämpötila ja rajat prosessointilämpötiloille. Materiaalit pysyvät suhteellisen stabiileina näiden lämpötilojen alapuolella. Herkästi reagoivat polymeerit voidaan stabiloida erilaisin lisäainein, jolloin prosessointi on helpompaa ja vaurioittaa polymeerimateriaalia vähemmän kuin ilman stabilointia. Polymeerimateriaalin mekaaniset ominaisuudet säilyvät myös pitkään, jos lämpötilaa ei nosteta ilmoitetun maksimikäyttölämpötilan yläpuolelle.

Lämmön aiheuttamia hajoamismekanismeja tunnetaan erilaisia:

- Polymeeri voi menettää pääketjustaan sivuryhmiä, jotka muodostavat jotain kemiallista yhdistettä ja jättävät pääketjun reaktiiviseksi. Pääketju voi pilkkoontua ja reagoida edelleen muodostamalla esimerkiksi bentseeni- tai tolueninrenkaita. Esimerkkinä PVC, jonka irronneista sivuryhmistä muodostuu kloorivetyä.
- Polymeerin pääketjuun muodostuu vapaita radikaaleja, joiden vaikutuksesta ketju pilkkoontuu päistä tai ketjun sisäosista. Polyeteeni hajoaa tällä mekanismilla.
- Polymeeriketju avautuu esimerkiksi vapaiden radikaalien vaikutuksesta ja hajoaa monomeereiksi. Esimerkiksi PMMA ja polystyreeni hajoavat tällä mekanismilla.

Näiden lisäksi polymeeri voi hajota myös hapettumalla lämmön tai UV -säteilyn vaikutuksesta. Polymeerimateriaalit valmistetaan kemiallisesti katalyyttien ja lämpötilan avulla. Sopivat kemikaalit, vesi ja riittävän korkea lämpötila saattavat saada hydrolyysireaktion tai jonkin muun kemiallisen reaktion aikaan, jolloin polymeeri alkaa hajota monomeereikseen tai pilkkoontua. Polymeerien herkkyys kemikaaleille ja lämpötilastabiilius on ilmoitettu valmistajan tuoteselosteessa. Lisätietoa löytyy myös kirjallisuudesta.

Kiteisillä, pienimolekyylisillä materiaaleilla on tyypillisesti kolme olomuotoa: kaasu, neste ja kiteytynyt aine. Kiteytyminen tapahtuu puhtailla aineilla yhdessä lämpötilassa ja kahdesta tai useammasta aineesta koostuvilla seoksilla tietyllä lämpötila-alueella. Kiteytyneen aineen kiteiden rakenne voi muuttua lämpötilan vaikutuksesta. Suurimolekyyliset aineet, kuten polymeerit eivät esiinny kaasumaisessa tilassa lainkaan. Amorfisilla polymeereilla on erotettavissa viisi erilaista, lämpötilasta riippuvaa sulan ja kiinteän tilan olomuotoa:

- **Lasimainen tila lasimuutoslämpötilan alapuolella.** Lämpötila on riittävän alhainen pitämään polymeerimolekyylit toisiinsa nähden liikkumattomina. Polymeerimateriaalin kimmokerroin pysyy lasimaisessa tilassa suhteellisen vakioisena. Materiaali on lasimaista.
- **Lasimuutosalue.** Noin 20 – 30 °C laajuinen lämpötila-alue, jolla polymeerimateriaalin kimmokerroin putoaa nopeasti. Lasimuutoslämpötila asettuu johonkin kohtaan tätä aluetta. Se voidaan määritellä useilla tavoilla. Materiaalin lasimuutoslämpötilaksi voidaan valita esimerkiksi lämpötila, jolla kimmokerroin lähtee voimakkaasti laskemaan. Lasimuutoslämpötilaksi voidaan valita myös lämpötila, jossa lämpöpitenemiskertoimen lämpötilan funktiona piirretty kuvaaja taivuttaa. Lämpöpitenemiskerroin alkaa kasvaa lämpötilan funktiona voimakkaammin lasimuutoslämpötilan yläpuolella kuin sen alapuolella.
- **Elastinen tila.** Polymeerimolekyylit pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden suhteellisen vapaasti, mutta materiaali pysyy kuitenkin kiinteänä. Polymeerimateriaalia voi kuvata tässä tilassa joustavan kumimaiseksi. Kimmokerroin asettuu jollekin suhteellisen vakioiselle, materiaalin ominaisuuksista riippuvalle tasolle. Jos polymeerimolekyylit ovat ristisilloittuneet, kimmokerroin jää suuremmaksi kuin jos ristisilloittumista ei ole tapahtunut. Osakiteisten polymeerien kiteytyneisyys vakioi kimmokerrointa. Amorfisilla

materiaaleilla kimmokerroin pienenee hitaasti eli venymät kasvavat vakiokuormituksella, kun lämpötilaa nostetaan.

- **Pehmevä tila.** Materiaali muuttuu juoksevammaksi ja kimmokerroin alkaa pienetä. Venymät kasvavat voimakkaammin.
- **Sula tila.** Materiaali muuttuu viskoosiksi nesteeksi. Kiteytyneen aineen kiderakenne on hajonnut. Viskositeetti pienenee, kun sulan lämpötilaa nostetaan.

Sekä amorfisista että osakiteisistä polymeereista valmistettuja tuotteita voidaan käyttää lasimuutoslämpötilan ylä- tai alapuolella. Lasimuutoslämpötilan yläpuolella käytettävät amorfiset polymeerit ovat useimmiten erilaisia elastomeereja tai kumeja. Osakiteisten polymeerien käyttölämpötilat ovat tyypillisesti lasimuutoslämpötilan yläpuolella. Tällaiset materiaalit ovat sitkeitä ja niillä on suhteellisen suuret venymät. Esimerkkinä polyeteeni, jonka lasimuutoslämpötila on -125 - -25 °C ja venymät tyypillisesti muutamasta kymmenestä prosentista satoihin prosentteihin. Amorfisten muovien käyttölämpötilat ovat huomattavasti lasimuutoslämpötilan alapuolella. Ne ovat ilman lisäaineita lasimaisia ja kovia materiaaleja. Niihin lisätään pehmittimiä joustavuuden lisäämiseksi.

Seuraavaan taulukkoon on koottu joidenkin yleisimpien polymeerien lasimuutos-, sulamis-, hajoamis- ja prosessointilämpötiloja.

Taulukko 1. Joidenkin yleisimpien polymeerien lasimuutoslämpötila, sulamislämpötila, prosessointilämpötila-alue ja hajoamislämpötila.

Polymeeri	Maksimikäyttölämpötila ³	Lasimuutos-lämpötila, °C ² (haurastumislämpötila, °C ³)	Sulamis-lämpötila, °C (VICAT) ²	Normaali prosessointi-lämpötila, °C ⁴	Hajoamis-lämpötila, °C ³ (sulussa lämpötila, jossa prosessi alkaa / kiihtyy) sekä hajoamismekanismi ⁵
Polyeteeni (PE), osakiteinen	60 - 90	-140 - -25 (-140.0 - -100.0)	105 - 135 (65 - 130)	150 - 300	280 - 300; (180 - 200); vapaiden radikaalien muodostuminen, hajoaa lyhyiksi ketjuiksi
Polyasettaali (POM), osakiteinen	65 - 90	-90 - -73	165 - 190 (115 - 185)	210 - 220	200 - 260 ⁴ ; muodostaa hajoessaan formaldehydikaasua
Polybuteeni (PB), osakiteinen		-63 - -17	115 - 130		
Polypropeeni (PP), osakiteinen	85 - 120	-20 - 0 (25)	160 - 175 (90 - 160)	200 - 280	hajoaa polymeeriketjujen päistä; hapettuminen lämpötilan ja UV-säteilyn vaikutuksesta
Polybuteeni-tereftalaatti (PBT), osakiteinen		37 - 52	215 - 230 (125 - 230)	240 - 270	400; (140 - 200); hajoaa ketjujen päistä

² Useita lähteitä

³ <http://www.chemnetbase.com>, Chemical Databases Online, Chapman & Hall/CRC Press LLC

⁴ Järvelä, Syrjälä, Vastela: Ruiskuvalu, Plastdata 2000

Polymeeri	Maksimikäyttölämpötila ³	Lasimuutos-lämpötila, °C ² (haurastumislämpötila, °C ³)	Sulamis-lämpötila, °C (VICAT) ²	Normaali prosessointi-lämpötila, °C ⁴	Hajoamis-lämpötila, °C ³ (suluissa lämpötila, jossa prosessi alkaa / kiihtyy) sekä hajoamismekanismi ⁵
Polyeteeni-tereftalaatti (PET), osakiteinen	150	67	245 - 280		(250 - 280); hajoaa ketjujen päistä ja keskeltä, molekyyliketjun keskeltä alkaneessa hajoamisessa muodostuu asetaldehydiä, hajoaa myös hapettumisen vaikutuksesta
Polyvinyylikloridi (PVC), amorfinen, 5-10 % kiteistä ainetta	60 - 90	70 - 100	(70 - 100)		300, (200 - 250) hajoaa pääketjun sivuryhmien irrotessa, muodostaa kloorivetyä hajoamisen sivutuotteena, epästabiili polymeeri, herkkä leikkausvoimille ja ketjussa oleville virheille
Polystyreeni (PS), amorfinen	105	85 - 110	210 - 270 (85 - 110)	180 - 280	300 - 330; hajoaa monomeereiksi muodostamalla vapaita radikaaleja; voi hapettua
Iskunkestävä polystyreeni (HIPS), amorfinen	90	95 - 105	(80 - 105)	180 - 280	300 - 330
Akrylinitriili-butadieeni-styreeni (ABS), amorfinen	75 - 85	105 - 109		220 - 260	340 - 400 ⁵ ; hajoaa muodostamalla vapaita radikaaleja, muodostaa hajoamisen sivutuotteena ammoniakkia, syaanivetyä ja typen oksideita
Polymetyyli-metakrylaatti (PMMA), amorfinen	65 - 100	105 - 115 (80 - 90)		180 - 270	300; ((175) 220 - 270); hajoaa monomeereiksi muodostamalla vapaita radikaaleja, myös ketjun sivuryhmät voivat irrota
Styreeni-akrylonitriili (SAN), amorfinen		115			320
Polysulfoni (PSU), amorfinen	160	185 - 190	310 - 390 (185 - 190)	320 - 380	400

⁵ Pielichowski, K. (toim.), Njuguna, J. (toim.), Rapra Technology Limited henkilökunta: *Thermal Degradation of Polymeric Materials*, Smithers Rapra, 2005

Polymeeri	Maksimikäyttölämpötila ³	Lasimuutos-lämpötila, °C ² (haurastumislämpötila, °C ³)	Sulamis-lämpötila, °C (VICAT) ²	Normaali prosessointi-lämpötila, °C ⁴	Hajoamis-lämpötila, °C ³ (suluissa lämpötila, jossa prosessi alkaa / kiihtyy) sekä hajoamismekanismit ⁵
Polyfenyylieetteri (PPE, PPO), amorfinen	80 - 105	205 - 230	255 - 305	260 - 300 (PPE+PS)	450; (250); hapettuu herkästi
Polyeetterisulfoni (PESU), amorfinen	180	220 - 225	345 - 390 (220)	340 - 390	
Polyfenyylisulfoni (PPSU), amorfinen		220 - 225	(220)		

Tekijät, jotka vähentävät polymeeriketjujen liikkuvuutta, nostavat lasimuutoslämpötilaa. Lasimuutoslämpötila riippuu näin ollen polymeeriketjujen pituudesta ja molekyyliketjujen välillä vaikuttavista sekundaarisista sidosvoimista. Pehmittimet laskevat lasimuutoslämpötilaa.

Polymeerien viskositeetti

Polymeerit ovat sulassa tilassa ei-newtoniaanisista, jonkin verran kokoonpuristuvia nesteitä. Ei-newtoniaanisella nesteellä tarkoitetaan nestettä, jonka virtausnopeus vaikuttaa sen viskositeettiin. Newtoniaanisesta nesteen viskositeetti pysyy teoriassa vakiona virtausnopeudesta riippumatta. Yksikään neste ei kuitenkaan käyttäydy täydellisen newtoniaanisesti. Ei-newtoniaanisista nesteistä voidaan yksinkertaistetusti jakaa neljään ryhmään: 1.) Dilatantit eli nesteet, joilla viskositeetti kasvaa, kun niihin kohdistetaan suurentuvaa leikkausvoimaa. 2.) Pseudoplastiset nesteet, joiden viskositeetti pienenee, kun niihin kohdistetaan suurentuvaa leikkausvoimaa. 3.) Reopektiset nesteet, joiden viskositeetti kasvaa ajan kuluessa, kun niihin kohdistetaan vakioista leikkausvoimaa. 4.) Tiksotrooppiset nesteet, joiden viskositeetti pienenee ajan kuluessa, kun niihin kohdistetaan vakioista leikkausvoimaa. Polymeerit luetaan näistä ryhmistä pseudoplastisiin nesteisiin. Leikkausnopeuden ohella polymeerin viskositeettiin vaikuttavat lämpötila, polymeerimolekyylien koko ja rakenne sekä molekyylien väliset sidosvoimat ja vyyhteytyminen. Myös polymeerimateriaaleissa käytettävät täyteaineet muuttavat viskositeettia.

Polymeeriketjut orientoituvat virratessaan muotin sisällä olevien kapeikkojen kautta tai prosessointiin käytettävän koneen suuttimen läpi. Kapeikkoja on esimerkiksi ruiskuvalukoneen suuttimessa ja ekstruusiolaitteen suuttimessa, ruiskuvalumuotin porteilla ja kaikissa muotin sisällä olevissa kapeissa kohdissa. Orientoituminen pienentää polymeerisulan viskositeettia. Se vaikuttaa myös valmiin tuotteen mekaanisiin ominaisuuksiin.

Polymeerisula orientoituu enemmän lähellä työkalun pintaa, koska pinta jarruttaa sulan virtausta. Sulavirran sisäosissa olevat polymeeriketjut säilyvät pintakerroksia pitempään vyyhteytyneinä.

Jotkin muoviraaka-aineet ovat erittäin herkkiä virtauksen aikana muodostuvien leikkausvoimien aiheuttamalle (kitka) lämpenemiselle. Nämä materiaalit alkavat hajota herkästi, jos virtausnopeus ylittää tietyn kriittisen arvon. Leikkausvoimat ovat erityisen suuria valuportilla, suuttimessa ja muissa kapeissa muottipesän ja kanaviston osissa.

Polymeerien käyttäytyminen kuormitettuna

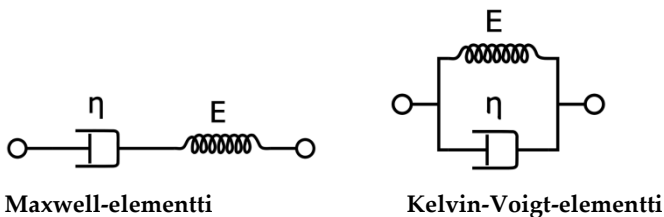
Polymeerit ovat kertamuoveja lukuun ottamatta viskoelastisia materiaaleja. Viskoelastinen materiaali käyttäytyy kuormitettaessa osin elastisen kiinteän aineen tavoin ja osin viskoosin nesteen tavoin.

Kun polymeerimateriaalista valmistettua kappaletta kuormitetaan, siinä olevat molekyylit alkavat relaxoitua ja virua eri mekanismeilla. Virumisen voi ajatella olevan hidasta ryömivää virtaamista. Materiaalissa olevat polymeerimolekyylit liikkuvat tällöin toisiinsa nähden kuormituksen aiheuttamien jännitysten vaikutuksesta eivätkä ne enää palaudu takaisin. Relaxoituminen on periaatteeltaan jousimaista, osin palautuvaa muodonmuutosta. Relaxoituminen ja viruminen ilmenevät käytännössä siten, että vakiovenymään tarvittava kuormitus pienenee ajan kuluessa. Ilmiö aiheuttaa esimerkiksi napsautusliitosten löystymistä ajan kuluessa.

Relaksoitumis- ja virumismekanismit ovat teoriassa seuraavat:

- **Polymeeriketjujen katkeaminen.** Aiheutuu useimmiten hapettumisesta tai hydrolyysistä. Kuormituksen lisäksi tarvitaan sopivat kemialliset olosuhteet.
- **Sidoskohtien vaihtuminen polymeeriketjujen välillä.** Polymeerimolekyylit katkeilevat kuormituksen aiheuttaman jännitystilän vaikutuksesta, mutta ne sitoutuvat välittömästi uudella tavalla viereisiin molekyyleihin. Molekyyliä ei pienene kuten siinä tapauksessa, että molekyylit hajoaisivat.
- **Viskoosi virtaus.** Polymeeriketjut liikkuvat hitaasti toistensa lomitse.
- **Polymeerivyyhtien joustaminen.** Toisiinsa kietoutuneet polymeeriketjut ja niiden välillä mahdollisesti olevat ristosillat joustavat. Kun jännitys poistetaan, polymeeriketjut vetäytyvät takaisin vyyhdelle.
- **Molekyyliketjujen relaxoituminen lasimuutoslämpötilan läheisyydessä.** Molekyyliketjut myötävät kuormituksen vaikutuksesta.

Viskoelastista materiaalia kuvataan matemaattisesti joko Maxwell- tai Kelvin-Voigt-elementeillä. Molemmat elementit koostuvat jousesta ja viskoosia nestettä täynnä olevasta astiasta. Maxwell-elementissä jousi ja astia on asetettu peräkkäin, Kelvin-elementissä rinnakkain (Kuva 2).



Kuva 2 Maxwell- ja Kelvin-Voigt-elementit. Lähde: <http://en.wikipedia.org>.

Polymeerimateriaaleille voidaan tehdä Charpy- (ISO 179-1 ja -2) tai IZOD -iskulujuustesti (ISO 180) lovetulle tai loveamattomalle koeksuvalle. Koeksuavan koko on 80 x 10 x 4 mm. Iskulujuustesti sopii jäykille ja lujitetuille kerta- ja kestopuoveille sekä nestekidemuoveille. Joustavia muovilaatuja ei välttämättä pysty rikkomaan iskukoemenettelyllä.

Koekappale tuetaan IZOD -menetelmässä pystysuoraan asentoon ja lyödään rikki yhdellä iskulla. Isku kohdistetaan vaakasuoraan joko kappaleen syrjään (4 x 80 mm sivu) tai lappeeseen (10 x 80 mm sivu). Koekappaleissa voidaan käyttää kahta lovikokoa: pohjasäde 0,25 mm (A) ja 1,00 mm (B). Loven aukeamiskulma on molemmissa menettelyissä 45 astetta. Loveamaton koeksuava merkitään kirjaimella (U). Testi merkitään esimerkiksi ISO 180/U.

Charpy -menetelmässä kappale tuetaan vaakasuoraan asentoon ja isku kohdistetaan kaikilla muilla koekappaleilla syrjää vasten (e) paitsi laminaateilla joko syrjää (e) tai lapetta vasten (f).

Koekappaleissa voidaan käyttää kolmea eri lovikokoa: pohjasäde 0,25 mm (A), 1,00 mm (B) ja 0,1 mm (C). Loven aukeamiskulma on kaikissa menettelyissä 45 astetta. Loveamaton koesauva merkitään kirjaimella (U). Testi merkitään esimerkiksi ISO 179-1/1eA. Numero 1 tarkoittaa koesauvan kokoa (1 = 80 x 10 x 4 mm).

Muovien kovuus mitataan ISO 2039 mukaisena kuulan syventymäkovuutena HB (ball indentation hardness HB) tai ISO 2039-2 mukaisena Rockwell -kovuutena. HB -testissä kuulan halkaisija on 5 mm. Materiaalille tehdään aluksi testikuormitus 9,81 N kuormalla. Testin tuloksesta riippuen valitaan sen jälkeen joko 49 N, 132 N, 358 N tai 961 N kuorma. Kovuuden arvo lasketaan kuorman ja painuman syvyyden perusteella. Rockwell -testi tehdään teräskuulalla, jonka halkaisija on 12,7 mm (R), 6,35 mm (L), 6,35 mm (M) tai 3,175 mm (E). Menettelyissä R ja L käytetään 588,4 N kuormaa ja menettelyissä M ja E 980,7 N kuormaa. Kovuus määritetään kuulan aiheuttaman painuman syvyyden perusteella.

Muovien vetolujuus määritetään standardien ISO 527-1 ja -2 mukaisesti. Virumistesti määritellään standardeissa ISO 899-1 ja -2.

Polymeerimateriaalien lisäaineet

Lisä- ja apuaineita käytetään parantamaan polymeerin ominaisuuksia. Tyypillisimmät lisä- ja apuaineet ovat pehmittimiä, täyteaineita, lujitteita, väriaineita, voiteluaineita, palonsuoja-aineita sekä erilaisia stabilointiaineita. Stabilointiaineina käytetään antioksidantteja, UV-suoja-aineita ja PVC polymeerin sivuryhmien irtoamisen estämiseen käytettäviä aineita.

- **Pehmittimet.** Plastisointiaineet. Tavallisimmat pehmittimet ovat ftalihapon estereitä eli ftalaatteja, adipaatteja, trimellitaahteja ja fosforihapon estereitä eli organofosfaatteja. Yli 90 % pehmittimistä on ftalaatteja. Toissijaisina pehmittiminä käytetään kloorattuja hiilivetyjä (kloorattua parafiinia) sekä epoksoitua soija- ja pellavaöljyä. Toissijaiset pehmittimet eli pehmittimenä käytettävät jatkoaineet parantavat varsinaisten pehmittimien ominaisuuksia. Niitä käytetään yksinään vain joillain kovilla PVC -laaduilla. Valtaosa (yli 90 %) pehmittimistä käytetään PVC -muovien ominaisuuksien muokkaamiseen. Pehmitin toimii voitelu- ja täyteaineena polymeerimolekyylien välissä. Se ehkäisee myös polymeeriketjujen välisten sekundaarisidosten muodostumista eristämällä ketjut toisistaan. Pehmitin laskee polymeerin lasimuutoslämpötilaa, pehmittää sen ja tekee siitä helpommin juoksevaa. Pehmittimiä käytetään jonkin verran myös korkeiden ja matalien lämpötilojen ominaisuuksien parantamiseen. Pehmittimiä käytetään vähäisessä määrin nylonille, kumeille, fluorimuoveille sekä PET -muovien värjättävyyden parantamiseen.
- **Täyteaineet.** Täyteaineet jaetaan jatkeaineisiin ja lujitteisiin. Niiden lisäksi käytetään aineita, joilla täyteaine sidotaan matriisiin. Jatkeaineet ovat polymeerimatriisia halvempia, epäorgaanisia tai orgaanisia aineita, kuten kalsiumkarbonaattia, kaoliinia, kiillettä, talkkia, puujauhoa ja tärkkelystä. Täyteaineilla voi olla myös stabiloivia ja suojaavia ominaisuuksia. Bariumsulfaatti vaimentaa ääntä, absorboi röntgensäteitä ja lisää polymeerimateriaalin tiheyttä. Alumiini- ja magnesiumhydroksidit ovat paitsi täyteaineita myös palonsuoja-aineita. Metallijauheita ja hiiltä käytetään lämmön- ja sähkönjohtavuuden parantamiseen. Polymeerimateriaalin lujittamiseen, jäykistämiseen, vääntyilyn estämiseen ja mitanpitävyyden parantamiseen käytetään yleisesti lasikuulia, lasikuituja, hiilikuituja ja aramidikuituja. Sideaineina käytetään silaaneja, titanaatteja, steariinihappoja ja stearaatteja.
- **Palonsuoja-aineet.** Polymeerit ovat perinteisiin konstruktiomateriaaleihin verrattuna suhteellisen herkästi palavia. Ne muodostavat myös runsaasti palokaasuja. Palonsuoja-aineiden tehtävänä on heikentää polymeerin syttymisherkkyttä, palamisnopeutta, lämmöntuottoa, palamisen kiihtymistä, savuntuottoa sekä myrkyllisten tai syövyttävien palokaasujen muodostumista. Palonsuoja-aineina käytetään alumiini- ja magnesiumhydroksideja, antimonyyhdisteitä, sinkkiboraatteja, ammoniumpolyfosfaatteja, amorfista fosforia (punafosforia), erilaisia metallioksiedeita ja karbonaatteja, organofosfaatteja sekä bromattuja tai kloorattuja orgaanisia yhdisteitä. Palosuojattuja muoveja käytetään erityisesti rakennustarvikkeissa, kalusteissa, vaahtomuoveina, sähköjohtojen päällysteissä, kulkuvälineissä, televisioissa, konttorikoneissa ja kotitalouskoneissa. Palosuojattuja laatuja löytyy kaikista edellä mainittuihin kohteisiin käytetyistä muoveista.
- **Antioksidantit eli hapettumisenestoaineet.** Antioksidantit ehkäisevät polymeerien hapettumisreaktioita. Hapettuminen voi ilmetä esimerkiksi säröilyn, värimuutosten, kiilto-ominaisuuksien ja haurastumisen muodossa. Antioksidanteina käytetään steerisesti estyneitä fenoleita ja amiineja, aromaattisia amiineja, fosfiitteja, fosfoneita, metalliyhdisteitä sekä dilauryyli-, dimyristyyli- ja distearyyli thiodipropionaatteja. Käyttökohteet esimerkiksi PE, PP, HIPS ja ABS. Käytetään lisäksi värisuojina esimerkiksi polyesteripohjaisilla muoveilla, polykarbonaateilla ja polyamideilla.
- **UV-suoja-aineet.** Auringon ultraviolettisäteilyn energia on riittävän suuri rikkomaan polymeeriketjun sidoksia, jolloin siihen muodostuu reaktiivisia osia ja ketju alkaa hajota. Ultraviolettisäteilylle altistunut muovi voi kellastua, säröillä, haurastua tai samentua ja muodostaa liitumaisen pinnan. UV-suoja-aineina käytetään hydroksibentsofenoneita,

hydroksifenyylibentsotriatsoleja, hydroksifenyylitriatsiineja, salisylaatteja, formamidiineja, hydroksibentsoaatteja, nikkelikomplekseja, kanelihapon suoloja, oksaalianilideja ja steerisesti estyneitä amiineja. UV-suoja-aineita käytetään erityisesti PE, PP, PS, ABS, SAN, PVS ja PU materiaaleille.

- **Stabilointiaineet PVC sivuryhmien irtoamisen estämiseen.** PVC on epästabiili korkeissa lämpötiloissa. Siinä olevat Cl -sivuryhmät pyrkivät irtoamaan ja muodostamaan vetykloridia. Stabilointiin käytetään lyijyä, tinaa ja antimonia sisältäviä metalliyhdisteitä sekä barium-kadmium, barium-sinkki ja kalsium-sinkki -yhdisteitä. Näiden lisäksi käytetään metallittomia yhdisteitä, kuten fosfiitteja, epoksoitua soijaöljyä ja polyoleja.
- **Voiteluaineet.** Voiteluaineet parantavat polymeerisulan juoksevuuutta, valmiin kappaleen pinnan laatua ja ehkäisevät sulaa takertumasta muottipesän pintaan. Voiteluaineina käytetään rasvahappoja, rasva-alkoholeja ja niiden johdannaisia, montaanihappoja ja niiden johdannaisia, parafiineja ja polyeteeni- tai polypropeenivahoja. Voiteluaineita käytetään etenkin PVC, ABS, SAN, PS, PE, PP, PET ja PBT -muovilaaduille.
- **Muut.** Polymeerimateriaaleihin voidaan näiden lisäksi sekoittaa erilaisia antistaattisia aineita, iskulujuuteen vaikuttavia aineita ja kirkasteita.

Polymeerien prosessoinnin erityispiirteet

Polymeerimateriaalin ominaisuudet, jotka vaikuttavat prosessoinnin onnistumiseen ja valmiin tuotteen laatuun, ovat:

- **Viskositeetti, viskositeetin riippuvuus lämpötilasta ja polymeerimateriaalin herkkyys lämpötilan vaikutukselle.** Polymeerimateriaaleille on tyypillistä, että niiden viskositeetti pienenee lämpötilan noustessa ja virtausnopeuden kasvaessa. Viskositeetin olisi edullista olla mahdollisimman pieni, koska tällöin muovisula virtaa paremmin muotin sisällä tai suuttimen läpi sekä ottaa helpommin halutun muodon. Osa polymeereista alkaa kuitenkin hajota herkästi jo prosessoinnin vaatimissa lämpötiloissa. Hajoamisen sivutuotteena voi syntyä erilaisia syövyttäviä aineita, kuten PVC -muovien tapauksessa kloorivetyä. Hajoaminen muuttaa myös polymeerimateriaalin rakennetta.
- **Polymeeriketjujen ja polymeerimateriaalissa olevien täyteaineiden orientoituminen.** Polymeeriketjuilla ja täyteaineena käytettävillä kuiduilla on taipumus orientoitua sulan virtauksen suunnassa. Jos materiaalin annetaan jäähtyä riittävän pitkään prosessoinnin aikana, polymeeriketjut ennättävät ottaa niille tyypillisen kiderakenteen tai vyyhteytyneen muodon. Lasi- ja mineraalikuidut tai muut epäorgaaniset kuidut eivät kuitenkaan järjesty orientoitumisen jälkeen uudelleen.
- **Kutistuma.** Polymeerimateriaaleille on tyypillistä kutistua enemmän virtauksen suunnassa kuin virtaukseen nähden poikittaisessa suunnassa. Kutistumaa voi kompensoida paineistamalla polymeerimateriaalia, koska se on useimmiten kokoonpuristuvaa. Paine ei kuitenkaan jakaannu tasaisesti muottipesään, kuten kokoon puristumattomassa nesteessä. Muotin sisällä tapahtuu painehäviöitä. Valmis tuote voi väännyillä ja siihen voi tulla muotovirheitä erisuuruisten kutistumien vaikutuksesta.
- **Kiteytymisnopeus, polymeeriketjujen relaksaationopeus.** Polymeerimateriaalin kiteytymisnopeus ja polymeeriketjujen relaksaationopeus on materiaalista riippuva suure. Jos prosessoitava materiaali jäähdytetään liian nopeasti, se ei ennätä kiteytyä tai relaksoitua ja jää pakkotilaan. Polymeerin tulee jäähtyä riittävästi, jotta se voidaan työntää ulos muotista. Tarvittava ulostyöntövoima ja ulostyöntimien aiheuttama rasitus riippuu hyvin monesta tekijästä. Tekijöitä ovat esimerkiksi materiaalin jäykkyys, kitka muottipesän ja muovin välillä sekä kappaleen muodot.
- **Polymeerimateriaalissa olevat täyteaineet.** Materiaalissa olevat täyteaineet vaikuttavat kutistuman suuruuteen ja viskositeettiin. Ne voivat kuluttaa muottia voimakkaasti, mutta toisaalta myös ehkäistä polymeerimateriaalissa olevien yhdisteiden syövyttävää vaikutusta. Täyteaineet lujittavat ja jäykistävät materiaalia.

- **Polymeerimateriaalissa olevat voiteluaineet.** Voiteluaineet parantavat sulan polymeerin juoksevuuutta ja parantavat kappaleen pinnanlaatua. Ne voivat myös edistää kappaleen irtoamista muottipesästä.

Lähteet

Brandrup, J.; Immergut, Edmund H.; Grulke, Eric A.; Abe, Akihiro; Bloch, Daniel R. Polymer Handbook (4. painos), John Wiley & Sons, 1999

Brydson, J, Plastics Materials, 7th Edition, Elsevier, 1999

Buschow, K.H. Jürgen; Cahn, Robert W.; Flemings, Merton C.; Ilshner, Bernhard; Kramer, Edward J.; Mahajan, Subhash: Encyclopedia of Materials – Science and Technology, Elsevier 2001.

Cadogan D. F., Howick C. J.: Plasticizers, teoksessa Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons, 2000

Campo E. A, The Complete Part Design Handbook For Injection Molding of Thermoplastics, Hanser Publishers, 2006

Chem netBase, Polymers: A properties Database, <http://poly.chemnetbase.com>, Taylor & Francis Group, 2010

Cheng S. Z. D., Pan R., Wunderlich B.: Thermal analysis of poly(butylene terephthalate) for heat capacity, rigid-amorphous content, and transition behavior, Macromolecular chemistry and physics, 10/189, 1993

Drobny, J. G, Handbook of Thermoplastic Elastomers, William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 2007

Goodman, S.H, Handbook of Thermoset Plastics, 2nd Edition, William Andrew Publishing/Noyes, 1998

Gunter, E, Designing with Plastics, Hanser Publishers, 2006

Pielichowski, K. (toim.), Njuguna, J. (toim.), Rapra Technology Limited henkilökunta: Thermal Degradation of Polymeric Materials, Smithers Rapra, 2005

Plasticisers Information Centre, An initiative of the European Council for Plasticisers and Intermediates (ECPI), <http://www.plasticisers.org>, tammikuu 2010

Sterling, L. H. Introduction to Physical Polymer Science (4. painos), John Wiley & Sons, 2006

Wolf, R., Kaul B. L.: Plastics Additives, teoksessa Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, John Wiley & Sons, 2000

Liitetaulukot: Polymeerimateriaaleja

Valtamuoveja Edullisia, käytetään runsaasti, suhteellisen vaatimattomat mekaaniset, termiset, kemialliset ja sähköiset ominaisuudet. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ⁶	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, Ioveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polystyreeni (PS) Amorfinen termoplastinen homopolymeeri, joka sopii ruiskuvaluun, ekstruusioon, kaasuvusteiseen ruiskuvaluun, lämpömuovattavaksi ja puhallusmuovattavaksi. Kaupalliset laadut ovat ataktisia. Käytetään elintarvikepakkauksissa ja elintarvikkeiden kanssa kosketuksiin joutuviissa tuotteissa, kodinkoneissa ja erilaisissa kuluttajatuotteissa. Kutistuma 0,4 - 0,8 %.	1030 - 1040	85 - 100 (85 - 110)	45 - 60 (2 - 3)	2400 - 3500 7200 - 11300 ⁷	<25	150	Ashland INEOS NOVA BASF Chevron Phillips NOVA Chemicals

⁶ Chem netBase, Polymers: A properties Database, <http://poly.chemnetbase.com>, Taylor & Francis Group, 2010

⁷ Lasikuitulujitteinen, kuidun määrä 20 – 40 %, lähteessä Polymers: A Properties Database

Valtamuoveja Edullisia, käytetään runsaasti, suhteellisen vaatimattomat mekaaniset, termiset, kemialliset ja sähköiset ominaisuudet. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmonmoduuli, MPa ⁶	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, loveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polyeteeni (PE) Osakiteinen termoplastinen homopolymeeri, jota voidaan muokata kaikilla termoplastisille polymeereille soveltuvilla menetelmillä. Polymeeriketju sisältää pelkästään hiiltä ja vetyä. Kiteisyys määräytyy ketjun haaroittuneisuuden mukaan. Haaroittuneet laadut kiteytyvät vähemmän. Useita tiheyslaatuja, esimerkiksi LDPE (low density), MDPE (medium density) ja HDPE (high density). Useita molekyylipainolaatuja, esim. HMWPE (high molecular weight) ja UHMWPE (ultra high molecular weight). Sulamislämpötilat: LDPE 105 - 115 °C (kiteisyys 45 - 55 %); MDPE 110 - 130 °C; HDPE 130 - 135 °C (kiteisyys 70 - 90 %). Pakkaukset, elintarvikepakkaukset, kodintarvikkeet, lelut, säiliöt, kuidut, putket, yleismuovi.	920 - 930 ⁸ 930 - 950 ⁹ 945 - 965 ¹⁰	-125 - -25 (80 - 100) (65 - 120) (75 - 130)	20 - 30 (85 - 600) 45 - 50 (450 - 500) 15 - 25 ¹¹ (100 - 900)	100 - 300 200 - 700 940 - 1090 (6200 - 4800) ¹²	9 (-30 °C)	15 - 17 40 - 50	LyondellBasell & Equistar Borealis Chevron Phillips DuPont ExxonMobil Flint Hills Resources Sabic

⁸ LDPE, Low density polyethylene

⁹ MDPE, Medium density polyethylene

¹⁰ HDPE, High density polyethylene

¹¹ Myötölujuus

¹² Lasikuitulujitteinen, kuidun määrä 30 %

Valtamuoveja Edullisia, käytetään runsaasti, suhteellisen vaatimattomat mekaaniset, termiset, kemialliset ja sähköiset ominaisuudet. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmonmoduuli, MPa ⁶	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, Ioveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polyvinyylikloridi (PVC) Amorfinen termoplastinen homopolymeeri. Kiteytyneen aineen osuus on noin 5 - 10 %. Noin 55 % syndiotaktisia ketjuja, loput ataktisia. Voidaan valmistaa myös osakiteisenä, jolloin kiteisen aineen osuus on 20 – 25 %. Sopii esimerkiksi lämpömuovattavaksi, ekstruusioon puhallusmuovattavaksi ja ruiskuvalettavaksi. Käytetään putkissa, letkuissa, putkiliittimissä ja -yhteissä, rantaleluissa ja pomppulinnoissa, kaapelin eristeissä ja pinnoitteina, pakkauksissa ja auton sisustuksessa. Kutistuma 0,2 - 0,4 %.	1200 - 1380 ¹³ 1300 - 1470 ¹⁴	70 - 100 (70 - 100)	7 - 25 (170 - 450) 34 - 62 (20 - 230)		<10	85 - 115	Acmos Alpha Gary Arkema Georgia Gulf INEOS Solvay

¹³ Joustava PVC, tiedot <http://www.pvc.org>, <http://www.matweb.com> polymeerivalmistajien materiaalitietojen lisäksi

¹⁴ Jäykkä PVC, tiedot <http://www.pvc.org>, <http://www.matweb.com> polymeerivalmistajien materiaalitietojen lisäksi

Käyttömuoveja Paremmat mekaaniset, kemialliset, termiset ja sähköiset ominaisuudet kuin valtamuoveilla. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C ¹⁵	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, loveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Akryylinitriili-butadieeni-styreeni (ABS) Amorfinen termoplastinen kopolymeeri. Monomeerit akryylinitriili (25 %), 1,3-butadieeni (20 %) ja styreeni (55 %). Kaikki termoplastisille polymeereille mahdolliset menetelmät soveltuvat prosessointiin, iskunkestävä, jäykkä, kova ja sitkeä muovilaatu, käytetään kodinkoneissa ja leikkikaluissa. Kutistuma 0,25 - 1,2 % virtauksen suunnassa, 0,25 – 0,8 % virtaukseen nähden poikittaissuunnassa.	1030 - 1050	105 - 109 (45 - 135)	10 - 25 (8 - 12)	2400 - 2600	90 - 140 (-30 °C)	75 - 100	Ashland BASF INEOS SAMSUNG
Metyylimetakrylaatti-ABS, läpinäkyvä ABS (MABS) Amorfinen termoplastinen kopolymeeri, sopii ruiskuvaluun, vastaavat ominaisuudet kuin ABS-muoveilla.	1080		42 - 48 (12 - 20)		110 - 120 70 - 80	70 - 75	BASF
Iskunkestävä polystyreeni (HIPS) Amorfinen termoplastinen homopolymeeri, prosessointimenetelminä ruiskuvalu, ekstruusio, kaasuvuovainen ruiskuvalu, lämpömuovaus ja puhallusmuovaus. Ominaisuudet ja käyttökohteet kuten polystyreenillä, iskunkestävä laatu.	1020 - 1030	93 - 105 ¹⁶ (101)	23 - 27 (25 - 40)	900 - 3500	120 - 160 (-30 °C)	66 - 90	BASF Ashland Chevron Phillips INEOS NOVA NOVA Chemicals

¹⁵ <http://www.matweb.com>

¹⁶ *Polymer Handbook, myös VICAT*

Käyttömuoveja Paremmat mekaaniset, kemialliset, termiset ja sähköiset ominaisuudet kuin valtamuoveilla. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C ¹⁵	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, loveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Styreeni-akrylonitrili (SAN) Amorfinen termoplastinen kopolymeeri, monomeerit styreeni (76 %) ja akrylonitrili (24 %). Vahva, kestää kemikaaleja erittäin hyvin, mitanpitävä, sopii ruiskuvaluun ja ekstruusioon, myös muille termoplastien muovaamiseen soveltuville menetelmille, käytetään esimerkiksi kosmetiikkapakkauksissa, astioissa ja keittiötarvikkeissa, valaisimissa ja heijastimissa, instrumenteissa ja tulostimen osissa. Kutistuma 0,2 – 0,6 %.	1080 1360 ¹⁷	115 ¹⁸ (103 - 113)	70 - 80 (3 - 3,5) 110 (2)		15 - 20 17	Rockwell M77-M84	BASF INEOS SAMSUNG

¹⁷ Lasikuitulujitteinen

¹⁸ Polymer Handbook

Käyttömuoveja Paremmat mekaaniset, kemialliset, termiset ja sähköiset ominaisuudet kuin valtamuoveilla. Ominaisuudet koottu lueteltujen polymeerivalmistajien sivuilta, ellei sarakkeen otsikossa ole toisin mainittu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C ¹⁵	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, loveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polypropeeni (PP) Termoplastinen homopolymeeri. Isotaktiset ja syndiotaktiset laadut ovat osakiteisiä, ataktinen laatu on amorfinen polymeeri. Kaupalliset laadut ovat useimmiten pääosin isotaktisia tai iso-, syndio- ja ataktisten ketjujen yhdistelmiä. Voidaan prosessoida kaikilla termoplasteille soveltuvilla menetelmillä. Käytetään kuituina, pakkaustarvikkeina, kannet ja korkit (erityisesti integraalisaranalla varustetut), akut ja auton osat. Sulamislämpötila 160 - 175 °C. Kutistuma virtauksen suuntaan 1 - 2,5 %, virtaukseen nähden poikittain 1 - 1,6 %.	900 - 925	-20 (ataktinen) 0 (isotaktinen) (90 - 160)	30 - 41 ¹⁹ (20 - 50; 5 - 11 ²⁰)	1030 - 1720	>65 (loveamaton) 9 - 11 (23 °C, lovettu)	62 - 98	Ashland Basell Chevron Phillips ExxonMobil Flint Hills Resources Sabic Sunoco
Styreeni-butadieeni kopolymeeri (SBC) Amorfinen termoplastinen kopolymeeri, ruiskuvaluun, ekstruusioon ja lämpömuovaukseen sopiva iskunkestävä, läpinäkyvä muovilaatu, käytetään elintarvikepakkauksissa, pulloissa, henkareissa ja muissa kotitaloustarvikkeissa, joissa vaaditaan yhtä aikaa läpinäkyvyyttä ja iskunkestävyyttä.	1010 - 1020		15 - 35 (20 - >300)		2 - 85 (23 °C, lovettu)		BASF

¹⁹ Myötöraja

²⁰ Venymä myötörajalla

Teknisiä muoveja Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, loveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polyasetali (POM) Termoplastinen kopolymeeri, monomeerit formaldehydi ja trioksaani. Sopii ruiskuvaluun, ekstruusioon ja puhallusmuovattavaksi, osakiteinen, kiteisyys 60 - 80 % sulamislämpötila 165 - 190 °C, luja, iskutukea ja kova materiaali, joka säilyttää mekaaniset ominaisuudet lähelle sulamispistettä, kestää hyvin kemikaaleja, iskulujuus säilyy pakkasessa, sopii sähkötekniisiin sovelluksiin, koska ei ime kosteutta ja toimii eristeenä, käytetään teknisissä komponenteissa sekä elektroniikka- ja sähköteknisissä laitteissa. Kutistuma virtauksen suunnassa 1,4 -1,9 % ja virtausta vastaan poikittain 1,3 – 2,1 %, lujitetut laadut virtauksen suunnassa 1,2 – 1,4 % ja virtausta vastaan poikittain 0,4 - 1,6 %.	1390 - 1430 1540 - 1580 ²¹ 1650 ²²	-90 - -73 (115 - 185)	37 - 68 (1 - 33) 52 - 145 (3 - 12) 75 (6)	3500 - 7900	25 - 260 50 - 55 55	120 - 400 164 - 190 190	Asahi Kasei BASF Celanese DuPont Polyplastic

²¹ Lasikuitulujitteinen, tiheys kasvaa lasikuidun määrän kasvaessa, lasikuitua on 20 – 25 %

²² Mineraalikulutujitteinen, kuidun määrä 30 %

Teknisiä muoveja Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luettuilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, Ioveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polyamidi (nylon, PA) Osakiteinen termoplastinen homopolymeeri, sulamislämpötila 260 °C, luja ja iskunkestävä muovimateriaali moniin teknisiin sovelluksiin, iskulujuus säilyy matalissakin lämpötiloissa, autojen osat, koneiden osat, sähkötekniset sovellukset, sopii ruiskuvaluun, ekstruusioon, puhallusmuovaukseen ja kaikille muille termoplastien prosessointimenetelmille.	1060 - 1150 1230 - 1560 ²³ 1360 ²⁴		48 - 100 (4 - 25) 95 - 240 (2 - 6) 75 (12)		80 - 250 40 - 110 190	-	Arkema Asahi Kasei BASF Chem Polymer DSM DuPont EMS Grivory LANXESS Toray Plastics
Polysulfoni (PSU) Amorfinen termoplastinen kopolymeeri. Voidaan prosessoida useimmilla termoplastisille polymeereille soveltuvilla menetelmillä. Käytetään, jos muut polymeerit eivät kykene vastaamaan tarpeisiin. Lujia ja kovia, kestävät korkeita lämpötiloja. Keittiötarvikkeet, auton osat, laboratoriotarvikkeet, pumpun juoksupyörät, elektroniset laitteet. Kutistuma 0,3 – 0,8 %:	1230 - 1235 1490 ²⁵	185 - 190 (185 - 190)	75 - 80 (6) 120 (2)	2500 7400 - 10000	- 33	135 193	BASF Solvay

²³ Lasikuitulujitteinen, tiheys kasvaa lasikuidun määrän kasvaessa, lasikuitua on 15 – 50 %, mekaaniset arvot kuivalle materiaalille

²⁴ Mineraalikulutiteinen, kuidun määrä 30 %

²⁵ Lasikuitulujitteinen, kuidun määrä 30 %

Teknisiä muoveja Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, Ioveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polyeetterisulfoni (PESU) Kuten edellä. Kutistuma 0,15 – 0,8 %:	1330 - 1370 1470 - 1600 ²⁶		85 - 90 (6 - 7) 125 - 185 (1,5 - 2,5)	2660 5690 - 8630	- 40 - 47	154 205 - 227	BASF Chevron Phillips
Polyfenyylisulfoni (PPSU) Osakiteinen termoplastinen kopolymeeri. Kiteisyys 60 - 65 %. Sulamislämpötila 280 – 320 °C. Kutistuma 1 %. Muuten kuten edellä PES ja PSU.	1290 1380 ²⁷	220 - 225 (220)	74 (8) 110 (2)		- 45	124 170	BASF

²⁶ Lasikuitulujitteinen, lasikuitua on 20 - 30 %

²⁷ Lasikuitulujitteinen, kuitupitoisuus 20 %

Teknisiä muoveja Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.	Tiheys, kg/m ³	Lasimuutoslämpötila T _g (ja VICAT), °C	Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)	Kimmomoduuli, MPa ³	Iskulujuus kJ/m ² Charpy, Ioveamaton	Kovuus, MPa ISO 2039-1	Valmistajia 2007
Polybuteenitereftalaatti (PBT) Polyesterilaatu. Sopii ruiskuvaluun, puhallusmuovattavaksi ja ekstruusioon; osakiteinen termoplastinen kopolymeeri, monomeerit 1,4-benzeenidikarboksylihappo ja 1,4-butaanidioli. Sulamislämpötila 215 – 230 °C. Mitanpitävä, luja, jäykkä ja iskunkestävä materiaali, hyvä kemikaalienkestävyys, käytetään sähkötarvikkeissa, auton osissa ja muina teknisinä komponentteina useilla teollisuudenaloilla. Kutistuma virtauksen suunnassa 1,6 – 2,2 %, virtausta vastaan poikittain 1,7 – 2,2 %. Lasikuitulujitteilla laaduilla virtauksen suunnassa 0,65 - 1,3 %, virtausta vastaan poikittain 0,25 - 0,8 %.	1300 - 1470 1370 - 1730 ²⁸ 1510 ²⁹ 1450 - 1530 ³⁰	37 - 52 ³¹ (125 - 230)	36 - 65 (25 - 200) 85 - 150 (1,5 - 4,5) 60 (4,5) 47 - 50 (4 - 10)	2530 60000 - 72900	50 - 290 25 - 78 70 35 - 40	75 - 190	BASF DuPont DSM SABIC LANXESS

²⁸ Lasikuitulujitteinen, tiheys kasvaa lasikuitupitoisuuden kasvaessa, kuituja voi olla 10 – 50 %, kuidut parantavat valmiin kappaleen jäykkyyttä, sitkeyttä ja mitanpitävyyttä

²⁹ Mineraalikulujitteinen, tiheys kasvaa mineraalipitoisuuden kasvaessa, kuitupitoisuus 25 %

³⁰ Lasikuulalujitteinen, tiheys kasvaa lasikuulapitoisuuden kasvaessa, lasikuulia voi olla 20 – 30 %, lasikuulat stabiloivat valmiin kappaleen rakennetta siten, että vääntyily vähenee

³¹ S. Z. D. Cheng, R. Pan, B. Wunderlich, Thermal analysis of poly(butylene terephthalate) for heat capacity, rigid-amorphous content, and transition behavior, *Macromolecular chemistry and physics*, 10/189, 1993

<p>Teknisiä muoveja</p> <p>Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.</p>	<p>Tiheys, kg/m³</p>	<p>Lasimuutoslämpötila T_g (ja VICAT), °C</p>	<p>Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)</p>	<p>Kimmo-moduuli, MPa³</p>	<p>Iskulujuus kJ/m² Charpy, loveamaton</p>	<p>Kovuus, MPa ISO 2039-1</p>	<p>Valmistajia 2007</p>
<p>Polyeteenitereftalaatti (PET)</p> <p>Osakiteinen termoplastinen kopolymeeri. Monomeerit dimetyylitereftalaatti ja 1,2-etaanidioli. Polyesterilaatu. Voidaan puhallusmuovata, ruiskuvalaa ja ekstruusioida. Käytetään erityisesti PET-pulloissa ja kuituina. Sulamislämpötila 245 - 280 °C. Lasikuitulujitteisilla laaduilla virtauksen suunnassa 0,8 - 0,9 %, virtausta vastaan poikittain 0,2 - 0,5 %.</p>	<p>1390 - 1850³²</p>	<p>67³³ (206 - 230)</p>	<p>70 - 189 (1 - 5)</p>	<p>2760 - 4140</p>	<p>20 - 70</p>	<p>58 - 125 (Rockwell)</p>	<p>DuPont DSM SABIC LANXESS</p>

³² Lasikuitulujitteinen, tiheys kasvaa lasikuitupitoisuuden kasvaessa, kuituja voi olla 15 – 55 %

³³ Buschow, K.H. Jürgen; Cahn, Robert W.; Flemings, Merton C.; Ilchner, Bernhard; Kramer, Edward J.; Mahajan, Subhash: *Encyclopedia of Materials – Science and Technology*, Elsevier 2001

<p>Teknisiä muoveja</p> <p>Tavallisesti useammasta monomeerista valmistettuja muovilaatuja, joiden murtolujuus on suurempi kuin 48 Mpa. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.</p>	<p>Tiheys, kg/m³</p>	<p>Lasimuutoslämpötila T_g (ja VICAT), °C</p>	<p>Murtolujuus, MPa (Murtovenymä, %)</p>	<p>Kimmo moduuli, MPa³</p>	<p>Iskulujuus kJ/m² Charpy, Ioveamaton</p>	<p>Kovuus, MPa ISO 2039-1</p>	<p>Valmistajia 2007</p>
<p>Polymetyylimetakrylaatti (PMMA)</p> <p>Amorfinen termoplastinen homopolymeeri. Polymeeriketjun rakenne riippuu polymerointimenetelmästä. Ketju voi olla pääosin ataktinen, konventionaalisella polymerointimenetelmällä valmistettuna enemmän syndiotaktinen kuin ataktinen, mutta materiaali voi sisältää myös isotaktisia ketjuja. Lasimuutoslämpötila riippuu ketjun taktisuudesta. Konventionaalisen materiaalin lasimuutoslämpötila on 105 °C, syndiotaktisen 115 °C ja isotaktisen 43 - 45 °C. Ruiskuvalu, ekstruusio, lämpömuovaus ja muut yleisimmät termoplastien muovausmenetelmät. Käytetään optiikassa, suojuksissa, suojalipoissa, pleksinä, matkapuhelimen näytön suojina, mittareissa ja ajoneuvojen valaisimissa, keittiötarvikkeissa ja aurinkolaseissa. Kutistuma 0,3 – 0,8 %.</p>		<p>105 - 115 (90 - 110)</p>		<p>2240 - 3800</p>			<p>Altuglas Evonik Lucite International</p>

<p>Seoksiin ja kopolymeereina käytettäviä laatuja</p> <p>Polymeereja, joita ei useimmiten käytetä yksinään, vaan seostettuna muihin polymeerilaatuihin. Taulukoidut arvot ovat luetelluilta valmistajilta, ellei toisin ole viitattu.</p>	<p>Tiheys, kg/m³</p>	<p>Lasimuutoslämpötila T_g (ja VICAT), °C</p>	<p>Murtolujuus, MPa</p>	<p>Murtovenymä, %</p>	<p>Iskulujuus kJ/m² Charpy, loveamaton</p>	<p>Kovuus, MPa ISO 2039-1</p>	<p>Valmistajia 2007</p>
<p>Polyfenyylietteri (PPE), Polyfenyylioksidi (PPO)</p> <p>Käytetään yleensä sekoitettuna polystyreeniin, nailoniin ja/tai polypropeeniin. Ei voi prosessoida pelkästään. Käytetään CD/DVD -asemien mekanismeissa, tulostimen osina ja muissa sähköteknisissä sovelluksissa. Erinomainen korkean lämpötilan kesto. Kutistuma lujittamattomalla PPE+PS -seoksella 0,5 - 1,0 %, lujitetulla PPE+PS -seoksella 0,2 - 0,5 %.</p>	<p>1060 - 1100³⁴ 1130 - 1430³⁵</p>	<p>230 (80 - 160) (85 - 140)</p>	<p>44 - 76 70 - 115</p>	<p>20 - 35 2 - 10</p>	<p>10 - 35 4 - 10</p>	<p>88 - 90</p>	<p>Asahi Kasei Evonik Industries SABIC Romira</p>
<p>Polybuteeni (PB)</p> <p>Osakiteinen termoplastinen homopolymeeri, jota käytetään yhdessä muiden polymeerien, useimmiten polyeteenin ja polypropeenin kanssa. Käytetään homopolymeerina esimerkiksi putkissa. Sulamislämpötila 115 - 130 °C, PB-co-PE. 81 - 98 °C.</p>	<p>914 - 940 895 - 901³⁶</p>	<p>-63</p>	<p>29 - 35 25 - 37</p>	<p>250 - 300 300 - 450</p>			<p>LyondellBasell</p>

³⁴ PPE+PS, VICAT sijaan annettu ISO DTUL (°C), 1.80 MPa, iskulujuus lovetulle sauvalle 23 °C, kovuus Rockwell

³⁵ PPE+PS, lasikuitulujitteinen, VICAT sijaan annettu ISO DTUL (°C), 1.80 MPa, iskulujuus lovetulle sauvalle 23 °C, kovuus Rockwell

³⁶ PB-co-PE kopolymeeri