TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

YRJÖ LEPOLA

VALMISTUSTEKNIIKAN JA MATERIAALIN VALINTA MUOVITUOTTEEN VALMISTUKSESSA

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Pentti Järvelä
ja DI Sauli Eerola

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Automaatio- kone ja materiaalitekniikan tiedekuntaneuvoston kokouksessa
7. joulukuuta 2011

Tiivistelmä

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Materiaalitekniikan koulutusohjelma
LEPOLA, YRJÖ: Valmistustekniikan ja materiaalin valinta muovituotteen valmistuksessa.
Diplomityö, 66 sivua, 4 liitesivua
Joulukuu 2011
Pääaine: Muovit ja elastomeerit
Tarkastajat: Professori Pentti Järvelä ja DI Sauli Eerola
Avainsanat: Muovituotteet, materiaalinvalinta, valmistustekniikka, tuotantomenetelmän valinta.

Tämän työn tarkoitus on nopeuttaa ja helpottaa muovimateriaaleihin ja muovituotteiden valmistusmenetelmiin tarvittavan tiedon löytymistä. Työhön on koottu lähes neljäkymmentä graafista esitystä ja taulukkoa tavallisimpien teknisten muovien ominaisuuksista ja valmistusmenetelmistä. Työ tarjoaa tuotteen suunnittelijoille ja valmistajille kattavan valikoiman tavallisimpien teknisten muovien tunnettuja ominaisuuksia yhdellä silmäyksellä luettavassa muodossa.

Työssä esitellään aluksi menetelmä, jota käyttämällä tuotteen suunnittelu ja materiaalin valinta saadaan systemaattiseksi tavaksi toimia. Yleisimpien muovimateriaalien teknisiä ominaisuuksia on koottu graafisiksi esityksiksi nopeasti silmäiltävään muotoon. Kolmanneksi työssä esitellään ja vertaillaan toisiinsa muovituotteiden valmistuksessa käytettyjä tavallisimpia valmistusmenetelmiä. Lopuksi annetaan vielä esimerkki materiaalin valinnasta muovituotteen valmistuksessa käyttäen hyväksi alussa esiteltyä menetelmää ja työssä annettuja taulukkomuodossa olevia tietoja.

Mikäli lukijalla on jo ennestään hyvä tietämys ja muovituotteiden valmistusmenetelmistä, kannattaa silti käydä läpi työn loppupuolella oleva lähdeluettelo. Jotkin siinä mainitut teokset soveltuvat erityisen hyvin vaikkapa oppikirjaksi tai lisätiedon lähteeksi myös sellaisille kokeneille ammattilaisille, jotka tuntevat muovimateriaalit ja muovituotteiden valmistusmenetelmät hyvin. Tietämyksen syventäminen voi olla mahdollista erityisesti muutamien lähdeluettelossa mainittujen tummennetulla merkittyjen teosten avulla.

Abstract

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Master's Degree Programme in Material Technology
LEPOLA, YRJÖ: Choosing the production method and the material in manufacturing plastic products.
Master of Science Thesis, 66 pages, 4 Appendix pages
December 2011
Major: Polymer and elastomeric materials
Examiners: Professor Pentti Järvelä and M.Sc. Sauli Eerola
Keywords: Plastic products, material selection, production technology, manufacturing process selection.

The purpose of this Master of thesis is to give an easy and fast way to find technical information of polymeric materials. The work consists of approximately forty different graphics and tables filled with technical features and comparisons of the production methods and physical and chemical features of plastics different kind. Most of the tables are readable very quickly.

At the beginning of this work one systematic method to choose the material and production method is presented. Secondly, many technical properties of common plastic materials are collected into a graphical form. The third issue in this work is a presentation of manufacturing methods of plastic products. Finally, an example is given how to use the systematic procedure and the information given in this work to choose the production method and the material in the production of a new plastic product.

In case the reader already has an excellent knowledge of technical features of polymeric materials and the production methods of polymers, it may still be useful to look at the bibliography written at the end of this work. Some of the references written bold letters may suit such professionals, who have an intention to complete their knowledge of polymeric materials.

Alkusanat

Tämä diplomityö on hyvin monivuotisen suunnitelman toteutuma. Tahdon kiittää siitä aivan erityisesti työni tarkastajaa, professori Pentti Järvelää, joka käveli yhtenä vuonna eräänä alkusyksyn päivänä silloiselle työpaikalleni ja herätti eloon haaveeni Tampereen teknillisestä oppilaitoksesta hankitun insinöörintutkintoni päivittämisestä yliopistotasoiseksi tutkinnoksi. Lisäksi professori Järvelä antoi opintojeni lopussa tutkittavakseni mielenkiintoisen aiheen, jossa saamastani avusta haluan myös kiittää. Työni toista tarkastajaa, Tampereen teknillisen yliopiston Lahden yksikön tutkimuspäällikköä DI Sauli Eerolaa haluan kiittää rakentavasta yhteistyöstä ja lukuisasta määrästä parannusehdotuksia, joiden ansiosta sekä työni sisältö että sen ulkoasu paranivat merkittävästi.

Seuraavaksi kiitän opintojeni alkuvaiheessa materiaalitekniikan koulutusohjelman suunnittelijana toiminutta ja opintosuunnitelmani teossa auttanutta DI Nina Ojalaa. Ilman saamaani tukea ja käytännöllisen järkevää suhtautumistasi aikuisen opiskelijan taustaan ja lähtökohtiin tästä olisi voinut muodostua huomattavasti pidempi projekti.

Lopuksi haluan kiittää vaimoani Päiviä, joka eli mukanani jokaisen vaiheen. Sinun tukesi ja merkittävä työpanoksesi oman päivätyösi muodossa mahdollisti opintojeni aikana perheemme pääasiallisen toimeentulon ja siten tämän yhteensä tasan viisi lukukautta kestäneen projektini toteutumisen. Suurimmat kiitokset Sinulle, Päivi!

Kangasalla 1.12.2011

Sisällysluettelo

Tiivistelmä i
Abstract ii
Alkusanat iii
Sisällysluettelo iv
Lyhenteet ja työssä käytetyt merkinnät vi

1. JOHDANTO 1

2. TUOTTEEN SUUNNITTELU 2

2.1. Tuotteen suunnitteluprosessi 2
2.1.1. Yleistä tuotteen suunnitteluprosessista 2
2.1.2. Systemaattinen tuotteen suunnitteluprosessi 2
2.1.3. Tuotteen vaatimusprofiilin laadinta 3

2.2. Tuotteen materiaalin valintaprosessi 6
2.2.1. Yleistä tuotteen materiaalinvalinnasta 6
2.2.2. Tarkoituksenmukaisen materiaalinvalinnan esteet 7
2.2.3. Esimerkki uudenlaisesta materiaalinvalinnasta 8
2.2.4. Materiaalin valintakriteerien muodostaminen 9
2.2.5. Tuotteen vaatimus- ja ominaisuusprofiilien laadinta 10

3. MUOVIMATERIAALIEN OMINAISUUDET 12

3.1. Muovimateriaalien lämmönkesto 12

3.2. Muovimateriaalien tiheys 15

3.3. Muovimateriaalien lämpölaajenemiskerroin 17

3.4. Muovimateriaalien kovuus 19

3.5. Muovien lujuus 20
3.5.1. Muovien vetolujuus 21
3.5.2. Muovien kimmomoduli 24
3.5.3. Muovien myötö- ja murtojännitys 26
3.5.4. Muovien vetovirumiskerroin 27

3.6. Veden imeytyminen muoviin 28

3.7. UV – säteilyn vaikutus muovimateriaaliin 29

3.8. Muovimateriaalien kemikaalinkesto 30

3.9. Muovimateriaalien kitka 31

4. MUOVITUOTTEIDEN VALMISTUSMENETELMIEN KUVAUS 37

4.1. Lujittamattomien muovien valmistusmenetelmiä 37
4.1.1. Valaminen 37

4.1.2. Puristusmenetelmät ... 38
4.1.2.1. Ahtopuristus ... 38
4.1.2.2. Siirtopuristus ... 39
4.1.2.3. Tasopuristus ... 40
4.1.2.4. Kalvopuristus ... 40
4.1.3. Ekstruusio ... 41
4.1.4. Ruiskuvalu ... 41
4.1.5. Puhallusmuovaus ... 43
4.1.6. Lämpömuovaus ... 43
4.1.7. Rotaatiovalu ... 44
4.1.8. Muovituotteen valmistus 3D -tulostimella ... 46
4.1.9. Lujittamattomien kesto- ja kertamuovien valmistusmenetelmien vertailua ... 46

4.2. Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmiä ... 48
4.2.1. Laminointimenetelmät ... 48
4.2.1.1. Käsinlaminointi ... 49
4.2.1.2. Ruiskulaminointi ... 49
4.2.1.3. Kuitukelaus ... 50
4.2.2. Paineinjektio (RTM) ... 50
4.2.3. Reaktioruiskuvalu RIM ... 51
4.2.4. Ruiskuvalu ... 52
4.2.5. Puristusmenetelmät ... 52
4.2.5.1. Märkäpuristus ... 52
4.2.6. Suulakeveto eli pultruusio ... 53
4.2.7. Valssaus ... 54
4.2.8. Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmien vertailua ... 54

5. KÄYTÄNNÖN ESIMERKKI ... 57

5.1. Raute Oyj taustaa ... 57

5.2. Kehitysvaiheessa olevan tuotteen materiaalinvalinta ... 57

5.3. Tuotteen vaatimusprofiilin laatiminen ... 58

5.4. Tuotteen materiaalinvalinnan yhteenveto ... 61

5.5. Tuotteen tuotantotavan valinta ... 62

5.6. Loppuyhteenveto ja suositus tuotantotavan ja materiaalin valinnasta tuotteelle ”nappi” ... 63

LÄHTEET ... 64

LIITE 1 ... 67

Lyhenteet ja työssä käytetyt merkinnät

TYÖSSÄ KÄSITELLYT MATERIAALIT:

ABS	Akryylinitriilibutadieenistyreeni, polystyreenin kopolymeeri
Al	Alumiini, tässä työssä: yleinen rakenteissa käytettävä alumiini
CA	Selluloosa-asetaatti
EP	Epoksi(t)
EPS	Nykymuodossa PS-E, polystyreenisolumuovi
Fe	Rauta, tässä työssä: yleinen rakenneteräs
LCP	Nestekidemuovi(laatu)
PA 6	Polyamidi 6
PA 66	Polyamidi 66
PA12	Polyamidi 12
PB	Polybuteeni
PBT	Polybuteenitereftalaatti
PBT + lk30	Polybuteenitereftalaatti, johon on lisätty 30 % lasikuitua
PC	Polykarbonaatti
PEI	Polyimidi
PEEK	Polyeetterieeetteriketoni
PE-HD	Polyeteeni, jonka tiheys (moolimassa) on korkea
PE-LD	Polyeteeni, jonka tiheys (moolimassa) on matala
PEHMW	Polyeteeni, jonka tiheys (moolimassa) on korkea
PEUHMW	Polyeteeni, jonka tiheys (moolimassa) on erittäin korkea
PES	Polysulfoni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PET-A	Amorfinen polyeteenitereftalaatti
PET-C	Kiteinen polyeteenitereftalaatti
PET-C + lk30	Polyeteenitereftalaatti, johon on lisätty 30 % lasikuitua
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, usein ”akryylilasi” tai ”pleksilasi”
POM	Polyoksimeteeni (käytetään myös nimitystä polyasetaali)
POM-C	Polyoksimeteenin kopolymeeri, muovin seostettu laji
POM-H	Polyoksimeteenin homologinen seos, homopolymeeri
PP	Polypropeeni
PP-H	Polypropeenin homologinen seos, homopolymeeri

PP-C	Polypropeenin ja polyeteenin kopolymeeri
PPS+lk40	Polyfenyleenisulfidi, johon on lisätty 40 % lasikuitua
PS	Polystyreeni, lasinkirkas amorfinen polystyreeni
PS-E	polystyreenin solustettu muoto, polystyreenisolumuovi
PSU	Polysulfoni
PTFE	Polytetrafluorieteeni
PUR	Polyuretaani
PVC-H	Polyvinyylikloridi, pehmitetty
PVC-U	Polyvinyylikloridi, kova
PVDF	Polyvinyylideenifluoridi
S/B	Polystyreenin ja butadieenin kopolymeeri, iskunkestävä
SAN	Styreeniakryylinitriili, polystyreenin kopolymeeri
UP	Polyesteri

TYÖSSÄ KÄSITELLYT TYÖMENETELMÄT:

RTM	Resin Transfer Moulding, hartsin paineinjektointi
RIM	Reaction Injection Moulding, reaktioruiskuvalu
RRIM	Reaktioruiskuvalu, jossa mukana lujite
SRIM	Reaktiovalu, jossa muottiin on ennalta asetettu lujiteaihio
SMC	Sheet Moulding Compound, puristemassalevy
GMT	Lasikuitumatolla lujitettu kestomuovi

MUUT LYHENTEET JA MERKINNÄT:

BMC	Puristemassa Bulk Moulding Compound
GMT	Lasikuitumatolla lujitettu kestomuovi
HB	Brinellin kovuuskoe ja -asteikko, jonka avulla mitataan materiaalien kovuuksia
T_g – lämpötila	Lasittumislämpötila, jossa amorfinen muovi muuttuu juoksevasta muodosta kiinteään muotoon
Prepreg	Puolivalmiste, jossa lujitemattoon tms. on imeytetty valmiiksi tuotteen valmistusvaiheessa tarvittavat ainesosat
SFS-EN ISO	SFS – standardin merkintätapa
SMC	Puristemassalevy Sheet Moulding Compound
Shore, Rockwell	Brinellin kovuuskoetta ja – asteikkoa vastaavia materiaalin kovuuden mittaukseen käytettyjä menetelmiä

1. JOHDANTO

Kannattava teollinen valmistaminen korkean kustannustason maassa vaatii tekijältään paljon. Pitää olla hyvä aistimaan ja nopea vastaamaan markkinoiden kysyntään. Pitää olla muuntautumiskykyinen, jotta pysyy mukana hintakilpailussa ja kulutusmieltymyksissä. Pitää valmistaa juuri oikeaan tarpeeseen ja siten varoa yli- ja alivalmistusta sekä määrällisessä että laadullisessa mielessä. Kerran valmistettu tuote on aina samalla myös käytetty raaka-aine, energia ja tuotantokapasiteetti.

Kaukana takanapäin on se aika, jolloin kaikesta oli pulaa ja tavarat ja tuotteet myivät siten itse itsensä. Elämme nyt aikakautta, jolloin kannattaa seurata markkinoita ja kilpailijoiden liikkeitä hyvin tarkasti ja olla avoin uusille materiaaleille, tavoille toimia ja aiempaa tehokkaammille tuotantomenetelmille. Muutokset näissä merkitsevät muutosta nopeuteen, jolla kyetään vastaamaan kysyntään ja asiakkaiden tarpeisiin sekä siten suoraan myös tuotantokustannuksiin ja kilpailukykyyn.

Yritys voi valita monta tietä ja strategiaa joilla se voi menestyä. Yritys voi olla alallaan suunnannäyttäjä ja vetää itse markkinoita toivomaansa suuntaan tuomalla myyntiin alati uusia ja innovatiivisia tuotteita, jotka ostava yleisö ottaa heti omakseen. Esimerkkinä tällaisesta toimintatavasta voidaan mainita vaikkapa Yhdysvaltalainen Apple. Toisessa tapauksessa yritys on niin hyvin ajan hermolla, että se kykenee seuraamaan alan markkinajohtajaa nopeasti, tehokkaasti, suurella volyymillä ja ennen kaikkea samanarvoisilla, mutta hieman edullisemmilla tuotteilla. Tätä toimintatapaa käyttävät monet ensimmäisenä kuvatun ryhmän yritysten jäljittelijät. Kolmannessa tapauksessa ei kyetä kumpaankaan edellisestä ja ainoaksi menestyskeinoksi jää tuotteen valmistaminen siten, että sen laatu on riittävä ja myyntihinta on alempien tuotantokustannusten ansiosta erittäin kilpailukykyinen. Tällaiset yritykset valmistavat tuotteensa tavallisesti paikoissa, joissa kustannukset ovat selvästi normaalia eurooppalaista kustannustasoa edullisemmat [1].

Olipa valittu strategia mikä vain, parhaiten menestyy kun on tietoa, taitoa ja kykyä ottaa hallintaansa nopeasti uusia valmistusmenetelmiä ja -materiaaleja. Tämän oppaan tarkoitus on helpottaa muovimateriaaleihin ja muovituotteiden valmistusmenetelmiin tarvittavan tiedon löytämistä. Opas on tarkoitettu erityisesti suunnittelijalle ja valmistajalle, joiden oma asiantuntemus suuntautuu johonkin muuhun materiaaliryhmään kuin polymeerimateriaaleihin. Mikäli lukijalla on jo ennestään hyvä tietämys muovialan materiaaleista ja valmistusmenetelmistä, voi sen syventäminen onnistua muutamien lähdeluettelossa mainittujen teosten avulla. Olen merkinnyt tummennetulla nimellä ne teokset, joita suosittelen aivan erityisesti lisätiedon lähteiksi alan ennestään tunteville ja kokeneille ammattilaisille tai sellaisiksi aikoville.

2. TUOTTEEN SUUNNITTELU

2.1. Tuotteen suunnitteluprosessi

2.1.1. Yleistä tuotteen suunnitteluprosessista

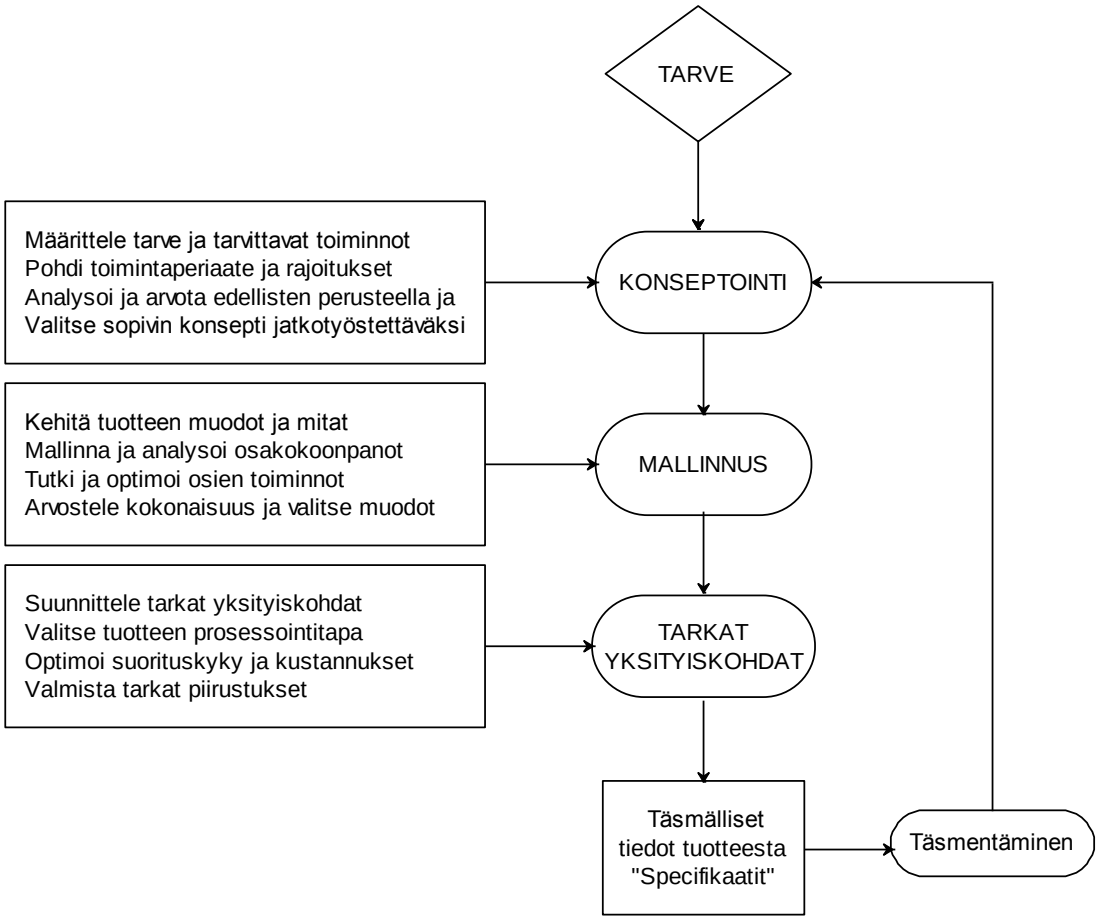
Ihminen on asuttanut tätä maapalloa erilaisten vaihtelevien tietolähteiden mukaan joko alle kymmenen tuhatta vuotta – satoja tuhansia vuosia. Olipa tarkka vuosimäärä mikä vain, yksi asia on kuitenkin aivan varmaa. Niin kauan kuin ihmisiä on ollut, on erilaisille tuotteille ollut kysyntää. Aikajanan alkupuolella käytettiin kiviä ja keppejä aseina ja työkaluina ja eläinten nahkoja vaatteina. Saman aikajanan nykyihmisen tuntemassa päässä käytämme hyvin monimutkaisia tuotteita ja laitekokonaisuuksia. Mikään ei kuitenkaan viittaa siihen, että olisimme saavuttaneet jonkinlaisen äärimmäisen pisteen, jossa kaikki keksimisen arvoinen olisi jo keksitty ja vieläpä tuotettu parhaimmalla mahdollisella tavalla. Pätevää ja alansa hallitsevaa suunnittelua tarvitaan siis edelleen sekä tänään että tulevaisuudessa.

Jokaiselle alansa hyvin hallitsevalle suunnittelijalle on täysin selvää, että yksittäisestä osasta koostuva tuote kannattaa suunnitella sen tarkoituksenmukaisen käytön perusteella ja komponenteista kootun kokonaisuuden osatekijät kannattaa suunnitella ja mitoittaa identtistä käyttöikää ja samankaltaisia olosuhteita ajatellen. Tuotteen käyttökelpoinen kestoikä voidaan esittää edelleen tutulla vertauksella, jonka mukaan ketju on yhtä vahva kuin mikä on sen heikoin lenkki. Suunnittelun ja valmistuksen kannalta onnistunut tuote onkin sellainen, että se kestää sille ajatellun eliniän verran. Kun se sitten ensimmäisen kerran vikaantuu normaalin käytön ja kulumisen surauksena, käyttäjä voi päätellä käyttökelpoisen eliniän olevan lopussa. Monen hyvinkin monimutkaisen laitteen korjauskustannukset kun ovat usein sen hankintahintaan nähden moninkertaisia. Tästä yhtenä esimerkkinä voidaan mainita nykyaikainen tulostin, jonka uushankintahinta monesti alittaa jopa korjaustarpeen arvioinnista perittävän hinnan. Tämä periaate mielessä tutustutaan seuraavassa systemaattiseen tapaan suunnitella tuote ja valita sille oikea valmistusmateriaali [32].

2.1.2. Systemaattinen tuotteen suunnitteluprosessi

Systemaattinen tuotteen suunnitteluprosessi lähtee yleensä liikkeelle tarpeesta. Tarvitaan työkalu omaan käyttöön, tuote myytäväksi kaikkialla maailmassa tai jotain siltä

väliltä. Aina alussa on tarve ja suunnitteluprosessin loppupisteessä on tuote, joka täyttää tuon tarpeen. Onkin erittäin tärkeää määritellä hyvin tarkasti tuo tarve, sillä väärin määritelty tarve ei kovin todennäköisesti johda parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen tuotteen suunnittelussa ja siihen erottamattomana osana kuuluvassa materiaalinvalinnassa. Kaaviokuvassa 2.1.2.1. on kuvattu tuotteen suunnitteluprosessi Michael F. Ashbyn mukaan [33].



Kaaviokuva 2.1.2.1. Tuotteen suunnitteluprosessin vaiheet [33].

2.1.3. Tuotteen vaatimusprofiilin laadinta

Suunnitteluprosessin ensimmäisessä vaiheessa on syytä määritellä hyvin tarkkaan mitä ollaan tekemässä. Tuote voi olla uusi tai vanha, kokonaisuus tai osa suurempaa kokonaisuutta. Tärkeintä on kerätä siitä kaikki mahdollinen saatavissa oleva tieto. Tämän perusteella voidaan päätellä ne vaatimukset, joita tuotteen käyttötarkoituksen mukainen käyttö sille sen elinkaaren aikana asettaa. Tätä kutsutaan jatkossa nimellä tuotteen vaatimusprofiili. Sitä laadittaessa on aluksi paikallaan listata ja tarkastella paitsi tuotteen

konstruktion suunnitteluun, myös tuotteen materiaalin valintaan vaikuttavia asioita. Tällaisia ovat esimerkiksi:

Tuotteelta halutut sen käyttöön vaikuttavat ominaisuudet:

- Tuotteen paino
- tuotteen lujuus ja kestävyys mekaanisten rasitusten suhteen
- tuotteen kestävyys ympäristötekijöiden suhteen.

Tuotteen ympäristövaikutukset:

- Tuotteen valmistukseen liittyvät määräykset
- tuotteen valmistusmateriaalille asetetut ohjearvot ja määräykset
- tuotteen kierrätettävyys ja korjattavuus.

Tuotteen arvioitu tai suunniteltu käyttöikä normaaleissa käyttöolosuhteissa

Tuotteen mahdollinen käyttö ei-tyypillisissä olosuhteissa

Tuotantokustannus ja siihen liittyen tuotteesta saatava hinta

Tuotteen valmistussarjan koko ja valmistuksen ajallinen pituus

Mahdollinen tarve aloittaa tuotteen valmistus mahdollisimman nopeasti

Tuotteen valmistamiseen käytettävissä olevat menetelmät

Tuotteen valmistamiseen tarvittava osaaminen

Tuotteen valmistuksen vaatimien laitteiden ja työkalujen saatavuus.

Mikäli kysymyksessä on tuote, jota on jo valmistettu, on tietoa tuotteen loppukäyttäjiltä mahdollisesti jo kertynyt. Tällöin asiakkaiden kanssa läheisessä kontaktissa olevat osapuolet kannattaa ehdottomasti haastatella. Mikäli tuote on uusi ja tällaista tietoa ei ole saatavilla, voidaan keinoina tuotteen vaatimusprofiilin laadinnassa käyttää:

Kokemuspohjaista harkintaa

Asiakkaan ilmoitusta, joka on yleensä melko toimiva menetelmä hyvässä ja vakiintuneessa asiakas-toimittaja -yhteistyösuhteessa

Markkinaselvitystä

Kilpailijan valmistamien vastaavien tuotteiden laadullista vertailua

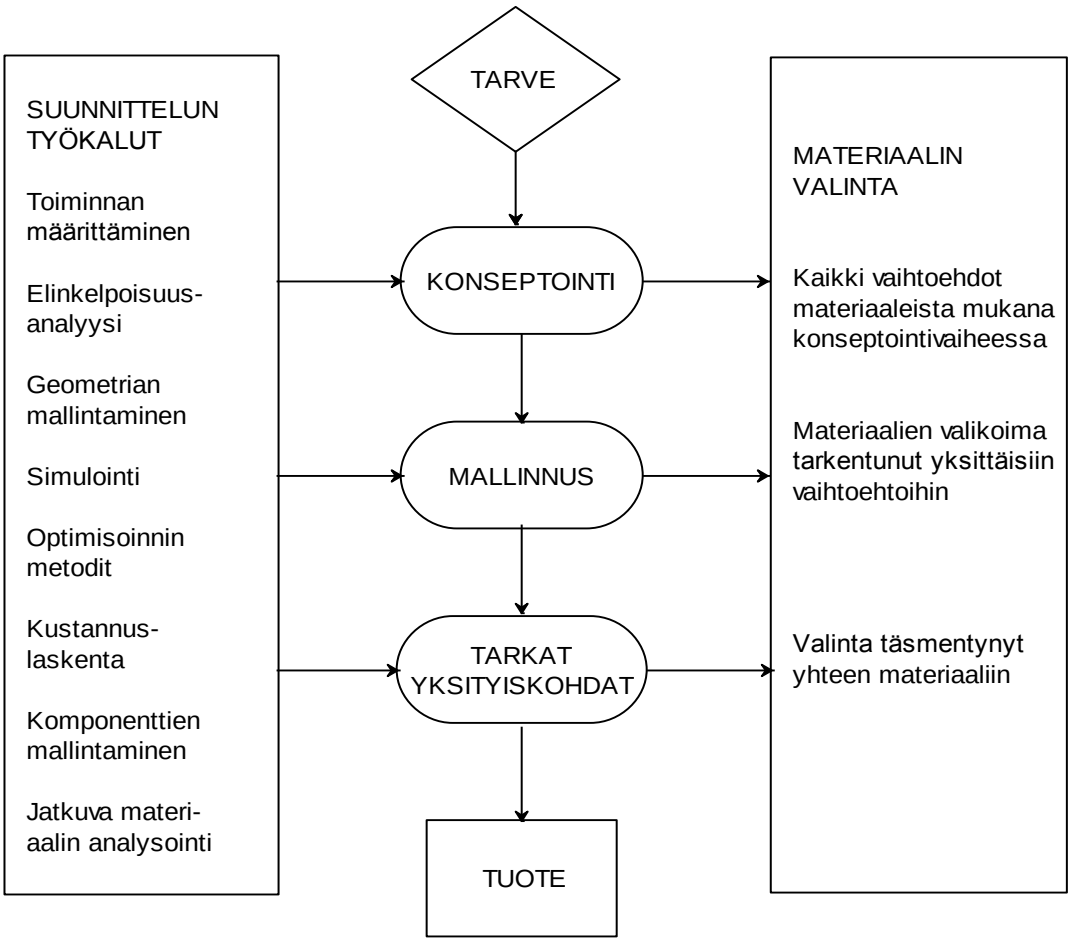
Vauriotapausten ja reklamaatioiden seurantaa aikaisempien omien tai kilpailijan vastaavien tuotteiden kohdalla

Erityisasioissa voidaan käyttää asiantuntijan konsultaatiota. Tällaisia erityisasioita voivat olla tuotteet, joiden valmistamisessa on esimerkiksi hygieniaan, paloturvallisuuteen tms. liittyviä viranomaisvaatimuksia.

Edellä on esitetty yleisiä esimerkkejä tuotteen vaatimusprofiilin sisällöstä ja tapoja sen tuottamiseen tarvittavien tietojen keräämiselle. Vaatimusprofiilin tekeminen vakiintuneella tavalla juuri omien asiakkaiden tarpeet, oman tuotannon lähtökohdat ja oma osaamistaso huomioon ottaen on yritykselle tärkeä ydinosaamisen alue, jonka määrätietoinen kehittäminen antaa selkeän kilpailuedun verrattuna muihin pelkällä ”musta tuntuu” -menetelmällä liikkeelle lähteviin kilpailijoihin [8, 34].

Vaatimusprofiilin keräämisen jälkeen kannattaa yleensä listata tieto taulukkomuotoon, jonka jälkeen päästään pohtimaan sitä mikä ominaisuus vastaa vaatimusprofiilissa esitettyä vaatimusta. Erityisesti on muistettava, että osa halutuista ominaisuuksista saattaa olla keskenään hyvinkin suuressa ristiriidassa. Tällöin pitää pystyä priorisoimaan halutut ominaisuudet niiden tärkeyden mukaan. Tämä on yleensä ryhmätyötä, sillä riittävä tietämys materiaaleista, valmistuksesta, suunnittelumetodeista ja markkinoiden tarpeesta on vain harvoin yhden henkilön hallussa.

Kaaviokuvassa 2.1.3.1. esitetään tuotteen suunnitteluprosessin vaiheita yhdistettynä seuraavassa luvussa tarkemmin esiteltyyn materiaalinvalintaprosessiin [33].



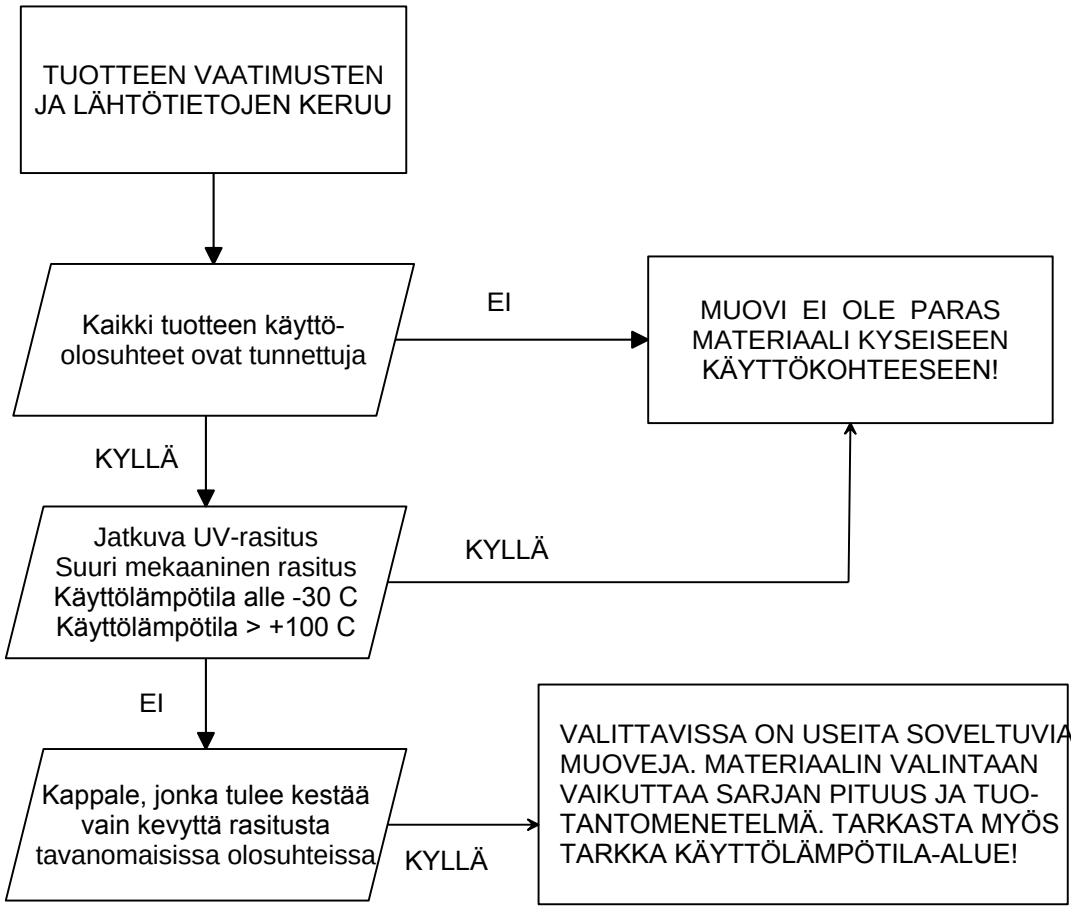
Kaaviokuva 2.1.3.1. Tuotteen suunnitteluprosessin vaiheet yhdistettynä tuotteen materiaalinvalintaprosessiin [33].

2.2. Tuotteen materiaalin valintaprosessi

2.2.1. Yleistä tuotteen materiaalinvalinnasta

Tavallisesti tuotteen suunnitteluprosessin läpiviemiseen on yrityksessä olemassa vakiintunut käytäntö. Useimmiten tähän liittyy myös menetelmä, jolla valitaan materiaali suunniteltavalle tuotteelle. On kuitenkin olemassa suuri vaara, että metallituotteita valmistavan yrityksen suunnittelija pitäytyy metallissa, vaikka aina ei tarvitsisikaan ja muovituoteyrityksen suunnittelija käyttää muovia paikassa, jossa pitäisikin käyttää metallia. Edellisessä tapauksessa tuotteesta saattaa tulla markkinoille liian kallis, jolloin kilpailija vie kaupat edullisemmalla tuotteellaan. Jälkimmäisessä tapauksessa tuotteen kestoikä voi lyhentyä, jolloin materiaalinvalinnalla on ollut tuotteen keston ja siten myös valmistajan imagon kannalta negatiivinen vaikutus.

Mikäli suunnitteluprosessiin ei ole liitetty systemaattista materiaalinvalinnan menetelmää, voidaan sellaisena käyttää esimerkiksi tässä luvussa esiteltyä tapaa. Lyhyesti kuvattuna aluksi selvitetään tuotteen tai sen osan tehtävä, jonka jälkeen voidaan määritellä tuotteelta vaadittavat ominaisuudet. Kun on saatu listaus tuotteen välttämättömistä ja toivotuista ominaisuuksista, voidaan nämä pisteyttää ja siten saadaan numeerinen arvo, jonka perusteella voidaan valita ominaisuuksiin parhaiten soveltuva tai soveltuvat valmistusmateriaalit. Lopullista valmistusmateriaalia ja tuotantomenetelmää valittaessa otetaan huomioon vielä esimerkiksi alihankinnan saatavuus ja valmistussarjan koko. Seuraavalla sivulla olevassa kaaviokuvassa 2.2.1.1. on esitettynä tuotteen valmistusprosessin lähtötietojen keräämiseen ja materiaalivalintaan liittyvät vaiheet [32].



Kaaviokuva 2.2.1.1. Tuotteen lähtötietojen kerääminen ja materiaalivalinta.

2.2.2. Tarkoituksenmukaisen materiaalinvalinnan esteet

Usein kuulee uutta tai uudistettua tuotetta markkinoitaessa sanottavan, että suunnittelussa on lähdetty liikkeelle täysin ”puhtaalta pöydältä”. Tästä lauseesta saa helposti vaikutelman, että uuden tuotteen tai laitteen valmistuksen yhteydessä on mietitty kaikki asiat uudestaan ja tuote on niin materiaalien kuin valmistusmenetelmienkin osalta viimeisintä ja uusinta huippua. Varsin usein tällaisten mainoslauseiden saattelemana tuodaankin markkinoille tuote, joka näyttää täysin uudenlaiselta. Totuus voi kuitenkin olla jotain muuta, sillä perin harvoin uuden tuotteen valmistuksessa päästään tekemään todellista läpimurtoa esimerkiksi tuotteen valmistusajan, valmistuskustannusten tai jonkin muun merkittävän muuttujan suhteen. Tämä johtuu usein siitä, että uuttakin tuotetta tai sen osaa suunniteltaessa suunnittelijan ja valmistajan kädet ovat hyvin sidotut. Vaikka aitoa tahtoa uusimpien menetelmien ja materiaalien käyttöön voisi hyvin olla, tapahtuu käytännössä todella merkittäviä uudistuksia sangen harvoin. Muutamia tällaisia esimerkkejä on kuitenkin löydettävissä: Muovi on tullut varteenotettavaksi materiaaliksi kotitalouksien monenlaisissa keittiövälineissä ja säilytysastioissa. Polyeteenitereftalaatista valmistetut kierrätettävät vesi- ja virvoitusjuomapullot painavat vanhoihin lasipulloihin verrat-

tuna murto-osan. Talotekniikassa muovi on syrjäyttänyt kupari- ja teräsputket monin paikoin selvästi edullisempana vaihtoehtona sekä materiaalin hinnan, että työmaalla tehtävän työvaiheen kustannusten osalta. Vastaavia, joskin hieman hitaamman kehitys-kaaren läpikäyneitä esimerkkejä on paljon ja käytämme niitä sujuvasti joka päivä ajattelematta koko asiaa. Silti moni suunnittelija ja valmistaja kokevat siirtymisen metallisista tuotteista ja tuotteen osista muovisiin erittäin suurena kynnyksenä [32].

Henkisen kynnyksen lisäksi on toki olemassa myös reaalimaailmasta lähtöisin olevia rajoituksia, jotka vaikeuttavat tarkoituksenmukaisimman materiaalin ja tuotantomenetelmän valintaa. Tällaisia konkreettisia rajoituksia asettavat esimerkiksi yrityksen koneja laitekanta sekä tuotantokapasiteetti tai vastaavat asiat toimittajien ja alihankintaverkoston asettamana. Henkisen kynnyksen voi asettaa myös yrityksen oma konservatiivinen johto, joka voi tässä heijastaa myös myynnin tai jopa asiakkaan oikeita tai oletettuja ennakkoluuloja. Hyvin tehokkaan rajoituksen asettaa tuotteen suunnittelijan tietämys ja riittävän syvällinen tuntemus olemassa olevista mahdollisuuksista. Myös tuotannosta voi puuttua tietotaitoa ja uskallusta ottaa käyttöön uutta valmistustekniikkaa. Tuotantoa ollaan valmiita kehittämään ja se koetaan asiana tärkeäksi, mutta siirtyminen johonkin ennakolta tuntemattomaan, vaikkapa uudenlaisten materiaalien käyttöön, asettaa liian suuren haasteen. Tämä viimeisin syy voi olla monissa tapauksissa hyvin todellinen rajoitus, sillä sellainen valmistaja, joka on tehnyt kaiken tai lähes kaiken metallista ei varmastikaan tunne muita materiaaleja yhtä hyvin osatakseen käyttää niitä ilman perusteellista opettelua [31].

Luvussa kaksi lähdetään liikkeelle siitä oletuksesta, että mitään edellä mainittuja tai muitakaan rajoituksia ei ole. Tällöin tuotteen suunnittelussa voidaan lähteä liikkeelle kaikkein järkevimmästä ja tarkoituksenmukaisimmasta päästä joka on tavallisesti käytännössä tuotteen materiaalinvalinta.

2.2.3. Esimerkki uudenlaisesta materiaalinvalinnasta

Osana tutkimustyötä tutustuttiin suomalaiseen valmistavaan yritykseen, joka on kuluneen vuosikymmenen ajan merkittävässä määrin toteuttanut uudenlaista materiaalinvalintaa. Lahdessa toimiva Kemppi Oy on suurehko ja perinteikäs kaarihitsauslaitevalmistaja, jonka tuotteita on myyty kotimaahan ja vientiin jo 1950-luvulta lähtien. Kaarihitsauslaitteiden kehittäminen ja valmistus on viimeisten vuosikymmenten aikana ollutkin Kemppi Oy:n ydinosaamista, jossa se on menestynyt maailmanlaajuisesti. Tällä hetkellä Kempin liikevaihdosta n. 90 % tulee viennistä. [30]

Suunnittelussaan Kemppi Oy on siirtynyt askel kerrallaan paitsi teollisen muotoilun aikakauteen, myös uudenlaiseen materiaaliajatteluun jo vuosituhannen vaihteesta lähtien. Tuotannossa ja tuotteissa tämä on tarkoittanut paitsi uudentyyppistä ja modernia tuotteiden muotoilua, myös uudenlaisten materiaalien ja tuotantomenetelmien vaiheit-

taista käyttöönottoa. Alun perin lähes täysin metallisista materiaaleista valmistettu hitsauskone pitää tänä päivänä sisällään parhaimmillaan kymmeniä muovimateriaaleista mm. ruiskuvalamalla valmistettuja osia, joiden ansiosta Kemppi Oy:n kannettavat laitteet ovat entiseen verrattuna oleellisesti kevyempiä käsitellä ja helpompia kuljettaa. Epäilemättä tämä on merkinnyt myös suurempaa suunnittelun vapautta ja kustannustason kilpailuetua materiaaleissa ja tuotannon alihankinnassa [31].

2.2.4. Materiaalin valintakriteerien muodostaminen

Materiaalien valintakriteerit ovat yleensä osa vakiintuneen yrityksen jokapäiväistä tuotesuunnittelua. Harkittaessa tuotteen valmistusta materiaalista, jonka käyttö ei ole ennestään tunnettua, on syytä pohtia materiaalin valintaa tuotteen tai sen osan toiminnallisista lähtökohdista. Jo vakiintuneella osalla saattaa olla sellaisia toimintoja, joita ei ole aiemmin tarvinnut tunnistaa. Tämän vuoksi ne saattavat tuottaa yllätyksen, jos uudessa tai uudistetussa tuotteessa esimerkiksi materiaalin lujuus- kovuus- tai kitkaominaisuudet muuttuvat olennaisella tavalla. Näin saattaa käydä vaihdettaessa tuote tai sen osa metallimateriaalista toiseksi, esimerkiksi muoviksi tai lujitetuksi muoviksi. Tämän vuoksi asiaa on syytä perusteellisesti selvittää ja pohtia ennen nopeaa siirtymistä uusien materiaalien käyttöön. Seuraavassa on joitakin asioita, jotka kannattaa aluksi selvittää itselleen ennen muutostyöhön ryhtymistä:

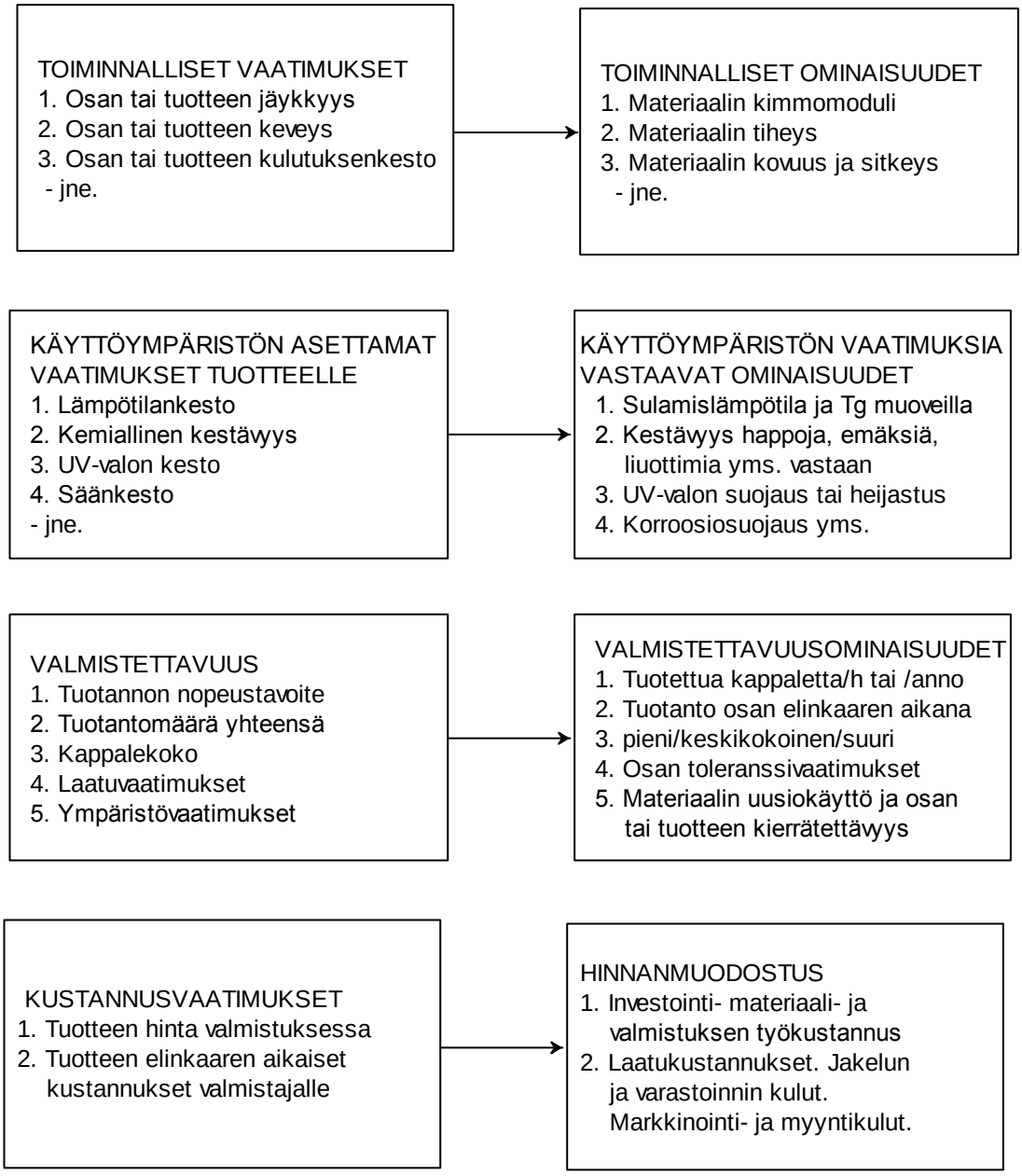
- Etsi tuotteen tai sen osan primäärinen tehtävä ja mahdolliset muut tehtävät ja käyttötarkoitukset. Ulko-oven lukitusmekanismi pitää ensisijaisesti oven kiinni, mutta toimii tarvittaessa myös murtosuojauksena. Tämän johdosta sen valmistaminen muovista ei saa kannatusta muutoin kuin varkaiden keskuudessa. Kevyissä sisäväliovissa muoviset lukitusmekanismin osat voivat sen sijaan hyvinkin olla paikallaan kevyen käyttönsä ja edullisuutensa ansiosta.
- Pohdi tavoite tuotteen optimoinnille. Onko se hinta tai kappaleen massa, halutaanko tuotantonopeuteen selkeää kasvua vai onko kysymyksessä jokin erityisominaisuus, jota ei ole aiemmalla materiaalinvalinnalla voinut saavuttaa. Tällaisia erikoisominaisuuksia voisi olla esimerkiksi antimagneettisuus tai se, että tuote on läpinäkyvä tai vastaavasti läpivärjätty.
- Etsi rajoittavat tekijät. Tämä on erityisen tärkeää vaihdettaessa materiaali toiseksi. Tällaisia rajoittavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi kappaleen lujuusominaisuudet ja korkean tai matalan lämpötilan kesto, vaikka alkuperäiseltä kappaleelta ei näitä ominaisuuksia olisikaan erityisesti vaadittu. Erityisen rajoittava tekijä lähes kaikissa tapauksissa on tuotteen hinta. Koska tämä rajoitus kuitenkin koskee kaikkia valmistajia, se on käännettävissä myös kilpailueduksi.

Kun tuotteen valmistukseen liittyvät kriteerit on valittu, on aika ryhtyä laatimaan tarkempaa sanallista selvitystä siitä, mitä vaatimuksia tuotteelle asetetaan ja minkälaiset ominaisuudet tuotteessa täyttävät nämä asetetut vaatimukset [35].

2.2.5. Tuotteen vaatimus- ja ominaisuusprofiilien laadinta

Tuotteen vaatimusprofiilin selvittäminen tarkoittaa käytännössä vastaamista joukkoon seuraavan kaltaisia kysymyksiä: Minkälaista mekaanista ja fysikaalista rasitusta tuotteelle tulee? Altistuuko tuote happamalle tai emäksiselle ympäristölle? Joutuuko tuote tekemisiin kemiallisten aineiden tai yhdisteiden kanssa? Mikä on tuotteen terminen tai korroosiota edistävä ympäristö? Tarvitseeko tuotteen kestää ulkoilmassa ja jos tarvitsee, riittääkö kotimaan sääolosuhteiden kesto vai käytetäänkö tuotetta myös erityisen kuumassa tai kylmässä ympäristössä? Pulkkaa tai lumilautaa ei tarvitse valmistaa kestämään Afrikan ilmaston erityispiirteitä, mutta köysi tai kuormaliina saattaa tulla käytetyksi missä tahansa aina Alaskan ja Siperian kaltaisista paikoista lähtien Saharan autiomaalle tyypillisiin olosuhteisiin asti [32].

Tuotteen vaatimusprofiilin selvittämisen jälkeen on syytä pohtia, mitkä tuotteen ominaisuudet vastaavat tärkeimpiä tuotteelle asetettuja vaatimuksia. Tällöin yleensä päästään karsimaan ja priorisoimaan kerättyjä vaatimuksia. Ominaisuusprofiilia laadittaessa tulisikin löytää vastaus kysymyksiin mitkä ovat kyseiset ominaisuudet tuotteen valmistuksessa mahdollisesti käytettäville materiaaleille ja mikä on valittujen ominaisuuksien tärkeysjärjestys tuotteen kannalta. Tuotteen suunnittelijan apuna em. priorisoinnissa kannattaa käyttää ainakin sellaisia asiantuntijoita, jotka tuntevat hyvin tarvittavan tuotantotekniikan ja käyttökelpoiset materiaalit. Joissakin tapauksissa myös myynnin ja markkinoinnin mukaan ottaminen voi tuottaa arvokasta lisätietoa, mutta kirjoittajan omien kokemusten mukaan tätä kannattaa aina harkita tapauskohtaisesti ja hyvin tarkkaan. Kaaviokuvassa 2.2.5.1 seuraavalla sivulla on esitetty tämä sama asia luettelolla tuotteen tavanomaisista toiminnallisista vaatimuksista ja niitä vastaavista materiaaliominaisuuksista [32].



Kaaviokuva 2.2.5.1. Vasemmalla puolella tuotteen tavanomaisia materiaalille asetettuja vaatimuksia ja oikealla puolella niitä vastaavia ominaisuuksia [32].

Tapoja karsimiseen ja priorisointiin on monia. Olennaista kuitenkin on, että valitut ominaisuudet vastaavat mahdollisimman hyvin tuotteelle asetettuja vaatimuksia. Materiaalin valintaprosessi kannattaa kehittää omaan tuotteeseen ja tuotantomenetelmiin soveltuvaksi systemaattiseksi tavaksi. Jos tuotteen tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu korkea lämmönkesto, erittäin suuri kitka ja nopea kitkalämmön haihtuminen (kuten olisi jarrulevyn ja jarrupalan muodostamalle parille) on tämä tietenkin otettava huomioon omaa vaatimus-ominaisuuslistausta laadittaessa. Hyvä menetelmä onkin taulukoida ristiin tärkeimmät tuotteelta vaaditut ominaisuudet ja verrata niitä vastaaviin materiaaliominaisuuksiin [32].

3. MUOVIMATERIAALIEN OMINAISUUDET

Materiaalin käyttökohde määrää yleensä ne ominaisuudet, joita suunnittelija edellyttää valmistusmateriaalilta. Yksi menetelmä oikean materiaalin valitsemiseksi sen ominaisuuksien ja käyttökohteen asettamien vaatimusten perusteella esiteltiin edellisessä luvussa. Tässä luvussa keskitytään esittelemään yleisimmin käytettyjen kesto- ja kertamuovimateriaalien tavallisimpia ominaisuuksia, joita suunnittelijan ja valmistajan on hyvä tuntea harkitessaan tuotteelle sopivaa valmistusmateriaalia. Tällaisia yleisiä materiaaliominaisuuksia ovat erilaiset mekaaniseen lujuuteen, lämmönkestoon ja kemialliseen kestävyyteen liittyvät tekijät. Lisäksi tämän luvun taulukoissa otetaan kantaa mm. muovimateriaalien lämpölaajenemiseen, kovuuteen, veden absorptioon ja kestävyyteen auringon ultraviolettisäteilyn vaikutuksia vastaan [32].

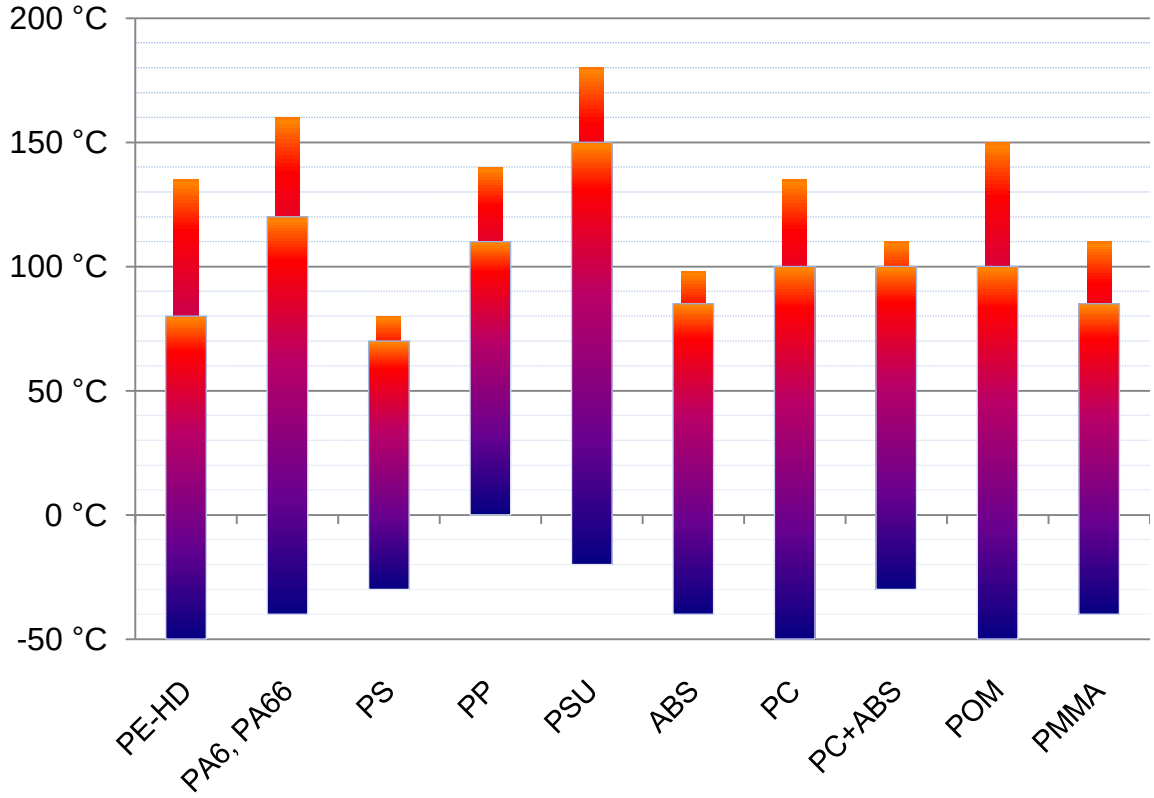
3.1. Muovimateriaalien lämmönkesto

Muovimateriaaleja on useita erilaisia tyyppejä, joista tässä työssä käsitellään lähinnä kolmea erilaista valtatyyppiä: Kiteisiä (jotka käytännössä ovat yleensä aina osakiteisiä) ja amorfisia kestomuoveja sekä ristisilloittuneita kertamuoveja. Lämpötilan nousun yhteydessä kiteisillä kestomuoveilla on selvästi havaittava sulamispiste, jonka yläpuolella muovi on juoksevassa tilassa. Amorfisilla kestomuoveilla ei ole havaittavissa tällaista yhtä selvää sulamispistettä, vaan muovi muuttuu ilman erityistä tarkasti määriteltävää sulamispistettä lämpötilan nousun myötä yhä helpommin juoksevaan muotoon. Kolmas vaihtoehto on ristisilloittuneet kertamuovit, joita ei voi palauttaa lisälämmön avulla takaisin juoksevaan tilaan vaan lämmönnousun ylitettyä kullekin kertamuovituotteelle ominaisen kriittisen rajan tuotteessa käynnistyy terminen hajoamisprosessi. Samankaltainen terminen hajoamisprosessi voi käynnistyä myös molemmilla kestomuovityypeillä, mikäli jo sulatilassa olevan kestomuovimassan lämmitystä jatketaan yli kullekin muovimateriaalille ominaisen kriittisen rajan [36].

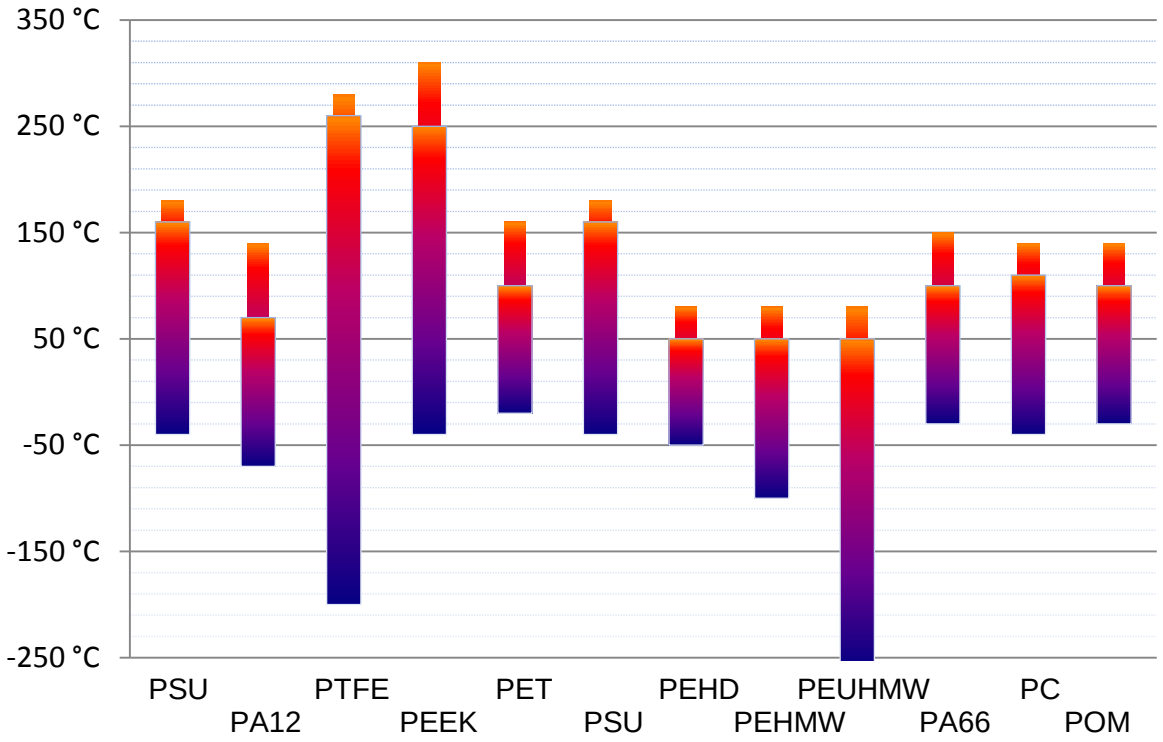
Jo huomattavasti ennen sulamista tai termisen hajoamisprosessin käynnistymistä useimmat kestomuovit menettävät valtaosan lujuudestaan. Tämän vuoksi muovituotteen suunnittelijan tuleekin tuntea tarkasti lämpötila-alue, jolle tuote tai sen osat käytön yhteydessä joutuvat. Tässä työssä on muovien lämpötilankestoa kuvaavissa esityksissä erityisesti kestomuovien yhteydessä annettu tuotteen jatkuva, pitkäaikainen lämmönkesto leveällä tolpalla ja sen jatkeena on kuvattu tuotteen lyhytaikainen lämmönkesto kapeammalla tolpalla.

Lämpötilan laskiessa muovin jähmettymispisteen alapuolelle tulee amorfisilla muoveilla ensimmäiseksi vastaan terminen raja, jota kutsutaan T_g – lämpötilaksi. Kyseinen lämpötila on muovin lasittumislämpötila, jossa amorfinen muovi lakkaa olemasta juoksevassa muodossa ja muuttuu kiinteään muotoon. Osakiteisille muoveille tämä lasittumislämpötila on yleensä vähemmän merkityksellinen, koska muovi kiteytyy tarkan sulamispisteen alapuolella ja saavuttaa näin mekaaniset ominaisuutensa juuri kiteytymisen ansiosta. Tietyillä osakiteisillä muoveilla ei kuitenkaan ko. T_g – lämpötilan alapuolelle pitäisi mennä liian nopeasti muovituotteen valmistuksen yhteydessä, koska kyseisen lämpötilan alapuolella muovi ei enää kiteydy ja siten tuotteen kiderakenteen järjestäytyminen saattaa jäädä vajaaksi. Tämä voi puolestaan johtaa myöhemmin tuotteen dimensioiden muuttumiseen, mikäli lämpötila esimerkiksi tuotteen varastoinnin tai käytön yhteydessä nousee jälleen tuon T_g – rajan yläpuolelle [36].

Kuvissa 3.1.1 ja 3.1.2. on esitetty tavallisimpien ja joidenkin erikoismuovimateriaalien lämmönkestoa. Leveän tolpan alue kuvaa muovin pitkäaikaista ja kapean tolpan alue muovin lyhytaikaista lämmönkestoa. Samoissa kuvissa esitetty alarajan lämpötila kuvaa sitä lämpötilaa, jonka alapuolella muovin lujuusominaisuudet laskevat voimakkaasti. Tämän rajan alapuolella muovia ei tule rasittaa lainkaan mekaanisesti. Sen käyttö on kuitenkin mahdollista tuon alimmankin lämpötilarajan alapuolella sellaisissa tapauksissa, joissa materiaalia kuormitetaan joko erittäin kevyesti tai se toimii tuotteen sellaisena osana, jolle ei tule lainkaan kuormitusta.



Kuva 3.1.1. Valtamuovien käyttölämpötila-alueita [5].

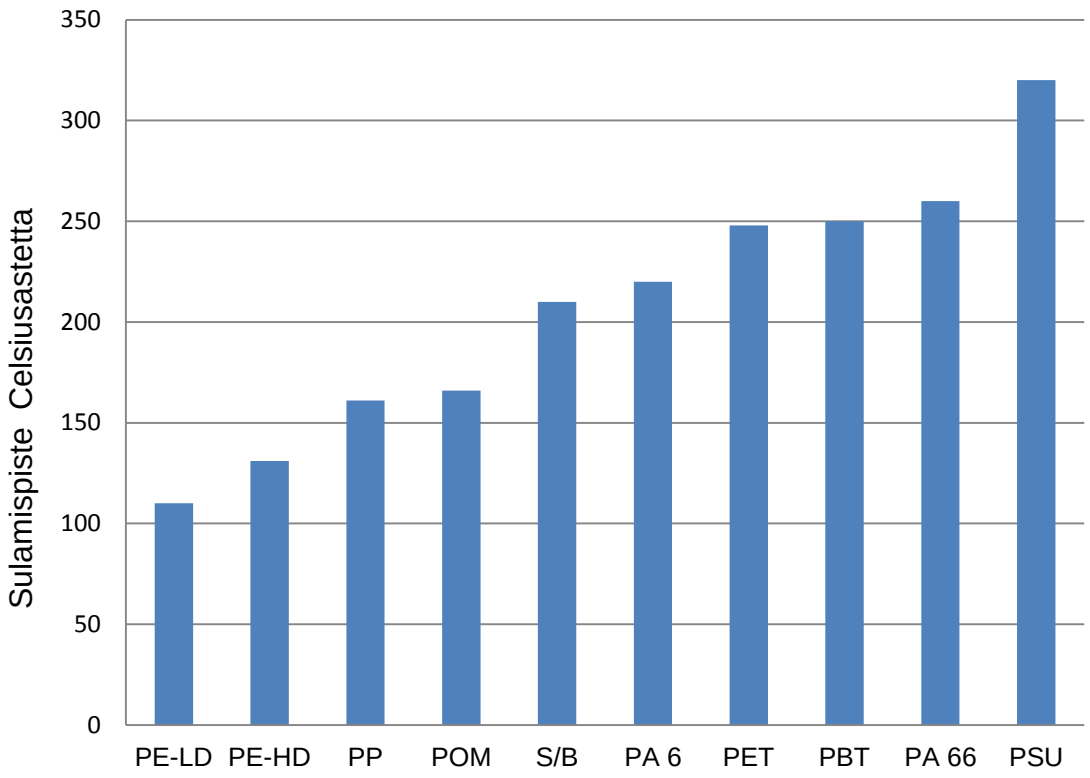


Kuva 3.1.2. Valta- ja erikoismuovien käyttölämpötila-alueita [5].

Suunnittelija, joka on tottunut huolettomaan metallimateriaalien käyttöön korkeissakin lämpötiloissa, joutuu usein pohtimaan tuotteen käyttölämpötilaa huomattavasti huolellisemmin muovimateriaalien kohdalla. Monien muovimateriaalien lujuusominaisuudet nimittäin heikkenevät huomattavasti jo melko alhaisissa lämpötiloissa [5].

Osakiteisillä muoveilla taulukon antamien maksimiarvojen hetkellinen ylitys ei kevyesti tai ei lainkaan kuormitetuissa tapauksissa välttämättä heti johda suuriin ongelmiin, mutta amorfisilla muoveilla kannattaa ehdottomasti pitäytyä ko. kuvien 3.1.1 ja 3.1.2. antamissa maksimiarvoissa. Huomattavaa lisäksi on, että kaiken tyyppisillä muoveilla kuormituskestävyyttä vaativien kohteiden lisäksi myös kulutuskovuutta vaativissa ja pistekuormituksen alaisissa kohteissa kannattaa ehdottomasti pysyä annettujen lämpötilarajojen alapuolella [5].

Kuvassa 3.1.3 on esitetty erikseen osakiteisten muovien sulamispisteitä. Kuten jo edellä todettiin, on osakiteisillä kestomuoveilla sulamispiste yleensä hyvin tarkka, kun sitä vastoin amorfisille kestomuoveille vastaavan tarkan rajan esittäminen on mahdotonta muovin vähittäisestä pehmenemisestä johtuen [5] [36].

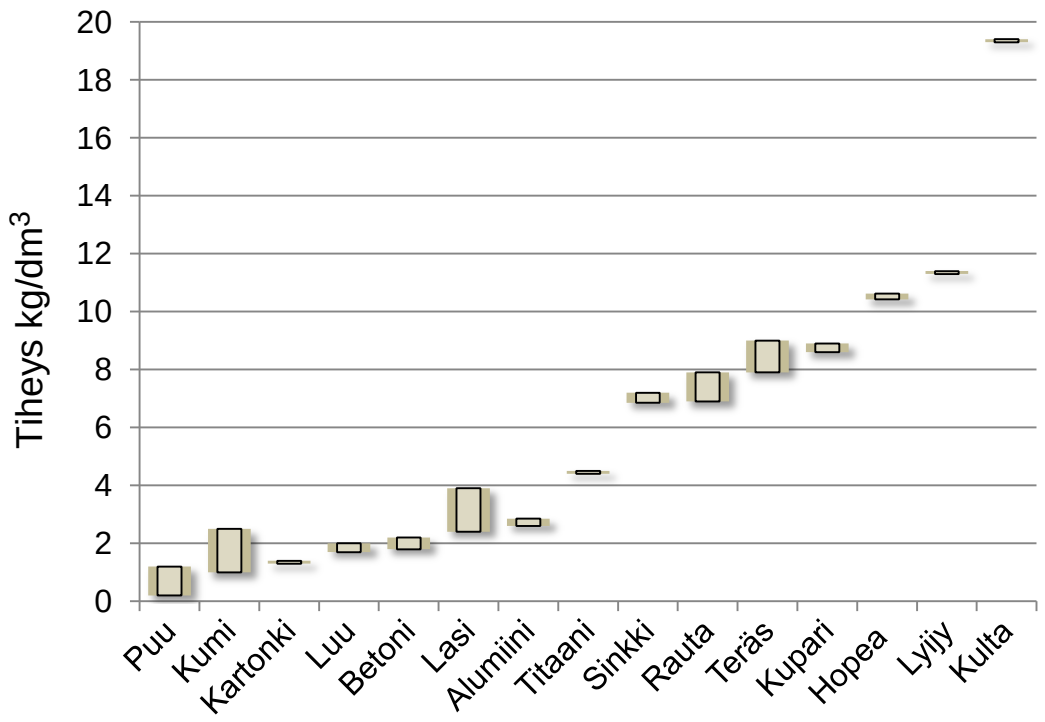


Kuva 3.1.3. Osakiteisten valtamuovien sulamislämpötiloja [5].

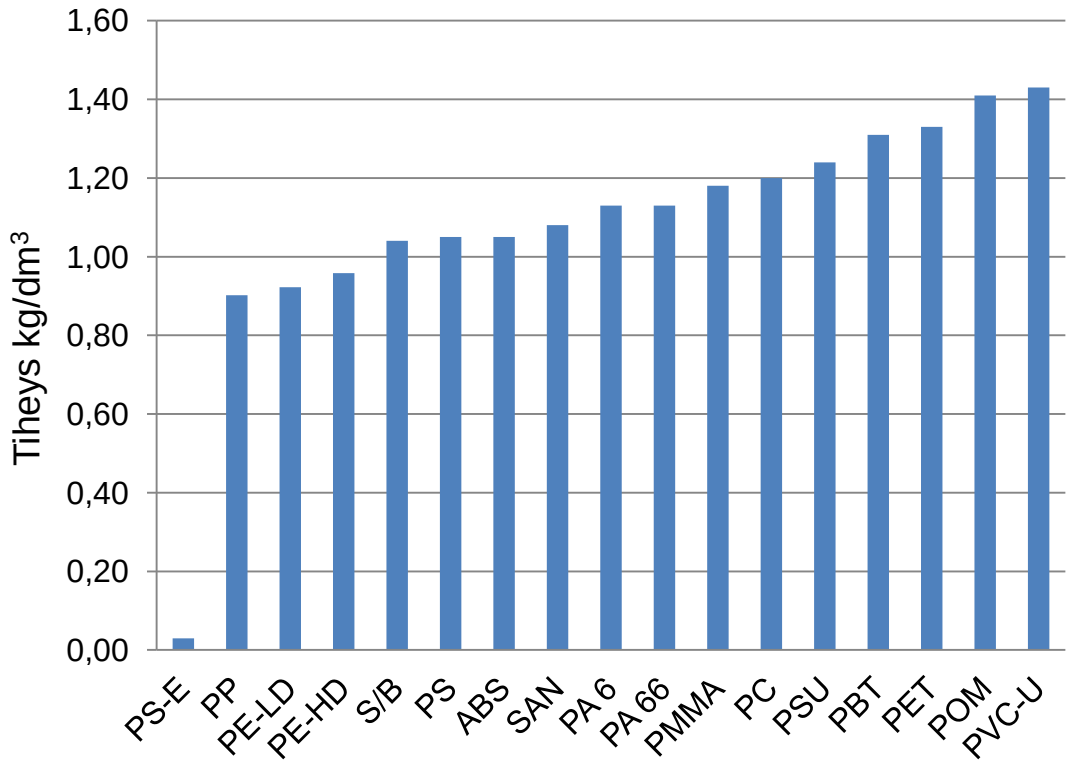
3.2. Muovimateriaalien tiheys

Tuotteen keveys on ominaisuus, joka tavallisesti helpottaa tuotteen käsittelyä ja vähentää energiankulutusta sekä tuotteen jakelussa että sen käytössä. Materiaalin edullisuuden lisäksi keveys onkin ollut hyvin merkittävä ominaisuus kun monissa tapauksissa on siirrytty metallimateriaaleista joko muovi- tai komposiittimateriaaleihin ja – rakenteisiin kokonaisissa tuotteissa tai tuotteiden kokoonpano-osissa.

Kuvassa 3.2.1. on aluksi esitetty yleisesti käytössä olevien materiaalien tiheyksiä. Kun verrataan kuvassa 3.2.1. esitettyä suurta materiaalien tiheyden vaihtelua kuvan 3.2.2. vastaavaan muovimateriaalien tiheyksien vaihteluun, voidaan todeta tavallisten muovimateriaalien tiheyden vaihteluvälin olevan hyvin pieni. Nyrkkisääntönä onkin helppo muistaa, että lähes kaikkien tavallisten muovimateriaalien massa kuutiodesimetriä kohden on yhden kilogramman molemmin puolin. Kuvassa 3.2.2 ainoan selvän poikkeuksen tähän tekee PS-E. Se on yleisesti pakkausmateriaalina ja rakennusteollisuudessa lämmöneristeenä käytetty polystyreenin solustettu muoto, jota usein kutsutaan sen kauppanimellä styroksi. Tuotetta valmistetaan hieman eri käyttötarkoituksiin useina eri kantavuusluokkina, jolloin sen tiheyskin vaihtelee jonkin verran. Taulukoitu arvo 0,03g/cm^3 on lämmöneristeenä käytettävän PS-E:n yhden kauppalaadun tyypillinen massa [13].



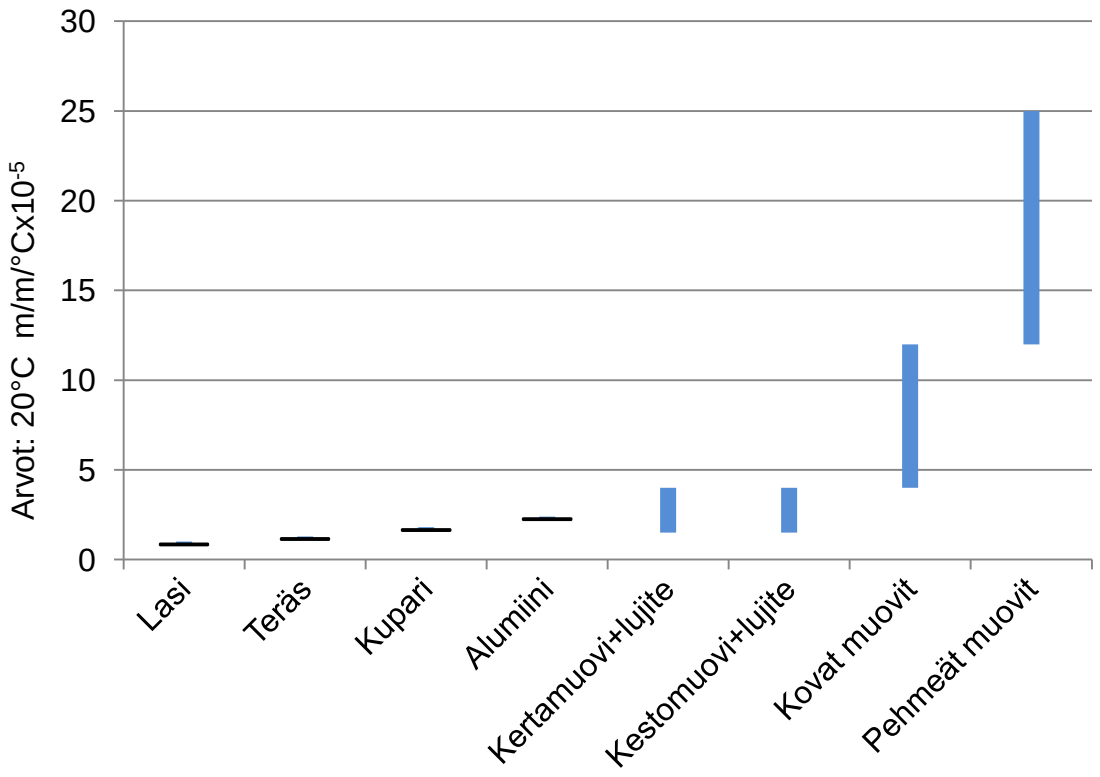
Kuva 3.2.1. Yleisesti käytettyjen materiaalien tiheyksiä [7] [17].



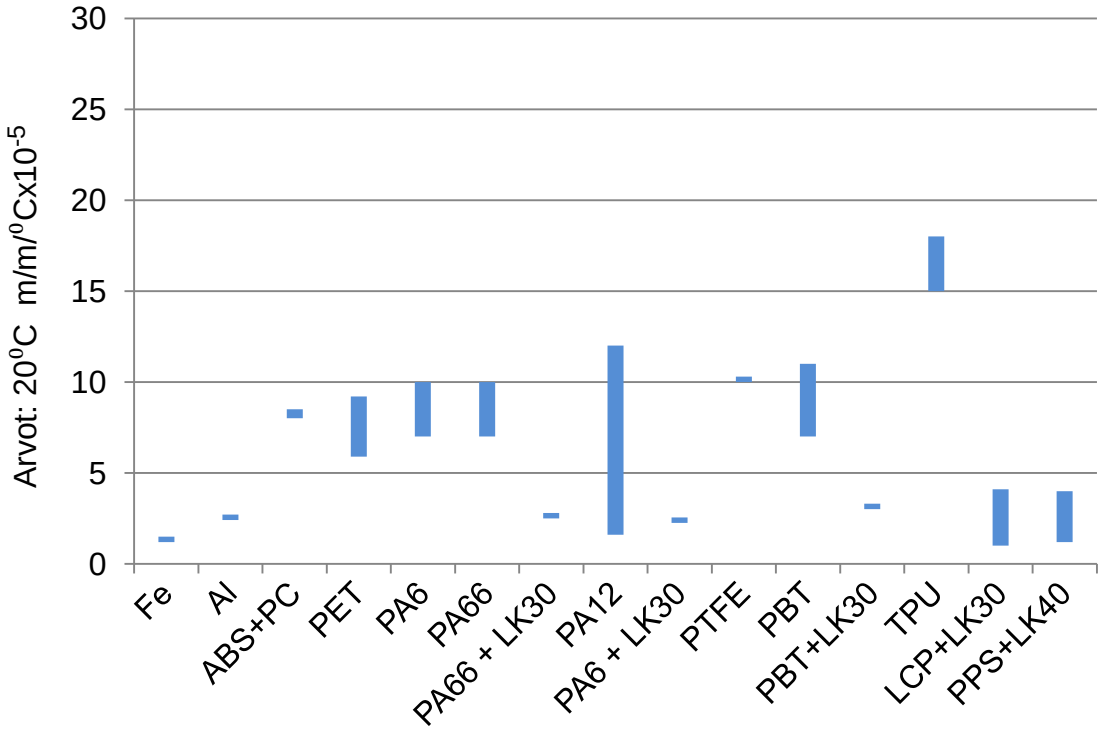
Kuva 3.2.2. Yleisesti käytettyjen muovien tiheyksiä [9] [13].

3.3. Muovimateriaalien lämpölaajenemiskerroin

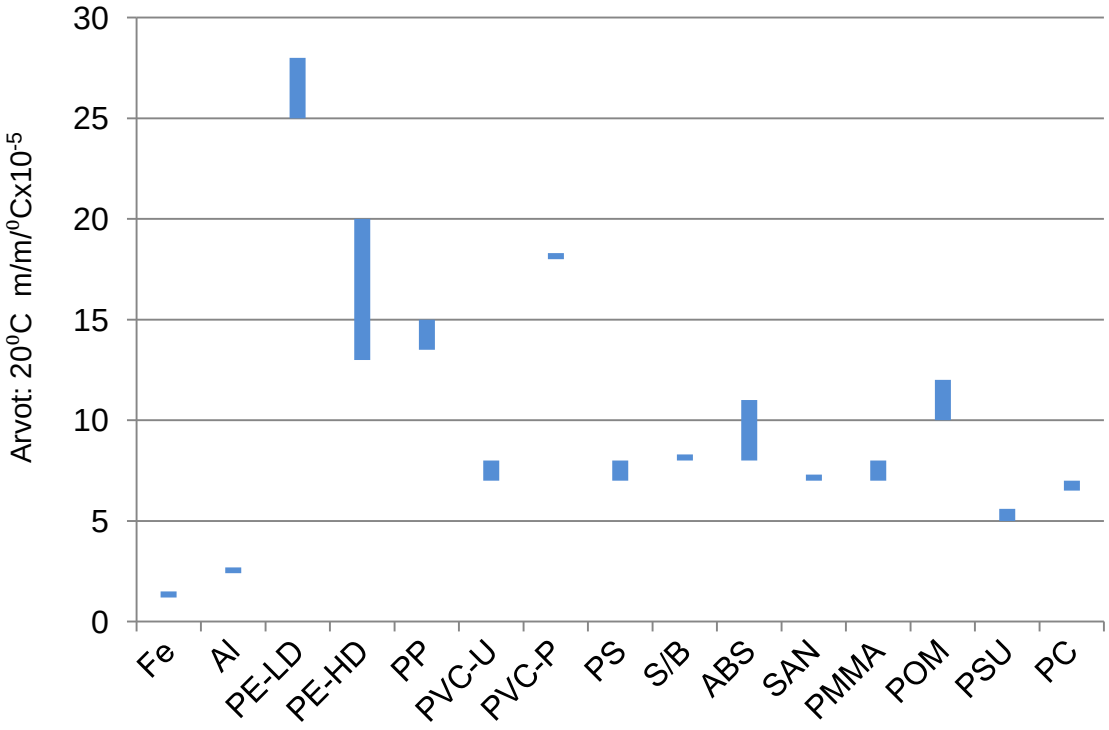
Seuraava suunnittelijaa kiinnostava materiaalin fysikaalinen perusominaisuus on sen lämpölaajenemiskerroin, joka joidenkin muovien kohdalla vaihtelevissa käyttölämpötiloissa voi aiheuttaa valmiiseen tuotteeseen yllättävänkin suuria mittamuutoksia. Tämän johdosta on hyvin tärkeää selvittää jo suunnitteluvaiheessa laitteen tai sen osan mahdollinen ja todennäköinen terminen käyttöympäristö ja ottaa se huomioon konstruktiossa käytettävän muovimateriaalin valinnassa. Kuvassa 3.3.1. esitetään aluksi tavallisimpien konstruktiomateriaalien yleisiä lämpölaajenemiskertoimia toisiinsa vertaillen ja sen jälkeen tarkemmin yleisten muovimateriaalien lämpölaajenemiskertoimia taulukoissa 3.3.2. ja 3.3.3. Selvyyden vuoksi molemmissa jälkimmäisissä taulukoissa on vasemmassa laidassa tavallinen lämpölaajenemiskerroin rakenneteräkselle ja alumiinille. Kuten taulukoista voidaan havaita, monen muovimateriaalin kohdalla lämpölaajenemiskertoimen vaihtelualue voi olla erittäin suuri. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kyseisestä muovimateriaalista on usein saatavissa myös sellaisia laatuja, joilla lämpölaajenemiskerroin on lähempänä pylvään alalaitaa. Mikäli lämpölaajenemiskerroin on tuotteen toiminnan kannalta merkittävä asia ja jostain syystä valinta osuu esimerkiksi kuvassa 3.3.2. esitettyyn PA 12:een, kannattaa toimittajilta kysyä laatua, jolla ko. kerroin on mahdollisimman matala [8].



Kuva 3.3.1. Yleisten konstruktiomateriaalien lämpölaajenemiskertoimia [8].



Kuva 3.3.2. Yleisten muovien ja metallien lämpölaajenemiskertoimien vertailu [13][5].

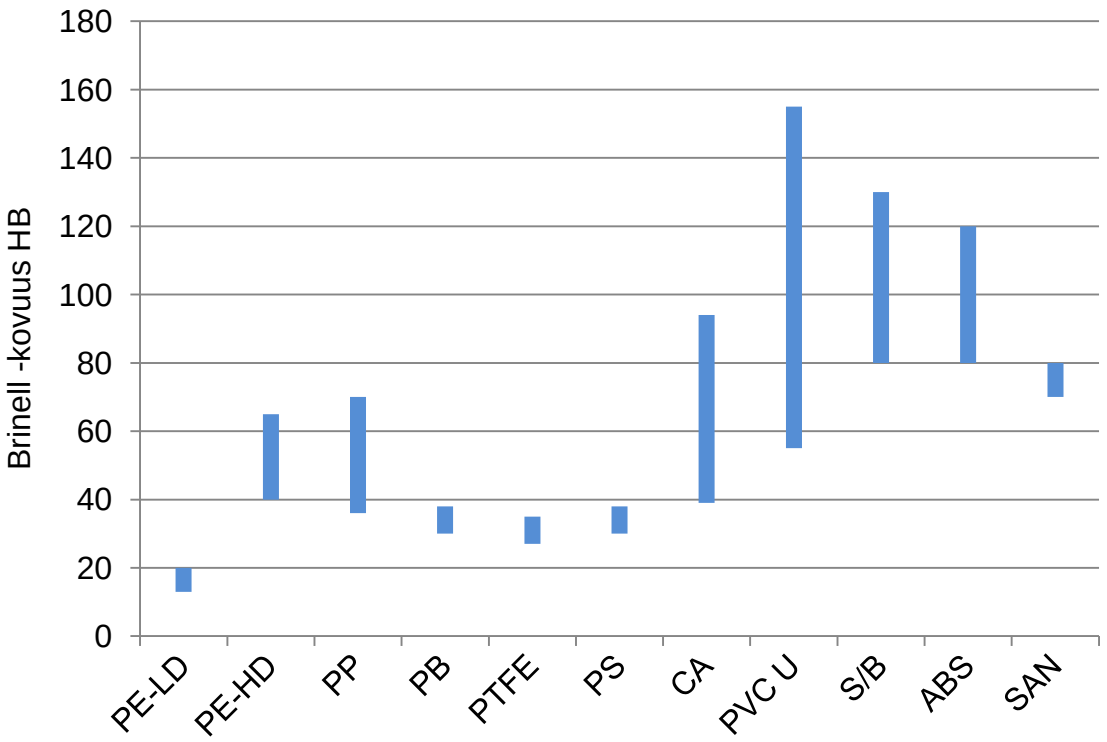


Kuva 3.3.3. Yleisten muovien ja metallien lämpölaajenemiskertoimien vertailua [13][5].

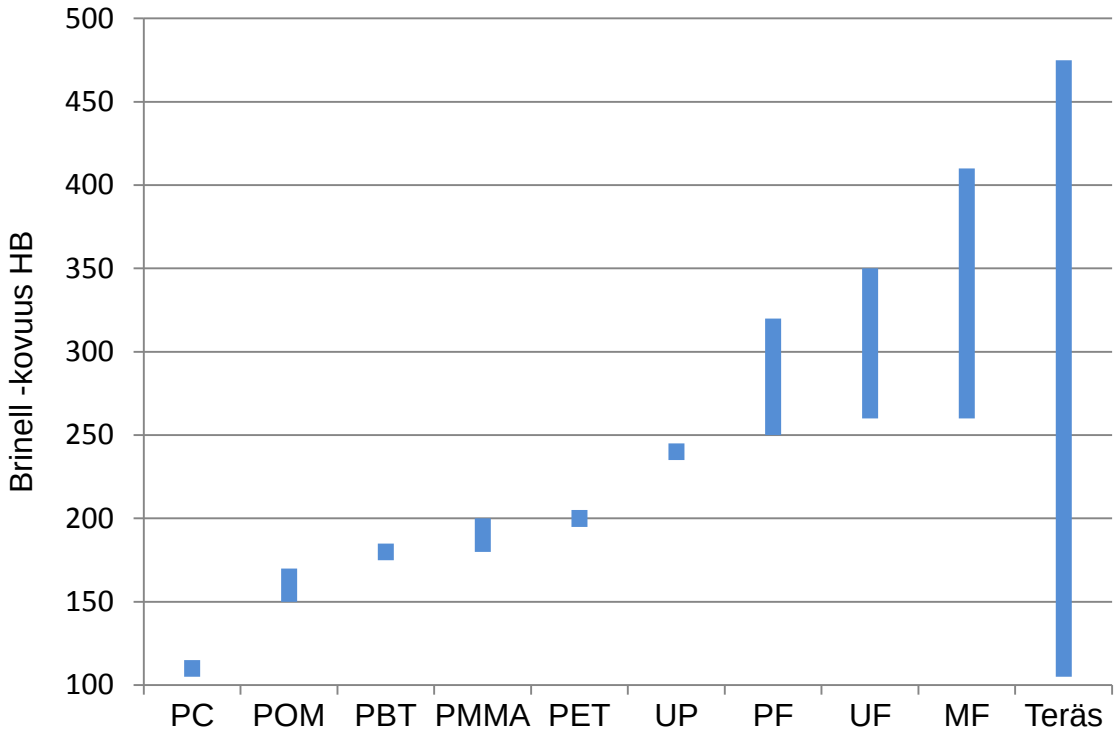
Kuvasta 3.3.2. voidaan havaita, että muovin lujittamisella on sen lämpölaajenemiskertoimeen yleensä huomattava vaikutus. Joidenkin lujitettujen muovimateriaalien lämpölaajenemiskertoimet ovat hyvin lähellä teräksen ja alumiinin vastaavia kertoimia. Kirjallisuudesta löytyi lisäksi tieto, jonka mukaan muovien lämpölaajenemiskertoimella ja kimmomodulilla on keskenään yhteys. Sen mukaan muovi on yleensä sitä jäykempää mitä pienempi lämpölaajenemiskerroin sillä on [19].

3.4. Muovimateriaalien kovuus

Materiaalien pinnan kovuus vaikuttaa sen kestävyyteen vastustaa muodonmuutosta ja suojata materiaalia hankaavaa ja naarmuttavaa kulutusta vastaan. Monilla materiaaleilla kovuus ja lujuus ovat siinä määrin suhteessa toisiinsa, että kovuuden perusteella voidaan arvioida myös niiden lujuutta. Muovimateriaaleilla ei voi kuitenkaan vetää aivan näin suoraviivaista johtopäätöstä kovuuden ja lujuuden keskinäisestä kausaliteetista. Syy tähän löytyy muovien viskoelastisesta luonteesta, joka tietynsuuruisen voiman ylittävällä kuormituksella antaa ajan myötä periksi melko nopeasti. Viskoelastinen muovimateriaali ikään kuin väistyy pois jatkuvan pistemäisen kuorman alta. Metallimateriaalien yhteydessä tämä ilmiö on myös tavallinen niiden käyttölämpötilan ylälaidalla ja siitä käytetään nimitystä viruminen [10].



Kuva 3.4.1. Muovimateriaalien kovuuksia Brinell – kovuusasteikolla [7].



Kuva 3.4.2. Muovimateriaalien Brinell – kovuuksien vertailua teräkseen [7] [11].

Kuvissa 3.4.1. ja 3.4.2 esitetään muovimateriaalien kovuuksia Brinellin (HB) kovuusasteikolla mitattuna. Muovimateriaaleille mitattuja kovuuksia voidaan ilmoittaa myös esimerkiksi Shore- tai Rockwell – asteikoilla [10]. Jälkimmäisessä kuvassa 3.4.2 on esitetty myös vertailun vuoksi teräksen vastaava Brinell - kovuus. Sen vaihteluväli on hyvin suuri, sillä teräksen kovuus on yhteydessä sen seosaineisiin ja sille tehtyihin lämpökäsittelyihin. Lisäksi todettakoon, että teräksen kovuus oheisessa kuvassa Brinell - asteikon ylälaidassa on laskennallinen. Brinell - kovuuden mittaustapa on sen tyyppinen, että sillä ei kyetä teräksestä mittaamaan taulukon ylälaidan kovuuksia [11].

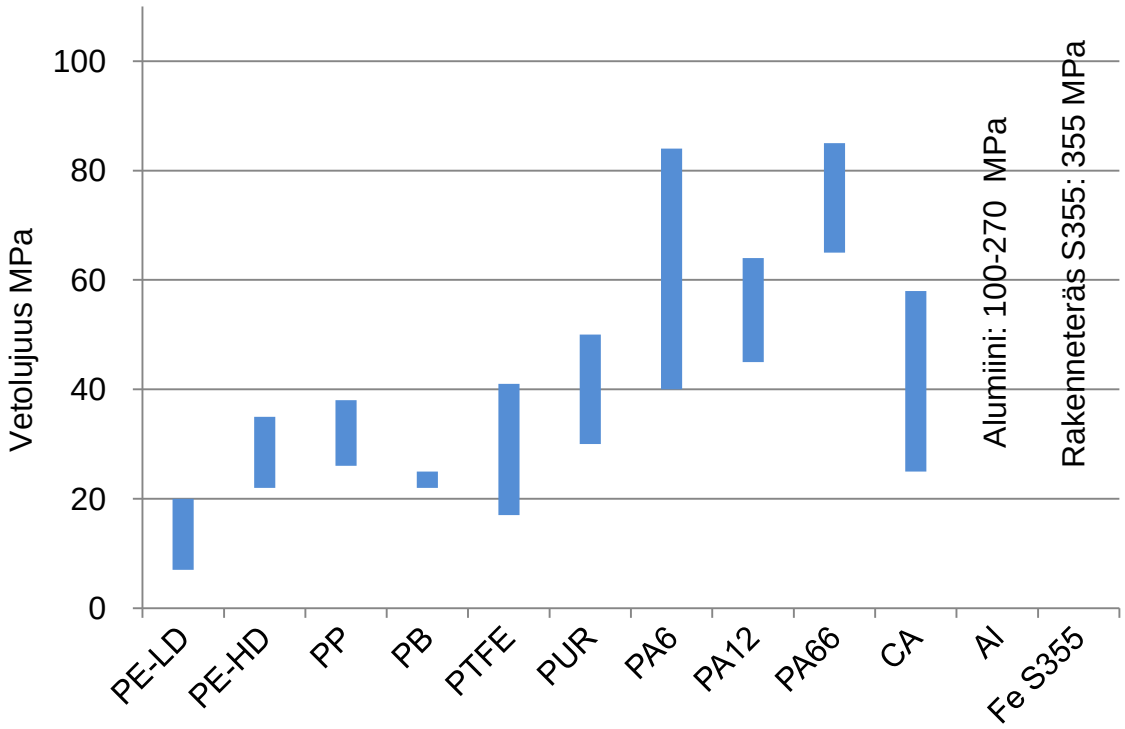
3.5. Muovien lujuus

Kun mistä tahansa materiaalista valmistettua kappaletta kuormitetaan niin suurella ulkoisella voimalla, etteivät tuon materiaalin sisäiset voimat riitä vastustamaan kyseistä ulkoista voimaa, sitkeästä materiaalista valmistettu kappale kokee aluksi muodonmuutoksen ja voiman vaikutuksen jatkuessa se ennen pitkää murtuu. Hauraasta ja lujasta materiaalista valmistettu kappale vastustaa aluksi tuota muodonmuutosta näennäisesti paremmin, mutta voiman vaikutuksen jatkuessa ja edelleen kasvaessa se murtuu sitäkin yllättävämmällä tavalla. Tämän määritelmän mukaisesti kappaleen lujuus tarkoittaa sen jännityksen suuruutta, jolla kappale murtuu [4].

Materiaalien lujuutta ilmaistaan yleensä määrittämällä sen vetolujuuden, kimmomodulin ja myötö- ja murtojännityksen arvot. Nämä määritetään tavallisimmin vetokokeella, jota käytetään rutiininomaisesti materiaalien lujuuden ja lujuuslaskelmia varten tarvittavien lujuusarvojen määrittämisessä. Lisäksi erityisesti muovimateriaaleilla tulee usein kysymykseen myös vetovirumiskertoimen määrittely, josta tarkemmin kappaleessa 3.5.4. [12].

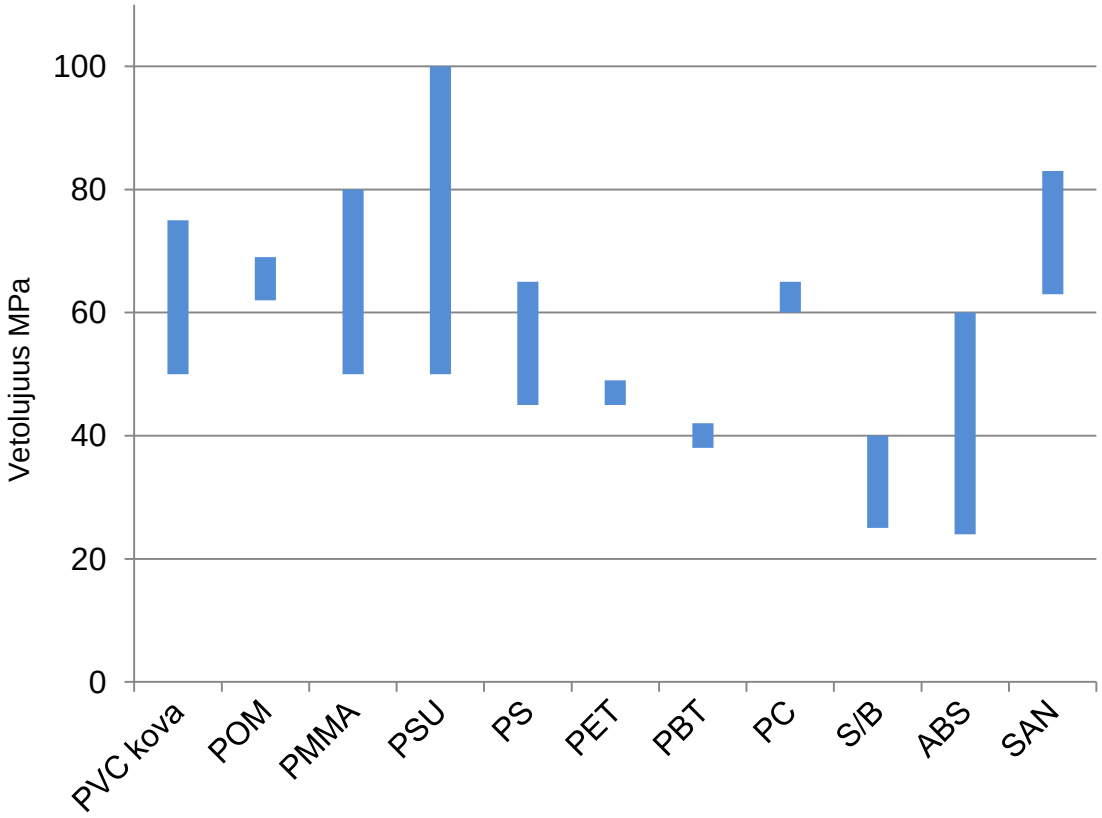
3.5.1. Muovien vetolujuus

Muovien vetokoe tehdään standardien SFS-EN ISO 527-1 ja -2 mukaisesti ja sen tarkoitus on selvittää muovin kestämä maksimivetojännitys. Testissä venytetään koekappaletta pääakselin suunnassa vakionopeudella kunnes koekappale joko murtuu tai jännitys tai venymä saavuttaa ennalta määrätyn arvon. Kokeen aikana mitataan koekappaleeseen vaikuttava kuormitus ja koekappaleen venymä [9]. Testi on siis hyvin samankaltainen muiden vastaavien vetotestien kanssa. Testitulosta arvioitaessa tulee muovien tapauksessa aina pitää mielessä niiden viskoelastinen luonne. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että vetokokeen antamaa arvoa pienemmälläkin voimalla muovi muuttaa muotoaan, jos rasittava voima vain on riittävän suuri ja vaikuttaa riittävän pitkään. Suunnittelijan tuleekin tiedostaa tämä ja välttää rakenteita, joissa lujittamaton kestomuovi on jatkuvan veto-, puristus- tai taivuttavan kuormituksen alaisena [8].



Kuva 3.5.1.1. Yleisimpien materiaalien vetolujuus/MPa. Muovien vertailu alumiinin ja rakenneteräs S355:n arvoihin [9] [11].

Edeltävän sivun kuvassa 3.5.1.1. ja tällä sivulla olevassa kuvassa 3.5.1.2. on esitettynä yleisimpien muovien vetolujuuksia megapascaleina. Vertailun vuoksi edellisen sivun kuvaan on lisätty yleisinä konstruktiomateriaaleina käytettyjen alumiinin vetolujuuden vaihteluväli ja normaalin rakenneteräs S355:n vetolujuuden arvo.

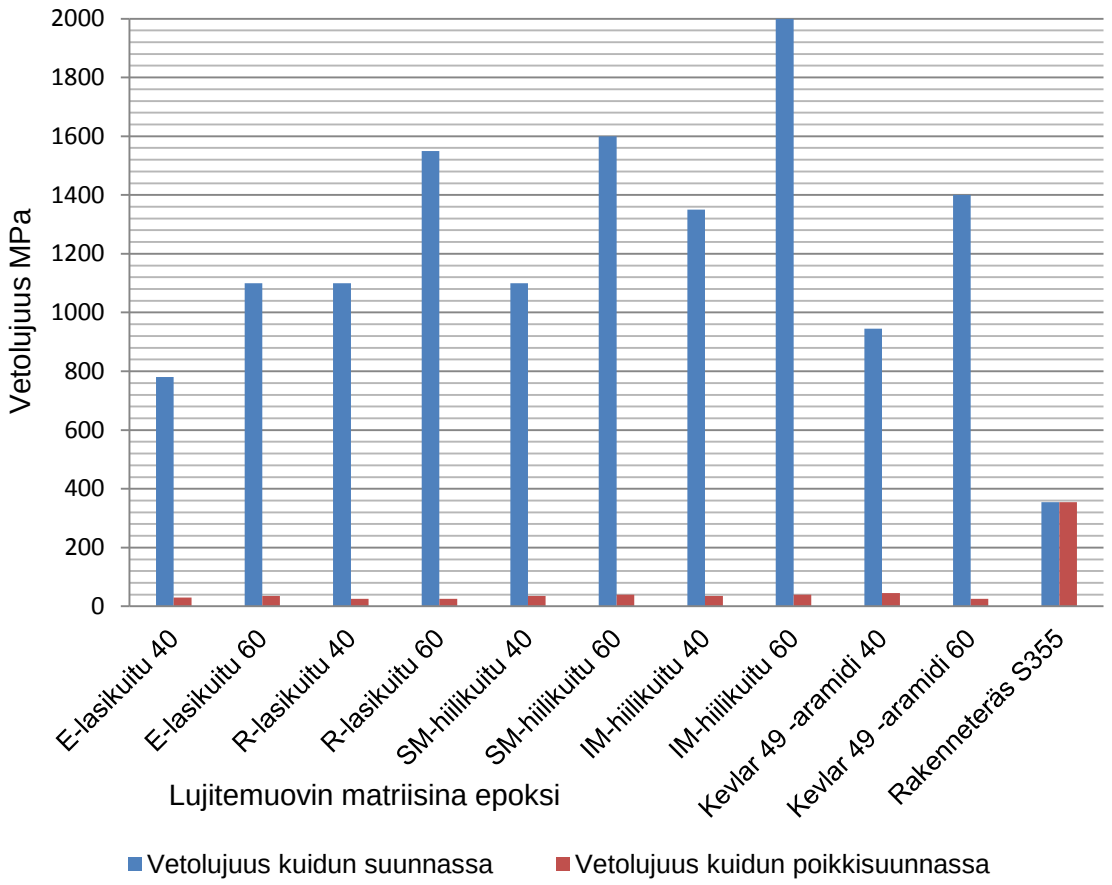


Kuva 3.5.1.2. Lisää yleisimpien muovien vetolujuuksia asteikolla MPa (N/mm^2) [9].

Muovien vetolujuus tai taivutusjäykkyys eivät vertailussa pärjää tavallisimmille metallisille konstruktiomateriaaleille teräkselle ja alumiinille. Lujuuksia numeerisesti vertailtaessa saattaa näyttää aivan samalta kuin jos juoksukilpailussa olisi laitettu pikajuoksija kilpikonnan kanssa samalle lähtöviivalle. Tässä kohtaa on kuitenkin syytä muistuttaa, että monissa käyttökohteissa tuotteen tai sen osan olennaisin ominaisuus ei ole aina mahdollisimman suuri lujuus. On olemassa paljon käyttökohteita, joissa suurella lujuudella on hyvin vähäinen merkitys ja joihin muovista tehty tuote tai tuotteen osa soveltuu aivan yhtä hyvin ja esimerkiksi valmistuskustannuksiensa osalta selvästi paremmin kuin vastaava metallimateriaalista tehty tuote tai sen osa [32].

Koska muovista kuitenkin usein halutaan sen helpon valmistettavuuden vuoksi tehdä myös mekaanista rasitusta kestäviä tuotteita tai niiden osia, on syytä tutkia vielä lujitet-

tujen muovien vastaavia lujuusominaisuuksia. Lujitettuina sopivalla kuitumateriaalilla päästäänkin muoveilla selvästi parempiin tuloksiin lujuuden suhteen. Kuitenkin lujitettujen muovien suhteen on esitettävä erityinen varoitus: Lujitetut muovit eivät aina ole yhtä lujia kaikissa kuormitussuunnissa. Kuvassa 3.5.1.3. lujitetun epoksin vetolujuuksia on esimerkin avulla havainnollistettu tämä ero. Siinä on esitetty lujuuksia, joita lujitekuidut aikaansaavat epoksimatriisissa kahdessa suunnassa: kuitusuunnassa ja kuitujen suuntaan nähden poikkisuunnassa. Kuva 3.5.1.3. visualisoi hyvin yksikerroksisen ja yhdensuuntaisen laminaatin lujuutta. Käytännössä yhdensuuntaisia lujitekuituja lisätään matriisina toimivaan hartsiin useita erisuuntaisia kerroksia tai voidaan käyttää valmista kudosta, jossa kuitusuuntia on kaksi tai useampia. Tässäkin tapauksessa niiden lujittava vaikutus ei ole sama mielivaltaisesti kuormittavan rasituksen kaikissa mahdollisissa suunnissa eikä sitä myöskään voida arvioida samaksi, kuin mikä olisi kaikkien kuitusuuntien yhteenlaskettu vaikutus. Tämän tyyppisen tiedon tarvitsijalle suosittelenkin esimerkiksi kirjaa ”Komposiittirakenteet” [24]. Kyseisessä kirjassa tätä aihepiiriä on käsitelty hyvin tarkasti. Kirjassa on myös esitelty laskennallisia menetelmiä, joilla kuitulujitettujen rakenteiden lujuutta voidaan arvioida tarkemmin kuin mikä on mahdollista tämän yleisemmän esittelyn puitteissa [24].

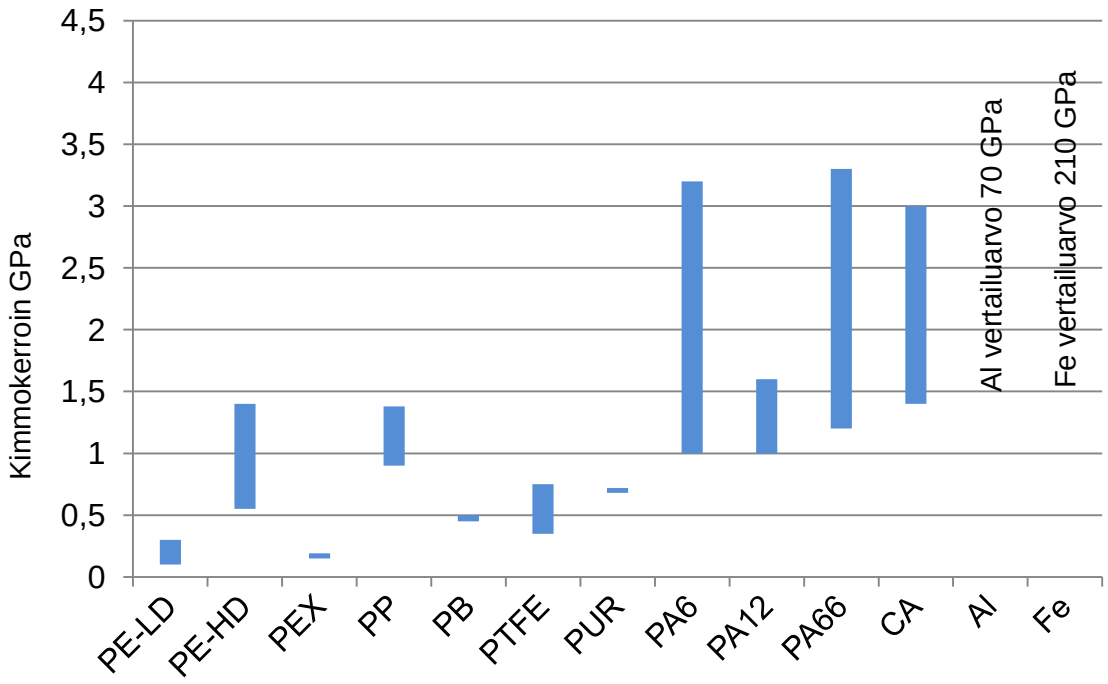


Kuva 3.5.1.3. Eri tavoin lujitetun epoksin ja teräksen vetolujuuksien vertailua [14].

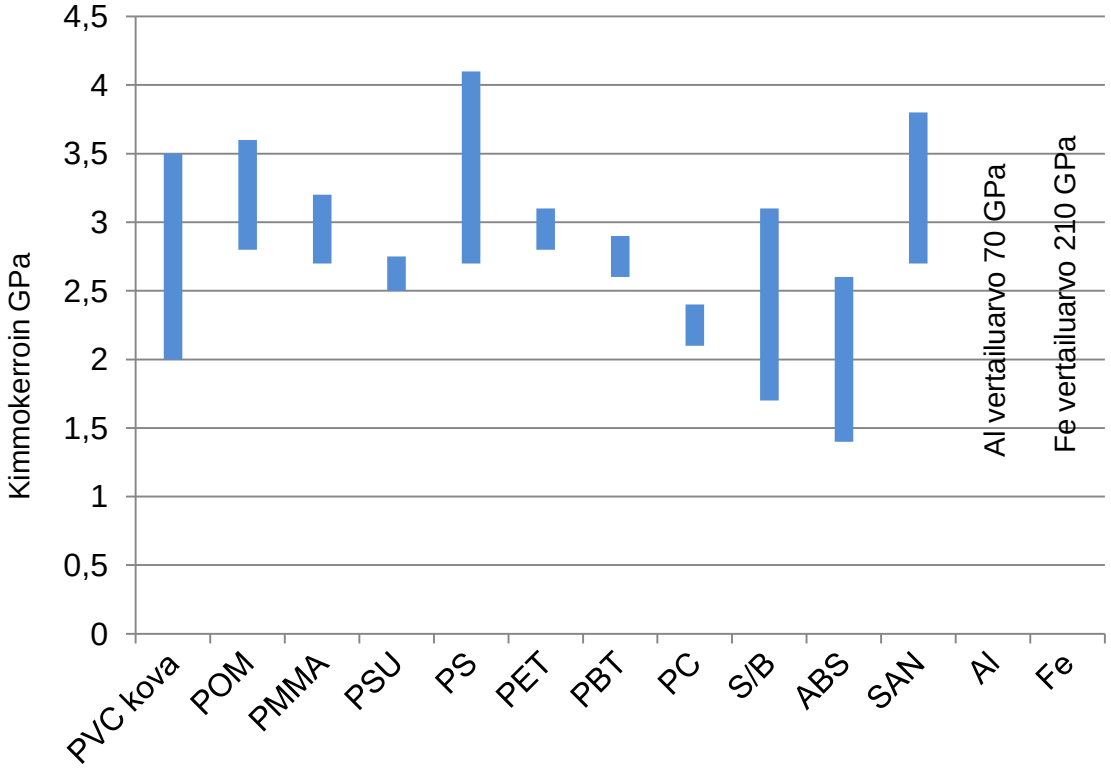
3.5.2. Muovien kimmomoduli

Kimmomoduli on eräs tärkeimpiä kappaleen lujuutta kuvaavia suureita. Siitä käytetään hyvin yleisesti myös nimityksiä vetomodu(u)li, kimmokerroin tai Youngin moduli. Kappaleen kimmoisuudella ymmärretään sen ominaisuutta palata takaisin entiseen muotoonsa, kun ulkoisten voimien vaikutus poistetaan [4]. Tätä kaikista materiaaleista valmistetuille kappaleille yhteistä ominaisuutta nimitetään kappaleen tai materiaalin jäykkyydeksi. Muovien kimmomoduli tutkitaan standardien SFS-EN ISO 527-1 ja -2 mukaisesti vetokokeella. Mitattaessa haetaan raja, jolla kappale ei enää palaa takaisin alkuperäisiin mittoihinsa vaan voidaan sanoa, että kappale alkaa myöntyä ja haurailla materiaaleilla kappale tavallisesti myös murtuu. Kokeen aikana mitataan koekappaleeseen aiheutettu kuormitus ja sen aikaansaama venymä [3].

Kuvissa 3.5.2.1. ja 3.5.2.2. on vertailtu yleisimpien muovien kimmokertoimien arvoja gigapascaleina GPa (= kN/mm^2). Vertailuarvoiksi taulukoiden oikeaan laitaan on merkitty alumiinin ja yleisen rakenneteräksen S355:n vastaavat arvot. Mikäli alumiinin ja teräksen arvot piirrettäisiin samaan asteikkoon vaikkapa ensimmäisessä kuvassa esitetyn PA 6 arvojen kanssa, olisi alumiinin tolppa sitä runsaat 20 kertaa ja teräksen tolppa n. 60 kertaa korkeampi. Kuten kuvista voidaan todeta, on muovimateriaalien kimmomoduli metallimateriaaleihin verrattuna varsin matala. Monessa tapauksessa metallimateriaali onkin käyttötarkoitukseensa moninkertaisesti ylimitoitettuja. Muoviämpärin sanka kestää hyvin tarvittavat 10 kilogrammaa ja kuten jo aiemmin yleisellä tasolla todettiin, toimii tuote tai laitteen osa varsin usein käytännössä sellaisessa paikassa, jossa siihen kohdistuu joko hyvin vähän tai ei lainkaan mekaanista rasitusta.



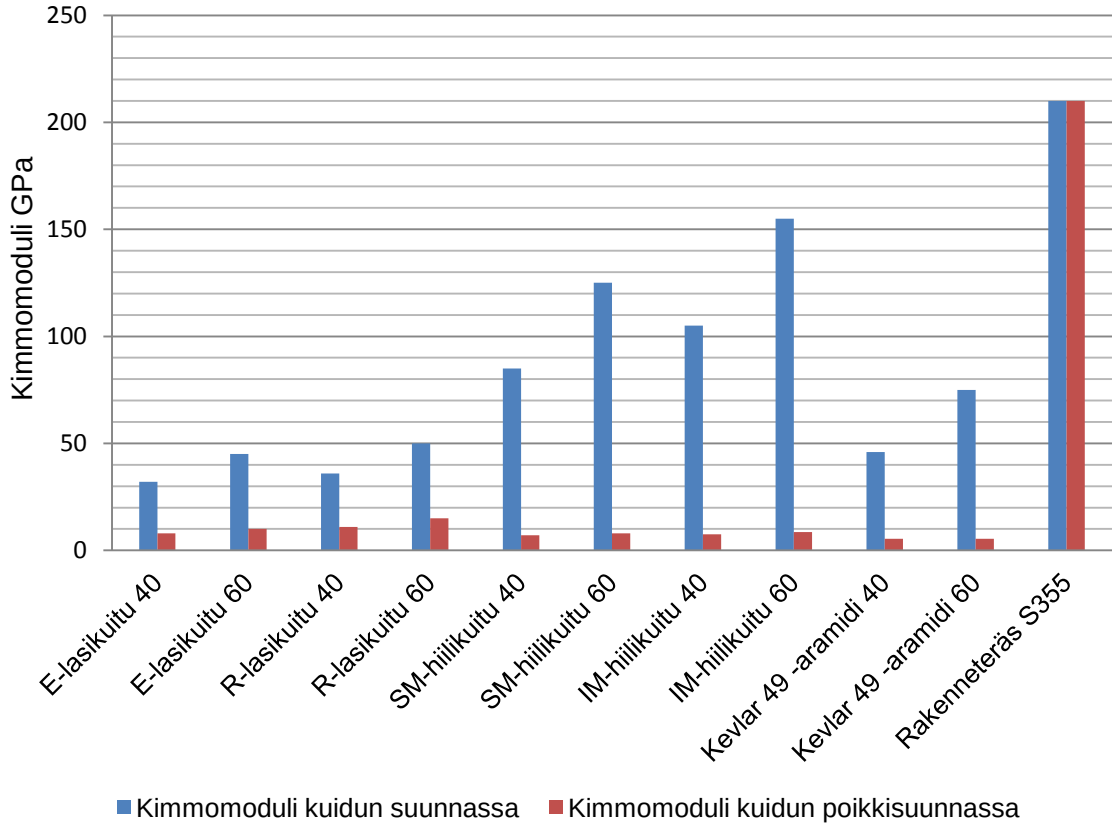
Kuva 3.5.2.1. Yleisimpien muovien kimmokertoimien vertailua metalleihin [18].



Kuva 3.5.2.2. Yleisimpien muovien kimmokertoimien vertailua metalleihin [18].

Aivan samoin kuin todettiin edellisessä luvussa 3.5.1 muovien vetomurtolujuuden kohdalla, myös kimmokertoimen suhteen päästään muoveilla sopivasti kuitulujitettuna huomattavasti parempiin tuloksiin kuin mitä pelkillä perusmuoveilla on saavutettavissa. Itse asiassa monen muovin kimmokerroin kasvaa oikein lujitettuna hämmästyttävän suureksi jopa rakenneteräkseen verrattuna. Tämä ominaisuus onkin ratkaisevan tärkeää valmistettaessa suurehkoja ja jäykkiä, mutta silti suhteessa hyvin kevyitä tuotteita kuten esimerkiksi vaikkapa erilaisia säiliöitä tai veneitä ja jopa suurehkoja avomerikelpoisia purjehdusaluksia. Ja edelleen aivan samoin kuin on tilanne vetolujuuden suhteen, myös kimmokertoimen suhteen kuitulujitetut muovit ovat lujuudeltaan hyvin erilaisia eri kuormitussuunnissa. Tämän vuoksi onkin syytä tutkia ja laskea tarkoin kulloiseenkin tilanteeseen soveltuva lujitekerrosten määrä ja valmistaa tuote niin, että lujitekuitujen suunta varmistetaan kaikissa tuotteen mekaanisen rasituksen suunnissa. Tarkemman laskennallisen menettelyn tarvitsijalle suosittelen samaa komposiittirakenteita käsittelevää kirjaa joka tuli mainittua jo edellisessäkin luvussa [24].

Kuvassa 3.5.2.3. on esitetty epoksimuovin kimmokertoimien arvoja lujitettuna monen tyyppisillä lujitekuiduilla. Vertailukohtana on kuvan oikeassa laidassa käytetty yleisesti käytetyn rakenneteräs S355:n vastaavia lujuusarvoja [14].

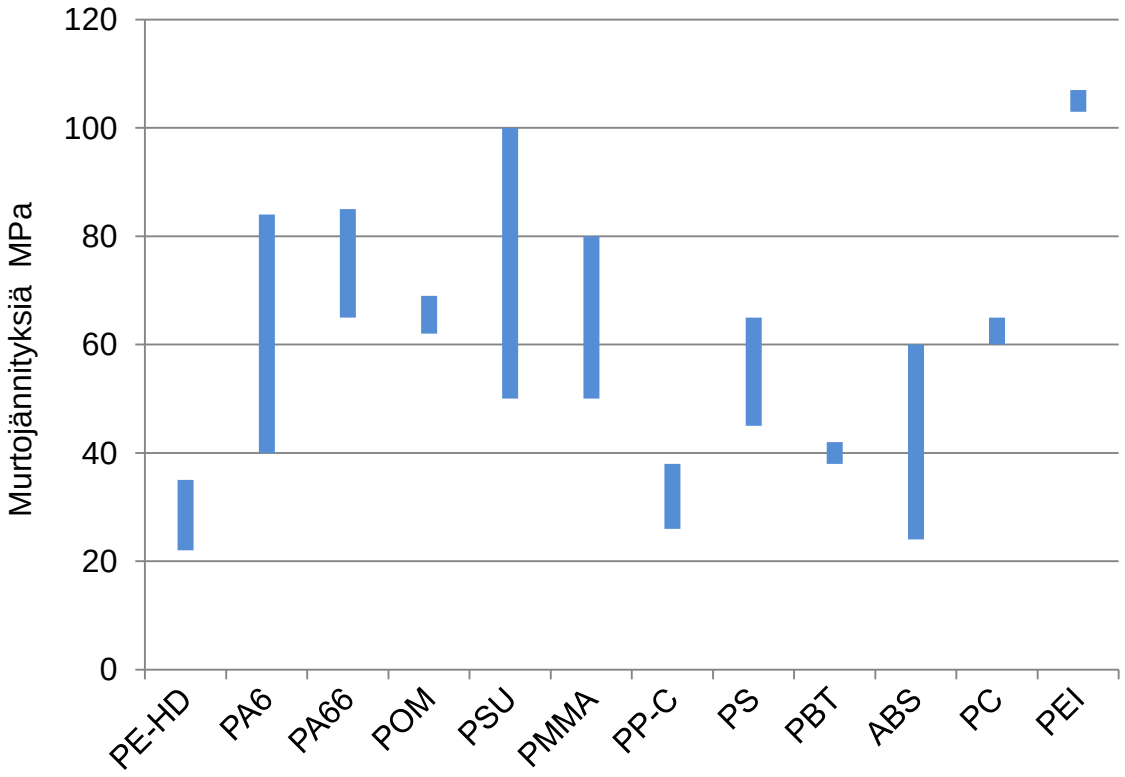


Kuva 3.5.2.3. Lujitekuiduilla lujitetun epoksimuovin kimmokertoimen arvoja verrattuna rakenneteräs S355:n kimmokertoimeen[14]. Teräs suunta 0° = suunta 90° [14].

3.5.3. Muovien myötö- ja murtojännitys

Muovien myötöjännitys tutkitaan standardin SFS-EN ISO 527-1 mukaan ja se on kappaleen vetojännitys kohdassa, jossa venymä ensimmäisen kerran kasvaa jännityksen enää kasvamatta. Venymisen päätyttyä jännitys vielä nousee jonkin verran useimmilla materiaaleilla, kunnes vastaan tulee materiaalin murtuminen. Tämä on nimeltään murtoraja, jota vastaavaa jännityksen arvoa nimitetään murtojännitykseksi [4]. Yleisimpien muovien myötö- ja murtojännityksen arvoja on annettu kuvassa 3.5.3.1. Kuten kuvasta voidaan havaita, on lujittamattomilla muoveilla yleensä varsin vaatimattomat lujuusominaisuudet verrattaessa niitä lähes kaikkiin muihin konstruktiomateriaaleihin. Tämän ja erityisesti muovien viskoelastisen luonteen vuoksi kappaleen mitoittaminen myötö- tai murtojännityksen mukaan ei tule muovimateriaaleilla kysymykseen, ellei

haluta erityisestä syystä tehdä sellaista rakennetta, jonka toimintaan kuuluu jonkinlainen murrettavuus. Tällaisia tuotteita voisivat olla esimerkiksi sinetit tai tuotepakkaukset, joiden avaamisesta pitää jäädä pysyvä jälki.

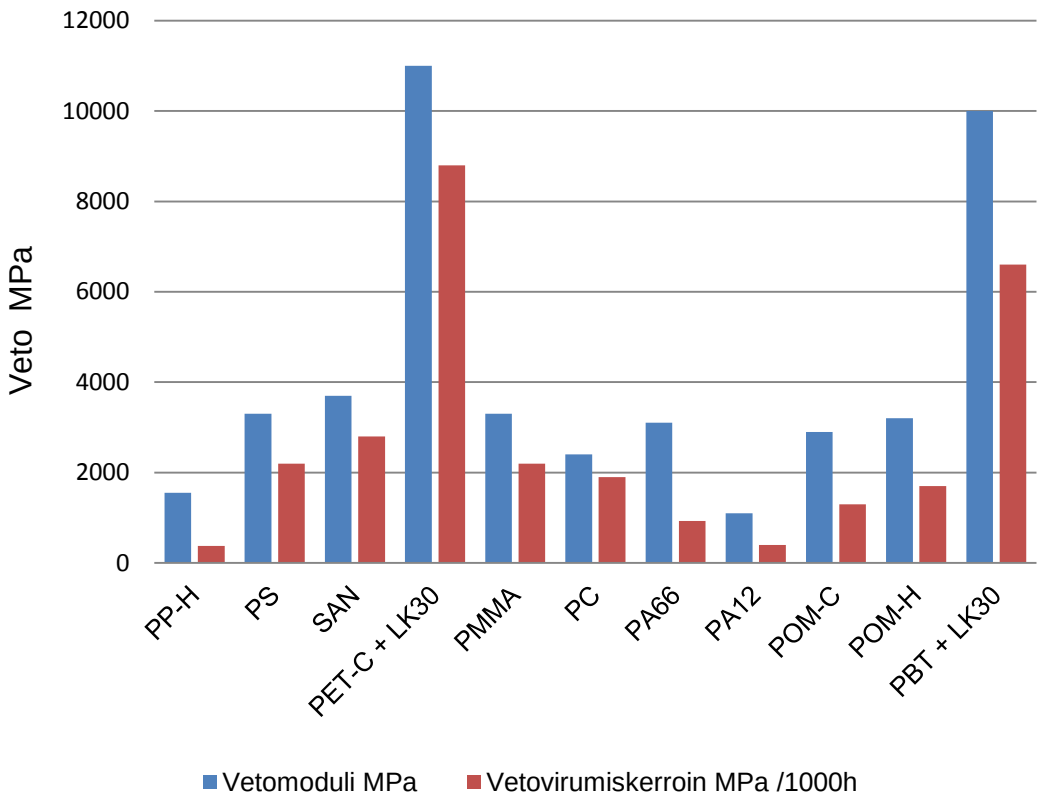


Kuva 3.5.3.1. Yleisimpien muovien myötö- tai murtojännityksen arvoja [18].

3.5.4. Muovien vetovirumiskerroin

Toisinaan joudutaan muovituotteen suunnittelussa ja mitoituksessa ottamaan huomioon se mahdollisuus, että muovituote joutuu käytössä jatkuvaan ja pitkäaikaiseen rasitukseen. Tällöin muovimateriaalin myötö- ja murtojännityksen arvo ei ole oikea mitoitusperuste, koska tuo arvo lujittamattomilla muoveilla kuvaa muovin viskoelastisen käyttäytymisen vuoksi sen kestoa vain lyhytkestoista rasituksen nousua vastaan [20]. Mitoituksen kannalta tärkeämpi ominaisuus on tällöin vetovirumiskerroin, joka testataan muoveilla standardin SFS-EN ISO 899-1 mukaan [21]. Kuvassa 3.5.4.1. on esitetty yleisimpien muovien vetovirumiskertoimien arvoja verrattuna vastaavien muovien vetomodulin arvoihin. Kuten kuvasta näkyy, antaa tuhannen tunnin testi joillakin muoveilla selviä eroja sallitulle jännitykselle verrattaessa sitä vastaavaan vetomodulin arvoon ja siten materiaalin lyhytaikaiseen jännityksen kestoon.

Standardissa SFS-EN ISO 899-1 on määritelty mahdollisuus testata muovien vetovirumiskerrointa muidenkin aikojen kuin 1000 tunnin mukaisesti. Kirjallisuudesta muiden aikojen mukaisesti testattuja arvoja on kuitenkin hyvin vaikeaa löytää.



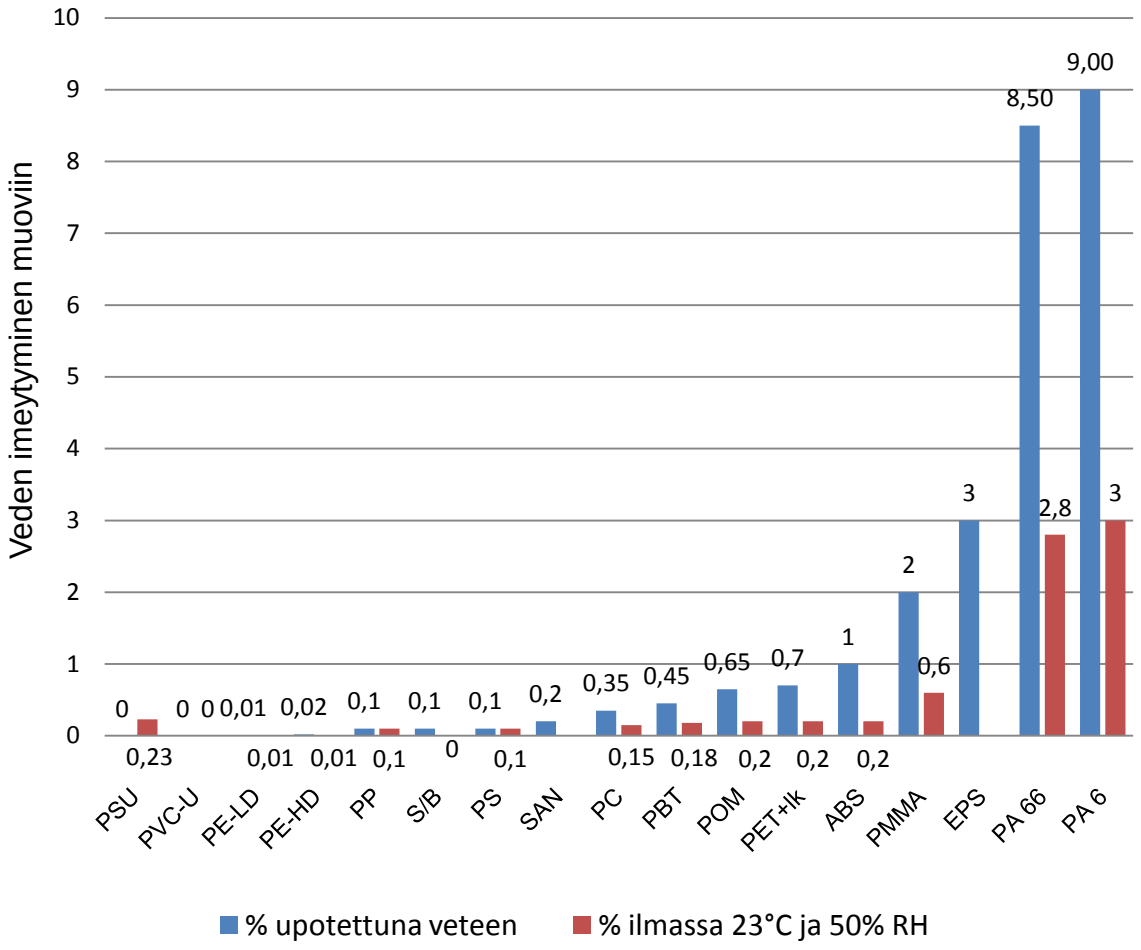
Kuva 3.5.4.1. Yleisimpien muovien vetovirumiskertoimen ja vetomodulin arvoja [37].

3.6. Veden imeytyminen muoviin

Veden imeytyminen muoviin on yksi muovimateriaalin ominaisuus, joka voi hallitsemattomana tuottaa muovituotteen valmistajalle ikävän yllätyksen. Näin saattaa käydä erityisesti silloin, kun tavoitteena on erittäin mittatarkka tuote, joka ei vaihtelevissa käyttöolosuhteissa hetken käytön jälkeen enää vastaakaan tuotteelle asetettuja alkuperäisiä mittatarkkuusvaatimuksia.

Mikäli tuotteelle on tiukat tarkkuusvaatimukset ja sen käyttöolosuhteet tiedetään kosteudeltaan vaihteleviksi, kannattaa käytettävää muovimateriaalia arvioida ennen lopullista valintaa taulukon 3.6.1. perusteella. Siinä on esitetty veden imeytymisen prosenttiosuuksia muovimateriaaleihin vedessä ja ilmassa. Taulukossa on sinisellä veden ab-

sorptio muoviin, kun kappale on upotettu nestepinnan alle ja punaisella, kun kappale on ilmassa, jonka lämpötila on 23 °C ja suhteellinen ilmankosteus 50 % [13].

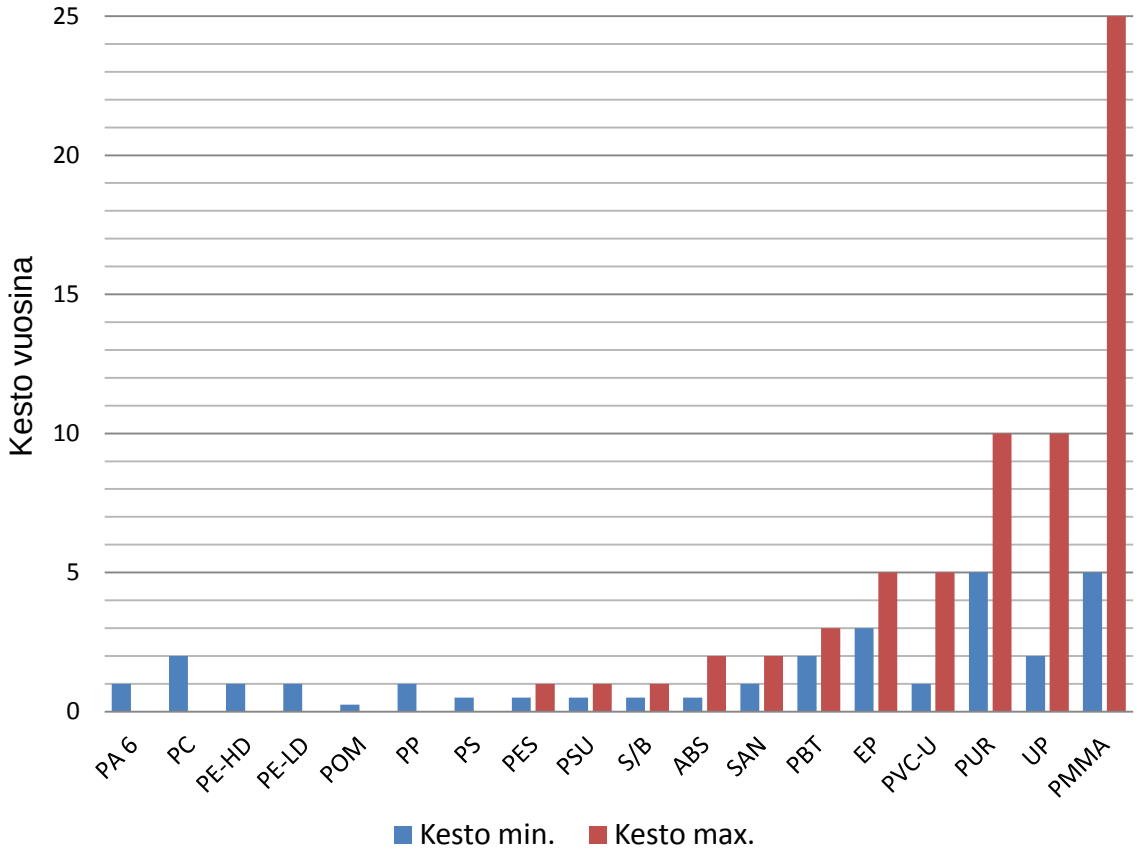


Kuva 3.6.1. Veden imeytyminen muoveihin vedessä ja ilmassa [9].

3.7. UV – säteilyn vaikutus muovimateriaaliin

Pitkäaikainen altistus suoralle tai epäsuoralle auringonvalolle aiheuttaa muovimateriaaliin yleensä näkyvän vaurion. Monet muovimateriaalit menettävät värinsä ja haalistuvat ja ultraviolettisäteilyn altistuksen jatkuessa myös haurastuvat. Tätä voidaan hidastaa joko perusmuoviin sekoitettavilla UV-stabilaattoreilla tai maalaamalla tai pinnoittamalla muovituote. On muistettava, että voimakasta UV – säteilyä voi esiintyä paitsi auringonvalon yhteydessä, myös ihmisen toiminnan seurauksena. Näistä esimerkkeinä mainittakoon UV-valon synty hitsausmenetelmien käytön yhteydessä ja toisaalta vaikkapa ilmankostutusvesien desinfiointi ilmastointilaitteissa [42].

Kuvassa 3.7.1. on esitetty stabiloimattomien muovien UV-kestoa ulkoilmassa. Jos jostain syystä kuvan vasemmassa päässä esiteltyjä muoveja joudutaan käyttämään UV-valolle altistavissa olosuhteissa, on syytä varmistaa niiden kesto käyttämällä siihen tarkoitettuja riittäviä menetelmiä. Lähinnä kysymykseen tulevat erilaiset täyteaineet ja stabilaattorit, värjäys, maalaus ja pinnoitus [9].



Kuva 3.7.1. Stabiloimattomien muovien UV-kesto ulkona Suomen ilmastossa [9].

3.8. Muovimateriaalien kemikaalinkesto

Muovituotteita käytetään usein paikoissa, joissa niiltä vaaditaan kemikaalinkestoa joko yleisellä tasolla tai varsin usein jonkin aivan tietyn kemikaalin suhteen. Oikean muovimateriaalin valitsemiseksi ja siten kyseessä olevan kohteen riittävän kestävyyden takaamiseksi olisi suunnittelijan selvitettävä aluksi itselleen vastaukset ainakin seuraaviin kysymyksiin:

- Onko olemassa mahdollisuus, että muovituote joutuu normaalin käytön tai säilytyksen aikana olosuhteisiin, jossa siihen vaikuttaa jokin kemiallinen aine?
- Mitkä ovat tuotteeseen vaikuttavat aineet tai kemikaalit normaalisti käytettäessä? Entä onko erityinen vaara tahattomalle altistukselle? Esimerkki: Tankattaessa bensiinillä polttomoottorikäyttöistä ajoneuvoa saattaa bensiiniä varsin helposti roiskahtaa tankkausaukon ympäristöön. Tämän vuoksi myös tankkausaukon ympäristön tulee ehdottomasti kestää kyseinen lyhytaikainen altistus.
- Mikä on altistusaika kemialliselle aineelle? Onko kyseessä jatkuva, jatkuvasti toistuva vai satunnainen altistuminen?
- Mikä on kemiallisesti vaikuttavan aineen konsentraatio? Onko se vahva, heikko vai onko kyseessä jokin kemiallisten aineiden yhdiste?
- Mikä on altistavan aineen ja/tai muovituotteen lämpötila hetkellä, jolloin muovituotteen tulee toimia ja kestää ko. kemiallinen altistus?

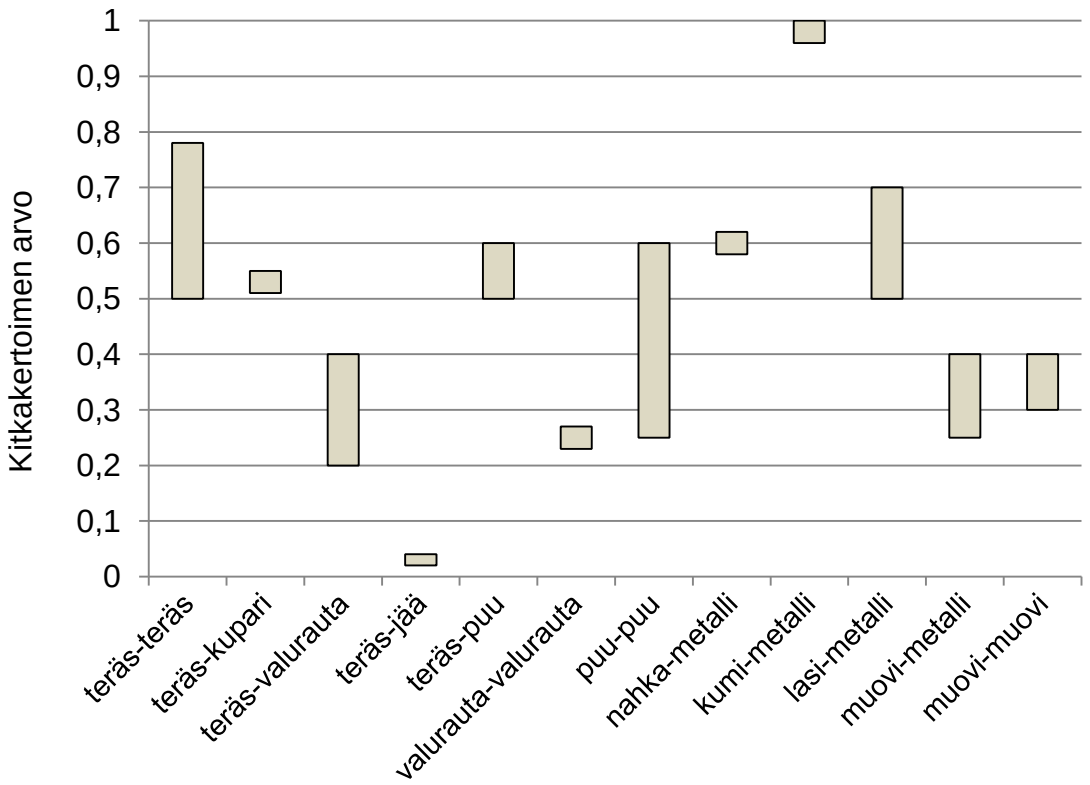
Liitteessä yksi on taulukko, johon on koottu tavallisimpien teknisten muovien kemikaalinkestot sadalla kemikaalilla ja yleisesti käytössä olevalla aineella [7] [13] [15].

3.9. Muovimateriaalien kitka

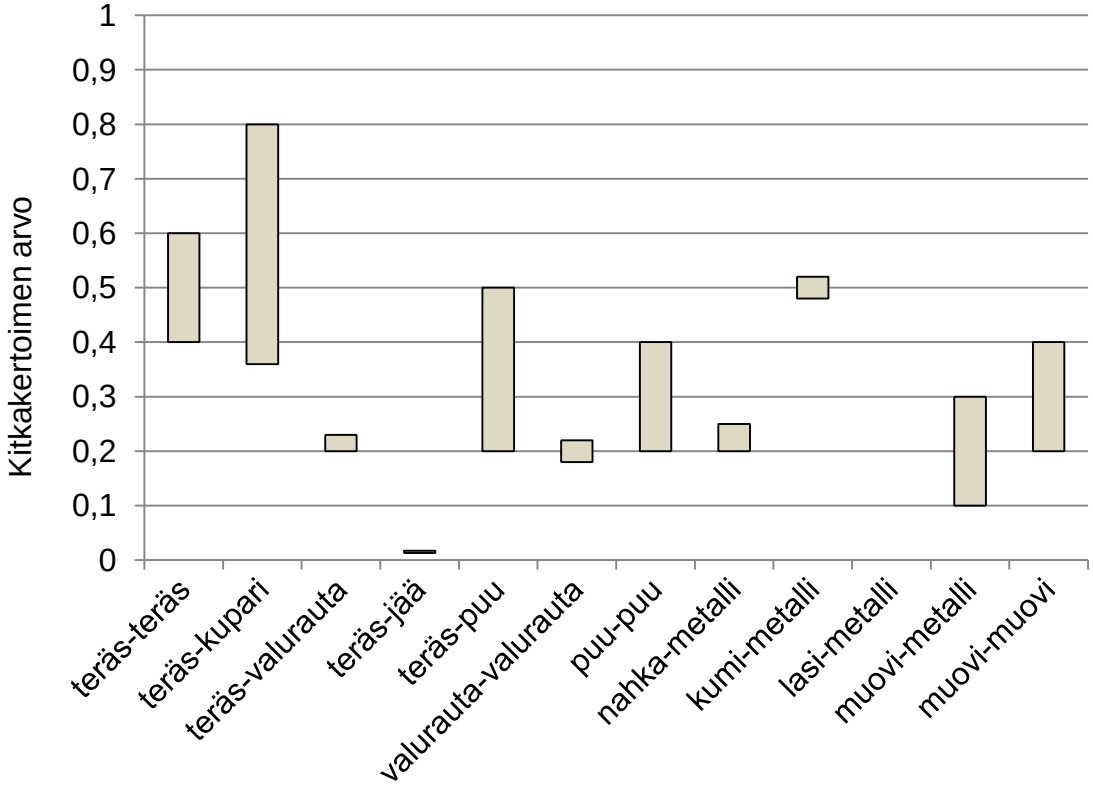
Kitka on voima, joka vastustaa kahden pinnan liukumista toistensa suhteen. Kitkaa mitataan tavallisesti joko pintojen suorana kosketuksena toisiaan vasten tai siten, että pintojen välissä on voiteluainekalvo. Ensimmäisessä tapauksessa voidaan puhua kyseisten pintojen kuivakitkasta ja jälkimmäisessä tapauksessa märkäkitkasta. Jälkimmäinen näistä on ensiksi mainittuun verrattuna tavallisesti merkittävästi alhaisempi. Mahdollisen pintojen välissä olevan voiteluaineen lisäksi kitkavoimiin vaikuttavat monet muutkin tekijät. Kontaktipintojen välinen paine, pinnankarheus, pintojen kovuus ja liikekitkan tapauksessa myös liikkeen nopeus vaikuttavat kitkavoimien suuruuteen. Liikkeelle lähtöä vastustavaa kitkavoimaa kutsutaan lepokitkaksi. Se on tavallisesti vastaavien materiaalien liikekitkaa selvästi suurempi ja esitetään siksi lukuarvona erikseen [16].

Muoveihin liittyvästä kitkasta puhuttaessa erityinen huomio tulee kiinnittää vielä käyttölämpötilaan. Kaikkien materiaalien kitkallinen hankaus toisiaan vasten synnyttää lämpöä, ja muovimateriaalien tapauksessa lämpötilan nousu vielä helposti kasvattaa kitkavoimia. Tämä johtuu siitä, että muovimateriaaleilla on metallimateriaaleihin verrattuna heikompi lämmönjohtavuus ja olennaisesti matalampi pehmenemislämpötila, jolloin nämä yhdessä johtavat kuormittavan hankauksen jatkuessa lämmönnousun jatkuvaan kierteeseen ja siten lopulta kappaleen vaurioitumiseen. Yleisesti ottaen kirjallisuudessa todetaan, että tämänkaltaisen vaurioitumismekanismin suhteen kestomuovit ovat selvästi herkempiä kuin kertamuovit [6].

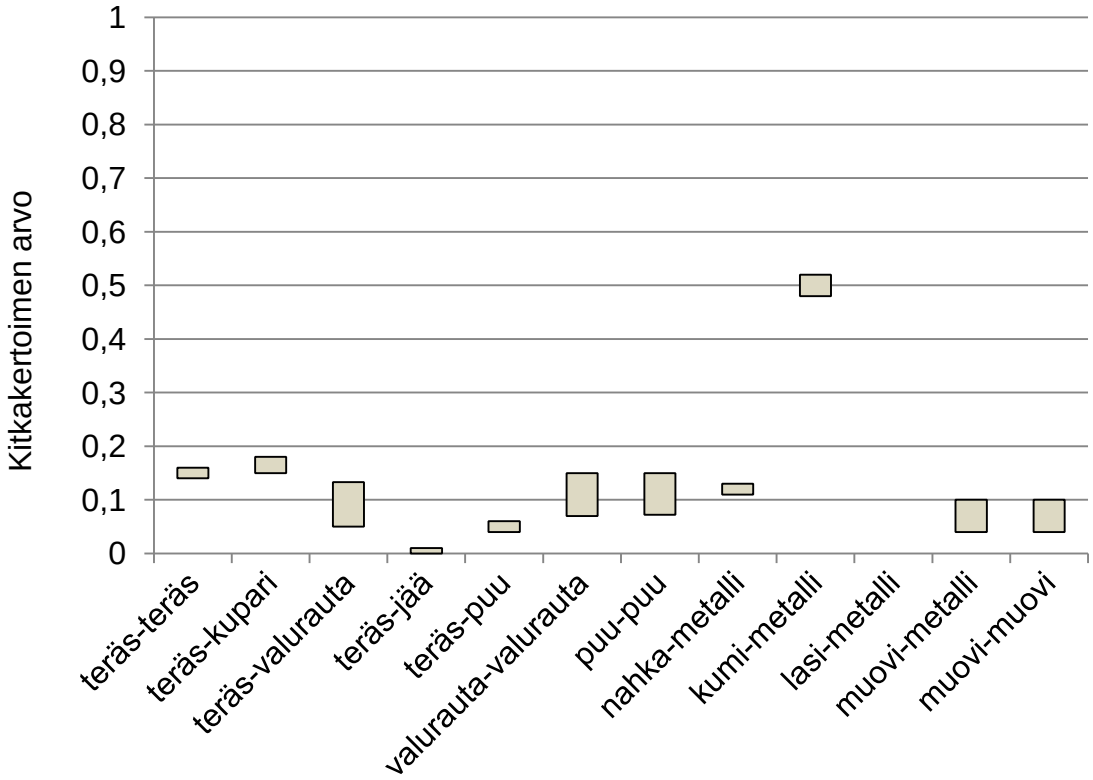
Seuraavissa kuvissa esitetään kitkaan liittyviä vertailuja. Aluksi esitetään yhdessä kuvassa 3.9.1. tavallisimpien materiaaliparien yleisiä kitkakertoimia staattisena tapauksena eli lepokitkakertoimia ilman voiteluainetta materiaalien välissä. Seuraavaksi on kaksi kuvaa dynaamisen kitkan kertoimista eli liikekitkakertoimista: Kuva 3.9.2. liikekitkakertoimia kuivana ja kuva 3.9.3. liikekitkakertoimia voideltuna. Huomattavaa on monissa tapauksissa annettujen arvojen suuret vaihteluvälit. Lukuja on haettu useammista lähdeteoksista, joista on vaikea löytää kahta samoille materiaaleille täysin samanlaisissa olosuhteissa (sama lämpötila, nopeus, ja voiteluaine yms.) tehtyä testiä. Kitkakertoimia selvitettäessä variaatio kirjallisuuden antamissa arvoissa on monille materiaalipareille usein suurta. Variaatio kasvaa ennestään kitkapareilla, joiden toinen tai molemmat osapuolet ovat muovia. Tähän antaa mahdollisen selityksen lähdeteoksena käytetty Tribology Data Handbook [16], joka kertoo polymeerien kitkaominaisuuksista seuraavaa: Polymeerit ovat tyypiltään viskoelastisia materiaaleja ja niillä kaikilla on oma tyypillinen aika, jonka kuluessa polymeeriin aiheutettu jännitys relaksoituu, puhutaan jännitysrelaksaatioajasta. Koska liukunopeuden kasvattaminen kasvattaa myös pintojen välisiä jännityksiä, nousevat kitkavoimat usein liikenopeuden kasvaessa voimakkaasti kitkan lämpötilaa nostavan ja pintaa pehmentävän vaikutuksen vuoksi. Kitkan taulukkoarvoja tuleekin lukea suuntaa-antavina. Niiden suhteen parasta olisikin tehdä kitkamittaukset itse juuri niillä materiaaleilla ja niissä olosuhteissa, joissa tuotetta käytetään silloin kun kitkan tarkan arvon tietäminen on todella tärkeää [16].



Kuva 3.9.1. Tavallisimpien materiaaliparien lepokitkakertoimia kuivina [7] [5].

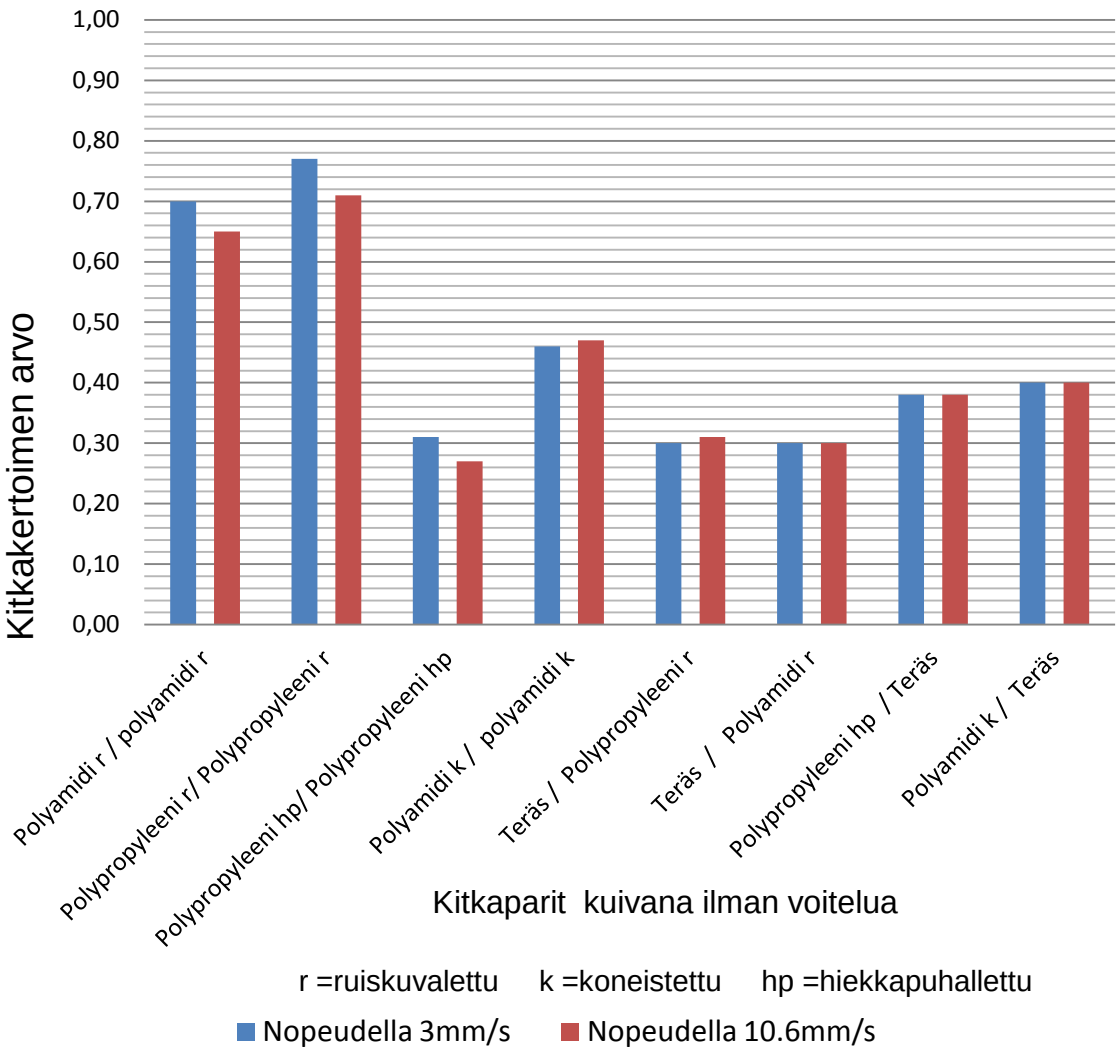


Kuva 3.9.2. Tavallisimpien materiaaliparien liikekitkakertoimia kuivina [7] [5].



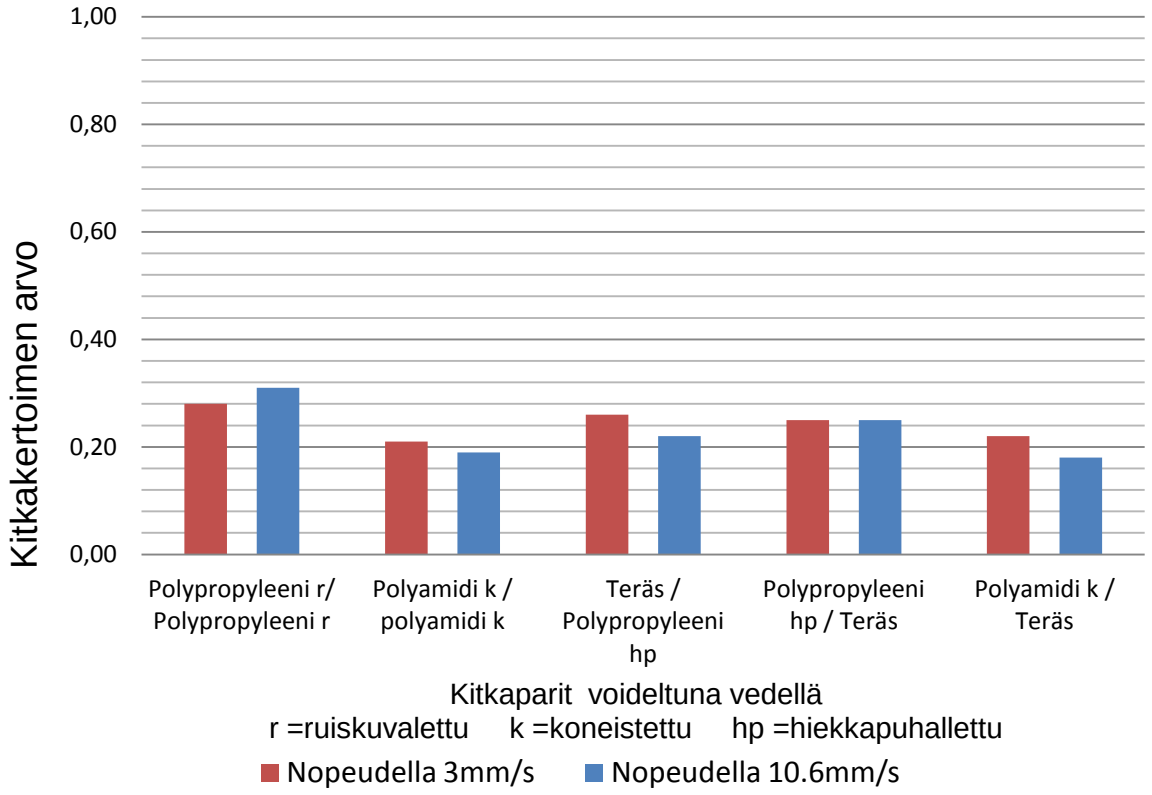
Kuva 3.9.3. Tavallisimpien materiaaliparien liikekitkakertoimia voideltuina [7] [5].

Edellä esitettyjen yleisten kitkakertoimien taulukkoarvojen jälkeen seuraavissa kuvissa on esitettynä kitkapareja eri tavoin valmistetuille ja käsitellyille muoveille. Kuvassa 3.9.4. on aluksi kitkakertoimien arvoja teräkselle ja muoveille sekä tavallisimmille konstruktiomuoveille keskenään kuivana ilman voitelua [5].

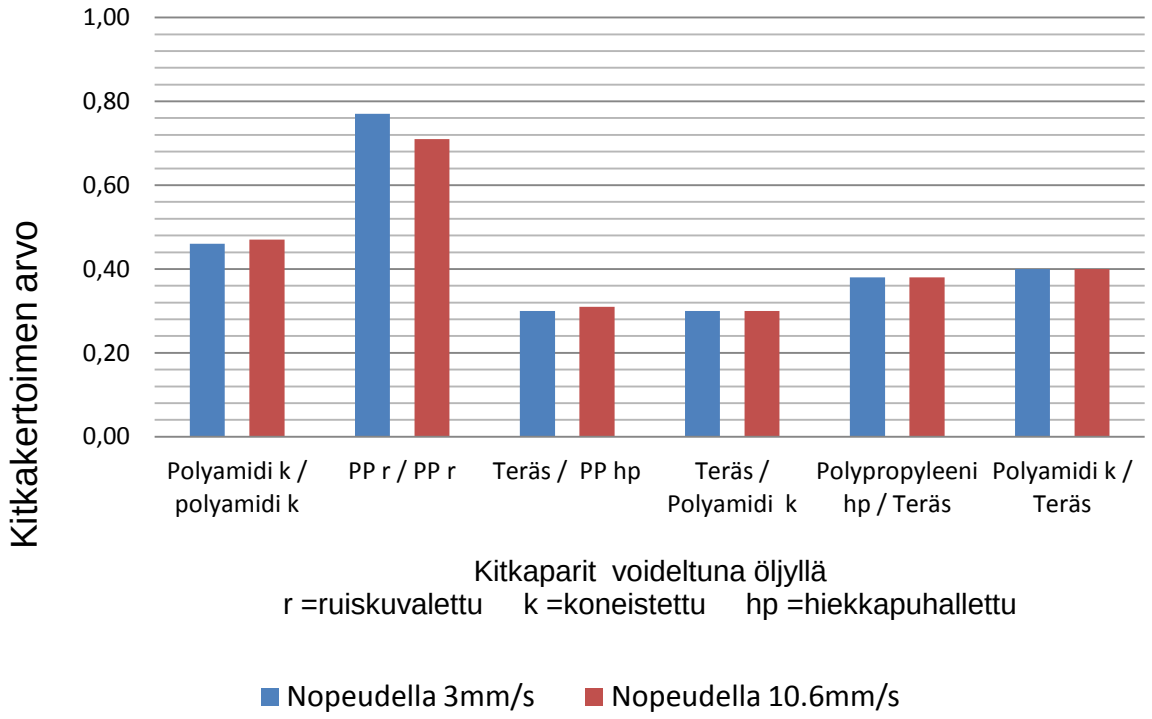


Kuva 3.9.4. Kitkakertoimien arvoja kuivana teräksen ja muovien pareille [5].

Kuvassa 3.9.5. on seuraavaksi esitetty kitkakertoimen arvoja teräksen ja muovien pareille voideltuna vedellä, jolloin kitkan arvo putoaa selvästi edellisen kuvan 3.9.4. esittämistä tapauksista. Lopuksi kuvassa 3.9.6. on samojen teräs-muovi ja muovi-muovi –parien kitkakertoimien arvoja voideltuna öljyllä tai vastaavalla hyvän voitelukalvon muodostavalla voiteluaineella [5].



Kuva 3.9.5. Kitkakertoimien arvoja teräkselle ja muoveille voideltuna vedellä [5].



Kuva 3.9.6. Kitkakertoimien arvoja teräkselle ja muoveille voideltuna öljyllä [5].

Muovien kitka on aihe, josta saatavilla on vain vähän tietoa ja sekin erityisesti kitkaparien osalta varsin epätäydellistä. Muovinmateriaalien kitkaa sellaisenaan käsitellään kirjassa Tribology Data Handbook [16], jossa annetaan kitkan arvoja lujittamattomille ja lujitetuille muoveille varsin monessa muodossa ja erilaisina sekoituksina. Muovien kitkasta lisätietoja hakevalle suosittelen tutustumaan mainittuun teokseen.

4. MUOVITUOTTEIDEN VALMISTUSMENETELMIEN KUVAUS

Muovituotteen valmistusmenetelmää ja valmistusmateriaalia valittaessa sopivien vaihtoehtojen kirjo on usein hyvin suuri. Normaalissa lämpötilassa käytettävä vähäisen kuormituksen alainen tuote tai tuotteen osa voidaan yleensä valmistaa hyvin monella tapaa ja useista materiaalivaihtoehdoista. Näin ollen sopivan menetelmän valintaa harkittaessa saattaa kokeneella muovituotevalmistajalla olla vanha tietämys ja konekanta jopa jonkinasteisena rasitteena, koska joissakin tapauksissa ne voivat rajoittaa uuden ja tarkoituksenmukaisemman valmistusmenetelmän käyttöönottoa. Uudella muovituotevalmistajalla tai -valmistuttajalla ei välttämättä ole tällaista ongelmaa, koska kaikista tarjolla olevista valmistusmenetelmistä voidaan valita ainakin aluksi kulloiseenkin tapaukseen parhaiten soveltuva.

Tässä luvussa käydään läpi erilaiset muovituotteiden valmistusmenetelmät ja muutamien taulukoiden avulla esitellään niiden sopivuutta esimerkiksi tuotteen koon, muotojen, mittatarkkuuden ja valmistussarjan pituuden mukaan. Taulukoissa kunkin luvun loppupuolella vertaillaan aina kyseisen muovimateriaalin valmistusmenetelmiä toisiinsa ja lopuksi on koottuna kaikki valmistusmenetelmät kertaava taulukko, jossa kerrataan kunkin menetelmän soveltuvuus muovien materiaaliryhmille.

4.1. Lujittamattomien muovien valmistusmenetelmiä

4.1.1. Valaminen

Valaminen on menetelmä, joka tunnetaan paremmin ja käytetään yleisemmin metallimateriaalien muodonannon yhteydessä. Tällöin sillä tarkoitetaan yleensä paineetonta valumenetelmää, joka on ongelmallinen muovimateriaaleille mm. ilmakuplien muodostumisen ja muovin suurehkon, jopa yli 15 prosenttiin yltävän kutistuman johdosta. Kuitenkin myös valaminen on tuotantomenetelmänä jossain määrin käyttökelpoinen muovimateriaaleille. Sillä tarkoitetaan tässä muoviraaka-aineen käsittelyä nestemäisinä lähtöaineina tai sulassa tilassa ilman merkittävää painetta erotuksena muovin painevalumenetelmiin. Käytännön valutilanteessa jonkinlainen paine kannattaa kuitenkin muodostaa, jotta varmistettaisiin muotin täyttyminen. Tämä paine voidaan saada aikaan esimerkiksi asettamalla valun päälle paino tai muodostamalla pieni alipaine, jonka avulla muotti imetään täyteen painovoimaan nähden vastakkaisesta suunnasta. Jälkimmäinen

menetelmä vähentää myös vapaaseen kaatoon nähden ilmakuplien muodostumista valun yhteydessä [22].

Merkittävin saavutettava etu paineettomassa valumenetelmässä on mahdollisuus rakentaa tarvittava muotti edullisesti ja hyvin kevyistä materiaaleista. Se voidaan valmistaa esimerkiksi puusta, kipsistä, muovista tai kumista. Muotti voidaan myös valmistaa joustavaksi ja pois riisuttavaksi siten, että tuotantokappaleessa ei tarvita lainkaan päästöä tai se voi sisältää jopa negatiivisia päästöjä. Valaminen on myös ainoa sovellus, jolla läpinäkyvän muovin sisälle voidaan pysyvästi tarkasteltavaksi säilöä jokin itsessään hauras objekti kuten esimerkiksi luonnonkukka tai hämähäkki [22].

Valamisen eräs alalaji on kasto, joka voidaan tehdä täysin ilman muottia. Kastamalla valmistetuista tuotteen osista yleisesti käytössä oleva esimerkki on työkalujen kahvojen ja erilaisten kädensijojen päällystäminen muovimateriaalilla. Näin voidaan parantaa tavallisen käsityökalun käsiotetta ja tehdä kädensija sähköä eristäväksi. [22]

4.1.2. Puristusmenetelmät

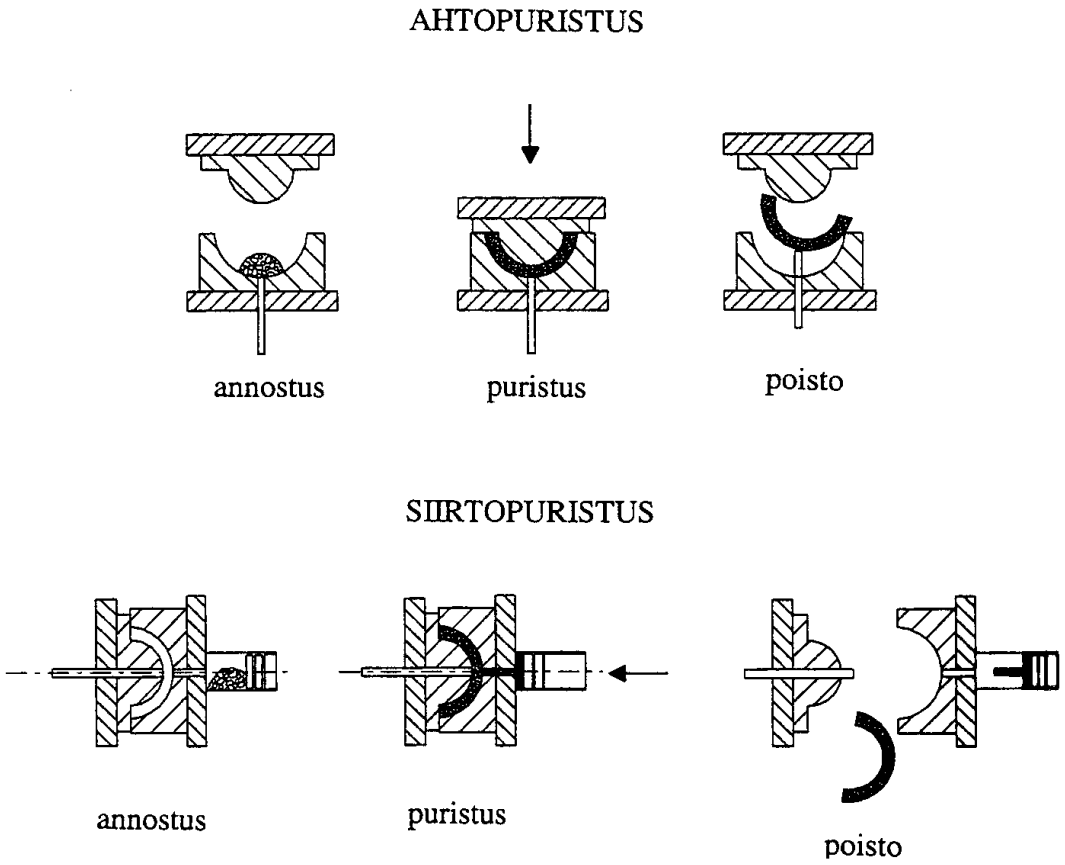
Puristusmenetelmät ahtopuristus, siirtopuristus ja tasopuristus ovat menetelminä melko paljon samankaltaisia. Kaikilla näillä tavoilla voidaan valmistaa suhteellisen yksinkertaisia tuotteita tai kerroslevyrakenteita kesto- tai kertamuovipohjaisista puristemassoista tai – levyistä. Nämä tuotantotavat ovat osittain samankaltaisina käytössä myös monentyyppisten kumituotteiden valmistuksessa. Seuraavassa on esitelty tavallisimmin muovituotteiden valmistuksessa käytössä olevat puristusmenetelmät.

4.1.2.1. Ahtopuristus

Ahtopuristus on valmistusmenetelmä, jossa materiaaleina voidaan käyttää kesto- ja kertamuoveja joskin kertamuovit ovat tässä menetelmässä selvästi käytetyimpiä materiaaleja. Menetelmänä ahtopuristus on hyvin yksinkertainen: Avoimeen muottiin asetetaan muovattava materiaali tavallisimmin pulverimuodossa ja suljetaan muotti. Suljettua ja paineenalaista muottia lämmitetään, jolloin muotissa oleva kertamuovimateriaali kovettuu ja silloittuu. Käytettäessä kestomuovimateriaalia se muovautuu sulatilassa muottionkalon mukaiseksi tuotteeksi ja tuotantosykliin kuuluu tällöin tavallisesti yhtenä osuutena myös muotin jäähdyttäminen. Välittömästi kovettumisreaktion jälkeen tuotantokappale voidaan poistaa muotista [22].

Muotin puristamiseen voidaan käyttää tavallista hydraulista teollisuuspuristinta, jonka puristustehon tulee kuitenkin riittää täyttämään muottionkalo tasaisesti puristettavalla yleensä pulverimuodossa annostellulla materiaalilla. Myös muotin tulee luonnollisesti kestää puristamisessa vaadittavat voimat ja lisäksi siltä yleensä vaaditaan myös lämmitettävyyttä. Tyypillisesti tällä menetelmällä valmistetaan kertamuoveista geometrialtaan

melko yksinkertaisia tuotteita kuten esimerkiksi sähkökojerasioita, suojakypäriä, kumisia tärinänvaimentimia ja siirtovaunujen pyöriä [22]. Kuvassa 4.1.2.2. on esitettynä periaatekuva ja työvaiheet tässä luvussa esitellystä ahtopuristuksesta ja seuraavassa luvussa esiteltävästä siirtopuristuksesta.



Kuva 4.1.2.2. Ahto- ja siirtopuristuksen periaate ja työvaiheet [26].

4.1.2.2. Siirtopuristus

Siirtopuristuksessa muovimassa annostellaan joko sulatilassa sylinterimäiseen syöttökammioon tai se lämmitetään syöttökammiossa sulatilaan ja työvaiheen aikana painetaan männän avulla kanavaa tai kanavia myöten muottionkaloon. Tämä tekee vaadittavasta muotista rakenteeltaan hieman monimutkaisemman, kuin mitä on vastaava ahtopuristuksessa käytetty muotti. Tuotteen valmistus muistuttaa siten syöttötapahtuman vuoksi jossain määrin ruiskupuristusta, joskin selvästi kevyemmällä laitteistolla ja manuaalisemmassa muodossa suoritettuna. Muotti on rakenteeltaan kuitenkin varsinaiseen ruiskupuristuksessa tarvittavaan muottiin verrattuna yksinkertaisempi. Tarvittava puristusvoima voidaan muodostaa vaikkapa hydraulisen sylinterin iskulla tai hyvin pienillä

kappaleilla jopa käsikammen avulla koska tapahtuman voimantarve on selvästi ahtopuristusta vähäisempi materiaalin ollessa valmiiksi sulassa tilassa jo siirtovaiheessa [22].

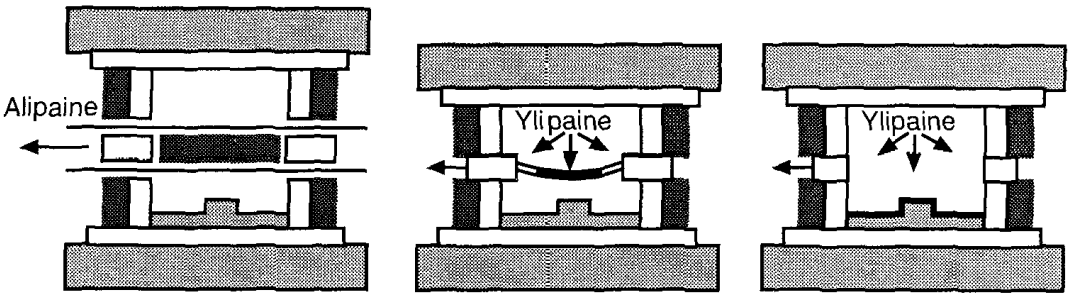
Siirtopuristus on ahtopuristukseen verrattuna monipuolisempi menetelmä, joka sallii mm. erilaisten inserttien laiton tuotteisiin. Se soveltuu myös ahtopuristusta selvästi paremmin kestomuovituotteiden valmistukseen. Menetelmällä voidaan valmistaa hyvinkin pieniä tuotteita tarkasti. Esimerkkinä tästä voidaan mainita vaikkapa kahteen osaan halkeavan vetoketjun nauhaan valettavat alapään boksi- ja pinniosat, jotka yleensä valmistetaan siirtopuristuksena [22].

4.1.2.3. Tasopuristus

Tasopuristus on edellisten kaltainen levymäisten tuotteiden valmistusmenetelmä, jonka avulla valmistetaan esimerkiksi vanerilevyjä ja kudosvahvisteisia lujitemuovilevyjä. Tasopuristusta voidaan käyttää osana valmistusmenetelmää kun valmistetaan ns. prepreg -puolivalmisteita lähinnä kestomuoveista kalvopuristusta varten [24].

4.1.2.4. Kalvopuristus

Kalvopuristuksen avulla voidaan valmistaa ohutseinämäisiä tasomaisia kappaleita. Menetelmässä prepreg-lujitteet asetetaan kahden tavallisesti polyimidistä valmistetun kalvon väliin jonka jälkeen prepregit tiivistetään alipaineen, sitä vastaavan ylipaineen ja lämmön avulla. Tämän jälkeen tiivistetty prepreg-pakka muovataan avomuottiin kuten painesäkkimenetelmässä. Muovikalvojen tehtävänä on sallia lujitteiden liukuminen hallitusti muovaamisen aikana ja siten ehkäistä niiden rypistymistä prosessissa. Käytettävät polyimidikalvot ovat tässä menetelmässä kertakäyttöisiä [24]. Kuvassa 4.1.2.4. on kuvattu kalvopuristuksen työvaiheet.

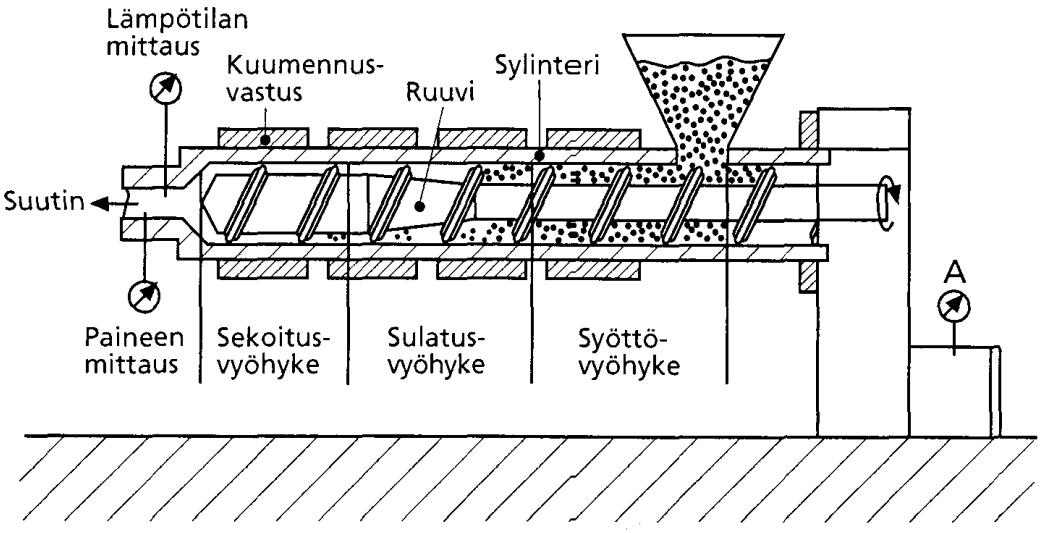


Kuva 4.1.2.4. Kalvopuristuksen vaiheet [24].

4.1.3. Ekstruusio

Ekstruusio on toiselta nimeltään suulakepuristus. Tässä menetelmässä muoviraaka-aine plastisoidaan yleensä sylinterimäisessä putkessa pyörivällä trapetsikierteisellä ruuvilla sulaksi massaksi ja muotoillaan jatkuvana prosessina suulakkeen läpi halutun muotoiseksi valmiiksi tuotteeksi tai tuoteaihioksi. Vastaavan menetelmän variaatioilla voidaan prosessoida myös kumi- ja jopa metallimateriaaleja. Tavallisesti ekstruusioon tarvittava laitteisto ja prosessin voimantarve ovat erittäin suuria, mutta ekstruusiosta voidaan esitellä myös käytännönläheinen ja kevyt esimerkki, tavallinen kuumaliimapistooli. Siinä liimana käytetty polymeeri plastisoidaan lämmön avulla sulatilaan ja työnnetään kärjessä olevan suuttimen läpi suoraan käyttökohteeseensa [24].

Tyypillisiä ekstruusiolla valmistettavia tuotteita ovat erilaiset putket, letkut, profiilit ja nauhat. Ekstruusio edustaa jo todellista massavalmistusta, sillä sen tuotantonopeus nousee suurilla linjoilla helposti tuhansiin kiloihin tunnissa ja tuote voi olla halkaisijaltaan hyvinkin suurta putkea tai profiilia. Ekstruusio on myös tavallisimmin käytetty pinnoitus- ja päällystysmenetelmänä esimerkiksi kaapeleille ja vastaaville monikerrostuotteille. Myöhemmin tässä samassa luvussa esitellään erityisesti kertamuoveille tarkoitetut menetelmät RIM ja RTM, joiden prosessi on tietyiltä osin samankaltainen ekstruusion kanssa [24]. Seuraavassa kuvassa 4.1.3 on esitetty kaavio ekstruuderin rakenteesta [29].



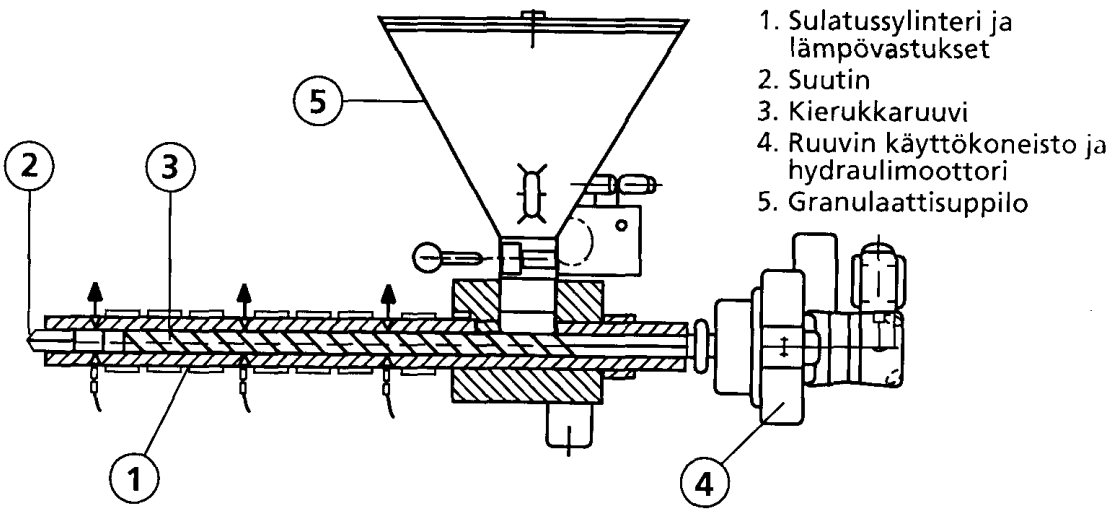
Kuva 4.1.3. Kaavio ekstruuderin rakenteesta [29].

4.1.4. Ruiskuvalu

Erona edellisessä kohdassa esiteltyyn jatkuvatoimiseen ekstruusioprosessiin ruiskuvalussa injektoidaan muottiin kerta-annos ja siten sitä käytetään erittäin yleisesti nimenomaan kappalevalmistusmenetelmänä. Ruiskuvalussa raaka-aine ensin sekoitetaan ja plastisoidaan samalla tavoin kuin ekstruusiossa sylinterissä pyörivän trapetsikierteisen

ruuvin avulla, mutta suulakkeen tilalle on asennettu muotin sulkupintaa vasten asettuva suutin. Raaka-aineen plastisoinnin jälkeen ruuvi yleensä pysäytetään hetkellisesti ja ruuvin kärjessä oleva sulalla raaka-aineella täyttynyt kammio tyhjennetään muottiin yhdellä vaakatasossa tapahtuvalla työiskulla. Tämän jälkeen männäksi muuttunut ruuvi ylläpitää hetken jälkipainetta, jonka aikana kompensoituu muovin jäähtyessä tapahtuva kutistuma ja samalla muottia jäähdytetään voimakkaasti. Sulassa tilassa olleen muovin kiinteydyttyä muotti avataan ja tuote poistetaan. Tämän jälkeen ruiskupuristin on yleensä valmis uuteen työkiertoon. Ennen uuden työkierron alkua on tietenkin mahdollista esimerkiksi tarkastaa ja puhdistaa muotti, lisätä siihen irrotusainetta tai asettaa muottiin erilaisia inserttejä. Ruiskuvalu on erittäin yleisesti käytetty ja tehokkaaksi kehitetty tuotantomenetelmä, jota käytetään hyvin monenlaisten muovituotteiden sarjavalmistukseen. Itse muoviraaka-aineen plastisoinnin ja ruiskutuksen suorittava kone on tavallisesti tyypiltään universaali, jolloin muotti ja käytetty muoviraaka-aine ratkaisevat valmistuksen tarkkuuden ja valmistussarjojen tuotantotehokkuuden. Muotin suhteellisen korkeasta hinnasta johtuen ruiskuvalua suositellaan käytettäväksi suurille valmistusmäärille ja suhteellisen pienille kappaleille [26].

Ruiskuvalutekniikasta on kehitetty useita sovelluksia, joista tärkeimpinä mainittakoon kahden tai useamman materiaalin yhdistäminen monikomponenttiruiskuvalulla ja mikroruiskuvalu, joka laajentaa ruiskuvalutuotteiden valmistusmittakaavan tavanomaisesta kuutiosenttimetritason minimisuuruusluokasta kuutiomillimetritasolle ja erikoistapauksissa jopa sen alle. Näiden lisäksi mainitaan vielä ruiskuvalun ja ahtopuristuksen yhdistelmä. Menetelmällä voidaan valmistaa hyvin mittatarkkoja kappaleita joissa jäännösjännityksien määrä on erittäin vähäinen ja mekaaniset ominaisuudet pelkällä ruiskuvalulla tuotettuja kappaleita paremmat [26]. Kuvassa 4.1.4. on periaatekuva ruiskuvalukoneen ruiskutusyksikön tärkeimmistä osista.

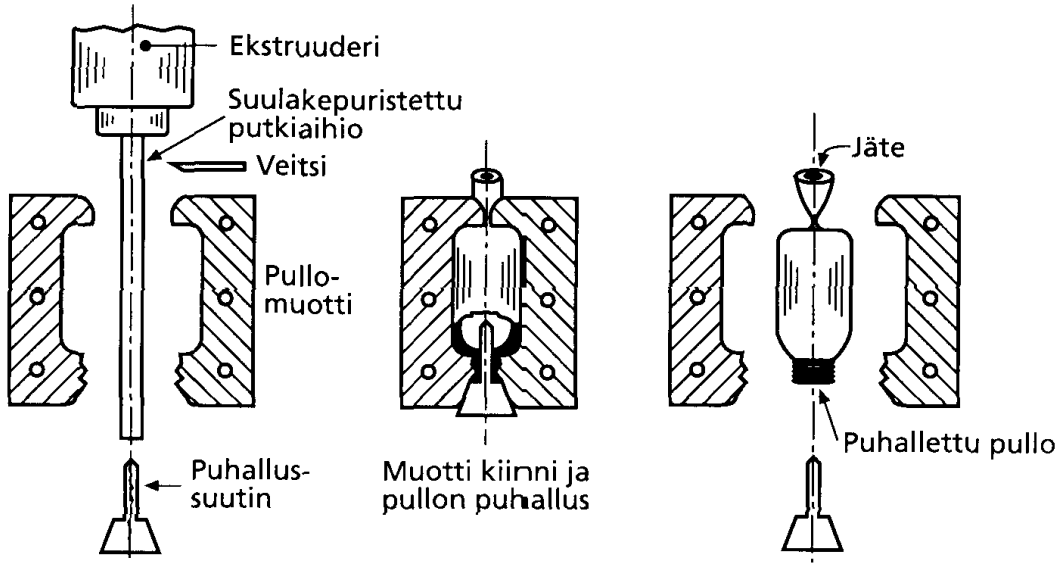


Kuva 4.1.4. Ruiskuvalukoneen ruiskutusyksikön pääosat [29].

4.1.5. Puhallusmuovaus

Puhallusmuovaus on tuotantomenetelmä, joka sopii hyvin onttojen pullomaisten tai säiliömäisten tuotteiden valmistamiseen. Se juontaa juurensa jo hyvin vanhaan lasinpuhaltajien tuotantomenetelmään, jossa muotin avulla puhallettiin täsmälleen samankokoisia ja -muotoisia lasipulloja [8].

Puhallusmuovaus voidaan tehdä joko valmiista aihiosta tai siten, että työvaiheeseen yhdistetään edeltäväksi vaiheeksi aihioiden valmistus ruiskuvalulla tai ekstruusiolla. Molemmat menetelmät mahdollistavat hyvin tehokkaan ja mittatarkan tuotannon. Ekstruusiolla valmistettavat kappaleet mahdollistavat dimensioiltaan useiden kymmenien litrojen suuruisten kappaleiden nopean valmistuksen. Yhdistämällä ruiskuvalu ja puhallusmuovaus saadaan hyvin tehokas tuotantomenetelmä erilaisille pienehköille tilavuudeltaan litraluokkaa oleville pulloille ja säiliömäisille tuotteille [8]. Kuvassa 4.1.5. on esitetty puhallusmuovauksen periaate yhdellä tavalla toteutettuna [29].



Kuva 4.1.5. Puhallusmuovauksen periaate [29].

4.1.6. Lämpömuovaus

Lämpömuovaus eroaa monella tapaa selvästi aikaisemmin esitetyistä tuotantotavoista. Materiaalit tuodaan tuotantoon puolivalmisteina yleensä levymäisessä muodossa, jotka lämmitetään muovailun edellyttämään lämpötilaan muotissa. Toisin sanoen lähtöaineet ovat puolivalmisteita ja siten selvästi kalliimpia ja niiden materiaalihukka on suurempi kuin esimerkiksi granulaattimuodossa toimitetulla raaka-aineella. Vastaavasti lämpö-

muovauksen edellyttämät lämpötilat ja paineet sekä sen myötä myös muotit ja tarvittavat laitteet ovat selvästi edullisempia ja yksinkertaisempia ruiskuvaluun tai puhallusmuovaukseen verrattuna [8].

Tuotantomenetelmä voidaan jakaa kahteen hieman erityyppiseen sovellukseen aihion paksuuden perusteella: Ohuiden levyjen ja filmien lämpömuovaus tapahtuu yleensä automaattisyötöllä rullatavarasta. Tuotanto on pitkälle automatisoitua ja nopeaa erilaisten pakkausten valmistusta. Paksujen levyjen lämpömuovaus tehdään yleensä määrämuotoisesta materiaalikappaleesta yksittäin muotoillen, jolloin tuotantonopeus on hidas ja muotin täyttäminen ja valmiiden tuotteiden ottaminen muotista tapahtuu yleensä edellistä enemmän manuaalisesti. Jälkimmäinen menetelmä soveltuu kooltaan erittäin suurten kappaleiden valmistukseen, esimerkkinä tästä voidaan mainita vaikkapa perävaunujen kuomut tai työkoneiden konepeitot [8].

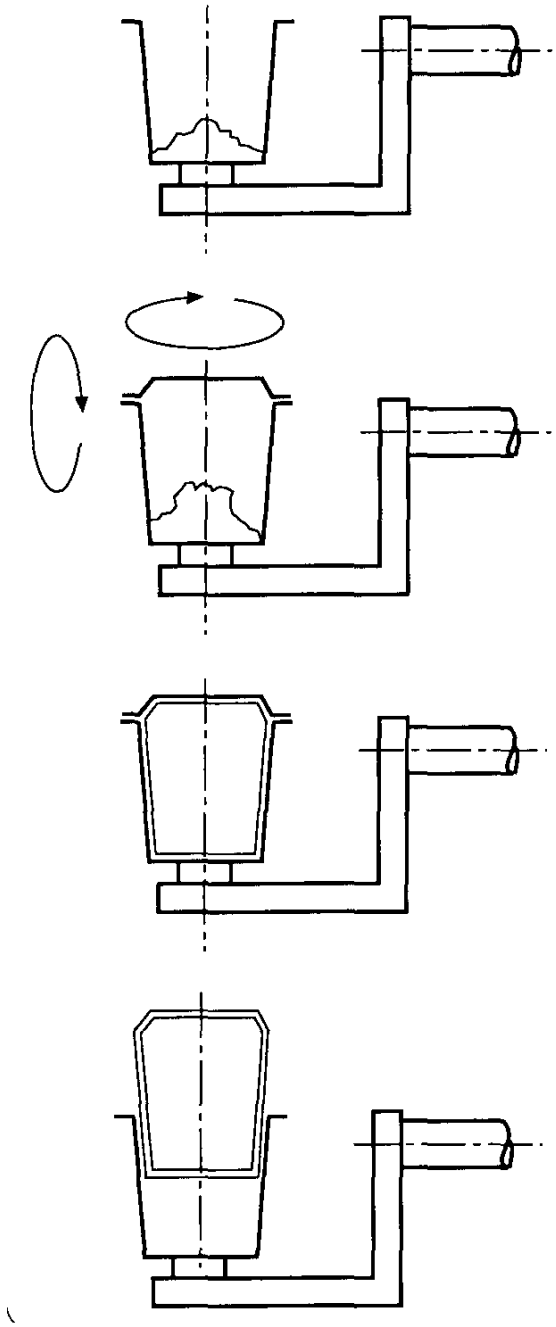
4.1.7. Rotaatiovalu

Rotaatiovalu on menetelmä, jolla voidaan valamalla valmistaa onttoja kappaleita hyvin laajalla kokovalikoimalla. Pienimmät rotaatiovaletut kappaleet voivat olla pingispallon kokoisia ja toisessa ääripäässä koon suhteen ovat kymmenien tuhansien litrojen vetoiset säiliöt. Myöskään pyöreä muoto ei ole välttämättömyys, rotaatiovalulla voidaan valmistaa kulmikkaan muotoisia laitekoteloita ja säiliöitä ja yhdistellä pyöreitä ja levymäisiä pintoja. Prosessi on paineeton, jonka vuoksi rotaatiovalun muottikustannukset suhteessa muotin kokoon muodostuvat erityisesti suurilla muoteilla suhteessa hyvin pieniksi. Suurikokoisia kestomuovisia tuotteita valmistettaessa hinnallisesti kalliiksi tekijäksi muodostuvatkin yleensä lämmitysuunin ja jäähdytysaseman yhdistelmä, jonka pitää olla riittävän suuri ja rakenteeltaan hyvin tukeva jotta muottia voidaan pyörittää sekä valmistuksen että jäähdytyksen aikana kaikissa suunnissa. Rotaatiovalu on hidas menetelmä joka vaatii suurilla kappaleilla pitkän lämmitys- ja jäähdytysajan. Vaikka menetelmä on hidas, on se suurien kappaleiden valmistuksessa erittäin käyttökelpoinen [8].

Rotaatiovaluprosessi on seuraava: Muottiin annostellaan muoviraaka-aine hienojakoisena jauheena, joka virtaa helposti jo ennen sulatilan saavuttamista. Muotti ladataan uuniin ja sitä lämmitetään ja pyöritetään siten, että muotissa oleva raaka-aine plastisoituu ulkopuolelta tuodun lämmön ja jossain määrin myös liikkeen ja hankauksen ansiosta. Sulassa tilassa oleva muovi täyttää muottia sen sisäpinnalta alkaen ja jo plastisoituneen muovikerroksen päälle sulaa uutta muovia. Kerrospaksuus kasvaa sitä hitaammin, mitä paksumpi kerros paikalla valmiiksi on, koska jo sulanut muovikerros toimii lämmöneristeenä. Toivottu kerrosvahvuus saavutetaan ennalta lasketulla raaka-ainemäärällä osin kokemusperäisesti saadussa ajassa. Tämän ajan kuluttua muotti siirretään uunista jäähdytysasemaan, jossa täsmälleen samaa liikerataa jatketaan muotille koko jäähdytyssyklin ajan. Muotin jäähdyttyä riittävästi se avataan, jonka jälkeen loppu osakiteisen kestomuovin jäähtymisestä tapahtuu varastointialueella. Jäähdytyssykli suurilla kappa-

leilla suljetussa muotissa on yleensä hyvin pitkä ja saattaa olla selvästi sulatuksessa tarvittua aikaa pidempi [27].

Kertamuoveja käytettäessä menetelmä muuttuu jonkin verran yksinkertaisemmaksi koska tällöin ei tarvita suurta lämmitysuunia ja koko valmistusoperaatio voidaan suorittaa kiinteällä paikalleen rakennetulla laitteistolla. Kuvassa 4.1.7. on esitetty periaatekuvaus rotaatiovalusta [29].



Kuva 4.1.7. Periaatekuvaus rotaatiovalusta [29].

4.1.8. Muovituotteen valmistus 3D -tulostimella

Uudehko hyvin mielenkiintoinen tulokas muovien prosessointimenetelmien joukossa on pikatulostus. Tietokoneen tulostimen kaltaisella laitteella voidaan tulostaa hyvinkin nopeasti käsin kosketeltava ABS – muovinen malli tai tuotteen yksittäiskappale. Tekniikkaa on kehitetty jo parinkymmenen vuoden ajan ja se on tehnyt läpimurron varteenotettavana tuotantomenetelmänä, jolla voidaan mallinnuksen lisäksi hyvin nopeasti valmistaa varaosia tai jopa käyttökelpoisia yksittäisiä tuotteita.

Ala kehittyy koko ajan ja tulostamista palveluna tarjoavien muovituotevalmistajien määrä on Suomessakin nopeassa nousussa. Dimensiot tulostettavassa tuotteessa voivat tällä hetkellä olla jo sitä luokkaa, että kappaleen tilavuus on useita kuutiodesimetrejä ja tulostinvalmistajat tarjoavat ABS – muovin rinnalle jo muitakin muoveja ja laajan skaalan värejä. Kehitys tässä on siinä määrin nopeaa, että verkko tarjoaa kaikkein parhaiten ajan tasalla olevan tiedon. Lähdeviitteessä oleva linkki johtaa yhden sellaisen valmistajan sivuille, joka on tehnyt muovien tulostamisen ja siihen tarvittavien muovimateriaalien kanssa kehitystyötä jo hyvin pitkään [41].

4.1.9. Lujittamattomien kesto- ja kertamuovien valmistusmenetelmien vertailua

Kuten edellä olevissa kappaleissa on jo jossain määrin todettu, lujittamattomien kesto- ja kertamuovien valmistusmenetelmät ovat suurelta osin keskenään melko samankaltaisia. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää samaa tai lähes samaa tuotantomenetelmää sellaisenaan valmistettaessa kummasta tahansa materiaalista. Kuitenkin yleisesti ottaen voidaan todeta yksi mielenkiintoinen ero valmistettaessa kesto- ja kertamuoveja erityisesti ruiskuvaluna, ahtopuristuksena tai siirtopuristuksena: Sillä hetkellä kun muotti täytetään muovimateriaalilla, on kertamuoveilla yleensä selvästi matalampi viskositeetti kuin kestomuoveilla. Tämä johtuu kertamuoveille tyypillisesti pienemmästä molekyylipainosta verrattuna kestomuovimateriaaleihin. Tämän ansiosta monimutkaisten muottien täyttäminen kertamuoveilla onnistuu selvästi helpommin. Kääntöpuolena helpommalle muotin täyttymiselle on kuitenkin se, että tällöin myös purseen muodostumisen vaara jakopinnassa ja ilmanpoistoissa on kuluneilla ja huonosti sovitetuilla tai mistä tahansa syystä (likaantuminen, kuluneet johteet yms.) epätiiviisti sulkeutuvilla muoteilla selvästi suurempi [22].

Seuraavien sivujen taulukoissa vertaillaan aluksi eri valmistusmenetelmien soveltuvuutta kesto- ja kertamuoveille lujitettuina ja lujittamattomina [8] ja sen jälkeen kolmea hyvin tyypillistä muovien valmistusmenetelmää [8].

Menetelmä/materiaali	Menetelmän soveltuvuus: Kestomuovit	Kertamuovit	Lujitetut Kestomuovit	Lujitetut Kertamuovit
Valaminen	SOVELTUU 1*	HYVÄ		
Ahtopuristus	SOVELTUU 2*	HYVÄ	SOVELTUU 2*	HYVÄ
Siirtopuristus	HYVÄ	HYVÄ		
Tasopuristus	HYVÄ	HYVÄ	HYVÄ	HYVÄ
Kalvopuristus			HYVÄ	HYVÄ
Ruiskuvalu	HYVÄ			
Monikomponenttiruiskuvalu	HYVÄ			
Mikroruiskuvalu	HYVÄ			
Puhallusmuovaus	HYVÄ			
Lämpömuovaus	HYVÄ			
Rotaatiovalu	HYVÄ	HYVÄ		SOVELTUU
Kalanterointi	HYVÄ	HYVÄ		
Käsinlaminointi				HYVÄ
Ruiskulaminointi				HYVÄ
Pultruusio				HYVÄ
Ekstruusio	HYVÄ	HYVÄ		
RTM		HYVÄ	SOVELTUU	SOVELTUU
RIM		HYVÄ		
SRIM			HYVÄ	
Kuitukelaus				HYVÄ
Valssaus	HYVÄ	HYVÄ	SOVELTUU	

1* Sulan tulee olla riittävän juoksevaa (esim. CA, PE, PA)

2* Soveltuu melko huonosti kestomuoveille

Taulukko 4.1.8.1. Tärkeimpien muovimateriaalien valmistusmenetelmien soveltuvuus kesto- ja kertamuoveille lujitettuina ja lujittamattomina [8].

Kuten taulukosta voidaan havaita, kestomuovien valmistukseen on käytettävissä varsin laaja skaala erilaisia menetelmiä ja monet näistä menetelmistä ovat sovellettavissa myös kertamuovien valmistukseen. Sen sijaan varsinkin lujitettujen kestomuovien valmistukseen soveltuvia menetelmiä on käytettävissä selvästi vähemmän kuin mitä on vastaavia lujitettujen kertamuovien valmistukseen soveltuvia menetelmiä.

Seuraavan sivun taulukossa 4.1.8.2. vertaillaan kolmea tyypillistä muovien valmistusmenetelmää keskenään: Hyvin yleistä pienten ja keskisuurten kappaleiden suurille sarjoille käytettävää ruiskuvalua, suurien yksittäiskappaleiden valmistukseen hyvin soveltuvaa ahtopuristusta ja hieman näitä molempia muistuttavaa siirtopuristusta [8].

Ominaisuus	Ahtopuristus	Siirtopuristus	Ruiskuvalu
Muovimateriaali	Kertamuovi	Kertamuovi	Kestomuovi
Muotin lämmitys	Kyllä	Kyllä	Ei
Tyypillinen sykliaika	Minuutteja	Minuutteja	Sekunteja
Kierrätettävyys	Ei	Ei	Kyllä
Avoin/suljettu muotti	Avoin	Suljettu	Suljettu
Tuotteen monimutkaisuus	Yksinkertainen	Monimutkainen	Monimutkainen
Reiät tuotteessa	Vaikeaa valmistaa	Keernojen avulla	Keernojen avulla
Insertit	Vaikeita asettaa	Helppoja asettaa	Keskinkertaisia asettaa
Ulokkeet muotissa	Ei	Kyllä	Kyllä
Tuotteen koko	Voi olla hyvin suuri	Rajallinen koko	Rajallinen koko
Purse	Kyllä	Ei	Ei
Syöttökanavan tappi	Ei	Kyllä	Kyllä
Hartsin viskositeetti	Keskinkertainen-korkea	Matala-keskinkertainen	Matala-keskinkertainen
Lujitteet	Kyllä, myös pitkiä	Jonkin verran, lyhyitä	Jonkin verran, lyhyitä
Suuntautuvuus	Asetettavissa	Vähäinen	Keskinkertainen

Taulukko 4.1.8.2. Ahto- ja siirtopuristuksen sekä ruiskuvalun tyypillisten ominaisuuksien vertailua [8].

4.2. Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmiä

Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmät voidaan yleisellä tasolla jakaa kolmeen ryhmään: Laminointimenetelmiin, painevalumenetelmiin ja puristusmenetelmiin. Laminointimenetelmiin kuuluvat käsinlaminointi, ruiskulaminointi ja kuitukelaus. Painevalumenetelmiä ovat RTM, RIM, ruiskuvalu ja keskipakovalu. Puristusmenetelmiä ovat siirtopuristus, ahtopuristus, suulakeveto eli pultruusio ja valssaus. Jälkimmäisistä siirto- ja ahtopuristus on esitelty jo kestomuovien valmistamismenetelmien esittelyn yhteydessä luvuissa 4.1.2.1. ja 4.1.2.2. Kestomuoveihin verrattuna lujitettuja kertamuoveja käytettäessä näiden prosessien olennaisin ero liittyy ulkopuoliseen lämmöntuontiin: Useimmissa tapauksissa ei ole välttämätöntä tarvetta saada lämpöä prosessiin sen ulkopuolelta, joskin monesti se kyllä nopeuttaa tuotantoprosessia [24].

4.2.1. Laminointimenetelmät

Laminointimenetelmät ovat yhteisnimitys valmistusmenetelmille, joissa käytännössä joko vuorotellen tai yhtäaikaisesti muottia täytetään polymeroituvalla hartsilla ja lujittavilla täyteaineilla. Tällaisia lujittavia aineita voivat olla erilaiset kuidut ja niistä valmistetut tasomaiset kudokset, matot jne. Myös pitkiä mono- tai multifilamenttimuodossa olevia lankoja voidaan käyttää sellaisenaan lujitteena. Yksittäisten lankojen käyttöä kuitenkin rajoittaa yleensä se, että niiden paikalla pitämiseen valmistuksen aikana tarvitaan jokin menetelmä. Tämän työn tekijä on itse nähnyt teollisuudessa sovelluksen muotista,

jossa tasomaisen kappaleen lujittamiseen käytettävät yksittäiset langat pujoteltiin koukkuihin varsinaisen muotin muovaavan osan ulkopuolelle ennen muotin sulkemista ja hartsin lisäämistä muottiin [24].

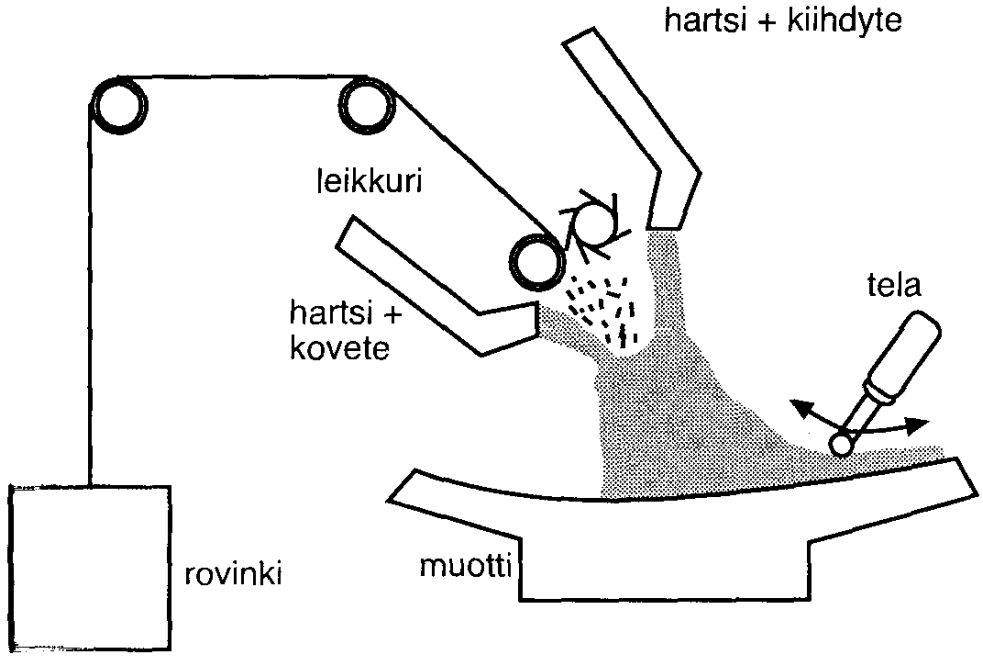
4.2.1.1. Käsinlaminointi

Käsinlaminointi on käyttökelpoinen pienten sarjojen ja suurehkojen yksittäiskappaleiden valmistusmenetelmä. Käytettävät muotit ovat yleensä hyvin yksinkertaisia, laminoimalla valmistettuja naarasmuotteja. Yksinkertainen ja edullinen tapa valmistaa tällainen muotti on laminoida aluksi tukeva rakenne tuotteen piirustusten mukaan valmistetun mallineen päälle, jonka jälkeen syntynyttä kuoriosaa voidaan käyttää muottina halutun tuotteen monistamiseen. Menetelmänä käsinlaminointi jakautuu vielä kahteen alalajiin: Märkälaminointiin ja kuiva- eli prepreglaminointiin. Edellisessä lujitekerroksina tavallisesti käytetty kudosmatto kostutetaan nestemäisellä hartsilla ennen seuraavan lujitekerroksen lisäämistä. Jälkimmäisessä tapauksessa laminoitaessa käytetään esikyllästettyjä puolivalmisteita eli prepregejä. Vaikka märkälaminointi on käytännössä puhtaasti käsityömenetelmä, saadaan huolellisella lujitteiden asettelulla, kostutuksella ja ilmanpoistolla valmistettavasta tuotteesta luja kaikissa kuormitussuunnissa. Tyypillinen tuote tässä ryhmässä on esimerkiksi yksittäisvalmistettu pieni vene tai vaikkapa perämoottorin lasikuituinen suojakoppa [24].

4.2.1.2. Ruiskulaminointi

Ruiskulaminointi on suurten yksittäiskappaleiden valmistuksessa käsinlaminointia selvästi tehokkaampi ja nopeampi menetelmä. Maaliruiskun tyyppisellä paineilmaruiskulla ruiskutetaan kerroksittain hartsia ja lujitekuituja työkappaleen vahvuutta tasomaisesti kasvattaen. Tällä tavoin valmistetussa tuotteessa lujitekuitujen orientaatio on kuitenkin yleensä hyvin sattumanvaraista. Mikäli lujitekuitujen lujittava vaikutus halutaan saada lähelle laskennallista maksimiaan, voidaan tuotteeseen yhdistää käsinlaminointia, kudottuja lujitekerroksia ja ruiskulaminointia. Ruiskulaminointi on käsinlaminoinnin tapaan hyvin suurelta osin käsityömenetelmä, koska itse ruiskutus tapahtuu yleensä käsivaralta ja myös laminoitujen kerrosten ilmanpoisto ja mahdollisten tasomaisten lisälujitekerrosten asettelu ja telaus on käsityötä. Tyypillinen tuote tässä ryhmässä on esimerkiksi lasikuituvene tai suurehko säiliö [24].

Ruiskulaminoinnin periaate on esitetty kuvassa 4.2.1.2. Kuvaan lujitekuiduksi merkitty rovinki tarkoittaa tässä tapauksessa yleisesti pitkäkuituista työssä käytettävälle hartsille soveltuvaa lujitemateriaalia [24].



Kuva 4.2.1.2. Ruiskulaminoinnin periaate [24].

4.2.1.3. Kuitukelaus

Kuitukelaus on menetelmä, jota käytetään sylinterimäisten ja kartiomaisten putkien ja kuorirakenteiden valmistamiseen. Kuitukelauksessa lujitekuitu vedetään keloilta altaan läpi, jolloin lujitekuidut kostuvat tavallisesti polyesteri- epoksi- tai fenolihartsilla. Tämän jälkeen kuidut kelataan sopivalla syötöllä ja etenemisnopeudella koiraspuolisen sylinterimäisen muotin päälle. Kuitukelauksen tavoite on aivan sama kuin molempien edellä esitettyjen laminointimenetelmien: Hartsilla kostutetut vahvikekerrokset laminoituvat ja kovettuvat kelattuun muotoon. Kelausta jatketaan tavoitepaksuuden saavuttamiseen asti ja kovettumisajan jälkeen muottina toimiva sylinteri tai kartio voidaan poistaa ja tuote on mahdollisia jälkikäsittelyjä lukuun ottamatta valmis. Jälkikäsittelynä tuotteelle tavallisesti tehdään hionta ja maalaus [24].

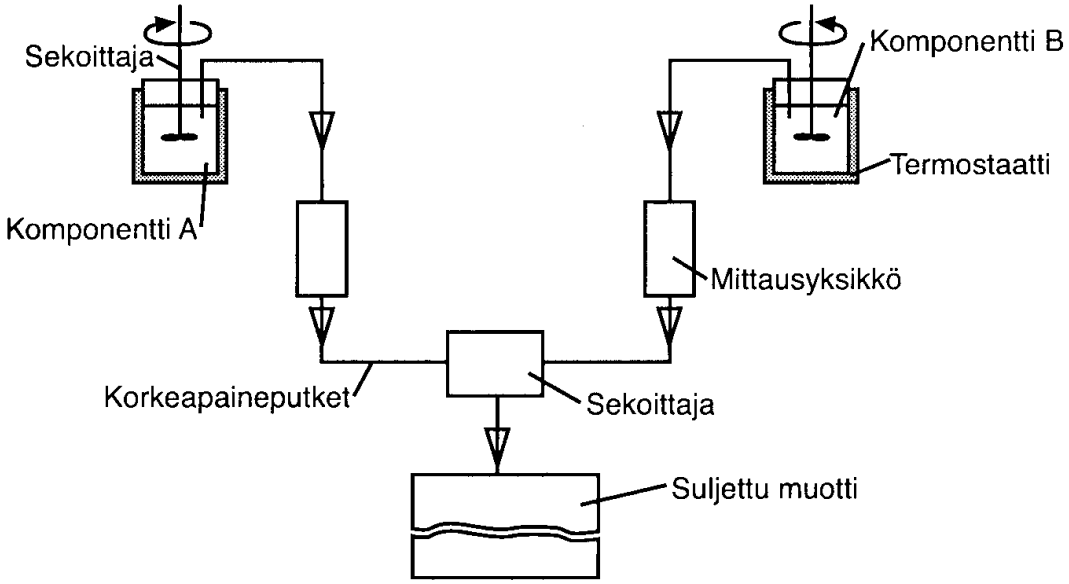
4.2.2. Paineinjektio (RTM)

RTM- eli paineinjektiomenetelmässä muotti aluksi käsitellään valmiin kappaleen irtoamista helpottavalla irrotusaineella, jonka jälkeen muottiin asetellaan mahdolliset lujit-

teet tai lujiteaihio. Tämän jälkeen nestemäisessä muodossa oleva hartsi injektoidaan muottiin yli- tai alipaineen avulla. Hartsin kovetuttua kappale poistetaan muotista ja se on valmis joko sellaisenaan tai mahdollisten jatkokäsittelyjen jälkeen joita ovat esimerkiksi purseenpoisto ja pintakäsittely. Menetelmänä RTM soveltuu hyvin pienille sarjoille. Sen muottiaika on normaalisti n. 15-20 minuuttia ja sitä voidaan tarvittaessa nopeuttaa raaka-aineena käytettävän hartsin esilämmityksellä ja myös muotin lämmityksellä hartsin reaktion aikana. [24]

4.2.3. Reaktioruiskuvalu RIM

Reaktioruiskuvalu eli RIM-menetelmä eroaa nimityksestään huolimatta selvästi tavallisesta kerta- tai kestomuovien ruiskuvalusta. Kun tavallisessa ruiskuvalussa muovimateriaali plastisoidaan ruuvilla ennen ruiskuttamista muottipesään, on RIM-menetelmässä raaka-aineet valmiiksi nestemäisinä komponentteina kahdessa tai useammassa säiliössä. Ennen ruiskutustapahtumaa raaka-aineet annostellaan sekoituspäähän, josta annos ruiskutetaan muottiin. SRIM – menetelmässä muottiin asennetaan ennen ruiskutusta lujiteaihio [23]. Kuvassa 4.2.3. on esitetty RIM – menetelmän periaate [24].



Kuva 4.2.3. RIM – menetelmän periaate [24].

Molempien menetelmien varsinaisena etuna on tavalliseen ruiskuvaluun verrattuna muotin pienempi tarvittava sulkuvoima ja siten myös kevyempi rakenne. Reaktioruiskuvalun raaka-aineissa tapahtuu sekoituksen jälkeen hyvin nopea reaktio joten muotin täyttymisajan täytyy aina olla kovettumisaikaa nopeampi. Tämän johdosta sekä raaka-aineiden lämpö että muotin lämpötila pitää olla tarkasti kontrollissa. Lämpötilat ovat

kuitenkin tavalliseen ruiskuvaluprosessiin verrattuna hyvin alhaisia joka voidaan lukea prosessin eduksi [23].

4.2.4. Ruiskuvalu

Ruiskuvalun tarkempi kuvaus on esitetty kappaleessa 2.1.4. Sen lisäksi, että se on eniten käytetty kestomuovituotteiden valmistusmenetelmä, ruiskuvalua voidaan käyttää myös lujitettujen kertamuovikappaleiden valmistusmenetelmänä. Tässä tapauksessa lujitteet on seostettu valmiiksi raaka-aineena käytettyyn materiaaliin, joka annostellaan tuotantoprosessiin granulaattimuodossa. Koska ruiskuvalukoneen ruuvissa tapahtuva sulaminen muokkaa materiaalia hyvin voimakkaasti, lyhenee normaaleilla lujitetuilla ruiskuvalumateriaaleilla lujitepituus lopullisessa tuotteessa yleensä hyvin lyhyeksi. On kehitetty materiaaleja, joilla lujitepituus pysyy pidempänä mutta tällöin lujitteet orientoituvat tuotteessa helposti siten, että lujitus on hyvä vain yhdessä suunnassa jättäen siten lujituksen heikoksi muissa suunnissa [24].

4.2.5. Puristusmenetelmät

Puristusmenetelmät ahtopuristus, siirtopuristus ja kalvopuristus ovat kertamuovimateriaaleilla hyvin samankaltaisia menetelmiä kuin mitä ne ovat käytettäessä kesto- muovimateriaaleja. Kyseiset menetelmät on esitelty luvuissa 4.1.2.1 ja 4.1.2.2. Suurimpana erona työskenneltäessä kertamuovimateriaalien kanssa on raaka-aineen toisistaan poikkeava luonne: Kuten jo aiemmin on todettu, tarvitaan kestomuovin sulattamisessa juoksevaan muotoon runsaasti energiaa ja kun materiaali on saatu muottiin, tuotetta ja muottia pitää tavallisesti jäähdyttää. Vastaavasti kertamuovien raaka-aineet ovat yleensä valmiiksi juoksevassa muodossa ja reaktio itsessään monissa tapauksissa generoi lämpöä. Materiaalin lämmitys ei ole tarpeen mutta muottia pitää tilanteen mukaan jäähdyttää, pitää sellaisenaan tai joissain tapauksissa reaktion nopeuttamiseksi lämmittää.

Seuraavana esiteltävä märkäpuristus on valmistusmenetelmä, joka poikkeaa aiemmin esitellyistä ja on käytössä vain ja nimenomaan lujitetuilla kertamuovimateriaaleilla [28].

4.2.5.1. Märkäpuristus

Märkäpuristus on ahtopuristuksen tapainen menetelmä, jossa muottiin asetetaan aluksi lujitteet tai lujiteaihio jonka jälkeen hartsiseos kaadetaan lujitteiden päälle ja muotti suljetaan. Märkäpuristuksessa käytettävä puristuspaine on varsin alhainen ja tarvittaessa kovettumisen nopeuttamiseksi annetaan tuotteelle puristusvaiheessa lisälämpöä, jolloin menetelmää kutsutaan usein kuumapuristukseksi [28].

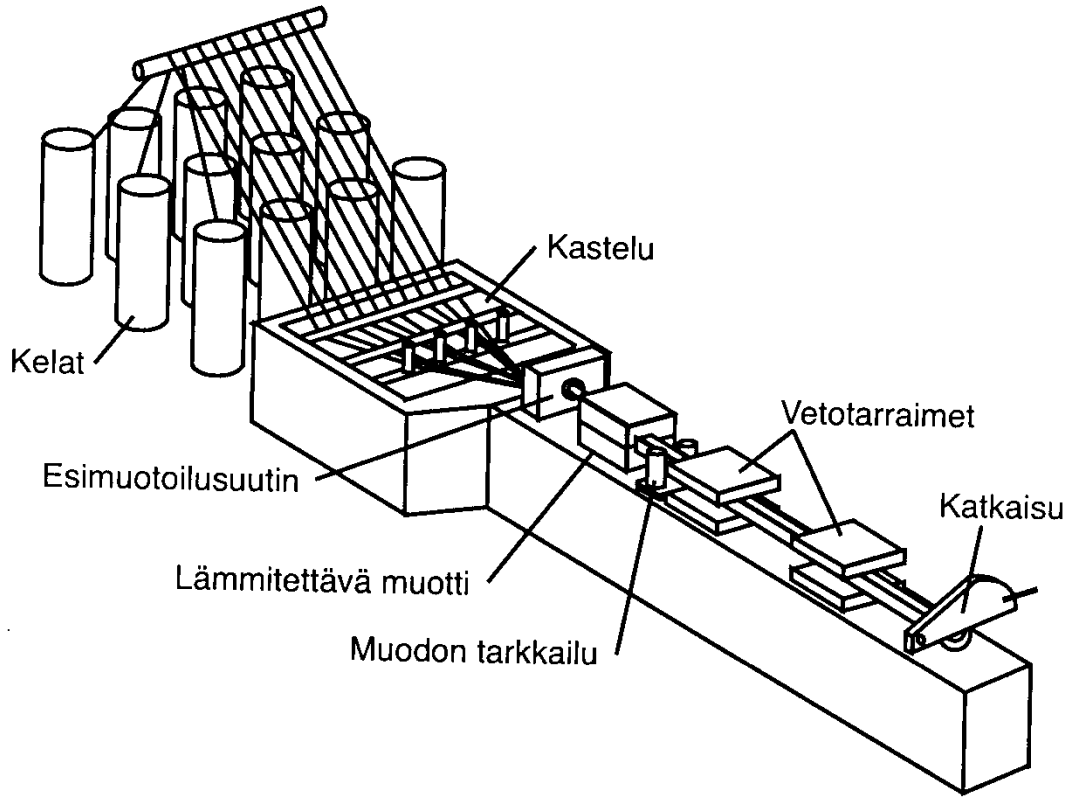
Kuumapuristusmenetelmästä on olemassa useita muunnoksia, joissa muotoon puristettavana raaka-aineena käytetään monentyyppisiä puolivalmisteita. Tällaisia kuumapuristettavia puolivalmisteita ovat esimerkiksi BMC-massa ja SMC-levyaihiot. BMC-massa

on hyvin helppokäyttöistä ja varmatoimista taikinamaista massaa, joka sisältää valmiiksi kaikki tarvittavat lujite- ja täyteaineet. SMC-levyaihiot ovat BMC-massan kanssa samankaltaisia, tarvittavat lujite- ja täyteaineet sisältäviä levymuodossa toimitettavia puolivalmisteita joita voidaan jatkojalostaa valmiiksi tuotteiksi yleensä juuri ahtopuristamismenetelmällä [28].

4.2.6. Suulakeveto eli pultruusio

Pultruusio on jatkuvatoiminen tankojen, putkien ja profiilien valmistusmenetelmä. Prosessi on yleensä hyvin automaattinen ja sen tuotantonopeus voi olla useita metrejä valmista tuotetta minuutissa. Kaikkein yksinkertaisimmassa tuotantoversiossa lujitteet vedetään keloilta kostutusaltaan kautta tuotteelle muodon antavan lämmitetyn suulakkeen läpi. Vetoon tarvittava voima kohdistetaan valmiiseen tuotteeseen ja vetolaitteena voi toimia esimerkiksi telaketju tai vuorottelevat tarraimet [24].

Tavallisin pultruusiossa käytettävä lujite on lasikuitu ja tyypillisin hartsi on polyesteri. Pultruusio on kuitenkin menetelmänä laajasti ja enenevässä määrin käytössä ja sen vuoksi lujite- ja hartsimateriaaleja on saatavilla hyvin laaja kirjo. Menetelmällä valmistetaan esimerkiksi rakennusteollisuudessa käytettäviä putkia, profiileja ja urheiluvälineitä kuten suksisauvoja ja mailanvarsia [24]. Kuvassa 4.2.6. on esitetty tyypillinen pultruusiolaitteisto.

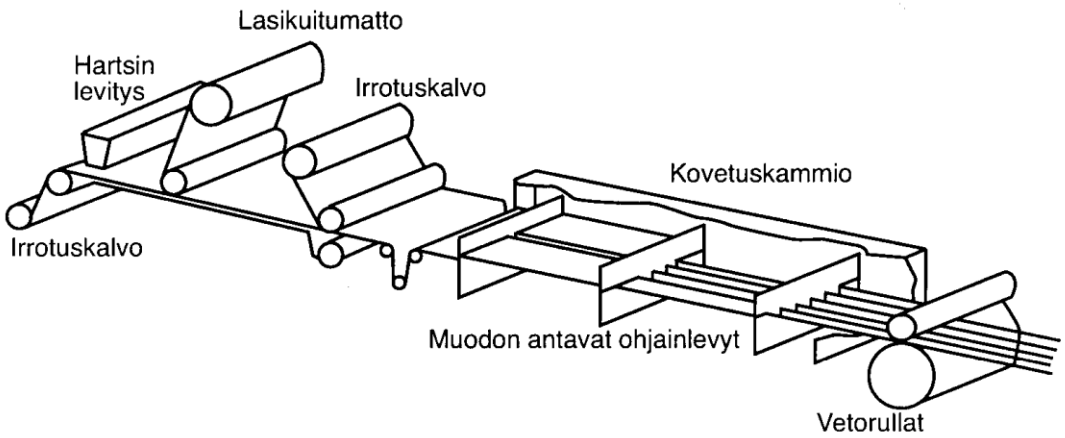


Kuva 4.2.6. Tyypillinen pultruusiolaitteisto [24].

4.2.7. Valssaus

Myös valssaamalla voidaan valmistaa levymäisiä valmiita tuotteita ja erilaisia puolivalmisteita materiaaleiksi jatkojalostukseen kertamuovimateriaaleista. Tällöin lujitteet ja hartsi syötetään kahden suojakalvon väliin, muotoillaan levy haluttuun paksuuteen ja kovetetaan tuote jatkuvatoimisesti linjan loppupäässä sijaitsevassa uunissa tai infrapunalämmittimien avulla. Valssaamalla saatava tuotannon määrä on yleensä varsin suuri ja tarvittavat laiteinvestoinnit ovat kalliit joten valssaus sopii yleensä vain hyvin suurien sarjojen kustannustehokkaaseen tuotantoon[24].

Elastomeerien valmistuksen puolella valssaus on hyvin tyypillinen ja paljon käytetty valmistusmenetelmä. Se sopii erityisen hyvin kaikenlaisten vahvikkeellisten ja vahvikkeettomien kumimattojen ja puolivalmisteiden tuotantoon. Valssaamalla saatetaan ajaa useiden vuorokausien mittaisia sarjoja. Valssaus soveltuukin erityisen hyvin materiaalin tuotantoon jatkuvatoimisesti rullatavarana. Tällöin samalla linjalla voidaan samoista raaka-aineista ajaa peräkkäin ilman katkoa sarja eripaksuisia raaka-aineita jatkojalostuksen tarpeisiin [24]. Kuvassa 4.2.7. on esitetty valssauslaitteiston periaate [24].



Kuva 4.2.7. Valssauslaitteiston periaate [24].

4.2.8. Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmien vertailua

Seuraavissa taulukoissa verrataan keskenään kestomuovien valmistusmenetelmiä. Taulukkoon 4.2.8.1. on aluksi koottu lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmiä joista verrataan niiden tuotantonopeutta ja suoran työn osuutta kustannuksista. Samassa taulukossa on myös tyypillisiä eri valmistusmenetelmille soveltuvia kappalekokoja [24].

VALMISTUS-MENETELMÄ	TUOTANTONOPEUS Kg/h	KESKIKOKOINEN KAPPALE Kg	SUORAN TYÖN OSUUS KUSTANNUKSISTA %
Käsinlaminointi:			
pienet kappaleet	1-5	2-10	60-70
suuret kappaleet	5-15	20-200	40-60
Ruiskulaminointi	10-30	10-30	30-50
Alipainesäkki	3-6	10-30	40-60
Kylmäpuristus	10-30	5-15	25-40
Kuumapuristus	20-50	5-15	25-40
RTM	20-40	5-30	15-30
RRIM	10-40	2-8	20-40
SMC	20-100	2-10	10-30
GMT	10-40	2-10	15-35
Pultruusio	10-30	-	20-30
Kelaus	5-50	5-50	15-30

Taulukko 4.2.8.1. Lujitettujen kertamuovien valmistusmenetelmien vertailua [24].

Seuraavassa taulukossa 4.2.8.2. vertaillaan eräiden kesto- ja kertamuovivalmistusmenetelmien välillä niiden keskinäistä energiankulutusta [25].

Materiaali ja prosessi	Energian-kulutus kWh/kg	Lisähuomautukset
Lämpömuovattu ABS	6,10	Paljon energiaa kuluttava infrapunalämmitys
Rotaatiovalettu PE	5,80	Paljon energiaa kuluttava pitkä tuotantosykli
Ruiskuvalettu modifioitu PA	2,60	Korkea sulatuslämpötila ja kitka- ja sulkuvoimat
Ruiskuvalettu PC/PBT	2,50	
Ruiskuvalettu PP	1,98	
Ruiskuvalettu PVC	1,80	
Reaktioruiskuvalettu PUR	1,25	Alhainen muottilämpötila ja eksoterminen reaktio
Reaktioruiskuvalettu PDCPD	1,25	Alhainen muottilämpötila ja eksoterminen reaktio

Taulukko 4.2.8.2. Muovien valmistusmenetelmien energiankulutuksen vertailua [25]

Viimeisessä taulukossa 4.2.8.3. seuraavalla sivulla verrataan lujitettujen kertamuovien tyypillistä muottikustannusta vuoden 2007 hintatason mukaan. On tietenkin muistettava, että sekä muotti- että investointikustannukset ovat suoraan verrannollisia suhdanteisiin: Matalasuhdanteessa materiaalit ovat yleensä jonkin verran edullisempia ja työ saatetaan joskus myydä hyvinkin edullisesti, jotta selvittäisiin huonojen aikojen yli. Korkeasuh-

danteessa tilaajan täytyy varautua aivan päinvastaiseen ja silloin myös muottien valmistuksen nopeus on jotain aivan muuta kuin matalasuhdanteen aikaan [24].

VALMISTUS-MENETELMÄ	Muottikustannus, keskivertokappale k€	Laiteinvestointi x 1000€
Käsinlaminointi:	1-2	3-15
Ruiskulaminointi	1-2	10-30
Alipainesäkki	1-2	10-30
Kylmäpuristus	2-3	30-50
Kuumapuristus	5-8	50-100
RTM	2-3	15-30
RRIM	5-10	50-100
SMC	10-30	100-300
GMT	10-30	100-300
Pultruusio	3-5	100-250
Kelaus	3-20	50-200

Taulukko 4.2.8.3. Lujitettujen kertamuovien muotti- ja laitekustannuksia. [24]

Lähteenä käytetyssä teoksessa vertaillaan enemmänkin erilaisten valmistustekniikoiden, raaka-aineiden ja jopa muotojen kustannusvaikutusta muovituotteen valmistuksessa. Hintatietoja listattaessa muistettava kuitenkin on, että kaikkeen teolliseen toimintaan vaikuttavat hyvin voimakkaasti jo edellisessä kappaleessa mainitsemani suhdanteet. Siksi päätänkin tämän luvun kertomalla tarinan eräästä entisestä kollegastani suurehkossa suomalaisessa teollisuuslaitoksessa 1990 – luvun alun lamavuosina. Budjettikäsittelyn yhteydessä hän teki useana vuonna investointiehdotuksen osastonsa avainasemassa olevan koneen uusimisesta ja merkitsi aina ehdotukselleen saman perustelun: ”Että meillä ei olisi viimeiset piipussa sitten kun nousukausi iskee”. Kyseinen perustelu ei tietenkään ollut missään vaiheessa riittävä vakuuttamaan yhtiön ylintä johtoa uuden koneen hankkimisen taloudellisesti kestävästä perustasta. Nousukausi tuli kuitenkin hetken kuluttua tuolle alalle sellaisella rytinällä, että yhtiön oli 90-luvun puolivälissä investoitava hyvin nopeassa tahdissa peräti kaksi uutta hänen tekemänsä ehdotuksen kaltaista konetta. Koska nousukausi ko. alalle oli muuttunut hetkessä globaaliksi, koneiden toimitusaika muodostui merkittävästi pidemmäksi ja hinta paljon korkeammaksi kuin kollegani tekemän investointiehdotuksen liitteenä olevassa tarjouksessa oli ollut.

5. KÄYTÄNNÖN ESIMERKKI

Käytännön esimerkiksi valikoitui nastolalaisen Raute Oyj:n tuotekehitysprojektiin liittyvä osa, jota kuvataan tässä työssä nimellä ”nappi”.

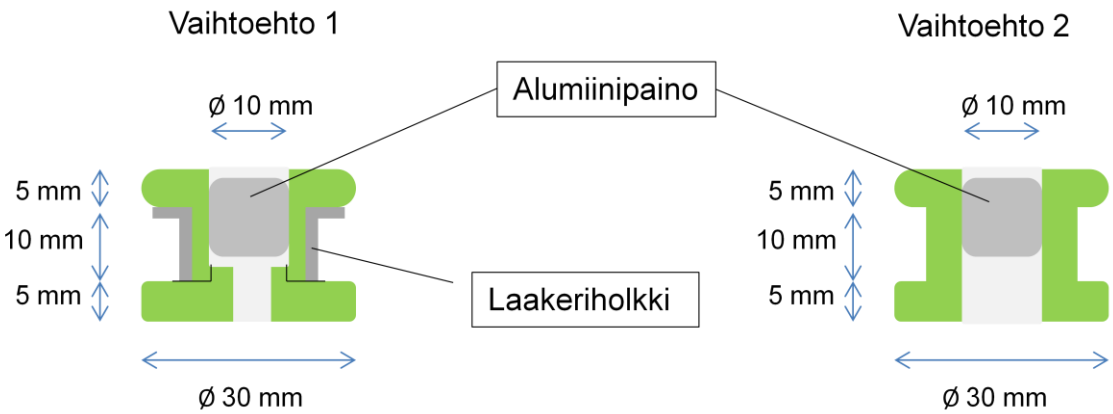
5.1. Raute Oyj taustaa

Raute on puutuotetoimialaa maailmanlaajuisesti palveleva teknologia- ja palveluyritys, jonka tärkeimmät asiakasteollisuudet ovat vaneri- ja LVL-teollisuus. Lyhennys LVL tulee sanoista ”Laminated Veneer Lumber” ja se tarkoittaa rakenteeltaan vanerin tavoin liimaamalla koottua palkkia, johon puuviilu asemoidaan ja liimataan kaikissa tai lähes kaikissa viilukerroksissa puun aksiaalisessa suunnassa palkin kantavuuden maksimoimiseksi.

Raute on maailmanlaajuinen markkinajohtaja vaneriteollisuudessa 15–20 prosentin markkinaosuudellaan ja LVL-teollisuudessa Rautella on myös vahva markkina-asema. Tuotannollista toimintaa Raute harjoittaa neljässä yksikössä, Nastolassa, Kajaanissa, Kanadan Vancouverissa ja Kiinassa Shanghain alueella. [38]

5.2. Kehitysvaiheessa olevan tuotteen materiaalinvalinta

Kehitysvaiheessa oleva tuote on pyörähdyssymmetrinen kappale, joka kulkee radalla kahden kiskon välissä. Sen rakenne ja päämitat selviävät seuraavasta kuvasta 5.2.1.



Kuva 5.2.1. Tuotteen ”nappi” vaihtoehtoinen rakenne ja tärkeimmät päämitat [43].

Tuotteen mitoitus on kuvassa 5.2.1. vielä vajavainen, mutta tässä vaiheessa sen antamat tiedot riittävät tuotekehitysvaiheen valmistusmateriaalin ja valmistusmenetelmien haarukointiin. Tuotteeseen kuvassa asennettu alumiinipaino on kappale, joka pitää ottaa sellaisenaan ja siksi materiaalinvalinta keskittyy tässä vain sen ympärillä olevaan osuuteen. Tuotteesta saatujen esitietojen valossa se on hyvin tyypillinen esimerkki osasta, jonka tärkeimmät ominaisuudet eivät painotu valmistustarkkuuteen, muotojen tai mittojen täsmälliseen pysyvyyteen tai suureen kuormankantokykyyn. Seuraavassa luvussa 5.3. on esitettynä tuotteen vaatimusprofiilin listaus, johon on koottu sen tärkeimmät tunnistetut ominaisuudet.

5.3. Tuotteen vaatimusprofiilin laatiminen

Luvussa 2.1.2. systemaattinen tuotteen suunnitteluprosessi esiteltiin kaaviokuvassa 2.1.2.1: Tuotteen suunnitteluprosessin vaiheet [33]. Tässä tapauksessa tuotteen suunnittelussa ei tarvitse lähteä liikkeelle aivan alusta, koska asiakas on jo hahmotellut haluamaansa tuotetta ja toimittanut siitä kaksi vaihtoehtoista kuvaa. Tilanne vastaa sellaista, jossa olemassa olevan tuotteen materiaali halutaan vaihtaa toiseksi.
Jotta kaikki tuotteen valmistamisessa tarvittavat tiedot olisivat käytettävissä, asiakkaan kanssa pidettiin palaveri ja selvitettiin olennaiset tuotteen käyttötapaan ja olosuhteisiin liittyvät tiedot. Koska tuote on vielä toistaiseksi osa tuotekehitysprojektia, kaikkia siihen liittyviä faktoja ei voida julkistaa, jolloin osa tuotteen vaatimuksista pitää ottaa vastaan sellaisena kuin asiakas on ne ilmoittanut. Suunnitteluvaiheessa saadut tiedot on listattuna taulukossa 5.3.1.

Tarve ja tarvittavat toiminnot	Kevyt ja edullinen rataa pitkin kevyesti kulkeva kappale
Toimintaperiaate ja rajoitukset	Kappaleen tulee pyöriä ja liukua kiskoparin välissä useissa eri asennoissa. Kuorma vähäinen, kitkan oltava pieni.
Sopivin konsepti jatkotyöstettäväksi	Pyörähdyskappale, valmistusmateriaaliksi valitaan konsepti-vaiheessa edullinen ja pienikitkainen muovi.

Tuotteen muodot, mitat ja mallinnus	Tuotteen muodot ja mitat kuvan 5.2.1. konseptin mukaan Tuotekehitysvaiheessa tutkitaan kahta hieman toisistaan poikkeavaa toteutusvaihtoehtoa.

Suorituskyky ja kustannukset	Tuotteen valmistus tuotekehitysvaiheessa joitakin satoja kappaleita. Lopullinen tarve on vähintään kymmeniä tuhansia.
Tuotteen prosessointitapa	Tuotekehitysvaiheessa koneistus tangosta. Jos suursarja-valmistus toteutuu, todennäköisin valmistustapa on ruiskuvalu.
Tarkemmat piirustukset	Piirustus on riittävän tarkka vaihtoehdon kaksi toteuttamiseen Ja sen toiminnan testaamiseen tuotekehitysvaiheessa.

Taulukko 5.3.1. Tuotteen suunnitteluprosessin taustatiedot konseptointia varten.

Seuraavassa vaiheessa vastattiin yksityiskohtaisemmin tuotteen materiaalin valintaan vaikuttaviin kysymyksiin sen esimerkkilistan perusteella, joka on esitettynä luvussa 2.1.3: Tuotteen vaatimusprofiilin laadinta. Taulukossa 5.3.2. on esitettynä tuotteen materiaalin valintaan liittyvää vaatimusprofiililaadintaa varten kerättyjä tietoja.

Tuotteen käyttöominaisuudet:	**Vaaditut ominaisuudet**
tuotteen paino	Tuotteen paino ei ole määräävä tekijä
tuotteen lujuus	Tuotteen tulee kestää alle 10N kuormaa
tuotteen mekaaninen kestävyys	Mekaaninen rasitus lähinnä liukukitkaa
tuotteen kemiallinen kestävyys	Ei merkittävää tunnistettua altistusta
Tuotteen suunniteltu käyttöikä	Useita tuhansia käyttötunteja
Tuotteen käyttöolosuhteet	Tavanomaiset, helpot
Tuotteen epätyypillinen käyttö	Ei ole tunnistettu tässä vaiheessa
Tuotteen ympäristövaikutukset:	
valmistukseen liittyvät määräykset	Ei valmistukseen liittyviä määräyksiä
materiaalille annetut määräykset	Ei materiaalille annettuja määräyksiä
kierrätettävyys ja korjattavuus	Vaurioitunut tuote vaihdetaan uuteen
Valmistussarjan suuruus	Tuote on oltava helposti valmistettavissa
tuotekehitysvaiheessa	Enintään joitakin tuhansia kappaleita
tuotantovaiheessa	Kymmeniä - satoja tuhansia kappaleita
Tuotantokustannus	Optimoidaan mahdollisimman pieneksi
Valmistussarjan ajallinen pituus	Todennäköinen pituus kuukausia - vuosia
1. erä mahdollisimman pian K/E?	Tarve nopeasti koe-erään
Mahdolliset valmistusmenetelmät	Koneistus tai ruiskupuristus ja kokoonpano
Valmistukseen tarvittava osaaminen	Alihankintaa + kokoonpanotyö (liimaus)
Valmistukseen tarvittavat välineet	Liimauksessa tarvittavat aineet ja välineet

Taulukko 5.3.2. Tuotteen materiaalin valintaan liittyviä ominaisuuksia

Nyt voidaan koota yhteen tähän mennessä kerätyt lähtötiedot ja todeta kaaviokuvassa 2.2.1.1. esitetyn yksinkertaistetun materiaalinvalinnan mallin perusteella muutamia asioita. Vaikuttaa ensinnäkin siltä, että tuotteen käyttöolosuhteet tunnetaan hyvin. Voidaan todeta, että kappale ei joudu alttiiksi suurelle lämpörasitukselle, UV-valolle tai voimakkaille kemikaaleille. Edelleen tiedetään, että kappaleelle aiheutuva mekaaninen rasitus on vähäistä. Näillä perusteilla muovit vaikuttavat hyvin käyttökelpoiselta materiaaliryhmältä kappaleen valmistusmateriaalin valinnassa. Tästä seuraa kaaviokuvan 2.1.3.1. mukaisesti se, että materiaalin valintaa voidaan ryhtyä tarkentamaan yksittäisiin vaihtoehtoihin.

Seuraavassa vaiheessa tutkittiin muoviraaka-aineita ja puolivalmisteita toimittavien yritysten toimitusohjelmaa. Kahdella suurella Suomessa toimivalla tukkuliikkeellä on varsin kattava valikoima, josta löytyy mm. koneistusaihioksi soveltuvia materiaaleja tankomuodossa. Valikoimat listattiin ja ne ovat esitettyinä taulukoissa 5.3.3. ja 5.3.4.

TOIMITTAJA VAIHTOEHTO 1

	Tanko, Ø 30 mm	Työstö, 43kpl/m			
TANKO	**Euroa/m**	**Euroa/kpl**	**TYÖSTETTÄVYYS**	**LIIMAUS**	**ERITYISHUOMIOT**
BAKEL.	56.70	1.32	KOHTALAINEN		HGW 2082 kudoslujitettu hartsi. Luja materiaali
PA6G	13.60	0.32	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Valettu tanko. Pieni kitka, hyvin kulutusta kestävä
PE300	9.40	0.22	KOHTALAINEN	HUONO	Väri musta. PE300 hyvin pehmeä laatu
PE1000	14.20	0.33	KOHTALAINEN	HUONO	Kova, pieni kitka, hyvät liukuominaisuudet
PEEK			KOHTALAINEN	HYVÄ	Kallis, erinomaiset ominaisuudet.
PET(P)	20.80	0.48	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Tekninen PET, pieni kitka. Kulutusta kestävä
PMMA	50.90	1.18	EI KOVIN HYVÄ	HYVÄ	Läpinäkyvä materiaali
POM-C	18.80	0.44	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Pieni kitka, kestää hyvin kulutusta.
PP	8.40	0.20	KOHTALAINEN	HUONO	Huono kulutuksenkesto, ei liukumateriaaliksi
PPS			HYVÄ	HYVÄ	Kallis, erinomaiset ominaisuudet
PSU			HYVÄ	HYVÄ	Kallis, erinomaiset ominaisuudet
PTFE	90.30	2.10	KOHTALAINEN	TYYDYTTÄVÄ	Pieni kitka, hyvät kemialliset ominaisuudet
PUR	ei kokoa		KOHTALAINEN	HYVÄ	Kovuus Shore A 90. Suurehko kitka
PVC	11.10	0.26	HYVÄ	HYVÄ	Harmaa kova materiaali, suurehko kitka
PVC	12.20	0.28	HYVÄ	HYVÄ	Väri musta, muutoin kuin yllä
PVDF	121.50	2.83	KOHTALAINEN	HUONO	Pieni kitka, hyvät kemialliset ominaisuudet

Taulukko 5.3.3. Toimittajan numero yksi valikoimassa olevia tankoaihioita [39].

Toimittaja numero yksi pitää yllä melko suurta valikoimaa ja soitto myynnistä vastaavalle henkilölle osoitti, että netissä ilmoitettu materiaalien saatavuus oli hyvin ajantasaista. Sen sijaan tässä työssä mainittuihin hintoihin ei valitettavasti voi luottaa, sillä öljypohjaisten tuotteiden hinnat elävät maailmanmarkkinoilla aivan koko ajan. Tästä asiasta saatiin hyvä osoitus tämän luvun kirjoittamisen yhteydessä, jolloin hieman runsaan viikon aikana lähes jokaisen taulukkoon otetun materiaalin hinta muuttui.

Toimittajan numero kaksi tarjoama valikoima oli hieman pienempi ja se on esitettynä seuraavalla sivulla taulukossa 5.3.4.

TOIMITTAJA VAIHTOEHTO 2

	Tanko, Ø 30 mm	Työstö, 43kpl/m			
TANKO	**Euroa/m**	**Euroa/kpl**	**TYÖSTETTÄVYYS**	**LIIMAUS**	**ERITYISHUOMIOT**
PA6	16.91	0.39	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Pieni kitka, hyvin kulutusta kestävä
PA6 öljy			HYVÄ		Hyvin pieni kitka, ei oikeaa kokoa
PE300	10.77	0.25	KOHTALAINEN	HUONO	Väri musta. PE300 hyvin pehmeä laatu
PE1000	12.99	0.30	KOHTALAINEN	HUONO	Kova, pieni kitka, hyvät liukuominaisuudet
PET(P)	22.74	0.53	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Tekninen PET, pieni kitka. Kulutusta kestävä
POM-C	18.46	0.43	HYVÄ	TYYDYTTÄVÄ	Pieni kitka, kestää hyvin kulutusta.
PP	9.93	0.23	KOHTALAINEN	HUONO	Huono kulutuksenkesto, ei liukumateriaaliksi
PTFE	108.23	2.52	KOHTALAINEN	TYYDYTTÄVÄ	Pieni kitka, hyvät kemialliset ominaisuudet
PUR	96.20	2.24	KOHTALAINEN	HYVÄ	Kovuus Shore A 90. Suurehko kitka
PVC	10.49	0.24	HYVÄ	HYVÄ	Harmaa kova materiaali, suurehko kitka
PVDF	124.45	2.89	KOHTALAINEN	HUONO	Pieni kitka, hyvät kemialliset ominaisuudet

Taulukko 5.3.4. Toimittajan numero kaksi valikoimassa olevia tankoaihioita [40].

5.4. Tuotteen materiaalinvalinnan yhteenveto

Tuotteen materiaalin valinta ei käsitellyssä esimerkissä osoittautunut hankalaksi, koska kyseiselle tuotteelle asetetut vaatimukset olivat yksinkertaisia ja lähes kaikilta osin helposti täytettävissä. Tuotteelle ei käytöstä aiheudu merkittävää ongelmaa ympäristötekijöiden, kemiallisten aineiden tai mekaanisen kestävyyden suhteen. Näin ollen tuotteelle asetettaviksi tärkeimmiksi vaatimuksiksi jäävät lähinnä pieni liukukitka, pintakovuus ja edullinen hinta. Sarjavalmistettavuuteen liittyen valitun materiaalin tulee olla helposti koneistettavissa. Jos tuote valmistetaan myöhemmässä vaiheessa saatujen kokemusten perusteella piirustuksessa kuvatun ensimmäisen vaihtoehdon mukaisesti, on se oltava kokoonpantavissa liimaamalla. Tällöin materiaalinvalinta voidaan kuitenkin pohtia myös uudelleen, koska tuotteen valmistaminen kuvassa 5.2.1. olevan osan kaksi mukaisella tavalla ei vaadi liimausta työvaiheeksi, mikäli alumiinipaino kiinnitetään muovimateriaaliin lievällä puristusliitoksella.

Tuotekehitysvaiheessa kustannustehokkain valmistustapa onkin tuotteen koneistus vaihtoehdon numero kaksi mukaisesti halkaisijaltaan 30 mm tangosta. Materiaaliksi soveltuvia edullisia, helposti koneistettavia ja pienikitkaisia materiaaleja ovat esimerkiksi PE1000 ja PA6G. Näistä PA6G on jonkin verran lujempi muovilaatu sivulla 24 olevan taulukon 3.5.2.1. ja sivulla 25 olevan taulukon 3.5.3.1 perusteella. Jos käyttöolosuhteissa ilmenee kuitenkin mittojen liian suurta elämistä PA6G.n absorboiman kosteuden

vuoksi, on taulukon sivulla 28 olevan taulukon 3.6.1. mukaan PE1000 parempi vaihtoehto. Molemmissa tapauksissa voidaan tuotekehitysvaiheen jälkeen valmistaa tuote samasta materiaalista suursarjatuotannon keinoin, koska molemmista löytyy myös ruiskuvalettavaksi soveltuva laji. Tällöin testeissä hyväksi koettua materiaalia ei tarvitse ryhtyä vaihtamaan toiseksi ainakaan tuotantomenetelmän muuttumisen johdosta.

5.5. Tuotteen tuotantotavan valinta

Edellisessä luvussa 5.4. kuvatun mukaisesti tuotteen valmistuksesta kysyttiin tarjoukset mahdollisilta valmistajilta. Tässä vaiheessa tuotteen koe-eräksi on ajateltu 400 kappaletta, jolloin ainoaksi kilpailukykyiseksi tuotantotavaksi jää valmistus koneistamalla tuote halkaisijaltaan 30 mm muovitangosta. Taulukossa 5.5.1. on laskettu tuotteen materiaali- ja tuotantokustannus valmistettuna kuvan 5.2.1. mukaisesti kahdella eri tavalla kahdesta tankomuodossa olevasta materiaalista PE1000 ja PA6G.

	TUOTE 1 OSA1 JA 2	TUOTE 2	SELITYS
VALMISTUSERÄN KOKO	400	400	KOE-ERÄ 400 KPL
MATERIAALIN HINTA PE1000	0.55	0.33	TAULUKOSTA 5.3.3.
MATERIAALIN HINTA PA6G	0.53	0.32	TAULUKOSTA 5.3.3.
OSIEN VALMISTUSNOPEUS KPL/H	16	27	VALMISTUS CNC-AUTOMAATTISORVILLA
OSAVALMISTUKSEN HINTA/KPL	3.50	2.20	
OSIEN HINTA YHTEENSÄ PE1000	4.05	2.53	
OSIEN HINTA YHTEENSÄ PA6G	4.03	2.52	
KOKOONPANOTYÖ/H (ARVIO)	8		TUOTE 1 KOKOONPANOTYÖ 50 KPL/H
KOKOONPANOTYÖ/H (ARVIO)		4	TUOTE 2 PAINON ASENNUS 100KPL/H
TUNTIHINTA KOKOONPANOLLE/€	20.00	20.00	TYÖ + SIVUKULUT
TUOTTEEN HINTA PE1000 €/KPL	4.45	2.73	
TUOTTEEN HINTA PA6G €/KPL	4.43	2.72	
KOE-ERÄ YHTEENSÄ € PE1000	1780	1092	HINTA YHTEENSÄ ERÄKOKO 400 KPL
KOE-ERÄ YHTEENSÄ € PA 6G	1772	1088	HINTA YHTEENSÄ ERÄKOKO 400 KPL

Taulukko 5.5.1. 400 kappaleen koe-erän valmistusvaihtoehtojen kustannukset.

5.6. Loppuyhteenveto ja suositus tuotantotavan ja materiaalin valinnasta tuotteelle ”nappi”

Tuotantotavan ja materiaalin valinnan loppuyhteenvetona kuvassa 5.2.1. esitetylle tuotteelle ”nappi” ehdotetaan 400 kappaleen koe-erän valmistusta koneistamalla halkaisijaltaan 30 mm muovitangosta, jonka materiaali on joko PE1000 tai PA6G. Edelleen tuotteen tuotekehitysvaiheesta johtuen koe-erä kannattanee tässä kehitysvaiheessa valmistaa kuvan 5.2.1. vaihtoehdon kaksi mukaisella tavalla, joka on kustannuksiltaan merkittävästi edullisempi vaihtoehto. Sen sijaan materiaalin valinnalla kustannustasoon on hyvin vähäinen vaikutus. Voitaisiin jopa ajatella, että koe-erä 400 kappaletta tehdään molemmista materiaaleista valmistamalla 200 + 200 kappaletta. Siten saataisiin mahdollista lisätietoa kyseisten materiaalien käyttäytymisestä jo testiajojen aikana. Tällöin tulee kuitenkin mekaanisella merkinnällä, muovin erilaisella värillä tai jollain muulla luotettavalla ja pysyvällä merkintätavalla varmistaa, että tuotteet pystytään varmuudella identifioimaan ja arvostelemaan vielä käytännön testiajojen jälkeenkin.

LÄHTEET

[1] Liiketoiminta ja strategia, Juhani Kauhanen. Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun luentoaineisto 2011. 33 s.

[3] SFS_EN_ISO/SFS-EN-ISO-527-1. Muovit. Veto-ominaisuuksien määrittäminen osa 1: Yleiset periaatteet. Kemianteollisuus ry 1996. Suomen standardisoimisliitto 17 s.

[4] Lujuusopin perusteet. Erkki Pennala TKY Otaniemi 1974 267 s.

[5] Materials Science of Polymers for Engineers. Tim A. Osswald ja Georg Menges. Hanser Publishers, Munchen 2003. 622 s.

[6] Materials Science of Polymers for Engineers. Tim A. Osswald ja Georg Menges. Hanser Publishers, Munchen 2003. Lainaus sivulta 490. 622 s.

[7] Koneenrakentajan taulukkokirja Esko Valtanen Teknolit Oy. Jyväskylä 1994. 788 s.

[8] PLASTICS Materials and Processing, A. Brent Strong 2006 third edition. Pearson Education Ltd. 917 p.

[9] Muovit ja kumit Raaka-ainekäsikirja 4. Metalliteollisuuden Keskusliitto MET Tampere 2001, 172 s.

[10] Taschenbuch Kunststoff-Prüftechnik. Roger P. Brown Carl, Hanser Verlag München/Wien. 1984 ISBN 3-446-14052-2 sivut 135-136. 485 s.

[11] Ruukki Oyj:n tuoteluettelo verkossa. Saatavissa: http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Layer-pages/Fysikaaliset-ominaisuudet-seka-murtolujuus-vs-kovuus

[12] LUJITEMUOVITEKNIIKKA ERI TOIMIALOILLA, Tutkimusraportti 2009. Tampereen teknillinen yliopisto, Lahden ammattikorkeakoulu, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu, Åbo Akademi University, Mikkelin Ammattikorkeakoulu ja Teknologiateollisuuden 100-vuotissäätiö.

[13] Muovin suomalainen käsikirja, Pasi Järvinen Muovifakta Oy, Porvoo 2000. 173 s.

[14] Komposiittirakenteet Olli Saarela, Ilkka Airasmaa, Juha Kokko, Mikael Skrifvars ja Veikko Komppa. Muoviyhdistys ry. Helsinki 2007. s. 242-244

[15] Designing with engineering Plastics, Licharz GmbH D-53567 Buchholz. 134 s.

[16] Tribology Data Handbook, E . Richard Booser CRC Press 1997

[17] Puun rakenne ja ominaisuudet Pentti O. Kettunen, Kangasala 2000. 361 s.

[18] Uusi muovitieto, Pasi Järvinen Muovifakta Oy. Porvoo 2008. 263 s.

[19] From Polymers to Plastics, A. K. van der Vegt. VSSD 2005. Lainaus sivulta 147. 268 s.

[20] Materials Science of Polymers for Engineers. Tim A. Osswald ja Georg Menges. Hanser Publishers, Munchen 2003. Lainaus sivulta 76. 622 s.

[21 SFS-EN ISO 899-1: Plastics. Determination of creep behaviour. Part 1: Tensile creep. Kemianteollisuus ry. 2003. Suomen standardisoimisliitto 19 s.

[22] PLASTICS Materials and Processing, A. Brent Strong 2006 third edition. Pearson Education Ltd. Lainaus löytyy sivulta 674.

[23] Reaktioruiskuvaluprosessin optimointi ja parantaminen, Hanna Bisterin diplomityö Tampere 2011. 38 s.

[24] Komposiittirakenteet Olli Saarela, Ilkka Airasmaa, Juha Kokko, Mikael Skrifvars ja Veikko Komppa. Muoviyhdistys ry. Helsinki 2007. 494 s.

[25] Reaktioruiskuvaluprosessin optimointi ja parantaminen, Hanna Bister. Diplomityö Tampere 2011 38 s.

[26] Ruiskuvalu Pentti Järvelä, Kai Syrjälä ja Martti Vastela. Plastdata Oy Tampere 2000. 358 s.

[27] Molok Oy Nokia: Keskustelu tekninen johtaja Hannu Jokinen, tuotantopäällikkö Harri Helin ja Yrjö Lepola 3.10.2011.

[28] Komposiittirakenteet Olli Saarela, Ilkka Airasmaa, Juha Kokko, Mikael Skrifvars ja Veikko Komppa. Muoviyhdistys ry. Helsinki 2007. Kuvaus sivulla 181. 494 s.

[29] Muovitekniikan perusteet Veijo Kurri, Timo Malén, Risto Sandell ja Matti Virtanen. Hakapaino Oy 2000. 242 s.

[30] Kemppi Oyj:n tietoja verkossa. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/fi

[31] Keskustelut Yrjö Lepola sekä tuotekehityspäällikkö Jani Hämäläinen ja tuotekehitysinsinööri Airi Vilpanen Kemppi Oy Lahti 29.8.2011

[32] Materials Selection in Mechanical Design, Michael FR. Ashby. Butterworth-Heinemann, Oxford UK. 599 s.

[33] Materials Selection in Mechanical Design, Michael FR. Ashby. Lainaus kappaleesta 2.2 The design process s. 8. Butterworth-Heinemann, Oxford UK. 599 s.

[34] Pentti Järvelä ja Harri Javanainen, Muovituotteen suunnittelu. Tampereen Teknillisen Yliopiston muovitekniikan laboratorion e-kirjojen kokoelma. 56 s.

[35] Materials Selection in Mechanical Design, Michael FR. Ashby. Kappale 5 Materials selection - The basics. Butterworth-Heinemann, Oxford UK. 599 s

[36] Käytännön muovitietoutta, TTKK Materiaaliopin laitos raportti 19/99. Toimittanut Jari Poutanen. ISBN 952-15-0195-2. Tampereen Teknillisen Yliopiston muovitekniikan laboratorion e-kirjojen kokoelma 146 s.

[37] Plastics Engineered Product Design. Dominick V Rosato & Donald V Rosato, Elsevier Advanced Technology 2003. 565 s.

[38] Raute oyj sijoittajatietoa verkossa, saatavissa http://www.raute.fi/tietoa-rautesta

[39] Vink Oy:n julkaisema tuoteluettelo ja hinnasto verkossa. Saatavissa: http://www.vink.fi/fi-FI/Tuotteet/Hinnastot/Levytuotteet-ja-mainosmateriaalit.aspx

[40] Etra Oy:n julkaisema tuoteluettelo ja hinnasto verkossa. Saatavissa: http://tuotteet.etra.fi/main.html?nodeUid=2226684&catalogUid=2224442&parents=&path=1

[41] FORTUS 3D Production systems. FORTUS FDM Thermoplastics Material Comparison. Saatavissa: http://www.fortus.com/materials/fdm-material-comparison.aspx

[42] Oy WatMan ab:n vedenkäsittelyn esite. Juomaveden bakteerien desinfiointi UV-valon avulla. Saatavissa: http://www.watman.fi/pdf/UV-laite.pdf

[43] Kuva: DI Harri Lyytinen, Raute Oy Nastolan suunnitteluosasto.

LIITE 1

	Konsentraatio	Lämpötila	ABS Akryylinitriilibutadieenistyreeni	PA 6 Polyamidi 6	PA 6 + lk30 Polyamidi 6+lasikuitu (lk)	PA 12 Polyamidi 12	POM-C +LK30 Polyasetaalin kopolymeeri	POM-C Polyasetaalin kopolymeeri + lk	PET Polyeteenitereftalaatti	PTFE Polytetrafluorietyleeni (teflon)	PVDF Polyvinyylifluoridi	PE-HD Polyetyleeni HD	PE-HMW Polyetyleeni HMW	PE-UHMW Polyetyleeni UHMW	PP-H Polypropyleeni	PVC-U (kova) Polyvinyylikloridi	PC Polykarbonaatti	PEEK Polyeetteriketoni	PSU Polysulfoni	PEI Polyeetteri-imidi
Ammoniakki	10	HL	K	K	K	K	K	K	E	K	K	K	K	K	K	K		R	E	E
Ammoniumhyd-roksidi	30	HL		K	K	K	E	E	E	K	E	K	K	K	K		E	K	K	E
Ammoniumkloridi		HL		K				K	K	K		K		K	K	K			K	
Asetaldehydi	40	HL		R				K	K	K		K	K	K	K	E	E	K	E	
Asetoni	100	HL	E	K	K	K	K	K	R	K	R	K	K	K	K	R	R	K	E	E
Bensiini, korkea-okt.		HL	E	K				K	K	K		K	K	K	R	E	E	K	R	
Bensiini, lyijytön		HL	E	K				K	K	K		K	K	K	R	K	E	K	R	
Bentseeni	100	HL	L!	K	K	K	K	R	K	K	K	R	R	R	R	E	E	K	E	E
Booraksi	VL	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K			K	K		
Boorihappo	10	HL	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K			K	K	K	K
Bromivetyhappo	10	HL		E	E	E	E	R	R	K	K	K	K	K	K	K		K	K	
Bromivetyhappo	50	HL		E	E	E	E	E	E	K	K	K	K	K	K	K		R	R	
Butanoli	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	E	K	E	
Dibutyyliftalaatti	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	R	R	R	R			E	K	K	R
Dieselöljy		HL	R	K				K	K	K		K	K	K	R	K	K		K	
Dietyylieetteri	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	R	R	R	R	E	E	K	R	K
Dikloorietaani	100	HL		K	K	K	K	K	E	K	K	R	R	R	R	E	E	K	L!	E
Elohopea		HL	K	K				K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	
Elohopeakloridi, vesipit.	5	HL	K	E				K		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	
Etanoli	96	HL	K	K				K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	
Etikka	KL	HL		E	E	K	K	K	K	K	R	K	K	K	K	K		K		
Etikkahappo	5	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Etikkahappo	10	HL	K	R	R	K	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Etikkahappo	10	50	RK	E	E	R	E	E	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	K	K
Etikkahappo	95	HL	RK	E	E	E	E	E	E	K	K	K	K	K	K	R	E	K	E	E
Etikkahappo	95	50	RK	E	E	E	E	E	E	K	R	R	R	R	R	E	E	K	E	E
Fenoli	90	HL		L!	L!	L!	E	E	E	K	K	K	K	K	K	R	L!	K	E	E
Fenoli	100	40		L!	L!	L!	E	E	E	K	K	K	K	K	K	E	L!	K	E	E
Fenoli	100	60		L!	L!	L!	E	E	E	K	R	E	E	E	E	E	L!	K	E	E
Fenoli	100	80		L!	L!	L!	E	E	E	K	R	E	E	E	E	E	L!	K	E	E
Ferrikloridi	SS	HL		E	E	E	R	R		K	K	K	K	K	K	K	K	K	E	K
Fluorivetyhappo	VL	HL	K	L!	L!	L!	E	E	E	K	K	K	K	K	K	K	E	L!	E	R
Formaldehydi	100	HL		R	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	E	E
Fosforihappo	85	HL	K	L!	L!	L!	E	E	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	E

	Konsentraatio	Lämpötila	ABS Akryylinitriilibutadieenistyreeni	PA 6 Polyamidi 6	PA 6 + lk30 Polyamidi 6+lasikuitu (lk)	PA 12 Polyamidi 12	POM-C +LK30 Polyasetaalin kopolymeeri	POM-C Polyasetaalin kopolymeeri + lk	PET Polyeteenitereftalaatti	PTFE Polytetrafluorietyleeni (teflon)	PVDF Polyvinyylifluoridi	PE-HD Polyetyleeni HD	PE-HMW Polyetyleeni HMW	PE-UHMW Polyetyleeni UHMW	PP-H Polypropyleeni	PVC-U (kova) Polyvinyylikloridi	PC Polykarbonaatti	PEEK Polyeetteriketoni	PSU Polysulfoni	PEI Polyeetteri-imidi
Glyseriini	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	K
Glyseroli	90	HL	K	K			K	K	K	K		K	K	K	K	K	R	K	K	
Heksaani	100	HL	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	K
Heptanoli	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	K	K	R	K
Hiilidioksidi		HL		K				K	K	K		K	K	K	K	K	K	K		
Hiilitetrakloridi	100	HL	L!	K				R	K	R		E	E	E	E	E	E		E	
Isopropanoli	100	HL	K	K	K	K	K	K	R	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	
Kaliumhydroksidi	10	HL		K	K	K	K	K	E	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	K
Kaliumhydroksidi	10	80		K	K	K	K	K	E	K	R	E	E	E	K	E	E	K	R	E
Kaliumhydroksidi	50	HL		R	R	K	K	K	E	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	E
Kalsiumhypoklo-riitti	SS	HL		E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K		
Kalsiumkloridi	5	HL	K	K	K	K	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K
Klooribentseeni	100	HL	E	K	K	K	R	K	K	K	K	R	R	R	R	E	L!	K	L!	E
Kloorikaasu	100	HL	E	E				E	E	K		R	R	R	E	K	R	K	K	
Kloorivesi		HL	R	E				E	E			R	R	R	R	R	R			
Kloroformi	100	HL	L!	R	R	R	E	E	E	K	K	R	R	R	R	E	L!	K	L!	E
Kromihappo	1	HL	R	R	R	R	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K
Kromihappo	50	HL	E	E	E	E	E	E	K	K	K	R	R	R	R	K		K	R	
Merivesi			K	K				K	K	K		K	K	K	K	K	K	K	K	
Metanoli	50	HL	E	K	K	K	K	R	R	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	K
Metanoli	100	HL	E	K	K	K	K	R	R	K	K	K	K	K	K	K	E	K	R	K
Metyleenikloridi	100	HL	L!	R				E	E	K		R	R	R	R	R	L!	K	L!	
Metyylietyylike-toni	100	HL	L!	K				R	K	K		K	K	K	K	K	E	K	E	
Mineraaliöljy	KL	HL	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Moottoribensiini	KL	40	E	K	K	K	K	K		K	K	R	R	R	R	E	R	K	R	E
Muurahaishappo	2	HL		R	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K		K		K
Muurahaishappo	100	HL		L!	L!	R	E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	E	R	E	
Natriumhydroksi-di (lipeä)	10	HL	K	K	K	K	K	K	R	K	R	K	K	K	K	K	R	K	K	R
Natriumhydroksi-di (lipeä)	10	80		E	E	E	K	K	E	K	R	R	R	R	K	R	E	K	K	E
Natriumhydroksi-di (lipeä)	50	HL	K	R	R	R	K	K	E	K	R	K	K	K	K	K	E	K	K	E
Natriumhydroksi-di (lipeä)	50	80		E	E	E	K	K	E	K	R	R	R	R	K	R	E	K	K	E

	Konsentraatio	Lämpötila	ABS Akryylinitriilibutadieenistyreeni	PA 6 Polyamidi 6	PA 6 + lk30 Polyamidi 6+lasikuitu (lk)	PA 12 Polyamidi 12	POM-C +LK30 Polyasetaalin kopolymeeri	POM-C Polyasetaalin kopolymeeri + lk	PET Polyeteenitereftalaatti	PTFE Polytetrafluorietyleeni (teflon)	PVDF Polyvinyylifluoridi	PE-HD Polyetyleeni HD	PE-HMW Polyetyleeni HMW	PE-UHMW Polyetyleeni UHMW	PP-H Polypropyleeni	PVC-U (kova) Polyvinyylikloridi	PC Polykarbonaatti	PEEK Polyeetteriketoni	PSU Polysulfoni	PEI Polyeetteri-imidi
Natriumhypoklo-riitti	10	HL		E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	R	K	K	K	K	
Natriumkloridi	10	HL	K	K				K	K	K		K	K	K	K	K	K	K	K	
Nitrobentseeni	100	HL	E	E	E	E	R	R	R	K	K	K	K	K	K	E	L!	K	K	E
Nitrotolueeni	100	HL		R	R	R	R	R	K	K		K	K	K	K	E	E	K		
Oksaalihappo	10	HL	K	R	R	R	E	E	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Petroli	100	HL	R	K				K	K	K		K	K	K	K	K	E		K	
Propanoli	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Rikkihappo	40	HL	K	E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	K
Rikkihappo	40	60		E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	K	R	R	E	R	R
Rikkihappo	96	HL		L!	L!	L!	E	E	E	K	K	R	R	R	R	K	L!	L!	L!	E
Rikkihappo	96	60	L!	L!	L!	L!	E	E	E	K	K	E	E	E	E	R	E	L!	L!	E
Ruokaöljy		HL		K				K	K	K		R	R	R	K	K	K			
Sitruunahappo	10	HL	K	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K
Sitruunahappo	10	50		R	R	K	E	E	K	K	K	K	K	K	K	K		K	R	K
Sprii		HL	K	K				K	K	K		K	K	K	K	K	K	K	E	
Stryreeni	100	HL		K				K	E	K		R	R	R	R			K	K	
Suolahappo	10	HL	K	E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Suolahappo	20	HL		E	E	E	E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Suolahappo	30	HL		L!	L!	L!	E	E	E	K	K	K	K	K	K	K	R	K	R	K
Sykloheksaani	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	R	
Sykloheksanoli	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	R	K	R	E
Sykloheksanoni	100	HL		K	K	K	K	K	E	K	R	K	K	K	K	K	E	K	L!	
Tolueeni	100	HL	L!	K				K	K	K		R	R	R	R	E	E	K	E	
Trikloorietyleeni	100	HL	L!	R	R	R	R	R	R	K	K	R	R	R	R	E	E	K	L!	E
Typpihappo	10	HL	K	E	E	E	E	E	K	K	K	K	K	K	K	K	E	K	K	K
Typpihappo	50	HL	E	L!	L!	L!	E	E	E	K	K	E	E	E	E	E	E	R	K	
Typpihappo	80	HL	E	L!	L!	L!	E	E	E	K	R	E	E	E	E	E	E	R	K	
Vesi, kylmä			K	K				K	K	K		K	K	K	K	K	K	K		

	Konsentraatio	Lämpötila	ABS Akryylinitriilibutadieenistyreeni	PA 6 Polyamidi 6	PA 6 + lk30 Polyamidi 6+lasikuitu (lk)	PA 12 Polyamidi 12	POM-C +LK30 Polyasetaalin kopolymeeri	POM-C Polyasetaalin kopolymeeri + lk	PET Polyeteenitereftalaatti	PTFE Polytetrafluorietyleeni (teflon)	PVDF Polyvinyylifluoridi	PE-HD Polyetyleeni HD	PE-HMW Polyetyleeni HMW	PE-UHMW Polyetyleeni UHMW	PP-H Polypropyleeni	PVC-U (kova) Polyvinyylikloridi	PC Polykarbonaatti	PEEK Polyeetteriketoni	PSU Polysulfoni	PEI Polyeetteri-imidi
Vetyperoksidi	10	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Vetyperoksidi	20	HL		E	E	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Vetyperoksidi	30	HL		E	E	E	R	R	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
Vetyperoksidi	30	60		E	E	E	E	E	K	K		R	R	R	R	R		R		
Xyleeni	100	HL		K	K	K	K	K	K	K	K	R	R	R	R	E	E	K	R	R

HL	Huonelämpötila
50	Lämpötila C◦

50	2-100 liuoksen konsent.
KL	Kauppalaatu
SS	Kylläinen liuos
VL	Vesiliuos

K	Kestää
R	Rajallinen kesto
E	Ei kestä
L!	Liukoinen
	Ei testattu