

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

MUOVIT, LUJITEMUOVIT JA NIIDEN VALMISTUSMENETELMÄT
KONEENRAKENNUKSESSA
CASE GENERAATTORIN ROOTTORI

PLASTICS, REINFORCED PLASTICS AND THEIR MANUFACTURING
METHODS IN MECHANICAL ENGINEERING
CASE GENERATOR ROTOR

Lappeenrannassa 6.4.2011

Simo Alekski Valkeapää

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Työn tavoitteet ja rajaus	1
1.2	Tuotekehitystyön lähtökohdat	2
2	MUOVIT MATERIAALINA KONEENRAKENNUKSESSA	4
2.1	Muovityypit	6
2.2	Muovien rooli koneenrakennuksessa ennen ja nyt	8
2.3	Muovien käyttösovelluksia koneenrakennuksessa ja kierrätettävyys	10
3	MUOVIEN JA LUJITEMUOVIEN VALMISTUSMENETELMÄT JA LIITOSMUODOT	12
3.1	Ruiskuvalu	14
3.2	Puhallusmuovaus	16
3.3	Rotaatiovalu	17
3.4	Lämpömuovaus	18
3.5	Ekstruusio eli suulakepuristus	18
3.6	Perinteinen valaminen	19
3.7	Avolaminointi	20
3.8	RTM -nestevalumenetelmä	21
3.9	Ahtopuristus	22
3.10	Muovien liitosmenetelmät	24
4	ROOTTORIN MATERIAALIVALINNAN JA VALMISTUSMENETELMÄN VAATIMUKSET	25
5	ROOTTORIN MATERIAALIN, VALMISTUSMENETELMÄN JA LIITOSMENETELMÄN VALINTA	28
5.1	Roottorin materiaalin valinta	28

5.2	Roottorin valmistusmenetelmän valinta.....	29
5.3	Roottorin liitosmenetelmän valinta.....	30
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	32
	LÄHDELUETTELO.....	33

LIITTEET

LIITE 1	Epoksiliimojen tuotetietoja, lujuuksia sekä käyttökohteita
LIITE 2	Työn tarkasteluun kuuluvat muovit ja materiaalinvalinnan kannalta keskeisimmät tiedot
LIITE 3	Kahden eri ahtopuristusmenetelmän mitta- ja muotorajoituksia suunnittelun avuksi

LYHENNELUETTELO

ABS	Akrylinitriili-butadieeni-styreeni
ASA	Akrylinitriilistyreeniakryyliesteri
CA,CAB,CP	Selluloosamuovit
EP	Epoksit
HGW	Kudosbakeliitti
HP	Paperibakeliitti
LCP	Nestekidemuovit
MF	Melamiini-formaldehydi
PA	Polyamidit
PA4.6	Polyamidi 4.6
PA6	Polyamidi 6
PA66	Polyamidi 6.6
PA6 + LK30	Polyamidi 6+lasikuitu 30%
PAI	Polyamidiimidi
PBT	Polybuteenitereftalaatti
PC	Polykarbonaatti
PEEK	Polyeetterieetteriketoni
PE	Polyeteeni
PEI	Polyeetteriamidi
PES	Polyeetterisulfoni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PETP	Polyetyleenitereftalaatti
PE-HD	Suurtiheyspolyeteeni
PE-HMW	Suurimolekyylinen polyeteeni

PF	Fenoli-formaldehydi
PI	Polyimidi
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, akryyli
POM	Polyasetaali
PP	Polypropeeni
PPE + S/B	Polyfenyylietterin ja iskulujan polystyreenin seos
PS	Polystyreeni
PSU	Polysulfoni
PTFE	Polytetra-fluorieteeni
PUR	Polyuretaani
UF	Ureaformaldehydi
UP	Tyydyttämätön polyesteri
PVC	Polyvinyylikloridi
PVDF	Polyvinyyliideenifluoridi
SAN	Styreeniakrylinitriili
TPU	Termoelastiset polyuretaanit
TPE-E	Kopolyesterielastit
VE	Vinyliesteri

1 JOHDANTO

Energiantuotantoprosessit elävät jatkuvan haasteen edessä. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä yritetään vähentää ja korvata uusiutuvilla energialähteillä kasvihuoneilmiön hillitsemiseksi. Energian tarve kuitenkin kasvaa koko ajan ja samalla energiantuotannolta vaaditaan päästöttömämpää ja luontoystävällisempää tekniikkaa. Monien uusiutuvien energialähteiden tuotantopotentiaali on huomattavasti suurempi kuin tämän hetkinen tuotanto. Tuotantoprosesseja on kuitenkin kysynnän kasvaessa kehitettävä.

Lähes kaikissa energiantuotantoprosesseissa mekaaninen energia muutetaan sähkömagneettisen induktion avulla generaattorissa sähköksi. Tästä yhtenä esimerkkinä on tuulivoima, jolle asetetaan vuotuisesti suuremmat kasvu- ja energiantuottovaatimukset. Tuulivoimalateollisuuden tuotteita valmistavat yritykset ovat suurien odotusten edessä. Myös tuulivoimalan hyötysuhdetta on parannettava kasvavan kysynnän edessä. Saksalainen Magnet Motor GmbH on erikoistunut ajoneuvojen, laivojen, lentokoneiden ja teollisuuden sovelluksien sähkökäyttöihin ja se tarjoaa ratkaisuja myös tuulivoimalan generaattoreihin, joiden hyötysuhdetta kehitetään sekä vahvan markkina-aseman takaamiseksi että energiantuotannon tehostamiseksi.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämä kandidaatintyö käsittelee muoveja sekä muovikomposiitteja ja niiden valmistusmenetelmiä koneenrakennuksessa. Työn tavoitteena on pyrkiä selvittämään pystytäänkö muoveja ja muovikomposiitteja käyttämään tuulivoimalan generaattorin roottorin materiaalina. Lisäksi työn tarkoitus on esittää roottorin ja akselin liitosehdotus. Materiaalia etsittiin systemaattisesti kaikista muovien pääryhmistä sekä muovikomposiiteista, joista on esitetty liitteessä 2 taulukko. Työssä esitellään ne valmistusmenetelmät, joita voidaan käyttää generaattorin roottorin valmistuksessa tuulivoimalan hyötysuhteen parantamiseksi. Läpikäytyt valmistusmenetelmät löytyvät työn taulukosta 3 sivulta 27. Muovien ja muovikomposiittien kirjo on laaja, joten yksittäisiä kaupallisia materiaaliratkaisuja on suuri määrä, kuten valmistajiakin. Tämän

takia työ antaa materiaali- ja valmistusmenetelmävalintaan kokonaisluontaisen katsauksen, sillä yksittäisten sovellusten tutkiminen on mahdollista vasta, kun lopputuotteen mitat ja vaatimukset ovat tarkemmin tiedossa.

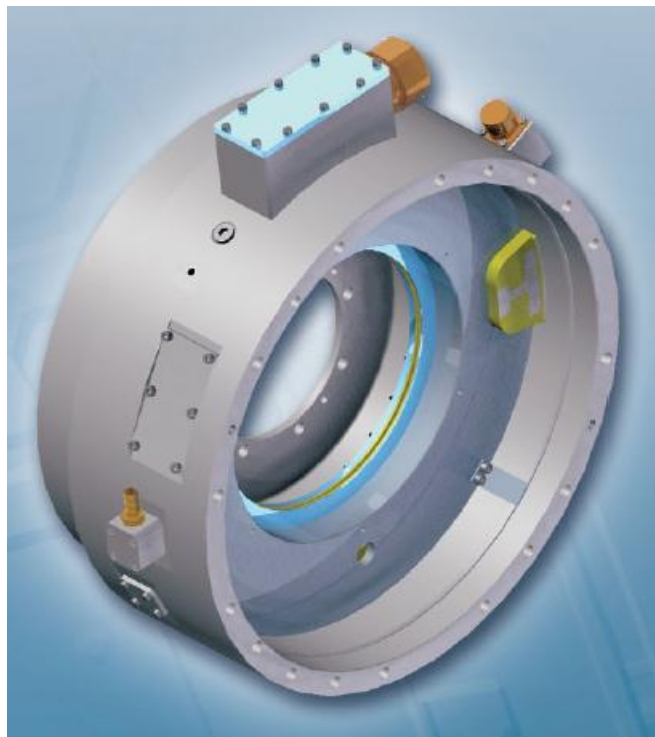
1.2 Tuotekehitystyön lähtökohdat

Generaattorin tuotekehitystyön lähtökohtana on hyötysuhteen parantaminen materiaalinvalinnan avulla. Generaattorin roottorit on aikaisemmin valmistettu teräslaipoista. Muovi tarjoaa materiaalina hyvät sähköiset ominaisuudet generaattorin komponenttina, sillä se on sähköä eristävä eikä näin haitallisia pyörrevirtoja indusoidu roottoriin. Muovi vaikuttaa myös koko generaattorin sähköisiin ominaisuuksiin, sekä vähentää lämmön että värähtelyjen syntymistä. Suurin haaste materiaalille on systeemin lämpötila. Kyseinen tuotekehitystyön generaattori kuuluu sähkökoneiden F-eristysluokkaan. (Magnet Motor GmbH 2010.) Kuitenkin käytännössä F-luokan koneita voidaan korkeintaan jatkuvasti käyttää B-luokan koneiden lämpötiloissa. Tämä tarkoittaa sitä, että kuumimman pisteen lämpötila voi olla F- luokassa 155 astetta.(Moottorit ja generaattorit 2010.) Käämit rajaavat kuitenkin käyttölämpötilan 150 asteeseen.

Roottorin tehtävänä on luoda kestopagneeteille kestävä runko, jonka kierrosnopeus on 3500 kierrosta minuutissa. Siihen upotetaan magneetit, jotka ovat vain muutamien millien päässä staattorin käämityksestä. Tämän vuoksi materiaalin on oltava myös korkeassa lämpötilassa mittapitävä, sillä siihen kohdistuu 1-napainen 1kN staattorivoima, kiihdytyksestä aiheutuva voima sekä ”keskipakovoima”. Roottorin halkaisija on noin 500 mm, sisähalkaisija noin 100 mm ja paksuus noin 50 mm. Kuvassa 1 on esitetty roottorilaipan prototyyppi ja kuvassa 2 käy ilmi generaattorin runkorakenne. (Magnet Motor 2010.)



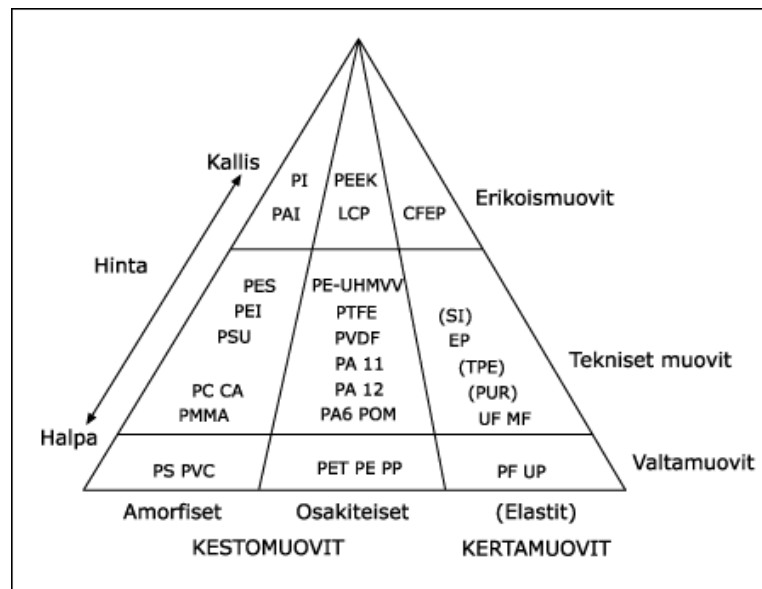
Kuva 1. Roottorin laipan prototyyppi (Magnet Motor 2010).



Kuva 2. Generaattorin runkorakenne. Vesijäähdytys pitää generaattorin enimmäislämpötilan 150 asteessa. (Magnet Motor 2010.)

2 MUOVIT MATERIAALINA KONEENRAKENNUKSESSA

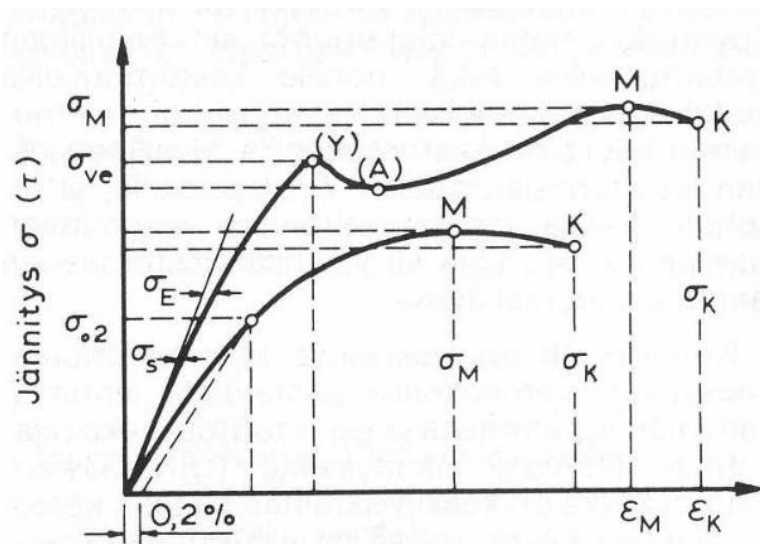
Muovit voidaan jaotella ryhmiin monin eri perustein. Molekyylirakenteen mukaan muovit jakautuvat osakiteisiin ja amorfisiin muoveihin. Kuitenkin koneenrakennuksen kannalta muovit jaetaan yleisesti niiden kemiallisen rakenteen mukaan, sillä kemiallinen rakenne määrää muovin ominaisuudet ja näin sen käyttötarkoituksen. Kemiallisen rakenteen jaossa pääryhmät ovat kestumuovit, kertamuovit, elastomeerit, lujitemuovit (eli komposiitit) ja solumuovit. Kuvasta 3 käy ilmi muovien jaottelu ja tyypillisiä esimerkkejä jokaisesta ryhmästä. Monesti erikoismuovien tekniset ominaisuudet ovat oleellisesti teknisiä muoveja parempia. (Vienamo & Nykänen 2011.)



Kuva 3. Koneenrakennuksessa käytettävien muovien jaottelu (Muoviteknologia 2010).

Muovien lujuusominaisuudet riippuvat oleellisesti lämpötilasta. Ne haurastuvat lämpötilan laskiessa ja pehmenyvät lämpötilan noustessa, mutta muutokset eivät yleensä tapahdu täsmällisesti tietyssä lämpötilassa. Muutokset tapahtuvat etenkin kestumuoveilla asteittain. Muovi alkaa lämpötilan noustessa hajota, mihin vaikuttaa lämpötila ja aika. Hajoamisen vaikutuksesta muovien kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet huononevat. Muovien klassisten lujuusominaisuuksien mittaaminen perustuu standardoituihin kokeisiin, jotka ovat alun perin kehitetty metalleille. Kun näitä kokeita sovelletaan muovien mekaanisten ominaisuuksien mittaamiseen, on pidettävä mielessä, että muovien jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen riippuu

kolmesta muuttujasta, joita ovat aika, lämpötila ja kosteus. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että muovien jatkuva käyttölämpötila on huomattavasti sulamislämpötilaa alhaisempi. Kuvassa 4 on esitetty jännitys-venymäkäyrä tyypillisille sitkeille kestopuoveille, missä Y ja A vastaa ylem্পää ja alem্পaa myötörajaa. M :n arvoa vastaava jännitys on murtojännitys, jota vetokokeesta saatuna nimitetään vetolujuudeksi. K on katkeamisjännitys, jota vastaa murtovenymä. Muovien väsymislujouden testaukseen käytetään samoja menetelmiä kuin metalleille. (Muovit rakentamisessa 1986.)



Kuva 4. Ylempi käyrä rajakohtineen on tyypillinen sitkeiden muovien jännitys-venymäkäyrä (Muovit rakentamisessa 1986, 78).

Muovikomposiittien lujuusarvojen määrittäminen on kuitenkin monimutkaisempaa kuin muovien, sillä rakenteen lujuus on riippuvainen muovikomposiitin valmistusmenetelmästä, matriisimuovista, lujitteesta ja näiden laadusta. Näin suunnitteluvaiheen laskennalliset arvot on myös tarpeellista varmentaa kokeellisesti ASTM- ja SFS-standardien mukaisesti laminaattikokeilla, joita suorittaa Suomessa VTT (VTT Expert Services 2011.)

2.1 Muovityypit

Koneenrakennuksessa paljon käytettävien kestumuovien alaryhmiä ovat valta-, tekniset – ja erikoismuovit, jotka on esitetty kuvassa 3 sivulla 4. Näistä tekniset muovit ja erikoismuovit (myös lujitemuovit) soveltuvat konetekniikan sovelluksiin parhaiten, sillä niitä pystytään teknisten ominaisuuksiensa vuoksi käyttämään vaativimmissa tuotteissa ja osissa. Seuraavaksi käsitellään eri muovityypit lyhyesti. (Vienamo & Nykänen 2011.)

Kestumuovien ja kertamuovien ero johtuu niiden valmistusprosessista ja uudelleen sulatettavuudesta. Raja ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, sillä joillain kestumuoveilla on myös kertamuovien ominaisuuksia (esimerkiksi modifioidut ristiin silloitetut kestumuovit). Kestumuovit sulavat lämmön noustessa ja niitä voidaan muokata valmistuksen jälkeen yhä uudelleen, sillä niiden molekyylien väliset voimat ovat heikkoja. Molekyyliarakenteet ovat myös pitkiä ja ne voivat haarautua, mikä osaltaan parantaa kestumuovien uudelleenmuokkausominaisuuksia. Kertamuovien valmistuksessa käytetään kemiallista prosessia, jossa nestemäiset aineet polymeroituvat muodostaen ristiin silloitettuja molekyyliverkkoja. Näiden verkkorakenteiden vahvojen vuorovaikutusten ansiosta kertamuovit eivät sula lämmön vaikutuksesta, mutta saattavat hieman pehmetä. Jos kuumentamista jatketaan, kertamuovit syttyvät palaamaan ennen kuin ne muuttuvat nesteeksi. (Muoviteknologia 2011.)

Kestumuoveista valtamuovit ovat halpoja ja paljon käytettyjä materiaaleja. Niitä käytetään toissijaisissa sovelluksissa, joissa tuotteelta ei vaadita paljoa teknisiltä ominaisuuksilta. Valtamuovit sulavat monesti jo 100 asteen lämpötiloissa. Tekniset muovit soveltuvat paremmin vaativimpiin sovelluksiin kuin valtamuovit, mutta ne ovat kalliimpia. Kestumuoveista teknisiltä ominaisuuksiltaan kehittyneimpiä ovat erikoismuovit. Ne ovat ryhmän kalleimpia, mutta niiden lämmönkesto on parempi kuin teknisillä muoveilla. Erikoismuoveja on suuri joukko, joista löytyy potentiaalisia materiaaleja, jopa laakerimateriaaleiksi. Teknisistä ja erikoismuoveista on esimerkkejä seuraavalla sivulla kuvassa 5 tuotesovelluksineen. Elastomeerit venyvät heikon voiman vaikutuksen alaisena ja palautuvat nopeasti alkuperäiseen mittaansa jännityksen vapautuessa. Ne jakautuvat kahteen alaryhmään: kumeihin ja termoelasteihin. Koneenrakennuksessa elastomeerejä käytetään lähinnä erilaisissa hihnoissa, letkuissa ja

autoteollisuuden tuotteissa. Ne eivät kuitenkaan sovellu kohteisiin joissa materiaalilta vaaditaan staattista pitävyyttä voiman vaikutuksen alaisena. (Vienamo & Nykänen 2011.)



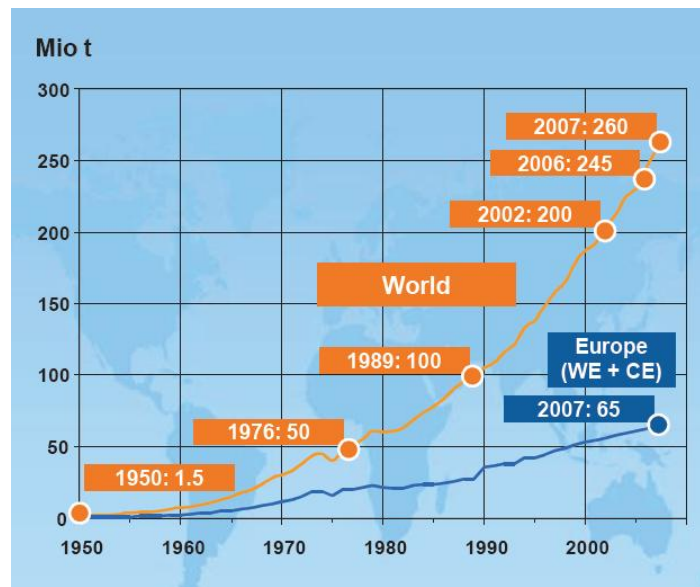
Kuva 5. Kestomuovien eli termoplastien valikoima ja niiden sovelluksia (Paasonen 2010).

Lujitemuovit eli muovikomposiitit ovat materiaaleja, joissa matriisimuovia on lujitettu kuitulujitteen avulla. Kuitulujite lisää materiaalin mekaanisia lujuusominaisuuksia, jäykkyyttä ja lujuutta. Komposiiteilla on paljon ominaisuuksia, jotka tekevät niistä yliverkaisia muovien joukossa. Ne pystyvät myös kilpailemaan metallien ja muiden materiaalien kanssa eri sovelluksissa. (Paajanen et al. 2010.)

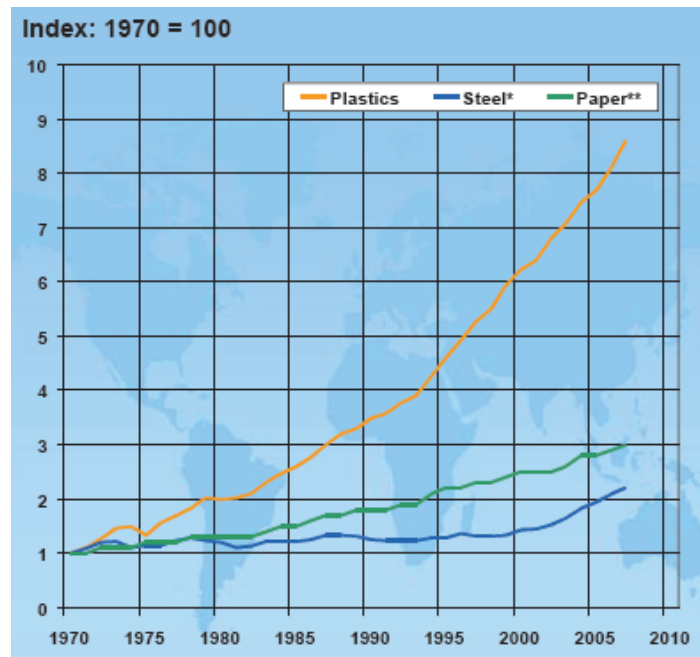
Solumuovit ovat muoveja, jotka ovat tarkoituksen mukaisesti tehty huokoisiksi mekaanisesti, fysikaalisesti tai kemiallisesti. Jokaisessa menetelmässä periaatteena on vapauttaa nestemäiseen perusaineeseen kaasukuplia. Kuplat jäävät rakenteeseen, kun matriisimuovi kiinteytyy ja muodostuu solumainen rakenne. Solumuoveilla on paljon ominaisuuksia, joita muut muovit eivät voi korvata. Tästä on esimerkkinä käyttö pehmusteina ja eristysmateriaalina. (Vienamo & Nykänen 2011.)

2.2 Muovien rooli koneenrakennuksessa ennen ja nyt

Ensimmäinen syntetttinen muovi, bakeliitti, kehitettiin vuonna 1907. Tämän jälkeen 1920-luvulla alkoi muovien teollinen tuotanto ja ne kehittyivät suurin harppauksin toisen maailmansodan jälkeen lentokone- ja avaruusteknologian vaikutuksesta. Perinteinen teollisuus perustui pelkästään metallikonstruktioihin ja metallintyöstöön. Kuvasta 6 käy ilmi muovien tuotanto maailmassa 1950-luvulta lähtien. Muovien tuotanto on osoittanut jatkuvaa kasvua 1950-luvulta lähtien. Muovien käyttö kohdistui sekundäärisiin sovelluksiin ja eristeisiin. Muovit kehittyivät ja valtasivat alaa koneenrakennuksessa, sillä niistä muodostui merkittäviä konstruktioaaleja elektroniikkateollisuudelle 1970-luvulla. Kuitenkin 1970-luvun jälkeen muovien ominaisuudet herättivät koneenrakentajien kiinnostuksen laajemmin ja kokemus niistä lisääntyi. Suomessa muovitekniikan koulutus aloitettiin ja kysynnän kasvaessa materiaalitekniikan laitoksia perustettiin teknillisiin korkeakouluihin 1980-luvulla. Tiedon ja koulutuksen määrä kasvoi. Muovi on nykyisin normaali materiaali koneenrakennuksen maailmassa. Kuvassa 7 muovin, teräksen ja paperin käytön suhteellista kasvua on kuvattu 1970-luvulta lähtien. (Pääkkönen 2010.)



Kuva 6. Muovien tuotannon kasvun kuvaaja aikavälillä 1950-2007 (Pääkkönen 2010).

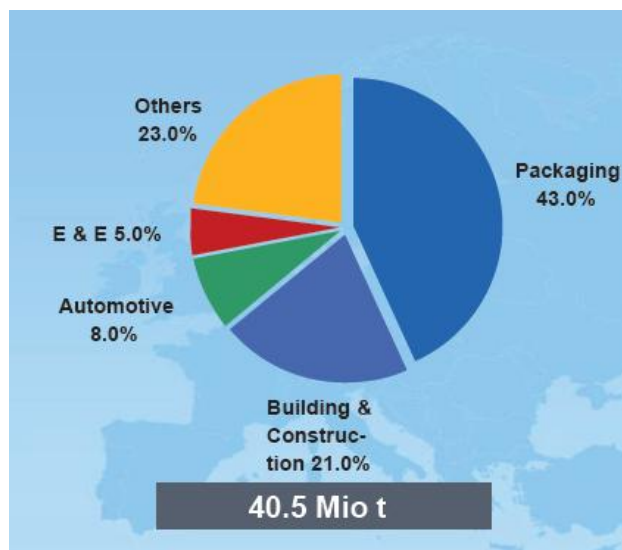


Kuva 7. Muovin, paperin ja teräksen suhteellinen kasvu aikavälillä 1970-2007 (Pääkkönen 2010).

2000-luvulla muovituotanto globalisoitui ja suurin osa tuotannosta hävisi Suomesta Itä-Euroopan maihin. Tällä hetkellä vanhoja muoveja jalostetaan lujitteilla ja seoksilla sekä innovoidaan uusia biomuoveja kierrätyksen parantamiseksi. Muovien käytölle on syntynyt yhä ekologisempi ja hiilijalanjälkeä painottavampi suuntaus. Tämä koetaan materiaalin käytön uhkaksi, sillä kierrätettävät muovit eivät vastaa teknisiltä ominaisuuksiltaan erikoismuoveja. Nykyään tuotetaan yli 700 kauppalajiketta ja uusia aktiivisia sekä älykkäitä materiaaleja kehitetään jatkuvasti. Myös nanoteknologia saattaa kehittää muovimateriaaleja. (Pääkkönen 2010.) Esimerkiksi suksissa ja tuulivoimalan lavoissa käytetään nanoteknologian tuotetta, hyptoniittia.

2.3 Muovien käyttösovelluksia koneenrakennuksessa ja kierrätettävyys

Avaruuslentojen mainostamana muovi, kauppanimeltään teflon, pääsi kalliina materiaalina myös muihin koneenrakennuksen sovelluksiin. Lujitemuovit tulivat ensimmäisinä lentokone- ja vesikulkuneuvoihin. Muovia käytetään myös mekatroniikan sovelluksissa, kuten hammaspyörissä ja liukulaakereissa sekä säiliöissä ja letkuissa, materiaalin kemiallisen kestävyden vuoksi. Koneenrakennus suhtautui aluksi muovisovelluksiin varauksellisesti, sillä muoveilla koettiin olevan huono jäykkyys, lämmönkestävyys ja mittatarkkuus perinteisiin metalleihin verrattuna. Nykyään muovien runsaasta käytöstä hyviä esimerkkejä tarjoaa ajoneuvoteollisuus. Myös työkaluteollisuus on muovistunut. Muovia käytetään eniten pakkausmateriaalina. Kuvasta 8 näkyy muovien käytön jakautuminen Länsi-Euroopassa. Ainoastaan 5 % muovin käytöstä kohdistuu sähkö- ja elektroniikkatuotteisiin. Kuvassa 9 on tyypillisiä tuulivoimasovelluksia. (Pääkkönen 2010.)



Kuva 8. Muovien käytön (pakkaus, rakentaminen, autoteollisuus, sähkö- ja elektroniikka tuotteet, muut) jakautuminen Länsi-Euroopassa (Pääkkönen 2010).



Kuva 9. Lujitemuovituotteita tuulivoimalan sovelluksissa (Pääkkönen 2010).

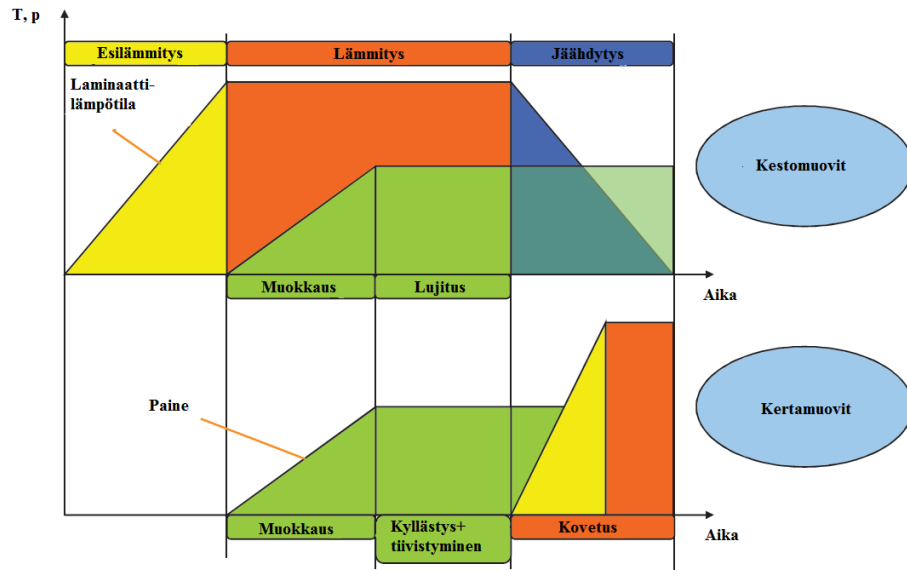
Kierrätettävyys asettaa muovituotteille suuret haasteet tämän päivän koneenrakennuksessa. Jätteenä päätyvää muovin määrää on vähennettävä, jotta raaka-aineiden saatavuus myös tulevaisuudessa voidaan taata. Myös lainsäädäntöön on tullut uusia vaatimuksia, jotka koskevat energian kulutusta, elinkaariajattelua ja hiilijalanjälkeä. Käytännössä lainsäädännön toteuttamiin vaatimuksiin päästään materiaalin käytön vähentämisellä, kierrätyksellä, uudelleenkäytöllä ja energian talteenotolla (muovin poltto hallitusti). Teollisuuden muoveista suurin osa on homogeenistä, joten se on myös helpompi kierrättää. Kun tuotteessa käytettävä muovi on mahdollista kierrättää, sen hiilijalanjälki kevenee. Tämä on tärkeää esimerkiksi uusiutuvien energianlähteiden sovelluksissa, sillä tuottajavastuu on kasvanut merkittävästi. Tuottaja vastuu koskee esimerkiksi sähkö- ja elektroniikkalaitteita (Eup-direktiivi). Näin tuotteen kierrätettävyys on otettava entistä paremmin huomioon jo suunnittelu- ja valmistusvaiheessa. (Paajanen 2010.)

3 MUOVIEN JA LUJITEMUOVIEN VALMISTUSMENETELMÄT JA LIITOSMUODOT

Kaupallisia muoveja on käytössä noin 35000. Näille kaikille muoveille on olemassa useita kymmeniä, ellei satoja valmistusmenetelmiä kaikkine erikoissovelluksineen. Taulukossa 1 on ryhmitelty yleisimpiä komposiittien valmistusmenetelmiä. Niistä esimerkiksi ahtopuristusta voidaan soveltaa myös kestopuoveille. Päättävänä muovi- ja lujitemuovituotteiden valmistuksessa on valmistaa lopputuote kerralla, jotta lisäkustannuksia aiheuttavia jälkityöstöjä ei tarvittaisi. Näin saavutetaan kannattavin ratkaisu myös tuoteteknisesti. Jos kuitenkin jälkityöstö on tarpeellista, siihen on olemassa useita eri ratkaisuja. Ne poikkeavat hieman metallin työstöstä, sillä muovilla on taipumus sulaa ja pehmetä alhaisemmissa lämpötiloissa, kuin metallin. Muovien ja lujitemuovien jälkityöstöön soveltuvat suurnopeusjyrsintä, lasertyöstö, vesisuihkuleikkaus sekä ultraäänyöstö. (Rosato D.V. et al. 2001) Kesto- ja kertamuovien valmistusteknilliset erot näkyvät seuraavalla sivulla kuvasta 10.

Taulukko 1. Muovikomposiittien valmistustekniikoita ja -menetelmiä

PÄÄRYHMÄ	VALMISTUSTEKNIikka	MENETELMÄ
1. Laminointimenetelmät		
	1.1 Käsinlaminointi	Märkälaminointi
		Kuivalaminointi eli prepreg-laminointi
	1.2 Ruiskulaminointi	
	1.3 Kuitukelaus	Punonta
		Käärintä
2. Puristusmenetelmät		
	2.1 Siirtopuristus	
	2.2 Ahtopuristus	Kylmäpuristus
		Kuumapuristus
3. Injektiomenetelmät		
	3.1 Kalvoinjektio	
	3.2 Alipaineinjektio	
	3.3 Paineinjektio RTM	
	3.4 RIM	
	3.5 Ruiskuvalu	
	3.6 Keskipakovalu	
4. Suulakemenetelmä		
	4.1 Pultruusio	
	4.2 Ekstruusio	
5. Valssaus		

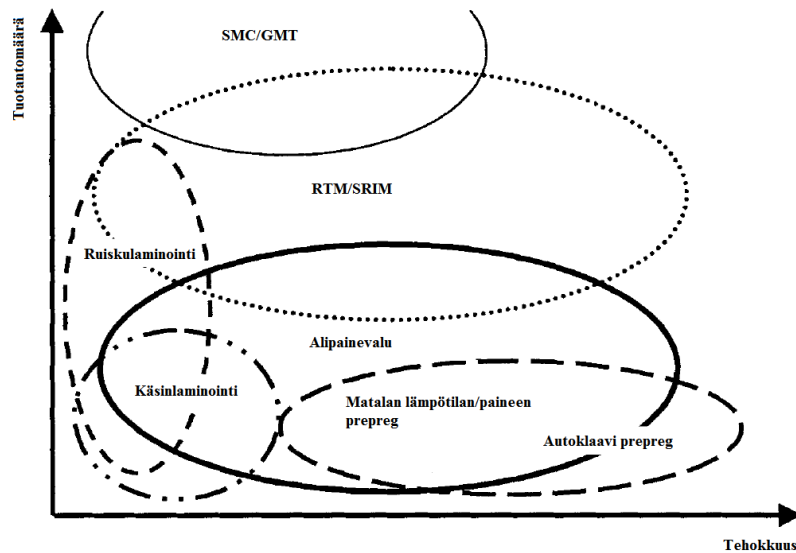


Kuva 10. Kesto- ja kertamuovien prosessointierot (Paasonen 2010). suomennettu Valkeapää 2011

Kun tuotteita valmistetaan perinteisistä koneenrakennusmateriaaleista, on kyse yleensä työstämisestä, valamisesta ja liittämisestä. Nämä materiaalit toimitetaan usein valmiina aihioina. Lujitemuovien valmistaminen ei ole kuitenkaan näin yksinkertaista tavoitteen saavuttamiseksi. Jo suunnittelijan on ymmärrettävä tarkoin materiaalin ominaisuudet ja miten ne vaikuttavat valmistusprosessiin ja sen valintaan.

Seuraavan sivun kuvassa 11 on jaoteltu komposiittien valmistusmenetelmiä sarjakkoon ja suhteellisen suorituskäyvän mukaan. Materiaali ja valmistus yhdessä määrittävät kokonaisuuden loppupotentiaalin. Valmistusmenetelmällä on saatava aikaan oikea muoto, pinnantarkkuus ja lujuus, jotka vaikuttavat merkittävästi lopputuotteen hintaan. Sopivan valmistusmenetelmän, oikean materiaalin ja muotin valmistuksen jälkeen voidaan aloittaa valmistusprosessi. Silloin avainalueita ovat lämpötilan ja paineen tarkkailu. Lujitettu muovi pidetään kullekin materiaalille ominaisen lämpötilan ja paineen alaisena, kunnes materiaali jähmettyy. Jos lujite täytyy kyllästyä prosessissa, paineen täytyy pakottaa matriisi lujitteen läpi. Kertamuovit tarvitsevat aikaa jähmettyäkseen minuuteista useisiin päiviin, mutta kestomuveille riittää pelkkä jäähtyminen. (Miracle & Donaldson 2001, 501-502.) Seuraavaksi kappaleet 3.1–3.6

käsittelevät muovien valmistusmenetelmiä ja kappaleet 3.7–3.9 lujitemuovien valmistusmenetelmiä.



Kuva 11. Lujitemuovituotteiden valmistusmenetelmiä on jaoteltu tuotantomäärän ja suhteellisen suorituskyvyn mukaan (Miracle & Donaldson 2001, 502). suomennettu Valkeapää 2011. SMC= puristemassalevy, GMT= lasikuitumatolla lujitettu kestumuovi, RTM= paineinjektio, SRIM= reaktiovalu, prepeg= puolivalmiste

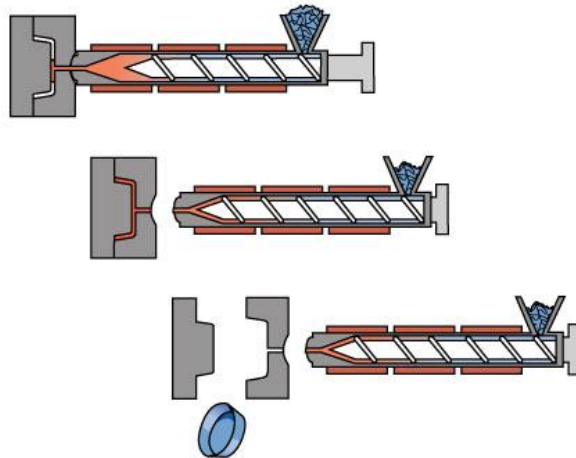
3.1 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yksi käytetyimmistä menetelmistä muovien valmistuksessa. Vain ekstruusio eli suulakepuristus on suosittu kaikkien muovien valmistusmenetelmien joukossa. Ruiskuvalun toteutukseen on olemassa monia erilaisia sovelluksia, jotka eroavat valmistusmäärän, koon, muotojen ja valmistustehokkuuden mukaan. Sovelluksilla on kaikilla ominaispiirteensä, jotka on huomioitava käyttötarkoituksen ja laitteistohankinnan mukaan. Prosessin kolmena keskeisenä komponenttina toimivat ruiskutusyksikkö, muotti ja lukitusyksikkö. Ruiskutin valmistaa muovisulan, joka johdetaan muottiin kanavia pitkin. Muotin ohjaus toteutetaan lukitusyksikön avulla, mikä on prosessin vaiheista monimutkaisin toteuttaa. Prosessissa muovisula ei ole jatkuvassa liikkeessä. Ruiskuvalu soveltuu myös monimutkaisille kappaleille, joilla on vaikeasti valmistettavia pieniä sekä suuria muotoja ja sitä voidaan käyttää kappaleille, joilla toleranssit ovat tarkkoja. (Rosato et al. 2001, 645-647.)

Ruiskuvalua käytetään yleisesti sellaisten tuotteiden valmistusmenetelmänä, joiden sarjakoot ovat pienimmillään 1000 kappaletta. Tyypillisiä tuotteita ovat laitekuoret ja virvoitusjuomapullojen korkit. Joskus ruiskuvalua käytetään myös muutaman sarjakappaleen valuihin, jos tuotteen materiaali- ja tuoteominaisuudet sitä edellyttävät. Yleensä ruiskuvalu on valmis tuote tai osakokonaisuus, jossa kaikki mahdolliset rakenteet ja toiminnot on suunniteltu yhdeksi kappaleeksi. Jälkityöstö on yleensä vähäistä. Seuraavan sivun kuvasta 12 käy ilmi yhden valmistusjakson kierto, joka koostuu

- muotin sulketumisesta
- aineen virtauksesta muottiin
- aineen jäähtymisestä
- muotin avautumisesta
- tuotteen poistamisesta muotista.

Ruiskuvalu soveltuu ohuille kappaleille, sillä jaksonaika on sitä pidempi mitä paksumpia kappaleita valmistetaan. Tämä johtuu jäähtymisnopeudesta. Suunnittelun lähtökohdaksi on pitää muodot ohuina jäähtymistä ajatellen ja jäykentää kappaletta ripojen avulla. Jyrkkiä kulmia tulisi välttää ja kaarevuussäteet tulisi olla suuria. Suunnittelussa tulee välttää sellaisia muotoja, jotka lukittavat kappaleen muottiin joko muotonsa tai ohuutensa puolesta. Valmistuksessa ja suunnittelussa on otettava huomioon muottikutistuma, joka on muotista ja materiaalista riippuen 0,5-0,7 %. Menetelmään liittyy myös muita monimutkaisia prosessille ominaisia ongelmia, kuten kutistuman hallinta ja jäähtymisen hallinta. Erikoisruiskuvalu menetelmillä pystytään myös yhdistämään useita eri materiaaleja. Muita yleisesti käytettyjä erikoismenetelmiä ovat sisäkkäisruiskuvalu ja kaasuavusteinen ruiskuvalu. Kaiken kaikkiaan ruiskuvalu tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet, sillä myös inserttien eli metallikappaleiden lisääminen valuun on mahdollista. (Vienamo & Nykänen 2011.)

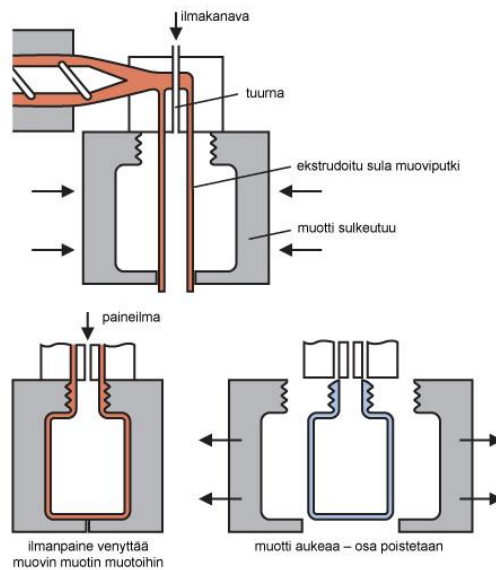


Kuva 12. Ruiskuvalumenetelmän prosessikierto (Vienamo & Nykänen 2011).

3.2 Puhallusmuovaus

Puhallusmuovaus on massatuotantomenetelmä, joka soveltuu suurille valmistuserille. Menetelmässä pehmenetty muovi puhalletaan, paineistetun kaasun avulla pakotetaan, muotin seinämiä vasten. Muovi jäähtyy ja muotti avataan. Lopputuloksena saavutetaan valmis tuote, jota ei yleensä tarvitse jälkityöstää. Menetelmä soveltuu kappaleille, joiden pinnat ovat sulavalinjaisia, esimerkiksi erilaisille pulloille ja säiliöille. Menetelmä on kolmanneksi käytetyin muovien valmistusmenetelmistä. (Rosato et al. 2001, 777–778.)

Puhallusmuovauksessa ongelmaksi muodostuu seinämän paksuuden hallinta. Menetelmässä on mahdollista käyttää myös inserttejä. Tämän lisäksi muottiin on mahdollista asentaa lisäosia, jotka halutaan integroida tuotteeseen. Myös pinnoittaminen ja etikettien käyttö on mahdollista. Seuraavan sivun kuva 13 esittää menetelmän yksinkertaisuudessaan. Puhallusmuovauksessa käytetään eniten polyeteenejä sekä polypropeeneja. Myös tämä menetelmä sisältää paljon erikoismenetelmiä, (Vienamo & Nykänen 2011.) jotka eivät tässä työssä suunnitteluohjeineen ole oleellisia.



Kuva 13. Puhallusmuovauksen prosessivaiheet (Vienamo & Nykänen 2011).

3.3 Rotaatiovalu

Rotaatiovalua käytetään pyörähdyssymmetristen kappaleiden valmistukseen. Kappalekoot ja muodot voivat vaihdella laajasti. Prosessi on kolmivaiheinen: muovi tuodaan muottiin ja kokonaisuus viedään uuniin, jossa se lämmitetään pyörittäen samaan aikaan muottia hitaalla nopeudella. Kun lämpöä johtuu muottiin, muovi alkaa sulaa muotin sisäkehälle ja siitä muodostuu muotin mukainen ontto muoto. Tämän jälkeen muotti jäädytetään asteittain ja pyörittämistä jatketaan kunnes se on kokonaan jäähtynyt. Muotti avataan ja uusi valu voi alkaa. Menetelmää käytetään suurien tankkien valmistukseen. Sovelluksia löytyy aina kypäristä huonekaluihin asti. (Rosato et al. 2001, 1167-1169.)

Menetelmä on paineettomana yksinkertainen sekä edullinen ja se antaa siistin lopputuloksen. Jälkikäsitteilyä ei usein tarvita. Tuotteiden ainevahvuus on melko tasainen, mutta menetelmän heikkous on sen hitaus. Eniten rotaatiovalussa käytetään polyeteenejä ja polyvinyylidiklorideja. Myös polyamidin käyttö rotaatiovaluissa on mahdollista. (Vienamo & Nykänen 2011.) Rotaatiovalun tuotesuunnittelua ja erikoismenetelmiä ei käsitellä tässä työssä, sillä menetelmä soveltuu parhaiten vain ontoille säiliöille.

3.4 Lämpömuovaus

Lämpömuovaus on levyaihioiden muovausprosessi. Prosessissa aihio lämmitetään vain muutaman asteen lasittumislämpötilan yli, joten se kuuluu matalan lämpötilan menetelmiin. Euroopassa sen käyttö on kasvamaan päin ja se kilpailee ruiskuvalun ja puhallusmuovauksen kanssa. Tämän mahdollistavat uudet kehittyneemmät lämpömuovauksen menetelmät. Lämpömuovausta käytetään myös esimerkiksi ekstruusion jälkikäsittelymenetelmänä. (Rosato et al. 2001, 886–887.)

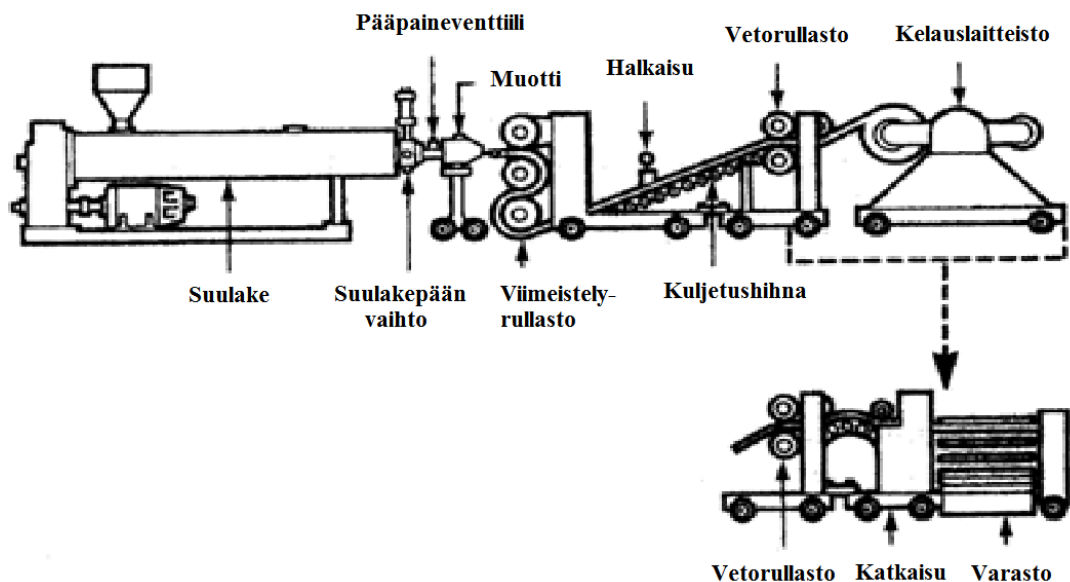
Menetelmä soveltuu suurille ja pienille kappaleille. Se voidaan toteuttaa sekä negatiivisesti positiivimuotin päälle paineen tai tyhjiön avulla. Erikoismenetelmiä on useita ja niiden valintaan vaikuttavat lopputuotteelta vaadittavat ominaisuudet, tuotteen mitat, vetosuhte ja vaatimukset materiaalin jakautumisesta tuotteesta. Tyhjiömuovaus on yksi erikoismenetelmistä ja sen tyyppillisiä sovelluksia ovat veneet, ajoneuvojen sisustus, laukut ja erilaiset kuomut. Kuumapuristusta puolestaan käytetään yleensä kestopuovien muovaukseen ja eri kovuisten levyjen toisiinsa laminointiin. Kappaleen toinen pinta on yleensä tasomainen, mutta myös kolmiulotteisia kappaleita voidaan valmistaa. Kuumapuristuksessa aihio kuumennetaan uunissa, jonka jälkeen se puristetaan muotoonsa muotissa ja jäähdytetään. Tyypilliset sovellukset ovat pehmustetut toppaukset urheilusuojuksissa ja vaatteissa. Lämpömuovauksen erikoismenetelmiä on lukuisia muita, joilla voidaan esimerkiksi yhdistää levyaihioita toisiinsa, muotoilla polyuretaanituotteita ja valmistaa tuotteita elastomeereista. (Vienamo & Nykänen 2011.)

3.5 Ekstruusio eli suulakepuristus

Ekstruusio eli suulakepuristus on edullinen ja yksinkertainen muovituotteiden valmistusmenetelmä. Olennaisena erona ruiskuvaluun on se, että ekstruusio tuottaa jatkuvan materiaalivirran ja että prosessin paine on pienempi. Sillä voidaan valmistaa monia eri muotoja, kuten erilaiset profiilit, levyt, nauhat, putket, letkut ja tangot. Ekstruusiossa muovi plastisoidaan ensin sylinterissä. Tämän jälkeen muovi jatkaa ekstruusioruuviin, jonka tehtävänä on sulattaa, kuljettaa, paineistaa ja luoda homogeeninen materiaalivirta. Ruuvin päässä on halutun muotoinen suutin, joka antaa

jatkuvalla materiaalivirralla sen lopullisen muodon. Käytännössä menetelmä soveltuu vain kestopuoveille. Kertamuoveille on kehitetty myös menetelmiä, mutta ne eivät ole yleistyneet. (Rosato et al. 2001, 544–546.) Ekstruusiolinja koostuu seuraavista osista, jotka näkyvät kuvasta 14 (Vienamo & Nykänen 2011)

- työkalu eli suulake
- kalibrointi
- jäähdytys
- vetolaitteet
- katkaisu ja leimaus
- jälkikäsittely ja pakkaus.



Kuva 14. Ekstruusiolinja (Rosato et al. 2001, 593). suomennettu Valkeapää 2011

3.6 Perinteinen valaminen

Muoveja valetaan harvoin metallien tapaa, sillä muovisulatteiden viskositeetti on liian suuri. Poikkeuksena ovat valukalvot ja polyolefiiniprofiilit. Muovin täytyy olla valuprosessissa monomeerimuodossa eli tällöin niiden viskositeetti on riittävän pieni. Hartseissa käytetään monesti täyteaineita, jotta saavutetaan paremmat ominaisuudet ja pieni kutistuma. Perinteinen valaminen rajoittuu kuitenkin vain yksinkertaisten kappaleiden valamiseen, sillä valua ei paineisteta. Seuraavia muoveja voidaan valaa perinteisesti: (Vienamo & Nykänen 2011.)

- polyamidit
- PUR
- UP
- EP
- silikonit

3.7 Avolaminointi

Avolaminointi on vanhin lujitemuovien valmistusmenetelmien joukossa ja sitä käytetään edelleen lähinnä kertamuoveille. Menetelmää voidaan käyttää monille tuotteille, sillä yksinkertaisella prosessilla on omat etunsa. Menetelmän sovelluksia on monia, kuten käsin laminointi manuaalisesti sekä ruiskulaminointi. Kaikissa sovelluksissa matriisimuovi ja lujite ladotaan avonaiseen muottiin, kuten soutuveneeseen peruskunnostuksessa lasikuitu ja hartsi. Ruiskulaminoinnin perusidea on kuten avolaminoinnissa, mutta matriisimuovi ja lujite ruiskutetaan avomuottiin. Lujite on katkottu koneellisesti, jotta se voidaan ruiskuttaa. Muotissa voidaan käyttää geelikerrosta tai muita tartuntaa ehkäiseviä aineita. Kun materiaalit on tuotu muottiin, poistetaan ilma manuaalisesti telan avulla. (Miracle & Donaldson 2001, 450–451.)

Avolaminointia käytetään manuaalisesti yleensä keskisuurille sarjoille, esimerkiksi muutaman kappaleen vuosituotannosta 300 kappaleen vuosituotantoon saakka. Ruiskulaminoinnissa vuosituotanto voi olla tuhansia kappaleita. Myös monimutkaisten muotojen valmistus on mahdollista. Avolaminoinnin investointikustannukset ovat pienet, jos sen suorittaa manuaalisesti. Myös prosessin hallinta on yksinkertaista ja helppoa. Ruiskulaminoinnissa muodostuvat investointikustannukset koostuvat lähinnä ruiskusta ja sen oheislaitteista. Laadukkaat tuotteet vaativat ruiskulaminoinnissa myös enemmän ammattitaitoa tekijältä. Molemmissa menetelmissä on mahdollista jättää tuotteiden sisälle inserttejä ja kappalekoot vaihtelevat muutamista kiloista satoihin kiloihin. (Miracle & Donaldson 2001, 451–453.)

Avolaminointia käytetään usein tuotesovelluksiin, jotka vaativat suurta lujuus-paino suhdetta, korroosionkestävyyttä ja ferromagneettisuutta. Se tarjoaa seuraavanlaisia ominaispiirteitä, jotka kaikki eivät ole monimutkaisimmille suurten sarjojen tuotantomenetelmille tyypillisiä:

- suunnittelun vapaus
- uuden suunnittelumallin toteuttaminen helppoa
- alhaiset muotti- ja työkalukustannukset
- alhaiset aloitusinvestointikustannukset
- alhaiset pääomakustannukset
- yksinkertainen prosessi
- prosessia ja työkaluja helppo räätälöidä tarpeen mukaan
- suurien, lujien kappaleiden valmistus mahdollista. (Miracle & Donaldson 2001, 450-453.)

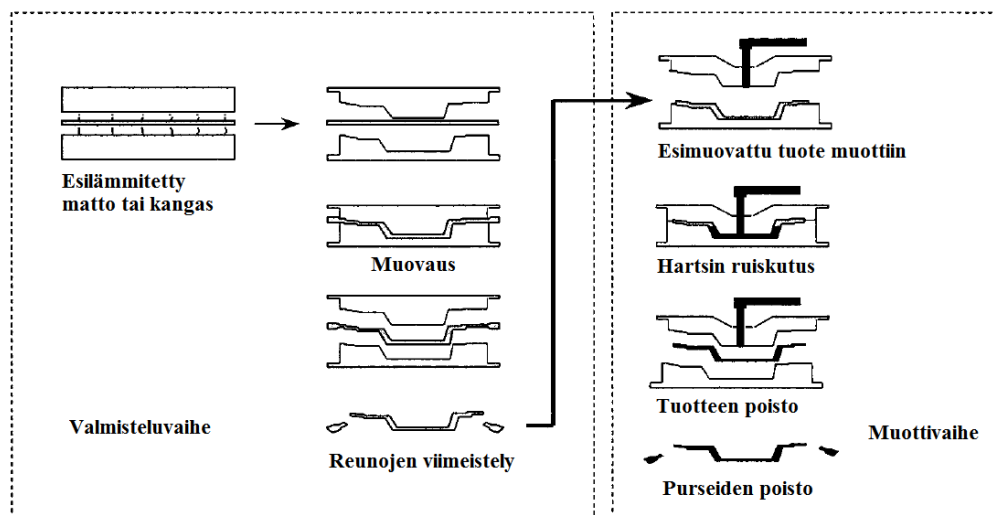
Avolaminointi menetelmän rajoituksia ovat

- alhainen vuosituotanto
- manuaalisesti suuritöinen
- vain telatun pinnan ulkonäkö hyvä
- sotkuinen prosessi
- ammattitaitoa vaativa
- terävät reunat ja nurkat rajalliset (Miracle & Donaldson 2001, 450–453).

3.8 RTM -nestevalumenetelmä

RTM eli resin transfer moulding on nestevalumenetelmä, jossa hartsi ruiskutetaan kiinteän lujitteen läpi suljetussa muotissa. Menetelmässä tehdään ensin lujitteesta aihio esilämmittämällä lujite ja muovaamalla esilämmitetty levy muotissa. Tämän jälkeen reunat työstetään esimerkiksi vesisuihkuleikkauksella ja voidaan toteuttaa itse valu, jossa hartsi ruiskutetaan lujitteen läpi. Valun reunat työstetään vielä kertaalleen ja kappale on valmis. (Miracle & Donaldson 2001, 492-493.) Seuraavan sivun kuvasta 15 näkyy prosessin edellä kuvatut vaiheet.

RTM -menetelmän lujitepitoisuus voi olla jopa 70 prosenttia ja sarjakoko vaihtelee muutamasta sadasta noin kymmeneen tuhanteen asti. Myös RTM -menetelmässä voidaan käyttää geelipinnoitusta muotissa ja erilaisten inserttien jättäminen valuun on mahdollista. RTM on avomuottimenetelmiä huomattavasti nopeampi, mutta sillä on omat haitat verrattuna perinteisiin menetelmiin. (Sinex Oy 2011.) RTM –menetelmää käytetään sen ominaisuuksiensa puolesta useimmiten ajoneuvojen puskureiden, katteiden ja kattojen valmistukseen, joten teollisuus osoittaa sen olevan oiva menetelmä ohuiden tuotteiden valmistuksessa, jossa myös sarjakoot ovat suuria. (Miracle & Donaldson 2001, 493.)



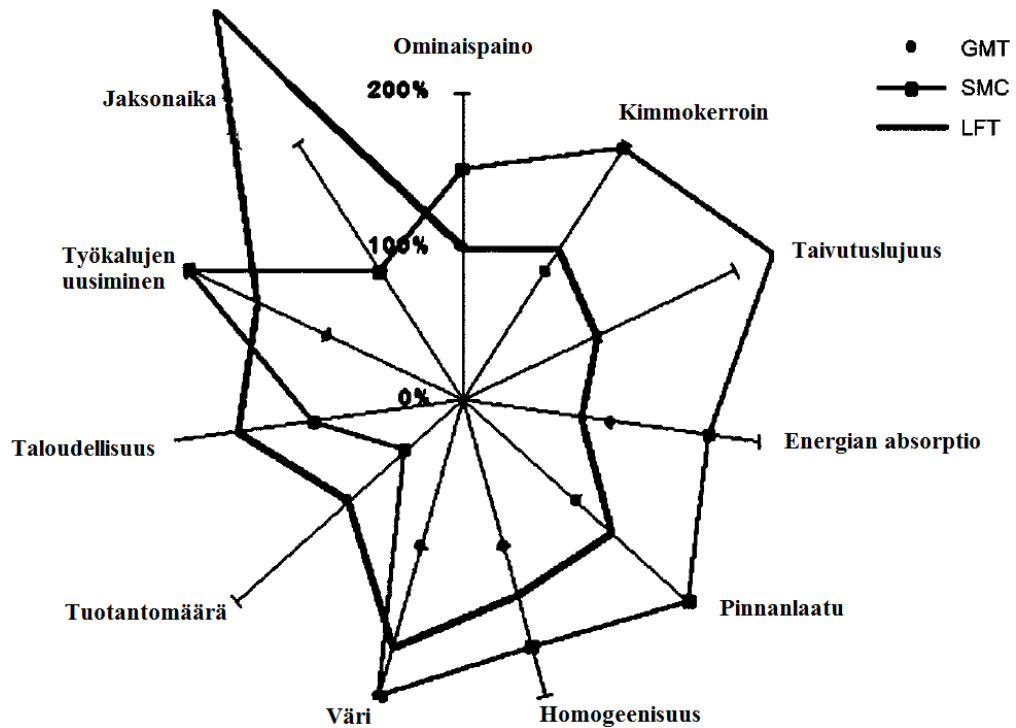
Kuva 15. RTM -menetelmän prosessivaiheet (Miracle & Donaldson 2001, 492). suomennettu Valkeapää 2011

3.9 Ahtopuristus

Ahtopuristus (compression molding) on yksittäisistä lujitemuovien valmistusmenetelmistä eniten käytetty menetelmä autoteollisuudessa. Se on saanut suosiota myös esimerkiksi energiateollisuudessa ja muissa kuluttajasovelluksissa. Ahtopuristuksessa käytetään metallisia muotteja ja jälkikäsittely, kuten purseenpoisto, reikien poraus, inserttien asennus, maalaus ja kitkahitsaus ovat yleistä. Menetelmää käytetään sekä kerta- että kestopuoveille, jotka monesti lujitetaan lasikuidulla. Uusimmat sovellukset käyttävät luonnonkuituja ja polymeerikuituja. (Miracle & Donaldson 2001, 516-517.)

Ahtopuristus prosessissa mitattu määrä kerta- tai kestopuovia asetetaan avoimeen muottiin. Muotin yläosa paikoitetaan nopeasti paikoilleen, jolloin muodostuu korkea paine ja materiaali täyttää muotin muodot kierroksen aikana. Kuvassa 16 on vertailtu kolmen yleisimmän ahtopuristusmenetelmän piirteitä. Tärkeimmät syyt valita ahtopuristus kappaleen valmistusmenetelmäksi ovat vuosituotanto, kustannustehokkuus ja mahdollisuus luoda tarkkoja monimutkaisia muotoja. Monimutkaisimmat kappaleet voivat käsittää seuraavia muotojen piirteitä (Miracle & Donaldson 2001, 516–517.):

- laajat pinnat, yleensä 0,1-4 m²
- ohuet seinämäpaksuudet, 1,3 mm asti (ideaalisin koverille muodoille)
- monimutkaisia ripoja 1-10 mm, aaltomuodot
- kohoumat, paarteet, tapit, koverat alueet, koukut, itselukittuvat muodot



Kuva 16. Ahtopuristusmenetelmien vertailua, jossa GMT lasikuitulujitetuille kestopuoveille, LFT pitkäkuitulujitetuille kestopuoveille sekä SMC kertamuovilevy tuotteille (Miracle & Donaldson 2001, 524). suomennettu Valkeapää 2011

3.10 Muovien liitosmenetelmät

Muovien liittäminen voidaan toteuttaa monin eri ratkaisuin. Monet sovellukset tarjoavat mahdollisuuden myös eripariliitoksien muodostamiseen ja usean liitostyyppin käyttämiseen samanaikaisesti eli hybridiliitoksiin. Liittämisen pääryhmät ovat mekaaninen liittäminen, liimaus ja hitsaus. Mekaanisissa liitoksissa etuja ovat liitoksen mahdollinen purkaminen esimerkiksi huoltotoimenpiteitä tai kierrätystä varten. Toisaalta mekaaninen liitos sisältää aina lisäosia, jotka voivat kasvattaa tuotetta, mutta insertit voidaan integroida jo valuun. Mekaaninen liitos saattaa myös aiheuttaa epätasaisen kuormituksen ja ei-toivottuja jännityshuippuja. Liimauksen etuja ovat hyvä väsymiskestävyys ja värähtelynvaimennuskyky. Se soveltuu myös eripariliitoksille, mutta monet liimat eivät siedä lämpöä eikä liitos ole purettavissa. Myös pintojen esikäsitteily tarvitaan. Liimojen kallis hinta ja terveysvaikutukset ovat myös ajaneet niiden suosion alas. (Vienamo & Nykänen 2011) Liimausmenetelmistä epoksipohjaiset liimat pystyvät toimiaan aina 204 asteeseen saakka (Loctite Plastic bonding 2005) ja niistä löytyy lisätietoja työn liitteestä 1. Hitsausmenetelmistä laserhitsaus soveltuu vain kestumuoveille ja laserilla voidaan hitsata myös metallin ja muovin muodostamia eripariliitoksia (Laaksonen & Järvelä 2003, 74). Taulukossa 2 on esitetty osa yleisimmistä eri liitossovelluksista muoveille.

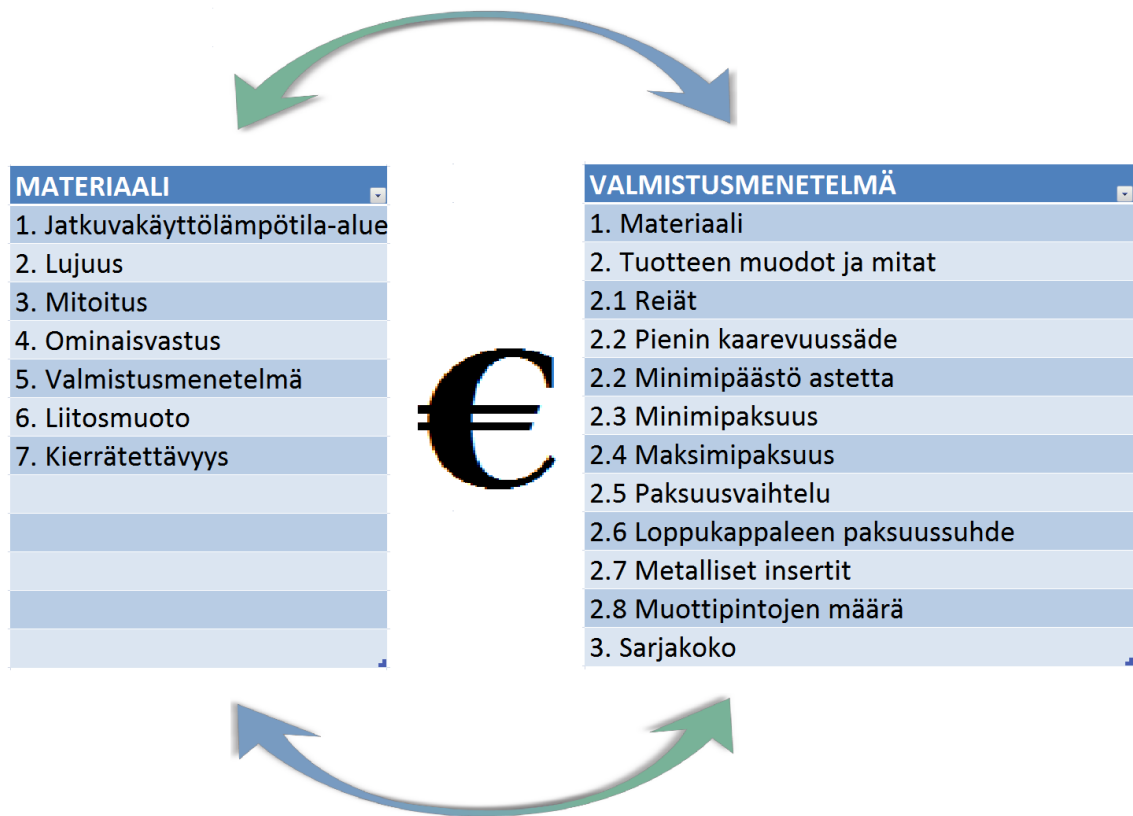
Taulukko 2. Muovien liitossovelluksia (Vienamo & Nykänen 2011)

MEKAANINEN LIITOS	LIIMAUS	HITSAUS
1.Puristusliitos	1.Epoksiliimat	1. Ekstruusiohitsaus
2.Snappiliitos	2.Polyesteriliimat	2. Kitkahitsaus
3.Ruuvikierre	3.Polyuretaaniliimat	3. Rotaatiohitsaus
4.Pulttiliitos	4.Syanoakrylaattiliimat	4. Induktiohitsaus
5.Sisäänvalettava insertti	5.Anaerobisetliimat	5. Laserhitsaus
6.Muotoliitos		

4 ROOTTORIN MATERIAALIVALINNAN JA VALMISTUSMENETELMÄN VAATIMUKSET

Roottorin materiaalivalintaan vaikuttaa useita tekijöitä. Ensimmäkin materiaalilla on oltava riittävä lämmönkestävyys. Tämän lisäksi materiaalin tulee täyttää lujuusvaatimukset, jotka voidaan selvittää roottorille sen mittavaatimusten tarkentuessa suunnitteluprosessin myötä. Materiaalikohtainen lujuusvaatimus syntyy siis mittavaatimusten ja tuotteeseen kohdistuvien staattisten ja dynaamisten voimien lopputuloksena. Myös materiaalin resistiivisyys on generaattorin toiminnan kannalta oleellinen muuttuja. Nämä tekijät rajaavat tietyn materiaaliryhmän, josta voidaan valita roottorin materiaali.

Lopputuotteen on kuitenkin vastattava valmistettavuuden tarpeisiin. Valmistusmenetelmän valintaan oleellisesti vaikuttavia tekijöitä ovat käytettävä materiaali, lopputuotteen muodot, sarjakoko, sekä pyörityssäteet ja seinämävahvuudet (Saarela 2003, 192–196). Jokaisella valmistusmenetelmällä on käytännössä yhtä monta sovellusta kuin tuotteiden valmistajia. Lopullisesta valmistusmenetelmästä on tehtävä perusteellinen tutkimus, kuinka se soveltuu roottorin valmistukseen ja miten prosessin muuttujia voidaan säätää kustannustehokkaan ja laadukkaan lopputuotteen valmistamiseksi. Saarelan komposiittirakenteet kirjassa on taulukoitu eri valmistusmenetelmien asettamat mitta- ja muotorajoitukset. Näistä on seuraavalle sivulle kuvaan 17 eritelty valmistusmenetelmän piirteitä, jotka ovat tämän tuotekehitystyön kannalta oleellisia. Kuvassa on esitetty myös materiaalivalintaan vaikuttavat tekijät.



Kuva 17. Materiaali- ja valmistusmenetelmän valintaan vaikuttavat vaatimukset ovat vuorovaikutuksessa.

Näin materiaalin ja valmistusmenetelmän valinta vaikuttaa toinen toisiinsa. Kun mahdolliset materiaalit ja valmistusmenetelmät on rajattu, on vielä pohdittava tuotteen toimintaa käyttöympäristössä. Jo pelkästään materiaalin valinta vaikuttaa siihen, kuinka tuotteen lujuutta ja mahdollisia vauriomekanismeja pystytään arvioimaan ja kehittämään. Esimerkiksi lujitetuilla muoveilla valmistusmenetelmä vaikuttaa oleellisesti lopputuotteen lujuuteen.

Muovien tapauksessa on pohdittava ja selvítettävä vaatimukset myös kierrätettävyyteen, jotta lopputuotteen ympäristöarvo säilyy vähintään markkinointi mielessä kelvollisena. Lopullinen materiaali-, valmistusprosessi-, ja liitosvalinta ovat siis aina kompromissi, joka onnistuakseen vaatii suunnittelu- ja valmistushenkilöstön tiivistä yhteistyötä. Kaikki valmistusmenetelmät, jotka on käyty läpi tässä kandidaatintyössä, on esitetty taulukossa 3. Suurin osa menetelmistä ei sovellu roottorin valmistukseen. Kuitenkin ne

menetelmät, jotka osoittivat potentiaalia roottorin valmistukseen, on käsitelty jo aiemmin.

Taulukko 3. Muovien ja lujitemuovien valmistusmenetelmät, jotka kuuluvat tämän kandidaatintyön tarkastelun piiriin.

MUOVIT	LUJITEMUOVIT
1. Ekstruusio	1. Avolaminointi
2. Ruiskuvalu	2. Kuivalaminointi(prepreg)
3. Puhallusmuovaus	3. Kuitulaminointi
4. Lämpömuovaus	4. Märkälaminointi
5. Ahtopuristus	5. Paineinjektio
6. Rotaatiovalu	6. Reaktiovalu=SRIM
7. Kalanterointi	7. Alipainevalu
8. Reaktioruiskuvalu	8. Ahtopuristus
9. Valaminen	9. Kuitukelaus
	10. Suulakeveto
	11. Kestomuovikomposiittien valmistus
	11.1 Prepreg-laminointi
	11.2 Autoklaavivalu
	11.3 Ahtopuristus
	11.4 Rullamuovaus
	11.5 Nestevalu
	11.6 Kuitukelaus
	11.7 Pultruusio

5 ROOTTORIN MATERIAALIN, VALMISTUSMENETELMÄN JA LIITOSMENETELMÄN VALINTA

Tämän työn tarkastelun piiriin kuuluvat muovit ja muovikomposiitit on esitetty liitteen 2 taulukossa. Taulukossa on esitetty kaikki yleisimmät koneenrakennuksessa käytettävät muovimateriaalit. Taulukko on laadittu kahden valmistajan tietopankkien (Aikolon Oy/Vink Oy) sekä virtuaaliopetusympäristön (Muovimuotoilu) perusteella. Niistä esitetyt tiedot keskittyvät tälle työlle oleellisiin materiaaleihin, jotka mahdollisesti pystyisivät toimimaan roottorin materiaalina. Taulukkoon on merkitty lähde jokaisen materiaalin kohdalle.

5.1 Roottorin materiaalin valinta

Ensimmäinen rajaava tekijä materiaalin valinnassa on jatkuva käyttölämpötila-alue. Tuotetietojen jatkuvaan käyttölämpötila-alueeseen on suhtauduttava varauksella, sillä ilmoitetuissa arvoissa on aina käytetty tiettyä (esimerkiksi 5000 h/20000 h) kuormitusaikaa, jossa materiaali kestää tietyn kuormituksen alaisena. Roottorin suunniteltu käyttöikä voi kuitenkin olla pidempi, jolloin myös jatkuvan käyttölämpötila-alueen arvot ovat pienempiä, sillä muovit pehmenevät ajan kuluessa lämmön alaisina. Jatkuvan käyttölämpötilan arvot rajaavat suurimman osan materiaaleista pois. Niille materiaaleille, jotka täyttävät jatkuvan käyttölämpötilan vaatimuksen (150 °C), on esitetty taulukossa myös vetolujuusarvot. Vetolujuusarvoja on käytetty lujuuden arviointiin, sillä se löytyy useimpien materiaalien tiedoista. Ne materiaalit, jotka vetolujuusarvojen puolesta ovat rajatun materiaalijoukon lujimpia, on otettu jatkotarkasteluun. Näille materiaaleille on merkitty resistiivisyys, joka on tärkeä tekijä generaattorin tuotekehityksen kannalta.

Liitteestä 2 huomataan, että erikoismuovit PI sekä PEEK (Aikolon Oy) ovat lämmönkeston, lujuuden sekä resistiivisyyden puolesta soveltuvimpia roottorin materiaaliksi. PEEK erikoismuovista on myös modifioitu sovellus, jossa on seosteena käytetty 10 % hiilimustaa, 10 % grafiittia sekä 10 % PTFE:tä. Seosaineiden ansiosta materiaalilla on parempi kulutuksenkestävyys ja virumislujuus kuin seostamattomalla

PEEK:illä, mutta seosaineet heikentävät materiaalin sähköneristyskykyä. Tämän vuoksi modifioitu PEEK ei sovellu roottorin materiaaliksi.

Liitteen 2 muovikomposiittien joukosta kolme materiaalia, Durostone EPC 203, Durostone EPM 203 ja Durostone CLF 770 (Aikolon Oy) päätyivät saman päättelyprosessin jälkeen roottorin materiaaliehdokkaiksi. Näistä materiaaleista resistiivisyysarvoja ei ole annettu, mutta niiden sähköneristyskyvyn sanotaan olevan hyvä. Näistä Durostone CLF 770 on murtolujuuden ja jatkuvan käyttölämpötilan mukaan kestävin. Näiden kolmen materiaalin sähköisiin ominaisuuksiin on kuitenkin tehtävä lisätutkimuksia, jotta tarkempi materiaalivalinta voidaan suorittaa.

Molemmat kestumuoveista, sekä PEEK että PI, ovat kierrätettäviä muoveja. Ne ovat kalliimpia muoveja kestumuovien ryhmästä. PI on rakenteeltaan amorfinen ja PEEK osakiteinen. Tämän työn käsittelemät lujitemuovit eivät ole kierrätettävissä. Komposiitit ovat vaikeita kierrätettäviä, sillä ne koostuvat sekä lujitteesta että matriisista ja eivät näin ole homogeenisiä kuten pelkät muovit. Tämän päivän luonnonkuitukomposiitit ovat kierrätettäviä materiaaleja, mutta ne eivät täytä roottorin mekaanisia ja lämmönkestovaatimuksia.

5.2 Roottorin valmistusmenetelmän valinta

Muovien valmistusmenetelmät, jotka kuuluvat tämän työn tarkastelun piiriin on esitetty taulukossa 3 sivulla 27. Näistä ainoastaan ruiskuvalu pystyy muovien valmistusmenetelmistä tarjoamaan sellaiset ominaisuudet, jolla lopputuote on mahdollista valmistaa, sillä roottorissa on monimutkaisia suuria ja pieniä muotoja, joiden toleranssit ovat tarkkoja.

Ruiskuvalussa sarjakoon olisi hyvä olla vähintään 1000 kappaletta kustannustehokkuuden kannalta. Kuitenkin esimerkiksi tuotteen testausvaiheessa myös muutaman sarjakappaleen valut ovat mahdollisia. Tämä valmistusmenetelmä on myös jälkityöstön vähäisyyden kannalta soveltuva roottorin valmistusmenetelmä. Valuun voidaan asettaa myös inserttejä. Ruiskuvalussa suositellaan kuitenkin käytettävän suuria kappaleen kaarevuussäiteitä ja jyrkkiä kappaleen kulmia tulisi välttää. Jäähtymisen ja

siten yhden kappaleen jaksonajan kannalta tulisi jäykkyys toteuttaa kappaleeseen ripojen avulla, eikä seinämäpaksuutta suurentamalla. Vain roottoriin suunnitellut reiät porataan jälkikäteen. Roottoriin suunniteltujen ilmanohjaimien toteutusta on myös harkittava, sillä ne saattavat lukita kappaleen muottiin ja ovat pieninä, ohuina ja terävinä yksityiskohtina hankalia valmistusteknisesti.

Lujitemuovien valmistusmenetelmistä, jotka on myös esitetty taulukossa 3 sivulla 27, ahtopuristus soveltuu roottorin valmistukseen, sillä se soveltuu niin kerta- kuin kestopuoveillekin. Ahtopuristus pystyy myös näistä valmistusmenetelmistä tarjoamaan roottorille oikean muodon, pinnantarkkuuden ja lujuuden. Liitteessä 3 on esitetty kahden ahtopuristusmenetelmän (kylmä- ja kuumapuristus) mitta- ja muotorajoituksia, joista voi olla apua roottorin suunnittelussa sekä valmistussovelluksen valinnassa. Taulukosta havaitaan, ettei kylmäpuristuksessa ole mahdollista käyttää metallisia kiinnikkeitä eli inserttejä.

Ahtopuristusta voidaan myös käyttää valittaessa pelkkä lujittamaton kestopuovi roottorin materiaaliksi. Ahtopuristuksen jälkeen roottoriin porataan reiät ja mahdolliset purseet koneistetaan pois. Insertin asentaminen on myös ahtopuristuksessa mahdollista. Ahtopuristus soveltuu roottorin valmistusmenetelmäksi erityisen hyvin, sillä se pystyy paineistettuna menetelmänä valmistamaan myös roottorin tarkat ja aaltomuotoiset ilmanohjaimet. Näiden valmistusmenetelmien lisäksi roottorin valmistus voidaan toteuttaa esimerkiksi suurnopeusjyrsimällä, sillä valittuja materiaaleja saa 50 mm paksuisina levyaihioina ja ne soveltuvat lastuavaan työstöön.

5.3 Roottorin liitosmenetelmän valinta

Roottori-akseli – liitos vaikuttaa sekä materiaalin että valmistusmenetelmän valintaan. Osa liitosmuodoista on mahdollisia vain tietyille materiaaleille ja valmistusmenetelmille. Esimerkiksi liimauksen on soveltuva molemmille materiaaleille pintojen esikäsitteilyneen. Valmiiden kovien inserttien asettaminen muottiin synnyttää aina riskin muotin sulkeutumiselle. Tämä saattaa aiheuttaa häiriöitä valmistusprosessissa. Eripariliitoksen hitsaus puolestaan voi aiheuttaa akseliin epäsuotuisia jännityksiä, jotka voivat laskea väsymiskestävyyttä.

Roottori-akseliliitos on mahdollista toteuttaa materiaalin ja valmistustekniikan puolesta mekaanisesti insertin avulla. Insertti on myös mekaanisista liittämismenetelmistä sellainen, joka ei kasvata liitoksen fyysistä kokoa ahtaassa generaattorissa. Insertti liittyisi akseliin mahdollisen koneistettavan kiilauran avulla. Toinen mahdollisuus on suunnitella akseliin sellainen pieni laippa, johon insertti saadaan kiinni pultein. Tämä on kuitenkin monimutkaisempi ratkaisu akselin valmistuksen kannalta, kiilaura on helpompi valmistaa.

Myös mittojen tarkentuessa on tehtävä lisäselvitys liimauksen soveltuvuudesta tai sen yhdistämisestä mekaanisen liitoksen kanssa. Kestomuovien ja metallin eripariliitos on mahdollista toteuttaa epoksiliimalla, joka kestää jopa 204 asteen lämpötiloja. Liima tasoittaisi kokoonpanon kuormitusta, parantaa väsymislujuutta sekä vaimentaa värähtelyjä. Liimauksen soveltuvuuden arvioinnin yhteydessä on myös otettava huomioon mahdolliset huoltotoimenpiteet, sillä liimattua roottoria ei enää saada irrotettua vaivatta akselistä. Tällöin ainoastaan mekaaninen liittäminen on ainut vaihtoehto. Muut liitosmenetelmät, jotka esitettiin taulukossa 2 sivulla 24, ovat valmistusteknisesti kalliita tai vaikeita toteuttaa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tutkimuksien perusteella roottorin materiaaliksi muovien joukosta soveltuvat parhaiten PEEK tai PI, jotka kuuluvat erikoismuovien joukkoon. Ne pystyvät tarjoamaan parhaat lämpö-, lujuus- sekä resistiivisyysarvot muovien joukosta. Lujitemuoveista soveltuva on Durostone CLF 770 samoin perustein. Tämän materiaalin resistiivisyys on kuitenkin vielä määritettävä lisätutkimuksin erikseen. Materiaaleista PEEK ja PI ovat homogeenisinä materiaaleina kierrätettäviä, mutta komposiitti ei. Työn materiaalitarkasteluihin ei kuulunut kuitulujitettu PEEK, joka on myös markkinoilla. Tämä materiaali kannattaa ottaa myös lisätutkimuksiin.

Näille kaikille materiaaleille näyttäisi soveltuvan parhaiten tämän työn tarkastelluista valmistusmenetelmistä ahtopuristus, sillä se soveltuu niin kestopuoveille kuin komposiiteillekin. Ahtopuristuksesta on tarjolla kaksi eri sovellusta, kylmä- ja kuumapuristus. Myös ruiskuvalu voi soveltua muoviroottorin valmistukseen, mutta sillä ei voida toteuttaa jyrkkiä kulmia, kuten roottorin muodot edellyttävät. Tämän takia ahtopuristus on tutkituista valmistusmenetelmistä pätevin paineistettuna menetelmänä roottorin valmistukseen. Se on myös potentiaalisin menetelmä toteuttamaan monimutkaiset, aaltomuotoiset ilmanohjaimet, joita roottorissa on.

Liitosratkaisuksi voisi tämän kirjallisuustutkimuksen perusteella soveltaa insertti-/liimaliitosta, sillä siinä yhdistyvät mekaanisen ja liimaliitoksen edut. Liimaliitoksen toteutuksessa on huomioitava generaattorin purkaminen huoltotoimenpiteitä varten. Inserttiliitos rajaa kuitenkin kylmäpuristuksen valmistusmenetelmien joukosta pois, sillä menetelmässä ei voida käyttää metallisia kiinnikkeitä. Tällöin ainoana tämän työn tutkimista valmistusmenetelmistä roottorin valmistukseen soveltuu kuumapuristus.

LÄHDELUETTELO

ABB. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Moottorit ja generaattorit.[verkkodokumentti]. Helsinki.[viitattu 12.12.2010]

Saatavissa:http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/17_Moottorit%20ja%20generaattorit.pdf

Aikolon Oy. Muovituotteet ja tietopankki. [Aikolon Oy:n www-sivut] 2010[viitattu 15.2.2011]. Saatavissa: <http://www.aikolon.fi/>

Laaksonen M. & Järvelä P. 2003. Kestomuovien laserhitsaus raportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Muovi- ja elastomeeritekniikan laitos.

Loctite: The Loctite Design Guide for Bonding Plastics, Volume 2 [tuotedokumentti] Loctite: 2005. [viitattu 17.2.2011] s.24-25

Saatavissa: http://www.yureka.com.my/media/227/208/Loctite_PlasticsBondGguide.pdf

Magnet Motor GmbH 2010. Generators. [pdf-dokumentti]. [viitattu 11.12.2011].

Saatavissa:[http://www.magnet-motor.de/en/home/downloads/?tx_abdownloads_pi1\[action\]=getviewcatalog&tx_abdownloads_pi1\[category_uid\]=3&tx_abdownloads_pi1\[cid\]=109&cHash=017fdc758984e671cf95a720976c69e9](http://www.magnet-motor.de/en/home/downloads/?tx_abdownloads_pi1[action]=getviewcatalog&tx_abdownloads_pi1[category_uid]=3&tx_abdownloads_pi1[cid]=109&cHash=017fdc758984e671cf95a720976c69e9)

Miracle D.B. & Donaldson S.L. 2001. ASM Handbook of Composites. Volume 21. ASM international. ISBN 978-0-87170-703-1

Paajanen M., Karttunen M. et al. Kierrätettävyyden ja lainsäädännön asettamat haasteet muovimateriaalien käytölle metalliteollisuuden tuotteissa. [pdf-dokumentti]. VTT. 2010. [viitattu 17.1.2011]. Saatavissa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Ville Ryyänen. Tietokanta vaatii salasanan.

Paajanen M., Karttunen M. et al. Muovit ja komposiitit koneenrakennuksessa.[pdf-dokumentti]. 10.11.2010. VTT Technical Research Centre of Finland. [viitattu 16.1.2011] Saatavissa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Ville Ryyänen. Tietokanta vaatii salasanan.

Paasonen J. Muovit, elastomeerit ja komposiitit koneenrakennuksessa. [pdf-dokumentti]. 10.11.2010. VTT Technical Research Centre of Finland. [viitattu 12.1.2011] Saatavissa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Ville Ryyänen. Tietokanta vaatii salasanan.

Pääkkönen E.J. Muovien rooli koneenrakennuksessa ennen ja tulevaisuudessa. [pdf-dokumentti]. 10.11.2010. VTT Technical Research Centre of Finland. [viitattu 19.1.2011] Saatavissa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Ville Ryyänen. Tietokanta vaatii salasanan.

Rosato D.V., Dominick V. et al. 2001. Plastics Institute of America Plastics Engineering Manufacturing and Data Handbook. ISBN: 978-0-7923-7316-2

Saarela O., Airasmaa I. et al. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry, 2003. 494 s. ISBN 951-9271-27-9

Sinex Oy. Tuotannon valmistusmenetelmät. [Sinex Oy:n www-sivu]. 2010. [viitattu 22.1.2011] Saatavissa: <http://www.sinex.fi/index.php?p=rtm-%28resin-transfer-moulding%29>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Muovit rakentamisessa. 1986. Helsinki: 305s. RIL 127-1986. ISBN 952-758-046-0

Taideteollinen korkeakoulu. Muoviteknologia. [virtuaaliyliopisto] Helsinki: Taideteollinen korkeakoulu 2011 [viitattu 25.1.2011]. Saatavissa: http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/muoviteknologia/materiaalit/01-00_muovit.html

Vienamo T. & Nykänen S. 2010. Muovimuotoilu. Taideteollinen korkeakoulu. Virtuaalinen opetusympäristö. [viitattu 19.12.2010]

Saatavissa:http://www.muovimuotoilu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=136&Itemid=199

VTT Expert services Oy. Lujitemuovirakenteiden verifiointi. [VTT:n www-sivu]. Helsinki 2010 [viitattu 28.12.2010] Saatavissa: http://www.vttexpertservices.fi/service/structuralverifications/verification_reinforced_plastic.jsp

Vink Finland Oy. Muovien materiaalitietopankki. [Vink Oy:n www-sivut]. [viitattu 28.2.2010] Saatavissa: <http://www.tuotteet.vink.fi/>

Xperion Oy 2010. Lujitemuovikomposiitit paperikoneteollisuudessa. [pdf-dokumentti]. 11.10.2010. [viitattu 25.2.2010]. Saatavissa: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikan osasto, Ville Rynänen. Tietokanta vaatii salasanan.

Epoxy

thermoset

Trade Names

- Araldite
- Conapoxy
- Eccogel
- Eccoseal
- Epolite
- EPON
- Epoxylite
- Lytex
- Maraglas
- Paraplast
- Fixmaster Poxypak
- Quatrex
- Ren
- Scotchply
- Stycast
- Tactix

Manufacturer

Ciba-Geigy Corp.
 Conap, Inc.
 Emerson & Cuming
 Emerson & Cuming
 Hexcel Corp.
 Shell Chemical Co.
 Epoxylite Corp.
 Premix, Inc.
 Acme
 Hexcel Corp.
 Loctite
 Dow Chemical
 Ciba-Geigy Corp.
 3M Industrial Chemicals
 Emerson & Cuming
 Dow Chemical

General Description

Epoxyes are polymers that have epoxide groups, or oxirane rings, in their molecular structure. They are usually nonmelting thermosetting materials, but linear, high molecular weight thermoplastic epoxyes are also available. Thermoset epoxyes are usually supplied as one-part frozen premixes or two-part systems. Room temperature curing formulations are available, but heat curing epoxyes typically have shorter cure cycles and superior physical properties. Epoxyes may utilize many different curing agents including aromatic amines, anhydrides, carboxylic acids, phenol novolacs, and amino resins. The large number of variations possible in the chemical structure and cure mechanism of epoxyes, coupled with their ability to be compounded with a wide variety of additives and fillers, has led to epoxyes' use in a vast variety of applications. Epoxyes find use as adhesives, coatings, and binding resins in composite structures. Specialty grades available include, but are not limited to, electrically conductive, thermally conductive, fiber reinforced, wear resistant, and machinable grades. In 1994, the price of epoxyes ranged approximately from \$1.00 to \$25.00 per pound at truckload quantities.

General Properties

Due to the vast array of fillers and different types of epoxy resins, the properties of epoxyes vary substantially. Epoxyes are generally very strong, heat, chemical, and abrasion resistant plastics. Glass fiber reinforced epoxy resins provide excellent strength-to-weight ratios and are used in many high technology applications. Many retain excellent electrical properties in extreme conditions and are

	Typical Properties of Epoxy	
	American Engineering	SI
Processing temperature	125-250°F	52-121°C
Linear mold shrinkage	0.001-0.015 in/in	0.001-0.015 cm/cm
Melting point	-	-
Density	43.7-139.2 lb/ft ³	0.70-2.23 g/cm ³
Tensile strength, yield	5.8-10.5 lb/in ² x 10 ³	4.1-7.4 kg/cm ² x 10 ³
Tensile strength, break	1.1-12.5 lb/in ² x 10 ³	0.8-8.8 kg/cm ² x 10 ³
Elongation, break	1.1-8.5%	1.1-8.5%
Tensile modulus	2.0-8.0 lb/in ² x 10 ⁵	1.4-5.6 kg/cm ² x 10 ⁴
Flexural strength, yield	4.0-25.0 lb/in ² x 10 ³	2.8-17.6 kg/cm ² x 10 ³
Flexural modulus	1.4-8.0 lb/in ² x 10 ⁵	1.0-5.6 kg/cm ² x 10 ⁴
Compressive strength	6.8-37.0 lb/in ² x 10 ³	4.8-26.0 kg/cm ² x 10 ³
Izod notched, R.T.	0.3-No Break ft-lb/in	1.6-No Break kg cm/cm
Hardness	D60-D96 Rockwell	D60-D96 Rockwell
Thermal conductivity	0.1-4.6 BTU-in/hr-ft ² -°F	0.014-0.663W/m ² -K
Linear thermal expansion	1.2-11.1 in/in-°F x 10 ⁻⁵	2.2-20.0 cm/cm-°C x 10 ⁻⁵
Deflection temp. @ 264 psi	-	-
Deflection temp. @ 66 psi	-	-
Continuous service temp.	200-400°F	93-204°C
Dielectric strength	300-525 V/10 ⁻³ in	1.2-2.1 V/mm x 10 ⁴
Dielectric constant @ 1MHz	2.7-4.7	2.7-4.7
Dissipation factor @ 1MHz	0.001-0.100	0.001-0.100
Water absorption, 24 hr	0.10-0.70%	0.10-0.70%

used in heavy electrical applications that require long-term outdoor exposure. The excellent abrasion and chemical resistance of epoxy resins has led to their widespread use as flooring, coatings for pipes, and components for chemical scrubbers, as well as in marine applications. Epoxyes are also well-known for their adhesive abilities, which accounts for much of their use. Most epoxyes are resistant to a wide variety of chemicals, including hydrocarbons, esters, bases, and salts. However, epoxyes can be attacked by phenols, ketones, ethers, and concentrated acids.

Typical Applications

- Coatings marine coatings, chemical scrubbers, pipes
- Electronic encapsulation and casting of transistors, integrated circuits, switches, coils, insulators, bushings
- Miscellaneous adhesives, solder masks, rocket motor casings, pressure vessels, flooring, highway paving

ADHESIVE SHEAR STRENGTH

(psi)

(MPa)

Epoxy Loctite products

Loctite Industrial Adhesive		Black Max 380 Rubber Toughened Cyanoacrylate	PRISM 401 Surface Insensitive Cyanoacrylate	PRISM 401/ PRISM Primer 770 Polyolefin Primer for Cyanoacrylates	Super Bonder 414 General-Purpose Cyanoacrylate	Depend 330 Two-Part No-Mix Acrylic	3105 Light Cure Acrylic
Loctite Medical Device Adhesive		—	PRISM 4011 Surface Insensitive Cyanoacrylate	PRISM 4011/ PRISM Primer 7701 Polyolefin Primer for Cyanoacrylates	—	—	3311 Light Cure Acrylic
G-10 Epoxyglass	manufactured by Westinghouse Corp. 21 rms	3200 22.1	3350 23.1	250 1.7	3600 24.8	1000 6.9	1500 10.3
G-10 roughened	33 rms	3200 22.1	2150 14.8	1500 10.3	1800 12.4	1700 11.7	1500 10.3
Loctite Fixmaster Poxy Pak	92 rms	2100 14.5	>3200 ^Δ >22.1 ^Δ	2850 19.7	2650 18.3	1000 6.9	1550 10.7
Loctite Fixmaster Poxy Pak roughened	167 rms	3750 25.9	>3200 ^Δ >22.1 ^Δ	>2650 ^Δ >18.3 ^Δ	>3750 ^Δ >25.9 ^Δ	>1600 ^Δ >11.0 ^Δ	1550 10.7
Loctite Fixmaster Fast Cure Epoxy	116 rms	1600 11.0	1500 10.3	2100 14.5	2750 19.0	1350 9.3	1250 8.6
Loctite Fixmaster Fast Cure Epoxy roughened	134 rms	>1850 ^Δ >12.8 ^Δ	>1900 ^Δ >13.1 ^Δ	>1700 ^Δ >11.7 ^Δ	>1900 ^Δ >13.1 ^Δ	>1200 ^Δ >8.3 ^Δ	2050 14.1
NOTES: <ul style="list-style-type: none"> Δ = The force applied to the test specimens exceeded the strength of the material resulting in substrate failure before the actual bond strength achieved by the adhesive could be determined. □ = The addition of the indicated additive (or surface roughening) caused a statistically significant increase in the bond strength within 95% confidence limits. □ = The addition of the indicated additive (or surface roughening) caused a statistically significant decrease in the bond strength within 95% confidence limits. 							

Adhesive Performance

The four cyanoacrylate adhesives evaluated, namely Black Max 380, Prism 401, 4011 and Super Bonder 414, achieved the highest bond strengths on the various types of epoxies tested. Loctite 3105 and 3311, light curing acrylic adhesives, and Depend 330, a two-part no-mix acrylic adhesive, achieved the lowest bond strengths.

Other Important Information

- Epoxy is compatible with all Loctite adhesives, sealants, primers, and activators.
- Surface cleaners: isopropyl alcohol, Loctite ODC Free Cleaner 7070.

Surface Treatments

Surface roughening usually caused either no effect or a statistically significant increase in the bond strengths achieved on epoxy. The use of Prism Primer 770, in conjunction with Prism 401, or 4011 with 7701, caused a significant decrease in the bond strengths achieved for most of the epoxies evaluated.





Työn tarkasteluun kuuluvat muovit ja materiaalinvalinnan kannalta keskeisimmät tiedot. Lähteet löytyvät taulukosta.

LIITE II

1 MUOVIT	LYHENNE	JATKUVAKÄYTTÖLÄMPÖTILA-ALUE	VETOLUJUUS (ISO-527-1/-2)	RESISTIIVISSYYS	LISÄTIETOJA	LÄHDE	TARKASTELUUN	VALINTA
1.1 KESTOMUOVIT								
1.1.1 VALTAMUOVIT								
	PE	-50 - +80°C			erikoislaadut<150°C	VINK		
	PP	-20 - +100°C				VINK		
	PVC	erikoislaadut max. 100°C				VINK		
	PS	pehmenemislämpötila 75°C				MUOVIMUOTOILU		
1.1.2 TEKNISET MUOVIT								
	ABS	-40 - +85°C				VINK		
	SAN	max. +100°C				MUOVIMUOTOILU		
	PET	max. +100°C				VINK		
	PMMA	-40 - +70°C				VINK		
	PC	max. 130°C				VINK		
	PA	-40 - +80°C			PA4.6/135°C(20000h); PA+lasikuitu/110°C	VINK		
	PA 6 XN	max.140 °C				AIKOLON		
	POM	max. 100°C				VINK		
	PBT	-----			PETP:n hauraampi laatu	VINK		
	CA/CAB/CP	-----			tekniset ominaisuudet eivät riitä	MUOVIMUOTOILU		
	PETP	-40 - +100°C			PETP+lasikuitu<250°C	VINK		
1.1.3 ERIKOISMUOVIT								
	PTFE	-270 - +260°C			sellaisenaan huono jäykkyys,kuten termoelasti	VINK		
	LCP	-----			tekniset ominaisuudet eivät riitä	MUOVIMUOTOILU		
	PI	max. 260°C	110 MPa	10^13Ωm(IEC 93)	erikoislaadut(hetkellinen)<450°C	AIKOLON	X	X
	PSU	max. 160°C	80 MPa			AIKOLON		
	PEEK	max. 260°C	97 MPa(160MPa, murtolujuus)	10^16Ωm(IEC 93)		AIKOLON	X	X
	PEEK MOD.	max. 260°C	141 MPa	-----	seosteena:10%hiilimustaa,10%grafiittia--->ei hyvä eriste	AIKOLON	X	
	PPS	max. 230°C	33 MPa			AIKOLON		
	PVDF	-30 - +140°C				VINK		
	PEI	max. 170°C	105 MPa			AIKOLON		
	PEI+20%LASIKUITU	max. 170°C	135 MPa			AIKOLON		
	PAI	max. 250°C	150 MPa	10^4Qm(IEC 60243-1)		AIKOLON	X	
	PBI	max. 310°C	130 MPa	10^4Qm(IEC 60093)		AIKOLON	X	
1.2 KERTAMUOVIT								
	PUR	-40 - +80°C				VINK		
	EP	-----			käyttö komponenttina	MUOVIMUOTOILU		
	VE	-----			käyttö komponenttina	MUOVIMUOTOILU		
	PF	-----			käyttö komponenttina	MUOVIMUOTOILU		
	MF	-----			käyttö komponenttina	MUOVIMUOTOILU		
	UF	-----			käyttö komponenttina	MUOVIMUOTOILU		
1.3 ELASTOMEERIT								
					tekniset ominaisuudet eivät sovellu			
1.4 LUJITEMUOVIT=KOMPOSIITIT								
	KUDOSBAKELIITTI HGW 2082	max. 120°C				AIKOLON		
	PAPERIBAKELIITTI HP 2061	max. 120°C				AIKOLON		
	DUROSTONE UPM 203	max. 155°C	70 MPa			AIKOLON		
	DUROSTONE EPC 203	max. 155°C	300 Mpa(340 Mpa, murtolujuus)	hyvä sähköneristävyys	epoksi pohjainen	AIKOLON	X	X
	DUROSTONE EPM 203	max. 180°C	280 Mpa(360MPa, murtolujuus)	hyvä sähköneristävyys	epoksi pohjainen	AIKOLON	X	X
	DUROSTONE CLF 770	max. 300°C	(400 Mpa, murtolujuus)	-----	10Q(ominaispintavastus,CEI 93)	AIKOLON	X	X
	EP 105 (CEM-1)	max. 130°C				AIKOLON		
	VETRONITE EGS 619 (FR-4)	max. 130°C				AIKOLON		
	PTFE +25% lasikuitu	max. 260°C	13-18MPa		seos	AIKOLON		
	PTFE +25% hiilikuitu	max. 260°C			hiilikuitu, joten ei toimi eristeenä	AIKOLON		
	PTFE +60% pronssi	max. 260°C	17-22MPa		seos	AIKOLON		
1.5 SOLUMUOVIT								
	PS	pehmenee 70 °C				MUOVIMUOTOILU		

Taulukossa on esitetty kahden ahtopuristusmenetelmän mitta- ja muotorajoituksia suunnittelun avuksi (Saarela 2003, 194).

LIITE III

MITTA- JA MUOTORAJOITUKSET		KYLMÄPURISTUS	KUUMAPURISTUS	SMC
Pienin kaarevuussäde [mm]		6	3	1,5
Reiät valmistuksen yhteydessä		ei	kyllä	kyllä
Minimipäästöastetta		2-3	1-4	1-3
Minimipaksuus [mm]		2	0,8	1,3
Maksimipaksuus [mm]		12	12	25
Paksuusvaihtelu [mm]		0,3	0,2	0,1
Loppukappaleen paksuussuhde		2:1	2:1	ei rajoituksia
Metalliset kiinnikkeet		ei	ei suositella	kyllä
Muottipintoja		2	2	2