

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KONEENRAKENNUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MUOVIKOMPOSITIT JA NÄIDEN  
VALMISTUSTEKNIIKAT  
POLYMER COMPOSITES USED IN MECHANICAL ENGINEERING AND  
MANUFACTURING TECHNIQUES

Venla Kanko 5.5.2011

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	2
2 MUOVIKOMPOSITIT .....	3
2.1 Rakenne .....	3
2.2 Käytettävät matriisimateriaalit.....	5
2.3 Täyteaineet ja lujitteet.....	6
2.4 Mekaaniset ominaisuudet.....	7
3 MUOVIKOMPOSITTIEN VALMISTUS .....	9
3.1 Valmistustekniikat.....	9
3.2 Erilaisten muotojen valmistaminen .....	14
3.3 Ainepaksuudet.....	15
3.4 Valmistusmenetelmien käyttörajoitukset.....	15
4 MUOVIKOMPOSITTIEN KÄYTTÖ .....	17
4.1 Käyttökohteet koneenrakennuksessa.....	17
4.2 Mahdollisuudet ja rajoitteet .....	18
5 CASE-TUOTE .....	20
5.1 Roottorin kansi.....	20
5.2 Roottorin kannen valmistus .....	20
6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	23
LÄHTEET .....	24

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan kirjallisuuden avulla yleisimpiin eri muovikomposiitteihin ja niiden valmistustekniikoihin, silmälläpitäen käyttöä koneenrakennussovelluksissa. Case-tuotteena on roottorin kansi, jolle esitetään sopiva valmistusmenetelmä jos tuote valmistettaisiin muovikomposiitista.

Komposiitti rakentuu kahdesta tai useammasta ainesosasta, jotka eivät liukene toisiinsa. Vahvistava materiaali on usein kuiduista tai hiukkasista koostuvaa ainesta, joka sulautetaan matriisimateriaaliin. Matriisimateriaali on usein jatkuvaa ainetta. Esimerkillisiä komposiittiratkaisuja ovat teräksellä vahvistettu betoni ja grafiitilla vahvistettu epoksi.

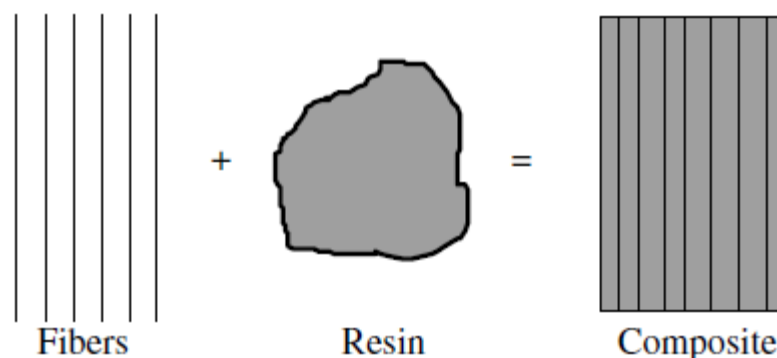
Muovikomposiitit ovat komposiittien alalajeja, missä muovi toimii matriisina. Muovikomposiittien ominaisuuksia muokataan erilaisilla matriisia lujemmilla täyteaineilla ja lujitteilla. Muovikomposiitteja käytetään niiden hyvien materiaaliominaisuuksien takia, kuten lujuuden ja jäykkyyden suhteutettuna tiheyteen, kokoon ja painoon.

Muovikomposiittien historia juontaa 1930- ja 1940-luvuille lähinnä avaruus- ja sotateollisuuden tarpeisiin. Lasikuidun kehitys ja myöhemmin 1970-luvulla muiden kuitujen, kuten hiili- ja boorikuitujen yleistyminen, nosti komposiittien lisääntyvää käyttöä. Nykyisin komposiitteja on yleisessä käytössä esimerkiksi auto-, ilmailu ja avaruusteollisuudessa, kuluttajatuotteissa sekä erilaisissa urheiluvarusteissa.

## 2 MUOVIKOMPOSIITIT

Muovikomposiitit ovat komposiittien yksi alaryhmä, joissa muovi toimii matriisimateriaalina. Muovikomposiitit voidaan jaotella kesto- ja kertamuoveihin perustuviin muoveihin. Kestomuoveja on mahdollista muovata toistuvasti lämmön ja paineen avulla kun taas kertamuovien rakennetta ei voi uudelleen muovata. /1/

Muovikomposiittien rakennetta parannetaan ja muunnellaan käyttämällä erilaisia lujitteita sekä täyteaineita. Lujitteita voi olla esimerkiksi lasikuidut, hiilikuidut tai aramidikuidut. Lujitteita voidaan käyttää kimppuina, lankoina tai sekoittamalla useampia lujitekuituja yhteen. Lujitekuitujen yhdistämisestä tulee puolivalmisteita, joita käytetään mattoina tai kankaina. Komposiiteissa lujitteet kantavat 70–90 % rakenteen kuormasta. /2/ Täyteaineina käytetään erilaisia hienojakoisia materiaaleja, kuten mineraaleja tai lasia, sekä pieniä, eri materiaaleista valmistettuja palloja. Täyteaineita käytetään kun halutaan keventää rakennetta tai parantaa esimerkiksi lopputuotteen sähkön- ja lämmönjohtavuusominaisuuksia. /1/ Komposiitin periaatekuva kuvassa 1.

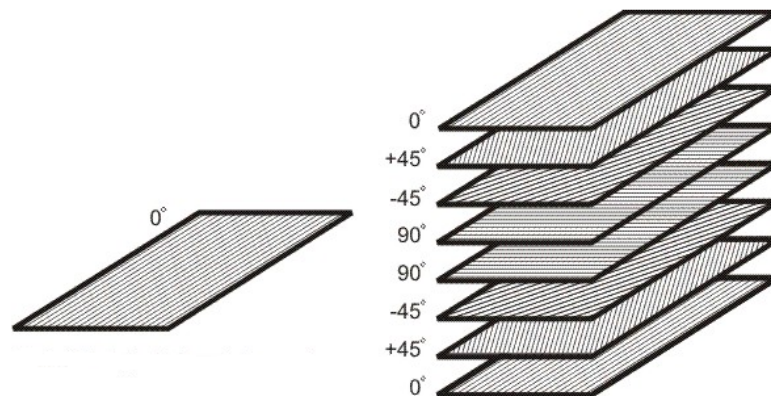


**Kuva 1.** Komposiitti koostuu kuitujen ja hartsin yhdistelmästä. Kuidut + hartsi = komposiitti /2/.

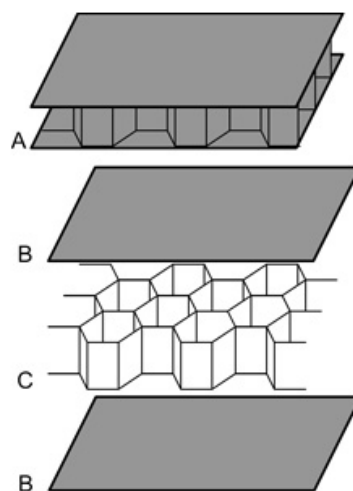
### 2.1 Rakenne

Muovikomposiittiset tuotteet ovat yleensä laminaatteja tai kerroslevyrakenteita eli sandwich-rakenteita. Laminaateiksi kutsutaan kerroksittain asetettujen lujitteiden,

eri kudoksien, mattojen tai punoksien muodostamaa rakennetta. Laminaatti voi koostua yhdensuuntaisesti tai ristikkäin symmetrisesti asetetuista kerroksista. Laminaattia eriasteittain latomalla saadaan jäykempi ja kestävämpi rakenne, verrattuna siihen että kaikki kerrokset olisivat samansuuntaisia. Laminaatin eri kerrokset voivat olla materiaaleiltaan joko samanlaisia tai erilaisia riippuen kappaleen käyttökohteesta. Kerroslevy- eli sandwich-rakenne koostuu kahdesta pintalevystä ja niiden väliin liimatusta ydinaineesta. /1/ Kuvassa 2 laminaattirakenteen ja kuvassa 3 sandwich-rakenteen periaatepiirroksia.



**Kuva 2.** Laminaattirakenteen muodostuminen /3/.



**Kuva 3.** Sandwich-rakenteen muodostuminen /3/.

Muovikomposiittien rakenne on kevyt mutta jäykkä. Kerroslevyrakenteella on parhaimmillaan hyvät taivutusjäykkyyden ominaisuudet keveyden lisäksi

verrattuna laminaattikomposiittiin. Kerroslevyrakenne on kuitenkin valmistusteknillisesti haasteellisempi toteutettava sekä potentiaalisesti kalliimpi valmistuskustannuksilta kuin laminaattilevyrakenne. /4/

## 2.2 Käytettävät matriisimateriaalit

Kertamuovit kovettuvat nestemäisestä hartsista kiinteäksi aineeksi kovettumisreaktiossa. Kovettumisen jälkeen aikaansaatua rakennetta ei ole mahdollista muovata uudelleen lämmön avulla. Kertamuovikomposiiteissa suurimman rasituksen kantaa lujitemateriaalit, täyteaineilla on omat roolinsa nostamassa kappaleen jäykkyyttä. Kertamuovikomposiittirakenteissa lujitteiden ja täyteaineiden osuus on yleensä 30–70 %. Kertamuovit ovat yleisesti suosittuja kappaleen valmistuksellisen yksinkertaisuuden ansiosta. Kertamuovien muottikutistuma on pientä, työstettävyys on helppoa sekä kertamuoveista on mahdollista valmistaa useantyyppisiä kappaleita erilaisina sarjakokoina. Myös korroosion- ja lämmönkestävyysominaisuudet ovat hyvät verrattuna kestomuoveihin. Huonoja puolia kertamuoveilla on niiden kierrättämisen vaikeus sekä hauraus, siten myös heikko iskunkestävyys. /1/

Kertamuovit valmistetaan haluttujen ominaisuuksien mukaan yleisimmin polyestereistä, vinyyliestereistä tai epokseista. /4/ Lisäksi käytetään fenoliformaldehydejä, polyuretaania, polyimidejä tai syanaattiestereitä. /1/

Kestomuovit ovat polymeereistä ja lisäainesta koostuvia yhdistelmiä, jonka muotoa on mahdollista muokata lämmön avulla muuntamatta jo valmiiksi saatua rakennetta. Kestomuovien käyttökohteet ovat erilaiset kuin kertamuovien, esimerkiksi kestomuovien alhaisemman lämmönkeston ansiosta. Kestomuoveja voidaan impregnoida, eli nestemäisessä muodossa käsitellä lujitetta toisella nestemäisellä aineella siten, että nestemäinen aine jää ainakin osittain lopputuotteeseen. Kestomuovikomposiitti on usein prepreg-puolivalmiste, missä esi-impregnoitu lujite yhdistyy matriisimuoviin. Lujitetut kestomuovikappaleet muovataan haluttuun muotoon pääasiallisesti sulattamalla, prepregeinä tai granulaatteina, jotka sisältävät lujitekuituja. /1/

Kestomuovien tärkeimmät matriisimateriaalit ovat polypropeeni ja polyamidit, jotka ovat yleisesti käytettyjä myös muissa muoviteollisuuden tuotteissa. /4/ Enemmän erikoiskohteissa, joissa tarvitaan esimerkiksi erityisen hyvää lämmönkestoa, käytetään polyeetteriketoneja ja polyeetteri-imidejä. /1/

### 2.3 Täyteaineet ja lujitteet

Täyte- ja apuaineet ovat nykypäivän komposiiteissa sekä kustannusten alentajia että fyysisten ja mekaanisten ominaisuuksien muodostajia itse matriisimateriaalin lisäksi. Erilaisina täyteaineina käytetään mineraalitäyteaineita, lasia, metalleja, hiilimustaa sekä orgaanisia täyteaineita. Täyteaineet voidaan jaotella pallomaisiksi, kuutiomaisiksi, lohkareiksi, hiutalemaisiksi sekä kuitumaisiksi. Eri täyteaineista suosituimpia ovat kalsiumkarbonaatit, joita käytetään lähinnä kestomuovien valmistuksessa. Kalsiumkarbonaatit ovat yleisiä täyteaineita edullisen hinnan ja hyvän saatavuuden takia. Myös materiaaliominaisuuksiltaan kalsiumkarbonaatit ovat loistavia hyvän sekoittumiskyvyn ansiosta, niillä pyritään esimerkiksi parantamaan pinnanlaatua ja kontrolloimaan viskositeettia. Muita mainitsemisen arvoisia täyteaineita ovat magnesiumkarbonaatit, talkki, kaoliini, piidioksidi, alumiinihydroksidi sekä erilaiset orgaaniset täyteaineet. Muovikomposiittisiin sovelluksiin myös nanokokoiset täyteaineet tuovat uusia materiaaliominaisuuksia./1/

Lujitekuituja käytetään mekaanisten ominaisuuksien tuojina komposiittirakenteissa ja ne kantavat suurimman osan varsinaisista kuormituksista. Lujitekuidut sitoutuvat toisiinsa matriisimateriaalin avulla. Yleisimpiä lujitekuituja ovat lasikuidut, joiden osuus kaikista lujitekuiduista on n. 95 %. Muita käytettyjä lujitekuituja ovat hiilikuidut, aramidikuidut, luonnonkuidut sekä joukko muita erinäisiä kuituja. /1/

Lasikuituja käytetään tuotteissa, joilta vaaditaan hyviä jäykkyyss- ja lujuusominaisuuksia ja samalla keveyttä. Lasikuituja valmistetaan nykyään lähinnä E-lasista (electrical glass), C-lasista (chemically resistant glass) ja S-lasista (high strength glass). E-lasi on yleisin lasikuitu, koska se omaa hyvät mekaaniset sekä

sähköiset ominaisuudet ja on myös kemiallisesti kestävä. C-lasi on käytetty materiaali happamiin olosuhteisiin hyvien korroosionkesto-ominaisuuksien ansiosta. S-lasi on lähinnä lentokoneiteollisuuden käytössä kalliin hinnan vuoksi, mutta lämmönkesto ja lujuusominaisuudet ovat E-lasia paremmat. Lasikuituja valmistaa Suomessa esimerkiksi Ahlstrom Glassfibre Oy. /1/

Hiilikuituja käytetään tuotteissa, joilta vaaditaan lujuus-, jäykkyys- ja keveysominaisuuksien lisäksi esimerkiksi väsymislujuutta, kemiallista kestävyyttä sekä sähkön- ja lämmönjohtavuutta. Hiilikuitua käytetään harvoin yksin lujitekuitumateriaalina, usein hintaa alennetaan lisäämällä lasikuitua. Vastaavasti lasikuitua seostetaan hiilikuidulla ja näin alennetaan painoa ja parannetaan kokonaisominaisuuksia. Aramidikuituja käytetään tuotteissa, joilta vaaditaan keveyden lisäksi vetolujuutta, jäykkyyttä, iskulujuutta ja iskusitkeyttä. Aramidikuituja käytetään usein muiden lujitekuitujen lisäksi parantamassa keveys- ja jäykkyysominaisuuksia. Hiilikuitujen kanssa aramidikuidut tekevät rakenteesta yhä keveämmän ja iskusitkeämmän. Lasikuitujen kanssa aramidikuiduilla saadaan keveämpi ja jäykempi rakenne. Aramidikuidut ovat yleisesti käytössä ballistisissa sovelluksissa erilaisten suojarusteiden valmistuksessa. /1/

## **2.4 Mekaaniset ominaisuudet**

Muovikomposiittien mekaaniset ominaisuudet riippuvat vahvasti seostuksesta sekä valmistusmenetelmästä. Lujitettujen muovikomposiittien lujuus haastaa usein koneenrakennuksessa käytetyt teräkset sekä muut metallit olemalla suurempi suhteutettuna muihin ominaisuuksiin. /4/

Taulukossa 1 on vertailtu eri kuituaineiden kimmo- ja lujuusominaisuuksia alumiiniin ja teräkseen. Yksittäisten kuitujen lujuus on ylivoimainen alumiiniin ja teräkseen verrattuna. Kun epoksi ja kuidut yhdistetään, heikkenee materiaalin lujuus riippuen kuitujen suuntauksesta. Jos kuidut ovat ristikkäin, tulee jäykempi rakenne. Kuitenkin suhteellisissa lujuuksissa komposiittiyhdistelmät peittoavat metallit.



Taulukko 1. Materiaalien ominaisuuksien vertailua /5/.

<b>Materiaali</b>	<b>Kimmomoduuli (Gpa)</b>	<b>Murtolujuus (Mpa)</b>	<b>Suhteellinen kimmomoduuli (Gpa - m<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>Suhteellinen lujuus (Mpa - m<sup>3</sup>/kg)</b>
<b>Grafiittikuitu</b>	230	2067	0.128	1.148
<b>Aramidikuitu</b>	124	1379	0.089	0.985
<b>Lasikuitu</b>	85	1550	0.034	0.620
<b>Suuntamaaton grafiitti/epoksi</b>	181	1500	0.113	0.937
<b>Suuntamaaton lasi/epoksi</b>	38	1062	0.021	0.590
<b>Ristikkäinen grafiitti/epoksi</b>	95	373	0.060	0.233
<b>Ristikkäinen lasi/epoksi</b>	23	88	0.131	0.049
<b>Teräs</b>	206	648	0.265	0.083
<b>Alumiini</b>	68	275	0.265	0.106

Muita komposiittien hyviä mekaanisia ominaisuuksia ovat kulumiskestävyys ja liukuominaisuudet. Eroosionkesto-ominaisuudet ovat komposiiteilla huomattavasti parempia kuin monilla metalleilla. Korroosionkestävyys on seostamalla saatava ominaisuus, jolloin joko koko komponentti tai pinnoite tehdään eri kemikaaleille tai olosuhteille kestäväksi. Esimerkiksi epokseilla on hyviä korroosionkestävyyteen vaikuttavia ominaisuuksia. /8/

Tuote otettaessa muotista ulos on useimmiten käyttövalmis. Jälkityöstönä pitää poistaa materiaaliylijäänteitä. Vauriokorjauksia on yksinkertaista tehdä esimerkiksi laminaattituotteisiin. Isot kappaleet, kuten tuuliturbiinien lapojen murtumat voidaan korjata uusilla kerroksilla tai pinnoitteilla. Pienemmät kappaleet ovat yleensä kertakäyttöisiä. Esimerkiksi pienet hammaspyörät tai laakerit ovat edullisia uusia kokonaan. /2/

### 3 MUOVIKOMPOSIITTIIEN VALMISTUS

Muovikomposiitteja voidaan valmistaa sekä käsin että automatisoidusti riippuen valmistettavista kappalemääristä ja kappaleen geometriasta. Yleisimmin muovikomposiittien valmistusmenetelmät jaotellaan laminointimenetelmiin, puristusmenetelmiin, injektioimenetelmiin sekä suulakemenetelmiin. Muovikomposiittien valmistuksessa on mahdollista tehdä kerralla valmiita tuotteita tai puolivalmisteita.

#### 3.1 Valmistustekniikat

Muovikomposiittisia laminaattirakenteita valmistetaan laminointimenetelmillä, joita on käsinlaminointi, ruiskulaminointi sekä kuitukelaus. Käsinlaminoinnissa laminaatti valmistetaan märkä- tai kuivalaminoimalla avomuottiin, jonka jälkeen tuote kovetetaan käyttämällä märkälaminoinnissa nestemäistä hartsia tai kuivalaminoinnissa prepregejä. /1/ Käsinlaminoinnissa selkeä haaste on kuitujen oikea suuntaaminen, apuna on mahdollista käyttää automatisoituja kuidun paikoittamislaitteita. Käsinlaminoimalla yleensä valmistetaan suuria, yksittäisiä kappaleita tai osia, kuten siipirakenteita tai tuuliturbiinien lapoja. /2/

Ruiskulaminointi on käsinlaminoinnin tapainen, mutta automatisoitu valmistusmenetelmä, missä raaka-aine ruiskutetaan muottiin. Koneen silppuri pilkkoo lujiteainetta, kuten lasikuiturovinkia, tiettyyn mittaan ja ruiskupistooli pakottaa kuidut hartsisuihkeen läpi muottiin. Ruiskulaminointi on nopea ja edullinen menetelmä, mutta kappaleiden lujuus ei ole käsinlaminoinnin vertainen. /2/

Erilaisia automatisoituja laminointimenetelmiä ovat nauhanladonta, materiaalikelasta irrotettujen nauhojen ja kuitujen ladonta sekä laminointi. Automatisoiduilla menetelmillä on mahdollista laminoida tasaisia tai yksinkertaisia muotoja vaativia kappaleita. Kappaleen muotoisen pyörivän muotin avulla punomalla kuitulangasta on mahdollista valmistaa erilaisia säännöllisiä muotoja, kuten palloja ja ovaaleja, jotka muodostuvat ristikkäisistä kudoksista.

Kuidunkelausmenetelmällä hartsilla esikyllästettyä tai märkänä kyllästettyä kuitua kelataan karan päälle. Kara toimii irrotettavana muottina, jonka muotoiseksi kuivuneet kuidut muodostavat kappaleen. /4/ Kuidunkelausmenetelmällä valmistetaan paineastioita, putkia ja tankkeja. /2/

Kelaamalla tehdään myös erikokoisia komposiittiteloja, joita käytetään suurissa paino- ja paperikoneissa sekä muissa teloja vaativissa laitteissa. Komposiittinen tela painaa noin 10–20 % perinteisen metallisen telan painosta. Painonsäästö on huomattava ja sen myötä telan toimimiseen vaadittavan laakeroinnin tarve vähenee. Kulumis- ja korroosionkestävyys sekä keveyden tuoma mahdollisuus korkeammille kierrosnopeuksille ovat komposiiteille tyypillisiä ominaisuuksia. /1/ Metso Composites valmisti ensimmäisiä komposiittisia paperikoneiden teloja, kuva 4. Metso Composites on nykyisin Xperiom GmbH omistuksessa. /6/



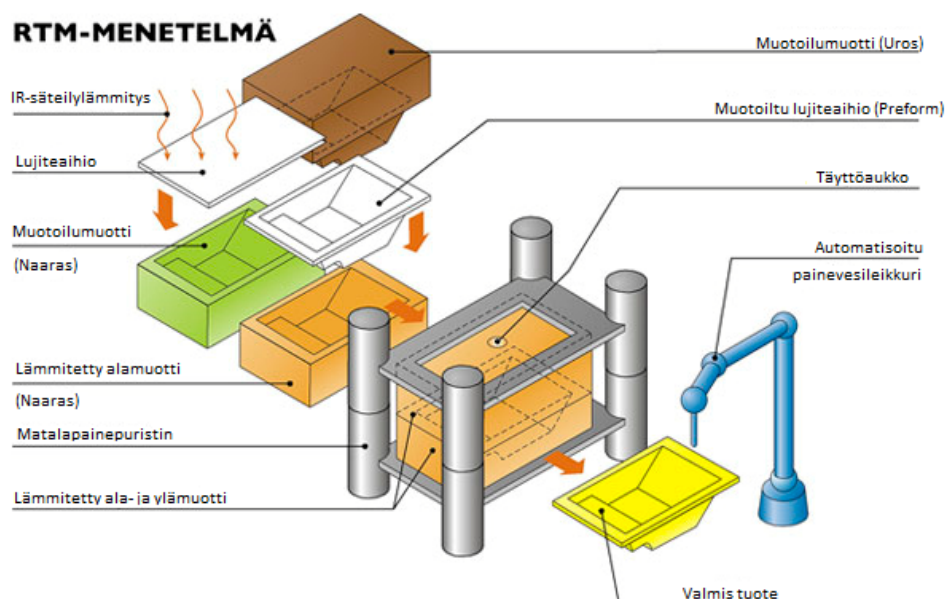
**Kuva 4.** Metso Compositesin valmistamia hiilikuituisia komposiittiteloja /6/.

Puristusmenetelmiä käyttämällä tuote nimenmukaisesti puristetaan muotoonsa. Puristusmenetelmät jaetaan materiaalin tuonnin perusteella siirtopuristukseen, missä materiaali annostellaan siirtosylinteriin ja tuodaan muottiin, sekä ahtopuristukseen, missä materiaali annostellaan suoraan muottiin. Ahtopuristus jaetaan vielä kuuma- ja kylmäpuristukseen, missä kuumapuristus tapahtuu korotetussa työlämpötilassa. /1/

BMC (bulk molding compound) on sekä siirto- että ahtopuristusmenetelmä, missä yleensä kaikki materiaalit sekoitetaan ensin yhteen, jonka jälkeen pelkästään paineen avulla materiaali annostellaan ja kovetetaan muottiin. BMC-menetelmällä on mahdollista automatisoidusti tuottaa pinnanlaadullisesti, lujuusominaisuuksiltaan sekä kemikaalisilta ominaisuuksiltaan hyvälaatuisia komponentteja. /9/

SMC (sheet molding compound) ei periaatteessa ole valmistusmenetelmä, vaan enemmänkin vakiintunut termi valmiin aihion käytöstä, jota muokataan puristamalla siitä valmis tuote. Arkki muodostuu kertamuovista, lasikuituisesta jäykisteestä ja täyteaineista. /9/ Reiät ja erilaiset ulokkeet ovat mahdollisia yhdellä valmistuskerralla eikä kappaleen paksuussuhde ole rajoittava tekijä. /1/ SMC on yleisesti käytetty valmistusmenetelmä autoteollisuudessa sen yksinkertaisuuden ja nopeuden ansiosta. SMC-menetelmää käyttäen valmistetaan mittatarkkoja levymäisiä kappaleita, kuten ovia ja puskureita. /2/

Injektiomenetelmissä materiaali syötetään muottiin joko valamalla tai käyttämällä ali- tai ylipainetta. RMT-menetelmä (resin transfer molding) on paineinjektiomenetelmä, missä jo lujitemateriaalin sisältävään muottiin painetta käyttämällä injektoidaan matriisimateriaali. Lopuksi tuote kovetetaan. Kappaleet voivat olla geometrioiltaan haastavia, kuitenkin lopputuloksena on molemmin puolin pinnanlaadullisesti hyviä kappaleita. /4/ RTM-menetelmää käyttäen valmistetaan erilaisia levymäisiä kappaleita, koreja sekä lapoja. /2/ Kuvassa 5 on periaatekuva Sinex Oy:n käyttämästä laitteistosta.

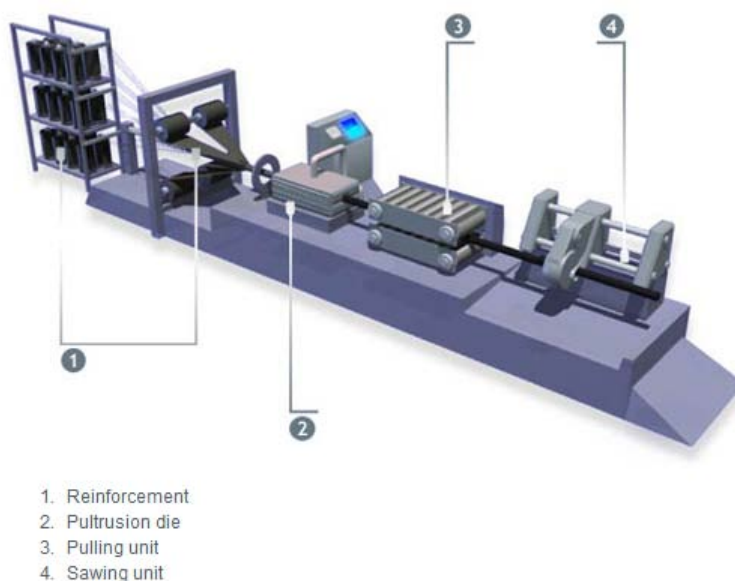


**Kuva 5.** RTM-menetelmänperiaatekuva /10/.

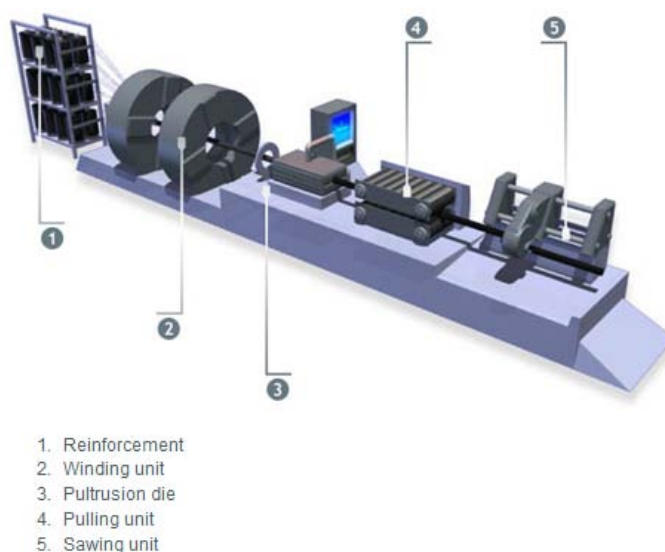
Yksi versio käyttää RTM-menetelmää on vakuumpussilla avustettu VARTM (vacuum assisted resin transfer molding). VARTM-menetelmässä vakuumpussia käyttäen materiaalisekoitus, mikä sisältää sekä kuidut että hartsin, kovetetaan muotoonsa avonaista muottia vasten. Vakuumpussin kanssa ei tarvita kiinteää kaksipuolista muottia. VARTM on kustannustehokas menetelmä esimerkiksi suurien, yksittäisten kappaleiden, kuten erilaisten runkorakenteiden ja muottien valmistuksessa. /2, 4/ Toinen versio RTM-menetelmästä on VARTM:n kaltainen patentoitu SCRIMP-menetelmä. SCRIMP eroaa VARTM:stä siten, että ensin vakuumpussiin ahdetaan kuidut ja sitten vasta hartsi. Näin varmistetaan kuitujen oikea suuntaus ennen kuin ne kyllästetään hartsiilla ja kovetetaan. SCRIMP soveltuu myös VARTM-menetelmän kaltaisiin sovelluksiin. /2/

Suulakemenetelmillä valmistetaan muovikomposiittisia profiileja ja tankoja, joilla on kiinteä eli koko matkalta tasainen poikkipinta-ala. Menetelmä jaetaan ekstruusioon eli suulakepursotukseen ja pultruusioon eli suulakevetoon, jotka ovat jatkuvia valmistusmenetelmiä ja kappaleet muodostavat suulakkeen perusteella halutun muodon. Materiaali voi olla kuivaa, joka on esikyllästettyä kertamuovia, tai märkää, missä kuitukimppu kyllästetään hartsiilla altaassa. Materiaali syötetään lämmitetyn

suulakkeen läpi, jonka ansiosta kuidut kovettuvat. Kovettumisen jälkeen kappaleet katkaistaan haluttuun mittaan. /1,4/ Kuvassa 6 on Exel Compositesin periaatekuva pultruusiomenetelmästä. Pullwinding eli vetokelaus on pultruusiosta kehitelty menetelmä, missä kuitu kelataan ristikkäiseen muotoon pultruusiossa. Menetelmän periaatekuva on kuvassa 7. /11/



**Kuva 6.** Pultruusiolaitteisto. Suom. 1. Jäykiste, 2. Suulake, 3. Vetoyksikkö, 4. Sahausyksikkö /11/.



**Kuva 7.** Pullwinding- eli vetokelauslaitteisto. Suom. 1. Jäykiste, 2. Kelausyksikkö, 3. Suulake, 4. Vetoyksikkö, 5. Sahausyksikkö /11/.

### 3.2 Erilaisten muotojen valmistaminen

Muovikomposiittirakenteiden valmistuksessa käytetään usein muottia. Muottia tehdessä käytetään mallia, jonka materiaalin tulee olla helposti muotoiltavissa sekä mielellään halpa. Muottien tärkeimmät kriteerit ovat kulumiskestävyys ja lämmönkesto. Kovimmille joutuvat kuumalujien kestopuovien puristuksessa käytettävät muotit, jolloin lämpölaajenemiskertoimiin tulee kiinnittää erityishuomiota kappaleiden mittamuutoksien eliminoimiseksi. /1/ Muotin pinnanlaatu vaikuttaa suuresti valmiin kappaleen pinnanlaatuun. /2/

Pieniä kappaleita, joiden sarjakokoko ei ole suuri, voidaan tehdä valettaviin kertamuovimuotteihin. Esimerkiksi epoksi soveltuu muottimateriaaliksi pienen kovettumiskutistuman ansiosta. Avomuottimenetelmissä ja käytettäessä pieniä muottipaineita, kuten puristus- ja injektio menetelmissä, yleisin muottimateriaali on lasikuitulujitemuovit. Hiilikuitukomposiitteja valmistettaessa hyvä muottimateriaali on myös hiilikuitulujitteinen muovi. /1/

Metalliset muotit ovat parhaimpia korkeissa paineissa ja lämpötiloissa käytettäviin sovelluksiin. Metalliset muotit pitävät paremmin mittatarkkuutensa kun muovauslämpötilat nousevat yli 150 °C. Alumiini on paljon käytetty edullisuutensa takia erilaisissa prototyypimuoteissa sekä piensarjojen valmistuksessa. Teräs kestää paremmin kovia paineita ja lämpötiloja, ja on paljon käytetty suursarjatuotannossa. Teräsmuotteja edullisempi, mutta pinnanlaadultaan vähän heikompi muotti, on lujitemuovilla tai muulla edullisella materiaalilla jäykistetty metallikuorinen muotti. Ruiskutettu metallikuorinen muotti on nopea ja edullinen valmistaa. Ruiskutetut kuoret soveltuvat prototyyppien valmistukseen ja keskisuurien sarjakokojen valmistukseen. Elektrolyyttisesti pinnoitettu kuorimuotti on hitaampi valmistaa, mutta tuloksena on suursarjatuotantoon soveltuva muotti, joka on myös kevyt ja pinnanlaadultaan hyvä. Myös keraamisia muotteja voidaan käyttää korkeissa lämpötiloissa. Keraami on materiaalina edullinen ja muotin valaminen on yksinkertaista. /1/

Muovikomposiittisia komponentteja on mahdollista leikata ja yhdistellä. Leikkaus onnistuu materiaalin kovuudesta riippuen joko sahaamalla tai erilaisia laikkoja

käyttäen. Vesileikkaus on myös soveltuva menetelmä. Lastuaminen voi aiheuttaa esimerkiksi laminaattirakenteen vaurioitumisen. Lisäksi muovikomposiittien lastuamiseen työkalulta vaaditaan paljon, koska kuidut ovat niin kovia, joten lastuaminen ei varsinaisesti ole toivottava valmistustoimenpide. /12/

Muovikomposiitteja on mahdollista liittää toisiinsa joko liimaamalla, mekaanisella liittämällä tai hitsaamalla, käyttäen esimerkiksi vastus- tai laserhitsausmenetelmiä. Laminaattikomponentteja on yksinkertaista liittää toisiinsa pistehitsaamalla asettaen laminaatteja päällekkäin ja tuomalla lämpöä, joka yhdistää kappaleet pistemäisesti kiinni toisiinsa sulattamalla matriisimateriaalia. Liimaaminen on myös helppo keino yhdistää komposiitteja, mutta vaatii tarkkaa pinnankäsittelyä kestävästi liitoksen varmistamiseksi. /13/ Muovikomposiittien liittämistä kannattaa minimoida turhien valmistuskustannuksien välttämiseksi sekä hinnakkuuden vuoksi. /2/

### **3.3 Ainepaksuudet**

Monipuolisin menetelmä aineenpaksuuksien mukaan valittuna on käsinlaminointi tai ruiskutus, kappaleen minimipaksuus on 1 mm ja maksimipaksuutta ei ole, koska tuotetta valmistetaan avomuottiin. Laminoititavoista kelaus on myös monipuolinen avomuotin ansiosta, paksuusluokka lähtee 0,25 mm ja tuote voi olla yli 50 mm paksu. Kaksipuolisilla muoteilla maksimipaksuus rajoittuu 12...25 mm riippuen valmistustavasta. /1/ Aineenpaksuuksien kasvaessa tuotantonopeudet laskevat sekä kovettumisajat pitenevät. /2/

### **3.4 Valmistusmenetelmien käyttörajoitukset**

Rajoituksiin vaikuttavat kappaleen geometria, koko- ja lujuusluokka ja valmistuksen järjestyminen. Pienille tai keskisuurille sarjakoille ei ole järkevää harkita suurien investointien valmistustapoja, kuten puristusmenetelmiä. Suuria sarjoja valmistettaessa kannattaa miettiä valmistusaikoja, tehokkuutta ja yksinkertaisuutta. Geometrisistä ominaisuuksista tärkeitä tekijöitä ovat monipuoliset ja erikoiset muodot, reiät sekä paksuus. Erilaiset ulokkeet sekä suuret kappalekoot myös rajoittavat valmistusmenetelmien valintaa.



Käyttökohteesta riippuen pinnanlaadulliset asiat vaikuttavat myös jälkityöstön määrässä. Yleisesti ottaen muovikomposiittisten kappaleiden pinnanlaadut ovat korkeaa luokkaa. Pinnanlaatuun on mahdollista vaikuttaa myös materiaalivirran nopeudella ja muotin pinnoittamisella. /1, 2/

Taulukossa 2 vertaillaan eri valmistusmenetelmiä melko triviaalein adjektiivein. Kuitenkin pääperiaatteet käyvät ilmi, koska esimerkiksi tuotantonopeuksiin vaikuttaa suuresti kappaleen koko ja käytettävä materiaali. Hintaan vaikuttaa tuotantomäärät sekä fyysisen työn tarve. Lujuus riippuu kuitujen suuntaamisesta sekä käytetystä lujitteesta. Kappaleen suurimpaan mahdolliseen kokoon ja muotoon vaikuttaa lähinnä vain muotin koko. Esimerkiksi käsinlaminoimalla kokorajoitteita ei ole. Mahdolliset erikoiset geometriat ovat tehtävissä lähinnä puristusvalmistusmenetelmillä. Kaikki valmistusmenetelmät eivät sovellu kaikille raaka-aineille, vaan esimerkiksi pitkille ja lyhyille kuiduille on eri menetelmät. /2/

Taulukko 2. Valmistusmenetelmien vertailua /2/.

Prosessi	Tuotanto- nopeus	Hinta	Lujuus	Koko	Muoto	Raaka- materiaali
<b>Käsin- laminointi</b>	Hidas	Kohtalainen → korkea	Kohtalainen → korkea	Pieni → suuri	Yksinkertainen → monimutkainen	Esivalmisteet ja matot epoksihartsilla
<b>Pultruusio</b>	Nopea	Matala → kohtalainen	Korkea	Läpileikkaus pieni → suuri	Pysyvä	Jatkuvat kuidut
<b>Kuidun- kelaus</b>	Hidas → nopea	Matala → korkea	Korkea	Pieni → suuri	Sylinteri- mäinen, akselisym- metrinen	Jatkuvat kuidut epoksi- ja polyesteri- hartsilla
<b>RTM</b>	Kohtalainen	Matala → kohtalainen	Kohtalainen	Pieni → kohtalainen	Yksinker- tainen → monimut- kainen	Aihiot ja matot vinyyliesterillä ja epoksilla
<b>Ruisku- puristus</b>	Nopea	Matala	Matala → kohtalainen	Pieni	Monimut- kainen	Lyhyet kuidut kertamuoveilla
<b>Ahto- puristus</b>	Nopea	Matala	Kohtalainen	Pieni → kohtalainen	Yksinker- tainen → monimut- kainen	Muovatut aihiot (SMC, BMS)

## 4 MUOVIKOMPOSIITTIIEN KÄYTTÖ

Muovikomposiitteja käytetään niiden hyvien rakenteellisten ominaisuuksien takia, jotka mahdollistavat suoraan muotoon valmistuksen, sekä materiaaliominaisuuksien takia. Yhdellä muovikomposiittisella kappaleella voi korvata usean metallisen komponentin rakenteen. Muovikomposiiteilla on hyvä lujuus-paino-suhde ja käyttökohteesta riippuen ne haastavat metallit materiaalivaihtoehtona. Koneenrakennuksessa ja sen eri käyttökohteissa muovikomposiitteja kuitenkin käytetään vielä metalleja huomattavasti vähemmän, ehkä muovikomposiittien korkean hinnan takia tai innottomuudesta kokeilla uusia materiaaleja.

### 4.1 Käyttökohteet koneenrakennuksessa

Muovikomposiitteja on käytetty lähinnä pienten koneenosien materiaalivalintana, kuten hammaspyöriä ja laakereita valmistettaessa. Useat kuori- ja suojarakenteet erilaisissa kone- ja laiteratkaisuissa on kuitulujitetusta muovista valmistettuja. /1/

Hyviä liukuominaisuuksia omaavia komposiitteja käytetään paljon joko pinnoitteena tai koko komponentin materiaalina kohteissa, jossa tarvitaan kitkaa paremmin kestäviä pintoja, kuten laakereissa ja pumpuissa. /8/. Myös sovelluksissa, joissa muutoin käytettäisiin voiteluaineita vaativia laakereita ja mahdollisesti vuotavia tiivisteitä, vaihtaminen komposiittisiin versioihin toisi luotettavuutta ja muovikomposiittien hyvät liukuominaisuudet sekä esimerkiksi korroosionkestokyvyn hyödyt. /14/

Massiivisia mutta kevyitä rakenteita suunniteltaessa muovikomposiitit ovat hyviä materiaaleja. Esimerkiksi helikoptereiden ja tuuliturbiinien lapoja valmistetaan muovikomposiiteista, koska lopputuloksena vaaditaan lujia, kestäviä mutta kevyitä kappaleita. /15,16/ Kuvassa 8 esitetään tuuliturbiinin lavan valmistusta, missä yleensä muottia käyttäen valmistetaan kaksi erillistä kuorta, jotka yhdistetään epoksiliimalla.



**Kuva 8.** Tuuliturbiinin lavan valmistus /16/.

#### **4.2 Mahdollisuudet ja rajoitteet**

Muovikomposiittisia koneenosia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon osan käyttökohde ja kappaleen geometria. Muovikomposiittien materiaalin monipuolisuus ja monet hyvät mekaaniset ominaisuudet korvaavat paljon jo käytössä olevia muita materiaalivaihtoehtoja. Muovin korkea hinta kannustaa yhä enemmän innovatiivisiin ratkaisuihin kevyiden ja kestävien kappaleiden ja rakenteiden materiaalisuunnittelussa.

Muovinanokomposiitit tuovat uusia ominaisuuksia perinteisempien muovikomposiittien rinnalle. Seostamalla matriisiainetta käyttämällä täyteaineina nanokokoisia partikkeleita, kuituja tai kankaita, on mahdollista kasvattaa kesto- ja kertamuovien lujuutta. Muovinanokomposiittien ominaisuuksien parannuksia on esimerkiksi kohonnut valmiin tuotteen käyttölämpötila, palonsuojan parantuminen, lisääntyneet kovuus- ja jäykkyysominaisuudet, parantuneet mekaaniset ominaisuudet sekä pinnanlaatu. Myös sähkönjohtavuutta ja kulumis- ja kitkaominaisuuksia on mahdollista parantaa sekä nykyaikana tärkeä kierrätettävyys on helpommin toteutettavissa. Muovinanokomposiiteissa

lujiteaineet ovat pienempiä ja irtoavat toisistaan helpommin kuin esimerkiksi lasikuidut. /14/

Nanokomposiittien täyteaineista käytetyimpiä ovat savimineraalit, joita sitten orgaanisesti modifioidaan. Savimateriaalit ovat levymäisiä nanopartikkeleita, joiden kerroksia pyritään erkauttamaan pinta-alan maksimoimiseksi. Muita nanopartikkeleita on esimerkiksi hiilinanoputket sekä pallomaiset nokipartikkelit ja metallioksidit. Nanokokoisten täyteaineiden käytössä agglomeroituminen, eli partikkeleiden yhteenliimautuminen, tuottaa haasteita. /17/

Muovikomposiittien käytön rajoituksina voidaan pitää laaduntarkastuksen ja aineenkoetuksien tekemisen vaikeutta. Muovikomposiittien rakenne on vaihteleva valmistustavasta riippuen, materiaali on epähomogeeninen ja tiheys melko alhainen. Rikkomattoman aineenkoetuksen tekeminen on vaikeaa materiaalin ollessa läpileikkaukseltaan vaihteleva. /18/ Kappaleiden tasalaatuisuus varsinkin käsinlaminoinnissa on selkeä haaste. Automatisoiduissa menetelmissä kappaleiden raaka-aineiden käyttäminen eri valmistuseristä saattaa aiheuttaa laatueroja.

Komposiittien käytölle suurin rajoite lienee edelleen hinta, joka on moninkertainen esimerkiksi alumiiniin tai teräkseen verrattuna. Myös todella tehokkaat, suursarjoille soveltuvat valmistusmenetelmät ovat vielä lapsenkengissä verrattuna metalliteollisuuteen. Myös kappaleiden käyttökohteita rajoittavat käyttölämpötilat, jotka ovat yleisesti alhaisempia kuin metalleilla. Kertamuovien sulamislämpötila vaihtelee 100..350 °C välillä, kun alumiinilla lämpötila on 500 °C ja teräksellä 1200 °C paikkeilla. /2/

Muovikomposiittien käytössä kierrätykseen ja kestävään kehitykseen panostetaan koko ajan. Muovikomposiittien valmistuksessa ylijäämät pyritään käyttämään uudelleen joko samanlaisissa sovelluksissa tai ne kierrätetään hajottamalla materiaali takaisin alkuperäisiin komponentteihin. Eri valmistusmenetelmien aikana mahdolliset myrkylliset päästöt tulee hallita ja poistaa standardien mukaisesti. /2/

## 5 CASE-TUOTE

Case-tuotteena on tässä työssä roottorin kansi, joka tulisi valmistaa muovikomposiitista sille sopivalla valmistusmenetelmällä. Tuotteen sarjakoko on 100–1000 kappaletta vuodessa. Tuotteen käyttölämpötila on vaihteleva, mutta materiaalin tulisi olla vähintään 150 °C kestävä. Alustavasti materiaaliksi roottorin kannen valmistukseen on mietitty PEEK- tai PI-pohjaista muovikomposiittia. /19/

PEEK on kestumuovi, mikä omaa hyvän kemikaalienkesto-ominaisuuden, on mittapysyvä ja sen mahdollinen käyttölämpötila on jopa 250 °C. PI on kertamuovi, jolla on erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet ja kestää myös hyvin korkeita lämpötiloja.

### 5.1 Roottorin kansi

Kappaleen ulkohalkaisija on 525 mm ja sisähalkaisija 245 mm. Kappale on paksuudeltaan vaihteleva, ohuimmillaan seinämänpaksuus on 1 mm ja paksuimmillaan 12,8 mm. Kappaleessa on myös sekä jyrkempiä että loivempia pyöristyksiä. Kiinnitystä varten kappaleessa on reikiä. Isommat reiät ovat halkaisijaltaan 9 mm ja pienemmät 6,7 mm. Kuvassa 9 näkyy roottorin kannen geometria ja kuvassa 10 roottorin kannen tasainen puoli.

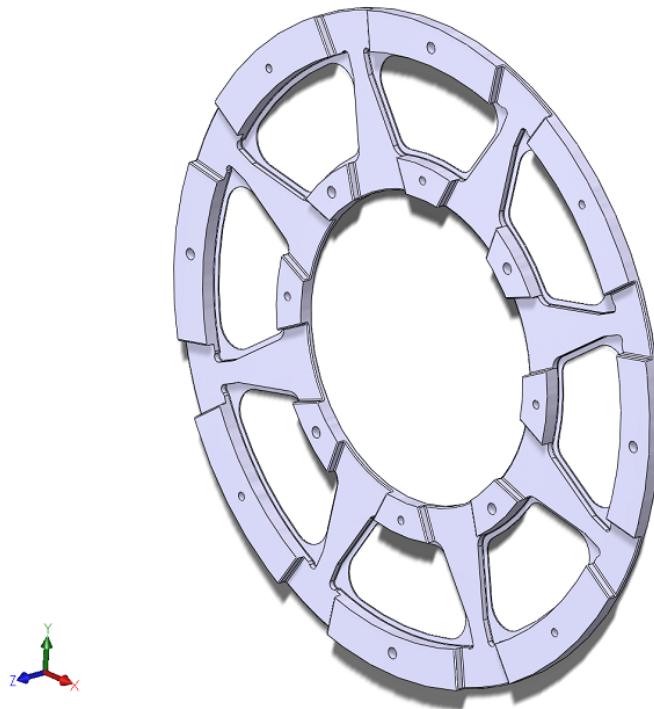
Muovikomposiittinen kansi soveltuu eri ominaisuuksien ansiosta vaativiinkin olosuhteisiin. Esimerkiksi korroosionkesto-, jäykkyys- ja kestävyysominaisuudet ovat muovikomposiittisessa materiaalissa valmiina. Verrattuna metallisiin vaihtoehtoihin, muovikomposiittista valmistettu kappale on kevyempi.

### 5.2 Roottorin kannen valmistus

Roottorin monipuolinen geometria tulisi saada valmiiksi yhdellä valmistusvaiheella. Muotista riippuen reiät kuuluvat valmiiseen kappaleeseen tai ne porataan jälkikäteen sekä poistetaan mahdolliset viisteet. Geometrian vaihtelevuus ja paksuuserot vaativat yksityiskohtaisen valmistusmenetelmää sekä mittatarkan

muotin. Koska kappaleen toinen puoli on sileä, sen voi painaa tasaista pintaa vasten ja geometria saadaan esiin tekemällä sitä vastaava muotti.

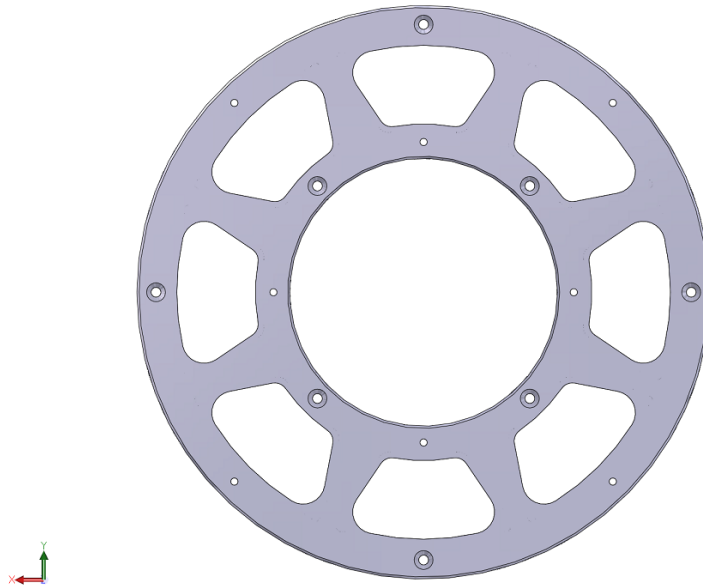
Kertamuovisesta PI-komposiitista valmistettuna roottorin kannelle hyvä valmistusmenetelmä olisi RTM- tai VARTM-menetelmä. Jos kappale valmistetaan PEEK-kestomuovista perustuvasta komposiitista, soveltuvia menetelmiä ovat esimerkiksi BMC tai SMC. Molemmilla menetelmillä aikaansaadaan mittatarkkoja kappaleita ja ne soveltuvat muottivälinein valmistusmenetelminä.



**Kuva 9.** Rootorin kannen geometria /20/.

RTM tai VARTM soveltuu kappaleen valmistusmenetelmäksi mittatarkkuuden ja joustavan muotin perusteella. RTM-menetelmää varten tarvitsee kiinteän muotin, mutta lopputulos on erittäin tarkka ja laatu on molemmanpuolin hyvä. Muita hyviä puolia on kustannustehokkuus ja kuitujen suuntaamisen tuoma kappaleen jäykkyys- ja kestävyysominaisuudet. VARTM-menetelmää käyttäen kuiva materiaaliainio levitetään muottia vasten ja ympäröidään muovisella vakuumpussilla, johon pumpataan hartsi. Vakuumissa kappale kovetetaan

geometrian mukaisesti. VARTM ei vaadi kiinteää muottia, vaan tasaista pintaa vasten geometriaa vastaavaa muottia painamalla kappale saa muotonsa. Valmiiseen tuotteeseen tulee jälkityöstönä porata reiät ja mahdollisesti pyöristetyt aukot.



**Kuva 10.** Roottorin kannen sileä alapuoli /20/.

BMC olisi hyvä menetelmä kappaleen valmistukseen, koska materiaali on valmiina sekoituksena ja valmis kappale on erittäin mittatarkka kopio muotista. Valmistustapahtuma on nopea ja jälkityöstön tarve on vähäinen tai olematon. BMC vaatii kiinteän ja suljetun muotin. Materiaali syötetään lämmitettyyn muottiin, jossa kovettuminen tapahtuu paineen avulla. Muotti on yleensä teräksestä tehty ja todennäköisesti kohtuullisen arvokas haasteellisen geometrian takia.

SMC olisi hyvä valmiin materiaaliaihion käytettävyyden takia. Vaikka geometria vaihtelee, materiaaliaihio mukautuu muotin mukaisesti. Kappale on yhdellä valmistusvaiheella valmis. SMC hyviä puolia on juuri valmistuksen yksinkertaisuus ja kappaleen laadukkuus. Kappaleen pyöristyssäteiden ei pitäisi vaikeuttaa SMC käyttöä. Tasalaatuisuuteen tulee panostaa varsinkin kovettumisen osalta, kun paksuuserot ovat hyvin selkeät.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Muovikomposiittisia kappaleita voi tehdä monipuolisesti eri menetelmillä riippuen raaka-aineen materiaalista sekä valmiin kappaleen muodosta. Muovikomposiittinen roottorin kansi olisi sarjakokonsa ja geometrian takia järkevä tehdä materiaalipäätöksestä riippuen käyttäen joko BMC, SMC-, RTM- tai VARTM-menetelmää. Lopputuloksena tulee joka tapauksessa mittatarkka ja toleransseiltaan hyvä kappale, jonka rakenne on tiivis ja jäykkä.

Muovikomposiittien käyttökohteet ovat monipuoliset ja materiaalivaihtoehtona haastavat koneenrakennuksessa perinteisesti käytetyt metallit. Muovikomposiittien parhaita puolia on valmiiden kappaleiden valmistusmahdollisuudet ja mekaaniset ominaisuudet. Lujuus-paino -suhde on moniin muihin konstruktio materiaaleihin verrattuna ylivoimainen. Suurien yksittäisten kappaleiden valmistus ja eri olosuhteiden kestävyys mahdollistavat muovikomposiittien käytön yleistymistä.

Tulevaisuudessa muovikomposiittien kilpailukykyiseen käyttöön vaikuttavia asioita on raaka-aineiden hinta, valmistusmenetelmien tehokkuuden nostaminen ja kestävään kehitykseen panostaminen. Aina pyritään edullisempiin ratkaisuihin, mutta kestävyys ja kierrätys ovat tärkeitä tekijöitä. Uudet materiaaliyhdistelmät ja innovatiivinen materiaalien käyttö yhdistettynä tehokkaiisiin valmistusmenetelmiin saattavat viedä päätöstä muovikomposiittien käytön suuntaan.



## LÄHTEET

/1/ Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars, Komppa: Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry, 2003. 483 s. ISBN 951-9271-27-9

/2/ Mazumdar, S.K. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press 2002. eBook ISBN: 978-1-4200-4198-9

/3/ Homemade composites. Internet-sivut. Viitattu 9.4.2011. Saatavissa: <[http://www.composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/what\\_are\\_composites.html](http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/what_are_composites.html)>

/4/ Military Handbook - MIL-HDBK-17-3F: Composite Materials Handbook, Volume 3 - Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. U.S. Department of Defense 2002. 693 s. ISBN 978-1-59124-508-7. <[http://www.knovel.com/web/portal/basic\\_search/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=720](http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=720)>

/5/ Kaw, A. K. Mechanics of Composite Materials. Second Edition. CRC Press 2006. eBook ISBN: 978-1-4200-5829-1

/6/ Tekniikka ja talous 17.4.2003. Internet-sivut. Viitattu 8.4.2011. Saatavissa: <<http://www.tekniikkatalous.fi/metsa/article42883.ece>>

/7/ Automated dynamics. Internet-sivut. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa: <<http://www.automateddynamics.com/content/materials>>

/8/ Buckley, T. Proactive use of polymer composites saves money and time. Pumps and systems 4/2007. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa: <<http://www.pump-zone.com/pumps/centrifugal-pumps/proactive-use-of-polymer-composites-saves-money-and-time.html>>

/9/ Peters, S.T.: Handbook of composites. 2nd edition. Lontoo: Chapman & Hall. 1998. ISBN 0412 54020 7. Viitattu 15.2.2011. Saatavissa: <[http://books.google.fi/books?id=5t5ePK1Lc1gC&pg=PA379&lpg=PA379&dq=BM+C+polymer+composites&source=bl&ots=shayLUBZy\\_&sig=JmFfvEd6WVvgzcXNf0evNWtB62U&hl=fi&ei=R-](http://books.google.fi/books?id=5t5ePK1Lc1gC&pg=PA379&lpg=PA379&dq=BM+C+polymer+composites&source=bl&ots=shayLUBZy_&sig=JmFfvEd6WVvgzcXNf0evNWtB62U&hl=fi&ei=R-)>

hUTZSHIceKswbwvKjpDA&sa=X&oi=book\_result&ct=result&resnum=4&ved=0CEAQ6AEwAw#v=onepage&q=BMC%20polymer%20composites&f=false>

/10/ Sinex Oy. Internet-sivut. Viitattu 15.2.2011. Saatavissa:

<<http://sinex.fi/index.php?p=tuotanto>>

/11/ Exel Composites. Internet-sivut. Viitattu 15.2.2011. Saatavissa:

<<http://www.exelcomposites.com/English/Technical/Manufacturingtechnologies/tabta/7663/language/en-US/Default.aspx>>

/12/ Nummi, T., Tapaninen, T. Valtonen, M., Väisänen, T. Vaikeasti koneistettavien materiaalien lastuava työstö. Teknillisen korkeakoulun konepajatekniikan laboratorion julkaisuja. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa:

<<http://users.tkk.fi/~tnummi/hardcut/Yleistamateriaaleista.pdf>>

/13/ Stavrov, D., Bersee, H.E.N. 2004. Resistance welding of thermoplastic

composites-an overview. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa: <

[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6TWN-4D4PS32-](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWN-4D4PS32-1&_user=949867&_coverDate=01%2F01%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1671062848&_rerunOrigin=google&_acct=C000049133&_version=1&_urlVersion=0&_userid=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a)

[1&\\_user=949867&\\_coverDate=01%2F01%2F2005&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=gateway&\\_origin=gateway&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=16710628](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWN-4D4PS32-1&_user=949867&_coverDate=01%2F01%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1671062848&_rerunOrigin=google&_acct=C000049133&_version=1&_urlVersion=0&_userid=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a)

[48&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000049133&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_useri](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWN-4D4PS32-1&_user=949867&_coverDate=01%2F01%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1671062848&_rerunOrigin=google&_acct=C000049133&_version=1&_urlVersion=0&_userid=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a)

[d=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWN-4D4PS32-1&_user=949867&_coverDate=01%2F01%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1671062848&_rerunOrigin=google&_acct=C000049133&_version=1&_urlVersion=0&_userid=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a)

[d=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWN-4D4PS32-1&_user=949867&_coverDate=01%2F01%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1671062848&_rerunOrigin=google&_acct=C000049133&_version=1&_urlVersion=0&_userid=949867&md5=0477974fc4f04ff362e66fc45267133d&searchtype=a)

/14/ Ingram, E.A., Ray, R.W. Bearings & seals: Innovations and good ideas. Power

Engineering 9/2010. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa: <<http://www.scopus.com/>>

/15/ Illston, J . M ., Domone, P . L . J . Construction materials: Their nature and behaviour. 3rd Edition. Spon Press. 2001. eBook ISBN 978-0-203-47898-1.

Viitattu 9.3.2011. Saatavissa: <<http://www.crcnetbase.com/>>

/16/ Grande, J. Wind power blades energize composites manufacturing. Plastics

tehcnoogy 10/2008. Viitattu 9.3.2011. Saatavissa:

<<http://www.ptonline.com/articles/wind-power-blades-energize-composites-manufacturing>>

/17/ Vuorinen, J. Muovit ja nano. Nanoteknologia nyt ja tulevaisuudessa. Vuokatti,

Suomi 19.12.2007. Viitattu 7.3.2011. Saatavissa:

<[http://www.snowpolis.fi/data/documents/MicrosoftPowerPoint\\_Muovit%20ja%20n  
ano%20Jyrki%20Vuorinen%20191207.pdf](http://www.snowpolis.fi/data/documents/MicrosoftPowerPoint_Muovit%20ja%20n<br/>ano%20Jyrki%20Vuorinen%20191207.pdf)>

/18/ Parnasov, V. S., Dobromyslov, V. A. NDT methods, equipment and technology for polymer composite products. Measurement techniques 11/1997.

Viitattu

10.3.2011.

Saatavissa:

<<http://www.springerlink.com/content/2705322q8l3n882q/>>

/19/ Valkeapää, S. Kandidaatintyö 2011.

/20/ Ryyänen, V. 2011