



KOMPOSITIT JA NIIDEN TÄRKEIMMÄT SOVELLUKSET

Emma Vikstedt

Opinnäytetyö
Syyskuu 2015
Paperi-, tekstiili- ja kemian-
tekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka

VIKSTEDT, EMMA:
Komposiitit ja niiden tärkeimmät sovellukset

Opinnäytetyö 30 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Syyskuu 2015

Komposiitti on kahden tai useamman toisiinsa liukenemattoman materiaalin yhdistelmä. Komposiitit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: metalli-, keraami- ja polymeerikomposiitit. Komposiitteja valmistettaessa pyritään maksimoimaan kahden tai useamman eri materiaalin hyvät ominaisuudet ja minimoimaan huonot.

Opinnäytetyö tehtiin kirjallisuustyönä ja työn tarkoituksena oli perehtyä komposiittimateriaaleihin ja erityisesti polymeerikomposiitteihin.

Aluksi käsitellään hartsit ja matriisimateriaalit sekä lujitekuidut, joita komposiiteissa käytetään. Seuraavaksi kerrotaan yleisimmistä valmistusmenetelmistä ja lopuksi perehdytään pääasiassa auto- ja ilmailuteollisuudessa käytettäviin komposiittisovelluksiin.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Paper-, Textile- and Chemical Engineering
Option of Chemical Engineering

VIKSTEDT, EMMA:
Composites and their most important applications

Bachelor's thesis 30 pages, appendices 0 pages
September 2015

Composite is a combination of insoluble materials to each other of two or more. Composites can be divided into three main categories: metal-, ceramic- and polymer composites. When manufacturing composites, the aim is to maximize the good properties of two or more different materials and to minimize the bad.

This thesis was done as a literature work and the purpose of this work was to study composite materials and especially polymer composites.

First resins and matrix materials and reinforcement fibers used in composites are handled. Next will be told about the most general manufacturing methods and finally the different composite applications are handled.

Key words: composite, polymer composite, polymer

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	HARTSIT JA MATRIISIMATERIAALIT.....	7
2.1	Kertamuovi	7
2.1.1	Epoksi.....	8
2.1.2	Polyesterihartsit.....	8
2.2	Kestomuovi.....	8
2.2.1	Polypropeeni	9
2.3	Gelcoat	10
2.4	Topcoat	10
3	LUJITEKUIDUT.....	11
3.1	Aramidikuidut (Kevlar)	12
3.2	Hiilikuitu	12
3.3	Lasikuitu	13
3.4	HP-polyeteenikuidut	14
3.5	Luonnonkuidut.....	14
3.6	Muut lujitekuidut	15
4	VALMISTUSMENETELMÄT.....	16
4.1	Märkälaminointi.....	16
4.2	Kuiva- eli prepreglaminointi.....	17
4.3	Ruiskulaminointi.....	17
4.4	Kuitukelaus	18
4.5	Paine- ja alipaineinjektio	19
4.6	Ruiskuvalu	20
4.7	Ahtopuristus.....	20
4.8	Pultruusio eli suulakeveto.....	21
4.9	Ekstruusio eli suulakepuristus	22
5	KÄYTTÖKOHTEET	23
5.1	Ajoneuvoteollisuus	23
5.2	Ilmailuteollisuus.....	24
5.2.1	Boeing 787 Dreamliner.....	25
5.3	Muut.....	26
5.3.1	Urheiluvälineet.....	26
5.3.2	Puolustuskäyttö	27
5.3.3	Hammashoito	27
	LÄHTEET.....	28

LYHENTEET JA TERMIT

PE	Polyeteeni
PVC	Polyvinyylikloridi
PP	Polypropeeni
PTFE	Polytetrafluorieteeni (Teflon)
ABS	Akrylinitriilibutadienistyreeni
GMT	Glass Mat Thermoplastic
PAN	Polyakrylinitriili
HDPE	High-density polyethylene
UHMWPE	Ultra high molecular weight polyethylene
HPPE	High-pressure polyethylene

1 JOHDANTO

Jo vuosisatojen alussa ensimmäiset tiilet on valmistettu sekoittamalla savea ja olkia. Tässä tiilikomposiitissa oljet olivat kuitulujite ja savi toimi matriisina. Teräskovikevahvisteista sementtiä on käytetty jo viimeiset 150 vuotta rakennusten ja siltojen valmistuksessa. 1900-luvun alussa myönnettiin ensimmäinen patentti, koskien fenolimuovien lujittamista. 1930-luvulla kehitettiin polyesteri- ja epoksimuovit ja ensimmäiset menetelmät muovikomposiittien massatuotantoon kehitettiin 1940-luvulla. 1950-luvulla kuitulujitteisista muoveista kehitettiin läpinäkyviä ja niitä alettiin käyttää veneiden rungoissa, autojen koreissa ja kuorma-autojen hyteissä. (Myllymaa & Vesterbacka 2005)

Konstruktiomateriaalit käsittävät metallit, polymeerimateriaalit, keraamit ja niiden yhdistelmämuodostuvat komposiitit eli yhdistelmämuodostumat. Komposiittimateriaalit jaotellaan matriisin mukaan kolmeen ryhmään: polymeerikomposiitit (PMC), metallikomposiitit (MMC) ja keraamikomposiitit (CMC). Muovi- eli polymeerikomposiitteja ovat lujitemuovit, seostetut muovit, solumuovit sekä muovia sisältävät kerroslevyt ja laminaattirakenteet. (Koivisto ym. 2008, 219–220.)

Kuitulujitettuja komposiitteja on käytetty eniten rakenteellisiin kohteisiin. Kuitumateriaalit ovat hyvin lujia ja jäykkiä, mutta samalla suhteellisen hauraita. Erilaisia kuitumateriaaleja voivat olla esimerkiksi lasikuitu, hiilikuitu, aramidikuidut, boorikuidut ja keraamiset kuidut. (Eskelinen 2012.)

Laminaattikomposiiteissa on useita kerroksia päällekkäin ja kerrokset voivat olla lujitettuja yksisuuntaisilla kuiduilla. Esimerkiksi lentokoneen lattiaa varten voidaan rakentaa vuorottelevista alumiinilevyistä ja Kevlarilla yksisuuntaisesti lujitetuista polymeerilevyistä materiaali, jolla on hyvä jäykkyys sivusuunnassa, mutta myös riittävät lujuusominaisuuden poikkisuunnassa. (Eskelinen 2012.)

Tämä opinnäytetyö on tehty Tampereen ammattikorkeakoululle kirjallisuustyönä ja tarkoituksena on perehtyä polymeerikomposiitteihin, niiden ominaisuuksiin, valmistusmenetelmiin ja käyttökohteisiin.

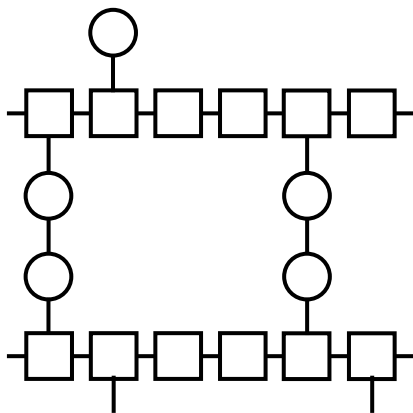
2 HARTSIT JA MATRIISIMATERIAALIT

Komposiittirakenne muodostuu yleensä niin, että toinen komposiitin materiaaleista muodostaa matriisin, johon muut materiaalit sijoittuvat ja sitoutuvat. Matriisi on materiaaliyhdistelmän eli komposiitin kokonaisuudeksi sitova osa. Matriisin tarkoituksena on myös suojata kuituja ja antaa lujuus ja sitkeys materiaalille sekä välittää kuormitus kuitujen kannettavaksi. (Eskelinen 2012; Vikstedt 2015, luentomateriaali.)

2.1 Kertamuovi

Kertamuovi on kaikkein yleisin matriisiaine ja tässä tapauksessa sitä kutsutaan hartsiksi. Kertamuoveissa molekyyliketjut sidotaan toisiinsa kemiallisin sidoksien. Koska lopputuote on silloittunut, ei kertamuovien rakennetta voi muokata uudelleen (kuva 1). Esimerkkejä kertamuoveista ovat epoksit, fenolit, polyesterit, vinyyliesterit ja polyimidit. (Koivisto ym. 2008, 220; Vikstedt 2015, luentomateriaali.)

Kertamuovit ovat metalleihin verrattuna selvästi kevyempiä ja niiden korroosionkesto on yleensä parempi. Ne ovat hyviä sähkön- ja lämmöneristeitä, mutta eivät kestä läheskään yhtä korkeita lämpötiloja kuin metallit. Huonona puolena kertamuoveille on myös se, ettei niitä voida sulattaa uudelleen kovettumisen jälkeen. (Koivisto ym. 2008, 220–221.)



KUVA 1. Kertamuovin rakenne (Vikstedt 2015, luentomateriaali)

2.1.1 Epoksi

Epoksi on yleensä kaksikomponenttinen materiaali, jossa on perusaine eli hartsi ja lisäksi jokin kovetin. Epoksin valmistuksessa täytyy olla tarkkana hartsin ja kovettimen oikeasta suhteesta. Mikäli kovetinta on liian vähän, lopputuotteessa ja kovettumatonta hartsia ja jos kovetinta on liikaa, lopputuotteeseen jää reagoimatonta kovetinta. (Vikstedt 2015, luentomateriaali.)

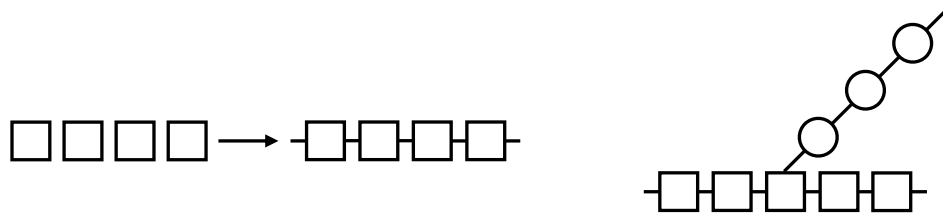
Epokseilla on paremmat lujuusominaisuudet verrattuna poly- ja vinyyliestereihin. Niillä on hyvä kemikaalien kesto ja tarttuvuus lujitteisiin. (Vikstedt 2015, luentomateriaali.)

2.1.2 Polyesterihartsi

Polyesterihartsi on tyydyttymättömän polyesterin ja styreenin seos. Polyesterihartsia käytetään pääosin sen edullisen hinnan vuoksi. Kovetus tapahtuu huoneenlämmössä peroksidikovetteella. Kovettumisreaktiossa vapautuu lämpöä eli se on eksoterminen. Kovetus on kolmivaiheinen, jonka osia ovat hyytyminen eli geelityminen, kovettuminen ja jälkikovettuminen. Hartsin työskentelyajan määrää hyytymisaika. Jälkikovetus tulisi suorittaa 60-120 °C:een lämpötilassa, jolloin hartsi saavuttaa optimaaliset ominaisuutensa. (Kevra Oy.)

2.2 Kestomuovi

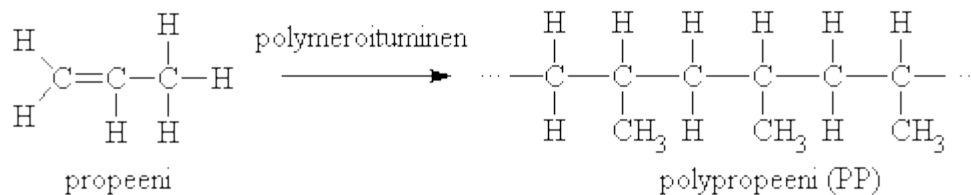
Kestomuoveja saadaan yhdistämällä monomeerejä pitkiksi polymeeriketjuiksi esimerkiksi eteenistä polyeteeniksi. Polymeeriketju voi olla suora tai haaroittunut tai sisältää eri monomeerejä (kuva 2). Polymeeriketjujen välillä ei ole kemiallisia sidoksia ja kestomuovien rakennetta voidaan täten muokata uudelleen lämmön avulla. Esimerkkejä kestomuoveista ovat PE, PVC, PP, PTFE ja ABS. (Vikstedt 2015, luentomateriaali.)



KUVA 2. Kestomuovoin rakenne (Vikstedt 2015, luentomateriaali)

2.2.1 Polypropeeni

Polypropeeni on kolmanneksi eniten käytetty muovi heti polyeteenien ja PVC:n jälkeen. Kemiallisesti polypropeeni muodostuu vain hiilestä ja vedystä. Lujitettuja ja täytettyjä polypropeeneja valmistetaan sen homo- ja kopolymeereistä. Näin saadaan nostettua muovin mekaanisia ominaisuuksia sekä parantaa kemikaalien ja lämmön kestoja. (Saarela ym. 2003, 53–54.)



KUVA 3. Polypropeenin muodostuminen (Etälukio)

Suurimpia polypropeenin käyttökohteita ovat erilaiset pakkaukset, auto- ja sähköteollisuuden muoviosat ja kuidut. Uutena sovelluksena polypropeenille on komposiitti, jossa lujitteena käytetään polypropeenikuitua kudosuodossa ja matriisina polypropeenia. Tämän tuotteen etuina ovat kierrätettävyyden ohella alhainen paino ja hyvä iskulujuus. Tärkein komposiittisovellus polypropeenille on kuitenkin ns. GMT, joka on jatkuvakuituisella lasikuitumatolla lujitettu, puristemuovattava kestopuovilevy. (Saarela ym. 2003, 53–54.)

2.3 Gelcoat

Gelcoat sivellään tai ruiskutetaan muottiin ennen laminoinnin aloittamista. Se suojaa laminaattia säältä, kosteudelta ja kemikaalien aiheuttamalta rasitukselta, sekä antaa hyvän ja kovan pinnan. (Kevra Oy; Koivisto ym. 2008, 223.)

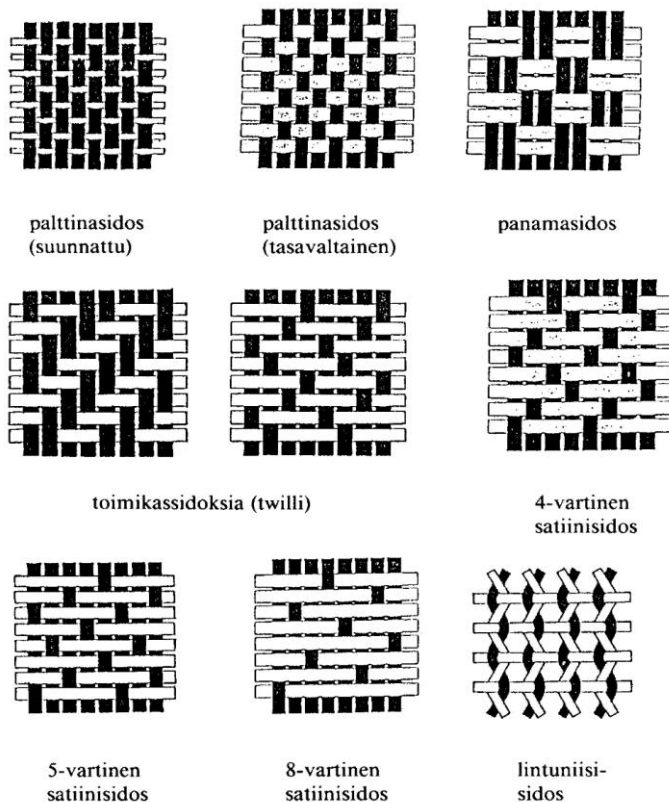
2.4 Topcoat

Topcoat on ilmanvaikutuksesta kovettuva parafiinipohjainen pintamaali. Se tulisi levittää mahdollisimman nopeasti laminaatin valmistuksen jälkeen. Mikäli työ tehdään myöhemmin, laminaatin pinta hiotaan ja puhdistetaan huolellisesti ennen maalausta. (Kevra Oy.)

3 LUJITEKUIDUT

Lujitekuituja eli lujitteita käytetään muovien ominaisuuksien parantamiseen. Niiden pääasiallisena tehtävänä on kantaa komposiittiin kohdistuvia kuormituksia. Tunnetuimpiin lujitekuituihin kuuluvat muun muassa hiilikuidut, lasikudut ja aramidikuidut eli aromaattiset polyamidikuidut. (Saarela ym. 2003, 74.)

Muovikomposiittituotteiden valmistuksessa käytetään eniten tasolujitteita, joista yleisimpiä ovat lujitematot ja -kankaat. Katkotuista tai jatkuvista lujitekuiduista valmistetaan lujitemattoja sideaineen avulla niin, että kuidut ovat maton tasossa satunnaisesti suuntautuneet. Lujitekankaista yksinkertaisimmassa keskenään samansuuntaiset kuitukimput on yhdistetty toisiinsa sidelangoilla. Kudos on toinen yleisesti käytetty lujitekangastyyppejä. Siinä toisiaan vastaan kohtisuorat lujitekimput tai -langat risteilevät toistensa yli ja ali (kuva 4). (Saarela ym. 2003, 20.)

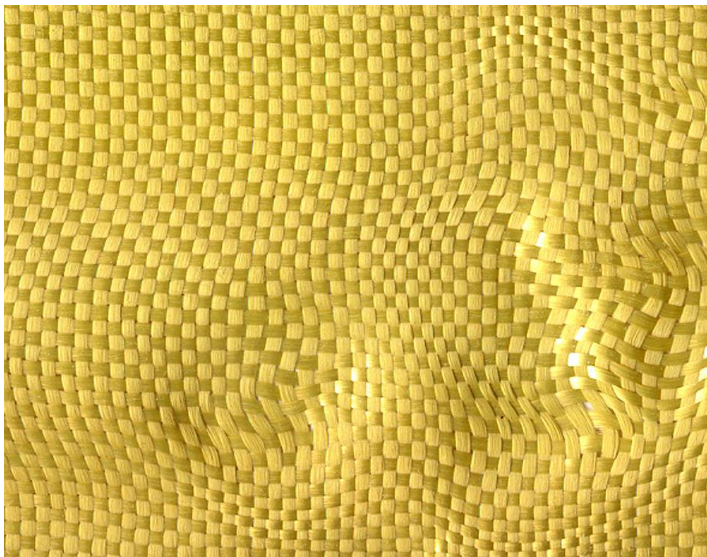


KUVA 4. Kudostyyppit (Saarela ym. 2003, 130)

3.1 Aramidikuidut (Kevlar)

Aramidikuidut ovat aromaattisia polyamidikuituja. Ne ovat ominaisuuksiltaan lujia ja sitkeitä sekä kestävät suhteellisen korkeita lämpötiloja. Valo heikentää aramidikuitujen lujuutta ja tummentaa sen väriä. Aramidikuidut ovat palamattomia ja alkavat hiiltyä noin 425 °C:ssa. Kuidut eivät myöskään sula sekä niiden hajoaminen alkaa tapahtua noin 500 °C:ssa. Olennaisena erona lasi- ja hiilikuituihin verrattuna on aramidikuitujen sitkeys ja tekstiilikuitumainen luonne sekä hygroskooppisuus. (Koivisto ym. 2008, 222; Saarela ym. 2003, 89.)

Aramidikuituja käytetään kun vaaditaan keveyttä, mutta samalla suurta vetolujuutta, iskulujuutta ja jäykkyyttä. Suurimmat ja merkittävimmät aramidikuitujen valmistajat ovat Du Pont ja Teijin Twaron. Du Pont onnistui valmistamaan ensimmäisen aramidikuidun jo vuonna 1965. Tunnetuimpia Kevlarin eli aramidikuitujen käyttökohteita ovat luotiliivit ja iskuilta suojaavat vaatteet ja kypärät. (Saarela ym. 2003, 89.)

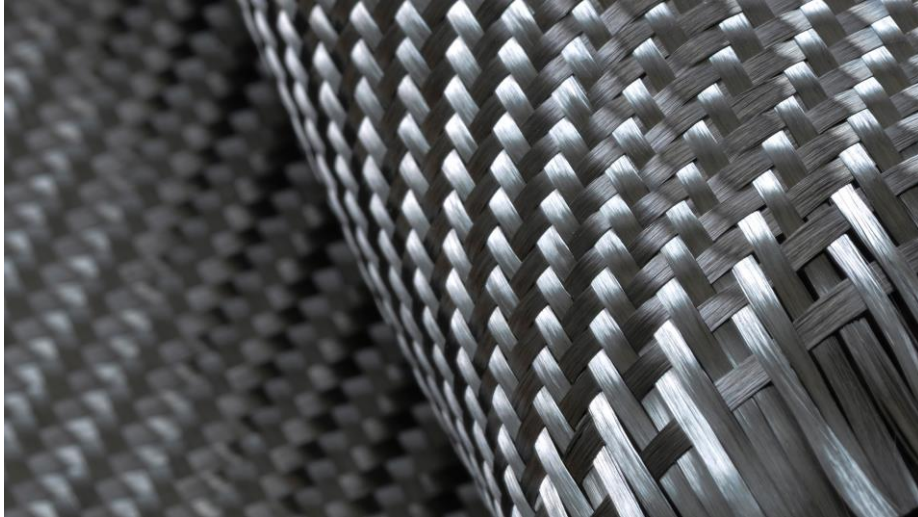


KUVA 5. Aramidikuitu (Kevlar Chemistry 2013)

3.2 Hiilikuitu

Hiilikuidussa hiilipitoisuus on yli 92 p-%, sillä sitä valmistetaan hiilipitoisista lähtöaineista hiililyttämällä. Lähtöaineena on yleensä PAN-kuitu tai piki. Hiilikuidussa hiiliatomit ovat sitoutuneet toisiinsa vahvoin kovalenttisin sidoksin ja näin olen se muistuttaa rakenteeltaan grafiittia. (Hämäläinen 2010, 6; Koivisto ym. 2008, 222.)

Hiilikuidut ovat huomattavasti kalliimpia kuin lasikuidut. Hiilikuitua käytetään kun tuotteelta vaaditaan samanaikaisesti lujuutta, jäykkyyttä ja keveyttä. Suurimpia hiilikuidun käyttäjiä ovat ilmailu- ja urheiluvälineiteollisuus. (Koivisto ym. 2008, 222; Vikstedt 2015, luentomateriaali.)



KUVA 6. Hiilikuitu (John & Table)

3.3 Lasikuitu

Lasikuitu on kaupallisesti ja teollisesti merkittävin lujitekuitu. Sen markkinaosuus on jopa 95 % kaikista lujitemateriaaleista. Tärkein oksidi on silikaattioksidi. Vanhin lasikuitutyyppejä on A-lasi (Alkali glass), joka on natriumkalsiumsilikaattilasia. A-lasista valmistetaan ikkuna- ja pakkauslasi, mutta sen huonon vedenkestävyyden vuoksi tästä kuitutyypistä ei valmisteta enää lujitekuituja. Nykyisin käytettävät muut lujitelasit voidaan jakaa E-, S-, ja C-laseihin. E-lasi (Electrical glass) on yleisin kuituaine. Sillä on hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet. S-lasi (High strength) on kallista, sillä se on 30 % E-lasia lujempaa ja sen kimmomoduuli on 20 % suurempi. Käyttö rajoittuu lähinnä ohjus- ja rakettitekniikkaan sekä lentokoneisiin. C-lasi (Chemically resistant) on korroosion kestävä lasia. (Koivisto s. 221; Saarela ym. 2003, 74–75.)



KUVA 7. Lasikuitu (Bedford Glass Fibre)

3.4 HP-polyeteenikuidut

Lujemmista ja jäykemmistä polyeteenikuiduista käytetään useita eri lyhenteitä, kuten HDPE-, UHMWPE- tai HPPE-kuidut. Polyeteenikuituja on valmistettu jo vuodesta 1983 alkaen. Polyeteeni- ja aramidikuitujen käyttö ja sovelluskohteet ovat paljolti samanlaisia. Muovien lujittamisessa HP-polyeteenikuituja ei käytetä samoin, kuten hiili- ja lasikuituja, koska HP-polyeteenikuitu tarttuu huonosti matriisimuoviin. (Saarela ym. 2003, 93–95.)

HP-polyeteenikuidulla on erinomainen vetolujuus ja kimmomoduuli erityisesti suhteessa sen tiheyteen. Tyypillistä on myös hyvä iskulujuus ja -sitkeys, hankauksenkesto sekä taivutusväsymislujuus. Kaikista lujitekuiduista HP-polyeteenikuiduilla on paras iskuenergian absorptiokyky, kun komposiitin paino on sama. (Saarela ym. 2003, 93–95.)

3.5 Luonnonkuidut

Alkuaikoina muovien lujittamiseen on käytetty luonnonkuituja, mutta mekaanisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan paremmat lujitekuidut ovat korvanneet luonnonkuidut markkinoilla. Selluloosa, soluseinän ligniini ja matriisin polysakkaridit muodostavat kaikkien luonnonkuitujen, myös puukuitujen, perusrakenteen. Luonnonkuiduiksi luetaan eläinkarvat, kasvi- ja puukuidut. Kasvikuituja saadaan esimerkiksi kasvien rungosta, lehdistä, hedelmistä, siemenistä ja pähkinöistä. Hyviä kasvikuituja saadaan muun

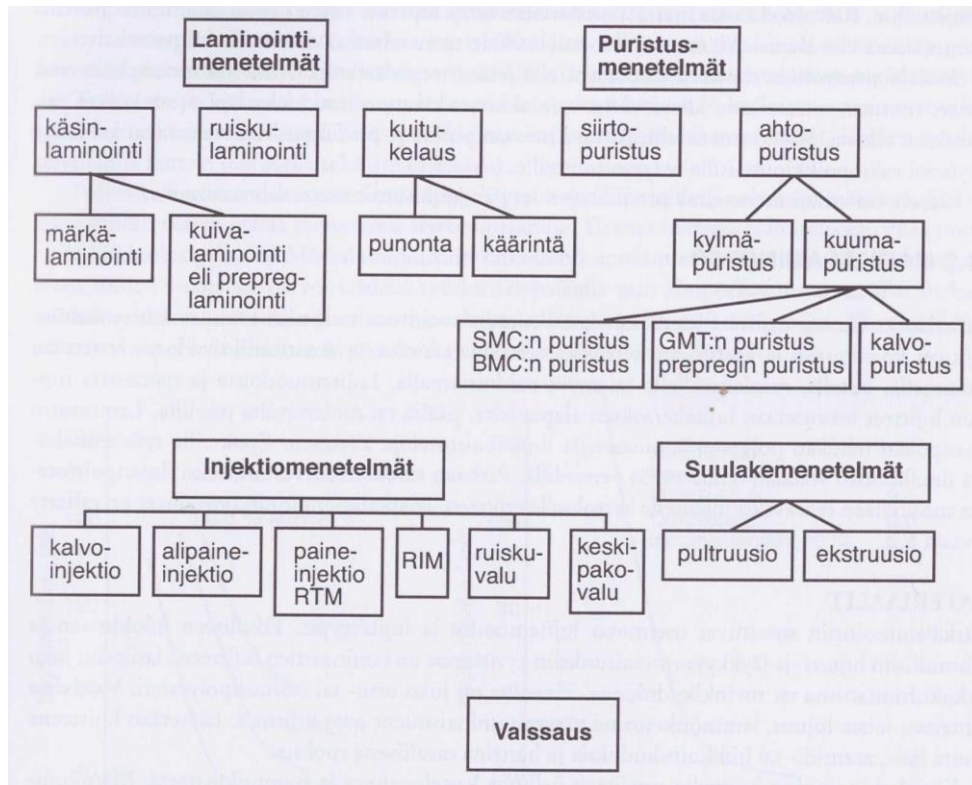
muassa hampusta, juutista, pellavasta, puuvillasta ja soijasta. (Lehtiniemi & Järvelä 2012, 3; Saarela ym. 2003, 99.)

3.6 Muut lujitekuidut

Muihin lujitekuituihin voidaan luokitella muun muassa boori-, piikarbidi-, polyesteri- ja polyamidikuidut. Erityisesti polyesteri- ja polyamidikuituja käytetään huopina, katkekuituina ja kudoksina parantamaan kertamuovien isku-, hankaus- ja väsymislujuutta sekä kemiallista kestävyyttä. Näitä käytettäessä etuina ovat myös alhainen hinta ja tiheys. Muovien lujittaminen onnistuu myös mineraalikuiduilla (esimerkiksi basaltti), metallikuiduilla (esimerkiksi teräs) tai synteettisillä epäorgaanisilla kuiduilla (esimerkiksi fosfaattikuidut). Näitä kuituja käytetään kuitenkin vain harvoin. (Saarela ym. 2003, 100.)

4 VALMISTUSMENETELMÄT

Komposiittien valmistuksessa voidaan käyttää useita eri menetelmiä. Tekniikoiltaan eri menetelmät voidaan jakaa laminointi-, injektio-, puristus- ja jatkuvatoimisiin menetelmiin. (Saarela ym. 2003, 153.) Alla on esitetty kaikista ryhmistä joitakin menetelmiä (kuva 8).



KUVA 8. Valmistusmenetelmien jako (Saarela ym. 2003, 153)

4.1 Märkälaminointi

Märkälaminointi on käsinlaminointimenetelmä, jossa lujitteet asetellaan kerroksittain käsin tai käsityökaluja apuna käyttäen avoimeen muottiin. Lujitteet kostutetaan neste-mäisellä hartsilla sivellintä tai telaa käyttäen. Ilmanpoisto hartsista ja kuitujen välistä tapahtuu telaamalla. Jotta ilmanpoistotelaus onnistuu parhaimmalla mahdollisella taval-la, suosituksena on tehdä telaus jokaiselle kerrokselle erikseen. (Saarela ym. 2003, 154; Tourunen 2008, 10.)

Tuotteen kovettaminen voidaan tehdä vapaasti muotissa. Tarvittaessa voidaan käyttää alipainesäkkiä laminaatin tiivistyksen tehostamiseksi. Alipainesäkillä laminaatin lujitepitoisuus saadaan korkeammaksi ja huokoisuus alhaisemmaksi verrattuna vapaaseen kovetukseen. (Saarela ym. 2003, 157.)

Märkälaminoinnilla pystytään valmistamaan suuria ja monimutkaisia kappaleita kohtuullisin kustannuksin. Haittapuolina märkälaminoinnilla tehdyissä tuotteissa on muun muassa se, että niissä vain yksi sileä pinta ja tuotteen laatu riippuu työntekijän ammattitaidosta. (Saarela ym. 2003, 159.)

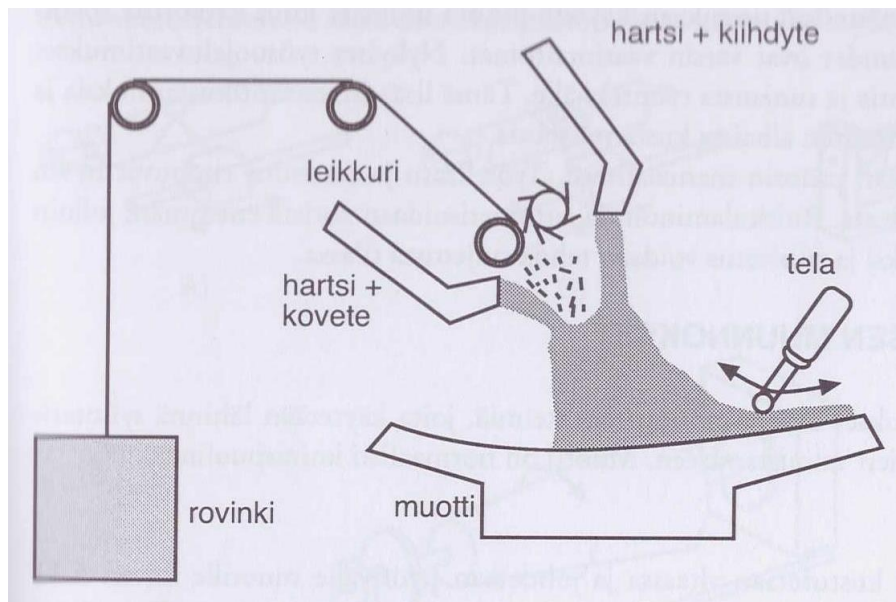
4.2 Kuiva- eli prepreglaminointi

Myös prepreg-laminointi on käsinlaminointimenetelmä. Prepregit toimitetaan muovikalvolla tai kahden muovikalvon väliin pakattuna. Ne ovat puolivalmisteita, joissa kertamuovihartsin on sidottuna hiilikuituun. Prepreg-kerrokset ladotaan yksipuoliseen muottiin, joka peitetään alipainesäkillä. Lämpötilan noustessa kertamuovihartsin muuttuu nestemäiseksi ja kastelee kuidut. Kovetus tapahtuu autoklaavikovetuksella, jolla pyritään minimoimaan ilmahuokosten määrä laminaatissa ja saamaan tuotteeseen korkea lujitesisältö. (Saarela ym. 2003, 159; Tourunen 2008, 7.)

Prepreg-laminointi on helppo ja siisti menetelmä, jonka etuja ovat laminaattien erinomaiset fysikaaliset ominaisuudet, huokosettomuus ja mahdollisuus tehdä kerroslevyjä. Haittoja ovat kalliit materiaalit ja raaka-aineet sekä laminoinnin ja kovetusjakson hitaus on. Myös koneet ja menetelmissä käytettävät aineet tulisi valita huolellisesti, koska ne joutuvat sekä lämmön että paineen rasittamiksi. (Eskola 2009, 31; Saarela ym. 2003, 160.)

4.3 Ruiskulaminointi

Ruiskulaminoinnissa avoimeen muottiin ruiskutetaan hartsi ja lujitteet. Rovinkilujite katkotaan halutun mittaisiksi katkokuiduiksi ruiskupistoolissa olevalla leikkurilla. Katkokuidut kulkeutuvat ruiskupistoolin aikaansaaman hartsisuihkun mukana muotille (kuva 9). (Saarela ym. 2003, 161.)



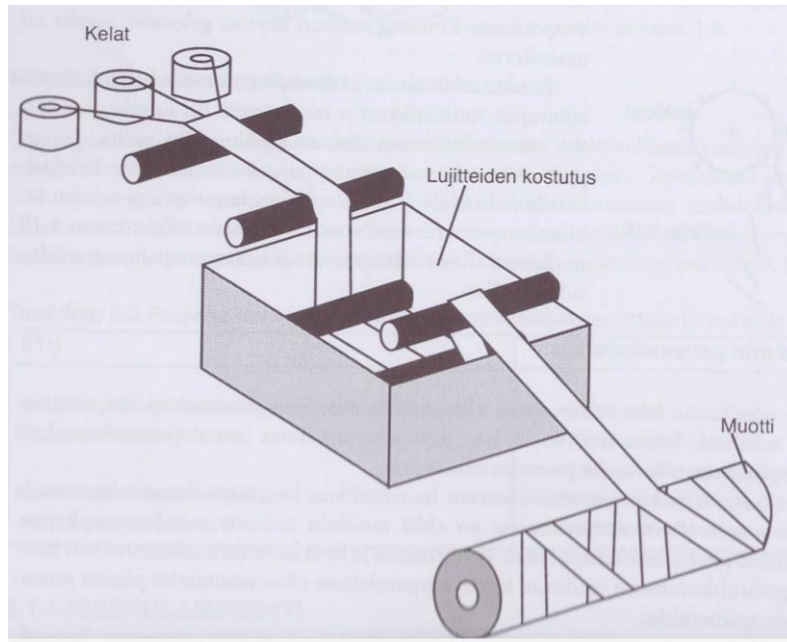
KUVA 9. Ruiskulaminoinnin periaate (Saarela ym. 2003, 161)

Ilmanpoisto suoritetaan kuten märkälaminoinnissa. Tarvittaessa ruiskutettujen kerrosten väliin voidaan laminoida kudoksia tai muita lujitteita tai asettaa ydinaine. Kovetus tapahtuu huoneenlämmössä tai hieman korotetussa lämpötilassa. (Saarela ym. 2003, 161.)

Ruiskulaminointi soveltuu pienille ja keskisuurille sarjoille, kun tuotteelle ei ole asetettu erityisiä lujuusvaatimuksia. Tuottavuudeltaan se on moninkertainen käsinlaminointiin verrattuna. Muottikustannukset ovat kohtuullisia, eikä ruiskutuslaitteiston hinta ole korkea. Haittoihin voi lukea nykyiset työsuojeluvaatimukset, jotka lisäävät investointikustannuksia ja nostavat välillisesti menetelmän muuten alhaista kustannustasoa. Koska ruiskutus tapahtuu pääosin manuaalisesti, on työn laatu ja tasaisuus hyvin riippuvaisia työntekijän taidoista. (Saarela ym. 2003, 162.)

4.4 Kuitukelaus

Kuitukelaus on avomuottimenetelmä, jota käytetään lähinnä sylinterimäisten tai kartiomaisten kuorien valmistamiseen. Kuitukimput kostutetaan altaassa, jonka jälkeen ne johdetaan pyörivälle muotille (kuva 10). Kelauksen jälkeen kovetus tapahtuu esimerkiksi huoneenlämmössä tai uunissa. Kovetuksen jälkeen muotti poistetaan ja kappale viimeistellään haluttuun muotoon. (Pykäläinen ym. 2008–2010, 26; Saarela ym. 2003, 164)



KUVA 10. Kuitukelauksen toimintaperiaate (Saarela ym. 2003, 162)

Kuitukelauksella saadut tuotteet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyviä, sillä lujitteet ovat jatkuvia ja suunnattuja. Menetelmä soveltuu monimutkaistenkin kappaleiden valmistukseen. Valmiilla tuotteella on erittäin hyvä kilpailukyky sekä ominaisuuksiltaan että hinnaltaan. (Pykäläinen ym. 2008–2010, 26; Saarela ym. 2003, 164.)

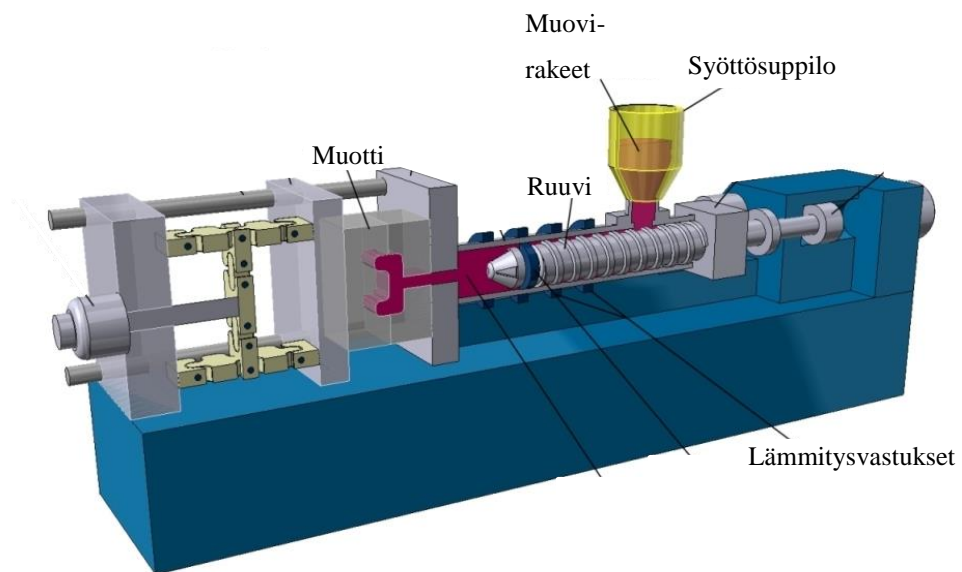
4.5 Paine- ja alipaineinjektio

Alipaineinjektiossa kuidut sekä mahdolliset ydinmateriaalit asetellaan avoimeen muottiin. Alipaineikalvo tai joustava muottipuolisko toimii toisena muottipintana. Muottipintojen väliin muodostetaan alipaine, jolloin se vetää nestemäisen hartsin letkulla erillisestä astiasta, joka kostuttaa kuidut. Kuitujen annetaan kuivua ja niiden kuivuttua tuote on käyttövalmis. (Komulainen 2011, 10.)

Alipaineinjektio sopii suurten, yksittäisten tuotteiden valmistusmenetelmäksi. Sillä voidaan helposti valmistaa esimerkiksi kokonaisia veneitä. Muottimateriaali voidaan vapaasti valita ja saatujen tuotteiden laatu on melko hyvä. Ongelmia alipaineinjektiossa ovat muun muassa valmistuksesta jäävien jätteiden huomattavan suuri määrä sekä tuotteen huono laatu mikäli kuidut eivät kostu kunnolla. (Komulainen 2011, 10.)

4.6 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on yksi kestämuovien tärkeimmistä valmistusmenetelmistä. Siinä raaka-aine syötetään syöttösuppilosta ja siirretään ruiskuvalukoneen ruuville. Ruuvi siirtää materiaalia eteenpäin samalla kun kestämuovi plastisoidaan tai kertamuovi lämmitetään kontrolloidusti varsinaista ruiskutustapahtumaa varten. Ruiskutuksen peruseriaate on esitetty alla olevassa kuvassa 11. (Saarela ym. 2003, 176–177.)



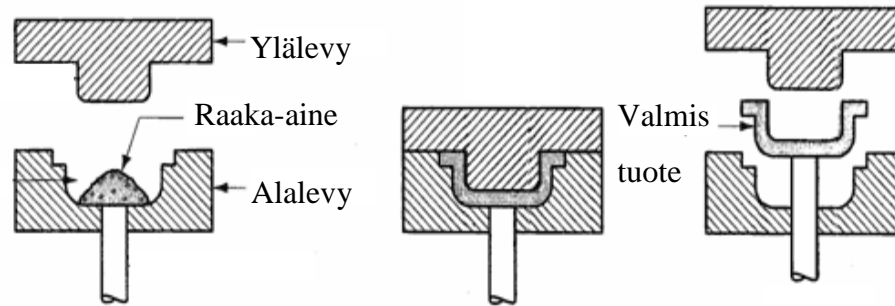
KUVA 11. Ruiskuvalun toimintaperiaate (Ruthland Plastics Limited, muokattu)

Ruiskuvalu on jaksoajaltaan lyhyt ja soveltuu hyvin suursarjatuotantoon. Menetelmällä on kuitenkin kalliit laite- ja muotti-investoinnit, joten suurten kappaleiden valmistus on erittäin kallista. Monimutkaisiakin tuotteita pystytään valmistamaan, ja tuotteiden laatu on tasaista pitkälle automatisoidun prosessin vuoksi. (Saarela ym. 2003, 179.)

4.7 Ahtopuristus

Ahtopuristus on tasopuristusmenetelmä, jossa käytetään suljettuja muotteja ja puristinta. Muottiin ruiskutetaan tarttumisenestoainetta, jonka jälkeen tarvittava määrä raaka-ainetta. Raaka-aine vaihtelee aina tarpeen mukaan, mutta valmistustapahtuma on aina samanlainen. Optimaalisin täyttöaste on noin 105–110 %. Muotti laitetaan suljettuna puristimeen, jossa on lämmitettävät ylä- ja alalevyt. Muotti suljetaan paineeseen puris-

timessa olevan hydrauliiikan avulla (kuva 12). (Murtoniemi 2010, 20; Saarela ym. 2003, 180.)



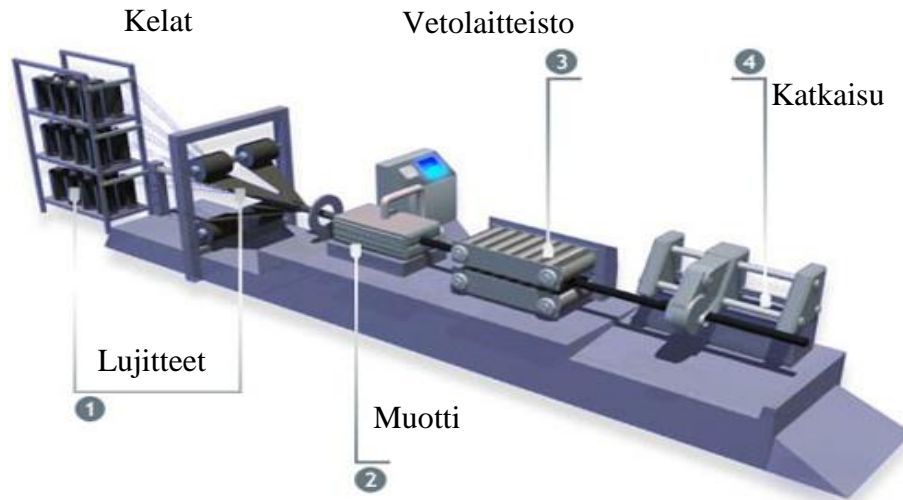
KUVA 12. Ahtopuristuksen toimintaperiaate (Sinotech 2010, muokattu)

Yksinkertaiset laitteet ja muotit ovat ahtopuristuksen etuja. Ahtopuristus on pääasiallisesti käsityötä ja vaatii paljon esivalmisteluja, kuten sekoitusta ja aihoiden leikkaamista. Nämä nostavat ahtopuristuksen kustannuksia ja yleensä ahtamalla valmistettavat tuotesarjat ovatkin pienehköjä. (Murtoniemi 2010, 21.)

4.8 Pultruusio eli suulakeveto

Pultruusio eli suulakeveto on jatkuvatoiminen lujitemuovien valmistusmenetelmä. Sen avulla voidaan valmistaa erilaisia profiileja ja putkia. Pultruusiossa kostutetut lujitteet vedetään lämmitetyn muotin eli suulakkeen läpi, jossa kappale saa muotonsa ja hartsi kovettuu. Muotin loppuosassa tai sen jälkeen voidaan kappale tarvittaessa jäähdyttää. Tuotteen pitää olla riittävästi kovettunut, jotta se kestää vetolaitteiston voiman. Vetolaitteiston jälkeen tuote voidaan katkaista halutun mittaiseksi. (Koskinen 2013, 26; Saarela ym. 2003, 186.)

Lujitteiden kostutus tapahtuu joko avoaltaissa tai hartsi injektoidaan muotin sisään. Lujitteiden tulisi olla mahdollisimman tasaisesti jännittyneinä ja usein myös esimuotoiltuja lähelle kappaleen lopullisia mittoja. Raaka-aineita voidaan myös lämmittää ennen muotia ja näin ollen kovetus tapahtuu nopeammin ja tasaisemmin. (Koskinen 2013, 27; Saarela ym. 2003, 187.) Pultruusion toimintaperiaate nähdään kuvasta 13.



KUVA 13. Pultrusiolaitteisto (Exel Composites, muokattu)

Pultrusiotuotteilla on hyvät ominaisuudet etenkin aksiaalisuunnassa ja tuotteen hinta on kohtuullinen. Tuotantonopeus on suuri ja tuotteilla ei ole teknisiä kokorajoituksia. Haittoina menetelmällä on poikittaissuunnan heikkous ilman erityislujitusta ja käytännössä vain vakiopoikkipinta-ala on mahdollinen. (Saarela ym. 2003, 188.)

4.9 Ekstruusio eli suulakepuristus

Ruiskuvalun tavoin ekstruusio on lujittamattomien kestopuovien perusvalmistusmenetelmä, jossa käytetään myös lujitteita sisältäviä raaka-aineita. Raaka-aine plastisoidaan jatkuvana prosessina ja muotoillaan halutun muotoiseksi tuotteeksi. Syöttösuppilosta raaka-aine syötetään ruuville, joka siirtää ja tiivistää sekä lopulta plastisoi sen. Ekstruusiolaitteisto voi koostua myös kahdesta ruuvista ja ruuvien geometria valitaan käytettävän raaka-aineen mukaan. (Saarela ym. 2003, 189.)

Ekstruusiota käytetään muun muassa kalvojen ja letkujen valmistukseen. Koska toistaiseksi lujitettuna raaka-aineena on lyhytkuituinen kestopuovigranulaatti, ovat ekstrudoitujen tuotteiden mekaaniset ominaisuuden huomattavasti alhaisemmat kuin pultrusiolilla. (Saarela ym. 2003, 189.)

5 KÄYTTÖKOHTEET

5.1 Ajoneuvoteollisuus

Autojen koreissa on aiemmin käytetty lähes yksinomaan terästä. Nykyisin niissä käytetään yhä enemmän komposiittimateriaaleja. Etuina ovat muun muassa alhaisempi polttoaineen kulutus niiden alhaisen painon vuoksi (Myllymaa & Vesterbacka 2005.) Komposiitteja käytetään myös ulkopaneeleissa sekä esimerkiksi puolirakenteellisissa osissa, sisustan osissa (kuva 14) sekä voimansiirron ja alustan osissa. Eniten komposiitteja käytetään tällä hetkellä luultavasti ulkopinnoissa sekä erilaisissa puolirakenteellisissa tai suojaavissa osissa. (Syväne 2013, 96.)



KUVA 14. Hiilikuitusisusta (Autoevolution)

Autojen jarrut voidaan tehdä hiili-hiilikuidusta (HH-jarrut) tai hiili-keräämistä. HH-jarruja käytetään tällä hetkellä vain urheiluautoissa ja kilpa-autoissa. Ne kestävät todella hyvin nopeita ja suuria lämpörasituksia, eivätkä ne menetä kitkaominaisuuksiaan yllättäen lämpötilan noustessa. Lisäksi ne kestävät kulutusta kaksi kertaa enemmän kuin vastaavat teräsajarrut ja ovat noin puolet kevyempiä. HH-jarrujen kuluminen riippuu jarrutuskertojen määrästä, kun taas metallijarrujen kestoikä on verrannollinen absorboituun lämpöenergiaan. Hiili-keräämijarrut kestävät useita satoja asteita kuumempia käyttölämpötiloja, painavat puolet vähemmän ja käyttäytyvät tasaisemmin suurissa lämpötiloissa kuin valurautajarrut. (Hämäläinen 2010, 18.)

Nykyaikaisten autojen runkomateriaaleissa on käytetty lähinnä hiilikuitua ja autot ovat pääasiassa olleet tyypeiltään kalliita urheilu- tai superautoja. Ferrari Enzo (kuva 15) oli ensimmäisiä tuotantoautoja, joissa on hyödynnetty laajamittaisesti hiilikuitua kantavissa rakenteissa. (Syväne 2013, 97.)



KUVA 15. Ferrari Enzo 2002 (Top Car Rating 2015)

5.2 Ilmailuteollisuus

Komposiittirakenteiden käyttö lentokoneteollisuudessa alkaa jo 1930-luvulta, jolloin epoksien ja lasikuitujen tuotanto alkoi. Aluksi komposiitteja käytettiin lentokoneen sekundääriosina kuten muotosuojina ja erilaisina luokkuina. Ensimmäisten sovellusten joukossa olivat myös tutkakuvut. (Saarela ym. 2003, 433.)

Komposiitteja käytetään lentokoneiden primäärirakenteissa, kontrollikomponenteissa sekä ulkoisissa ja sisäisissä komponenteissa. Primäärirakenteet käsittävät siivet, peräsiemen ja rungon. Kontrollikomponentteihin luetellaan siipien eri osat, kuten ilmanohjaimet. Ulkoisiin komponentteihin luetellaan muun muassa tutka, ruuman ja laskutelineiden ovet. Sisäiset komponentit käsittävät esimerkiksi lattiat, ovet sekä matkatavarahyllyt. (Gay 2007, 135–136.)

Pääasiallisesti lentokoneteollisuudessa komposiitteja käytetään rakenteiden keventämiseen ja niiden tuotantokustannusten alentamiseen. Kustannus- ja painosäästöt ovat nykYTEKNOLOGIALLA 15-20 %, kun vertailukohteena on vastaava alumiinista valmistettu osa. Komposiiteilla saadaan myös pintamateriaaleja sileämmiksi, mikä vaikuttaa ilmanvaihduksen pienenemiseen. Tätä ominaisuutta hyödynnetään etenkin purjelentokoneissa (ku-

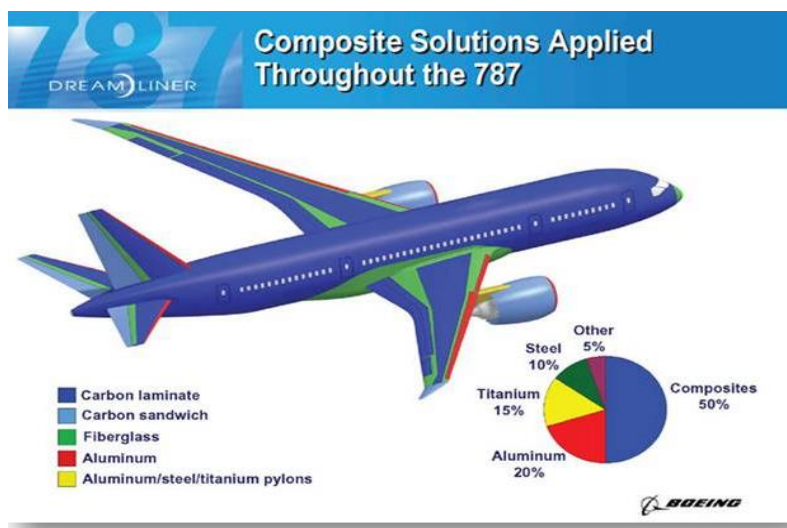
va 16). Tällä hetkellä suurin osa uusista pienkoneista on komposiittirakenteisia. (Saarela ym. 2003, 433.)



KUVA 16. Purjelentokone (Polyteknikkojen Ilmailukerho Oy, muokattu)

5.2.1 Boeing 787 Dreamliner

Boeing 787 Dreamliner on uuden sukupolven matkustaja kone, johon mahtuu noin 250 matkustajaa. Noin puolet lentokoneesta on valmistettu kevyistä komposiittimateriaaleista (kuva 17). (Yle 2012.) Komposiittimateriaaleilla on monia etuja. Ne mahdollistavat kevyemmän ja yksinkertaisemman rakenteen, joka lisää lentokoneen tehokkuutta, vähentää polttoaineen kulutusta sekä myös painoon perustuvia maksuja ja huoltoja. Komposiitit eivät väsy tai syövy, mikä vähentää määräaikaishuoltoja ja tuottavuus kasvaa. Pienet vauriot rungossa voidaan korjata lähtöportilla alle tunnissa. (Boeing 2015.)



KUVA 17. Boeing 787 komposiittiosuudet (University of Southern California)

Boeing 787 hiilikuiturungon laminaattirakenne on yksiosainen ja näin ollen eliminoi pitkittäisten liitosten hajoamisen. Komposiittien käyttö rungossa vähentää painoa ja ilmanvastusta, mutta myös huollon tarvetta. (Boeing 2015.)

Komposiittimateriaalien käyttö siipien rakenteessa mahdollistaa Boeing 787-mallin siiven korkeamman sivusuhteen kuin edellisessä mallissa. Tämä korkea sivusuhte yhdistettynä tehokkuutta lisääviin kallistettuihin siivenkärkiin tekee 787-mallista yhden maailman nopeimmista matkustajalentokoneista. Samanaikaisesti se kuluttaa polttoainetta vähemmän kuin samankokoinen verrokkilentokone. (Boeing 2015.)

5.3 Muut

5.3.1 Urheiluvälineet

Tyypillisimpiä osittain tai kokonaan komposiittimateriaaleista tehtyjä talviurheiluvälineitä ovat sukset, jääkiekkomailat (kuva 18), lumilaudat, kelkat ja luistimet. Kesäurheiluvälineistä tyypillisimpiä ovat tennismailat, golfmailojen varret, erilaisten polkupyörien rungot sekä purje- ja lainelaudat. (Saarela ym. 2003, 444.)



KUVA 18. Komposiittimaila (Easton Hockey)

5.3.2 Puolustuskäyttö

Merkittävä osa puolustusvälineteollisuuden valmistamista suuren lujuuden ja alhaisen painon omaavista lujitemuovituotteista on tarkoitettu käytettäväksi ilma-aluksissa kuten pommi-, kuljetus- ja hävittäjäkoneissa sekä helikoptereissa ja laivaston aluksissa. Lujitemuovisovelluksia löytyy myös maakuljetusvälineistä ja panssarivaunuista. (Saarela ym. 2003, 442–443.)

Komposiitteja käytetään myös erityisesti ballistisiin tuotteisiin. Luotiliivit ja luodinkes-
tävät kypärät (kuva 19) ovat yksi esimerkki näistä. Niissä yhdistyvät suuri vahvuus, keveys ja pieni koko. Luotiliivejä valmistetaan muun muassa Kevlar- ja Dyneema nimi-
sistä kuiduista. Dyneema on 10-15 kertaa ja Kevlar viisi kertaa vahvempaa kuin teräs. (Myllymaa & Vesterbacka 2005.)



KUVA 19. Kevlar-kypärä (Germes Online)

5.3.3 Hammashoito

Akryyli- ja kuitulujitettuja yhdistelmämuovimateriaaleja voidaan käyttää ham-
mashoidossa esimerkiksi uuden hampaan tai kiskotuksen valmistamiseen. Lasikuituluji-
tus tekee komposiittirakenteesta vahvuudeltaan samaa luokkaa kuin kulta, vaikka muo-
vimateriaalit eivät yksinään kestä purennan ja kulumisen aikaansaamaa kulutusta. Hyvä
esteettisyys on myös mahdollista saavuttaa komposiiteilla, sillä ne voidaan sävyttää
täsmälleen potilaan omien hampaiden värisiksi. (Myllymaa & Vesterbacka 2005.)

LÄHTEET

- Autoevolution. 2015. Red crocodile leather and carbon fiber combine in G65 AMG interior-Photo gallery. Luettu 21.9.2015. <http://www.autoevolution.com/news/red-crocodile-leather-and-carbon-fiber-combine-in-g65-amg-interior-photo-gallery-76977.html#>
- Bedford Glass Fibre. Luettu 14.9.2015. <http://www.bedfordglassfibre.com/>
- Boeing. 2015. Boeing 787 Dreamliner. Luettu 20.9.2015 <http://www.boeing.com/commercial/787/#/design-highlights/visionary-design/composites/advanced-composite-use/>
- Easton Hockey. 2015. Luettu 21.9.2015. <http://eastonhockey.fi/easton-stealth-II-kampanja>
- Edwards, T. Composite materials revolutionise aerospace engineering. The Ingenia Magazine 36/2008.
- Eskelinen, H. 2012. Konstruktio materiaalit. Komposiitit. Luettu 02.09.2015.
- Eskola, T. 2009. Lasikuituveneiden laminointitekniikoiden vaikutus venealan kannattavuuteen. Tuotannon laitos. Vaasan Yliopisto. Pro gradu-tutkielma.
- Etälukio.2009. Polymeerit. Luettu 02.09.2015. <http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/kemia/kemia2/polymeeri.html>
- Exel Composites. Pultrusion. Luettu 3.8.2015. <http://www.exelcomposites.com/en-us/english/composites/manufacturingtechnologies/pultrusion.aspx>
- Gay, D. 2007. Composite materials: Design and applications. 2nd edition. CRC Press.
- Germes Online. Luettu 21.9.2015. http://www.germes-online.com/catalog/70/1238/25099/kevlar_material_bulletproof_helmet.html
- Hämäläinen, J. 2010. Hiilikuitukomposiitit autotekniikassa. Aalto Yliopisto. Kandidaatintyö.
- Johansson, J-E. Muovit valmiina nousukiitoon. Kemia-lehti 35/2008.
- John & Table. Carbon Fiber. Luettu 14.9.2015. <http://www.johnandtable.com/carbon-fiber/processing.html>
- Kevlar Chemistry. 2013. Production and Recycling. Luettu 14.9.2015. <http://kevlarchemistry.neocities.org/about3.html>
- Kevra Oy. Hartsit. Luettu 26.7.2015. <http://kevra.putteripro.fi/fi/Tuotteet/Hartsit/>
- Kevra Oy. Aramidikuitu. Luettu 26.7.2015. <http://www.kevra.fi/tuotteet/lujitteet/aramidikuitu/>

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki.

Komulainen, J. 2011. Suuret kuormaa kantavat hybridi- ja komposiittirakenteet. Materiaalitekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Koskinen, L. 2013. Lujitemuovirakenteiden kemiallisen kestävyuden testaus säiliöissä. Paperi-, tekstiili- ja kemiantekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Lehtiniemi, P. & Järvelä, P. 2012. Luonnonmateriaalipohjaiset polymeerikomposiitit rakentamisteollisuudessa. Luettu 02.09.2015.
www.miktech.fi/media/getfile.php?file=212

Murtoniemi, T. 2010. Kumituotteiden valmistus ja laadunhallinta eri työstömenetelmillä. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Myllymaa, H., Vesterbacka, P. 2005. Historiaa. Kemia yhteiskunnassa-kurssi. Helsingin yliopisto, Kemian laitos. Luettu 19.9.2015
<http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/komposiitit/historiaa.htm>

Myllymaa, H., Vesterbacka, P. 2005. Sovelluksia. Kemia yhteiskunnassa-kurssi. Helsingin yliopisto. Kemian laitos. Luettu 19.9.2015.
<http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/komposiitit/sovelluksia.htm>

Polyteknikkojen Ilmailukerho Oy. 2015. DG-505 Orion, OH-952. Luettu 21.09.2015.
<http://pik.ayy.fi/joomla/index.php/kalusto/oh-952>

Pykäläinen, P., Äikäs, V., Karttunen, T., Tanttu, M., Ruuskanen, J., Ylhäinen, A., Kemppinen, M., Dufva, K., Haveri, S. 2008-2010. Suurten lujitemuovituotteiden tehokkaammat tuotantoprosessit ja suunnittelu. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Tampere University of Technology. Loppuraportti.

Rutland Plastics Limited. 2015. Plastic injection moulding machine. Luettu 02.09.2015. http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.html

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., Komppa, V. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki.

Sinotech. 2010. Compression and transfer molding. Luettu 19.9.2015.
<http://www.sinotech.com/compressionAndTransferMolding.html>

Syvänne, O. 2013. Muovikomposiittien hyödyntäminen ajoneuvon runkorakenteessa. Materiaalitekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Top Car Rating. 2015. 2002 Ferrari Enzo. Luettu 20.9.2015.
<http://www.topcarrating.com/2002-ferrari-enzo.php>

Tourunen, V-M. 2008. Komposiittiosien valmistustyövälineiden mittauksen tutkiminen. Lentokonetekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

University of Southern California. 2015. Luettu 14.9.2015.

<http://composites.usc.edu/projects/automated-defect-evaluation-software-for-ultrasonic-ndi.htm>

Vikstedt, H. 2015. Materiaalitekniikka. Luentomateriaali. Tampereen seudun ammattiotisto. Tampere.

Yle. 2012. Boeingin lento jäi aiottua lyhyemmäksi. Luettu 14.9.2015.

http://yle.fi/uutiset/boeing_787_lahti_ensilennolleen/1276788