POLYMEERIKOMPOSIITIT VENETEOLLISUUDEN SOVELLUSKOHTEISSA

POLYMER COMPOSITES IN BOAT INDUSTRY APPLICATIONS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Lauri Liuska

Tarkastajat: Professori Timo Kärki

TkT Marko Hyvärinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Lauri Liuska

Polymeerikomposiitit veneteollisuuden sovelluskohteissa

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

33 sivua, 9 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Timo Kärki ja TkT Marko Hyvärinen

Avainsanat: polymeeri, komposiitti, hiilikuitu, lasikuitu, vene ja veneteollisuus

Tässä kandityössä tutkitaan polymeerikomposiittien käyttökohteita ja käyttöön johtaneita syitä veneteollisuudessa. Työssä on selvitetty veneteollisuuden erityisiä materiaaleihin liittyviä vaatimuksia, sekä polymeerikomposiittien soveltuvuutta veneteollisuuteen. Työstä selviää myös erilaisia polymeerikomposiittien kehityskohteita veneteollisuudessa.

Tutkimus on kirjallisuuskatsaus, jonka tietolähteinä käytetään painettua kirjallisuutta, sekä julkisia internetistä löytyviä artikkeleita ja valmistajien kotisivuja. Tutkimuksessa tutkitaan pääasiassa alle 24-metrisiä veneitä, sillä sitä suurempia aluksia voidaan pitää jo laivoina.

Tutkimuksessa selvisi, että polymeerikomposiitit ovat erittäin suosittu materiaali veneteollisuudessa, mutta polymeerikomposiiteilla on kuitenkin vielä kehitys tarpeita. Työn tuloksena löydettiin veneteollisuuteen sopivien polymeerikomposiittien tärkeitä ominaisuuksia, sekä käyttökohteita.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Lauri Liuska

POLYMER COMPOSITES IN BOAT INDUSTRY APPLICATIONS

Bachelor’s thesis

2022

33 pages, 9 figures and 2 tables

Examiners: Prof, D. Sc. (Tech.) Timo Kärki and D. Sc. (Tech.) Marko Hyvärinen

Keywords: polymer, composite, glass, carbon, fiber, boat, marine

This bachelor’s thesis investigates the applications of polymer composites and the reasons behind the use of polymer composites in the boat industry. The research explains what is required from materials in boat industry, and how polymer composites suite the boat industry applications. The work also reveals development needs for polymer composites in the boat industry.

The study is a literature review in which printed literature as well as public articles and manufacturers' websites are used as sources. The study focuses on boats less than 24 long in length, as larger ones can already be considered ships.

The study found that polymer composites are already a very popular material in the boat industry, but polymer composites still have development needs in the industry. As a result of this study, important properties, and applications for polymer composites in boat industry were found.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1 Johdanto 5
1.1 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset 6
2 Yleistä polymeerikomposiiteista 6
2.1 Polymeerikomposiitin rakenne 7
2.1.1 Matriisimateriaalit 10
2.1.2 Lujitekuidut 11
2.2 Polymeerikomposiittien valmistus 14
3 Polymeerikomposiitit veneteollisuudessa 16
3.1 Materiaali vaatimukset veneteollisuudessa 18
3.2 Käyttökohteet 20
3.3 Viimeisimmät innovaatiot ja kehitystarpeet 25
4 Pohdinta 27
5 Yhteenveto 29
Lähteet 31

1 Johdanto

Polymeerikomposiitit ovat olleet jo vuosikymmeniä merkittävä materiaali veneteollisuudessa, sillä ne tarjoavat erinomaisen vaihtoehdon kestäviä, työstettäviä ja edullisia. Polymeerikomposiitit sopivat lähes täydellisesti veneteollisuuteen, sillä ne kestävät hyvin vesistöjen vaativia ympäristötekijöitä, kuten merivettä ja UV-valoa. Näiden ominaisuuksien ansiosta alle 20 metriä pitkien veneiden rungoista noin 80 prosenttia valmistetaan muovikomposiiteista. Komposiittien käytön veneteollisuudessa oletetaan kuitenkin kasvavan entisestään. (Neşer 2017, 19–20; Rubino, Nistico, Tucci & Carlone 2019,5.) Tämän työn keskeisenä tavoitteena on selvittää polymeerikomposiittien käytön nykytilanne ja merkittävyys veneteollisuudessa.

Tässä työssä tutustutaan ensin yleisesti polymeerikomposiitteihin, niiden rakenteeseen, ominaisuuksiin ja valmistustapoihin. Tämän jälkeen tarkastellaan erityisiä materiaaleihin liittyviä vaatimuksia ja valmistustapoja sekä polymeerikomposiittien käyttökohteita veneteollisuudessa. Lopulta tarkastellaan veneteollisuuden vaatimia kehityskohteita ja pohditaan mahdollisia tulevaisuuden näkymiä liittyen polymeerikomposiittien käyttöön. Näin työn kokonaisuudesta saadaan selville polymeerikomposiittien nykytilanne veneteollisuudessa. Tutkimusongelmaksi muodostuu se, kuinka veneteollisuus nykyään käyttää komposiittimateriaaleja ja millaisissa sovelluskohteissa.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin käyttäen mahdollisimman uusia ja luotettavia lähteitä:

- Miksi polymeerikomposiitteja käytetään veneteollisuudessa?
- Miten polymeerikomposiittien käyttö on muuttunut ja tulee muuttumaan veneteollisuudessa?
- Millaisissa käyttökohteissa polymeerikomposiitteja käytetään veneteollisuudessa tällä hetkellä ja miksi?

1.1 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tämä tutkimus on tyypiltään kirjallisuuskatsaus ja tutkimuksessa suoritettavan tiedonhaun avulla pyritään vastaamaan edellisessä luvussa esitettyihin kysymyksiin. Tutkimuksen tietolähteinä käytetään pääasiallisesti Google Scholar -hakukonetta sekä LUT Primoa ja Scopusta, joiden kautta on saatavilla tieteellisiä kirjoja ja artikkeleita. Tutkimus toteutetaan lähdekirjallisuuteen perustuvana kvalitatiivisena tutkimuksena.

Tutkimus on kvalitatiivinen, joten tutkimuksessa pyritään vahvistamaan lähteiden uskottavuus ja luotettavuus. Tutkimuksessa keskitytään veneteollisuuteen, mutta ero veneen ja laivan välillä on aina ollut veteen piirretty viiva, eikä venettä ja laivaa aina ole helppo tunnistaa toisistaan. Tutkimus rajataan alle 24-metrisiin veneisiin ja huvialuksiin, sillä tätä suurempien alusten kuljettaminen vaatii tutkinnon. Tämän takia yli 24-metrisiä aluksia voidaan pitää jo laivoina (Yle 2010.)

2 Yleistä polymeerikomposiiteista

Polymeerikomposiitit eli muovikomposiitit tulivat ensimmäisen kerran kaupalliseen käyttöön 1930-luvulla. Samoihin aikoihin kehitettiin polyesteri- ja epoksimuovit sekä aloitettiin lasikuitujen kaupallinen tuotanto. Ensimmäiset polymeerikomposiittien massatuotantoon soveltuvat valmistus menetelmät kehitettiin kuitenkin vasta 1940-luvun loppupuolella. Näitä olivat ruiskutus, kelaus ja pultruusio. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifas & Komppa 2003, 13.) Ennen kylmäkovettuvien polyesterihartsien kehitystä 1949, polymeerikomposiittien merkittävin käyttökohde oli lentokoneiden suojakuvut USA:ssa. Nämä valmistettiin käyttäen lasikuituja lujitteena. (Hollaway & Green & Feely 1994, 3.)

Muovikomposiittien ensimmäiset käyttäjät olivat Lentokone- ja ilmailu teollisuus, jotka ovat edelleen rahallisesti merkittäviä polymeerikomposiittien käyttäjiä. Polymeerikomposiitteja on valmistusmenetelmien kehittyessä alettu käyttämään yhä enemmän myös suuremmissa sarjoissa valmistettavissa kuljetusvälineissä, kuten autoissa, junissa ja työkoneissa. Polymeerikomposiitit ovat myös hyvin merkittävä materiaali prosessiteollisuudessa,

rakennusteollisuudessa, sähköteollisuudessa, tuulivoimaloissa ja avaruusteollisuudessa. (Saarela et al. 2003, 13.)

Polymeerikomposiitit ovat historiansa aikana osoittautuneet hyviksi vaihtoehdoiksi korvaamaan muita materiaaleja, kuten metalleja. Muihin materiaaleihin verrattuna muovikomposiittien etuja ovat niiden suuri lujuus ja jäykkyys suhteutettuna omaan painoon, niiden muotoiluvapaus ja mahdollisuus suunnata lujuusominaisuuksia, mahdollisuus valmistaa suuria rakenteita yhtenä kokonaisuutena sekä polymeereille tyypillinen erinomainen kemiallinen kestävyys. Muovikomposiittien käytön kannalta haitallisista ominaisuuksista tärkeimmät ovat raaka-aineiden melko korkeat hinnat, materiaalien standardoimattomuus, laminaattirakenteiden monimutkaisuus sekä yleisimpien matriisimateriaalien huono lämmön kestävyys. Polymeerikomposiiteilla on myös ominaisuuksia kuten alhainen sähkön- ja lämmön johtavuus, joita voidaan käyttökohteen mukaan pitää joko haitallisina tai hyödyllisinä. (Saarela et al. 2003, 13.)

2.1 Polymeerikomposiitin rakenne

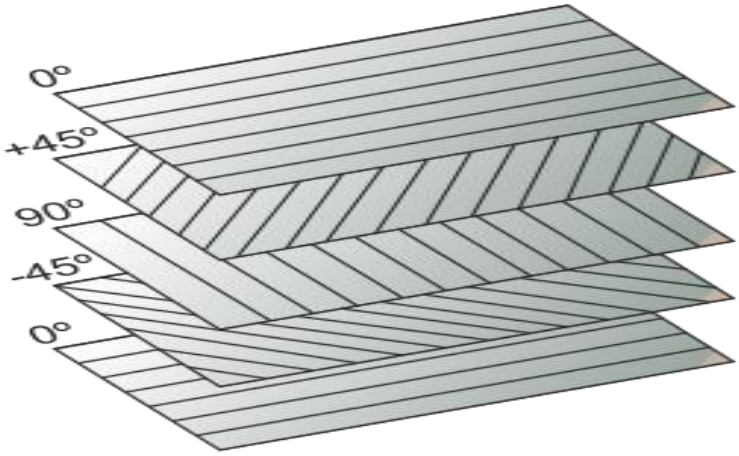
Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman eri materiaalin yhdistelmää, jossa materiaalit toimivat yhdessä, mutta ne eivät ole liuenneet toisiinsa. Komposiitit ovat kiinteitä materiaaleja, joissa sideaine eli matriisi ympäröi ja pitää paikallaan lujitteita. Matriisi materiaaleja voivat olla esimerkiksi polymeerit, metallit tai keraamit. Yleisimmin komposiittien lujitteina käytetään erilaisia lujitekuituja, mutta myös erilaisilla täyteaineilla voidaan parantaa komposiitin mekaanisia ominaisuuksia. (Strong. 2008, 1.)

Polymeerikomposiitissa matriisimateriaalina on polymeeri eli muovi, ja ne ovat yksi tärkeimmistä komposiittien alaryhmistä. Polymeeri matriisi voi olla myös useamman eri polymeerin seos, seosta voidaan myös muokata lisäämällä siihen erilaisia täyteaineita. Muovikomposiitteihin lisätään usein lujuutta parantavia lujitekuituja, jolloin muodostuneita komposiitteja kutsutaan usein lujitemuoveiksi, kuitulujitetuiksi muoveiksi tai lujitetuiksi muoveiksi. Yleisimpiä lujitekuituja ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Kuidut voivat esiintyä jatkuvina tai katkottuna ja katkotut kuidut voivat edelleen olla eri mittaisia. Kuidut kootaan jatkojalostusta varten kuitukimpuiksi tai kierretyiksi langoiksi, sillä yksittäiset kuidut ovat millin tuhannesosien paksuisia ja hankalia käsitellä. Joskus näitä kuitukimppuja tai lankoja käytetään sellaisenaan, mutta eniten polymeerikomposiiteissa käytetään erilaisia lujitemattoja tai lujitekankaita. (Saarela et al. 2003, 17–20.)

Komposiitissa lujitekuidut ovat usein yhdensuuntaisina levytasoissa, jolloin muodostuvaa rakennetta kutsutaan laminaatiksi. Tätä nimikettä täsmennetään usein vielä lujitteen suuntauksen, käyttömuodon, kerrosten putoamisjärjestyksen ja laminaatin rakenteen perusteella. Lujite suuntauksen perusteella nimettyjä laminaatteja ovat esimerkiksi yhdensuuntais laminaatti, jossa kaikki kuidut ovat yhdensuuntaisia eli niiden kaikkien välinen kulma 0° ja ne ovat referenssikoordinaatiston pääakselin suuntaisia. Toinen esimerkki lujitesuuntauksen perusteella nimetystä laminaatista on ristikkäislaminaatti, jossa kuidut ovat pääakselin suunnassa ja sitä vastaan. Tällöin kuitujen välille muodostuu 90° kulma. Yleisimmin laminaatit muodostuvat matoista tai kudoksista, jolloin niitä voidaan kutsua lujitteen käyttömuodon perusteella matto- tai kudos laminaateiksi. (Saarela et al. 2003, 22.)

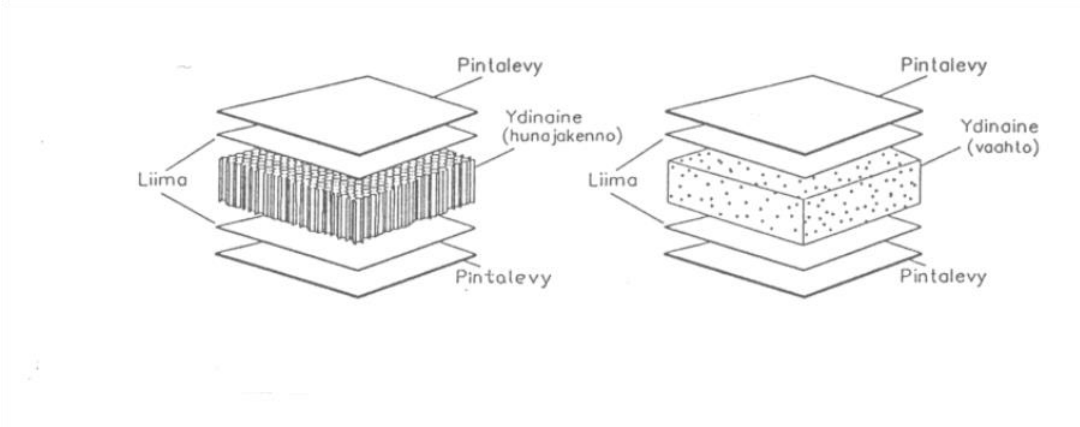
Laminaateissa kuitukerrokset voidaan myös asetella pareittain kahteen eri suuntaan siten, että niiden suuntakulmat eroavat toisistaan vain etumerkillä tällöin laminaattia kutsutaan kulmaladotuksi laminaatiksi. Eli yksinkertaisimmillaan kulmaladotussa laminaatissa on kaksikerrosta joista toinen on kulmassa +θ° ja toinen kulmassa -θ°. Kun laminaatissa on muita kuin pääsuuntiin 0° ja 90° suunnattuja laminaatteja vain pareittain siten että jokaista +θ° kulmaan ladottua kerrosta vastaa -θ° kulmaan ladottu kerros puhutaan balansoidusta laminaatista. Balansoiduissa laminaateissa voi esiintyä useita eri suuntaisia kerrospareja. Määritelmän mukaan myös ristikkäislaminaatit ja kulmaladotut laminaatit ovat balansoituja laminaatteja. (Saarela et al. 2003, 22.)

Kerrosten järjestyksen mukaan laminaatit voidaan jakaa edelleen symmetrisiksi, antisymmetrisiksi ja epäsymmetrisiksi. Symmetriset laminaatit ovat materiaaleiltaan ja kerroksiltaan symmetrisiä. Antisymmetrisissä laminaateissa keskitasoon nähden molemmin puolin kerrokset ovat muuten keskenään samanlaisia, mutta toisella puolella oleva kerros on kulmassa +θ° ja toinen kulmassa -θ°. Antisymmetrinen laminaatti voi sisältää myös 0° ja 90°- suuntaisia kerroksia, jotka esiintyvät pareittain symmetrisesti keskitasoon nähden. Kuvassa 1. on esitelty yksi esimerkki antisymmetrisen laminaatin kerroksista ja niiden suunnista. Mikäli laminaatti ei ole symmetrinen tai antisymmetrinen se on silloin epäsymmetrinen. (Saarela et al. 2003, 22.)



Kuva 1. Lujitekerrosten erilaisia suuntia antisymmetrisessä laminaatissa. (OXYBLACK)

Veneteollisuudessa käytetään paljon kuitulujitetuista kerroksista koostuvien laminaattien lisäksi kerroslevylaminaatteja, joissa kahden pintalevyn välissä on kevyt ydinaine. Kuvassa 2. näkyy kerroslevyrakenteen komponentit. Kerroslevyrakenteen etuja ovat sen erinomainen jäykkyys sekä äänen- ja lämmöneristys kyky. kerroslevyrakenteessa käytetään usein pintalevyinä kuitulujitettuja laminaatteja ja ydinaineena solumuoveja, balsaa tai kennolevy rakenteita. (Saarela et al. 2003, 23.)



Kuva 2. Kerroslevyrakenne (Saarela et al. 2019.)

2.1.1 Matriisimateriaalit

Komposiiteissa matriisi antaa materiaalille sen muodon ja ympäröi sekä peittää lujitteet. Tämän takia matriisi on komposiitin osa, joka ottaa ensimmäisenä vastaan ympäristön aiheuttamat kuormitukset kuten esimerkiksi iskut ja auringon UV-valon. Polymeerikomposiittien matriisi materiaalina on aina jokin polymeeri eli muovi. Muovit ovat suurimolekyylisiä synteesireaktiossa syntyviä aineita eli polymeerejä. Polymeereihin on tavallisesti sekoitettu lisäksi pieniä määriä lisäaineita, joilla voidaan parantaa lopputuotteen ominaisuuksia ja helpottaa tuotteen valmistusta. Yksi polymeerin tärkeimmistä ominaisuuksista on polymeerin muovattavuus. Polymeerit voidaan jakaa muovattavuuden mukaan kahteen laajaan pääryhmään nämä ovat kestomuovit ja kertamuovit. (Saarela et al. 2003, 18; Strong. 2008, 2–4.)

Kertamuoveiksi kutsutaan synteettisiä epäorgaanisia polymeerejä. Kertamuovit kovettuvat silloittumis- eli kovettumisreaktiossa nestemäisen hartsin avulla. Kovettumisen jälkeen kertamuoveja ei lämmittämällä voida enää muovata uuteen muotoon. Polymeerikomposiiteissa yleisimin esiintyviä kertamuoveja ovat tyydyttymättömät polyesterit, epoksit ja vinyyliesterit. Kertamuovit soveltuvat komposiittien matriisimateriaaliksi erittäin hyvin, sillä niiden muottikutistuma on erittäin pieni ja niiden työstö on melko vaivatonta eikä se vaadi merkittäviä investointeja. Lisäksi kertamuovien mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet sekä korroosion ja lämmön kestävyys ovat paremmat kuin kestomuoveilla. (Saarela et al. 2003, 35.)

Matriisi materiaali on komposiitissa se osa, joka ensimmäisenä ottaa vastaan ulkoisen kuormituksen ja mahdolliset iskut. Kertamuovien huonoja ominaisuuksia ovat huono iskunkestävyys, ja muovin luonteeltaan hauras murtumismekanismi. Kertamuoveja ei myöskään voi enää kovetuksen jälkeen muokata takaisin alkuperäiseen hartsimaiseen muotoon. Tämän takia niiden kierrättämien ei ole mahdollista samalla tavalla kuin kestomuoveilla, joita voi muokata uuteen muotoon sulattamalla. Lisäksi kertamuovien valmistusajat ovat yleensä kestomuoveja pidemmät. Kertamuovien ominaisuuksia voidaan kuitenkin muokata hyvinkin paljon ryhmän sisällä. Alla olevassa taulukossa 1 on listattu polymeerikomposiiteille yleisimpien kertamuovien ominaisuuksia. (Saarela et al. 2003, 35–36; Strong. 2008, 4.)

Merkittävin etu kestomuoveilla kertamuoveihin nähden on se, että kestomuoveja voidaan uudelleen muovata lämmittämällä muuttamatta muovin rakennetta. Tämän takia kestomuoveja kutsutaan usein myös termoplastisiksi muoveiksi. Polymeerikomposiittien matriisimateriaaleissa tärkeimpiä kestomuoveja ovat polypropeeni ja polyamidi. Muovikomposiiteissa

matriisimateriaalina käytetään kuitenkin myös erikoismuoveja kuten polyeetteriketonia ja polyeetteri-imidiä. (Saarela et al. 2003, 53.)

Taulukko 1. Kertamuovien ominaisuuksia (Saarela et al. 2003, 37.)

Kertamuovi	Vetolujuus [MPa]	Lämmönkestävyys [C°]	Kemiallinen kestävyys	Muotti-kutis-tuma	Hinta
Polyesteri	50–70	120–180	Hyvä	Korkea	Halpa
Epoksi	50–70	120–180	Hyvä	Alhainen	Kallis
Vinyyliesteri	50–70	120–180	Erinomainen	Alhainen	Kallis

Kestomuovien sovelluskohteet, työstö sekä ominaisuudet eroavat huomattavasti kertamuoveista. Kestomuovit ovat täysin polymerisoituneita silloin, kun ne toimitetaan asiakkaalle, minkä takia kestomuovit työstetään useimmiten sulattamalla. Kertamuovit eroavat kestomuoveista tässäkin, sillä niitä käytettäessä loppupolymerisoinnin tekee yleensä käyttäjä työstö vaiheessa. Vaikka kestomuovit työstetäänkin sulattamalla niiden sulamispisteet ovat melko korkeita esimerkiksi polyeetteriketonin sulamispiste on 345 C° ja polypropeenin 165–175 C°. (Saarela et al. 2003, 53.)

2.1.2 Lujitekuidut

Polymeerikomposiittien rakenteen mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa lujitekuitujen avulla. Matriisimuovin tehtävänä on sitoa kuitumaiset lujitteet toisiinsa, suojata kuituja ja siirtää kuormitukset kuitulujitteiden kannettavaksi. Lujitekuidut jäykistävät ja vahvistavat komposiittia sekä antavat komposiitille muutkin mekaaniset ominaisuudet. Polymeerikomposiiteissa merkittävimmät lujitekuidut ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Näistä teollisesti ja kaupallisesti huomattavasti merkittävin on lasikuitu, jonka osuus kaikesta lujitus käytöstä on noin 95 prosenttia. Hiilikuitujen käytön osuus on noin 1,5 prosenttia, luonnonkuitujen osuus on noin 1,6 prosenttia ja Aramidikuitujen osuus on noin 1,6 prosenttia. (Saarela et al. 2003, 74; Strong. 2008, 4.)

Lasikuituja on mahdollista valmistaa useista erilaisista lasityypeistä, mutta kaupallisesti valmistettavia lasityyppejä on muutamia. Lujitekuiduissa kaupallisesti merkittävimmät

lasikuitutyypit ovat C-lasi, E-lasi ja S-lasi. C-lasin nimi tulee englannin kielen sanoista chemically resistant glass ja sitä käytetään erityisesti happamissa olosuhteissa silloin, kun halutaan valmistaa korroosion kestäviä tuotteita. E-lasia on noin 99 prosenttia kaikesta nykyään valmistetusta lasikuidusta. E-lasin nimi tulee sanoista electrical glass ja sillä on hyvät sähköiset, mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. S-lasi on erityisesti kehitetty lentokoneteollisuutta varten ja sen laajempaa käyttöä rajoittaa lähinnä kallis hinta. S-lasin nimi tulee englannin kielen sanoista high strenght glass ja sen lämmönkestävyys, vetolujuus ja kimmokerroin ovat muita lasityyppejä suuremmat. Taulukossa 2 on vertailtu lasikuitujen ja muiden kuitujen erilaisia ominaisuuksia. (Saarela et al. 2003, 74–75.)

Taulukko 2. Tyypillisten lujitekuitujen ominaisuuksia (Neşer 2017, 23)

	Vetolujuus [GPa]	Kimmokerroin [GPa]	Murtovenymä [%]	Tiheys [g/cm^3]
Lasikuitu	1200–1800	72	2,5	2,5
Hiilikuitu	4000	235	2	1,4
Kevlar	3600–4100	130	2,8	1,44
Pellava	500–900	50–70	1,5–4,0	1,45

Hiilikuitujen hiilipitoisuus on erittäin korkea, määritelmän mukaan vähintään 92 prosenttia. (Huang. 2009, 1). Tavallisesti hiilipitoisuus on kuitenkin noin 95–99 prosenttia (Saarela et al. 2003, 80–81). Hiilikuiduilla on erinomaiset lujuusominaisuudet, alhainen tiheys, hyvä lämmönkestävyys, kemiallinen kestävyys sekä korkea kimmomoduuli. Näiden ominaisuuksien ansiosta hiilikuidut soveltuvat erinomaisesti esimerkiksi avaruusteollisuuden ja lentokoneteollisuuden käyttökohteisiin, joissa usein halutaan panostaa materiaalin keveyteen ja lujuuteen, vaikka hinta olisikin huomattavasti korkeampi. Hiilikuitujen käyttö on kuitenkin jäänyt lasikuituja huomattavasti vähäisemmäksi korkeamman hinnan ja hiilikuitujen hitaiden valmistustekniikoiden takia. (Huang. 2009, 1–2.)

Suurin osa hiilikuiduista valmistetaan polyakryylinitriilikuiduista eli ns. PAN-kuiduista. PAN-pohjaisten kuitujen jälkeen toiseksi yleisimpiä ovat luonnonasfaltista ja kivihiilitervasta valmistetut hiilikuidut. PAN-pohjaisista kuiduista valmistetaan kuitenkin käytännöllisesti suurin osa sekä korkean lujuuden ja korkean kimmomoduulin hiilikuidut. Pikipohjaisten hiilikuitujen hiilikuitusaanto valmistus prosessissa on PAN-pohjaisia kuituja parempi.

Pikipohjaiset hiilikuidut ovat yleensä myös halvempia, kuin PAN-pohjaiset kuidut, mutta PAN-pohjaisilla kuiduilla on kuitenkin tyypillisesti korkeampi vetomurtolujuus. Hiilikuitujen mekaanisia ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 2. muihin tyypillisiin lujitekuituihin. (Saarela et al. 2003,81.)

Aromaattiset polyamidikuidut eli aramidikuidut ovat lujitekuituina eniten käytössä lentokone-, avaruus- ja veneteollisuudessa. Aramidi kuitujen merkittävä käyttökohde on myös ballistiset sovelluskohteet kuten komposiittikypärät sekä kovat- ja puolikovat levyt. Aramidi kuiduista valmistetut levyt ovat erittäin suosittuja esimerkiksi luotiliiveissä ja räjähteiltä suojaavissa rakenteissa. Aramidikuiduilla on muihin kuituihin verrattuna pieni murtovenymä sekä erinomainen vetomurtolujuus ja kimmomoduuli. Aramidikuitujen olennaisin ero lasi- ja hiilikuituihin on niiden tekstiilikuitumaisuus, sitkeys sekä hygroskooppisuus. Aramidikuiduille on kuitenkin ominaista myös huono puristuslujuus ja ongelmat sitoutua matriisimuoviin. Aramidikuidut ovat lisäksi palamattomia ja ne kestävät suhteellisen korkeita lämpötiloja. (Saarela et al. 2003,89–91.)

Luonnonkuidut olivat ensimmäisiä polymeerikomposiittien lujittamiseen käytettyjä kuituja. Niiden käytön merkitys kuitenkin vähentyi, kun mekaanisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksilta parempia lujitekuituja saapui markkinoille. Luonnonkuituja ovat kasveista, elämistä ja mineraaleista saatavat kuidut kuten esimerkiksi selluloosapohjaiset kuidut, eläintenkarvat, ruohonkuidut ja silkki. Luonnonkuidut ovat halpoja, helposti kierrätettävissä, niillä on alhainen tiheys ja ne ovat ympäristöystävällisiä, minkä takia niiden suosio on viime aikoina jälleen lisääntynyt. (John & Sabu. 2012, 5.)

Luonnonkuiduista lähinnä kasvikuidut ovat muovien lujittamiseen houkuttelevia. Niiden käyttöä kuitenkin rajoittaa kuitujen herkkyys lämmölle sekä sienten ja hyönteisten hyökkäyksille. Kasvikuidut absorboivat lisäksi kosteutta ja niiden mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat paljon. Luonnonkuiduissa esiintyy paljon laatueroja, minkä vaikeuttaa valmistettavien kappaleiden mitoitusta ja joudutaan käyttämään suuria varmuuskertoimia. Näiden ominaisuuksien takia luonnon kuitujen tulevaisuuden käyttökohteet ovat todennäköisesti tuotteissa, joissa edellytetään ympäristöystävällisyyttä sekä tuotteissa, joille muiden lujitekuitujen mekaaniset ominaisuudet ovat tarpeettoman hyvät. (Saarela et al. 2003,99–100.)

2.2 Polymeerikomposiittien valmistus

Polymeerikomposiittikappaleiden valmistukseen on olemassa monenlaisia perusmenetelmiä, joita on muunneltu ja yhdistelty toisiinsa (Saarela et al. 2003,153). Tässä osiossa esitellään hyvin lyhyesti veneteollisuudelle yleisimpiä polymeerikomposiittituotteiden valmistukseen käytettäviä laminointimenetelmiä sekä näiden menetelmien etuja ja haittoja.

Polymeerikomposiittituotteiden valmistus menetelmät voidaan jakaa pääryhmittäin laminointimenetelmiin, puristusmenetelmiin, injektiomenetelmiin ja suulakemenetelmiin. Laminointi menetelmiin kuuluvat käsinlaminointi, ruiskulaminointi, kuitukelaus sekä niiden muunnokset. Käsinlaminoinnin tavallisimpia muunnoksia ovat märkälaminointi ja prepreg-laminointi. Märkälaminoinnissa komposiitin lujitteet kostutetaan nestemäisellä hartsilla, kun taas prepreg-laminoinnissa käytetään esikyllästettyjä puolivalmisteita eli prepreggejä. (Saarela et al. 2003,153–154.)

Polymeerikomposiittiveneiden rungot on tyypillisesti valmistettu käyttäen joko käsin laminointi menetelmiä tai ruiskulaminointia. Märkälaminointi ja ruiskulaminointi ovat olleet perinteisesti suosituimpia valmistusmenetelmiä niiden halvempien kustannusten ansiosta. Kuivalaminointia eli prepreg-laminointia käytetään veneteollisuudessa harvoin, mutta menetelmällä voidaan valmistaa korkeampilaatuisia rakenteita. Näitä menetelmiä käytettäessä matriisi materiaalina käytetään yleensä polyesteri tai vinyyliesteri hartseja, sillä nämä materiaalit tarjoavat hyvän veden kestävyyden sekä nopean ja helpon valmistettavuuden. Putkimaisten rakenteiden kuten mastojen ja säiliöiden valmistukseen kuitukelaus ja keskipakovalu ovat olleet yleisimpiä valmistusmenetelmiä. (Tsouvalis. 2015, 9–10; Rubino et al. 2019,7–8.)

Märkälaminoinnissa hartsi sekoitetaan ensin käsin ämpärissä, minkä jälkeen hartsi voidaan levittää siveltimellä tai maalausrullalla. Yleensä menetelmässä muotin pohjalla ensimmäinen kerros on sileä ja kulutusta kestävä pintahartsi, jonka päälle voidaan käsin asetella etukäteen sopiviksi leikattuja lujitteita. Tämän jälkeen lujitteet ensin kastellaan hartsilla ja sitten telataan ilmattomiksi ja tasaisiksi. (Hollaway et al. 1994, 74.) Ilmanpoisto suositellaan tehtävän jokaiselle kerrokselle erikseen ja se toteutetaan ilmanpoistoteloja käyttäen. Ilmanpoisto voidaan suorittaa myös pensselillä, jos matriisimateriaalina käytetään epokseja. (Saarela et al. 2003,154.)

Märkälaminoinnin avulla suunnitellussa materiaalien ja rakenteiden valinta on erittäin vapaata. Märkälaminointi sopii hyvin suurien ja monimutkaisten kappaleiden valmistamiseen ilman suuria muotti ja laitekustannuksia. (Saarela et al. 2003,158–159.) Menetelmällä on myös huonoja ominaisuuksia ja niitä ovat esimerkiksi työn suuri osuus, huono painon ja paksuuden hallinta sekä lopputuloksen riippuvuus työntekijän taidoista. Näiden lisäksi menetelmässä vain yksi pinta on muottia vasten, milloin vain se pinta saadaan sileäksi. (Hollaway et al. 1994, 74–76.)

Kuivalaminoinnissa eli prepreg-laminoinnissa materiaali toimitetaan muovikalvojen väliin pakattuna ja kalvot poistetaan prepreg-materiaalista joko mittoihin leikkaamisen jälkeen tai sitä ennen. Prepreg-laminoinnissa materiaali kerrokset asetellaan muottiin halutussa suunnassa ja järjestyksessä, minkä jälkeen kerrokset telataan mahdollisimman tiiviisti toisiinsa. Laminaatteja voidaan myös tarvittaessa tiivistää alipainesäkin avulla. Lopulta repreg-laminaatti alipainesäkitetään kovetusta varten, minkä jälkeen kovetus tapahtuu yleensä lämmitettävässä paineastiassa. (Saarela et al. 2003,159.)

Prepreg-laminointi kehitettiin rakenteellisesti haastavien tuotteiden valmistukseen ja sen tavoitteena on ollut kontrolloitu suurtenkappaleiden valmistus ja mahdollisimman korkeiden lujuus arvojen ja tasaisen laadun saavuttaminen. Menetelmä sopii erityisen hyvin lentokone- ja avaruusteollisuuden tarpeisiin. Menetelmän haittapuolia ovat kalliit muotit, hidas laminointi, hidas kovetusjakso ja kalliit raaka-aineet. (Saarela et al. 2003,160.)

Ruiskulaminointi on menetelmä, jossa sekä lujitteet ja hartsi ruiskutetaan muottiin saman aikaisesti. Ruiskutuspistooliin on kiinnitetty leikkuri, joka pilkkoo siihen syötettyä rovinkilujitetta ja tämän jälkeen pilkotut lujitepätkät kulkevat pistoolin hartsisuihkun mukana muotille. Leikkuria ja hartsisuihkua voidaan menetelmässä säätää, jotta saadaan haluttu määrä lujitetta materiaaliin. Menetelmässä ilmanpoisto suoritetaan telaamalla kuten märkälaminoinnissa, mutta se on helpompaa sillä lujitteet ovat tasaisemmin levittäytyneet. Kuvassa 3 näkyy, kuinka ilmanpoisto suoritetaan ruiskulaminoinnissa. (Hollaway et al. 1994, 78.)

Kuva 3. Lasikuituveneen valmistus ruiskulaminoimalla (Kivioja 2016)

Ruiskulaminointi on menetelmänä erittäin tuottava, mutta lujitekuitujen ja paksuuden hallinta on täysin käyttäjästä riippuvaisia. Lisäksi satunnaisesti asettuneiden ja pilkottujen lujitekuitujen takia menetelmä sopii vain tuotteille, joille ei aseteta erityisiä lujuusvaatimuksia. Menetelmän etuja ovat matalat materiaalien hinnat, suuri tuottavuus, pienet työkalukustannukset sekä menetelmän sopivuus suurten osien tuotantoon. Ruiskulaminoinnin huonoja puolia ovat huono paksuuden hallinta, lujitteiden satunnaisuus, menetelmän riippuvuus tekijän taidoista sekä se, että menetelmässä saadaan vain yksi sileä pinta. (Hollaway et al. 1994, 78.) Ruiskulaminoinnille tyypillisiä valmistettavia tuotteita ovat esimerkiksi erilaiset muotokappaleet, soutuveneet ja pienet säiliöt (Saarela et al. 2003,162).

3 Polymeerikomposiitit veneteollisuudessa

Suomessa veneily on kasvattanut viime vuosina suosiotaan. Trafin mukaan vuonna 2020 ensirekisteröintien määrä kasvoi huomattavasti ja vuonna 2021 määrä kasvoi entisestään. Vesiskoottereita on Suomessa myyty yhä enemmän, mutta edelleen suurin osa ensirekisteröidyistä vesikulkuneuvoista on moottoriveneitä. Vuonna 2021 suomessa ensirekisteröitiin yhteensä 4899 vesikulkuneuvoa, joista 3482 kappaletta oli moottoriveneitä, 1250 vesiskoottereita ja 167, muita kuten esimerkiksi purjeveneitä. (Trafi 2021.)

Suomen veneteollisuuden yleisimmin käyttämät runko materiaalit ovat järjestyksessä: lasikuitukomposiitit, alumiini ja ABS. Lasikuitukomposiittien käytön osuus oli vuosina 1994–1996 noin 41 %, alumiinien 36 % ja ABS-muovien 22 %. (Hildebrand 1997.) Nykyäänkin Suomen suosituimpien venemerkkien mallistoista löytyy paljon erilaisia materiaaleja ja materiaali yhdistelmiä. Perinteisesti suosituimmissa vaihtoehdoissa veneen sisäosat ja runko ovat olleet samaa materiaalia. Näiden lisäksi valmistajat ovat tuoneet markkinoille venemalleja, joissa runko on valmistettu alumiinista, mutta veneen sisusta on valmistettu polymeerikomposiiteista. Kuvassa 4 näkyy tyypillinen Suomessa käytettävä laskuituvene malli.

Kuva 4. Tyypillinen Suomessa käytettävä lasikutukomposiittivenemalli (Silver)

Valmistustekniikoiden ja suunnittelun kehityksen ansiosta polymeerikomposiittien käyttö on kehityksen myötä yleistynyt veneissä. Lasikuiduilla lujitetut polymeerikomposiitit ovat olleet jo pitkään vene teollisuuden suositun komposiittimateriaali, mutta myös muita komposiittimateriaaleja on alettu käyttämään lisääntyvästi. (Tsouvalis. 2015, 6–8; Barsotti, Gaiotti, Rizzo 2020.) Alle 50 m pitkien alusten valmistuksessa polymeerikomposiitit ovat kansainvälisesti kaikkein suosituin materiaalivaihtoehto. Jopa 70 prosenttia näihin alle 50 m pitkiin aluksiin käytetystä materiaalista on polymeerikomposiitteja ja alle 20 metriä pitkien veneiden rungoista noin 80 prosenttia valmistetaan muovikomposiiteista. Komposiittien käytön oletetaan kuitenkin vielä kasvavan näistä luvuista. (Neşer 2017, 19; Rubino et al. 2019,5.)

Polymeerikomposiittien suurimmat edut veneteollisuudessa voidaan todeta korroosion vähentämisessä sekä monimutkaisten rakenteiden ja saumattomien runkojen valmistuksessa. Polymeerikomposiiteilla voidaan myös vähentää painoa, osien lukumäärää ja kokoonpanokustannuksia, minkä takia niillä on alettu korvaamaan muita materiaaleja kuten terästä, alumiinia ja puuta. (Tsouvalis. 2015, 6–8; Barsotti, Gaiotti, Rizzo 2020.)

3.1 Materiaalivaatimukset veneteollisuudessa

Veneteollisuudessa valmistetut komponentit ja rakenteet ovat jatkuvasti muuttuvassa ympäristössä, minkä vuoksi ne altistuvat elinikänsä aikana usein haastaviin ympäristöolosuhteisiin. Komponentit voivat olla välillä tuulen ja aaltojen aiheuttaman kuormituksen alaisina ja välillä jopa täysin upotettuina meriveteen. (Rubino et al. 2019, 1.) Tämän lisäksi veneet altistuvat usein auringon UV-valolle sekä erilaisten elävien organismien aiheuttamalle rasitukselle (Neşer 2017, 20). Yksi suurimmista syistä muovikomposiittien käytölle veneteollisuudessa onkin niiden hyvä kestävyys haastavissa ympäristöolosuhteissa (Tsouvalis 2015, 9).

Suola ja syövyttävä merivesi ovat erityisen haitallisia veneille ja muille merivedessä liikkuville kulkuneuvoille. Meriveden aiheuttama korroosio on ollut veneteollisuudessa suuri ongelma varsinkin terästä, alumiinia ja puuta käytettäessä. Polymeerikomposiittien käyttö veneteollisuudessa on kasvattanut suosiotaan, kun niiden avulla on onnistuttu parantamaan veneiden korroosion kestävyyttä. Polymeerikomposiittien korroosion ja väsymisen kestävyyden ansiosta voidaan huomattavasti vähentää huoltovaatimuksia käyttämällä muovikomposiitteja rungon lisäksi myös tietyissä komponenteissa, kuten kiinnikkeissä ja liittimissä. (Rubino et al. 2019, 1–2.)

Vesistöjen haastavuutta ympäristönä lisäävät erityisesti vesistöjen rannoilla esiintyvät kivet ja erilaiset veneille vaaralliset matalikot. Erityisesti matalissa ja kivikkoisissa vesistöissä liikkuvissa veneissä halutaan usein hyvää iskunkestävyyskykyä. VTT Manufacturing Technologyn 1997 rahoittamassa tutkimuksessa Hildebrand (1997,9–26) on tutkinut veneteollisuuden suosituimpien runkomateriaalien lasikuitukomposiittien, alumiinin, vanerin ja ABS-muovin iskunkestävyyttä. Tutkimuksen perusteella näistä neljästä perinteisestä veneiden

runkoihin käytetyistä materiaalista alumiinilla on paras iskunkestävyys ja lasikuitukomposiiteilla vanerin jälkeen toiseksi huonoin.

Lasikuitukomposiittien ja vanerin huono iskunkestävyys johtuu niiden hauraasta murtumismekanismista. Alumiini on polymeerikomposiitteihin verrattuna paljon sitkeämpi materiaali, minkä ansiosta materiaali pystyy paremmin absorboimaan iskun energiaa. (Hildebrand 1997,18.) Tämän ansiosta alumiinirunkoisiin veneisiin ei tule yhtä herkästi reikiä mahdollisissa iskuissa. Erityisesti suomen kivikkoisissa sisävesistöissä ja rannikkoalueilla monet kuluttajat suosivatkin juuri alumiinirukoisia veneitä muovikomposiittiveneiden sijaan. Suomalaisista alumiiniveneiden valmistajista Silver mainostaakin sivustoillaan, ettei alumiini runkoisilla veneillä tarvitse pelätä kolhuja rantautuessa rantakallioille tai hietikoille.

Materiaalin kestävyyden lisäksi veneen keveys on veneteollisuudessa tärkeä ominaisuus. Kuten lähes kaikissa kulkuneuvoissa myös veneteollisuudessa pyritään saavuttamaan samaan aikaan niin kevyitä ja lujia rakenteita kuin mahdollista. Kevyemmät veneet voivat kuljettaa painavamman kuorman kerrallaan, kuluttavat vähemmän polttoainetta, niillä on pienempi inertia ja ne kelluvat paremmin. Polymeerikomposiittien hyvän lujuus-painosuhteen ansiosta jopa raskaissa pääosin metallisissa kelluvissa rakenteissa käytetään polymeerikomposiitteja erilaisissa komponenteissa, jotta rakenteen massaa saadaan vähennettyä. Rakenteen keventäminen on veneteollisuudessa erityisen tärkeää, sillä keventämällä veneen pinnan yläpuolisen osan painoa saadaan parannettua merkittävästi aluksen vakautta ja laskettua painopistettä. (Neşer 2017, 19–20; Rubino et al. 2019, 1–2.)

Veneteollisuudessa halutut materiaaliominaisuudet vaihtelevat paljon myös sen mukaan millaiseen veneeseen materiaalia aiotaan käyttää. Esimerkiksi soutuveneissä ja pienissä moottoriveneissä massatuotettavuuden helppous on yksi tärkeimmistä kriteereistä. Suosituimmat polymeerikomposiitit ovat melko nopeasti ja edullisesti massatuotettavissa ja tästä johtuen niitä käytetään paljon pienten veneiden valmistukseen. Suuremmissa veneissä massatuotanto ei ole yhtä yleistä. Niissä muut materiaalit voivat olla houkuttelevampia vaihtoehtoja. (Tsouvalis 2015, 13.)

Erityisesti suurempia matkustajaveneitä valmistettaessa paloturvallisuuden merkitys korostuu. Polymeerikomposiittien käyttäytyminen tulipaloissa onkin yksi suurimmista niiden käyttöä rajoittavista tekijöistä. Pienemmille kalastusaluksille ja veneille paloturvallisuuteen liittyvät säännökset eivät ole niin tiukkoja, mutta matkustajakäyttöön tarkoitetuille

kansainvälisillä vesillä liikkuville suuremmille veneille tai laivoille on olemassa IMO:n (International Maritime Organization) asettamia määräyksiä, jotka rajoittavat veneisiin käytettäviä materiaaleja. Tämän lisäksi myös esimerkiksi USA:ssa polymeerikomposiittien käyttöä veneiden runkorakenteissa on rajoitettu, sillä vaatimukset palamattomuuden osalta eivät täyty. (Tsouvalis 2015, 13–14; Neşer 2017, 22.)

3.2 Käyttökohteet

Polymeerikomposiiteille on viime aikoina löytynyt uusia käyttökohteita kaikenlaisissa veneiden osissa. Polymeerikomposiitit ovat jo pitkään olleet käytössä veneiden runkomateriaalina ja niillä korvataan yhä enemmän perinteisesti teräksestä, alumiinista tai puusta valmistettuja komponentteja. Hyvän korroosion kestävyyden ja lujuus-painosuhteen ansiosta polymeerikomposiittien on havaittu olevan edullisia veneiden runkorakenteiden lisäksi useissa käyttökohteissa, kuten potkureiden laipoissa, veneiden kansiosissa ja mastoissa. (Rubino et al. 2019, 1; Neşer 2017, 19.) Suurimmassa osassa näistä käyttökohteista polymeerikomposiiteilla on haluttu päästä eroon korroosiosta, jota ilmenee terästä tai alumiinia käytettäessä tai ympäristön aiheuttamasta kulumisesta, jota ilmenee puuta käytettäessä. Toinen tärkeä syy polymeerikomposiittien käytölle veneteollisuudessa on ollut rakenteiden keventäminen. Erityisesti veden pinnan yläpuolista painoa on pyritty keventämään painopisteen alentamiseksi. (Barsotti et al. 2020.)

Edullisen hinnan ansiosta lasikuitu on ollut veneteollisuuden suosituin polymeerikomposiittien lujittamiseen käytetty materiaali, mutta myös hiilikuituja käytetään sovelluskohteissa, joissa hinta voi nousta korkeammaksi (Tsouvalis. 2015, 9; Barsotti et al. 2020). Kuvassa 5 näkyvä purjeveneen masto on yksi esimerkki tyypilliselle hiilikuitujen käytölle purjeveneissä. Mastoissa käytetään yhä enemmän hiilikuiduilla lujitettuja polymeerikomposiitteja, niiden erinomaisen lujuus-painosuhteen ansiosta. Joissain erikoisemmissa sovelluskohteissa käytetään myös aramidikuituja. Esimerkiksi purjeveneiden keula- ja köliosissa aramidikuiduilla lujitetuilla polymeerikomposiiteilla voidaan vahvistaa veneen tärkeimpiä osia ja parantaa samalla veneen iskunvaimennus kykyä. (Johnson 2018.)

Kuva 5. Polymeerikomposiittien käyttö purjeveneiden mastoissa on yleistä varsinkin kilpaveneissä. (Upffront)

Purjeveneen masto on rungon ohella yksi purjeveneen tärkeimmistä komponenteista. Mastoissa polymeerikomposiittien käyttö alkoi vasta 1990-luvulla, kun tutkimus osoitti, että polymeerikomposiittien käytöllä voidaan ratkaista useita teräsmastoihin liittyviä ongelmia. Ensimmäisissä polymeerikomposiittimastojen prototyypeissä käytettiin lasikuituja ja hiilikuituja lujitteena, jolloin saatiin parannettua maston ballistista suorituskykyä ja jäykkyyttä. Polymeerikomposiitteja käyttämällä mastojen tärinän vaimennuskyky parani ja painoa saatiin kevennettyä merkittävästi. Samaan aikaan muovikomposiittimastot tarjoavat paremman väsymisen ja korroosiokestävyyden, mutta ainakin ensimmäisten mastojen hinta oli jopa 50 % kalliimpi, kuin perinteisillä mastoilla. (Rubino et al. 2019,5.)

Myös moottoriveneiden kriittisimmissä komponenteissa on jo pitkään käytetty polymeerikomposiitteja. Kuvassa 6 näkyy esimerkki polymeerikomposiiteista valmistetusta potkurista. Ensimmäiset polymeerikomposiitti potkurit nähtiin kalastuslaivoissa 1960-luvulla. Ensimmäiset potkurit olivat jopa 2 m halkaisijaltaan, mutta myöhemmin 1970-luvlla polymeerikomposiitteja käytettiin jopa 6 m halkaisijaltaan olevien potkureiden valmistamiseen. Samoihin aikoihin polymeerikomposiitteja käytettiin ensimmäisiä kertoja myös ilmatyynyalusten propelleissa. Potkureissa polymeerikomposiittien käytöllä saavutettiin perinteisiin materiaaleihin verrattuna samankaltaiset ominaisuudet alusten nopeudessa, polttoaineen kulutuksessa, käyttöiässä ja moottorin kuormituksessa. Tämän lisäksi polymeerikomposiittipotkureiden käyttö vähensi alusten tärinää ja teki niistä samalla hiljaisempia. (Rubino et al. 2019,6.)

Kuva 6. Polymeerikomposiiteista valmistettu moottoriveneen potkuri. (Comprop)

Muovikomposiittien erinomaisten ominaisuuksien ja kilpailukykyisen hinnan ansiosta niitä käytetään maailmanlaajuisesti lähes kaikenlaisten vesikulkuneuvojen runkorakenteissa. Polymeerikomposiitit ovat suosittuja esimerkiksi kalastusveneiden, ilmatyynyalusten, katamaraanien, purjeveneiden ja muiden erilaisten pienten veneiden rungoissa. Polymeerikomposiittimateriaaleja on monenlaisia ja erilaisten veneiden runkoihin voidaan valita juuri siihen käyttöön sopiva materiaali ja rakenne. Esimerkiksi pelastusveneiden runkoja varten on kehitetty polymeerikomposiittimateriaali, joka kestää tulipaloa muita komposiittimateriaaleja paremmin. Veneiden runkomateriaalina polymeerikomposiittien käytöllä voidaan lopputuotteessa saavuttaa huomattavia etuja, kuten veneen keveys, pienemmät valmistuskustannukset ja huoltokustannukset. (Rubino et al. 2019,5.)

Ilmatyynyalukset ja katamaraanit ovat Suomessa melko harvinaisia, mutta niilläkin on omat etunsa. Polymeerikomposiittien käyttö ilmatyynyalusten rungoissa oli yksi ensimmäisistä polymeerikomposiittien käyttökohteista veneteollisuudessa. Jo ensimmäisissä ilmatyynyaluksissa ja katamaraaneissa polymeerikomposiitti rungot valmistetiin käyttäen kerroslevyrakennetta ja tätä rakennetta käytetään niissä edelleen. Katamaraaneissa kerroslevyrakenteisten ja aramidikuiduilla lujitettujen polymeerikomposiittien käyttö paransi huomattavasti runkojen vetolujuutta ja äänen eristyskykyä. Katamaraanien ja ilmatyynyalusten valmistuksessa käytetään aramiidikuitujen lisäksi myös hiilikuituja ja lasikuituja polymeerikomposiittien lujitteena. (Rubino et al. 2019,5.)

Perinteisesti avoveneiden valmistajat valmistavat samasta materiaalista sekä veneen rungon että sen sisustan. Suomessa täysin alumiinista tai lasikuitukomposiiteista valmistettujen avoveneiden rinnalle on tullut hiljattain kilpaileva vaihtoehto. Suomen suurimmista veneiden valmistajista ainakin Yamarin ja Silver valmistavat alumiinirunkoisia veneitä, joissa on lasikuitukomposiitista valmistettu sisusta. Kuvassa 7 näkyy erillään veneen polymeerikomposiittinen sisusta ja alumiininen runko. Silverin mukaan alumiinisen rungon ja muovikomposiitti sisustan yhdistelmä tuo veneeseen muovikomposiitti- ja alumiiniveneen parhaat ominaisuudet. Alumiinista valmistettu runko kestää paremmin iskuja, minkä ansiosata veneily ja rantautuminen kivikkoisiin rantoihin on huolettomampaa. Polymeerikomposiiteista valmistetun sisustan etuna on sen saumattomuus ja helppous pitää vene puhtaana. Polymeerikomposiitti sisusta pysyy myös auringossa viileämpänä, minkä ansiosta sen päällä on mukavampi kävellä kuumalla kelillä. (Silver; Yamarin.)

Kuva 7. Polymeerikomposiiteista valmistettu veneen sisusta ja alumiininen runko. (Silver)

Veneissä keveyden ja korroosion kestävyyden tavoittelu on johtanut polymeerikomposiittien käyttämiseen myös matkaveneiden hyttien sisustuksessa. Matkustamiseen tarkoitetuissa avoveneitä suuremmissa veneissä on usein mahdollista yöpyä, minkä vuoksi niistä löytyy usein oma keittiö, wc ja suihku. Näille alueille veneissä on kuitenkin jouduttu kehittämään tavallisista poikkeavia ratkaisuja, jotta veneestä ei tulisi liian painava. Lasikuitukomposiitista on valmistettu jo pitkään suihkuja ja kerroslevyrakenteisia tankkeja polttoaineelle ja makealle vedelle. Näiden käyttökohteiden lisäksi veneiden painoa on pyritty keventämään käyttämällä polymeerikomposiitteja keittiön kaapeissa ja työtasoissa. Polymeerikomposiiteille on löydetty käyttöä myös veneiden putkistoissa, missä lasikuitukomposiitit ovat painon vähentämisen lisäksi parantaneet putkien korroosionkestävyyttä. (Dawson 2006.)

Kuten kuvassa 8 näkyy veneiden keittiöt ovat yleensä melko ahtaita, mutta veneiden omistajat haluavat, että pinnat valmistetaan keittiöille tutuista laadukkaista materiaaleista. Käyttämällä polymeerikomposiitteja keittiöiden kaapistoissa ja putkistoissa, saadaan vene pidettynä kevyenä ja keittiöissä voidaan silti käyttää massiivisia kivitasoja ja hienoja lehtipuisia kalusteita. Myös suurien kivitasojen painoa on kyetty keventämään käyttämällä ohuita kerroksia kiveä muuten polymeerikomposiiteista valmistetun levyn päällä. Näin työtasoista on saatu kevennettyä jopa 80 % levyn painosta, verrattuna täysin kivestä valmistettuun levyyn. Työtasoihin ja kaapistoihin käytettävät polymeerikomposiitti levyt valmistetaan yleensä käyttäen kerroslevyrakennetta. (Dawson 2006.)

Kuva 8. Tyypillinen suuremman matkustajaveneen keittiö (Cabinetdoormat)

Polymeerikomposiitteja käytetään myös veneeseen nousuun käytettävissä apuvälineissä, kuten tikkaissa, rappusissa ja kävelykansissa. Erityisesti kävelykansissa ja rappusissa polymeerikomposiittien erinomainen lujuus-painosuhde on valtava etu, sillä kevyemmät kävelykannet tai rappuset on helpompi asettaa paikalleen. Kevyempien kävelykansien ja rappusten ansiosta veneet eivät myöskään tarvitse kalliita hydrauliikkajärjestelmiä, jotta veneestä päästään nousemaan maihin. Kuvassa 9 on esitelty osittain hiilikuitukomposiitista valmistettuja veneeseen nousuvälineitä. Hiilikuitukomposiitit ovat keveyden lisäksi myös tyylikkään näköisiä, mikä on lisännyt niiden suosiota kalliimmissa huviveneissä. (Dawson 2006.)

Kuva 9. Veneeseen nousemiseen käytettyjä apuvälineitä. (GMTcomposites)

3.3 Viimeisimmät innovaatiot ja kehitystarpeet

Yksi merkittävimpiä viimeaikaisia kehityksiä polymeerikomposiiteissa on ollut vinyyliestereiden käytön yleistyminen matriisimateriaalina. Vinyyliesterit ovat tulleet tunnetuksi niiden erinomaisesta murtovenymästä ja hyvästä kerrosten välisestä tarttuvuudesta. Vinyyliestereistä on tullut merkittävä kilpailija epoksihartseille, joita pidettiin ominaisuuksiltaan parhaina matriisimateriaaleina. Veneteollisuudessa epoksihartsien korvaaminen vinyyliestereillä helpottaa suurten komponenttien valmistusta, sillä epoksi vaatii kiinteät lämpöprofiilit jälkikovettumisvaiheessa, jotta epoksien käytöllä olisi selkeitä etuja vinyyliestereihin nähden. Epokseja käytettäessä pieniä komponentteja voidaan valmistaa paineistetuissa uuneissa, mutta suuremmat runkorakenteet vaativat muotin lämmittämistä. Nämä epoksimatriiseihin liittyvät käsittelyongelmat rajoittavat laajempaa epoksimatriisien käyttöä veneteollisuudessa. (Barsotti et al. 2020.)

Kuten kaikilla materiaaleilla, myös polymeerikomposiiteilla on omat ongelmansa veneteollisuudessa. Vaikka muovikomposiittiveneet vähentävät huollon tarvetta 1970-luvulla lasikuiturutto eli ”osmoosio” aiheutti paniikkia muovikomposiittiveneiden omistajien keskuudessa. Lasikuitukomposiittiveneille tyypillisessä ilmiössä veneen pintahartsi toimii puoliläpäisevänä kalvona, jolloin ajan kuluessa muovikomposiitin sisään imeytyy vettä. Kun vettä on tarpeeksi päässyt imeytymään polymeerikomposiittiin, se alkaa lopulta muodostamaan komposiitin sisällä painetta, joka aiheuttaa rakkuloiden syntymisen pintahartsiin. (Clegg, 1–2; Epu Coat.) Rakkuloiden syntymiseltä veneen pintaan voidaan kuitenkin nykyään välttyä käyttämällä joko paremmin vettähylkiviä matriisimateriaaleja tai käyttämällä veneissä vinyyliesteripohjaista pinnoitetta. (Rubino et al. 2019,6–7.)

IMO:n (International Maritime Organization) mukaan polymeerikomposiitit ovat palavaa materiaalia, mikä rajoittaa niiden käyttöä paloturvallisuutta vaativissa kohteissa. Myös veneissä paloturvallisuus on tärkeää, minkä takia polymeerikomposiittien palonkestoa on pyritty kehittämään. Muovikomposiiteissa matriisimateriaalin terminen hajoaminen on suuri ongelma, kun muovikomposiitti altistetaan korkeille lämpötiloille. Matriisimateriaalien hajotessa ne päästävät ympäristöön helposti syttyviä kaasuja, mikä edesauttaa liekkien kasvamista ja kiihdyttää polymeerikomposiitin hajoamista. (Barsotti et al. 2020.)

Veneiden valmistukseen käytettävien polymeerikomposiittien paloturvallisuutta testataan asettamalla tutkittava materiaali 20 minuutin ajaksi 750 °C lämpötilaan. Jos materiaalin painohäviö on alle 50 % ja sen lämpötila on alle 800 °C materiaali luokitellaan IMO:n mukaan palamattomaksi. Ensimmäinen ehdoista on melko helposti saavutettavissa käyttämällä lasipitoisuutena yli 0,5:ttä. Jälkimmäisen saavuttamien ei ole aivan yhtä yksinkertaista johtuen lämpöhajoamisessa syntyvien kaasujen tuottamasta lämmöstä. Tällä hetkellä tutkimukset keskittyvät muovikomposiittien palamista hidastavien lisäaineiden käyttämiseen. Esimerkiksi alumiini-hypofosfaatin ja ammonium-polyfosfaatin käyttö ovat osoittautuneet tähän tarkoitukseen tehokkaiksi. Myös muita palamista hidastavia lisäaineita on löydetty, mutta perinteisesti paloturvallisuutta lisäävät lisäaineet ovat heikentäneen polymeerikomposiitin mekaanisia ominaisuuksia. Alumiini-hypofosfaatin käytöstä on kuitenkin tutkimusten mukaan saatu lupaavia tuloksia myös mekaanisia ominaisuuksia testattaessa. (Barsotti et al. 2020.)

Vaikka polymeerikomposiitit ovat veneen käytön aikana ominaisuuksiltaan erinomaisia materiaaleja, veneen tullessa käyttöikänsä loppuun tulisi vene kierrättää jollain ympäristöystävällisellä menetelmällä. Nykyiset ja tulevat ympäristöön liittyvät lait ja säännöt edellyttävät, että kaikki tekniset materiaalit otetaan ja kierrätetään asianmukaisesti talteen käyttöikänsä loppuun tulleista tuotteista kuten veneistä. Vuoden 2016 alussa voimaan astuneen EU:n määräyksen mukaan biohajoavan jätteen ja muun orgaanisen aineksen vienti kaatopaikoille on kielletty. Tämä määräys koskee myös polymeerikomposiitteja. Polymeerikomposiiteille kierrättäminen on ollut ja on yhä yksi suurimmista kehityskohteista, johtuen pääasiassa muovikomposiittien heterogeenisestä rakenteesta. Suomessa ongelmia aiheuttaa myös polymeerikomposiittijätteen määrän vähäisyys, mikä hankaloittaa kustannustehokasta käsittelyä. Tällä hetkellä polymeerikomposiittien kierrätys rajoittuu lähes täysin komposiittimateriaalin

polttamiseen energian tuotannossa. Lujitekuituja tässä prosessissa otetaan joko hyvin vähän tai ei ollenkaan uuteen käyttöön. (Neşer 2017, 21; Kivioja 2016.)

Polymeerikomposiittien kierrättämisen laajan tutkimisen tuloksena on hiljattain kehitelty uudenlaisia menetelmiä polymeerikomposiittien kierrättämiseen. Kehitetyt menetelmät voidaan jakaa mekaanisiin, kemiallisiin ja lämpöön perustuviin menetelmiin. Näistä menetelmistä mekaanisessa kierrätysmenetelmässä suuret polymeerikomposiitti kappaleet pilkotaan mekaanisesti pienempiin osiin, minkä jälkeen enemmän matriisimateriaalia sisältävät kappaleet ja enemmän lujitekuituja sisältävät kappaleet erotellaan toisistaan uudelleen käyttöä varten. Mekaaninen menetelmä on kehitellyistä menetelmistä edullisin ja vaatii vähiten uutta teknologiaa, mutta menetelmä on kuitenkin erittäin energiaintensiivinen ja saatavat kierrätetyt materiaalit ovat huonolaatuisia. (Neşer 2017, 21.)

Jotta kertamuovikomposiittien käyttöä voidaan lisätä veneteollisuudessa nykyisten ja tulevien ympäristöön liittyvien lakien mukaisesti, tulee materiaalien toimittajien ja tuottajien huolehtia, että jätehuolto polymeerikomposiiteille on kunnossa. Tämän takia alalla on kiire kehittää uusia käyttökohteita kierrätetyille komposiittimateriaaleille. Mekaanisesta kierrättämisestä saatavalle materiaalille on löydetty käyttöä esimerkiksi keinotekoisen puun valmistuksessa, bitumipohjaisissa asfalteissa ja katon päällysteissä sekä sementtimateriaaleissa niiden lämmöneristys ominaisuuksien parantamiseksi. Uusia käyttökohteita kierrätetyille polymeerikomposiiteille tarvitaan kuitenkin edelleen, jotta kierrättäminen olisi kustannustehokasta ja kannattavaa. (Neşer 2017, 21; Kivioja 2016.)

4 Pohdinta

Lisääntyvä empiirinen tieto on vahvistanut polymeerikomposiittien suorituskyvyn erityisesti suolavesiympäristöissä. Ajan kuluessa valmistustekniikoiden kehitys ja automatisointi voisi hyvinkin moninkertaistaa polymeerikomposiiteista valmistettavien veneiden ja veneen osien määrän. (Dawson 2006.) Polymeerikomposiitit ovat jo osoittautuneet käytännöllisiksi useissa erilaisissa veneiden komponenteissa. Runkomateriaalina polymeerikomposiitit ovat jo suosituin vaihtoehto veneissä, mutta varsinkin kookkaammissa veneissä on paljon

muitakin komponentteja rungon lisäksi. Polymeerikomposiiteista on valmistettu veneiden erilaisiin komponentteihin kevyempiä ja kestävämpiä vaihtoehtoja, mutta polymeerikomposiitteja tullaan todennäköisesti näkemään entistäkin enemmän uusissa veneissä.

Kehitetyimpien polymeerikomposiittimateriaalien käyttö on kuitenkin jäänyt harvinaisemmaksi suurempien alusten valmistuksessa johtuen osittain komposiittimateriaalien korkeammasta hinnasta ja osittain niiden heikkouksista. Polymeerikomposiittien heikkouksia muihin materiaaleihin nähden ovat esimerkiksi heikko vedenalainen iskunkestävyys ja palonkestävyys. Näihin ongelmiin kehitetään kuitenkin jatkuvasti ratkaisuja kehittämällä uusia materiaaleja ja valmistusmenetelmiä, mikä taas edistää polymeerikomposiittien käyttöä koko venealalla. (Rubino et al. 2019, 25.)

Toisin kuin esimerkiksi alumiinista venettä rakennettaessa, polymeerikomposiittiveneille on useita vaihtoehtoisia matriisi-, lujite- ja rakennevaihtoehtoja, joilla voidaan vaikuttaa merkittävästi lopputuotteen ominaisuuksiin. Materiaalit ja rakenteet on määriteltävä oikein jo varhaisessa vaiheessa suunnittelua. Oikean rakenteen ja materiaalin valinta ei kuitenkaan ole aina niin yksinkertaista. Tällä hetkellä on meneillään useita tutkimuksia, joissa selvitetään kuinka materiaali- ja rakennevalinnat vaikuttavat laivan painoon ja hintaan. Näillä tutkimuksilla pyritään hankkimaan tietoa paino- ja hintaeroista erilaisilla materiaali- ja rakenneyhdistelmillä kaiken kokoisissa laivoissa ja veneissä erilaisilla kuormituksilla. Tutkimusten avulla voidaan todennäköisesti kehittää yhä kevyempiä ja kustannustehokkaampia tuotteita. (Rubino et al. 2019, 25.)

Suomessa veneillään paljon kivikkoisissa järvissä, milloin veneellä kiville ajamisen vaara on aina veneilijän mielessä, minkä takia alumiiniveneiden valmistajat markkinoivatkin paljon veneidensä huolettomuutta rantautumistilanteissa. Mikäli iskunkestävyyttä polymeerikomposiitti veneissä saadaan parannettua, tulee veneistä turvallisempia ja markkinoille voidaan saada mahdollisesti edullinen vaihtoehto alumiiniveneille.

Polymeerikomposiittien haastavan kierrätettävyyden vuoksi joko kierrätysmenetelmiä tai materiaaleja tulee tulevaisuudessa kehittää, jotta materiaalit olisivat kestävän kehityksen mukaisia. Polymeerikomposiittien ympäristöystävällisyyttä voidaan parantaa käyttämällä esimerkiksi kertamuovien sijaan kestomuoveja tai käyttämällä lujitekuituina luonnonkuituja. Näillä materiaalivaihtoehdoilla on kuitenkin omat ongelmansa, minkä takia niillä ei vielä tällä hetkellä ole merkittävää käyttöä veneteollisuudessa. Suurimmat heikkoudet ovat näiden

materiaalien lujuus- ja jäykkyysominaisuuksissa, mutta muita veneteollisuudelle merkittäviä ongelmia ovat esimerkiksi kosteuden imeytyminen luonnonkuituihin sekä luonnonkuitujen heikko iskunkestävyys. (Neşer 2017, 21–22.)

Haastava kierrätettävyys on vaikea ongelma ratkaista, mutta ongelmaa voitaisiin mahdollisesti pienentää käyttämällä erilaisia komposiittimateriaaleja. Biohajoavien polymeerikomposiittien käytöllä voitaisiin ehkä tulevaisuudessa vähentää uusien veneiden kierrättämisen ongelmia, mutta tällä hetkellä käytössä olevat veneet tulevat joka tapauksessa jossain vaiheessa tiensä päähän. Tämän takia polymeerikomposiittien kierrätysmenetelmiä tulee kehittää mahdollisimman nopeasti. Jotta polymeerikomposiittien kierrätys onnistuisi käytännössä, kierrättämisen tulisi olla taloudellisesti kannattavaa. Polymeerikomposiittien kierrätyksestä saatavalle materiaalille tulisi keksiä mahdollisimman paljon uusia käyttökohteita. Mikäli polymeerikomposiittien kierrätysongelma saadaan ratkaistua, voidaan polymeerikomposiittien käyttöä veneteollisuudessa jatkaa murehtimatta siitä, että ongelmallinen polymeerikomposiittijäte jäisi tulevien sukupolvien ongelmaksi.

5 Yhteenveto

Polymeerikomposiitit ovat materiaaleina erittäin monipuolisia ja niiltä löytyy edelleen paljon potentiaalia kehittyä materiaaleina. Polymeerikomposiittien ominaisuudet sopivat veneteollisuuden tarpeisiin erinomaisesti, minkä takia veneteollisuudessa käytetään hyvin paljon erilaisia lujitekuitumateriaaleja ja matriisimateriaaleja monissa erilaisissa käyttökohteissa. Kehittyneet valmistusmenetelmät ovat mahdollistaneet entistäkin laajemman käytön polymeerikomposiiteille. Veneteollisuudessa polymeerikomposiitteja käytetään painon keventämisen vuoksi jopa veneille hyvin erikoiselta tuntuvissa käyttökohteissa, kuten keittiön kaapeissa ja työtasoissa. Näiden lisäksi myös veneelle tyypillisissä komponenteissa on alettu korvaamaan entistä enemmän perinteisiä materiaaleja polymeerikomposiiteilla.

Polymeerikomposiitit ovat jo tähän mennessä kehittyneen ominaisuuksiltaan paljon, mutta jotta polymeerikomposiittien käyttö veneteollisuudessa voisi kasvaa jatkossakin, tulee joitain ongelmia ratkaista. Polymeerikomposiittien iskunkestävyyden ja paloturvallisuuden

kehittäminen parantaisi veneiden turvallisuutta, mikä voisi mahdollisesti jopa pelastaa ihmishenkiä. Polymeerikomposiittien kierrättäminen on kuitenkin ehkä jopa näitä ongelmia suurempi ongelma. EU:ssa lainsäädännöllä on jo kielletty polymeerikomposiittien vienti kaatopaikoille, mutta ongelmaan tarvitaan edelleen ympäristöystävällisiä ja taloudellisesti kannattavia ratkaisuja, jotta polymeerikomposiittijäte ei jäisi tulevien sukupolvien ongelmaksi.

Polymeerikomposiitit tulevat kuitenkin olemaan suosituin veneteollisuuden materiaali myös tulevaisuudessa. Kilpaileviin materiaaleihin verrattuna polymeerikomposiitit ovat monipuolisempia ja monilta ominaisuuksiltaan ylivoimaisia. Niille on kehitetty monenlaisia valmistusmenetelmiä, joista kullakin saadaan parhaiten valmistettua tietynlaisia tuotteita. Polymeerikomposiittien kehityspotentiaali valmistus menetelmissä, sekä materiaaleissa on huomattavasti muita veneteollisuuden materiaaleja korkeampi, minkä ansiosta polymeerikomposiittien käyttö veneteollisuudessa ei tule vähentymään.

Lähteet

Barsotti, B., Gaiotti, M. & Rizzo, C.M. 2020. Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength. J. Marine. Sci. Appl. 19, 553–566 [Viitattu 4.4.2022]. Saatavissa: https://link.springer.com/article/10.1007/s11804-020-00171-1

Cabinetdoormart.com. [Cabinetdoormartin www-sivuilla]. Saatavissa: https://www.cabinet-doormart.com/blog/post/build-the-best-cabinets-for-your-boat

Clegg, N. A Short Guide to Osmosis & its Treatment. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.4.2022]. Saatavissa: http://www.anchormarinesurveys.com/wp-content/uploads/2018/03/osmosis3v6.pdf

Comprop. [Compropin www-sivuilla]. Saatavissa: http://comprop.com/

Dawson, D. 2006. Composites in Boat Accessories and Hardware. Compositesworld. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.4.2022]. Saatavissa: https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-boat-accessories-and-hardware

Epu Coat. [Epu Coatin www-sivuilla]. [Viitattu 7.4.2022]. Saatavissa: https://www.epu-coat.fi/

GMTcomposites. [GMTcompositesin www-sivuilla]. Saatavissa: https://gmtcomposites.com/

Hildebrand, M. 1997. Local impact strength of various boat-building materials. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 25.3.2022]. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/1997/P317.pdf

Hollaway, L. Green, G & Feely, C. 1994. Handbook of polymer composites for engineers. Cambridge, England: Woodhead Publishing.

Huang, X. 2009. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: https://www.mdpi.com/1996-1944/2/4/2369

John, M & Sabu, T. 2012. Composites. Cambridge: RSC Pub.

Johnson, T. 2018. A List of Composite Materials in Boats. ThoughtCo. [Viitattu 11.4.2022]. Saatavissa: https://www.thoughtco.com/composite-materials-in-boats-820410

Kivioja, K. 2016. Kielto ei pure lujitemuovia päätyy edelleen kaatopaikalle. Yle. [Viitattu 11.4.2022]. Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-8831043

Neşer, G. 2017. Polymer Based Composites in Marine Use: History and Future Trends. Procedia Engineering. Vol. 194. S. 19-24. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817332460#

OXYBLACK. [Oxyblackin www-sivuilla]. Saatavissa: https://www.oxyblack.com/index.php/en/composites/laminates-sandwiches

Rubino, F., Nistico, A., Tucci F. & Carlone P. 2019. Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.3.2022]. Saatavissa: https://www.mdpi.com/2077-1312/8/1/26/pdf

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M & Komppa, M. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M & Komppa, M. 2019. Komposiittirakenteet. [Komposiittirakenteet www-sivuilla]. saatavissa: https://www.lujitemuovi.fi/raaka-aineet/3-6-kerroslevyjen-ydinaineet/

Silver. [Silverin www-sivuilla]. [Viitattu 29.3.2022]. Saatavilla: https://www.silverboats.fi/tietoa-tuotteista/alufibre

Strong, A. 2008. Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications. Society of Manufacturing Engineers

Trafi 2021. Veneiden ensirekisteröinnit jatkaneet kasvuaan vuonna 2021 − onnettomuuksissa ei piikkiä. [Trafin www-sivuilla]. [Viitattu 29.3.2022]. Saatavissa: https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/veneiden-ensirekisteroinnit-jatkaneet-kasvuaan-vuonna-2021-onnettomuuksissa-ei

Tsouvalis 2015. Use of Fiber Reinforced Plastics in Ship Construction. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.4.2022]. Saatavissa: https://core.ac.uk/download/pdf/38467591.pdf

Upfront. [Upfrontin www-sivuilla]. Satavilla: https://info.upffront.com/en-gb/blog/sailboat-composite-standing-rigging-material-options

Yle 2010. Veneen ja laivan ero on veteen piirretty viiva. [Ylen www-sivuilla]. [Viitattu 18.4.2022]. Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-5568661

Yamarin. [Yamarinin www-sivuilla]. Saatavissa: https://cross.boats/fi