

Waltteri Forsbom ja Lauri Ahosola

KOMPOSIITTIEŒ OMINAISUUDET, SOVELLUTUKSET JA
TULEVAISUUS MERENKULUSSA

Merenkulun insinöörin koulutusohjelma
2018

KOMPOSIITTIIEN OMINAISUUDET, SOVELLUTUKSET JA TULEVAISUUS MERENKULUSSA

Forsbom Waltteri, Ahoosola Lauri
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Merenkulun insinöörin koulutusohjelma
Joulukuu 2018
Ohjaaja: Haapanen, Toni
Sivumäärä: 55
Liitteitä:

Asiasanat: Muovikomposiitti, Merenkulku, Komposiitti

Tässä opinnäytetyössä käytiin läpi muovikomposiittien perusrakenne, tärkeimmät valmistustavat, oleelliset ominaisuudet ja käyttökohteet. Työssä myös vertailtiin mahdollisuutta korvata nykyisiä merenkulussa käytettäviä metalleja komposiittirakenteilla tutkien niiden taloudellisuutta ja käytännöllisyyttä.

Monet sovellukset, joita käytiin työssä läpi ovat mahdollistuneet vasta lähiaikoina komposiittien korkeiden valmistus- ja materiaalikustannusten vuoksi. Työn aikana tutkittiin onko komposiittien käyttö taloudellisesti kannattavaa ja missä määrin nykyisiä merenkulussa käytettäviä materiaaleja voitaisiin niillä korvata, sekä säädösten, että ominaisuuksiensa puolesta.

Työn tarkoituksena oli saada kattava tietopaketti muovikomposiittien ominaisuuksista ja mahdollisuuksista, jotta asiasta kiinnostuneet löytäisivät tietoa helpommin.

PROPERTIES, APPLICATIONS AND FUTURE OF COMPOSITES IN MARITIME

Forsbom Waltteri, Ahosola Lauri

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences
Degree Programme in Maritime Engineering

December 2018

Supervisor: Haapanen Toni

Number of pages: 55

Appendices:

Keywords: Plastic composite, Maritime, Composite

This thesis examined the basic structure, the main manufacturing methods, the relevant properties and applications of plastic composites. The work also compared the possibility of replacing existing marine materials with composite structures, by studying their economy and practicality.

Many of the applications that have been studied through the thesis haven't become available until recently because of the high manufacturing and material costs of composites compared to current materials. During the work, it was examined whether the use of composites was economically viable and to what extent existing materials used in maritime transport could be replaced by examining both regulations and their properties.

The purpose of the thesis was to obtain a comprehensive information package on the properties and possibilities of plastic composites in order to find information more easily accessible to those interested.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	KOMPOSIITTIIEN KEHITYS	7
3	KOMPOSIITIT	8
3.1	MÄÄRITELMÄ.....	8
3.2	RAAKA-AINEET	8
3.2.1	LUJITTEET	8
3.2.2	MATRIISIT	12
3.2.3	TÄYTEAINEET	13
3.3	VALMISTUSMENETELMÄT.....	15
3.4	RAKENNEMAHDOLLISUUDET	22
4	NYKYISET SOVELLUTUKSET MERENKULUSSA	27
4.1	KAUPPALAIVAT	27
4.2	MERIVOIMAT	31
4.3	VAPAA-AJAN ALUKSET	33
5	KOMPOSIITTIIEN JA NYKYISTEN MATERIAALIEN VERTAILU	36
5.1	ISKU- JA RASITUSTEN KESTO	36
5.2	LÄMMÖNKESTO	38
5.3	KEMIALLINEN KESTÄVYYS	38
5.4	PAINOEROT	39
5.5	MATERIAALIHINNAT	39
6	KÄYTÄNNÖN MAHDOLLISUUDET	41
6.1	MITÄ KORVATTAVISSA KOMPOSIITEILLA	41
6.2	RAJOITTEET	41
6.3	BIOKOMPOSIITIT	42
6.4	RISKIT.....	43
7	TALOUDELLISUUS	44
7.1	HUOLTOMAHDOLLISUUDET- JA KUSTANNUKSET	45
7.2	KÄYTTÖIKÄ	47
7.3	RAKENTEIDEN JA JÄRJESTELMIEN HINTAEROT	47
7.4	POLTTOAINESÄÄSTÖT.....	48
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	50
	LÄHTEET.....	52

1 JOHDANTO

Valitsimme aiheeksemme muovikomposiittien ominaisuuksien, nykyisten ja mahdollisten lähitulevaisuuden käyttökohteiden tutkimisen. Vertailemme muovikomposiitteja nykyisin käytössä oleviin materiaaleihin ja käymme läpi komposiitin komponentit ja tärkeimmät valmistusmenetelmät.

Komposiitti tarkoittaa kahden tai useamman materiaalin yhdistelmää, jotka eivät kuitenkaan ole sulautuneena toisiinsa, tavoitteena tuoda materiaalien hyvät ominaisuudet esille.

Opintojemme aikana muovikomposiitit ovat jääneet todella vähälle huomiolle, vaikka se on iso ja kehittyvä osa merenkulkua ja sen teollisuutta. Siksi päätimme keskittää aiheemme muovikomposiitteihin ja niiden mahdollisuuksien tutkimiseen, tarkoituksenaamme kerätä kattava komposiittien tiedonlähde muille niistä kiinnostuneille.

Teräs on ollut vuosikymmeniä dominoiva materiaali laivanrakennuksessa ja sen väistyminen on hidasta sen todetun toimivuuden ja tuntemuksen johdosta. Nykyään kuitenkin polttoainekustannukset ja päästörajoitukset aiheuttavat tarpeen etsiä uusia ratkaisuja niiden vähentämiseksi. Komposiittien keveys on suuri etu verrattuna teräkseen ja se tulee esiin niin polttoainekustannuksissa kuin mahdollisissa lastimäärissä.

Teräksen suurimpia heikkouksia on alttius korroosiolle vaatien pinnoitusta ja sen ylläpitoa. Korroosion- ja säänkestonsa ansiosta komposiitin käyttöikä on huomattavasti terästä pidempi, josta seuraa matalammat huolto- ja kunnossapitokustannukset ja pidempi elinkaari.

Työelämässämme tulemme kohtaamaan monia komposiittisovelluksia, joiden kanssa toimiessa tulisi tietää perusasiat tästä lujitemuovista. Toivomme opinnäytetyömme aikana oppivamme enemmän sen työstöstä, ominaisuuksista ja käsittelystä ja sen antavan myös lukijoille tietoa ja ymmärrystä materiaalista.

Tutkimusote opinnäytetyössä on suureksi osaksi konstruktivistista vertaillen materiaaleja ja tekniikoita toisiinsa. Opinnäytetyön teon aikana hyödyllisen ja luotettavan tiedon löytäminen oli välillä haastavaa. Pyrimme saamaan tietoa kirjallisuudesta, internetistä löytämistämme tutkimuksista ja artikkeleista, alan

eri yrityksiltä sähköpostitse, sekä haastatteluilla Wenda Oy:ltä. Muovikomposiitit ovat niin tutkimatonta alaa meriteollisuuden näkökulmasta, että opinnäytetyömme kannalta sopivia ja ajantasalla olevia tutkimuksia oli vaikeaa löytää. Yhdistelimme tietoja ja tuloksia eri tutkimuksista ja lähteistä, joiden perusteella teimme päätelmiä.

2 KOMPOSIITTIEEN KEHITYS

Ensimmäiset komposiitit tulivat käyttöön yli 5000 vuotta sitten, kun Mesopotamiassa puusuikaleita liimattiin eri kulmissa yhteen muodostaen vaneria. 1500 eaa. Egyptissä ja Mesopotamiassa sekoitettiin olkia ja savea keskenään, joiden seoksesta rakennettiin tiiliä, keramiikkaa ja veneitä. Oljet toimivat tämän varhaisen komposiitin lujiteosana ja savi matriisina. [1]

Ensimmäiset synteettiset polymeerimatriisit kehitettiin 1900-luvun alussa, joihin kuuluivat vinyylit, polystyreenit, fenolit ja polyesterit. vuonna 1935 kehitettiin lasikuitulujite ja muovikomposiittien teollistumisen alkoi. Vuotta myöhemmin tyydyttymättömät polyesterit patentoitiin matriiseina ja ne ovat nykyäänkin dominoivassa asemassa. [1]

Vielä nykyäänkin käytössä oleva muovikomposiittien valmistusmenetelmä ahtopuristus kehitettiin 1940-luvulla. 50-luvun aikana valmistusmenetelmät kehittyivät ja käyttöön tulivat pultrusio, kalvoinjektio ja suuren mittakaavan kuitukelaus.

Hiili- ja aramidikuidut kehitettiin 1960-luvulla ja tulivat nopeasti kaupalliseen käyttöön. Merenkulku oli 60-luvulla suurin komposiittien kuluttaja/käyttäjä kunnes autoteollisuus ohitti sen 70-luvulla. Komposiittien leviäminen lentokone-, rakennus- ja lääketieteellisuuteen tapahtui nopeasti tämän jälkeen. [1]

3 KOMPOSIITIT

3.1 MÄÄRITELMÄ

Komposiitti tarkoittaa kahden tai useamman materiaalin yhdistelmää, jossa materiaalit toimivat yhdessä mutta eivät ole sulautuneet toisiinsa, tavoitteenaan tuoda niissä käytettyjen materiaalien hyvät ominaisuudet esiin ja minimoida huonot.

Komposiitit jaetaan pääsääntöisesti kolmeen pääryhmään, jotka ovat metalli-, keraami- ja muovikomposiitit. Komposiitit muodostuvat vähintään yhdestä matriisi- ja lujiteosasta. Matriisi on komposiitin yhdessä pitävä osa, joka myös siirtää komposiittiin kohdistuvat rasitukset lujitekuiduille. Muovikomposiiteissa matriisit ovat kesto- tai kertamuoveja, joita ovat esimerkiksi polyesterit, epoksit ja vinyylesterit. [3]

Lujitteiden tehtävä komposiitissa on parantaa muovien mekaanisia ominaisuuksia ja vastaanottaa siihen kohdistuvat rasitukset ja kuormitukset. Muovikomposiiteissa yleisimmät lujitteet ovat lasi-, hiili- ja aramidikuidut. Komposiittien ominaisuuksia voidaan muokata väliaineilla ja materiaali- ja rakenneratkaisuilla. [3] (74)

3.2 RAAKA-AINEET

3.2.1 LUJITTEET

Lujitteet ovat komposiitin rasitusten ja kuormitusten vastaanottava osa. Sen rakenne- ja materiaaliratkaisuilla voidaan minimoida tarvittava materiaalmäärä tietyissä voimaolosuhteissa ja käyttötarkoituksissa. Lujitteet jaetaan muovikomposiiteissa kolmeen pääryhmään: lasi-, hiili- ja aramidikuituihin.

Lasikuitu on näistä kolmesta käytetyin ja edullisin. Nykyisin käytettyjä yleisimpiä lasikuitutyyppejä ovat E-, C-, R- ja S-lasit. E-lasi kattaa 99% kaikista valmistetuista lasikuiduista. Niillä on hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä hyvä kemiallinen kestävyys. C-lasityyppiä käytetään, kun tarvitaan parempia happamuuden ja korroosion kestäviä tuotteita. R- ja S-lasien vetolujuus, kimmokerroin ja erityisesti lämmönkestävyys ovat E-lasia paremmat. Niiden käyttö on rajoittunut enimmäkseen lentokoneiteollisuuteen kalliin hinnan takia. [3] (74-75)

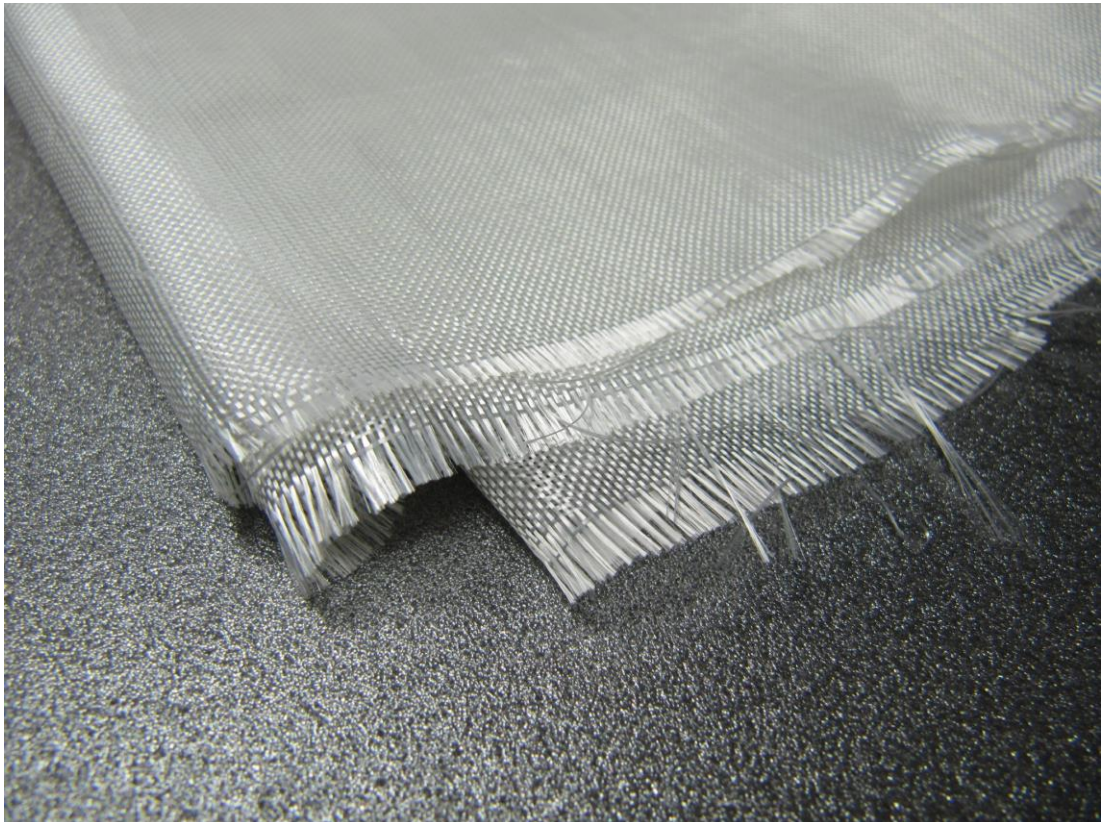
Hiilikuidulla tarkoitetaan ainetta, jonka hiilipitoisuus on 95-99 p%. Kaikki kerta- ja kestopuovut voidaan lujittaa hiilikuiduilla. Hiilikuiduilla on suuri lujuus- ja jäykkyyspainosuhte ja muita mainittavia ominaisuuksia ovat erinomaiset veto-, puristus- ja taivutuslujuudet, kimmoisuus murtorajaan asti, kemiallinen reagoimattomuus sekä sähkön- ja lämmönjohtavuus. [3] (80-81)

Aramidikuiduilla tarkoitetaan aromaattisia polyamidikuituja. Niiden käyttö lujitemateriaalina muihin lujitteisiin verrattuna on rajoittunutta moninkertaisen hintansa vuoksi. Aramidikuiduilla vetomurtolujuus ja kimmomoduli ovat orgaanisia lujitekuituja merkittävästi suuremmat, mutta niiden käyttöä vaikeuttaa rajoittunut matriisien käyttö aramidin huonojen tartuntaominaisuuksiensa vuoksi. Aramidikuidut ovat palamattomia ja korkeita lämpötiloja, orgaanisia liuotteita, poltto- ja voiteluaineita kestäviä. [3] (89)

Monesti aramidikuitua käytetään muiden lujitteiden rinnalla tuomassa rakenteelle alhaisempaa painoa, huomattavaa iskunkestävyyttä ja sitkeyttä. Kevlar on tunnettu aramidikuitujen tuotenimi. [3] (91)

Taulukko 3.1 Lujitekuitujen taulukkoarvoja

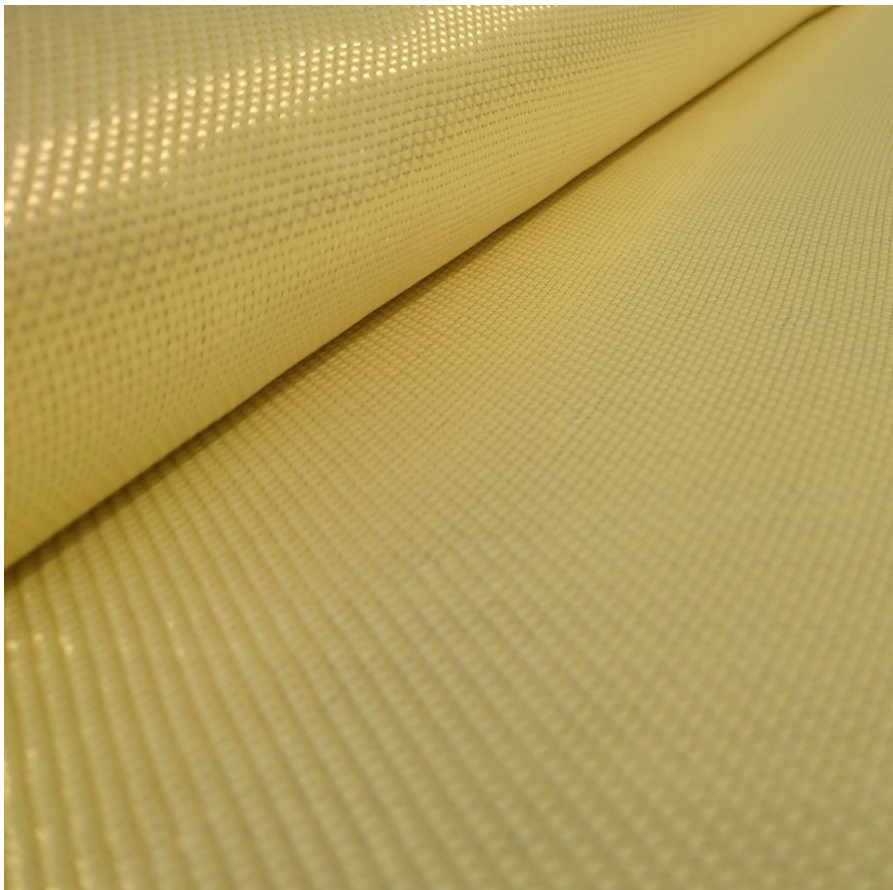
	Vetolujuus (MPa)	Kimmomoduli (GPa)	Murtovenymä (%)	Tiheys (g/cm ³)
Lasikuitu	2400-3700	69-86	6-9	2,7
Hiilikuitu	2000-5000	160-800	0,5-2	1,8-2
Aramidikuitu	3100-3600	60-180	3,5	1,4
Pellava	345-1050	27,6	2,7-3,2	1,5
Hamppu	690	70	1,6	1,47
Puuvilla	287-800	5,5-12,6	7-8	1,5-1,6



Kuva 3.1 Lasikuitumatto [36]



Kuva 3.2 Hiilikuitumatto [37]



Kuva 3.3 Aramidikuitumatto [30]

3.2.2 MATRIISIT

Matriisilla tarkoitetaan komposiitin lujiteosan yhteensitovaa osaa, jonka tehtävänä on myös siirtää komposiittiin kohdistuvat voimat ja jännitykset lujitekuituihin. Matriisit ovat useimmiten valmistettu kertamuoveista, joista yleisimmät ovat polyesterit, vinyylesterit ja epoksit.

Polyesterihartsit muodostuu polyesterin ja styreenin seoksesta. Polyesterit ovat käytetyimpiä matriiseja pääosin edullisen hintansa vuoksi. Polyestereitä käytetään lähinnä lasikuidun matriisina rajoittuneiden ominaisuuksiensa johdosta. Polyesterihartsien kanssa käytettävät kovetteet ovat aina orgaanisia peroksiedeja, jotka toimivat initiaattorina silloittumisreaktiolle eli kovettumiselle. [3] (37)

Vinyylesterihartsit muistuttavat työstöominaisuuksiltaan polyesterihartseja, loppuominaisuuksiltaan epoksihartseja ja sisältävät polyesterihartsin tavoin styreeniä. Vinyylestereiden hyviä ominaisuuksia ovat sitkeys, lämmönkesto, kemiallinen kestävyys sekä vahvoille emäksille että hapoille. Niiden tartunta- ja kostutusominaisuudet ovat kaikkiin lujitteisiin hyvät, ja kovetus on mahdollista tavanomaisilla kovetteilla. Suurimpia vinyylestereiden käyttökohteita ovat prosessiteollisuuden korroosion kestävät laitteet. Vinyylesterihartsit kovetetaan samalla menetelmällä kuin polyesterihartsit. [3] (44-45)

Epoksit ovat ominaisuuksiltaan parempia kuin vinyyli- tai polyesterit, mutta hinnaltaan huomattavasti kalliimpia. Hyvien tarttumisominaisuuksiensa ansiosta epokseja voidaan käyttää matriisina minkä tahansa lujitekuidun kanssa. Lopputuotteen ominaisuuksien kannalta ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää käyttää epokseja lasikuidun kanssa, ja lujitteina käytetäänkin yksinomaan jatkuvakuituisia lujitteita. Epokseja käytetään, kun halutaan hyvät mekaaniset ominaisuudet tuotteelle, kuten hyvät väsymisominaisuudet ja erinomainen kemiallinen- ja lämmönkesto. Epoksien käyttö jaetaan yleiskäyttöön, sähkö-, avaruus- ja lentokoneteollisuuteen ja liimoihin. Epoksien kovetteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat joko

emäksiä tai happoja. Kovetteen ja hartsin suhde on sekoitettaessa tarkka, jottei matriisiin jää kovettumatonta materiaalia huonontaan siten kappaleen ominaisuuksia. [3] (45-48), [4]

Komposiitteja valmistettaessa hartsiin sekoitetaan kovete, mikä aiheuttaa sen kovettumisen lujitteen ympärille kolmessa vaiheessa, jotka ovat hyytyminen, kovettuminen ja jälkikovettuminen. Hartsin työstöaika määräytyy hyytymisajan eli geeliajan mukaan, joka riippuu valitusta matriisi ja kovete yhdistelmästä. Tätä seuraa kovettuminen, jolloin kovete ja matriisi reagoivat keskenään luoden kovalenttisiä sidoksia, mikä vapauttaa lämpöä ja nopeuttaa kovettumista entisestään. Hartsin täydellinen kovettuminen saavutetaan jälkikovetuksella tavallisimmin 60-120°C lämpötilassa. Täysin kovettunut hartsi on käytännössä vain yksi molekyyli, sillä sen molekyyliketjut ovat kytkeytyneet toisiinsa silloittumisreaktiossa. [3] (41-47)

Taulukko 3.2 Matriisien taulukkoarvoja [3](37)

Matriisit	Vetolujuus Mpa	Lämmönkestävyys C	Palavuus	Kemiallinen kestävyys	Muottikutistuma	Hinta
Polyesteri	50-70	120-180	Helposti palava	Hyvä	Korkea	Halpa
Vinyyliesteri	50-70	120-180	Helposti palava	Erinomainen	Alhainen	Kallis
Epoksi	50-70	120-180	Helposti palava	Hyvä	Alhainen	Kallis
Polyimidi	>70	180-300	Huonosti palava	Hyvä	Alhainen	Hyvin kallis

3.2.3 TÄYTEAINEET

Täyteaineita sekoitetaan muoveihin tarkoituksena muokata komposiitin ominaisuuksia haluttuun suuntaan. Tarkoituksena on usein tilavuuden tai tiheyden muuttaminen ja kustannusten laskeminen. Niillä voidaan myös vaikuttaa tuotteen jäykkyyteen, muovin viskositeettiin, lämmön- ja

sähkönjohtavuuteen ja kemialliseen kestävyys. Täyteaineiden käyttö on yleisimmin kohdistunut kestumuoveihin. Nykyään niiden ominaisuuksia voidaan muokata ja soveltaa lähes jokaiseen käyttötarkoitukseen sopivaksi.

Markkinoilla on satoja erilaisia täyteaineita ja 2000-luvun alussa 65% käytetyistä täyteaineista oli magnesium- ja kalsiumkarbonaatteja. Täyteaineet voidaan jakaa viiteen ryhmään partikkelimuotonsa perusteella; pallo-, kuutio-, lohkar-, hiutale- ja kuitutäyteaineisiin.

Pallomaisilla täyteaineilla on ensisijaisesti tarkoituksena korvata matriisimuovia ja sitä kautta kustannuksia, mutta niillä on riippuen pallojen koosta, tyypistä ja materiaalista myös parantavia vaikutuksia palon-, savukaasun- ja säänkestoon sekä lopputuotteen pinnan laatuun. Ominaista pallomaisille täyteaineille on myös lämmön- ja sähköneristykseen parantuminen. Pallomaiset täyteaineet ovat joko umpinaisia tai onttoja ja ne ovat valmistettu lasista, hiilestä, polymeereistä, lentotuhkasta tai keraameista.

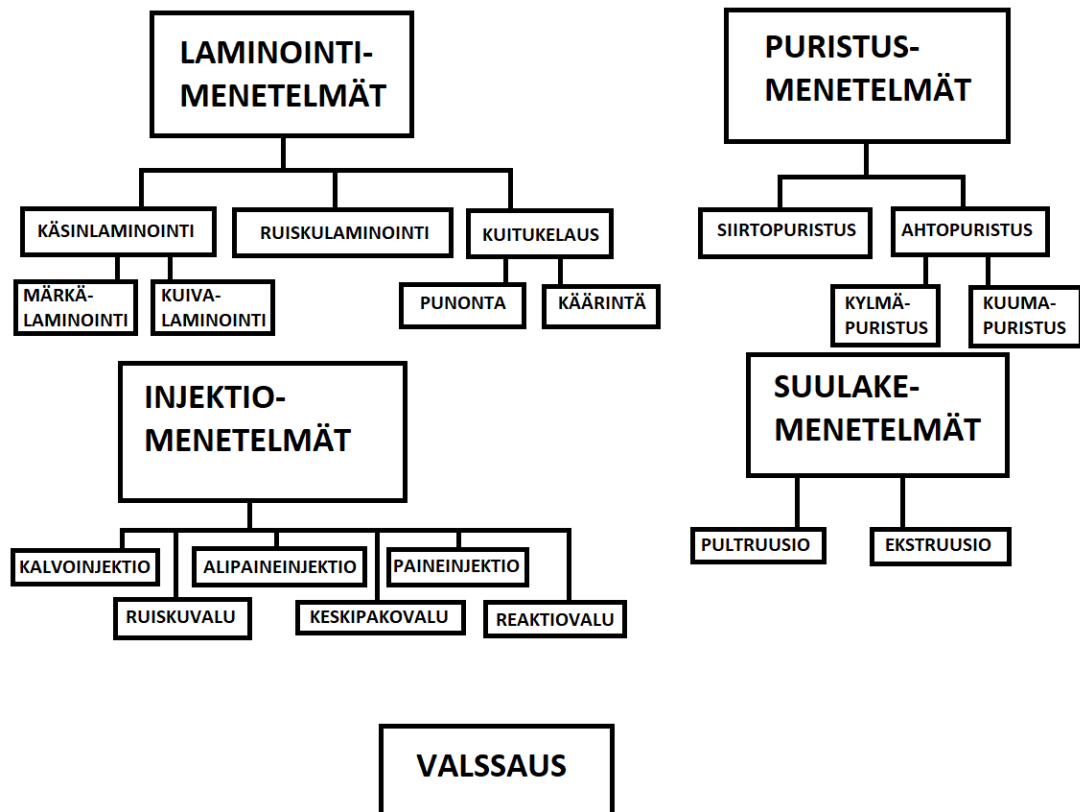
Kuitumaisilla täyteaineilla on myös lujittava vaikutus, erityisesti vetomurtolujuudessa muotonsa ansiosta. Mineraalitäyteaineista asbestilla ja wollastonitilla on ainoat kuitumaiset partikkelit. Asbestin käyttö on lopetettu terveyshaittojen takia. Myös tavanomaisia lujitekuituja voidaan käyttää täyteaineina.

Kuutio- ja lohkaremallisia täyteaineita ovat esimerkiksi karbonaatit, maasälpä, ja raskassälpä. Kalsiumkarbonaattia käytetään täyteaineista eniten johtuen sen edullisesta hinnasta, laajimmasta partikkelikokoalikoimasta, hyvästä sekoittumiskyvystä muovin kanssa, myrkyttömyydestä ja komposiitin lämmönkestävyyden parantamisesta. Heikkoina puolina kalsiumkarbonaatilla on huono haponkestävyys ja matala lujittava vaikutus.

Hiutalemallisia täyteaineita ovat esimerkiksi kaoliini, talkki ja kilteet. Kaoliini parantaa komposiitin pinnan laatua ja estää kuitujen näkymisen ja hiushalkeamien muodostumisen. [3] (57-65)

3.3 VALMISTUSMENETELMÄT

Komposiittien valmistusmenetelmät jaetaan viiteen eri ryhmään: laminointimenetelmiin, puristusmenetelmiin, injektioihin, suulakemenetelmiin ja valssaukseen. Niitä on muokattu ja yhdistetty tilanteen mukaan. [3] (153)



Kuva 3.4 Lujitemuovien valmistusmenetelmien jaottelu [3](153)

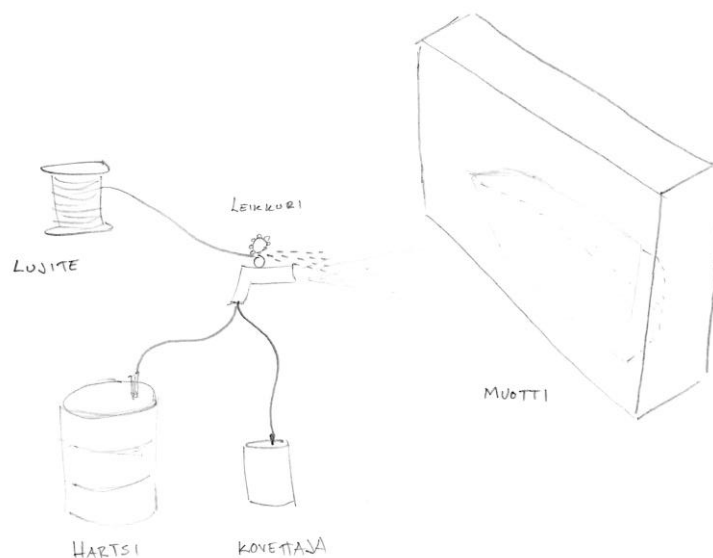
Laminointimenetelmissä laminaatti asetetaan kerroksittain muottiin ja kovetetaan yli- tai alipaineella tai ilman ulkoista painetta. Laminointimenetelmiä ovat käsinlaminointi, ruiskulaminointi ja kuitukelaus.

Käsinlaminoitaessa edullinen kilohinta ja kohtuulliset lujuus- ja jäykkyysominaisuudet saavutetaan käyttämällä lasikuitua katkokuituna tai rovingina eli punottuna mattona. Käsinlaminoinnin etuja ovat matalat muottikustannukset ja laiteinvestoinnit, mahdollisuus valmistaa suuriakin kappaleita taloudellisesti ja helppo lujitemuotojen ja lisävahvistusten käyttö. Haittapuolina on, että käsinlaminointi ei sovellu suurien lopputuotesarjojen

valmistukseen, sillä työn osuus on suuri ja se on hidasta. Valmistus vaatii hyvän ilmastoinnin ja lopputuotteen laatu riippuu työntekijän ammattitaidosta.

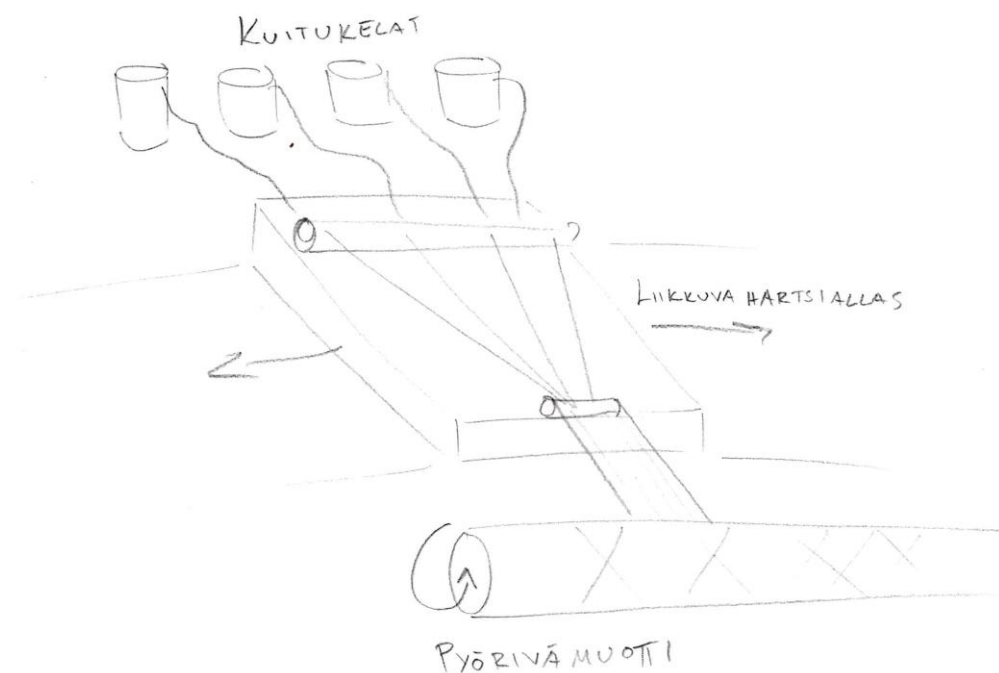
Käsinlaminoidaessa muotin päälle levitetään ensin irroitussaine, jotta lopputuote saadaan muotista vaivatta irti. Sen jälkeen lujitekuitu asetetaan muottiin, kostutetaan hartsilla ja poistetaan ilma käsin telalla. Lopuksi kovettunut kappale irroitetaan, viimeistellään ja maalataan.

Ruiskulaminoinnissa lujite ja hartsia ruiskutetaan muotin pinnalle. Ruiskutuspuistoolissa rovinkeijute katkotaan sisällä olevan leikkurin avulla halutun mittaisiksi katkokuiduiksi, jonka jälkeen hartsia ja katkokuidut ruiskutetaan yhdessä muottiin. Ilmanpoisto tapahtuu telalla aivan kuten käsinlaminoidaessakin. Ruiskulaminointi soveltuu käsinlaminointiin verrattuna paremmin suurempien sarjojen valmistukseen moninkertaisen tuottavuutensa vuoksi. Ruiskulaminoinnissa käytetään lähes poikkeuksetta polyesteriä matriisina ja lasikuiturovinkia lujitteena.



Kuva 3.5 Ruiskulaminointimenetelmä [Oma piirros]

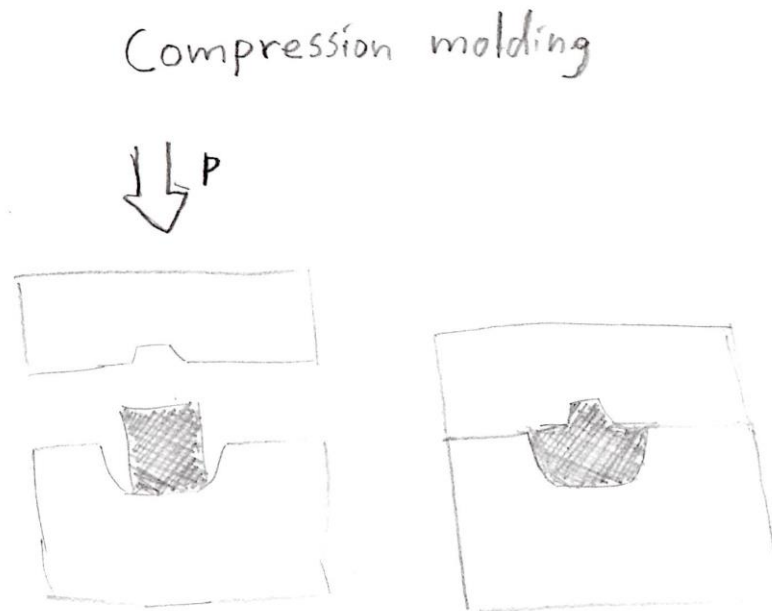
Kuitukelausta käytetään sylinterimäisten tai kartiomaisten kuorien valmistamiseen. Kuidut johdetaan altaaseen, jossa ne kostutetaan hartsiin ja johdetaan siitä pyörivälle muotille. Kun muotin ympärillä on tarpeeksi hartsilla kostutettua lujitetta, sen annetaan kovettua muotille tai siirretään muotteineen kovetusuuniin. Lujitteena käytetään kuitukelauksessa lasikuitua rovinkina, katkokuitumattona, pintahuopana tai kudoksena. Kuitukelauksen ominaisuudet voivat vastata prepreg- laminoinnilla ja autoklaavikovetuksella saavutettuja arvoja, sillä kelauksen lujitteet ovat jatkuvia ja suunnattuja.



Kuva 3.6 Kuitukelauksen periaate [Oma piirros]

Puristusmenetelmiä on kahdenlaisia, siirtopuristus- ja ahtopuristusmenetelmä, joista on erilaisia muunnoksia. Siirtopuristuksessa komposiitin ainesosat lämmitetään sylinterissä, josta se männän avulla puristetaan muottionkaloon jopa 200 baarin avulla.

Ahtopuristuksessa raaka-aineet asetellaan avattuun muottiin, muotti suljetaan ja puristetaan hydraulisesti, jolloin aine leviää muottiin tasaisesti muottionkalon mukaiseksi.

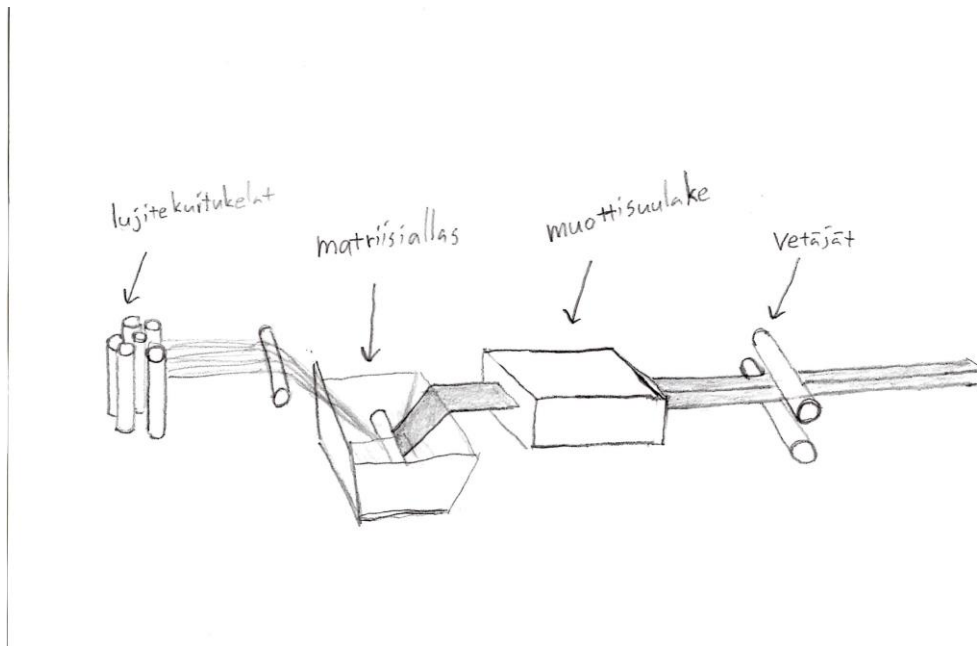


Kuva 3.7 Ahtopuristuksessa materiaali puristetaan hydraulisesti muottiin. [Oma piirros]

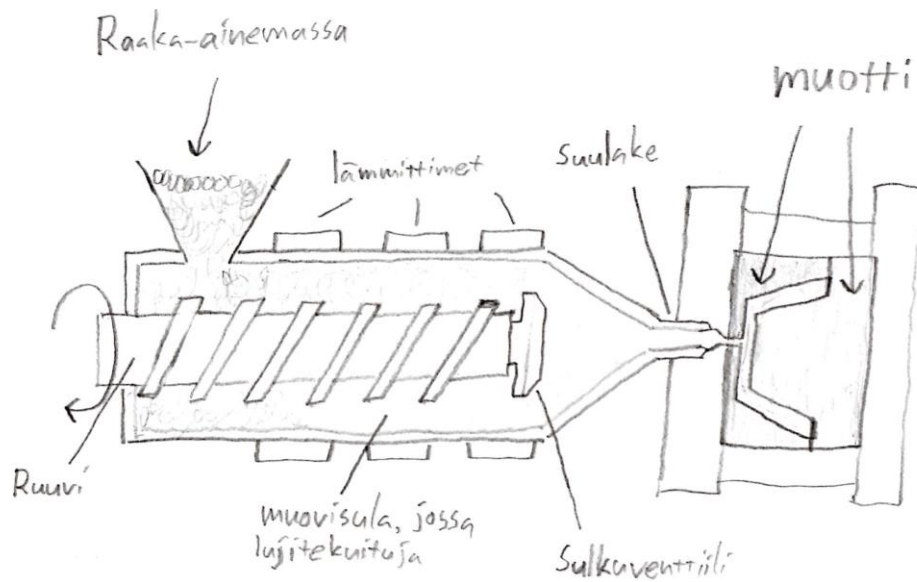
Suulakemenetelmiä on kaksi, jotka ovat pultruusio ja ekstruusio. Nämä ovat yleisiä kestopuovien valmistusmenetelmiä, joita sovelletaan myös komposiittien valmistukseen. Pultruusiossa vedetään kostutettu lujitekuitu muottisuulakkeen läpi, jolloin saadaan tuotettua haluttu profiili ja tarvittaessa hyvinkin pitkiä ja leveitä kappaleita. Raaka-aineena on yleensä lasikuitua rovinkina, katkokuitumattona ja kudottuna tai pintahuopana, mutta menetelmään soveltuvat myös hiili- ja aramidikuidut. Yleisin hartsi on polyesteri, sillä se on edullista ja sen avulla saavutetaan suurin tuotantonopeus. Epokseja voidaan käyttää parempia lujuusominaisuuksia haettaessa tai fenoleja lämmön- ja palonkestoa tarvittaessa. Pultruusio

soveltuu parhaiten suurille tuotantomäärille, sillä käynnistuskustannukset ovat korkeat.

Suulakepursotuksessa eli ekstruusiossa raaka-aineet siirtyvät syöttösuppilon kautta ruuville, joka pyöriessään kuumentaa ja siirtää tasaisesti sekoittuneen massan suulakkeen läpi. Menetelmää käytetään putkien, kalvojen ja letkujen valmistukseen. Raaka-aineena käytetään yleisimmin lyhytkuituista kestumovigranulaattia. Tällä menetelmällä valmistettujen tuotteiden mekaaniset ominaisuudet ovat pultruusiotuotteita selvästi heikkommat.

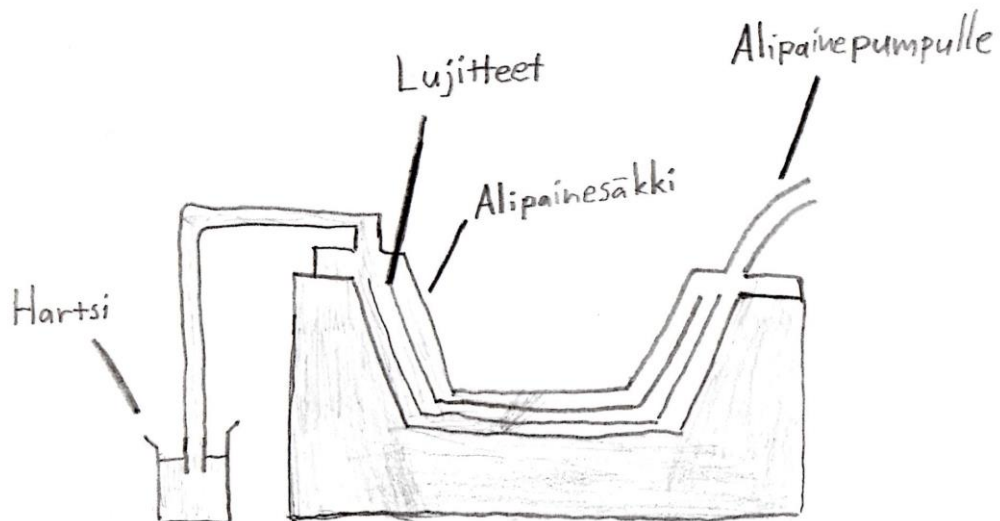


Kuva 3.8 Pultruusiomenetelmä [Oma piirros]



Kuva 3.9 Ekstruusion läpileikkaus [Oma piirros]

Painevalu- eli injektio menetelmissä matriisi ja lujite johdetaan muottiin paineella tai valaen. Paine- ja alipaineinjektiossa sulaa matriisi syötetään muotissa olevien lujitteiden sekaan yli- tai alipaineella. Käsins laminointiin verrattuna painevalumenetelmät ovat nopeampia ja laatu tasaisempaa. Prosessit ovat suljettuja, joten työympäristöön ei haihdu terveydelle haitallisia aineita. Riippuen yli- ja alipaineinjektio menetelmästä voidaan lujitteina käyttää lasi-, hiili- tai aramidikuituja mattoina ja kudottuina. Polyesterihartsia on yleisin hartsimateriaali, mutta sen ohella käytetään epokseja ja vinyylieistereitä erityisesti kudottujen lujitteiden kanssa.



Kuva 3.10 Alipaineinjektio menetelmä. [3](167)

Ruiskuvalutekniikka on yksi käytetyimmistä kestopuovien valmistusmenetelmistä, mutta sitä käytetään myös lujitettujen kesto- ja kertamuovien valmistuksessa. Matriisi on lähtövaiheessa yleisimmin granulaattina eli muoviryneinä, joka syöttösuppilon kautta siirretään ruiskuvalukoneen ruuville, josta ruuvi siirtää lämpenevän granulaatin eteenpäin ruiskutusta varten. Ruuvin edessä oleva suutin syöttää pehmeän massan muottiin 40-200 baarin paineella, riippuen muotin monimutkaisuudesta ja matriisimateriaalista. Kappale kovettuu puolesta minuutista kahteen. Tekniikkaa käytetään pienten ja muodoiltaan vaihtelevien lujitettujen tuotteiden valmistukseen suurissa erissä. Menetelmällä saadaan korkeat kimmo- ja lujuusarvot, hyvä lämmönkesto tai alhainen lämpölaajeneminen samalla lisäten pitkäkestoisuutta staattisessa ja dynaamisessa kuormituksessa.

Valssauksessa lujite ja hartsii muotoillaan kalvojen välissä levyksi ja kovetetaan lämmöllä. Valssausmenetelmällä valmistetaan paneeleja, kerroslevyjä ja suoria laminaatteja. Jotta tuotanto on taloudellisesti kannattavaa, on tuotteiden määrän oltava korkea, sillä tuotantolaitteet vaativat suuria investointeja. [3] (153-191)

3.4 RAKENNEMAHDOLLISUUDET

Komposiittirakenteen suurena etuna on mahdollisuus valmistaa kookkaita ja hyvinkin vaikean muotoisia kappaleita. Mitä paremmin kohdistuvat kuormitukset tunnetaan, sitä optimaalisempi komposiitti voidaan valmistaa materiaali- ja rakennemuotovalinnoilla sekä kohdistamalla lujitekuituja. Kokonaisuudesta pyritään saamaan liitosten määrä mahdollisimman pieneksi eli kappaleen tulisi sisältää mahdollisimman vähän osia, jotta kustannusten ja rakenteen massa saadaan mahdollisimman alhaiseksi.

Laminaatteja yhdistetään toisiinsa joko mekaanisesti tai liimaamalla muodostaen kerroslevyjä. Liimauksen etuna on tiiviys, keveys ja jännitysten tasainen jakautuminen. Mekaanisilla liitoksilla vahvuutena taas ovat toimintavarmuus, tarkastettavuus, yksinkertainen purku ja kokoaminen, toisin kuin liimaliitoksella, joka ei ole purettavissa. [3] (221, 272)

Kerrossuuntauksien avulla voidaan saavuttaa tarvittavaan suuntaan kohdistetut veto-, puristus- ja leikkauslujuudet. Kerrossuunnattu kappale muodostuu yhdensuuntaisista lujitekuitukerroksista, jotka ovat keskenään erisuuntaisia. Ne suunnataan lujuuslaskelmien pohjalta suuntiin, joilla saavutetaan tarvittavat mekaaniset ominaisuudet. Useimmat laminaatit ovat kerrossuunnattuja, koska niin saavutetaan tasaisemmat lujuusarvot joka suunnasta. Tavallisimpia ovat 0° -, 90° ja $\pm 45^\circ$ -suuntauksia sisältävät laminaatit. [3] (244-248)

Taulukko 3.3 Kerrossuunnattujen 0°/90°-ristikkäislaminaattien taulukkoarvoja lujitepitoisuuden ollessa 60-t% [3] (247)

	E-lasi /epoksi	SM-hiilikuitu /epoksi	Kevlar49 /epoksi
Kimmomoduli GPa	27,7	66,8	40,5
Liukumoduli GPa	5	5	2
Poissonin vakio	0,11	0,04	0,05
Vetovaurioraja MPa	98	335	185
Vetovauriovenymä %	0,35	0,5	0,45
Vetomurtoraja MPa	555	805	700
Vetomurtovenymä %	2,4	1,3	1,9
Puristusvaurioraja MPa	337	535	135
Puristusvauriovenymä %	1,2	0,8	0,33
Puristusmurtoraja MPa	460	535	135
Puristusmurtovenymä %	1,3	0,8	0,34
Leikkausvaurioraja MPa	80	80	40
Leikkausvauriovenymä %	1,6	1,6	2
Leikkausmurtoraja MPa	80	80	40
Leikkausmurtovenymä %	1,6	1,6	2

Taulukko 3.4 Yhdensuuntaislaminaattien taulukkoarvoja lujitepitoisuuden ollessa 60-t% [3] (243-244)

	E-lasi /epoksi	SM-hiilikuitu /epoksi	Kevlar49 /epoksi
Kuormitus 0° suunnassa			
Kimmomoduli GPa	45	125	75
Vetolujuus MPa	1100	1600	1400
Vetomurtovenymä %	2,4	1,3	
Puristuslujuus MPa	675	1000	250
Puristusrurtovenymä %	1,5	0,8	
Poissonin vakio	0,3	0,3	0,34
Kuormitus 90° suunnassa			
Kimmomoduli GPa	10	8	5,5
Vetolujuus MPa	35	40	25
Vetomurtovenymä %	0,35	0,5	
Puristuslujuus MPa	120	220	100
Puristusrurtovenymä %	1,2	2,8	
Poissonin vakio	0,067	0,019	0,025
Leikkaus 0°/90° suunnassa			
Liukumoduli GPa	5	5	2
Leikkauslujuus MPa	60/80	80	40

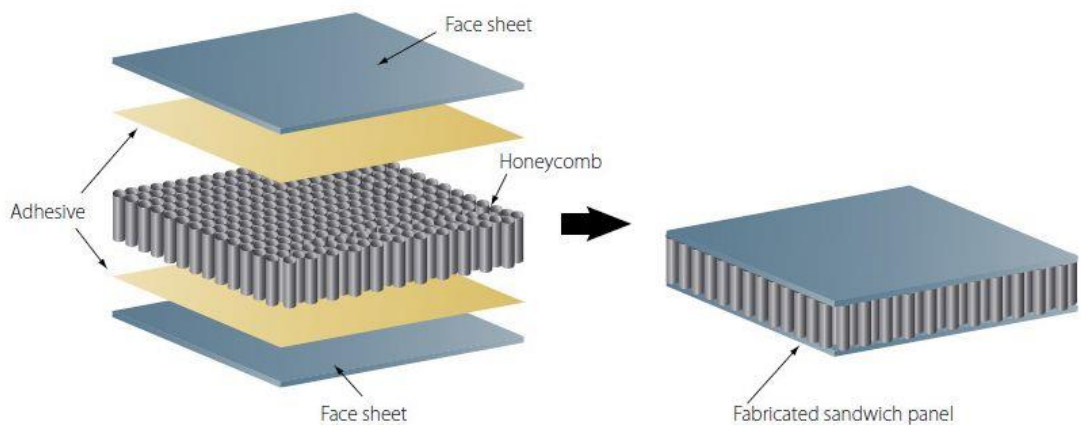
Taulukoista voidaan todeta kerrossuunnattujen laminaattien olevan tasapainoisempia kuin yhdensuuntaislaminaatit lujuusominaisuuksien suhteen. Taulukon 3.3 ristikkäishiilikuitulaminaatin vetolujuus kuitujen suunnassa on 805 MPa ja vastaavan yhdensuuntaislaminaatin kuitujen suuntainen lujuus on 1600 MPa, mutta kohtisuoralujuus vain 40 MPa.

Kerroslevy eli sandwich- rakenne on yksinkertaisuudessaan kaksi laminaattia, joiden välissä on ydinaine lisäämässä kappaleen paksuutta ja sitä kautta jäykkyyttä ja keveyttä. Yleisimmin ydinaineet ovat solumuoveja, kuten polyvinyylikloridi (PVC), polyuretaani (PUT) ja polystyreeni (PS), jotka eristävät

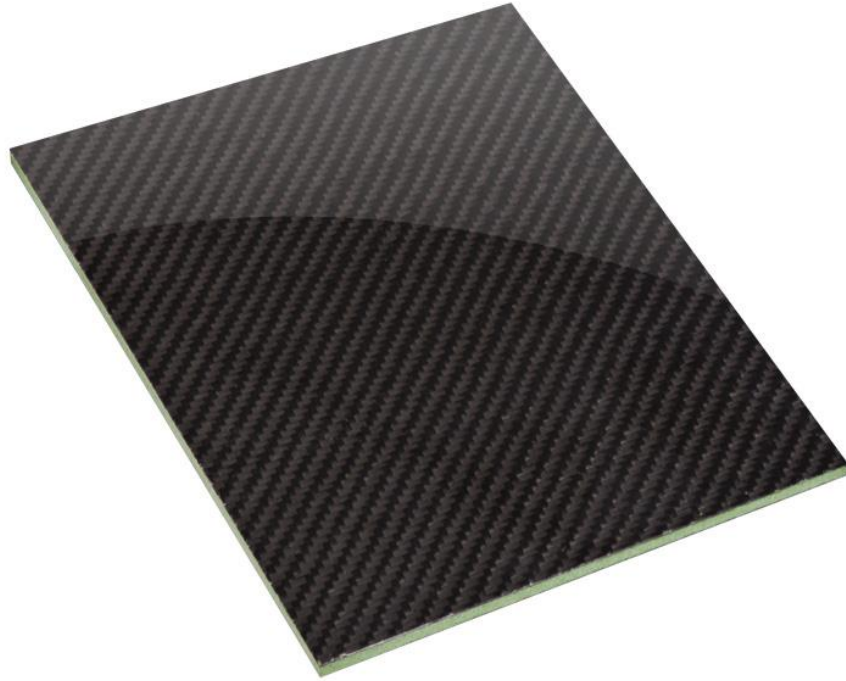
hyvin lämpöä ja ovat suhteellisen halpoja. Alumiiniset tai kuitulujitetut kennot ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan parhaita ydinaineita, mutta ne ovat kalliita ja niiden työstö on hankalaa. Balsa on yksi orgaanisista käytetyistä ydinaineista, joka sopii hyvin sandwich-rakenteen ydinaineeksi. Sillä on korkea jäykkyys- ja sitkeys-painosuhte, hyvä palonkestävyys, laaja käyttölämpötila ja huomattava väsymiskestävyys ja äänen- ja lämmöneristysominaisuus. [5] [3] (105-110)

Taulukko 3.5 Väliaineiden taulukkoarvoja [3] (114-115)

Ydinaineet	Polyuretaani Kapex C50.60	Silloitettu PVC	Balsa
Tiheys kg/m ³	60	30-400	90-220
Puristuslujuus MPa	0,45	0,2-11	5,4-21,9
Puristusmoduli MPa	25	26-1000	1850-6840
Vetolujuus MPa	0,55	0,7-12	7-20,6
Kimmomoduli MPa	10	20-469	1,6-4,5
Leikkauslujuus MPa	0,45	0,3-7,4	96-237
Liukumoduli MPa	5	11-195	100-300
Lämmönkesto C°	140	65-120	163



Kuva 3.11 Sandwich rakenne hunajakennolla. [33]



Kuva 3.12 Hiilikuitulaminaatti [35]

4 NYKYISET SOVELLUTUKSET MERENKULUSSA

Komposiittirakenteita käytetään lähes kaikilla tekniikan aloilla. Komposiiteista valmistettiin veneitä sarjatuotantona jo 1940-luvulla, koska sekä hinta, että ylläpitokustannukset laskivat huomattavasti ja ne olivat keveitä, mutta kuitenkin tarpeeksi lujia ja jäykkiä. Nykyisin lähes kaikki huvi-, kilpa- ja purjeveneet tehdään kuitulujitetusta muovista. Komposiittien käyttö merivoimien ja kauppa-alusten keskuudessa on myös yleistynyt ja yleistyy edelleenkin. [3] (436-437)

4.1 KAUPPALAIVAT

Monet uudet ja vanhat innovaatiot ovat mahdollistuneet komposiittien ansiosta. Roottoripurje kehitettiin jo 1900-luvun alussa, mutta sen kannattavuus on noussut materiaalien kehityttyä ja ympäristövaatimusten tiukennuttua lähivuosina. Ympäristövaatimusten seurauksena myös rikkipesurit kehitettiin ja asetettiin pakollisiksi käytettäessä korkearikkistä polttoainetta. Rikkipesurien merivesiputket ovat lähes poikkeuksetta lasikuitua tai ruostumatonta terästä riippuen lämpötilaolosuhteista. [43] [44]

Kauppalaivojen komposiittien käyttö suurella mittakaavalla on vähäistä sillä suurien komposiittiosien valmistus vaatii telakoilta laajoja muutoksia ja kalliita valmistusmuotteja ja -välineitä. Pienemmän mittakaavan komposiittisovellukset ovat lisääntyneet huomattavasti. Esimerkiksi kansirakenteita, roottoripurjeita, vinssikeloja ja -akseleita, putkia, tankkeja, ovia, kansiluukkuja, potkuriakseleita ja potkureita, kuten myös kaikenlaista irtaimistoa valmistetaan komposiiteista.

XPERION yhtiö on valmistanut CFRP potkuriakseleita 90-luvun puolivälistä lähtien. Yli 500 Xperionin valmistamaa suurta akselia on käytössä, jotka ovat jopa 12m pitkiä ja 800mm halkaisijaltaan. CFRP akselit painavat jopa 70% vähemmän kuin yleiset akselit eivätkä siitä syystä tarvitse kannatinlaakereita. Hyötyinä ovat myös melusaasteen ja tärinän vähentyminen, sekä

ruostumattomuus. Näitä potkuriakseleita on mahdollista käyttää lähes jokaisessa alustyypissä. [6]

Maailman ensimmäinen CFRP potkuri asennettiin 499GT kokoluokan kemikaalitankkeri Taiko Maru'un toukokuussa 2014, johon oli jo asennettu CFRP keulapotkurit vuonna 2012. Koeajoissa huomattiin potkurin vaativan yhdeksän prosenttia vähemmän hevosvoimia kuin aikaisemmin käytössä ollut alumiini-pronssipotkuri ollen silti yhtä kestävä.[7]

Eurooppalainen tutkimusprojekti Fibreship (2017) tähtää uudistamaan laivojen rakennuksen. EU rahoittaa projektia, jonka tarkoituksena on mahdollistaa ja uudistaa yli 50 metristen alusten rakennus kuituvahvistetuista muovikomposiiteista. Komposiittien käyttö voi Fibreship:n laskelmien mukaan keventää laivojen painoa jopa 30%, vähentää polttoainekulutusta 10-15%, laskea huomattavasti kasvihuonekaasuja, mahdollistaa 75% materiaalin uudelleenkäytön, vähentää melusaastetta ja kasvattaa lastikapasiteettia noin 12%. [8]



Kuva 4.1 Taiko Maru'un CFRP potkuri asennettuna. [38]



Kuva 4.2 E- Ship 1 neljällä roottoripurjeellaan. [34]



Kuva 4.3 Pelastusveneet ovat olleet jo pitkään lasikuidusta valmistettuja. [28]



Kuva 4.4 Hiilikuitulujitettu potkuriakseli. [39]

4.2 MERIVOIMAT

Komposiittien käyttö merivoimissa alkoi, kun huomattiin komposiittien ylivoimaisuus metalleihin nähden. Vahvuus, korroosion kesto, keveys, joka vaikutti suoraan polttoainekustannuksiin ja nopeuteen, ja varsinkin akustinen heijastamattomuus ja magneettisuuden puutos, jotka estävät kaikuluotaimessa ja tutkassa näkyvyyden, vaikuttivat kaikki metallin syrjäytymiseen komposiitin tieltä.

Ensimmäisiä muovikomposiittisovelluksia käytettiin miinantorjunta-aluksissa, maihinnousualuksissa, pienissä kuljetusaluksissa ja sukellusveneissä. 1960-luvulta lähtien komposiittien käyttö on yleistynyt ja nykyään käyttö on edennyt siihen, että alukset alkavat olemaan kokonaan komposiittia. Komposiittien käytössä suurimmat ongelmat ovat olleen suuret materiaali- ja rakennushinnat, palonkesto ja iskunkesto.

Keulapotkureiden, potkuriakselien ja pääpotkurien vaihtaminen komposiittiin on tuonut keveyttä, äänenvaimentumista, korroosionkestävyyttä, ja värinän- ja magneettisuuden vähenemistä. Aluksiin on asennettu komposiittilevyjä runkoon, jotka heijastavat ja uudelleensuuntaavat tutkasignaaleja. Magneettisuuden puutos on miinanraivaajille tärkein ominaisuus, sillä merimiinojen anturit tunnistavat metallien magneettikentän. [9]



Kuva 4.5 Ruotsalainen Visby- luokan alus, jossa tutkaheijastus on minimoitu rungon muotoilun ja hiilikuidun avulla. [32]



Kuva 4.6 USS Zumwaltin kansirakenteissa pyrittiin maksimoimaan häiveominaisuudet. [31]



Kuva 4.7 Miinantorjunta-alus Vahterpää. [40]

4.3 VAPAA-AJAN ALUKSET

Lähes kaikki hivi-, kilpa- ja purjeveneet ovat tehty muovikomposiiteista. Tähän vaikuttavat estetiikka, huollon helppous ja korroosion kestävyys. Entistä suurempia huvijahteja tehdään kauttaaltaan komposiiteista, suurimpien superjahtien ollen jo yli 50-metrisiä. Nopeakulkuisissa aluksissa komposiitti tarjoaa kevyen ja kilpailukykyisen mahdollisuuden verrattuna teräsmateriaaleihin. [3] (436-437)



Kuva 4.8 Sarjavalmistettu lasikuitu vene [41]



Kuva 4.9 150 jalkainen 48M SuperSport jahti on valmistettu hiilikuitukomposiitista. [29]



Kuva 4.10 Lasikuidusta valmistettu purjevene 1950-luvulta [42]

5 KOMPOSIITTIIEN JA NYKYISTEN MATERIAALIEN VERTAILU

Teräs on ollut jo 1800-luvulta asti käytössä merenkulun alusten rakennuksessa ja on säilyttänyt asemansa käytetyinpänä rakennusmateriaalina. Sen rinnalle ovat tulleet muovikomposiitit, jotka korvaavat alusten metallirakenteita, järjestelmiä ja osia. [10]

Vertailemme tämän luvun aikana muovikomposiittien, teräksen ja muiden nykyisten käytössä olevien materiaalien ominaisuuksia toisiinsa. Suosituin käytetty teräs on matalahiilinen teräs, sillä se on edullista ja helposti työstettävissä matalammissa lämpötiloissa kuin muut teräkset.

5.1 ISKU- JA RASITUSTEN KESTO

Aineen mekaanisia ominaisuuksia kuvataan kimmo- ja liukumodulilla, poissonin vakiolla, ja vetolujuudella, jonka raja-arvoja on murto- ja myötölujuuksilla. Teräksen mekaaniset ominaisuudet ovat joka suunnasta samanlaiset, kun taas komposiitin ominaisuudet riippuvat voimien suunnasta suhteessa lujitekuituihin.

Kimmomoduli tarkoittaa aineen kykyä vastustaa siihen kohdistuvien voimien aiheuttamia muodonmuutoksia. Teräkselle ominaista on hyvät iskunkesto ominaisuudet ja suuri tiheys. Sen kimmomoduli on 210 GPa tarkoittaen 210 Newtonia neliömillimetriä kohden. SM- hiilikuidun eli standardoidun hiilikuidun ja epoksin muodostaman laminaatin 60%:n lujitepitoisuudella kimmomoduli lujitekuitujen suuntaisesti on 138 GPa ja kohtisuorassa 10,3 GPa.

Teräksen vetolujuuden raja-arvoja ovat myötölujuutena 370 MPa ja murtolujuutena 510 MPa. Komposiiteilla ilmoitetaan ainoastaan vetomurtoraja, sillä kappale murtuu ennen pysyviä muodonmuutoksia. SM- hiilikuidun 60% ja epoksin 40% laminaattikomposiitilla tämä vetomurtoraja on 2275 MPa kuitujen suuntaisesti ja 52 MPa kohtisuorasti.

Liukumodulilla tarkoitetaan kappaleen ominaisuutta vastustaa leikkausjännityksiä. Teräksellä on noin 80 GPa:n liukumoduli riippuen terästyypistä ja komposiiteilla liukumoduli on alle 5 GPa riippumatta lujite tai matriisi valinnoista. Komposiitit kestävät leikkausjännityksiä siis huomattavasti terästä huonommin.

Kuituja kohdistamalla haluttuihin suuntiin ottaen voimien tulokulmat huomioon saadaan laminaateista terästä huomattavasti kestävämpi suhteessa aineen määrään. Iskunkestävyys on teräksellä silti ylivoimainen.

Taulukko 5.1 Metallien ja yhdensuuntaislaminaattien taulukkoarvoja. Laminaattien arvot kuitujen suuntaisesti, missä kuitujen osuus 60%. [26]

	E-lasi /Epoksi	Aramidi /Epoksi	SM- Hiilikuitu /Epoksi	Teräs S355	Alumiini 2024-T4
Kimmomoduli (GPa)	43	76	138	210	73,1
Vetolujuus (MPa)	1070	1380	2275	510	470
Puristuslujuus (MPa)	870	275	1590	510	470
Tiheys (g/cm ³)	2	1,38	1,55	7,38	2,78
Lämpölaajenemiskerroin (10 ⁻⁶ /C)	6,4	-2	-0,1	12	23,2

Taulukko 5.2 Metallien ja yhdensuuntaislaminaattien taulukkoarvoja. Laminaattien arvot kohtisuorasti kuituihin nähden, kuitujen osuus 60%. [26]

	E-lasi /Epoksi	Aramidi /Epoksi	SM- Hiilikuitu /Epoksi	Teräs S355	Alumiini 2024-T4
Kimmomoduli (GPa)	9,7	5,5	10,3	210	73,1
Vetolujuus (MPa)	38	30	52	510	470
Puristuslujuus (MPa)	185	138	207	510	470
Lämpölaajenemiskerroin (10 ⁻⁶ /C)	16	57	18	12	23,2

5.2 LÄMMÖNKESTO

Komposiittien lämmönkesto ominaisuudet riippuvat valituista matriiseista, sekä lisä- ja täyteaineista. Lämmönkesto kuvataan lasittumislämpötilalla (TG) ja taipumislämpötilalla (HDT), ne ilmaisevat lämpötilaa, jossa komposiitin ominaisuudet muuttuvat radikaalisti. Maksimi lämpötilankesto riippuu mekaanisista kuormituksesta ja kuormituksen kestosta. [3] (235)

Matalahiilisen teräksen sulamispiste on noin 1500 °C, teräs johtaa lämpöä hyvin. Hiilikuitu-epoksi komposiitti laminaatit pystyvät 121 °C pitkäaikaisiin ja 204 °C lyhytaikaisiin työolosuhteisiin. Polyimidi matriisi pystyy 232 °C pitkäaikaiseen ja 400 °C lyhytaikaiseen työolosuhteisiin. Polyesteri ortoftaalihartsin HDT on 55-100 °C. Vinyyliesteri bisfenoli-A hartsin valun HDT on 100 °C ja epoksi DGEBA-hartsin 130°C, kun kovetteena on käytössä BF₃MEA.

Komposiitit johtavat lämpöä selvästi metalleja huonommin. Teräs siis kestää lämpöä huomattavasti komposiitteja paremmin, joka on suurimpia syitä teräksen suosioon verrattuna komposiitteihin merenkulussa. [11]

5.3 KEMIALLINEN KESTÄVYYS

Muovikomposiittien yksi suurimmista eduista on ruostumattomuus, joka on ongelmana merenkulussa aina metalleja käytettäessä. Ne kestävät myös happoja ja emäksiä riippuen matriisista tai pinnoitteesta. Käsittelemättömänä teräs ruostuu helposti, eikä kestä emäksiä tai happoja, siksi käytetäänkin suojaavia maaleja ja galvaanista suojausta. Hiilikuitu aiheuttaa kosteissa olosuhteissa epäjalompien materiaalien galvaanista korroosiota ja tästä johtuen liitoksissa on käytettävä esimerkiksi titaania tai ruostumatonta terästä. [3]

5.4 PAINOEROT

Komposiittilaminaattien tiheys on huomattavasti terästä pienempi, teräksen tiheyden ollen 7380 Kg/m^3 ja lasikuitulaminaatilla 2000 Kg/m^3 . Komposiittien lujuus suhteessa massaansa onkin yksi komposiittien hyvistä puolista. Massan väheneminen vaikuttaa merenkulussa suoraan polttoainekulutukseen, maksimi lasti määrään ja aluksen vakavuuteen. [8]

Ruotsalaisen LASS tutkimuksen (2009) mukaan irtolastialuksen kaikkien yhdeksän kansiluukun vaihto teräksestä lasikuitulujitettuun polyesteri komposiittilaminaattiin vähensi painoa 53%, joka vastasi 29 tonnia.

Tutkimuksessa muutettiin myös aluksen teräksiset kansirakenteet komposiittiin tavoitteena vähentää rakenteiden painoa. Tutkimuksessa kansirakenteessa käytettiin sandwich- ydinaineena Balsaa. Balsaa on käytetty useita vuosia merenkulun sovelluksissa ja se on todettu olevan suhteellisen palonkestävää, ?laskelmissa otettiin silti paloeristeiden lisäys huomioon. Tutkimuksen teräksiset kansirakenteet painoivat 25,5 tonnia ja komposiittirakenteet noin 60% vähemmän eli 10,1 tonnia. [24]

5.5 MATERIAALIHINNAT

S355 teräksen, alumiinin ja komposiittien komponenttien hinnat vaihtelevat valmistajan, laadun ja markkinatilanteen mukaan, joten taulukossa esitetyt arvot ovat vain suuntaa antavia. Polyesteri, vinyyliesteri ja epoksi hinnoittelun saimme Wenda OY:n haastattelusta, ja hinnat ovat tukkuhintoja.

Kyseisiä taulukkohintoja tarkastellessa huomioon on otettava komposiittien huomattavasti matalimmat ainemäärävaatimukset saavutettaakseen samat lujuusarvot kuin metalleilla.

Taulukko 5.3 Suuntaa antavia materiaalihintoja [12] [13] [14]

	Euroa / Tonni
S355 teräs	~550-800
Alumiini	~1700
E- lasikuitu rovinki	~8500
SM hiilikuitu matto	~35000
Aramidikuitu matto	~49000
Polyesteri	~1600
Vinyyliesteri	~3500
Epoksi	~5600

6 KÄYTÄNNÖN MAHDOLLISUUDET

6.1 MITÄ KORVATTAVISSA KOMPOSIITEILLA

Merenkulussa muovikomposiitteja käytetään huviveneistä helikopterikenttiin offshore-lautoilla. Rajoittavana tekijänä korvattaessa nykyisiä materiaaleja komposiiteilla ovat IMO:n säädökset, jotka koskevat erityisesti paloturvallisuutta. [27]

Käytännössä on mahdollista valmistaa koko laiva komposiitista, mutta se vaatisi todella suuria investointeja eikä se ole toistaiseksi kannattavaa kauppamerenkulussa. Nykyisten valmistusmenetelmien, pitkäaikaisten hyötyjen tiedossa olon ja tietotaidon ansiosta komposiittien käyttö suurien alusten kansirakenteissa, alemmissa kansissa, bulkheadeissa ja jopa rungossa on mahdollista. [27]

6.2 RAJOITTEET

Aluksissa muita materiaaleja kuin metalleja käytettäessä on näiden materiaalien ominaisuuksia testattava ja varmistuttava riittävydestä. Näitä ominaisuuksia ovat MSC.370(93) mukaan yhteensopivuus lastien kanssa, materiaalin ikääntyminen, mekaaniset ominaisuudet, lämpölaajeneminen ja kutistuminen, kulutuskestävyys, koheesio, värinän kesto, palon ja sen leviämisen kesto ja väsymisen ja murtumien sieto.

Mikäli materiaali ei täytä palonkesto- ja leviämisvaatimuksia voidaan se hyväksyä suojaamalla rakenne palonkestävällä aineella tai jos rakennetta käytetään pysyvässä inerttikaasu ympäristössä.

Jotta suuria komposiittirakenteita voidaan asentaa aluksiin, vaatii se telakoilta suuria muutoksia laitteissa ja työntekijöiden koulutuksessa. Komposiittialusten kysynnän puutteen vuoksi telakat ovat vastahakoisia investoimaan komposiittien työstöön. Komposiittien ekologiset ja ekonomiset

hyödyt ovat kuitenkin suuret ja muutoksia telakoissa luulisi lähitulevaisuudessa tapahtuvan.

Suunniteltaessa komposiittirakenteita merenkulun sovelluksiin on otettava huomioon IMO:säädökset, budjetti, rakenteeseen kohdistuvien kuormitusten ja rasitusten voima ja suunta sekä työympäristön aiheuttamat olosuhteet, joiden perusteella suunnitellaan sopiva rakenne ja valitaan materiaalit. Työmääränä tämä on huomattavasti suurempi kuin metallirakenteella.

Vaikka komposiittien lujuusominaisuudet ovat erinomaiset, alhainen iskunkestävyys aiheuttaa ongelmia toteutuksessa. Komposiitin yleistymisen haasteet laivoissa jakautuvat tietämättömyyteen suurien komposiittirakenteiden suorituskyvystä meriolosuhteissa, monimutkaisiin ja aikaavieviin analyyseihin paloturvallisuudesta, teräksen laivateollisuuden hallitsevaan ja sen tuntemuksen aiheuttamaan asemaan ja taloudellisiin haasteisiin, sillä käyttöikäkustannukset jakautuvat teräkseen nähdessä eri tavalla. Nämä haasteet johtavat siihen, että uusien rakenteiden kokeilu on vähäistä. [15] [16]

6.3 BOKOMPOSIITIT

Biokomposiitteissa joko lujite tai matriisi on biopohjainen. Biokuituja ovat esimerkiksi pellava, hamppu, puuvilla. Suurina etuina luonnonkuituilla ovat matala hinta, kierrätettävyys, uusiutuvuus ja matala tiheys, ekologisuus, tuoden korkeamman vetolujuuden ja jäykkyyden kuin lasikuitu, ollen silti sitä edullisempi. Luonnonkuituilla on ontto rakenne, jonka ansiosta ne eristävät ääntä ja lämpöä.

Materiaalina luonnonkuituja on helppo käsitellä, ja niille on siksi paljon sovellusmahdollisuuksia. Luonnonkuitujen kosteuden- ja lämmönkestävyydet ovat huomattavasti synteettisiä kuituja heikompia, joten niiden käyttö merenkulun sovelluksissa on rajoittunutta ja tuskin yleistyy.

6.4 RISKIT

Komposiittirakenteissa riskejä voivat aiheuttaa piilevät vauriot, jotka ovat aiheutuneet jo valmistusvaiheessa tai myöhemmin ympäristön muodostamina. Mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavia vaurioita ovat esimerkiksi huokoisuus, matriisisäröt, sidosvauriot, lujitekatkeamat ja lujitteen epätasainen jakauma. Näitä vaurioita on mahdollista havaita eri menetelmin, kuten visuaalisella tarkastuksella, joka sopii hyvin valoaläpäisevien laminaattien tarkastukseen. Ultraäänitarkastuksessa tutkitaan ääniaaltojen vaimenemista ja muutosta kappaleessa. Termografiassa kappaleen pintaa lämmitetään ja seurataan lämpötilajakaumaa joko lämmittettävän pinnan tai vastakkaisen pinnan puolelta. Vauriokohdissa lämmön johtuminen on heikompaa. Tällä menetelmällä on mahdollista paikantaa huokosia, onkaloita, halkeamia ja delaminaatioita.

Epoksihartseja sekoittaessa matriisiin ja kovettajan sitoutuminen keskenään vapauttaa lämpöä, joka nopeuttaa reaktiota entisestään. Jos hartsi on levitetty oikein lämmön nousu haihtuu, mutta jätettynä astiaan tai kasaantumaksi lämmön nousu aiheuttaa itseään ruokkivan kuplivan, myrkyllistä kaasua savuavan ja tulisen seoksen. Epoksihartsia käytettäessä tulee valmistaa vain tarvittava määrä seosta ja säilyttää sitä levittämättömänä mahdollisimman vähän aikaa.

Useasti altistuminen komposiittien valmistuksessa käytettäville kemikaaleille voi aiheuttaa niille herkistymistä, kuten ihottumaa tai hengitysongelmia. Jokainen altistumiskerta kasvattaa aineelle herkistymisen mahdollisuutta eikä herkistymiselle ole parannusta. Altistumiset kemikaaleille vältetään oikeiden suojavälineiden käytöllä.

7 TALOUDELLISUUS

Kaupallisessa merenkulussa rakenteiden materiaalien vaihtaminen tai muuttaminen määräytyy pääasiallisesti kustannuksien muutosten perusteella eli onko muutoksista rahallista hyötyä. Komposiittien taloudellisuus painottuu pitkäaikaiseen elinkaareen, edulliseen ja vaivattomaan asennukseen ja huoltoon. Materiaalihinnat ovat korkeat, mutta pitkäikäisyyden ja keveyden tuomat edut tekevät komposiiteista kokonaisuudessa taloudellisesti monesti kannattavia. Komposiitteja käytettäessä on laskettava rakenteen elinkaarikustannukset, johon kuuluu:

-Suunnittelu

Komposiittirakenteiden suunnittelu vie enemmän aikaa kuin metallien, koska komposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat erilaiset riippuen monesta tekijästä, kuten kuitujen suunnasta, raaka-ainevalinnoista, valmistustavoista ja kappaleen muodosta.

-Raaka-aineet

Raaka-aine kustannukset ovat terästä huomattavasti korkeammat, mutta vaihtoehtoja on erilaisia. Raaka-aineiden tuotantotapojen kehittyessä kustannukset kuitenkin luultavasti alentuvat tulevaisuudessa.

-Tuotanto

Tuotantokustannukset riippuvat pitkälti valmistettavasta rakenteesta ja tuotantomenetelmästä. Menetelmät vaikuttavat huomattavasti lopputuotteen laatuun ja suorituskykyyn.

-Testaus

Komposiittirakenteet vaativat enemmän kokeita teräsrakenteisiin nähden, jotta varmistetaan IMO:n säädöksiä toteutumisesta ja rakenteen ominaisuuksien riittävydestä.

-Kokoaminen

Kokoamisen kustannukset riippuvat täysin kappaleen monimutkaisuudesta ja muodosta. Sanottakoon että komposiittien asennus ja korjaus on vaivattomampaa ja yksinkertaisempaa teräkseen verrattuna.

-Käyttökustannukset

Teräksen korvaavalla komposiittirakenteella on keveytensä ansiosta polttoainekustannuksia vähentävä ja kuollutta painoa nostava vaikutus. Tämä tarkoittaa mahdollisuutta kasvattaa kuljettettavan lastin tai matkustajien määrää.

-Huolto- ja korjauskustannukset

Huoltokustannukset ovat oletusti matalat verrattuna teräkseen komposiitin ruostumattomuuden, säänkeston ja pitkän väsymisikänsä ansiosta.

-Kierrätys ja käytöstäottokustannukset

Komposiittimateriaalien hävittämisen on oletettu olevan ongelmallista ja kallista, mutta tanskalainen Standard Flex 300 merivoimien aluksen romutus todisti että se on mahdollista toteuttaa nopeasti ja edullisesti. Komposiittiosia voidaan uudelleenkäyttää ja kierrättää vähentäen romutuskustannuksia. [16]

7.1 HUOLTOMAHDOLLISUUDET- JA KUSTANNUKSET

Komposiittirakenteiden vaurioita ovat valmistusvirheet, ylikuormitus ja käyttöolosuhteiden ylitys. Vauriot voivat olla helposti havaittavia tai täysin huomaamattomia.

Valmistusvirheitä ovat huokokset eli kaasutaskut rakenteessa, laminaatin kovettumattomuus ja matriisin liiallinen lämpeneminen. Huokosia muodostuu komposiittiin joka tapauksessa, mutta huokoisuuteen vaikuttaa hatsivalinta ja valmistusmenetelmät. Parhaimmillaan oikeilla valmistusmenetelmillä saavutetaan prosentin murto-osien huokoisuus, mutta huokoisuus voi olla jopa 15 prosenttia huonommilla menetelmillä valmistetuissa komposiiteissa.

Huokosten suuri tilavuusosuus johtuu valmistusvaiheessa tapahtuvan ilmanpoiston epäonnistumisesta. Huokokset heikentävät rakenteen lujuusominaisuuksia, sillä näiden ilmataskujen kohdalla matriisi ei ole kosketuksissa lujitteen kanssa eivätkä ne siksi toimi yhdessä tarkoitetulla tavalla. Laminaatin hartsin kovettumattomuus johtuu kovetteen väärästä sekoitus suhteesta, jolloin osa aineesta jää reagoimatta ja kovettumatta.

Ylikuormituksesta aiheutuvat vauriot ovat useimmiten iskukuorman tai käyttölämpötilojen ylityksen aiheuttamia. Lämpötilarajan ylitys aiheuttaa matriisin pehmenemisen ja komposiittirakenteen mekaanisten ominaisuuksien heikentymisen ja mahdollisesti rakenteen pettämisen. Yleisimpiä ulkoisista olosuhteista johtuvia vaurioita aiheuttavat auringon UV- säteily, kosteus ja erilaiset kemikaalit.

Komposiittirakenteiden korjaaminen vaatii aina alkuperäisen rakenteen ja materiaalien tuntemisen, jotta pystytään palauttamaan rakenteen alkuperäinen lujuus ja jäykkyys. Useimmiten suljettujen muottien menetelmillä valmistetut kappaleen ovat niin halpoja, että vaurioituneen kappaleen korvaaminen uudella on taloudellisesti kannattavampaa.

Korjauksessa on otettava huomioon hartsien kovettumiselle riittävät olosuhteet, mikä tarkoittaa vähintään 15C° lämpötilaa ja alle 75% suhteellista ilmankosteutta. Mikäli laminaatti on vaurioitunut osittain, vaurio on korjattavissa hiomalla vaurion ympärysyhjään laminaattikerrokseen asti ja täyttämällä kohta lujitteella ja matriisilla. Laminaatin ollessa täysin murtunut, vaurioitunut rakenne poistetaan ja korjattavan alueen reunat viistetään hiomalla ja kohtaan laminoidaan uusi korvaava kappale. Laminaatit tulisi korjata samoilla materiaaleilla kuin alkuperäis kappaleellakin. Polyesterilaminaatit on mahdollista korjata myös epoksihartseilla, mutta polyestieriä ei voida käyttää epoksilaminaattien korjauksessa.

7.2 KÄYTTÖIKÄ

Hyvä suunnittelu on komposiittien pitkän käyttöiän edellytys. Tiedettäessä käyttökohteen mekaaniset, termodynaamiset ja muut vaikuttavat olosuhteet kuten kosteus ja ultraviolettisäteily, voidaan valita optimaalisimmat rakenteet, materiaalit ja tarvittaessa pinnoitteet saavutettaakseen pisin mahdollinen käyttöikä. Jos olosuhteet pysyvät suunnittelun mukaisissa arvoissa, käyttöikä voi olla hyvinkin pitkä.

Käyttöiän pituudesta kertovat lähes kokonaan komposiiteista valmistetut Boeing 787 Dreamliner lentokoneet, joille on esitetty yli 44000 lennon käyttöikä ja 1956 valmistetut lasikuitupurjeveneet, jotka ovat vieläkin merikelpoisia. [20] [21]

Vesi- ja viemäriputkistoja on alettu rakentamaan yhä enemmän komposiiteista niiden pitkän käyttöiän ja matalan huoltotarpeen vuoksi. Komposiittiputkien sileät seinämät aiheuttavat pienempää virtausvastusta, mikä johtaa matalempiin tehovaatimuksiin pumpuissa ja täten alhaisempaan energian kulutukseen. Putkistoihin kerääntyy kasaumia vähemmän pinnan sileyden johdosta. Pitkä käyttöikä ja matala huollon tarve parantavat suoraan kokonaisuuden taloudellista kannattavuutta. [22]

7.3 RAKENTEIDEN JA JÄRJESTELMIEN HINTAEROT

LASS projektin tekemässä vertailututkimussa laskettiin eri materiaaleista valmistettujen kansirakenteiden taloudellisuutta. 12500 tonnin Ro-Pax Stena Hollandica alusta käytettiin laskelmien pohjana. Alus on 188m pitkä ja kansirakenne on noin 75 metriä pitkä, 29 metriä leveä ja 13 metriä korkea.

Projektissa korvataan teoriassa jo käytössä oleva teräskansirakenne kannelta seitsemän kannelle 11 kahdella erilaisella ydinaineen omaavalla sandwich-komposiitilla. Tutkimuksessa arvioitiin rakenteiden tuotantohinta, massa, romutuskustannukset ja rakenteiden keveyden tuomat edut, joiden

perusteella laskettiin komposiittimateriaalien käytön takaisinmaksuaika. Hinnoitteluun on otettu huomioon suunnittelu ja valmistusvälineet, jotka ovat 10 % materiaali- ja työhinnosta. Elinikä on laskettu 25 vuodelle ja painonalennushyödyt on käytetty lastimäärän lisäämiseen.

Taulukko 7.1 Kansirakenteiden vertailu (Valuuttamuutokset kruunuista euroiksi tehtiin 14.11.2018 kurssin mukaan) [24]

	Teräsrakenn e	Lasikuitu, Polyesteri, Balsa Sandwich	Lasikuitu, Polyesteri, PVC Sandwich
Tuotantohinta €	4 713 000	8 380 000	9 947 000
Rakenteiden massa t	950	440	488
Romutuskustannukset €	-110 050	77 130	82 390
Vuoden lastimäärä milj.t	1,75	1,91	1,89

LASS:n laskelmien mukaan, versio jossa käytetään balsaa ydinaineena maksaa itsensä takaisin 15:ssä vuodessa ja vastaavasti PVC vaahtoa käyttävä 37 vuodessa suhteessa teräsrakenteeseen. Jos halutaan viiden vuoden takaisinmaksu vaaditaan balsaa käyttävältä sandwich-rakenteelta 770 800 € ja PVC kokonaisuudelta 1 114 380 € enemmän tuottoa vuotta kohden. [24] (180-)

7.4 POLTTOAINESÄÄSTÖT

Komposiittien käyttö laivan eri järjestelmissä ja osissa johtaa keveämpään kokonaisuuteen ja sitä kautta polttoainesäästöihin. Ympäristösäädösten tiukentuessa ja polttoainehintojen noustessa keskitytään ratkaisuihin, joilla pyritään kulutusta madaltamaan. Monet komposiittirakenninnovaatiot ja -ratkaisut ovat alentaneet polttoainekustannuksia.

CFRP pääpropulsiopotkuri alensi Taiko Maru- aluksessa operointiin vaadittavia hevosvoimia yhdeksän prosenttiyksikköä verrattuna

tavanomaiseen alumiini- pronssipotkuriin. Alhaisempi tehovaatimus johtuu potkurin keveydestä, matalammasta kitkasta ja muotoilusta. Potkurin keveys mahdollistaa myös pienemmän potkuriakselin halkaisijan, mikä johtaa keveämpään ja energiatehokkaampaan kokonaisuuteen, koska potkuriakselin ja potkurin käyttö vaatii vähemmän vääntöä ja polttoainetta saavutettaakseen sama työntövoima. [7]

Suomalaisen Norsepower yhtiön kehittämä roottoripurje mahdollistui sandwich-komposiittirakenteiden käytöllä purjeen pyöriässä osassa. Purje hyödyntää magnus-efektiä, jossa sylinterin pyöriessä ilma kulkee toiselta puolelta nopeammin kuin vastakkaiselta puolelta työntäen alusta eteenpäin. 2014 roottoripurjetta kokeiltiin 9700 DWT:n Ro-Ro alus M/S Estradenilla. Testeissä todettiin yhden roottoripurjeen vähentäneen polttoainekulutusta 2,6 prosenttia. Nykyään kahdella roottoripurjeella varustettu M/S Estraden kuluttaa 400 tonnia vähemmän polttoainetta vuodessa, säästään 200 000 dollaria ja tuottaen 1200 tonnia vähemmän hiilipäästöjä. [25]

Käyttämällä komposiittia alusten eri järjestelmissä ja rakenteissa metallien sijasta saavutetaan kevyempi kokonaisuus, joka vähentää aluksen liikuttamiseen tarvittavaa energiaa alentaen polttoainekulutusta. Mahdollisia korvattavia kohteita ovat laivojen lastiluukut, tankit, putkistot, potkuriakselit, kontit, kansirakenteet.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Löytämiemme tietojen, aineistojen ja tutkimusten perusteella voimme todeta komposiittirakenteiden olevan ominaisuuksiltaan hyvin muokattavissa tarkoitetun käyttökohteen vaatimusten mukaisesti. Materiaalivalinnoilla, lujitteiden kohdistamisilla, erilaisten valmistusmenetelmien, rakenteen muodon ja pinnoitteiden avulla saavutetaan ominaisuuksiltaan optimaalinen kappale lähes joka tarkoitukseen.

Esteenä merenkulun sovelluksissa ilmenee terästä ja muita metalleja huomattavasti heikompi lämmön- ja palonkestävyys. Niiden käyttö rajoittuu tästä syystä IMO:n säädöksillä, joissa otetaan huomioon komposiittirakenteiden ikääntyminen, mekaaniset ominaisuudet, lämpölaajeneminen, kulutuskestävyys, koheesio, tärinän-, palon- ja sen leviämisen kesto sekä väsymisen ja murtumien sieto. Säädösten noudatuksesta varmistuminen on aikaa vievä ja työläs prosessi, joka jo itsessään kasvattaa etäisyyttä teräsrakenteiden korvaamiseen.

Muovikomposiitit ovat kuitenkin yleistyneet huomattavasti erilaisissa järjestelmissä ja rakenteissa meriteollisuudessa suurelta osin keveyden, sää- ja meriolosuhteiden kestävyys, pitkäikäisyyden ja huomattavasti pienemmän huollon ja kunnossapidon tarpeen vuoksi verrattuna teräsrakenteisiin. Niiden käyttö on ollut dominoivaa jo pitkään vapaa-ajan- ja merivoimien aluksissa ja sovelluksissa.

Suuren alkuhintansa vastapainona ovat useat eri syistä seuraavat taloudelliset hyödyt, joita ovat polttoaineen kustannusten aleneminen suoraan keveämmän rakenteen, huolto- ja kunnossapitokustannusten vähenemisen ja korroosion- ja kemiallisen kestävyytensä ansiosta. Huomattavia polttoainesäästöjä on myös mahdollista saavuttaa roottipurjeiden, CFRP-potkuriakselien ja -potkureiden käytöllä.

Jo pitkään meriteollisuudessa käytössä olleet teräs- ja muut metallimateriaalien ominaisuudet ja käyttäytyminen on laajalti tunnettua suurissa rakenteissa, mikä hidastaa muovikomposiittien kokeilua suurella mittakaavalla.

Muovikomposiittien valmistusmenetelmien integrointi nykyisiin telakoihin vaatii todella suuria investointeja, tietotaitoa ja muutoksia. Matalan kysynnän johdosta telakat ovat vastahakoisia investoimaan komposiittien työstöön.

Mielestämme nykyiset materiaalihinnat ovat vieläkin niin korkeat, ettei suurien teräsrakenteiden korvaaminen komposiittirakenteilla ole taloudellisesti kannattavaa. Komposiittien taloudelliset hyödyt tulevat esille vasta vuosikymmenien jälkeen riippuen käyttökohteesta ja tarkoituksesta. Muovikomposiitit ovat kuitenkin yleisesti käytössä kohteissa, joissa rakenteelta vaaditaan erityisiä ominaisuuksia.

Opinnäytetyön teon aikana hyödyllisen ja luotettavan tiedon löytäminen oli välillä haastavaa. Pyrimme saamaan tietoa kirjallisuudesta, internetistä löytämistämme tutkimuksista ja artikkeleista, alan eri yrityksiltä sähköpostitse, sekä haastatteluilla Wenda Oy:ltä. Muovikomposiitit ovat niin tutkimaton ala meriteollisuuden näkökulmasta, että opinnäytetyömme kannalta sopivia ja ajantasalla olevia tutkimuksia oli vaikeaa löytää. Yhdistelimme tietoja ja tuloksia eri tutkimuksista ja lähteistä, joiden perusteella teimme päätelmiä.

Opinnäytetyö toteutettiin suurelta osin parityönä molempien kuitenkin keskittyen sovittuihin aihealueisiin. Rajasimme aihealueet taloudellisuuteen ja käytännön mahdollisuuksiin. Taloudellisuus aihealue, jota tutki Walteri Forsbom, jakautui nykyisiin sovellutuksiin merenkulussa (luku 4) ja taloudellisuuteen (luku 7). Lauri Ahosola keskittyi käytännön mahdollisuuksien tutkimiseen, joka jakautui materiaalien vertailuun (luku 5) ja käytännön mahdollisuuksiin (luku 6).

LÄHTEET

- [1] Mar-Bal, Inc verkkosivut, viitattu 21.06.2018
<https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>
- [2] Wenda Oy haastattelut syksyn 2018 aikana
- [3] Saarela Olli, Airismaa Ilkka, Kokko Juha, Skrifvars Mikael, Komppa Veikko, Komposiittirakenteet 2007
- [4] materialshop.fi verkkosivut, viitattu 10.07.2018
https://www.materialshop.fi/epages/Materialshop.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shop/s/2014052201/Categories/Laminointi/Epoksihartsit
- [5] Core Composites verkkosivut, viitattu 12.10.2019
<http://www.corecomposites.com/products/core-materials/balsa.html>
- [6] Dynexa verkkosivut, viitattu 12.10.2018
<https://www.dynexa.de/en/products/drive-shafts/ship-propeller-shafts.html>
- [7] World's First CFRP Propeller Installed in Main Propulsion System of a Merchant Vessel, compositesmanufacturingmagazine.com, 5.9.2014.
<http://compositesmanufacturingmagazine.com/2014/09/worlds-first-cfrp-propeller-installed-main-propulsion-system-merchant-vessel/>
- [8] Europe to Use Composite Materials to Manufacture Ships, irishtechnews.ie, 21.7.2017
<https://irishtechnews.ie/europe-to-use-composite-materials-to-manufacture-ships/>
- [9] Using Composites Could Make Navy Ships Harder to Detect, compositesmanufacturingmagazine.com, 24.11.2013
<http://compositesmanufacturingmagazine.com/2013/11/using-composites-make-navy-ships-harder-detect/>
- [10] Royal Museums Greenwich verkkosivut, viitattu 24.11.2018
<https://www.rmg.co.uk/discover/explore/shipbuilding-1800%E2%80%93present>
- [11] Resin for the Hot Zone, Part I: Polyimides, compositesworld.com, 19.6.2009
<https://www.compositesworld.com/articles/resins-for-the-hot-zone-part-i-polyimides>
- [12] Alibaba verkkosivut, 15.11.2018
<https://www.alibaba.com/showroom/s355-steel-material-price.html>
- [13] MEPS International Ltd. verkkosivut, 15.11.2018
<http://www.meps.co.uk/world-price.htm>

- [14] Made-in-China verkkosivut, 15.11.2018
<https://www.made-in-china.com/>
- [15] Kansainvälinen merenkulkujärjestö verkkosivut, 22.05.2014
<http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSC%20Resolutions/MSC%20370%2093.pdf#search=composite>
- [16] Guidelines for the use of FRP in superstructures on passenger ships, 08.2016
https://brandog-sikring.dk/files/Pdf/FogU/COMPASS_Guideline_for_the_use_of_FRP_in_superstructures_on_passenger_ships.pdf
- [17] Biokomposiittien monet mahdollisuudet & Case UPM ForMi, UPM, 9.5.2013
https://smy.fi/wp-content/uploads/2014/10/PMA35_StefanFors_diat.pdf
- [18] Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, 11.9.2003
<https://msu.edu/user/satish/CompositesA-final%20published.pdf>
- [19] Safety issues with advanced composite materials, Greg Mellema, 1.10.2002
https://www.aviationpros.com/article/10387483/safety-issues-with_advanced-composite-materials
- [20] How Long do Fiberglass Boats Last?, viitattu 10.11.2018
http://www.ericgreeneassociates.com/images/Boat_Longevity.pdf
- [21] FARNBOROUGH: Boeing presses on with 787 flight-testing, Ostrower Jon, 11.7.2010
<https://www.flightglobal.com/news/articles/farnborough-boeing-presses-on-with-787-flight-test-343871/>
- [22] Composite pipes capture water and sewage markets, Marsh George, 1.9.2009
<https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/composite-pipes-capture-water-and-sewage-markets/>
- [24] LASS, Lightweight Construction Applications at Sea, Hertzberg Tommy, 2009
http://e-lass.eu.loopiadns.com/media/2016/08/LASS-SP_Report_2009_13.pdf
- [25] Norsepower Oy Ltd. verkkosivut, viitattu 25.11.2018
<https://www.norsepower.com/technology>
- [26] Komposiitit Loputtomasti mahdollisuuksia, Muoviteollisuus ry, 04.05.2016

https://www.plastics.fi/document.php/1/252/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksi/9e832437f8e4e6f3e76e45b5d93d6bf1

[27] Use of Fiber Reinforced Plastics in Ship Construction: A Study of SOLAS regulation II-2/17 on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety, 2015

<https://core.ac.uk/download/pdf/38467591.pdf>

[28] Kuva 4.3 Pelastusvene

http://alsafwanmarine.com/img/five_yearly_inspections.jpg

[29] Kuva 4.9 SuperSport

https://farm3.static.flickr.com/2901/14766655096_58c912978f_b.jpg

[30] Kuva 3.3 Aramidimatto

https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1q2aILVXXXXXQaXXXq6xXFXX1/1100D-200gsm-Yellow-Kevlar-Fabric-PARA-ARAMID-SYNTHETIC-Aramid-fiber-Cloth-plain-NOMEX.jpg_640x640.jpg

[31] Kuva 4.6 Zumwalt

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/32/Future_USS_Zumwalt%27s_first_underway_at_sea.jpg/800px-Future_USS_Zumwalt%27s_first_underway_at_sea.jpg

[32] Kuva 4.5 Visby-luokan alus

http://mb.cision.com/Public/183/2451438/ab10b4df34a57ac4_800x800ar.jpg

[33] Kuva 3.11 Kerroslevy

https://pure.sabanciuniv.edu/sites/pure.sabanciuniv.edu/files/project-public-reports/pure_final_report-mine_uras.pdf

[34] Kuva 4.2 Roottoripurje

<https://www.betterworldsolutions.eu/wp-content/uploads/2015/06/Rotor-Sails-saves-cargo-ships-up-to-20-percent-fuel-300x201.jpg>

[35] Kuva 3.12 Hiilikuitulaminaatti

https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nac_march2017_ifalker_stri_tagged.pdf

[36] Kuva 3.1 Lasikuitumatto

[https://www.rapidrcmodels.com/ekmps/shops/rapid/images/glass-fiber-cloth-450x1000mm-48g-m2-ultra-thin-\[4\]-6501-p.jpg](https://www.rapidrcmodels.com/ekmps/shops/rapid/images/glass-fiber-cloth-450x1000mm-48g-m2-ultra-thin-[4]-6501-p.jpg)

[37] Kuva 3.2 Hiilikuitumatto

<https://img.staticbg.com/thumb/large/oaupload/banggood/images/42/E6/c692a13e-90e5-431d-b7f2-e2f187792220.jpg>

[38] Kuva 4.1 Taiko-Maru CFRP

https://www.motorship.com/_data/assets/image/0030/429951/varieties/1200.png

[39] Kuva 4.4 CFRP potkuriakseli

<https://www.regalbeloit.com/-/media/Files/Literature/Industries/Marine/Marine-Literature-Jaure-Form-9517E-June-4-2017.pdf>

[40] Kuva 4.7 Vahterpää

<https://i.imgur.com/TwLorQMm.jpg>

[41] Kuva 4.8 Lasikuituvene

<https://www.tuningdesign.net/tuotekuvat/700x500/2983picture1Upload.jpg>

[42] Kuva 4.10 Purjevene

<https://www.sailingscuttlebutt.com/2013/04/30/first-fiberglass-boat-ever/>

[43] newscientist, 10.3.1983

https://books.google.fi/books?id=9lqwg3iZyH0C&pg=PA658&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (656)

[44] Kansainvälinen merenkulkujärjestö, 20.9.2016

http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/sulphur%20imits%20FAQ_20-09-2016.pdf