



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Matti Murtomäki ja Markus Niinikoski

Komposiittimateriaalien käyttöopas Apuvälinetekniikan opiskelijoille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Apuvälineteknikko

Apuvälinetekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyö

6.11.2018

Tekijä(t) Otsikko	Matti Murtomäki, Markus Niinikoski Komposiittimateriaalien käyttöopas opiskelijoille	Tiivistelmä Apuvälinetekniikan
Sivumäärä Aika	35 sivua + 2 liitettä 6.11.2018	
Tutkinto	Apuvälineteknikko	
Tutkinto-ohjelma	Apuvälinetekniikan koulutusohjelma	
Suuntautumisvaihtoehto	Apuvälinetekniikka	
Ohjaaja(t)	Lehtori Tomi Nurminen Yliopettaja Pekka Paalasmaa	
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena on valmistaa komposiittimateriaalien käyttöopas. Kyseinen opas on suunnattu apuvälinetekniikan opiskelijoille. Opas sisältää tietoa muun muassa yleisimmin käytettävistä materiaaleista sekä työstötekniikoista. Opinnäytetyöhön kuuluu sarja materiaalitestejä kuudella eri komposiittimateriaaliyhdistelmällä. Materiaalitestien tarkoituksena on luoda tukimateriaalia eri komposiittimateriaaliyhdistelmien mekaanisista ominaisuuksista oppaan rinnalle.</p> <p>Tavoitteena on tuottaa opiskelijoille selkeä käyttöopas, jonka avulla opiskelija voivat itsenäisesti perehtyä komposiittimateriaaleihin ja niiden käyttöön. Opasta voidaan hyödyntää, kun nousee tarve perustella komposiittimateriaalien käyttöä työelämässä. Taustan ja perustelun oppaan kirjoittamiseen on luonut kehittyvä työympäristö, jossa vaaditaan yhä laajempaa osaamista eri materiaalien käsittelyyn. Opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä Soleus Proteorin kanssa.</p> <p>Aihealueeseen liittyen löytyy hyvin teoretietoa useasta eri lähteestä. Itse apuvälinetekniikkaan liittyen taas tutkimusta ei ole paljon saatavilla. Sisältö oppaaseen valikoitui olennaisuuden perusteella liittyen apuvälinetekniikan sovelluksiin.</p> <p>Lopputuloksena syntyi komposiittimateriaalien käyttöopas, joka pitää sisällään aihealueeseen liittyvää perustietoa. Lisäksi oppaaseen kuuluu case-mallinen työ, jossa valmistettiin staattinen säärimitainen alaraajaortoosi. Ortoosia valmistettaessa kokeiltiin eri materiaaleja sekä menetelmiä kokeilumielessä ja näiden kokeilujen onnistumista käsitellään oppaassa. Oppaan lisäksi suoritettiin kolmipiste taivutustestejä, siihen soveltuvalla testilaitteella, kuudella eri komposiittimateriaali yhdistelmällä ja testien tulokset käydään läpi opinnäytetyössä.</p> <p>Suoritimme oppaan tukimateriaaliksi sarjan materiaalitestejä, joita voi käyttää tarvittaessa referenssinä materiaalien mekaanisten ominaisuuksien kannalta. Käytetty kolmipiste taivutuslaite ei ollut optimaalinen käytetyn standardin mukaisille testikappaleille, mikä saattoi vaikuttaa testituloksiin. Jatkoa ajatellen olisi hyvä lisä, jos tutkittaisiin enemmän laminaattien väsymisenkestoa.</p>		
Avainsanat	Komposiitti, Hiilikuitu, kolmipistetaivutus, opas	

Author(s) Title	Matti Murtomäki, Markus Niinikoski Composite material guide for Prosthetist and orthotist students
Number of Pages Date	35 pages + 2 appendices 6 november 2018
Degree	Bachelor of health care
Degree Programme	Prosthetics and orthotics
Specialisation option	Prosthetics and orthotics
Instructor(s)	Tomi Nurminen, Senior Lecturer Pekka Paalasmaa, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to manufacture a manual for using composite materials. The manual is mainly made for prosthetist and orthotist students. The manual includes basic techniques and information about most commonly used composite materials. The second purpose of our thesis is to perform series of mechanical tests for six different composite material combinations. The test results can be used as support material with the manual.</p> <p>Our goal is to make a comprehensive collection of information, that students can study independently and learn how to use and work with composite materials. The manual can be utilized when the usage of composite materials needs to be justified. The reason for writing this manual is the ever changing demands of the field of prosthetics and orthotics, where you need to know how to use different materials. The thesis has been made in collaboration with Soleus Proteor Oy.</p> <p>There is a lot of information regarding composite materials, however from the prosthetist and orthotist point of view, there was hardly any information. The manual's content is based on assumed needs and requirements of prosthetic and orthotic applications.</p> <p>The end product is a composite material manual which includes basic information regarding the materials. Also the manual includes a fabrication method of an ankle foot orthosis manufacturing process step by step. The manual includes different composite material manufacturing techniques and methods. We also performed mechanical tests for six different composite material combinations and analyzed the results.</p> <p>We performed a series of material tests as supportive material that can be used with the manual. The universal test machine we used was not ideal for the material tests because the standard used small test specimens.</p>	
Keywords	Composite material, three point bending, manual, carbon fiber

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Lujitteet	2
2.1	Lasikuitu	3
2.2	Hiilikuitu	4
2.3	Aramidi	5
3	Sidosaineet eli hartsit	6
3.1	Epoksit	6
3.2	Polyesterit	6
3.3	Akryylihartsi	7
4	Komposiitti	8
4.1	Laminaatti	8
4.2	Kuituorientaatio	8
5	Koestusstandardit	10
5.1	ASTM D7264 —standardi	10
5.2	Kolmipistetaivutus	11
6	Toiminnallinen opinnäytetyö	12
7	Oppaan kehitysprosessi	13
7.1	Oppaan suunnittelu	13
7.2	Oppaan sisältö	14
7.3	Oppaan rakenne	15
7.4	Oppaan ulkoasu	15
8	Materiaalitestien toteutusosa	16
8.1	Testien suoritus	19
8.2	Materiaalitestien tulokset	21
9	Pohdinta	26
9.1	Tarkkuus	28
9.2	Jatkotutkimus	29
	Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. Komposiittimateriaalien käyttöopas

Liite 2. Testitulokset

1 Johdanto

Komposiittimateriaaleja käytetään monissa apuvälinetekniikan sovelluksissa. Komposiittimateriaaliksi lasketaan kahden eri materiaalin yhdistelmä, jossa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät sekoitu keskenään. Komposiitit rakentuvat matriisista ja lujitteesta. Matriisi toimii sidosaineena, joka sitoo lujitteet yhteen ja suojaa niitä ympäristön vaikutuksilta. Lujitteet voivat parantaa komposiitin mekaanisia ominaisuuksia, lämmönjohtavuutta tai jotain muuta tarvittavaa ominaisuutta (Vuorinen & Mustakangas & Annala n.d.: 3).

Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa apuvälinetekniikan opiskelijoille suunnattu komposiittimateriaalien käyttöopas, jossa käsitellään yleisimpiä apuvälinetekniikassa käytettyjä materiaaleja ja työstötekniikoita. Tavoitteena on luoda opas, josta opiskelija voi itse opiskella ja perehtyä komposiittimateriaalien käyttöön. Opinnäytetyön tarve kumpuaa alati muuttuvasta työelämästä, jossa vastavalmistuneilta vaaditaan laajempaa osaamista eri materiaalien käsittelyn osalta. Osaa komposiittimateriaaleja ja niiden käyttöä ympäröi epävarmuus ja epätietoisuus, jota haluamme vähentää oppaalla. Eri komposiittimateriaalien käyttö pohjautuu apuvälinealoilla useasti pelkästään kokemukseen ja opittuihin käytäntöihin, eikä tutkittuun tietoon.

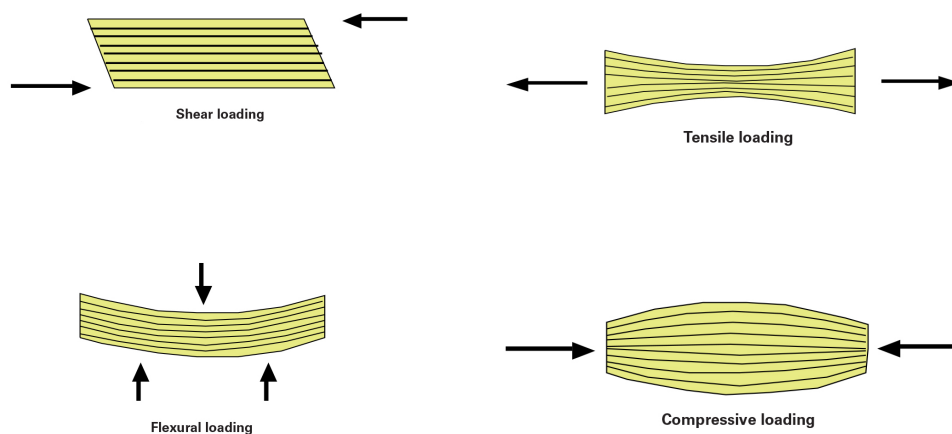
Oppaan lisäksi opinnäytetyössä selvitetään kuuden eri komposiittimateriaaliyhdistelmän mekaanisia ominaisuuksia ASTM D7264 -standardin mukaisella kolmipistetaivutuskokeella. Käytämme standardoitua testiasetelmaa, jotta koetulokset olisivat vertailukelpoisia muiden saman standardin mukaan suorittamiin kokeisiin verrattuna. Materiaalitestien tulosten tarkoituksena on havainnollistaa eri komposiittiyhdistelmien välisten mekaanisten ominaisuuksien eroja.

Opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä Soleus Proteorin kanssa. Saimme hyödyntää yrityksen työtiloja, työvälineitä ja materiaaleja. He myös tarjosivat konsultaatiota liittyen oppaassa olevan käytännön harjoituksen toteutuksessa.

2 Lujitteet

Lujitteiden tarkoituksena komposiittimateriaalissa on parantaa sen mekaanisia ominaisuuksia ja ottaa vastaan komposiittiin kohdistuvia kuormituksia. Lujitteeksi katsotaan kuidut, jotka on valmistettu kyseistä tarkoitusta varten. Yleisimmät lujitekuidut ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Muita lujitekuituja ovat luonnonkuidut, boori- ja piikarbidikuidut sekä keraamiset kuidut. Lujitemuoveissa lujitteita käytetään monessa eri muodossa, kuten katkokuituna, lankana, mattona tai kankaana. Yleisimmät lujitemateriaalin käyttömuodot ovat tasolujitteet eli lujitematot ja lujitekankaat. Nämä voidaan valmistaa katkotuista kuiduista sideaineen avulla tai jatkuvista kuiduista kutomalla. Yksi yleisesti käytetty kangastyyppe on kudot, jossa toisiinsa nähden kohtisuorat lujitekimput kulkevat vuoroin toistensa yli ja ali. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2003: 19—20, 74.)

Kappaleeseen kohdistuu neljää eri kuormitusta: vetoa, puristusta, leikkausta ja taivutusta. Eri lujitemateriaaleilla ja kuitusuunnilla voidaan vahvistaa halutun kuorman kestävyttä. Neljä tärkeintä tekijää, jotka määrittävät komposiittimateriaalin ominaisuuksia ovat: lujitekuidun mekaaniset ominaisuudet, lujitekuidun ja käytetyn hartsin välinen käyttäytyminen, lujitekuidun määrä komposiitissa ja lujitekuitujen suunnat. (Gurit 2017: 6, 24.)



Kuvio 1. Laminaatin kuormituksen eri muodot. (Image ©Gurit)

2.1 Lasikuitu

Lasikuitua valmistetaan sulatusprosessilla, jossa lasin raaka-aineet sulatetaan homogeeniseksi massaksi. Lasimassa sisältää raaka-aineiden saatavuudesta riippuen esimerkiksi kvartsihiekkaa, kaoliinisavea, kolemaniittia ja kalkkikiveä, joiden pitoisuudet vaikuttavat lopullisen lasikuidun ominaisuuksiin. Lasimassa vedetään rei'itetyn suuttimen läpi noin 50-150 km/h nopeudella. Tämän jälkeen lasikuidut jäähdytetään vesisuihkulla ja niihin lisätään pinnoite. Pinnoitteen tarkoituksena on muodostaa kuiduista kimppu, suojata kuituja ja antaa kuiduille erilaisia pintaominaisuuksia. (Saarela ym. 2003: 75—78.)

On olemassa erilaisia lasikuituja, joita ovat muun muassa e-lasi, c-lasi ja r/s/t-lasi. Näitä voidaan valmistaa käyttämällä erilaisia materiaaleja valmistusvaiheessa. E-lasi (electrical) on yleisin käytettävä lasikuitu, jolla on hyvä vetolujuus, puristuksen kesto, jäykkyys, kemiallinen kestävyys ja se on halpaa. Tämä johtuu kyseisen lasin vähäisestä alkalipitoisuudesta. Sillä on kuitenkin suhteessa S-lasiin huono iskunkestävyys. C-lasi (chemical) kestää kemikaaleja parhaiten ja sitä käytetään yleensä uloimmassa laminoinnin kerroksessa suojaamaan kemikaalien vaikutuksilta lähinnä putkistoissa ja säiliöissä. R-, S- tai T-lasi ovat eri valmistajien samat ominaisuudet omaava lasikuitutyyppi, jolla on parempi vetolujuus E-lasiin verrattuna. Tämä on kuitenkin suhteellisen kallista verrattuna E-lasiin. (Gurit 2017: 28.)

		A-lasi	C-lasi	E-lasi	S-lasi
SiO₂	p%	72	64,5	55	65
Al₂O₃+Fe₂O₃	p%	2	4	4,5	25
CaO	p%	10	13,5	21,5	-
MgO	p%	2	3	0,5	10
Na₂O+K₂O	p%	14,5	10	<1	-
B₂O₃	p%	-	5	7,5	-
Vetolujuus	Gpa	3,1	3,3	3,6	4,6
Kimmokerroin	Gpa	72	70	75	86

Kuvio 2. Lasikuitujen ominaisuuksia (Saarela ym. 2003: 75)

2.2 Hiilikuitu

Hiilipitoisuudeltaan korkeaa kuitua eli 95—99 %, jolla on suuri lujuus ja korkea kimmomoduuli, kutsutaan hiilikuiduksi. Hiilikuitua käytetään, kun vaaditaan keveyttä, lujuutta ja jäykkyyttä kappaleeseen. Hiilikuidulla on myös erittäin hyvät puristus-, veto- ja taivutuslujuudet. Hiilikuitulaminaatit ovat murtorajaan asti kimmoisia eikä niissä ilmene plastista muodonmuutosta, eli kappale palautuu alkuperäiseen muotoonsa taivutusvoiman poistamisen jälkeen, jos myötörajaa ei saavuteta. Hiilikuitukomposiitilla on huonompi iskunkestävyys kuin aramidikomposiitilla. (Saarela ym. 2003: 87.)

Kuitua valmistetaan kontrolloidussa prosessissa hiilirikkaasta orgaanisesta kuidusta. Suurin osa valmistetusta hiilikuidusta on polyakryylnitriili pohjaista (PAN). PAN-kuidusta voidaan valmistaa taloudellisesti jatkuvana prosessina tasalaatuista hiilikuitua. Prosessi voidaan jakaa viiteen osaan: hapetus, hiillytys, grafitointi, kuidun pintakäsittely ja käsittely viimeistelyaineella. Hiilikuitua voidaan myös valmistaa luonnonasfaltista ja kivihiilitervasta. Ne ovat halvempia lähtöaineita kuin PAN-kuitu. Pikipohjainen hiilikuitu on hauraampaa, vetomurtolujuudeltaan heikompaa ja ominaispainoltaan painavampaa kuin PAN-kuidusta valmistettu hiilikuitu. (Saarela ym. 2003: 81—85.)

Hiilikuitukimppua kutsutaan touviksi ja yksittäistä lankaa kutsutaan filamentiksi. Filamenttiluku kertoo, että kuinka monta filamenttia touvissa on. Hiilikuituja jaotellaan filamenttiluvun mukaan, raja suurilukuisten ja pienilukuisten hiilikuitujen välillä on 50 000. Yleisin hiilikuitulaatujen jaottelu tapahtuu kimmomoduulin mukaan esimerkiksi SM-kuitu (Standard modulus) 270-320 GPa, HM-kuitu (High modulus) >340GPa ja UHM-kuitu (ultra high modulus) >440GPa. (Saarela ym. 2003: 85.)

2.3 Aramidi

Aramidikuitu eli aromaattinen polyamidi, yhdeltä kauppanimeltään kevlar, on teollisesti valmistettu polymeeri, jota valmistetaan kehräämällä nestemäisestä seoksesta, joka sisältää tyypillisesti PPTA-polymeeriä ja vahvaa rikkihappoa (Teijin Aramid n.d.). Aramidikuitu on vahvaa, joustavaa, kestää iskuja, hankausta, kemikaaleja ja kuumaa (Aramid Fiber n.d.). Aramidikuitu ei kuitenkaan kestä ultraviolettivaloa, vaan altistuminen heikentää sen kestävyyttä. Lisäksi aramidikuitu ei siedä painetta hyvin (Gurit 2017: 29).

Aramidikuidulla on huonompi tartuntaominaisuus matriiseihin, kuin esimerkiksi hiili- ja lasikuidulla. Tämä on nähtävissä mm. laminaattia hiottaessa paljastunut aramidikuitu nukkaantuu. Aramidikuidut pystyvät rajoittamaan halkeamien leviämistä ja estämään katastrofaalista murtumista (Saarela ym. 2003: 91), mikä lisää käyttöturvallisuutta mm. ortotiikassa. Yleisimmät käyttökohteet ovat mm. sotilasajoneuvoissa, komposiittimateriaalien vahvikkeena, palon- ja pistonkestävissä asusteissa sekä elektroniikan komponenteissa (Aramid Fiber n.d.).

3 Sidosaineet eli hartsit

Sidosaineet ovat matriisimuoveja, jotka sitovat lujitteet sekä vahvikkeet ja yhdessä muodostavat komposiittimateriaalin. Yleisimmät lujitemuoviteollisuudessa käytetyt kertamuovit ovat epoksit, vinyyliesterit ja tyydyttymättömät polyesterit. Hartsit on kertamuovin perusraaka-aine, josta kemiallisen kovettumisreaktion jälkeen syntyy kertamuovia. Reaktiossa hartsin polymeeriketjut kytkeytyvät toisiinsa eli silloittuvat verkkomaiseksi rakenteeksi. Kertamuoveja käytetään matriisiaineena muovikomposiittirakenteissa. Hartsiin voidaan lisätä pieniä määriä apu- seos- ja täyteaineita muokkaamaan komposiitin ominaisuuksia. Kovettumisreaktio kertamuoveissa etenee hitaasti alussa ja reaktion lopussa nopeasti, jonka aikana laminaatin lämpötila nousee. (Saarela ym. 2003: 18-19.)

3.1 Epoksit

Epoksihartsit ovat polymeerejä tai oligomeerejä, joissa on vähintään kaksi epoksiryhmää. Epoksiryhmä on reaktiivinen ja rengasmainen kemiallinen molekyyli rakenne. Kovettuaakseen epoksihartsit vaatii kovetteen, joita voivat olla amiini-, happo- tai alkoholianhydridiyhdiste. Epoksihartseja on useita erilaisia ja lähes kaikki monifunktionaaliset fenolit, glykolit, polyolit ja bisfenolit voidaan epoksoida epoksihartsiksi. (Saarela ym. 2003: 45.)

Epoksihartsien kovetteet ovat reaktiivisia kovetteita ja ne voidaan jakaa happoihin ja emäksiin. Kovete muodostaa epoksihartsin verkkorakenteesta suuren osan. Kovete ja hartsit on annosteltava tarkasti, sillä jos suhde on väärä, niin osa seoksesta jää reagoimatta, mikä heikentää epoksimuovin ominaisuuksia. Epokseilla on paremmat mekaaniset ominaisuudet polyesterihartseihin verrattuna. (Saarela ym. 2003: 47.)

3.2 Polyesterit

Polyesterihartsit on seos styreeniä ja tyydyttymättömää polyesteriä. Kyseinen hartsit jähmettyy, kun ainesosat reagoivat keskenään silloittumisreaktiossa. Polyesterihartsia valmistetaan esteröimällä dikarboksyylihappoa ja diolinia. Dikarboksyylihappo on orgaaninen kaksiarvoinen happo, joka sisältää kaksi happoryhmää. Diolin taas on kaksiarvoinen alkoholi, joka sisältää kaksi hydroksyyli ryhmää. (Saarela ym. 2003: 37—39.)

Polyesterihartsin ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäaineilla. Lisäaineita ovat kiihdytteet, inhibiittorit, haihtumisen estoaineet, tiksotrooppiset aineet ja uv-stabilisaattorit. Kiihdyttimet nopeuttavat kovettumisaikaa huoneenlämpötilassa. Inhibiittorit taas hidastavat kovettumisaikaa, mikä lisää työstöaikaa. Haihtumisen estoaineet vähentävät laminointivaiheessa styreenin haihtumista, mikä muuten aiheuttaa sen, että hartsin pinta ei kovetu kunnolla vaan jää tahmeaksi. Tiksotrooppiset aineet taas lisäävät viskositeettia, mikä vähentää hartsin valumista. (Saarela ym. 2003: 40, 41.)

Polyesterihartsi kovettuminen tapahtuu radikaalireaktiossa, jolloin vapaat radikaalit muodostavat kovalenttisia sidoksia keskenään. Lopputuloksena syntyy silloittunut rakenne ja syntyy yksi suuri molekyyli, jossa kaikki polyesteriketjut ovat sitoutuneet toisiinsa styreenisiltojen avulla. (Saarela ym. 2003: 41.)

Polyesterihartsin adheesiokyky vertailtaessa epoksihartsiin on huonompi. Lisäksi polyesterihartsi kutistuu jopa 8% kovettuessaan, kun epoksi taas vain 2%. Veden sietokyky on myös heikompaa polyestereilla kuin epokseilla. Polyesterihartsin vetomoduuli ja –vahvuus on heikompaa kuin epoksihartsilla. (Gurit 2017: 20–22.) Polyesterihartsi kuitenkin on huomattavasti edullisempaa ja prosessiajaltaan nopeampaa kuin epoksihartsi.

3.3 Akryylihartsi

Polymetyylimetakrylaatti, jota usein myös kutsutaan akryyliksi, on synteettinen polymeeri. Sitä valmistetaan polymerisoimalla metyylimetakrylaattia. PMMA on kovaa ja jäykkää muovia, jolla on myös erinomaiset optiset ominaisuudet. Lisäksi sillä on hyvä uv:n ja sään sieto ominaisuus. Lisäksi se on termoplastinen eli sitä voidaan muokata lämmittämällä. (Britannica A n.d.) Sitä käytetään sen valoa läpäisevän ominaisuuden vuoksi muun muassa valomainoksissa, akvaarioissa ja ikkunoissa (Muoviteollisuus ry n.d.).

4 Komposiitti

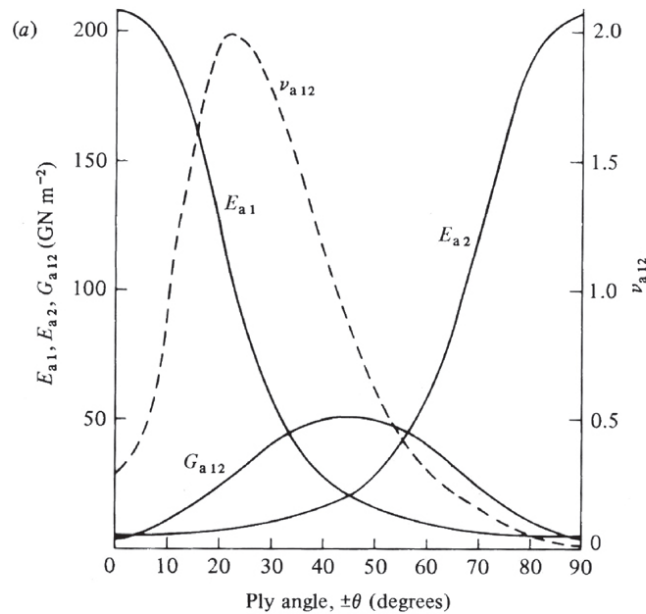
Yksinkertaisimmillaan komposiittimateriaali koostuu kahdesta eri materiaalista, jotka eivät ole sulaneet tai lienneet toisiinsa, mutta kuitenkin toimivat yhdessä. Joissain tapauksissa nämä kaksi materiaalia ovat tasavertaisia keskenään niin, että kummankaan tehtävää ei voida määrittää komposiitissa. Käytännössä kuitenkin toinen materiaaleista toimii sitovana ainesosana eli matriisina ja toinen materiaaleista toimii vahvikkeena. Esimerkiksi lasikuituveneessä polyesterihartsin toimii matriisina ja katkolasikuitu toimii vahvikkeena. Muoviaineen ja eri vahvistekuitujen muodostamia komposiitteja kutsutaan lujitemuoveiksi tai kuitulujitteiksi muoveiksi. (Saarela ym. 2003: 17.)

4.1 Laminaatti

Laminaatilla tarkoitetaan komposiittituotetta, joka muodostetaan kerroksia yhteen liimaamalla. Rakenne on yleensä levymäinen, jolloin lujitteet ovat kerroksittain levytasossa. Komposiittimateriaaleja tehdessä yleensä tarkoitetaan kuitulujitteisia tuotteita, jotka sisältävät vähintään kaksi lujitekerrosta. (Saarela ym. 2003: 457.) Kun komposiittituotteita valmistetaan laminoimalla, käytetään lujitteita ja sidosaineita. Lujitteina toimivat yleensä kuidut esim. hiilikuitu ja sidosaineena hartsit eli kertamuovit.

4.2 Kuituorientaatio

0°, 90° ja +/-45° kerrossuuntia sisältävät laminaatit kestävät hyvin sekä normaali- että leikkauskuormia (Saarela ym. 2003: 376). Selkokielelle käännettynä tämä tarkoittaa sitä, että kuidut ovat vahvimmillaan siihen suuntaan mihin ne kulkevat. Käytännön työssä voidaan ajatella, että +/-45° kuitusuuntakerros tuo kiertojäykkyyttä, 90° puolestaan lisää jäykkyyttä kahteen eri suuntaan/perusjäykkyyttä ja 0° on yksisuuntaista, jolla voidaan saada lisäjäykkyyttä haluttuun suuntaan. Yhteen suuntaan lujitettu laminaatti on rakenteena hauras, joten poikittaista lujitetta on aina hyvä lisätä (Saarela ym. 2003: 376). Lisäksi laminaatit, joissa on leikkausjäykkyyttä lisääviä +/-45° lujitekerroksia, tuovat merkittävästi lisää stabiliteettia, mikä auttaa estämään rakennetta merkittävästi heikentäviä kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia (Saarela ym. 2003: 376, 377).



Typical effect of ply angle on carbon laminate

Kuvio 3. Kuitusuunnan vaikutus hiilikuitulaminaattiin. (Image ©Gurit)

Laminaatin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa vahvikekerrosten kuitujen suuntaukset. Mekaaniset ominaisuudet, joita ovat Youngs modulus (kimmomoduuli), shear modulus (leikkausmoduuli) ja poissonin ratio (poissonin vakio). Kimmomoduuli kuvaa materiaalin jäykkyyttä eli kuinka se taipuu tai venyy, kun siihen kohdistuu taivutusta tai puristusta (Engineering ToolBox A 2003). Leikkausmoduuli taas kuvaa kappaleen jäykkyyttä ja miten se kestää transversaalitason muodonmuutosta sekä pystyykö kappale palaamaan alkuperäiseen muotoonsa rasituksen jälkeen (Britannica B n.d.). Poissonin vakio kuvaa sitä, kun kappaletta venyttää yhteen suuntaan niin sillä on tapana oheta poikittaisessa suunnassa (Engineering ToolBox B 2008). Esimerkiksi kun kuminauhaa jännittää, niin se venyy pituussuunnassa, mutta se ohenee samalla.

5 Koestusstandardit

Koeolosuhteet ja koestustavat vaikuttavat kokeiden tuloksiin. Onkin välttämätöntä vertailukelpoisten tulosten saamiseksi, että samankaltaiset kokeet suoritetaan samalla tavalla samanlaisissa olosuhteissa. Tämän takia koemenetelmiä ja koelaitteistoja on standardoitu. Kattava muovikomposiittien koestuksiin liittyvä standardikokoelma on amerikkalainen ASTM-standardikokoelma (American Society for Testing and Materials). Muita keskeisiä standardikokoelmia ovat saksalaiset DIN-standardit, SAE (Society of Automotive Engineers), MIL-standardit, ISO ja EN-standardit. Standardien tarkoituksena on määritellä eri tekijät, jotka vaikuttavat kokeen lopputulokseen. Esimerkiksi koeolosuhteet, koekappaleen koko ja muoto, kokeen suoritustapa ja mittauslaitteisto. Standardit ottavat myös kantaa miten tulokset kirjataan ylös ja miten niitä voi käsitellä. Joskus standardin määrittämään koeasetelmaan tehdään poikkeuksia, niin muutokset on kirjattava ylös ja ilmoitettava koetuloksissa. Jos koe tehdään standardin mukaisesti, koekuvaukseksi riittää standardi koemenetelmän kuvaukseksi. (Saarela ym. 2003: 289.)

5.1 ASTM D7264 —standardi

Materiaalitestissä käytetään ASTM internationalin muovikomposiiteille tarkoitettua koestus standardia D7264 / D7264M - 07 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Kyseisessä standardissa käydään läpi testimetodi, jolla voidaan määrittää polymeeri komposiittimateriaalin taivutusominaisuuksia. Kyseisessä standardissa käydään yksityiskohtaisesti läpi materiaalitestin eri vaiheet ja muuttujat.

Standardin mukaan tukipisteiden ja kuormituspään säteen tulisi olla 3 millimetriä. Testikappaleiden tulee olla 13 millimetriä leveitä ja support span to thickness suhdeluvun eli tukipisteiden etäisyyden suhde testikappaleen paksuuteen tulee olla 32:1. Standardi testikappaleen paksuus on 4 millimetriä, mutta standardin mukaan ohuempiakin testikappaleita voi käyttää. (ASTM D7264 2007: 3-5)

5.2 Kolmipistetaivutus

Koekappale asetetaan kahden pyöreän rullamaisen tuen päälle ja kappaletta kuormitetaan keskeltä yhdellä pyöreällä kuormituspäällä tasaisella vauhdilla. Kappaleen taipumista keskeltä mitataan ja käytettyä voimaa myös. Kolmipistetaivutuksella voidaan määrittää koekappaleen taivutusmoduuli (Pa), taivutuslujuus (Pa), voima (N) ja taipuminen (mm). (Saarela ym. 2003: 300.) Taivutusvoimat ovat yhdistelmä veto-, puristus- ja leikkausvoimia. Yläpintaan kohdistuu puristusta, alapintaan vetoa ja laminaatin keskiosaan kohdistuu leikkausvoimia (Gurit 2015: 7).



Kuvio 4. Kolmipistetaivutus testiasetus r 10mm tukipisteillä ja r 50mm kuormituspäällä

6 Toiminnallinen opinnäytetyö

Vilkan ja Airaksisen mukaan toiminnallinen opinnäytetyö tavoitteena on ohjeistaa ja opastaa käytännön toimintaa ammatillisessa kentässä, kuten esimerkiksi perehdyttämisoas johonkin aiheeseen. Toteutusmuoto valitaan kohderyhmän mukaan ja muoto voi olla kirja, vihko, CD, opas tai jokin muu. Toiminnallinen opinnäytetyö yhdistää käytännön toteutuksen ja siitä raportoinnin tutkimusviestinnän keinoin. (Vilka ja Airaksinen 2003: 9)

Vilka ja Airaksinen kirjoittavat, että määrällisen tutkimusmenetelmän keinoja voi käyttää toiminnallisessa opinnäytetyössä silloin, kun opinnäytetyön tueksi tarvitaan numeraalista tietoa, joka on mitattavissa. He myös kirjoittavat, että selvityksen ongelma tulee määritellä toiminnalliseen opinnäytetyöhön liittyvästä asiaongelmasta, esimerkiksi selvityksen tarkoituksena heidän mukaan voi olla puuttuvan tiedon kerääminen tai kohderyhmän määrittäminen. Kerätyn tiedon kuuluu olla järjestelmällistä ja harkittua. (Vilka ja Airaksinen 2003: 56—60.) Vilka ja Airaksinen keskittyvät teoksessaan käsittelemään enemmän lomakekyselyitä, mutta heidän periaatteensa soveltuvat hyvin suunniteltuihin materiaalitesteihin. Selvityksen tavoitteena on kerätä kirjallisuudesta puuttuvaa lähdetietoa ja selvityksellä kerätty aineisto on tilastollisesti merkitykseltä, mutta aineisto on silti analysoitava. (Vilka ja Airaksinen 2003: 62.)

Alusta asti meille oli selvää, että tulemme tekemään sarjan materiaalitestejä komposiittimateriaalioppaan rinnalle, sillä oppaan yksi asiaongelmista on eri laminaattien mekaanisten ominaisuuksien tiedon puute. Halusimme luoda oppaan rinnalle keskenään vertailukelpoista tietoa ja myöskin noudattaa koestusstandardia, jotta tuottamamme tieto olisi vertailukelpoista myös muiden samalla standardilla tuottamaan tietoon.

7 Oppaan kehitysprosessi

Mertanen kirjoittaa kirjassaan Tietokirjoittajan Käsikirja, että kaikki paitsi kaunokirjallisuus on tietokirjallisuutta pois lukien lasten tietokirjat. Tietokirjallisuus ei perustu pelkästään mielikuvitukseen ja tietokirjoissa tieto on käyttö- ja lukukelpoisessa muodossa. (Mertanen 2007: 9.) Raimo Jussilan mukaan tietokirjallisuuden kenttä on sekava ja moni-ilmeinen. Tietokirjallisuutta luokitellaan eri tavoin eri näkökulmista. Hänen mukaan tietokirjallisuus pitää sisällään kaiken tiedon, mutta itse tietokirjallisuudesta tiedetään puutteellisesti. Tietokirjallisuudelle on kuitenkin hänen mukaan esitetty kuuden luokan mallia, jotka ovat: tutkimus-, haku-, opas-, oppi-, mielipide-, ja yleinen tietokirjallisuus. Näistä lajeista opaskirjallisuus on laaja ja monimuotoinen kirjallisuuden laji. Se on tärkeä kirjallisuuden muoto käytännön elämän kannalta. (Jussila 2006: 12, 23.)

Ennen prosessin alkua meillä oli kysymyksiä, jotka lähetimme kahdelle apuvälineitä valmistavalle yritykselle. Toinen yrityksistä on saksalainen suuri apuvälineitä ja komponentteja valmistava yritys Otto Bock ja toinen saksalainen ortoosikomponentteja valmistava yritys Fior&Gentz. Kysymyksillä pyrimme kartoittamaan, että millä tavalla he käyttävät komposiittimateriaaleja apuvälineissä ja miten he edistävät komposiittimateriaalien kehitystä. Käytimme heiltä saatuja vastauksia apuna oppaan rakenteen ja sisällön suunnittelussa. Kysymykset ja vastakset löytyvät liitetiedostoista.

7.1 Oppaan suunnittelu

Omien opintojen aikana kaipasimme opasta, josta olisi voinut helposti hakea tietoa suomeksi. Tällaista emme kuitenkaan onnistuneet löytämään, joten päätimme valmistaa sellaisen. Aloimme miettimään, millaisen oppaan haluamme tuottaa, täysin teoreettisen vai käytännön läheisen, helppolukuisen vai enemmän pohjatietoja vaativan. Rentolan mukaan hyvän oppaan kuuluu auttaa lukijaa oppimaan uutta, tietämään ja tekemään. Opasta kirjoittaessa hänen mukaan lukijan tarpeet tulee ottaa huomioon ja lukijan lähtökohdat, mitä hän tietää entuudestaan, mitä lukija tarvitsee oppaalta ja oppiiko lukija oppaan luettuaan jotakin uutta. (Rentola 2003: 92—93.) Rentolan esittämät argumentit olivat yksinkertaisia ja selkeitä, mutta haastavammaksi kohdaksi paljastui oppaan suuntaaminen apuvälinetekniikan alan opiskelijoille. Lähtökohtaisesti apuvälinetekniikan alalle suuntautuneet oppaat ovat olleet erilaisia valmistusoppaita, joita seuraamalla

pystyy valmistamaan yhden tuotteen, esimerkiksi hiilikuidusta valmistetun säärimittaisen alaraajaortoosin.

Mielestämme sen kaltaiset oppaat eivät mene tarpeeksi syvälle komposiittimateriaaleihin ja niiden käyttöön, mutta kuitenkin ovat tärkeitä materiaalien käytön ja käsittelyn oppimisen suhteen. Tämän takia halusimme, että oppaassamme on laaja teoriapohja ja käytännön opetuksia myös.

Oppaan kohderyhmäksi valikoitui apuvälinetekniikan opiskelijat siitä syystä, että meillä molemmilla oli vahva mielipide oppaan tärkeydestä ja hyödyllisyydestä koulutusohjelmaa täydentämään. Kohderyhmän valinta näkyy oppaan sisällössä, sillä sisältö on kohdennettu tulevan apuvälinetekniikan tarpeisiin. Opas ei kuitenkaan ole niin suunnattu apuvälineteknikoille, etteikö siitä olisi hyötyä myös muille asiasta kiinnostuneille.

7.2 Oppaan sisältö

Oppaan sisältöä varten kerättiin tietoa komposiittimateriaaleihin liittyvästä kirjallisuudesta, artikkeleista, valmistajien oppaista, sekä alan yritysten kanssa käydyistä sähköpostikeskusteluista alan yritysten kanssa. Etsimme aluksi tietoa sähköisistä tiedonhakuportaaleista (LibGuides, SFS, PubMed) hakusanoilla komposiitti, komposiittimateriaali, laminaatti, kolmipistetaivutus, hiilikuitu, materiaalitesti, standardi ja komposiittimateriaaliopas. Emme kuitenkaan onnistuneet tätä kautta löytämään tietoa, joka soveltuisi tähän käyttötarkoitukseen ja mikä toisi lisäarvoa työhömmme.

Ohjeistusten, käsikirjojen ja oppaiden kohdalla lähdekritiikkiin on kiinnitettävä huomiota. Tulee kiinnittää huomiota, mistä tieto on hankittu, onko tieto ajantasaista ja lähteiden oikeellisuus ja luotettavuus on kuvattava jotenkin. Ensisijaiset lähteet ovat toissijaisia lähteitä luotettavampia, sillä toissijaiset lähteet ovat ensisijaisen tiedon tulkintaa. Lähteen luotettavuutta voi myös arvioida sen kirjoittajan tunnettavuuden ja auktoriteetin kautta. Jos yhdellä kirjoittajalla on aiheeseen paljon liittyviä tutkimuksia, on hän todennäköisesti tunnettu ja luotettava lähde. (Vilka ja Airaksinen 2003: 53,72—73.)

7.3 Oppaan rakenne

Oppaan teoriaosuudessa käsittelemme yleisimpiä käytettyjä komposiittimateriaaleja ja avaamme tärkeitä käsitteitä, jotta lukija oppisi niin sanotun yhteisen ammattikielen, mikä helpottaa työskentelyä myöhemmin. Oppaan teoriaosuus on koonti monesta ajankohtaisesta lähteestä. Suurin osa alan kirjallisuudesta on englanniksi, mikä muodostuu haasteeksi, jos termejä ei ymmärrä ja joskus käännöksissä voi tapahtua virheitä. Halusimme kirjoittaa oppaan suomeksi, koska se on yleisin työkieli apuvälineteknikoilla Suomessa. Kirjoittajien eli meidän tuoma näkökulma oppaaseen on melko neutraali ja persoonaton, koska oppaan aihealue on melko haastava ja monimutkainen. Rentola kirjoittaa, että neutraali ja persoonaton näkökulma voi olla hyvä arkojen, ristiriitaisten tai vaikeatajuisten aiheiden kanssa. Rauhallinen ja etäinen näkökulma helpottaa lukijan pohtimista. (Rentola 2006: 95.)

Aloitimme oppaan tekemisen siten, että laadimme ensin tulevan oppaan rungon ja mitä teoriatietoa opas tulisi pitämään sisällään sekä minkä koimme opiskelijoiden kannalta oleelliseksi. Kun oppaan runko ja sisältö oli määritetty, niin seuraavaksi alkoi teoreettisen viitekehyksen kerääminen ja sijoittaminen oppaan runkoon sopivaksi. Tämän jälkeen perehdyimme oppaan laatimiseen ja mietimme, että millaisen ulkoasun valitsemme ja miten saamme sen suunnattua kohderyhmällemme eli apuvälinetekniikan opiskelijoille

7.4 Oppaan ulkoasu

Tietokirjallisuudessa tekstin rakenne on laadukas, kun teksti rakentuu tärkeysjärjestyksen mukaan. Asioita voidaan kertoa myös kronologisesti, esimerkiksi kronologinen järjestys sopii prosessin kuvaamiseen. Tekstin mielekkyyttä lisää vaihtelevuus, katkokset ja kuvat. (Mertanen 2007: 37—40.) Halusimme oppaan ulkoasun olevan pelkistetty selkeän jäsentelyn takia. Emme myöskään käyttäneet värejä tai isoja kuvia oppaassa, mikä helpottaa esimerkiksi oppaan tulostusta pajoille käytettäväksi. Halusimme myös, että opasta olisi helppo lukea ja tulkita, vaikka ei olisikaan laajaa alakohtaista osaamista. Oletuksena kuitenkin oli, että kohderyhmä ymmärtää perusasiat apuvälinetekniikasta. Näitä ovat esimerkiksi kipsintyöstö, tarvittavan apuvälineen valinta sekä se, että tunnistaa pajoilla käytettävät materiaalit. Näihin asioihin emme pyrkineet ottamaan kantaa, vaan puhtaasti teoriatiedon tarjoamiseen sekä valmistustekniseen näkökulmaan. Opas rakentuu loogisesti teoria osiosta ja käytännön osuudesta, jossa kuvataan erään komposiittivalmistustekniikan prosessi.

8 Materiaalitestien toteutusosa

Testikappaleet valmistettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Kalevankadun toimipisteen kylmälaboratoriossa. Valmistusmetodina käytettiin alipaineinjektiota ja muottina toimi lasilevy parhaan mahdollisen pinnanlaadun saavuttamiseksi. Hiilikuidusta valmistetut testikappaleet valmistettiin Hexforce PrimeTex 200g/m² Twill 2/2 -tuotteen kudoksesta. Aramidikuidusta valmistetut testikappaleet valmistettiin HexForce 175g/m² 4H satin -tuotteen kudoksesta. Muissa testikappaleissa käytetty Nylglas- ja Perlon-kudos olivat Ottobock konsernin valmistamia. Kaikissa testikappaleissa käytettiin Gurit Prime 20 LV -merkkistä epoksihartsia ja hidasta kovetetta.

Lasilevy puhdistettiin Chemtrend mold cleaner EZ -merkkisellä muotin puhdistusaineella ja kaikki vanhat epoksijäämät poistettiin mekaanisesti. Tämän jälkeen lasilevyille levitettiin Chemlease 15 sealer EZ -merkkistä huokoslakkaa 2 kerrosta ja kerrosten välinen kuivumisaika oli noin 15 minuuttia. Huokoslakka tasoittaa muotin pintaa ja parantaa irrotusaineen tarttumista muottiin. Tunnin lopullisen huokoslakan kovettumisen jälkeen lasilevyille levitettiin Chemlease 75 EZ -merkkistä irrotusainetta 4 kerrosta ja jokaisen kerroksen välissä 20 minuutin kuivumisaika. Työskentelytilan lämpötila oli alle 20 astetta, joten kuivausaikoja pidennettiin valmistajan suosituksista. Irrotusaineen tarkoituksena on mahdollistaa komposiittiosan irtoaminen muotista.

Kuiduista leikattiin noin 30 x 30 cm:n paloja, jotka kiinnitettiin lasilevyyn sprayliimalla. Kuituorientaatio kerrosten välillä oli 0 astetta eli eri kerrosten kuidut kulkevat saman suuntaisesti. Perlon- ja Nyglass-sukista leikattiin kolme palaa, jotka liimattiin päällekkäin sprayliiman avulla. Sukkien päät alkoivat käpristyä leikkausvaiheessa sisäänpäin.

Liimattujen testipalojen päälle asetettiin karhennuskangas, jonka tehtävänä on imeä itseensä ylimääräistä hartsia, muodostaa tasainen pinta koekappaleiden toiselle puolelle ja mahdollistaa johdinverkon irtoaminen kappaleista. Karhennuskankaan päälle asetettiin johdinverkko pienillä tiivistenauhan paloilla kiinni. Johdinverkon tehtävänä on mahdollistaa hartsin virtaaminen tasaisesti alipaineessa. Tämän jälkeen testikappaleiden ympärille asetettiin tiivistenauhaa, johon alipainekalvo kiinnittyy. Hartsin syöttöä ja alipainetta varten kalvon ja tiivistenauhan väliin laitettiin 8mm muoviputkea.

Ennen injektointia, alipainekalvon pitävyys testattiin. Syöttöputki suljettiin ja alipaineputki kytkettiin alipainepumppuun ja testikappaleet vedettiin alipaineeseen. Noin 10 minuutin alipaineistuksen jälkeen imu suljettiin ja odotettiin noin 15 minuuttia ja alipainekalvoa tarkkailtiin mahdollisten vuotojen varalta.

Epoksihartsin ja kovete punnittiin ja sekoitettiin tarkasti. Käytössä oli vanha kirjevaaka, joka punnitsi ainesosat gramman tarkkuudella. Epoksin ja kovetteen painosekoitussuhde oli 100: 26 eli 100 g epoksia kohden 26 g kovetetta. Epoksia käytettiin 400 g ja kovetetta 104 g eli yhteensä 504 g hartsia.

Käytimme hidasta kovetetta, jonka purkkiaika oli noin tunti 20-25 asteessa. Purkkiajalla tarkoitetaan sitä, että minkä ajan seos pysyy geelimäisenä ja työstettävissä, kun seosta on enemmän esimerkiksi purkissa. Pitkän työskentelyajan takia emme tarkkailleet epoksin virtausaikaa. Kun testikappaleet olivat saturoituneet hartsilla, suljimme syötön ja sen jälkeen imun. Injektoinnin jälkeen nostimme huoneen lämpötilan yli 30 asteeseen hallipuhaltimella. Lämpötila vaihteli huoneessa, jonka takia odotimme 48 tuntia ennen kappaleiden purkamista muotista.



Kuvio 5. Epoksi virtaukseen vaikutti ristisyöttö

Käyttämämme epoksihartsin takia kappaleita piti jälkikovettaa eli karaista 16 tuntia 50 asteessa. Jälkikovetus tapahtui Metropolia ammattikorkeakoulun Kalevankadun hitsauslaboratorion uunissa. Jälkikovetuksen jälkeen kappaleista leikattiin standardin vaatimia 13mm leveitä kappaleita. Leikkaustyökaluna käytössä oli kipsisaha, jonka käyttö aiheutti melko suurta vaihtelua kappaleiden leveyksissä.



Kuvio 6. Valmiit testikappaleet

Käytössä olevaan testilaitteeseen oli saatavilla vain 10 millimetrin säteisiä kuormituspäitä ja tukipisteitä. Valmistimme laitteeseen sopivat tukipisteet ja kuormituspään (kuvio 6.), jotka täyttivät standardin ASTM 7264 vaatimukset.



Kuvio 7. Omavalmisteiset tuki- ja kuormituspäät

8.1 Testien suoritus

Materiaalitestien tarkoituksena on toimia tukimateriaalina kirjoittamallemme oppaalle. Testien tuloksista voi päätellä eri laminaattien mekaanisia ominaisuuksia ja niitä voi soveltaa käytännön töissä. Materiaaliteissä keskityttiin yleisimpiin apuvälinetekniikassa käytettyihin materiaaleihin ja laminaattien kerrosrakenteet valittiin vastaamaan apuvälinetekniikassakin käytettäviä kerrospaksuuksia. Testit ovat myös pelkästään suuntaa antavia ja niistä ei saa vastauksia kaikkiin ongelmiin. Komposiittimateriaaliyhdistelmiä on lähes rajattomasti. Ajatusleikkinä jos käytettävissä on 4 eri kuitumateriaalia, 4 eri kudoksella, 3 eri kuitusuuntaa, 3 eri hartsia ja 5 kerrosta laminaatissa saataisiin 720 eri mahdollista yhdistelmää aikaan.

Materiaalitestit suoritettiin Zwick Roell Z250/SW5A (kuvio 8.) testilaitteella Metropolia ammattikorkeakoulun Agricolankadun toimipisteessä. Laite on hankittu vuonna 1996, voima-anturi on kalibroitu laitteen papereista päätellen viimeksi vuonna 2005 ja käytetty mittaväli kalibroinnissa oli 80N - 20kN. Laitteen tietokone ja ohjelmistot on päivitetty uudemmiksi jossain vaiheessa. Testien tarkoituksena oli pyrkiä saamaan sellaista tietoa, joka auttaisi apuvälineteknikoita hahmottamaan, että minkä verran materiaalia tulisi eri komposiittituotteiden valmistuksessa hyödyntää. Tällä hetkellä tätä asiaa on vaikea hahmottaa ja useat apuvälineteknikot luottavat omakohtaisen kokemuksen tuomaan tietoon.



Kuvio 8. Zwick Roell Z250/SW5A yleistestilaite

Testiohjelman parametrit tarkastettiin ennen kokeiden aloittamista ja testiasetelma asetettiin paikoilleen ASTM D 7264 A standardia mukaillen. Taivutusnopeus oli 0,1 millimetriä sekunnissa, testikappale esijännitetään 10 N voimalla ennen testin alkamista ja testilaite pysäyttää testin, kun laite havaitsee testikappaleen hajoamisen. Testikappaleiden ympäristöä tai koeolosuhteita ei normalisoitu. Testikappaleiden paksuus mitattiin työntömitalla, jonka mittatarkkuus oli 0.01 millimetriä

8.2 Materiaalitestien tulokset

Testikappaleryhmät ovat:

3x cf = 3 kerrosta 200 g/m² 2/2 twill hiilikuitua

5x cf = 5 kerrosta 200 g/m² 2/2 twill hiilikuitua

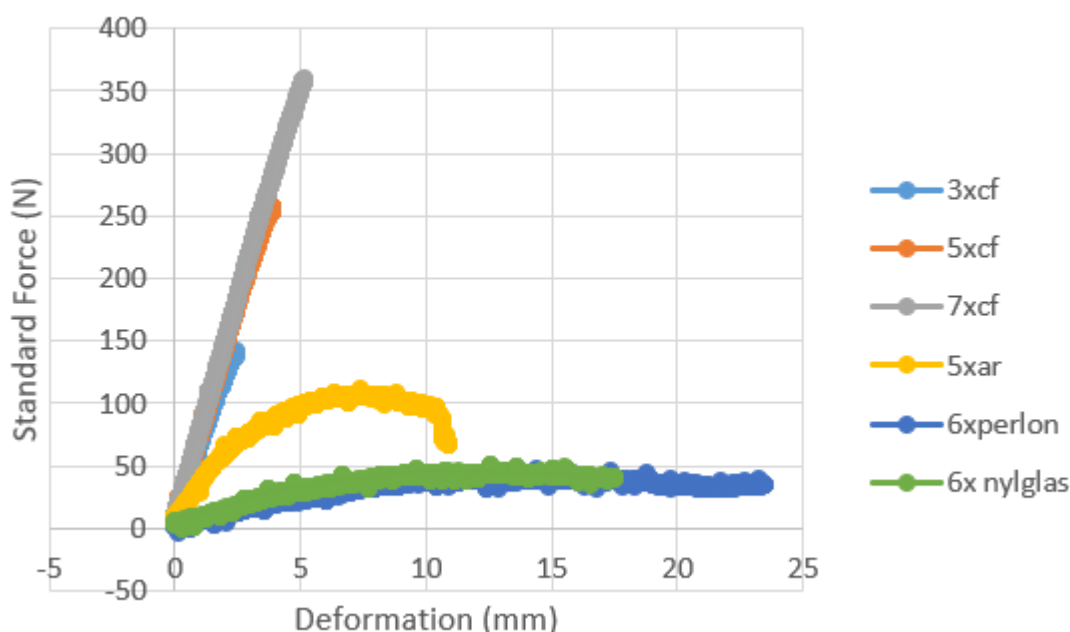
7x cf = 7 kerrosta 200 g/m² 2/2 twill hiilikuitua

5xar = 5 kerrosta 175/m² 4H satiini aramidikuitua

6x perlon = 6 kerrosta ottobock 623TX polyamidi sukkaa

6x nylglas = 6 kerrosta ottobock GN001 glass / nylon textile material sukkaa (verrokki)

Comparison between specimen

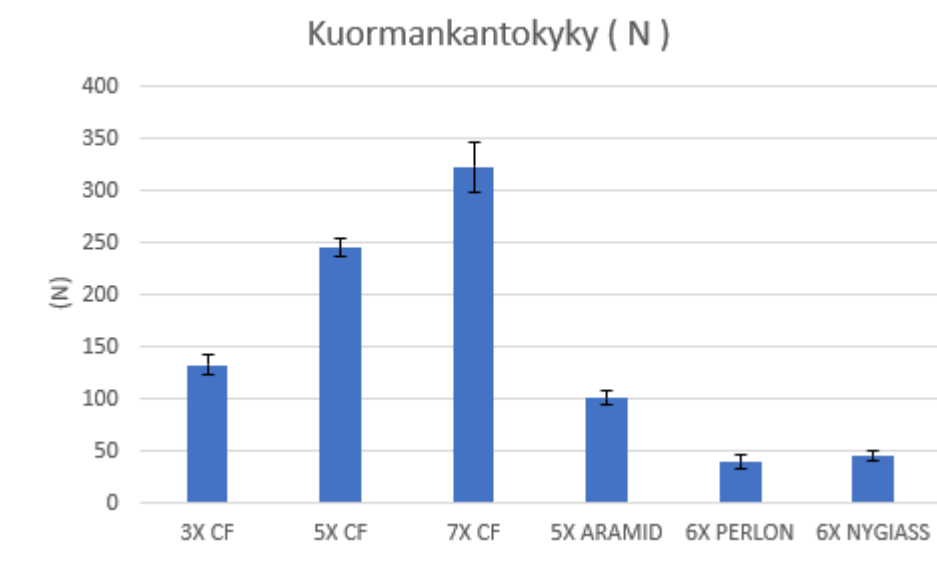


Kuvio 9. Testiryhmien parhaat tulokset

Kuvio 7. esittää jokaisen testiryhmän parhaan tuloksen. Graafi kuvaa testikappaleen taipuman ja normaalivoiman suhdetta eli kuinka paljon materiaalissa tapahtuu deformaatiota siihen kohdistuvan voiman kasvaessa. Graafista voidaan päätellä testimateriaalien käyttäytymistä oikeassa maailmassa. Esimerkiksi hiilikuidusta valmistetut testikappaleet käyttäytyvät lineaarisesti, kun taas perlonilla ja nylglassilla ei ole yhtä selkeää lineaarista aluetta, vaan materiaalit käyttäytyvät epälineaarisesti. aramidilla on alussa lineaarinen alue, mutta se ei käyttäydy loppuun asti lineaarisesti. Graafista voi myös päätellä materiaalien jäykkyyksiä. Lineaarisella käyttäytymisellä tarkoitetaan, kun normaalivoima kasvaa, niin kappaleen venymä kasvaa suhteessa.

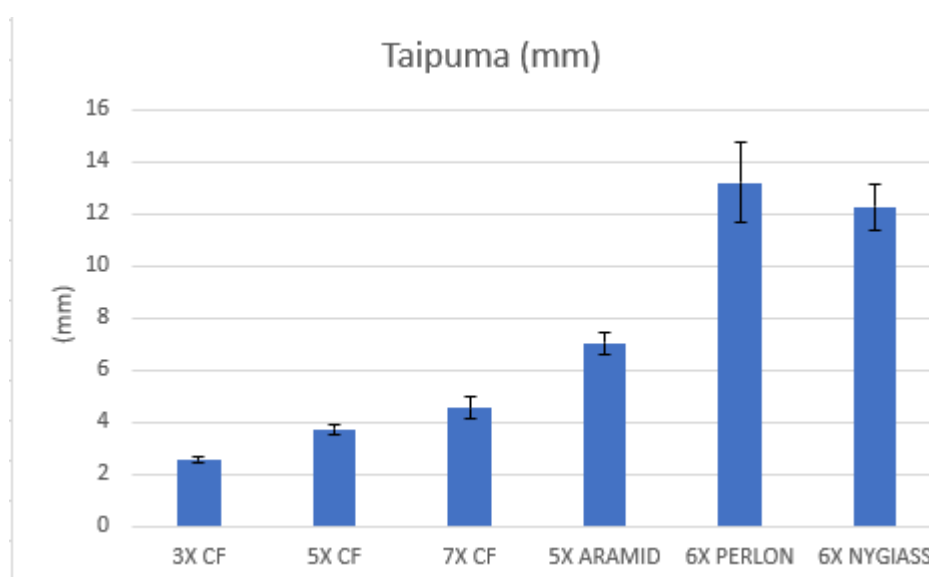
Kuormankantokyky kuvastaa kuinka paljon kappale kestää voimaa ennen hajoamista tai maksimikuorman saavutettua. Sininen palkki kuvaa testiryhmän keskiarvoa ja musta palkki keskihajontaa Nylglas:iin verrattuna, aramidi oli 2,2 kertaa vahvempaa, 5X CF 5,4 kertaa vahvempaa ja 7X CF 7,1 kertaa vahvempaa. Perlonin kuormankantokyky oli 0.95 nylglas:sta ja perlonin variaatiokerroin oli 14,8%. Hiilikuitulaminaatin kuormankantokyky kasvoi lähes lineaarisesti hiilikuitukerrosten lisääntyessä. Keskimäärin yksi hiilikuitukerros toi 46,7 N lisää kuormankantokykyä. Variaatiokerroin (coefficient of variation) on tilastollinen hajontaluku, jossa verrataan keskihajonnan ja keskiarvon osamääriä. Variaatiokertoimella voidaan vertailla eri otosten keskihajontoja. Variaatiokerroin lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\text{Variaatiokerroin} = \frac{\text{Hajonta}}{\text{Keskiarvo}} \times 100$$



Kuvio 10. Testikappaleiden kuormankantokyky

Taipuma kuvaa kuinka paljon testikappale taipuu maksimikuormankantokyvyn saavutettua. Sininen palkki kuvaa testiryhmän keskiarvoa ja musta palkki keskihajontaa. Nylglassista valmistetut testikappaleet taipuivat keskimäärin 4.8 kertaa enemmän kuin 3X CF ja 1.7 kertaa enemmän kuin aramidi. Perlon taipui 1.1 kertaa enemmän kuin nylglass ja perlonin variaatiokerroin oli 14,8%.



Kuvio 11. Testikappaleiden kappaleiden taipuma

Taivutuslujuus kuvaa pintajännitystä, jolla koekappale pettää taivutuskuormituksessa. Taivutuslujuuden yksikkö on Megapascal (N/mm²) ja siitä käytetään kreikkalaista sigma symbolia σ . Taivutuslujuus saadaan laskettua seuraavan kaavan avulla:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Jossa:

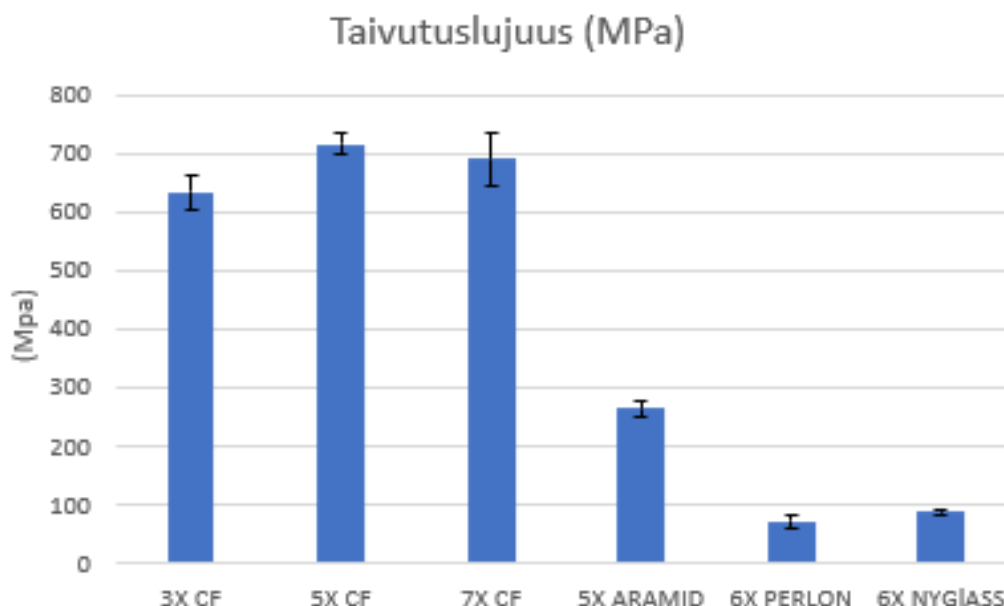
P = maksimivoima

L = taivutusväli

b = koekappaleen leveys

h = koekappaleen paksuus

Sininen palkki kuvaa testiryhmän keskiarvoa ja musta palkki keskihajontaa. Hiilikuidusta valmistettujen testipalojen taivutuslujuudet olivat melko samat riippumatta kerrosten lukumäärästä. Keskihajonnat hiilikuidusta valmistetuilla testikappaleilla olivat 28, 18,7 ja 103,7. Keskihajonnan heittely voi selittää miksi 5X CF oli suurempi taivutuslujuus kuin 7X CF. 7X CF variaatiokerroin oli 16,2 %. 3X CF oli 7.2 kertaa ja aramidilla 3 kertaa korkeampi taivutuslujuus kuin nylglassilla.



Kuvio 12. Testikappaleiden taivutuslujuus

Taivutusmoduli kuvaa testikappaleen taivutusjäykkyyttä, joka määrittyy kappaleen pinnan jännityksen ja venymän suhteena eli toisin sanoen materiaalin kykynä vastustaa taipumista. Taivutusmodulin yksikkö on megapascal eli N /mm². Taivutusmoduli saadaan laskettua seuraavan kaavan avulla:

$$E = \frac{L^3 F}{4 w h^3 d}$$

Jossa:

L = taivutusväli

F = Voima valitussa taipumakohdassa

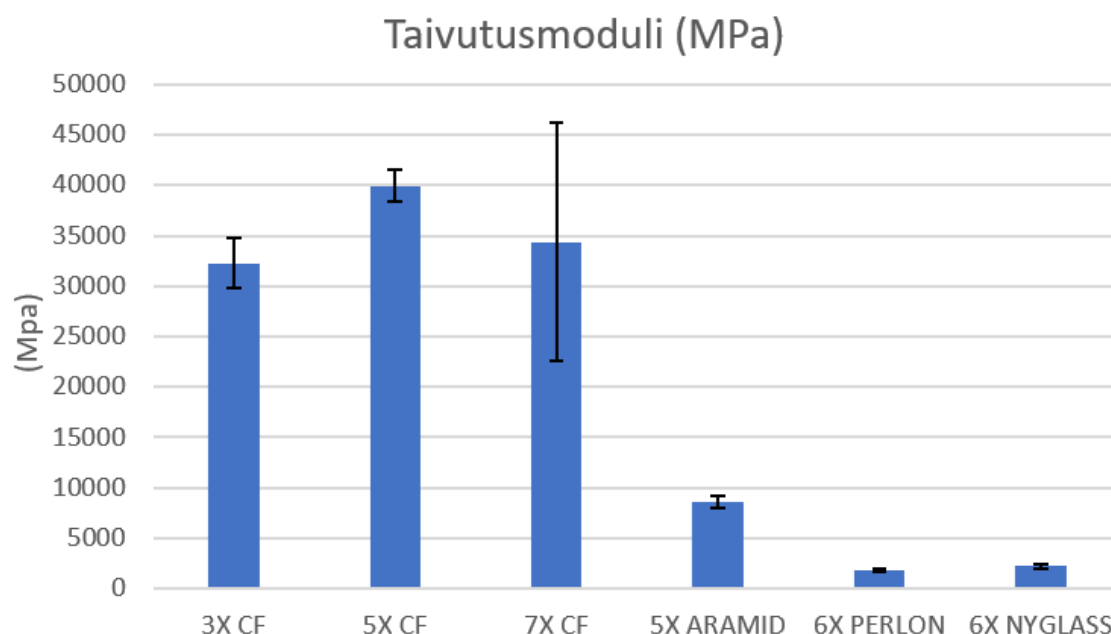
d = Taipuma valitussa voimakohdassa

w = koekappaleen leveys

h = koekappaleen paksuus

F ja d pitäisi valita testikappaleen graafin lineaariselta alueelta.

Sininen palkki kuvaa testiryhmän keskiarvoa ja musta palkki keskihajontaa. Keskihajonnat hiilikuidusta valmistettujen testikappaleiden välillä oli 2459, 1633 ja 11777. 7X CF variaatiokerroin oli 34,27%. 3X CF taivutusmoduli nylglasiin verrattuna oli 14,5 kertainen ja aramidiin 3,8 kertainen.



Kuvio 13. Testikappaleiden taivutusmoduli

9 Pohdinta

Ennen opinnäytetyön kirjoittamista laadimme suunnitelman, minkä mukaan lähestyimme aihetta. Rakensimme oppaalle rungon sen mukaan, mitä pidimme oleellisina asioina opiskelijan kannalta. Alussa myös päätimme, että opas pitää sisällään käytännön osion, jossa käytäisiin läpi jonkin komposiittimateriaalin valmistustekniikka. Ajatuksemme oppaan relevantista sisällöstä muuttui koko prosessin aikana, kun keräsimme lähdemateriaaleja ja opimme itse aiheesta enemmän.

Kummallakaan meistä ei ollut kokemusta tietokirjallisuuden tai oppaan kirjoittamisesta, mikä toi myös haasteita oppaan muotoilun kannalta. Heräsimme myös tähän puutteeseen kirjoittamisprosessin loppuvaiheilla, minkä takia emme voineet enää reagoida kaikkiin oppaan puutteisiin. Lähestyimme opasta ajoittain melko insinöörimäisesti, unohtaen kohdeyleisön, jota varten kirjoitimme opasta. Aiheemme oli haastava opinnäytetyön kirjoituksen kannalta, koska kirjoitamme sosiaali- ja terveystieteiden opinnäytetyötä, mutta aiheen sisältö lähentelee insinöörimäistä opinnäytetyötä. Jos tekisimme oppaan nyt uudestaan, aloittaisimme oppaan suunnittelun ensin kyselyllä ja/ tai kohderyhmän edustajien haastatteluilla saadaksemme paremman käsityksen kohderyhmän tarpeista ja toiveista tämän tyyppiselle oppaalle.

Oppaan kirjoituksen edetessä, jouduimme pohtimaan aiheen rajausta useasti. Komposiittimateriaalit aiheena on erittäin laaja ja aiheen laajuudesta koituikin useasti ongelmia meille. Aihe lähti helposti rönsyilemään ja niin sanottu punainen lanka kirjoittamisesta hukkuikin useasti. Pidimme useita palavereita, joiden aikana käsittelemme oppaan sisältöä ja mitä siihen tulisi lisätä tai poistaa.

Oppaan kirjoittaminen oli työläs ja pitkä prosessi, eikä opas ole periaatteessa koskaan valmis. Ala muuttuu sekä kehittyy jatkuvasti ja opas tarvitsee täydennystä muutoksen mukana. Oppaan kirjoittamisen myötä, meidän oma ymmärryksemme aiheesta kasvoi koko ajan ja kasvanut tietomäärä myös ohjasi oppaan rakennetta ja sisältöä. Saimme opinnäytetyön ohjaajilta hyviä kommentteja työmme kehittämisen kannalta ja yritimme parhaamme mukaan ottaa ne huomioon.

Opinnäytetyön toisena tarkoituksena oli täydentää tuottamaamme komposiittimateriaalien käyttöoppaan tietoperustaa materiaalitestien tuloksilla. Eri laminaattiyhdistelmien mekaanisia ominaisuuksia taivutustesteistä on huonosti saatavilla ja olikin mielenkiintoista huomata suuret erot käytettyjen materiaalien kesken. Lähtökohtaisesti komposiittimateriaaleille suoritetaan veto- tai puristuskokeita, joista saadaan mekaanisten ominaisuuksien tuloksia. Nämä eivät ole vertailukelpoisia tuloksia taivutuskokeisiin, sillä taivutuskokeessa tutkitaan laminaatin mekaanisten ominaisuuksien yhteisvaikutusta. Käytössä on useita eri mittaus standardeja ja käytettyä standardia ei aina ilmoiteta tulosten yhteydessä, mikä tekee tulosten vertailusta haasteellista.

Ohuimmallakin testatulla hiilikuidulla oli huomattavasti paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin esimerkiksi perlonista tai nylglassista valmistetuilla testikappaleilla. Näitä ominaisuuksia olivat taivutusmoduuli, taivutuslujuus ja kuormankantokyky. Kuitenkin käyttökohde huomioon ottaen on mietittävä, että onko esimerkiksi suuri määrä materiaalin taipumista haluttavaa vai ei. Mekaanisten ominaisuuksien ero kasvaa entisestään, kun huomioidaan testikappaleiden kerrospaksuudet. Olisikin mielenkiintoista nähdä, vaikuttaako suorittamamme koesarja työelämän käytäntöihin ja materiaalivalintoihin jatkossa, sillä edelleen perlonia ja nylglassia käytetään pääosin holkkien valmistuksessa ja hiilikuitua vain jäykisteenä.

Keskihajonnan heittely ja variaatiokertoimen suuruus 7X CF testikappaleilla kielii kyseisen testisarjan epäonnistumisesta ja sen tuloksia onkin tarkasteltava kriittisesti varsinkin taivutuslujuuden ja taivutusmodulin osalta. Loogista olisi, että kyseisen testisarjan keskiarvot olisivat suuremmat kuin 5X CF:n.

Testikappaleiden valmistaminen onnistui hyvin. Testikappaleiden laminoinnissa ei ilmennyt ongelmia, sillä alipaineistus ei vuotanut, kuituorientaatio onnistui suunnitellusti ja epoksihartsimme hartsi-kovete suhde oli suositusten mukainen. Testikappaleiden muotoon leikkaamisessa sen sijaan saattoi ilmetä pieniä virheitä. Käytimme käsikäyttöistä kipsisahaa sekä rautasahaa, jolloin kappaleiden koko on voinut vaihdella standardin vaatimuksesta. Jälkikäteen ajatellen, olisimme voineet miettiä tarkemmin valitsemat komposiittiyhdistelmät ja mahdollisesti saada niistä helpommin keskenään vertailtavia.

9.1 Tarkkuus

Testitulosten tarkkuuteen vaikuttaa moni asia, joita pitää tarkastella kriittisesti. Suurimmat virheet ja epätäydellisyydet komposiittimateriaaleissa syntyy valmistuksen aikana. Laminaatin ominaisuuksiin vaikuttaa mm. tukikuitujen suuntaus, käytetyn hartsin sekoitussuhde, valmistustekniikan tuomat haasteet ja komposiittimateriaalien käsittely.

Testikappaleet ovat suhteellisen kapeita pituuteensa, jolloin pienikin heitto kuitusuunnissa vaikuttavat kappaleiden lopulliseen kestävyys. Testikappaleiden muotoon leikkaamisessa tapahtuu aina pieniä vaurioita laminaatin rakenteeseen, jotka myös voivat vaikuttaa lopullisiin tuloksiin.

Käyttämämme testilaitte oli liian järeä testien tarkoituksenmukaisuuteen nähden. Mittapään maksimikuorma on 250 000 N joka on korkeimpaankin saatuun tulokseen nähden yli 700 kertainen. Kyseinen mittapää ei välttämättä havaitse pieniä muutoksia testikappaleeseen kohdistuvissa voimissa. Jos käytössä olisi ollut paremmin käyttötarkoitukseen soveltuva testilaitte, olisi tulokset voineet olla hieman erilaiset. Testilaitetta ei myöskään ole kalibroitu pitkään aikaan, joka voi myös vaikuttaa testitulosten tarkkuuteen.

Metropolia ammattikorkeakoulun kampusten muuton takia emme saaneet käyttöön paremmin soveltuvaa testilaitetta. Vaikkakin testilaitteen mittapää on tarkoitettu suuremmille voimille, se ei tarkoita, että laitteen tulokset olisivat epävarmemmat. Käyttämäämme testilaitteeseen ei ollut saatavilla standardin vaatimia testipäitä, jotka jouduimme valmistamaan itse. Itsevalmistamat testipäät eivät olleet täysin muototarkkoja ja suoria, mikä voi vaikuttaa tuloksiin.

Kaikki testikappaleet koestettiin samalla testijärjestelyllä samana päivänä, joten tulosten pitäisi kuitenkin olla vertailukelpoisia keskenään, mutta muiden suorittamiin kokeisiin tulokset eivät välttämättä ole vertailukelpoisia edellä mainituista syistä. Laitteen mittapään kalibrointi on tarkistettu 80—20 000 N välillä. Kaikkien testikappaleiden maksimikuorma oli yli 80N, joten maksimitulosten voidaan olettaa pitävän paikkansa

9.2 Jatkotutkimus

Jatkotutkimuksena olisi aiheellista selvittää oppaan toimivuus opiskelijoiden käytössä ja jatkokehittää oppaan sisältöä heidän kommenttien ja toiveiden mukaisesti. Lisäksi olisi aiheellista selvittää laminaattiyhdistelmien väsymistä ja väsymisen kestoa, sillä useat komposiitista valmistetut apuvälineet joutuvat jatkuvan kuormituksen kohteeksi. Eri komposiittiyhdistelmien väsymisenkeston selvityksellä voi olla merkittävä vaikutus eri apuvälineiden teoreettisen käyttöiän määrittämisessä ja apuvälineen vahvuuden oikeaan mitoittamiseen. Epoksihartsin ja akryylihartsin mekaanisten ominaisuuksien ero laminaatissa olisi myös hyödyllinen jatkotutkimuskohde.

Lähteet

Aramid Fiber. Fibremax Ltd. n.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.aramid.eu/characteristics.html>> Luettu 23.4.2018

ASTM D7264. 2007. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. ASTM international. Verkkodokumentti. <https://www.researchgate.net/profile/Yashwant_Munde/post/ASTM_choice_for_Flexural_testing_of_polymer_matrix_composite/attachment/59d6269f6cda7b8083a23684/AS%3A505496109305856%401497531072076/download/ASTM+D7264+-+Flexural+Comp.pdf> Luettu 07.8.2018

Britannica A. The Editors of Encyclopaedia Britannica. N.d. Polymethyl methacrylate. Verkkodokumentti. <<https://www.britannica.com/science/polymethyl-methacrylate>> Luettu 22.10.2018

Britannica B. The Editors of Encyclopaedia Britannica. N.d. Shear modulus.

<<https://www.britannica.com/science/shear-modulus>> Luettu 2.11.2018

Engineering ToolBox A. 2003. Young's Modulus – Tensile and Yield Strength for common material. Verkkodokumentti.

<https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html> Luettu 2.11.2018

Engineering ToolBox B. 2008. Poisson's ratio. Verkkodokumentti.

<https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html> Luettu 2.11.2018

Gurit. Guide To Composites. 2017. Verkkodokumentti.

<www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf> Luettu 23.4.2018

Mertanen, Virve. 2007. Tietokirjoittajan Käsikirja. Tampere. Vastapaino

Muoviteollisuus ry. Muovisanastoa. n.d. PMMA. Verkkodokumentti.

<<https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=16&tag=97>> Luettu 22.10.2018

Rentola, Marketta. 2006. Hyvä opas teoksessa Tieto kirjaksi. toim. Jussila, Raimo & Ojanen, Eero & Tuominen, Taija. 2006. Saarijärvi. Kansanvalistusseura.

Saarela, Olli & Airasmaa, Ilkka & Kokko, Juha & Skrifvars, Mikael & Komppa, Veikko. 2003. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys ry. Helsinki. Hakapaino Oy.

Teijin Aramid. N.d. Verkkodokumentti.

<<https://www.teijinaramid.com/en/what-is-aramid/>> Luettu 23.4.2018

Vilkka, Hanna & Airaksinen, Tiina. 2003. Toiminnallinen opinnäytetyö. Jyväskylä. Gummerus Kirjapaino Oy

Vuorinen, Jyrki & Mustakangas, Mika & Annala, Minna. n.d. Komposiitit—loputtomasti mahdollisuuksia. Verkkodokumentti.

<https://www.patria.fi/sites/default/files/attachments/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksia-_mobile.pdf> Luettu 2.11.2018

3 kerrosta hiikuitua	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	0,75	13,96	24	141	133,00	8,05	6,05	2,5	2,52	0,10	3,89	646,42	632,91	28,04	4,43	33096,62	32238,41	2459,81	7,63
Kappale 2	0,75	12,8	24	130				2,4				650,00				34666,67			
Kappale 3	0,75	13,12	24	120				2,7				585,37				27750,68			
Kappale 4	0,75	13,68	24	142				2,5				664,33				34013,57			
Kappale 5	0,75	13,66	24	132				2,5				618,45				31664,54			

5 kerrosta hiilikuitua	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	1,23	13,5	39,36	258	245,40	7,61	3,10	3,8	3,74	0,17	4,66	745,80	710,68	18,74	2,64	41199,53	39952,55	1633,23	4,09
Kappale 2	1,23	13,67	39,36	250				4				713,69				37454,28			
Kappale 3	1,23	13,41	39,36	241				3,8				701,33				38743,12			
Kappale 4	1,23	13,46	39,36	241				3,5				698,73				41907,71			
Kappale 5	1,23	13,33	39,36	237				3,6				693,83				40458,11			

7 kerrosta hiilikuitua	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	1,62	14,06	39,36	320	323,17	21,78	6,74	4,4	4,55	0,36	7,90	512,01	636,65	103,72	16,29	18546,94	34362,08	11777,44	34,27
Kappale 2	1,62	13,37	39,36	293				4,6				493,01				17082,00			
Kappale 3	1,62	14,3	51,84	309				4,1				640,25				43174,62			
Kappale 4	1,62	14,1	51,84	341				4,9				716,57				40432,36			
Kappale 5	1,62	13,7	51,84	360				5,1				778,59				42208,67			
Kappale 6	1,62	13,78	51,84	316				4,2				679,46				44727,90			

5 kerrosta aramidia	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	1,34	13,73	42,88	102	101,26	6,42	6,34	6,3	7,02	0,38	5,36	266,11	263,02	10,23	3,89	9660,04	8593,96	583,57	6,79
Kappale 2	1,34	12,97	42,88	92,4				7,2				255,19				8105,68			
Kappale 3	1,34	13,74	42,88	102				7,1				265,92				8565,35			
Kappale 4	1,34	14,39	42,88	112				7,4				278,80				8616,19			
Kappale 5	1,34	14,08	42,88	97,9				7,1				249,07				8022,54			

6 kerrosta perlonia	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	2	14,06	64	31,5	39,50	5,85	14,80	11,7	13,22	1,38	10,45	53,77	70,24	10,42	14,84	1568,66	1815,18	216,03	11,90
Kappale 2	2	12,98	64	35,3				13,2				65,27				1687,78			
Kappale 3	2	14,05	64	43,4				15,1				74,14				1675,82			
Kappale 4	2	12,93	64	39,2				11,7				72,76				2122,71			
Kappale 5	2	13,54	64	48,1				14,4				85,26				2020,94			

6 kerrosta nyglassia	Thickness (mm)	Width (mm)	Support span (mm)	F. MAX (N)	AVG	STDEV.P	CV (%)	DL AT F MAX (mm)	AVG	STDEV.P	CV (%)	σ (Mpa)	AVG	STDEV.P	CV (%)	E (MPa)	AVG	STDEV.P	CV (%)
Kappale 1	1,82	14,25	58,24	47,3	45,08	3,84	8,53	12,9	12,26	0,78	6,37	87,54	87,21	4,42	5,07	2107,88	2221,00	207,41	9,34
Kappale 2	1,82	12,65	58,24	43				10,9				89,65				2554,71			
Kappale 3	1,82	14,4	58,24	51,2				12,6				93,77				2311,68			
Kappale 4	1,82	13,03	58,24	40				13				80,96				1934,47			
Kappale 5	1,82	13,76	58,24	43,9				11,9				84,14				2196,29			



Matti Murtomäki ja Markus Niinikoski

Komposiittimateriaalien käyttöopas

2018

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Komposiitti	2
2.1	Laminaatti	2
2.2	Kuituorientaatio	3
3	Lujitteet	5
3.1	Lasikuitu	6
3.2	Hiilikuitu	7
3.3	Aramidi	8
3.4	Polyesterikudos	9
3.5	Luonnonkuidut	9
3.6	Lujitteet apuvälinetekniikassa	10
4	Lujitteiden käyttömuodot	11
4.1	Kudokset	11
4.2	Katkokuitu	14
4.3	Punokset	14
5	Sidosaineet ja muovit	15
5.1	Kertamuovit	15
5.2	Epoksit	15
5.3	Polyesterit	16
5.4	Akryylihartsi	17
5.5	Kestomuovit	17
5.5.1	Polypropeeni	18
5.5.2	Polyeteeni	18
5.5.3	PVC	18
6	Kerroslevyrakenne	19
6.1	Solumuoviydinaineet	19
6.2	Kennoydinaineet	19
7	Valmistusmenetelmät	20
7.1	Märkävalu	20
7.2	Alipaineinjektio	20

7.3	Prepreg- laminointi	21
7.4	TFC- laminointi	21
8	Työstö	23
8.1	Leikkaus	23
8.2	Hionta	23
8.3	Poraus	23
8.4	Liimaus	24
8.5	Korjaaminen	24
9	Case: Staattinen AFO prepreg- laminoinnilla	26
9.1	Kipsipositiivi	26
9.2	Pehmusteet	26
9.3	Jäykistysprofiili	28
9.4	Prepregin asettelu	29
9.5	Vahvikkeet ja ankkurointi	31
9.6	Jäykkä jalkaterä	32
9.7	Viimeistely	34
9.8	Alipainekalvon valmistus	34
9.9	Muotoilu	37
9.10	Pintavalu	38
9.11	Profiilin ankkuroinnin lopputulema	41
9.12	Pohdinta valmistukseen liittyen	44
	Lähteet	46

1 Johdanto

Tämän oppaan tarkoituksena on toimia perus tietopohjana komposiittimateriaaleihin. Opas ei sisällä ehdottomia ohjeita, ratkaisuja tai valintaperusteita komposiittituotteiden valmistukseen. Oppaan käytännön osuuden hyödyntäminen vaatii komposiittimateriaalien perusteiden hallitsemista. Opasta voi käyttää käytännön tekemisen tukena, mutta syvempää tietämystä aiheeseen kannattaa hakea tietokirjallisuudesta.

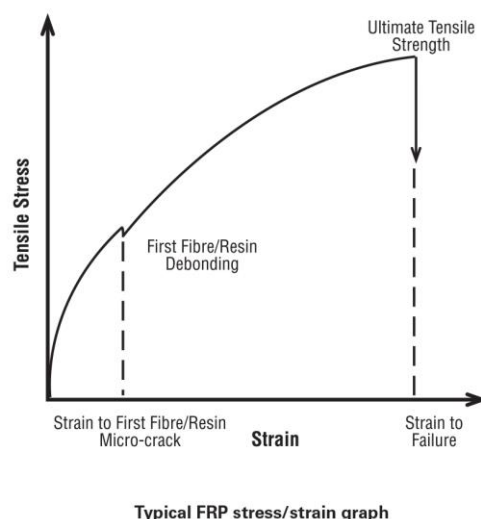
Oppaassa kerrotaan kappaleittain yleisesti mitä on komposiittimateriaali ja mistä asioista se koostuu. Työssä käydään läpi mm. erilaisia lujitteita, sidosaineita ja ydinmateriaaleja. Lisäksi käydään läpi yleisimmät komposiittimateriaalin valmistusmenetelmät, niiden työstötavat ja miten materiaalien korjaus tai liimaus tapahtuu. Lisäksi oppaan lopussa on case-osio, jonka tarkoitus on toimia valmistusteknisenä esimerkkinä. Osiossa kuvataan vaihe vaiheelta staattisen säärimitaisen alaraajaortoosin valmistus prepregistä. Valmistuksen yhteydessä kokeiltiin myös erilaisia materiaaleja ja menetelmiä oppimisen näkökulmasta.

2 Komposiitti

Yksinkertaisimmillaan komposiittimateriaali koostuu kahdesta eri materiaalista, jotka eivät ole sulaneet tai liuenneet toisiinsa, mutta kuitenkin toimivat yhdessä. Joissain tapauksissa nämä kaksi materiaalia ovat tasavertaisia keskenään niin, että kummankaan tehtävää ei voida määrittää komposiitissa. Käytännössä kuitenkin toinen materiaaleista toimii sitovana ainesosana eli matriisina ja toinen materiaaleista toimii vahvikkeena. Esimerkiksi lasikuituveneessä polyesterihartsin toimii matriisina ja katkolasikuitu toimii vahvikkeena. Muoviaineen ja eri vahvistekuitujen muodostamia komposiitteja kutsutaan lujitemuoveiksi tai kuitulujitteisiksi muoveiksi. (Saarela & Airasmaa & Kokko & Skrifvars & Komppa 2003: 17.)

2.1 Laminaatti

Laminaatilla tarkoitetaan komposiittituotetta, joka muodostetaan kerroksia yhteen lami-noimalla. Rakenne on yleensä levymäinen, jolloin lujitteet ovat kerroksittain levyta-sossa. Komposiittimateriaaleja tehdessä yleensä tarkoitetaan kuitulujitteisia tuotteita, jotka sisältävät vähintään kaksi lujite kerrosta. (Saarela ym. 2003: 457.) Kun komposiittituotteita valmistetaan laminoimalla, niin käytetään lujitteita ja sidosaineita. Lujitteina toimivat yleensä kuidut esim. hiilikuitu ja sidosaineena hartsit eli kertamuovit. Lujitteina käytetään lujitekuituja esimerkiksi hiilikuitua ja sidosaineena kertamuoveja esimerkiksi epok-sihartsia.

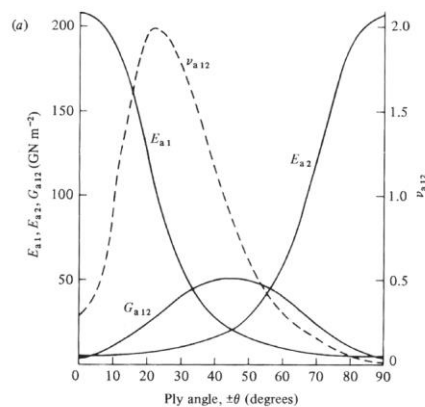


Kuvio 1. Kuvio kuvaa tyypillistä laminaatin vaiheittaista pettämistä. (Image ©Gurit)

Kaikki laminaattirakenteet pettävät kuormituksen lisääntyessä ja vaurioiden edetessä. Tämä pettäminen tapahtuu vaihteittain ja tyypillistä laminaatille on, että tietyn kuormitus-tason alla kuorma pystytään ottamaan vastaan ilman vaurioita. Tämän vaiheen jälkeen kuormituksen kasvaessa syntyy mikrovaurioita, jotka ovat lähinnä paikallisia sidosaineen ja sidosaine/lujitesidosten vaurioita. Pettämistä edeltävää jännitystä, joka aiheuttaa vaurioita, kutsutaan vaurioitumisjännitykseksi. Kun vauriot etenevät kuormituksen lisääntyessä, niin lopuksi laminaatti pettää ja jännitystä, joka aiheuttaa pettämisen kutsutaan taas murtojännitykseksi. (Saarela ym. 2003: 33.)

2.2 Kuituorientaatio

0° , 90° ja $\pm 45^\circ$ kerrossuuntia sisältävät laminaatit kestävät hyvin sekä normaali- että leikkauskuormia (Saarela ym. 2003: 376). Selkokielelle käännettynä tämä tarkoittaa sitä, että kuidut ovat vahvimmillaan siihen suuntaan mihin ne kulkevat. Käytännön työssä voidaan ajatella, että $\pm 45^\circ$ kuitusuuntakerros tuo kiertojäykkyyttä, 90° puolestaan lisää jäykkyyttä kahteen eri suuntaan/perusjäykkyyttä ja 0° on yksisuuntaista, jolla voidaan saada lisäjäykkyyttä haluttuun suuntaan. Yhteen suuntaan lujitettu laminaatti on rakenteena hauras, joten poikittaista lujitetta on aina hyvä lisätä (Saarela ym. 2003: 376). Lisäksi laminaatit, joissa on leikkausjäykkyyttä lisääviä $\pm 45^\circ$ lujitekerroksia, tuovat merkittävästi lisää stabiiliteettia, mikä auttaa estämään rakennetta merkittävästi heikentäviä kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia (Saarela ym. 2003: 376— 377).



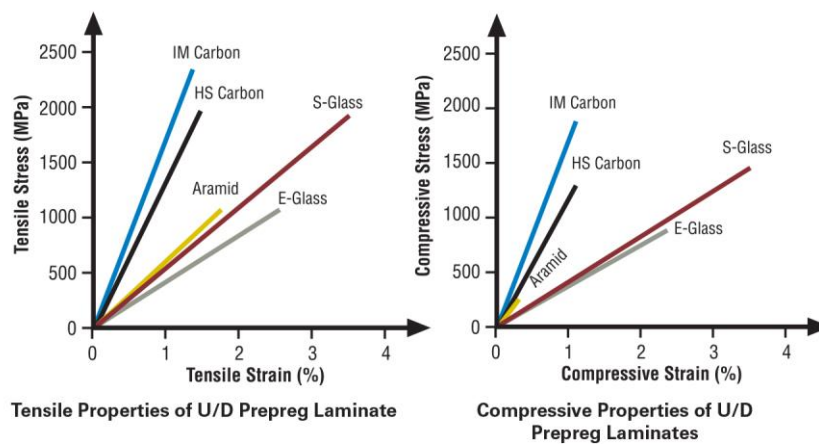
Typical effect of ply angle on carbon laminate

Kuvio 2. Kuituorientaation vaikutus hiilikuitukomposiittiin. (Image ©Gurit)

Laminaatin mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa vahvikekerrosten kuitujen suuntaukset. Mekaanisen ominaisuudet, joita ovat Youngs modulus (kimmomoduuli), shear modulus (leikkausmoduuli) ja poissonin ratio (poissonin vakio). Kimmomoduuli kuvaa materiaalin jäykkyyttä eli kuinka se taipuu tai venyy, kun siihen kohdistuu taivutusta tai puristusta (Engineering ToolBox A 2003). Leikkausmoduuli taas kuvaa kappaleen jäykkyyttä ja miten se kestää transversaalitason muodonmuutosta sekä pystyykö kappale palaamaan alkuperäiseen muotoonsa rasituksen jälkeen (Britannica B n.d.). Poissonin vakio kuvaa sitä, kun kappaletta venyttää yhteen suuntaan niin sillä on tapana oheta poikittaisessa suunnassa (Engineering ToolBox B 2008). Esimerkiksi kun kuminauhaa jännittää, niin se venyy pituussuunnassa, mutta se ohenee samalla.

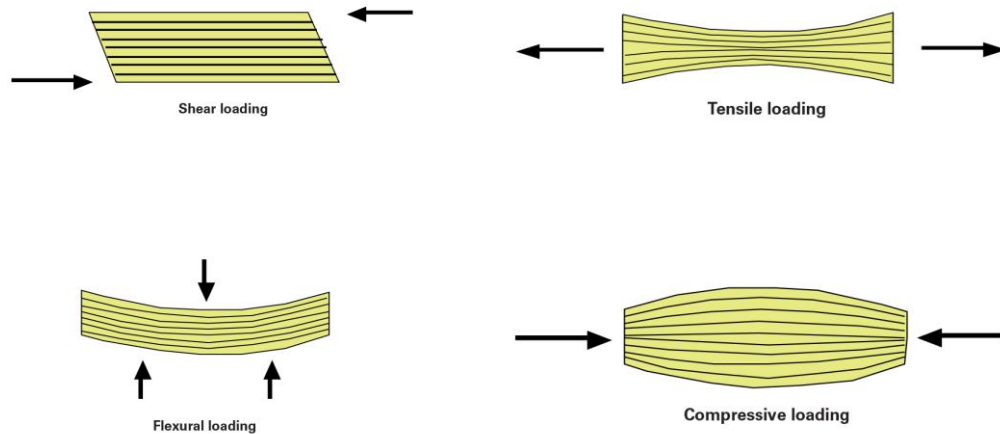
3 Lujitteet

Lujitteiden tarkoituksena komposiittimateriaalissa on parantaa sen mekaanisia ominaisuuksia ja ottaa vastaan komposiittiin kohdistuvia kuormituksia. Lujitteeksi katsotaan kuidut, jotka ovat valmistettu kyseistä tarkoitusta varten. Yleisimmät lujitekuidut ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut. Muita lujitekuituja ovat luonnonkuidut, boori- ja piikarbidikuidut, sekä keraamiset kuidut. Lujitemuoveissa lujitteita käytetään monessa eri muodossa, kuten katkokuituna, lankana, mattona tai kankaana. Yleisimmät lujitemateriaalin käyttömuodot ovat tasolujitteet eli lujitematot ja lujitekankaat. Ne voidaan valmistaa katkotuista kuiduista sideaineen avulla tai jatkuvista kuiduista kutomalla. Yksi yleisesti käytetty kangastyppi on kudot, jossa toisiinsa nähden kohtisuorat lujitekimput kulkevat vuoroin toistensa yli ja ali. (Saarela ym. 2003: 19—20, 74.)



Kuvio 3. Eri lujitteiden veto- ja puristuslujuuksia. (Image ©Gurit)

Kappaleeseen kohdistuu neljää eri kuormitusta: vetoa, puristusta, leikkausta ja taivutusta. Eri lujitemateriaaleilla voidaan vahvistaa halutun kuorman kestävyyttä. Neljä tärkeintä tekijää, jotka määrittävät lujitemateriaalin osuuden komposiitissa ovat: lujitekuidun mekaaniset ominaisuudet, lujitekuidun ja käytetyn hartsin välinen käyttäytyminen, lujitekuidun määrä komposiitissa ja lujitekuitujen suunnat. (Gurit 2017: 6, 24.)



Kuvio 4. Laminaatin kuormituksen eri muodot. (Image ©Gurit)

3.1 Lasikuitu

Lasikuitua valmistetaan sulatusprosessilla, jossa lasin raaka-aineet sulatetaan homogeeniseksi massaksi. Lasimassa sisältää raaka-aineiden saatavuudesta riippuen esimerkiksi kvartsihiekkää, kaoliinisavea, kolemaniittia ja kalkkikiveä, joiden pitoisuudet vaikuttavat lopullisen lasikuidun ominaisuuksiin. Lasimassa vedetään rei'itetyn suuttimen läpi noin 50-150 km/h nopeudella. Tämän jälkeen lasikuidut jäähdytetään vesisuihkulla ja niihin lisätään pinnoite. Pinnoitteen tarkoituksena on muodostaa kuiduista kimppu, suojata kuituja ja antaa kuiduille erilaisia pintaominaisuuksia. (Saarela ym. 2003: 75—78.)

On olemassa erilaisia lasikuituja, joita ovat muun muassa e-lasi, c-lasi ja r/s/t-lasi. Näitä voidaan valmistaa käyttämällä erilaisia materiaaleja valmistusvaiheessa. E-lasi (electrical) on yleisin käytettävä lasikuitu, jolla on hyvä vetolujuus, puristuksen kesto, jäykkyys, kemiallinen kestävyys ja se on halpaa. Tämä johtuu kyseisen lasin vähäisestä alkalipitoisuudesta. Sillä on kuitenkin suhteessa S-lasi huono iskunkestävyys. C-lasi (chemical) kestää kemikaaleja parhaiten ja sitä käytetään yleensä uloimmassa laminoinnin kerroksessa suojaamaan kemikaalien vaikutuksilta lähinnä putkistoissa ja säiliöissä. R-, S- tai T-lasi ovat eri valmistajien samat ominaisuudet omaava lasikuitutyyppi, jolla on parempi vetolujuus E-lasiin verrattuna. Tämä on kuitenkin suhteellisen kallista verrattuna E-lasiin. (Gurit 2017: 28.)

		A-lasi	C-lasi	E-lasi	S-lasi
SiO₂	p%	72	64,5	55	65
Al₂O₃+Fe₂O₃	p%	2	4	4,5	25
CaO	p%	10	13,5	21,5	-
MgO	p%	2	3	0,5	10
Na₂O+K₂O	p%	14,5	10	<1	-
B₂O₃	p%	-	5	7,5	-
Vetolujuus	Gpa	3,1	3,3	3,6	4,6
Kimmokerroin	Gpa	72	70	75	86

Kuvio 5. Lasikuitujen ominaisuuksia. (Saarela ym. 2003: 75.)

3.2 Hiilikuitu

Hiilipitoisuudeltaan korkeaa kuitua eli 95—99%, jolla on suuri lujuus ja korkea kimmoduuli, kutsutaan hiilikuiduksi. Hiilikuitua käytetään, kuva vaaditaan keveyttä, lujuutta ja jäykkyyttä kappaleeseen. Hiilikuidulla on myös erittäin hyvät puristus-, veto- ja taivutuslujuudet. Hiilikuitulaminaatit ovat murtorajaan asti kimmoisia eikä niissä ilmene plastista muodonmuutosta. Hiilikuitukomposiitilla on huonompi iskunkestävyys kuin aramidi-komposiitilla. (Saarela ym. 2003: 87.)

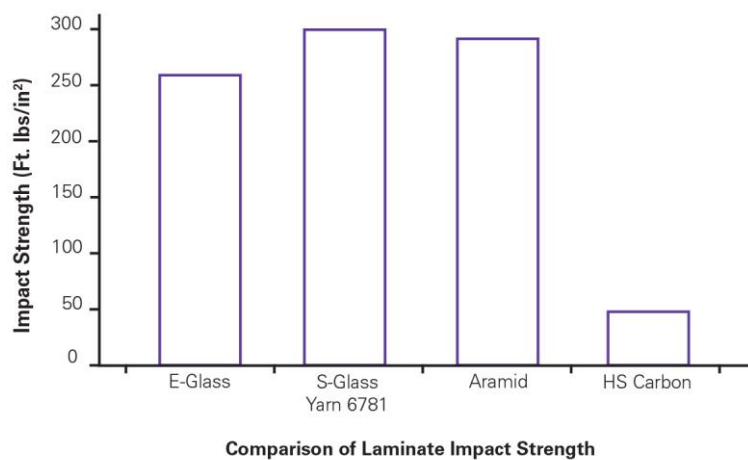
Kuitua valmistetaan kontrolloidussa prosessissa hiilirikkaasta orgaanisesta kuidusta. Suurin osa valmistetusta hiilikuidusta on polyakryylintriili pohjaista (PAN). PAN-kuidusta voidaan valmistaa taloudellisesti jatkuvana prosessina tasalaatuista hiilikuitua. Prosessi voidaan jakaa viiteen osaan: hapetus, hiillytys, grafitointi, kuidun pintakäsittely ja käsittely viimeistelyaineella. Hiilikuitua voidaan myös valmistaa luonnonasfaltista ja kivihiilitervasta. Ne ovat halvempia lähtöaineita kuin PAN-kuitu. Pikipohjainen hiilikuitu on hauraampaa, vetomurtolujuudeltaan heikompaa ja ominaispainoltaan painavampaa kuin PAN-kuidusta valmistettu hiilikuitu. (Saarela ym. 2003: 81—85.)

Hiilikuitukimppua kutsutaan touviksi ja yksittäistä lankaa kutsutaan filamentiksi. Filamenttiluku kertoo, kuinka monta filamenttia touvissa on. Hiilikuituja jaotellaan filamenttiluvun mukaan, raja suurilukuisten ja pienilukuisten hiilikuitujen välillä on 50 000. Yleisin hiilikuitulaatujen jaottelu tapahtuu kimmomoduulin mukaan esimerkiksi SM-kuitu (Standard modulus) 270-320 GPa, HM-kuitu (High modulus) >340GPa ja UHM-kuitu (Ultra high modulus) >440GPa. (Saarela ym. 2003: 85.)

3.3 Aramidi

Aramidikuitu eli aromaattinen polyamidi, yhdeltä kauppanimeltään Kevlar, on teollisesti valmistettu polymeeri, jota valmistetaan kehräämällä nestemäisestä seoksesta, joka sisältää tyypillisesti PPTA-polymeeriä ja vahvaa rikkihappoa (Teijin Aramid, n.d.). Aramidikuitu on vahvaa, joustavaa, kestää iskuja, hankausta, kemikaaleja ja kuumaa (Aramid Fiber, n.d.). Aramidikuitu ei kuitenkaan kestä ultraviolettivaloa, vaan altistuminen heikentää sen kestävyttä. Lisäksi aramidikuitu ei siedä painetta hyvin (Gurit 2017).

Aramidikuidulla on huonompi tartuntaominaisuus matriiseihin, kuin esimerkiksi hiili- ja lasikuidulla. Tämä on nähtävissä mm. laminaattia hiottaessa paljastunut aramidikuitu nukkaantuu. Aramidikuidut pystyvät rajoittamaan halkeamien leviämistä ja estämään katastrofaalista murtumista (Saarela ym. 2003: 91.), mikä lisää käyttöturvallisuutta mm. ortotiikassa. Yleisimmät käyttökohteet ovat mm. armeijan ajoneuvoissa, komposiittimateriaalien vahvikkeena, palon ja piston kestävässä asusteissa sekä elektroniikan komponenteissa (Aramid Fiber, n.d.).



Kuvio 6. Eri lujitteiden iskunkestävyys laminaateissa. (Image ©Gurit)

3.4 Polyesterikudos

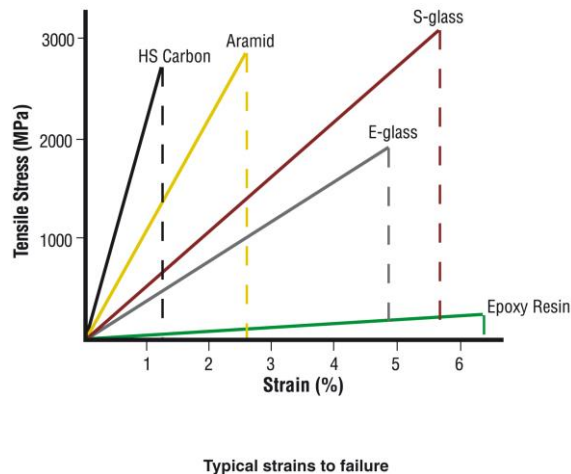
Yhdeltä kauppanimeltä dioleeni on polyesteripohjainen kuitu, joka muistuttaa ominaisuuksiltaan aramidia, mutta ei omaa yhtä hyvää venymisen kestäkykyä. Muutoin ominaisuuksiltaan lähellä ja huomattavasti halvempaa materiaalia (Saarela ym. 2003: 100). Dioleeniä käytetään kohteissa, joissa halutaan lisätä iskunkestävyyttä ja hankauksen kestoja edullisesti. Yleensä dioleeniä käytetään lasikuidun kanssa lisäämään iskun- ja hankauksen kestävyyttä mm. vedessä liikkuviin aluksiin. (EasyComposites 2015.)

3.5 Luonnonkuidut

Luonnonkuituja käytettiin ennen kuin markkinoille tulivat mekaanisilta ominaisuuksiltaan paremmat lujitekuidut. Nykyään kiinnostus luonnonkuituja kohtaan on jälleen kasvanut, sillä kierrätettävyyden merkitys on kasvanut ja tulee korostumaan tulevaisuudessa entisestään. (Saarela ym. 2003: 99.)

Käytetyt luonnonkuidut ovat eläinkarvat, puukuidut ja kasvikuidut. Enemmän käytössä ovat lähinnä puukuidut sekä kasvikuidut. Puusta eristettyjä selluloosakuituja käytetään rakennusteollisuuden sovelluksissa. Kasvikuituja, joista hyviksi on havaittu mm. hamppu, juutti, pellava ja puuvilla. (Saarela ym. 2003: 99.)

Kasvikuitujen käytön etuja ovat niiden edullisuus, alhainen tiheys, kierrätettävyyys ja ympäristöystävällisyys, sillä ne ovat biohajoavia. Ne eivät myöskään ärsytä ihoa ja niitä on helppo työstää. Luonnonkuiduilla on hyvä iskulujuus ja -sitkeys. Huonoina puolina kasvikuidut ovat herkkiä kuumuudelle, kosteudelle, sienille sekä hyönteisille. Lisäksi tasalaatuisuus on ongelma, mikä pakottaa käyttämään enemmän kuituja tuotteessa. Luonnonkuitujen laminointi on synteettisiä kuituja haastavampaa ja lopputulos saattaa olla epäsiisti. (Saarela ym. 2003: 99.)



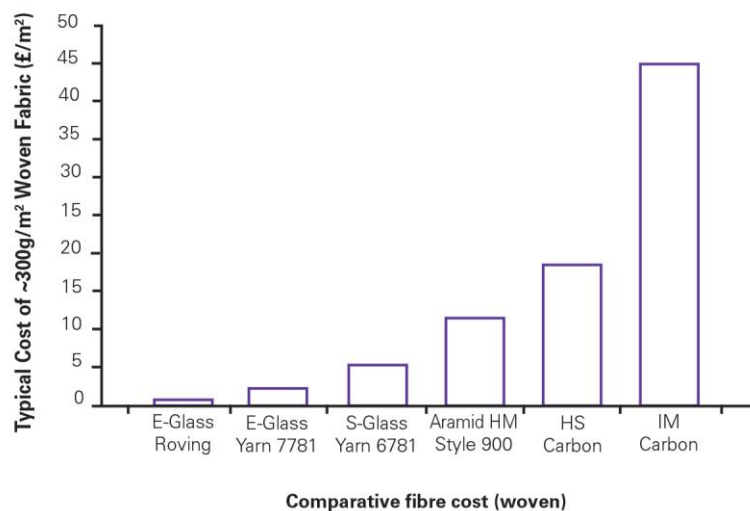
Kuvio 7. Eri lujitteiden tyypillisiä vetolujuuksia. (Image ©Gurit)

3.6 Lujitteet apuvälinetekniikassa

Useimmiten käytetyt lujitekuidut, joita käytetään apuvälinetekniikan sovelluksissa, ovat hiilikuitu, lasikuitu ja aramidi. Monesti hiilikuitu toimii runkomateriaalina tuoden vahvuutta sekä jäykkyyttä tuotteeseen ja muita materiaaleja käytetään lisäämään halutunlaisia ominaisuuksia. Näitä ovat lasikuidun hyvä paineen sekä vedon sietokyky ja iskunkesto, joka on parempi verrattuna hiilikuituun. Aramidin ominaisuuksia on hyvä joustavuus, vahvuus, iskunkestävyys sekä hankauksen kesto. Näitä materiaaleja yhdistelemällä voidaan vaikuttaa tuotteen ominaisuuksiin merkittävästi ja saavutettavien ominaisuuksien variaatiot ovat laajat. Useimmiten käytetty lujitteiden käyttömuoto on kudoss tyypinen kangas. Lisäksi yksisuuntaisia yhteen liitettyjä kimppuja sisältäviä mattoja käytetään paikallisina lujitteina, kun tehdään valuja.

4 Lujitteiden käyttömuodot

Lujitemateriaaleja käytetään pitkinä eli jatkuvina kuituina, lyhyinä eli epäjatkuvin kuituina tai eri jalostemuodossa, kuten punoksina, mattona, tai kankaana. Joissain tapauksissa lujitteessa voidaan käyttää useampaa eri lujitemateriaalia esimerkiksi hiilikuitua ja aramidikuitua. Tällöin materiaalia kutsutaan hybridilujitteeksi. Hybridilujitteissa yritetään hyödyntää eri lujitemateriaalien parhaita ominaisuuksia. Sama lopputulos voidaan myös saada aikaan käyttämällä eri lujitemateriaaleja kerroksittain. (Saarela ym. 2003: 123.)



Kuvio 8. Yleisimpien lujitemateriaalien hintaerot. (Image ©Gurit)

4.1 Kudokset

Tavallisimmin lujitemateriaalina käytetään kaksiaksiaalisia kudoksia, joissa kaksi eri langajärjestelmää ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Lisäksi langat risteävät toistensa yli ja ali. Poikittain kulkevia lankoja kutsutaan kudelangoiiksi ja pituussuunnassa loimilangoiksi. Loimilankojen ja kudelangojen määrä toisiinsa verrattuna ja kudoksen tyyppi määräävät, että onko kudokse suunnattu vai tasavaltainen. Tasavaltaisessa kudoksessa lujitetta on lähes sama määrä loimi- ja kudesuunnassa, kun taas suunnatussa punoksessa jopa yli 95% lujitteesta kulkee jompaan kumpaan suuntaan. (Saarela ym. 2003: 129.)

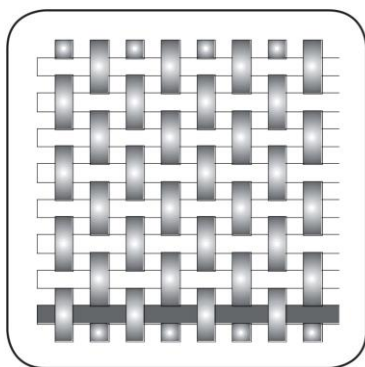
Yleisimmät käytetyt kudostyypit ovat palttina, toimikas ja satiini. Kudoksen sidosrakenteella on merkitystä kudoksen taipuisuuteen, stabiliteettiin, pinnan tasaisuuteen ja kastumisnopeuteen. Taulukossa listattu yleisten sidosrakenteiden ja edellä mainittujen ominaisuuksien riippuvuuksia.

	Stabiilius	Muotoiltavuus	Pinnan tasaisuus	Kastumisnopeus
Palttinasidos	hyvä	huono	epätasainen	hidas
panamasidos	↑	↓	↓	↑
toimikassidos				
4-v. satiini				
5-v. satiini				
8-v. satiini	huono	hyvä	tasainen	nopea

Kuvio 9. Yleisimpien kudostyyppien ominaisuuksia (Saarela ym. 2003: 129.)

Palttina (plain)

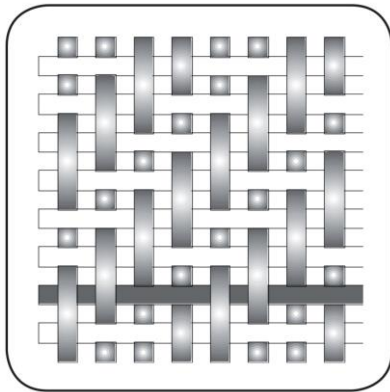
Kyseinen sidos on sidoksista yksinkertaisin. Tässä tyypissä kaksi kuitukerrosta kulkevat kohtisuoraan toisiinsa nähden, pysty- ja vaakasuuntaan. Palttinasidoksessa jokainen lanka menee vuorotellen vastakkaissuuntaisen kerroksen lankojen yli ja ali. (Saarela ym. 2003: 128—129.) Kuviossa 9. on eritelty jokaisen kudostyyppin ominaisuudet.



Kuvio 10. Palttinasidos. (Image ©Gurit)

Toimikassidos (twill)

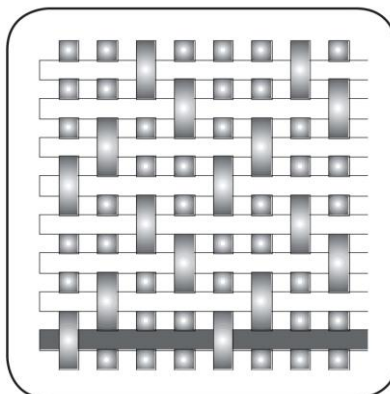
Tässä kudostyypissä yksi tai useampi pituussuuntainen lanka menee säännöllisesti kahden tai useamman poikittaissuuntaisen langan yli ja ali. Tälle kudostyypille on ominaista sen toimiviivat, joista toinen kulkee jatkuvana vanana kulmasta kulmaan ja toinen siksakkaa toisesta kulmasta toiseen. (Saarela ym. 2003: 129.)



Kuvio 11. Toimikassidos. (Image ©Gurit)

Satiinisidos (satin)

Saman tyyppinen kuin toimikassidos, mutta lankojen risteämiskohtia on vähemmän. Sidoksessa on pitkät lankajuoksut eli 4, 5 tai 8 lankaa ylitetään tai alitetaan yleensä ennen kuin kuvio toistuu sidoksessa. (Saarela ym. 2003: 129.)



Kuvio 12. Satiinisidos. (Image ©Gurit)

4.2 Katkokuitu

Katkokuitumatossa lujitekuidut eivät ole orientoituneet tiettyyn suuntaan, vaan asettuvat satunnaisesti lujitteessa. Yleisin kuitupituus on 50mm, mutta on myös saatavilla muita kuitupituuksia. Tyypilliset katkolasikuitumatot asettuvat 300-750g/m² neliöpainoihin, mutta on myös mahdollista saada kevyempänä tai painavampanakin. Lujitekuidut voidaan sitoa joko liimaamalla, sulattamalla tai ompelemalla toisiinsa. Käsins laminoinnissa kannattaa käyttää polyvinyylisetaattiemulsiolla sidottua katkokuitumattoa, koska sen käsiteltävyys, sidonta ja revittävyys ominaisuudet ovat hyvät. (Saarela ym. 2003: 128.)

Korkean vaatimustason komposiittivalmisteissa ei nykyään käytetä katkokuitumattoa sen heikompien mekaanisten ominaisuuksien takia verrattuna kudoksiin (Gurit 2017: 39). Apuvälineratkaisuissa katkokuitumattoa voidaan käyttää ankkurina nivelille ja valuadaptereille.

4.3 Punokset

Punokset voivat olla joko tuubin mallisia tai nauhoja. Tuubin malliset punokset on tehty spiraali muotoon. Kuitujen määrä punoksessa vaikuttaa tuubin halkaisijaan, kuitujen kulmaan sekä toistensa ylittävien kuitujen lukumäärään. Näillä tuubimaisilla punoksilla voidaan tuoda komposiittirakenteisiin lisää kiertojäykkyyttä. (Gurit 2017: 39.)

Nauhamaisilla punoksilla voidaan vahvistaa komposiittirakenteita niistä paikoista, joissa vaaditaan lisää vahvuutta täsmällisesti. Etuna tässä on se, että materiaalia voi lisätä vain sinne, missä sitä tarvitaan eikä yhtään ylimääräistä. (Gurit 2017: 33.)

5 Sidosaineet ja muovit

Sidosaineet ovat matriisimuoveja, jotka sitovat lujitteet sekä vahvikkeet ja yhdessä muodostavat komposiittimateriaalin. Yleisimmät lujitemuoviteollisuudessa käytetyt kertamuovit ovat epoksit, vinyyliesterit ja tyydyttymättömät polyesterit. Hartsit ovat kertamuovien perusraaka-aine, josta kemiallisen kovettumisreaktion jälkeen syntyy kertamuovia. Reaktiossa hartsin polymeeriketjut kytkeytyvät toisiinsa eli silloittuvat verkkomaiseksi rakenteeksi. Kertamuoveja käytetään matriisiaineena muovikomposiittirakenteissa. Hartsiin voidaan lisätä pieniä määriä apu- seos- ja täyteaineita muokkaamaan komposiitin ominaisuuksia. Kovettumisreaktio kertamuoveissa etenee hitaasti alussa ja reaktion lopussa nopeasti, jonka aikana laminaatin lämpötila nousee. (Saarela ym. 2003: 18—19.)

5.1 Kertamuovit

Yleisimmät lujitemuoviteollisuudessa käytetyt kertamuovit ovat epoksit, vinyyliesterit ja tyydyttymättömät polyesterit. Kovettumisreaktiossa hartsista muodostuu kertamuovi, kun polymeeriketjut liittyvät toisiinsa kemiallisin sidoksien eli silloittuvien. Kun kertamuovi on kovettunut niin sitä ei voida enää uudelleen muovata. (Saarela ym. 2003: 18.) Apuvälinetekniikassa käytetään ensisijaisesti akryylihartseja ja epoksihartseja. Näitä muoveja käytetään mm. valuisissa ja erilaisissa hiilikuitulaminaateissa. Akryylihartsi on edullisempaa, kuin esimerkiksi epoksihartsi ja se on termoplastinen. Tämä tarkoittaa sitä, että se on jälkikäteen lämpömuokattavissa ilman, että sen ominaisuudet merkittävästi heikenevät. Akryylihartsi lukeutuu tästä syystä myös kestopuovien piiriin. Epoksihartsi taas omaa pidemmän geeliajan eli se lähtee hitaammin kovettumaan, mikä lisää työstöaikaa. Lisäksi se on mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempaa kuin akryylihartsi.

5.2 Epoksit

Epoksihartsit ovat polymeerejä tai oligomeerejä, joissa on vähintään kaksi epoksiryhmää. Epoksiryhmä on reaktiivinen ja rengasmainen kemiallinen molekyyli rakenne. Kovettuakseen epoksihartsi vaatii kovetteen, joka voivat olla amiini-, happo- tai alkoholi-hydridiyhdiste. Epoksihartseja on useita erilaisia ja lähes kaikki monifunktionaaliset fenolit, glykolit, polyolit ja bisfenolit voidaan epoksoida epoksihartsiksi. (Saarela ym. 2003: 45.)

Epoksihartsien kovetteet ovat reaktiivisia kovetteita ja ne voidaan jakaa happoihin ja emäksiin. Kovete muodostaa epoksihartsin verkkorakenteesta suuren osan. Kovete ja hartsi on annosteltava tarkasti, koska jos jompaa kumpaa on liikaa, se jää reagoimatta ja heikentää epoksimuovin ominaisuuksia. Epokseilla on paremmat mekaaniset ominaisuudet polyesterihartseihin verrattuna. (Saarela ym. 2003: 47.)

5.3 Polyesterit

Polyesterihartsi on seos styreeniä ja tyydyttymätöntä polyesteriä. Kyseinen hartsi jäähmettyy, kun ainesosat reagoivat keskenään silloittumisreaktiossa. Polyesterihartsia valmistetaan esteröimällä dikarboksyylihappoa ja diolinia. Dikarboksyylihappo on orgaaninen kaksiarvoinen happo, joka sisältää kaksi happoryhmää. Diolin taas on kaksiarvoinen alkoholi, joka sisältää kaksi hydroksyyli ryhmää. (Saarela ym. 2003: 37—39.)

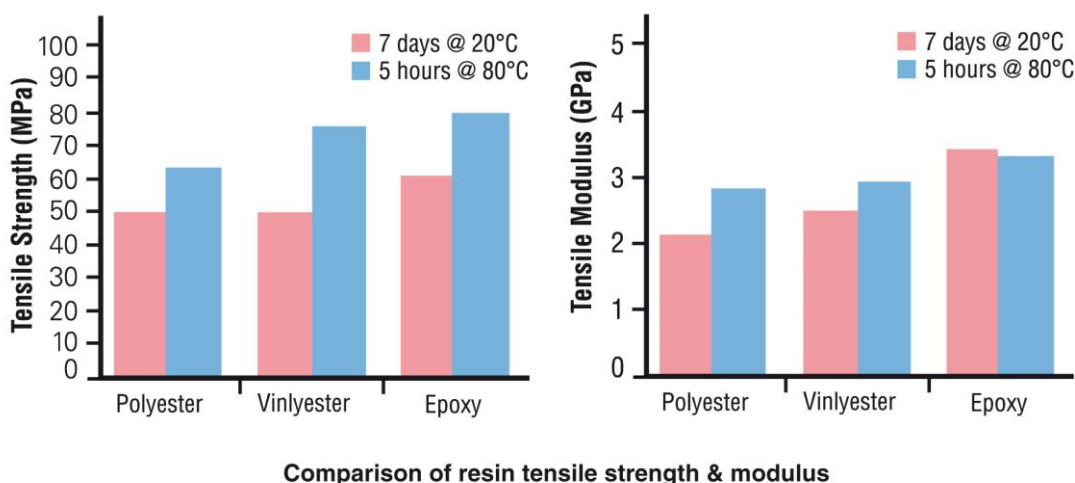
Polyesterihartsin ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäaineilla. Lisäaineita ovat kiihdytteet, inhibiittorit, haihtumisen estoaineet, tiksotrooppiset aineet ja uv-stabilisaattorit. Kiihdyttimet nopeuttavat kovettumisaikaa huoneenlämpötilassa. Inhibiittorit taas hidastavat kovettumisaikaa, mikä lisää työstöaikaa. Haihtumisen estoaineet vähentävät laminointivaiheessa styreenin haihtumista, mikä muuten aiheuttaa sen, että hartsin pinta ei kovetu kunnolla vaan jää tahmeaksi. Tiksotrooppiset aineet taas lisäävät viskositeettia, mikä vähentää hartsin valumista. (Saarela ym. 2003: 40—41.)

Polyesterihartsi kovettuminen tapahtuu radikaalireaktiossa, jolloin vapaat radikaalit muodostavat kovalenttisia sidoksia keskenään. Lopputuloksena syntyy silloittunut rakenne ja syntyy yksi suuri molekyyli, jossa kaikki polyesteriketjut ovat sitoutuneet toisiinsa styreenisiltojen avulla. (Saarela ym. 2003: 41.)

Polyesterihartsin adheesiokyky vertailtaessa epoksihartsiin on huonompi. Lisäksi polyesterihartsi kutistuu jopa 8% kovettuessaan, kun epoksi taas vain 2%. Veden sietokyky on myös heikompaa polyesterilla kuin epokseilla ja polyesterin. Polyesterihartsin veto-moduuli ja -vahvuus on heikompaa kuin epoksihartsilla. (Gurit 2017: 20—22.) Polyesterihartsi kuitenkin on huomattavasti edullisempaa ja prosessiajaltaan kuin epoksihartsi.

5.4 Akryylihartsi

Polymetyylimetakrylaatti, jota usein myös kutsutaan akryyliksi, on synteettinen polymeeri. Sitä valmistetaan polymerisoimalla metyylimetakrylaattia. PMMA on kovaa ja jäykkää muovia, jolla on myös erinomaiset optiset ominaisuudet. Lisäksi sillä on hyvä uv:n ja sään sieto ominaisuus. Lisäksi se on termoplastinen eli sitä voidaan muokata lämmittämällä. (Britannica A n.d.) Sitä käytetään sen valoa läpäisevän ominaisuuden vuoksi muun muassa valomainoksissa, akvaarioissa ja ikkunoissa (Muoviteollisuus ry n.d.).



Kuvio 13. Eri sidosaineiden vetolujuus ja vetomoduuli ominaisuudet. (Image ©Gurit)

5.5 Kestomuovit

Kestomuoveja kutsutaan termoplastisiksi muoveiksi, koska niitä voidaan muokata lämmön avulla ilman, että niiden rakenne muuttuu merkittävästi. Termoplastisilla muoveilla on yksi- tai kaksiulotteinen molekyyli rakenne, joka mahdollistaa niiden muokattavuuden. (Composite materials n.d.: 71.) Kestomuovien molekyylit koostuvat pitkistä polymeeriketjuista ja ne eivät ole liittyneet toisiinsa kemiallisin sidoksin. Kun muovia lämmitetään,

sen rakenne heikkenee, jolloin se on muovattavissa ja jäähtyessä taas rakenne uudelleen vahvistuu. (Saarela ym. 2003: 18.)

Yleisimpiä apuvälinetekniikassa käytettäviä kestopuoveja ovat polyeteeni (PE), polypropeeni (PP) ja polyvinyylikloridi (PVC). PE:tä ja PP:tä käytetään usein esimerkiksi ortootien runkomateriaaleina. PVC:tä voidaan käyttää mm. valuisia jäykistävinä profiileina. Akryylihartsi on myös kestopuovi.

5.5.1 Polypropeeni

Polypropeeni on PVC:n ja polyeteenin jälkeen kolmanneksi käytetyin puovi maailmassa. Propeeni polymeroidaan metalloseenikatalyyttien kanssa kaasufaasissa tai Ziegler-Natta katalyyttien kanssa. Muovin eri ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäaineilla tai polypropeenin polymeerirakennetta muuttamalla. Kyseisen muovin sulamislämpötila on noin 160—175 astetta ja jatkuva käyttölämpötila noin 100 astetta. (Saarela ym. 2003: 53—54.)

5.5.2 Polyeteeni

Polyeteeni on yksi yksinkertaisimmista ja halvimista polymeereistä (Muoviteollisuus n.d.). Se on myös yksi käytetyimmistä muovilaaduista. Polyeteeniä valmistetaan polymeroimalla eteeniä. Polyeteeniä löytyy eri laatuksina, joista käytetyimpiä ovat LDPE (matala-tiheyksinen), josta valmistetaan mm. muovipusseja ja HDPE (suur-tiheyksinen), josta taas tehdään mm. vesiputkia sekä erilaisia säiliöitä (Rogers 2015.). Polyeteenin hyviä puolia ovat sen helppo työstettävyys, hyvä kemikaalien sietokyky, keveys, kosteuden sietokyky ja kestävyys. Sulamispiste sekä mekaaniset ominaisuudet riippuvat siitä, että minkä tiheyksisestä polyeteenistä on kyse. Sulamispisteen vaihteluväli on n. 80°C-120°C. (Muoviyhdistys n.d.)

5.5.3 PVC

Polyvinyylikloridi on myös yksi käytetyimmistä termoplastisista muoveista maailmalla. Sitä löytyy kahtena perusmuotona, jotka ovat jäykkä ja joustava. Joustava on pehmeämpää sekä taipuisampaa ja sitä käytetään mm. sähköjohtojen päällysteenä ja sisätilojen lattiapintoina. Jäykkää PVC:tä käytetään esimerkiksi vesiputkissa. (Creative Mechanisms 2016.) PVC:tä valmistetaan suolaveden elektrolyysillä, josta saadaan kloriinia.

Tämä yhdistetään öljystä tuotettuun etyleeniin, jolloin saadaan vinyylidikloridimonomeeria. Tämä polymerisoidaan PVC-hartsiksi, josta pystytään jalostamaan haluttuja PVC-muotoja. (BPD 2018.) PVC:n hyviä ominaisuuksia ovat korkea tiheys, mikä tekee siitä kovan ja vahvan, sitä on helposti saatavilla ja se on edullista (Creative Mechanisms 2016).

6 Kerroslevyrakenne

Kerroslevy muodostuu kahdesta jäykästä pintalevystä ja kevyestä ja paksusta ydinaineesta. Pintalevyt liimataan ydinaineen molemmille puolille. Kyseinen rakenne on kevyt ja taivutusjäykkä. Kerroslevyrakenteilla on hyvät jäykkyys-paino ja lujuus-paino suhteet. Huonoja ominaisuuksia ovat alttius vaurioille iskuista ja pistekuormista. Yleisimpiä ydinaineita ovat kennoydinaineet ja solumuoviydinaineet. (Saarela ym. 2003: 105—106.)

6.1 Solumuoviydinaineet

Yleisimpiä ydinaineena käytettyjä solumuoveja ovat polyvinyylidikloridi (PVC), polyuretaani(PUR) ja polystyreeni (PS). Solumuovit imevät itseensä vähän vettä, eristävät lämpöä hyvin, ovat suhteellisen halpoja ja helposti saatavia. Jos solumuovia käyttää alipainejektiossa ydinaineena, se pitää urittaa ja rei'ittää hartsin virtaamista ja ilman poistumista varten. (Saarela ym. 2003: 106.)

6.2 Kennoydinaineet

Kennoydinaineista yleisimpiä ovat alumiinista, ruostumattomasta teräksestä ja aramidikuitupaperista valmistetut kennot. Aramidihunajapaperi- ja alumiinihunajakennoilla on parhaat lujuusominaisuudet ominaispainoon nähden. Kennoja voidaan valmistaa melkein mistä vain ohuesta levymateriaalista ja kennoydinaineita valmistetaan yli 500 eri materiaalista ja kennorakenteen ohuin mahdollinen paksuus on 2-3 mm. Kennomuotoja on useampia kuin heksagonaalinen, kuten neliö, yliavattu hunajakenno ja taipuisa. Ydinaineen ominaisuudet riippuvat valmistusmenetelmästä, kennokoosta, kennon muodosta ja materiaalista. (Saarela ym. 2003: 111.)

7 Valmistusmenetelmät

Valmistusmenetelmän valinta riippuu käytettävistä materiaaleista. Kun käytetään puoli-valmisteita, kuten prepreg ja tfc, niin vaativat materiaalit omat valmistusmenetelmänsä. Märkävalu ja alipaineinjektio vaatii taas omat valmistusmenetelmänsä.

7.1 Märkävalu

Märkävalu tarkoittaa sitä, että vahvikekuidut kyllästetään hartsilla käsin käyttämällä esimerkiksi teloja tai pensseleitä. Kun hartsi on saatu levitettyä kauttaaltaan halutulle alueelle, jätetään laminaatti kypsymään huoneenlämpöön sellaisenaan. (Gurit 2017: 48.)

Hyviä ominaisuuksia menetelmässä on mm. siinä voidaan hyödyntää mitä tahansa sidosaineita(hartseja), jotka kovettuvat huoneenlämmössä, vahvikkeita ja ydinmateriaaleja. Menetelmää on käytetty pitkään, se on helppo omaksua ja se on melko edullista. Huonoja ominaisuuksia ovat mm. laminaatin laadun heikko hallintakyky, terveydelliset seikat kun käsitellään aineita ja menetelmässä hartsin ominaisuudet ovat heikkommat. (Gurit 2017: 48.)

7.2 Alipaineinjektio

Alipaineinjektioilla tarkoitetaan sitä, että sidosaine syötetään vakuumiin alaisuudessa olevan positiivimallin ja vahvikkeiden joukkoon, jolloin sidosaine alipaineen avulla valuu tähän välitilaan ja täyttää sen hartsilla. (Performance Composites Inc. n.d.)

Menetelmä toimii siis siten, että positiivimalli päällystetään imukalvolla, jonka päälle asetellaan haluttu määrä vahvikkeita kuten perlon-, lasikuitu-, aramidi- ja hiilikuitutekstiiliä tai ydinmateriaaleja. Tämän jälkeen kaikki suljetaan imukalvon alle ja välitilaan johdetaan sidosaine. Sidosaine levittyy tasaisesti riippuen vahvikkeiden paksuudesta(läpäisykyky), matkasta, jonka hartsin pitää ylittää, hartsin viskositeetista ja alipaineesta alueelle vakuumpumpun voimalla. (Performance Composites Inc. n.d.)

Hyviä puolia ovat hyvä vahvike-sidosaine -suhde (jopa 70% vahvikkeita painosta), vahvempi sekä kevyempi laminaatti, ei niin paljon terveyshaittoja, malli ei kutistu, hyvät mahdollisuudet vaikuttaa vahvikkeiden määrään, hyvä viimeistely ja nopea jähmettyminen. (Performance Composites Inc. n.d.)

Huonoina puolina mm. esivalmistelujen määrä, vakuumin mahdollinen pettäminen, vaatii paljon työkaluja sekä työtunteja ja hukkaan menevää tavaraa tulee enemmän. (Performance Composites Inc. n.d.)

7.3 Prepreg- laminointi

Prepreg on puolivalmiste, jossa lujitemateriaali on esikyllästetty muovilla ja nimitys prepreg tulee englanninkielisen sanasta "pre-impregnated". Lähtökohtaisesti prepregissä käytetään kertamuoveja. Prepregiä tulee säilyttää -18 asteessa. Prepregiin esikyllästetyn hartsin kovettumisreaktio toimii hitaammin, kun sitä säilytetään kylmässä. Tuotteen säilyvyys paranee entisestään, kun sitä säilytetään jäätyneenä, mutta tällöinkin puhutaan useista kuukausista (Gurit 2017: 54). Ennen käyttöä prepregin annetaan lämmitä huoneenlämpöiseksi ja prepreg kovetetaan korkeassa lämpötilassa. (Saarela ym. 2003: 142).

Prepreg-laminoinnissa käytettävät palat ja kerrokset voidaan asettaa muotille käsin tai koneella. Huoneenlämmössä prepreg on pehmeää, sitä on helppo käsitellä ja se muovautuu hyvin erilaisille pinnoille. Kun prepreg on aseteltu muotille, kokonaisuus suljetaan vakuumin alle ja tuote laitetaan uuniin, tyypillinen käsittelylämpötila on 120°C. Tässä lämpötilassa hartsi pehmenee ja lähtee liikkumaan alipaineen vaikutuksesta. Hartsi asetuu uudelleen tasaisesti ja ylimääräinen hartsi pyritään saamaan tuotteesta pois käyttämällä repäisykalvoa ja tämän päällä huopaa. Ylimääräinen hartsi kulkee repäisykalvon läpi ja imeytyy huopaan alipaineessa. Tällä tavoin tuote kevenee sekä tavoitetaan optimaalinen hartsi-lujite-suhde. (Gurit 2017: 54, 55.)

7.4 TFC- laminointi

TFC eli thermo formable composite on levy muodossa olevaa komposiittimateriaalia, joka sisältää vahvikemateriaalin lisäksi sidosaineen. Sidosaine on lämpömuovattavaa muovia, joka lämmitettäessä notkistuu, mikä mahdollistaa materiaalin muotoilun mallin muotoja mukailevaksi. Jäähdyessään sidosaine jähmettyy ja materiaali jäykistyy. Tätä materiaalia voidaan lämmittää, muotoilla ja jäähdyttää useita kertoja ilman, että sen ominaisuudet heikkenevät. (CompositesWorld 2006.)

Käytännössä lämpöilmapuhaltimella lämmitetään materiaalia, minkä jälkeen se asetellaan positiivimallin päälle ja lämmön avulla painellaan tiiviisti mallia vasten haluttu määrä

kerroksia ja vahvikkeita yms. Mikäli pehmusteille halutaan luoda tila, niin positiivimalli kannattaa päällystää korkilla, sillä se sietää korkeaa lämpötilaa. Lisäksi korkin ja TFC:n välissä on hyvä olla jotain esimerkiksi kerros perlonia.

Kun valittu määrä kerroksia vahvikkeita yms. on saavutettu, ylimääräinen materiaali poistetaan haluttuun linjaan asti ja tuote laminoidaan positiivimallin päällä vakuumin alla n. 240 asteen lämmössä 45min ajan.

Valmistelut vulkanointia varten käsittävät lämpöä kestävä kalvon asettamisen positiivin päälle, tämä estää tuotteen tarttumisen positiiviin ja tuo sileän sisäpinnan tuotteeseen. Tämän jälkeen tuote asetetaan positiiville ja päälle on hyvä pingottaa esimerkiksi silikonikalvo kuumaa kestäväällä teipillä, mikä yhdessä kuumuuden ja alipaineen vaikutuksen alla luo hyvän ulkopinnan tuotteeseen. Tämän jälkeen tehdään sopivan kokoinen kuumaa kestävä imupussi, joka vedetään positiivin yli imuputkea vasten tiiviisti kiinni. Nyt tuote on valmis laminoitavaksi. Kuumuus yhdessä alipaineen kanssa sitoo kerrokset ja vahvikkeet yhteen, mikä luo tiiviin, yhtenäisen ja vahvan lopputuloksen.

Tämän materiaalin etuja ovat mm. nopea työstettävyyys, soveltuu yksilöllisiin ratkaisuihin, on kierrätettävissä ja on edullista. (CompositesWorld 2006.)

8 Työstö

Komposiittimateriaaleja työstäessä pitää käyttää tarvittavia suojalaitteita, kuten hengityssuojainta, hanskoja, suojalaseja ja kuulosuojaimia käytetystä laitteesta riippuen. Eri hartsit ja komposiittipöly voivat aiheuttaa allergisia reaktioita.

8.1 Leikkaus

Tärkeintä komposiittimateriaalin leikkaamisessa on käyttää hienohampaista terää, koska karkeahampainen sahanterä repii kuitukerroksia ja voi delaminoida kerroksia erilleen. Riippuen käytetystä hartsista, leikkuunopeus valitaan nopeaksi epoksilla ja hitaaksi akryylihartsilla, sillä akryylihartsi on kestopuovi ja se alkaa sulaa lämmön vaikutuksesta.

Aramidikuitu on sitkeämpää kuin hiilikuitu, mikä tekee sen leikkaamisesta haastavampaa ja leikkuusaumasta tulee helposti epätasainen. Leikkuutyökaluina voi käyttää pistosahaa, rautasahaa tai jopa kipsisahaa.

8.2 Hionta

Hiomakoneella hiottaessa kestopuovikomposiitteja, kuten akryylihartsipohjaisia tai TFC-pohjaisia komposiitteja, tulee käyttää karkeaa hiomapaperirullaa ja hidasta hiontanopeutta. Muuten komposiittirakenne lämpenee kitkan vaikutuksesta, sulaa ja näin ollen menettää joitakin ominaisuuksiaan. Epoksihartsipohjaisia komposiitteja voidaan hioa hienolla paperilla ja suurella hionta nopeudella, mutta hiottavaa kappaletta ei kuitenkaan saa painaa rullaa vasten kovalla voimalla. Epoksihartsi ei pehmene ja sula samalla tavalla kuin kestopuovi komposiitit. Lopullinen reunojen hionta voidaan suorittaa vesihiomapaperilla.

8.3 Poraus

Porattaessa kannattaa käyttää erittäin teräviä poranteriä ja riippuen porattavasta kohteesta ja reiän koosta suurta kierroslukua. Poratessa pitää olla tarkkana poranterän mentäessä läpi komposiitista. Koska jos terää painaa liikaa, se saattaa repiä reiän reunamista paloja irti ja kerrokset voivat delaminoitua ja pahimmassa tapauksessa kappaleeseen voi tulla halkeama.

8.4 Liimaus

Liimaus on hyvä osien liittämistapa, jos osia ei tarvitse irrottaa toisistaan myöhemmin. Liimasauman pinta-alan on oltava suurempi verrattuna mekaaniseen liitokseen, koska liimat ovat perusmateriaaleja heikompia. Kunnollinen liimaus vaatii oikean liimatyyppin, liimauspintojen käsittelyn ja oikeat kovetusolosuhteet (Saarela ym. 2003: 113.) Valittavan liiman on sovelluttava molemmille liimattaville pinnoille. Lisäksi on hyvä valita liima, joka soveltuu käyttökohteen vaatimaan suorituskyykyyn. (Gurit 2017: 60).

Perusedellytys liimasauman toimivuudelle on liiman adheesio eli tartunta liimattavaan kappaleeseen. Liiman koheesion eli sisäisen lujuuden on oltava myös riittävä, jotta liimasauma kestää. Liimasaumaan kohdistuu yleensä repiviä voimia, joiden takia liiman tulisi olla sitkeää ja vetokuormia kestävä. (Saarela ym. 2003: 113.)

Yleisimmin liimat ovat yksi- tai kaksikomponenttisiä nesteitä ja pastoja. Nämä ovat myös helppokäyttöisiä ja käytetyimpiä liimamuotoja rakenneliimauksessa. Pastaliimat ovat hyviä, jos liimasaumassa on toleranssiongelmia ja saumaa pitää täyttää hieman. Kyseiset liimat toimivat myös lähtökohtaisesti huoneenlämmössä. Haittapuolena neste- ja pastaliimoissa ovat epäsiisteys, mahdolliset terveydelliset ongelmat ja liimasauman mahdollinen epätäydellisyys ja saumaan jäävät ilmataskut ja huokoset. (Saarela ym. 2003: 116.)

Liimattavat pinnat on puhdistettava ennen liimausta mahdollisesta rasvasta, irrotusaineista, kosteudesta ja muusta liasta. Useimmin puhdistusaineena käytetään nopeasti haihtuvia liuottimia. Yleisimpiin apuvälinetekniikassa käytettyihin muoveihin puhdistusaineksi soveltuu ketoniliuote esimerkiksi asetoni. Puhdistuksen lisäksi liimattavat pinnat voi karhentaa adheesion parantamiseksi. (Saarela ym. 2003: 223.)

8.5 Korjaaminen

Kun lähdetään korjaamaan komposiitteja, niin ensin on kartoitettava vahinkojen laajuus. Yleensä vauriot saattavat ulottua pinnassa näkyvää lommoa syvemmälle, joten vaurioiden laajuus täytyy saada selville. Kun vaurion laajuus on selvillä, sen vakavuus ja vaikuttavuus komposiitin suorituskyykyyn täytyy arvioida. (Hexcel 1999: 3.)

Vaurio voi olla niin kattava, että sen korjaaminen ei kannata tai palautta komposiitin suorituskyykyä tai eheyttä sitä. Tällöin parempi vaihtoehto on kokonaan uuden valmistus tai

vaihtaminen uuteen. Mikäli kyseessä taas on vain kosmeettinen vaurio, joka ei vaikuta komposiitin kestävyYTEEN, niin pinnan siistiminen riittää eikä vahvikkeita tarvita. Jos taas vaurio on komposiitin toimintaa heikentävä ja rakennetta uhkaava, niin suurempi korjaus on välttämätön. Vaurioitunut alue saattaa myös olla pieni eikä suoraan uhkaa komposiittia, mutta ajan kanssa rasitus ja kosteus saattavat nopeasti tuottaa tuhoa. (Hexcel 1999: 3, 5.)

Kun lähdetään korjaamaan vaurioitunutta laminaattia, niin vaurioituneet ja suorituskynsä menettäneet materiaalit tulisi poistaa ja korvata uusilla. Uudet vahvikkeet, hartsit sekä ydinmateriaalit olisi hyvä olla niitä samoja, joita alkuperäisessä komposiitissa on käytetty, jolloin yhteensopivuus on parempi. (Hexcel 1999: 5.) Lisäksi korjattavien pintojen täytyisi olla kuivat ja puhtaat, jotta yhteenliittyminen onnistuisi parhaiten.

Tyypillisesti komposiitti korjataan siten, että vaurioitunut alue poistetaan ja vaurioitunut alue täytetään vauriot kattavilla vahvikekerroksilla ja päälle laitetaan ylimeneviä vahvikekerroksia. Vahvikkeet laminoidaan suoraan kiinni alkuperäiseen laminaattiin. Jos on käytetty ydinmateriaaleja, niin samalla tavalla vaurioitunut ydin korvataan uudella ja vahvikkeiden avulla laminoidaan yhteen alkuperäiseen laminaattiin. (Hexcel 1999: 3, 6-8.)

9 Case: Staattinen AFO prepreg- laminoinnilla

Seuraavassa osiossa käydään läpi yleisellä tasolla sitä, miten prepregiä käytetään. Kyseisessä työssä hyödynnetään useita eri tekniikoita esimerkin vuoksi, joista kaikki tekniikat eivät välttämättä sovellu käytettäväksi keskenään oikean ortoosin valmistuksessa. Kantaa ei myöskään oteta oikeaoppiseen kipsin työstöön kyseisessä esimerkkitapauksessa.

9.1 Kipsiposiitivi

Positiivimuotin eli tässä tapauksessa kipsimallin tulee olla todella tarkasti valmistettu asiakkaan mittojen mukaan, koska prepreg on lähtökohtaisesti epoksihartsipohjaista. Tästä syystä se ei ole lämpömuokattavaa, mistä johtuen ortoosia ei voida muokata lämmöllä sen valmistuksen jälkeen. Kipsin pinnan tulee olla siisti ja tasainen, koska pienetkin epätasaisuudet siirtyvät valmiiseen tuotteeseen kipsimallista. Hyvä tapa saada selville kipsimallin onnistuminen on valmistaa niin kutsuttu testi-ortoosi. Positiivimallin päälle tehdään tavallinen muovinveto ja tämän muovisen ortoosin kanssa tehdään sovitus. Sovituksen aikana saadaan näin hyvin selville, jos kipsiä on tarpeen muokata jollakin tavalla.

Jos on epävarma tuotteen onnistumisesta tai kipsin sopivuudesta, siitä kannattaa ottaa kopio kipsinauhalla ennen tuotteen valmistuksen aloittamista. Tämä syystä, että suurella todennäköisyydellä kipsimuotin joutuu hajottamaan tuotteen irrottamisen yhteydessä.

Mikäli tuotteeseen tehdään esimerkiksi vahvistava profiili yms. on oltava huolellinen, että se istuu hyvin positiivia vasten. Prepreg täytyy myös saada tiiviisti aseteltua ilman ilmaa/sumppuja välissä, sillä muuten melko varmasti valmiissa tuotteessa ilmenee rypyjä tai muita epätasaisuuksia. Tässä työssä käytettiin vanhaa prepregiä, mikä ei välttämättä ole niin hyvä ratkaisu. Vanha prepreg saattaa vaikuttaa lopputuotteen laatuun heikentävästi.

9.2 Pehmusteet

Ortoosiin tulevat pehmusteet täytyy valmistaa ennen kuin valmistetaan pehmustevara esimerkiksi korkista. Pehmusteen voi vetää koko ortoosin yli ja jälkikäteen leikata sopivaan muotoon.

Korkin liimaamista varten kipsiin kannattaa hahmotella ortoosin lopullinen muoto, jonka pohjalta voi piirtää kaavat korkin paloja varten. Kaavapaperina toimii hyvin valkoinen pyyhkearkki, koska kipsiin piirretyt ääriviivat näkyvät siitä läpi ja rajan voi hahmottaa kaavaksi. Kun kaavapaperiin on saatu piirrettyä ortoosin reunat ja paperi on saatu muotoiltua kipsin myötäiseksi teipin avulla, kaavan voi leikata irti paperista.



Kuvio 14. Kuvassa kaava pehmustevaraa varten sekä valmistetut pehmustevarat.

Vielä tarkemman kaavan voi saada aikaan teippaamalla samalla tavoin, kuin esimerkiksi kenkien kaavat valmistetaan lestistä. Teipattu kaava vie enemmän aikaa kuin paperista tehty kaava, mutta kannattaa miettiä kumpi tapa on järkevämpi valmistettavan tuotteen kannalta. Teippi ei myöskään taivu hyvin, jos on vaativampia muotoja, jolloin teippikopion siirtäminen, esimerkiksi pahville, ei välttämättä onnistu sujuvasti. Tällöin muodostuva kaava ei välttämättä ole yhtä tarkka.

Kaava olisi aina hyvä saada tehtyä mahdollisimman isosta osasta kerrallaan, mutta jos se ei ole mahdollista, kaavan voi tehdä useammista osista, kunhan jakolinjat tehdään saumattomiksi korkitusvaiheessa. Jos korkituksessa tulee saumoja, korkin reunat kannattaa ohentaa ennen liimaamista, jotta saavutetaan mahdollisimman tasainen sauma.

Korkki kannattaa leikata kaavaa hieman isommaksi jättämällä työskentelyvaraa korkin liimaukseen ja työstöön. Korkki muotoutuu paremmin, kun sitä käyttää 150°C asteisessa uunissa pienen hetken. Kontaktiliiman voi levittää korkin päälle ennen uunitusta ja myös kipsiin. Korkki kestää huonosti venytystä ja repeää helposti, joten korkin liimauksessa kannattaa olla tarkkana. Korkkia voi muotoilla paikoilleen pienellä vasaralla varovasti nappamalla.

Jos korkki ei liimaudu kunnolla kipsiin, niin sitä voi yrittää liimata pikaliimalla jälkikäteen. Yksi hyvä keino korkin liimaamisessa kipsiin on se, että kipsimallin päällelystää esimerkiksi tiukalla perlon sukalla. Tiukka sukka ei lähde pyörimään mallin päällä ja liimallekin on jotain, mihin tarttua. Jos korkkiin tulee suurempia koloja tai reikiä viimeistelyvaiheessa, reiät voi täyttää pastasilillä tai vastaavalla nopeasti kovettuvalla pastalla, joka kestää lämpöä.

Käytetyn korkin tulisi olla yhtä paksua kuin tulevien pehmusteiden paksuus. Esimerkiksi, jos käyttää 3mm korkkia, niin se luo varan 3mm paksuiselle pehmusteelle. Tässä työssä käytettiin 3mm extrafoamia. Korkistusvaihetta ei voi kiertää valmistamalla pehmusteet ensiksi ja jättämällä ne paikoilleen laminoinnin ajaksi, koska prepreg vaatii noin 120 asteisen uunituksen, minkä aikana pehmustemateriaalit menettävät ominaisuutensa ja litistyvät. Esimerkin takia käytimme osan korkin sijasta 3mm extrafoamia, joka litistyi 0,5-1 mm paksuiseksi uunituksen jälkeen. Jos taas tekee tavallisena valuna, niin tällöin pehmusteet voidaan jättää alle, sillä näin tehtynä lämpötila ei kohoa niin korkeaksi, että se painaisi pehmusteita liikaa kasaan.

9.3 Jäykistysprofiili

Joidenkin ortoosien kuuluu olla jäykkiä ja helpoin tapa valmistaa jäykkä ortoosi on käyttää jotain profiilia, esimerkiksi profiilitankoa valun sisällä. Komposiitista valmistetuissa osissa muotojäykiste on kustannustehokas, materiaalia ja painoa säästävä keino.

Hyvä jäykistemateriaali on eri valmistajilta saatava PVC profiilitanko. Sitä on mahdollista saada eri levyisinä ja paksuisina. Tankoa saa myös eri profiilimuodoilla. Käytimme noin 20 mm leveää ja 4mm paksua PVC-tankoa. Ensiksi hahmotellaan mallin päälle haluttu linja ja paikka jäykisteelle ja mitataan tarvittavan pitkä pala profiilitankoa. PVC tangon

päät nollataan molemmista päistä muotoilun jälkeen siistimmän lopputuloksen ja paremman istuvuuden takia. Päiden nollaamisella tarkoitetaan päiden hiomista viistoiksi, jolloin pää on ohut ja lopulta paksunee tangon paksuuteen.

Tanko saadaan muotoiltua, kun se laitetaan noin 150°C asteiseen uuniin, kunnes PVC veltostuu, tämän jälkeen profiilitanko asetetaan positiivin päälle haluttuun kohtaan. Tankoa on pidettävä paikoillaan, kunnes se on kokonaan jäähtynyt, koska se voi muuten menettää osan muodostaan. Tangon voi kinnittää jäähtymisen ajaksi positiiviin ideaalisiteellä. Kun profiili on jäähtynyt, tarkastetaan muoto ja asetetaan sivuun odottamaan laminointia. Jos tanko ei ole oikean muotoinen tai halutussa paikassa, sen voi lämmittää uudelleen ja toistaa vaiheet. Tangon reunat on myös hyvä pyöristää, jolloin lopputuloksesta tulee jouhevampi, kuidut asettuvat siistimmin ja ylimääräinen hartsi virtaa paremmin.



Kuvio 15. Profiilitangon muotoilu ja päällystys.

9.4 Prepregin asettelu

Korkitetun kipsin päälle on hyvä vetää kireä perlonsukka tasoittamaan teräviä kulmia sekä pehmentämään muotoja. Tämän jälkeen päälle vedetään sopivan kokoinen PVA-

kalvo. Kalvon yläpää pitää sulkea tiiviisti ja alapää kiinnittää imuputkeen kuminauhalla ja teipillä. Tarkoituksena on muodostaa tiivis ja sileä pohja prepregiä varten.

Yleisimmät käytetyt prepregit apuvälinetekniikan sovelluksissa ovat unidirectional hiilikuitu, twill-kudoksinen hiilikuitu ja twill-aramidikuitu. Lähtökohtaisesti kaikki käytettävät prepregit ovat epoksipohjaisia. Käytössä olevan prepregin ominaisuudet kannattaa tarkastaa valmistajan tarjoamasta teknisestä datalehddestä. Eri prepregillä on eri kovetusajat uunissa sekä käytettävät lämpötilat ja ne selviävät yleensä valmistajan tarjoamasta datalehddestä myös.

Prepregit kannattaa ottaa pakastimesta huoneenlämpöön pari tuntia ennen käyttöä. Kannattaa myös varmistaa prepregin ostopäivämäärä, koska prepreg ei säily pakastimessa vuotta pidempään ilman, että sen käyttöominaisuudet rupeavat kärsimään. Ulkoisesti vanhentunut prepreg voi olla hyvän tuntuista, mutta sen kemialliset ominaisuudet voivat olla heikentyneet.

Esimerkin vuoksi käytimme työssämme vanhentunutta prepregiä. Prepreg oli viisi vuotta vanhaa, ulkoisilta ominaisuuksiltaan laadukkaan tuntuista, mutta kovetuksen jälkeen kappaleesta tuli kuiva ja hauras.

Prepregiä käsitellessä olisi hyvä käyttää nitriliikumihanskoja käsien suojaamiseksi. Prepreg rulla levitetään auki ja leikataan aikaisemman kaavan mukaisia paloja. Prepregissä pitäisi olla suojakalvo toisella puolella ja suojapaperi toisella puolella. Paperi pysyy paremmin kuidussa kiinni, joten sille puolelle kannattaa piirtää kaavakopio. Kaavaa käytettäessä pitää myös huomioida prepregin kuituorientaatio ja haluttu kuitusuunta.

Prepregiä voi leikata esimerkiksi tavallisilla keittiösaksilla, mutta sähkösaksien käyttö on suositeltavaa. Kun sopivan muotoinen pala on leikattu, poistetaan suojakalvo ja paperi. Suurten prepreg palojen käsittely on helpompaa, jos on toinen henkilö auttamassa. Prepreg asetetaan kipsin päälle, ja pienellä painalluksella prepreg tarttuu kipsiin melko hyvin kiinni. Prepregiä asetettaessa on varottava ryppyjen muodostumista ja ilmataskuja. Jos prepreg menee ryppeyn niin sen voi irroittaa kipsistä ja yrittää uudelleen.

Prepreg on myös asetettava melko kireästi kipsin pintaan, koska alipaineistus vaiheessa löysästi asetettu kuitu vetäytyy helposti ryppeyn. Kuitua ei kuitenkaan saa vetää liian

kovaa, koska muuten kudosa voi hajota tai kuitusuunnat voivat mennä väärään suuntaan. Prepregiin voi leikata pieniä halkeamia helpottaakseen kuitujen asettumista muotoon, kunhan halkeamat eivät joudu suurten rasitusten alaisiksi valmiissa tuotteessa.



Kuvio 16. Prepregin käsittely ja asettelu positiivin päälle.

9.5 Vahvikkeet ja ankkurointi

Jäykisteprofiilia varten ortoosiin pitää rakentaa ns. ankkuri, johon profiili kiinnittyy. Ankkurin voi valmistaa UD kuidusta leikkaamalla tarpeeksi leveitä paloja, jotka asettuvat profiiliin alle sen koko matkalta. Ankkurin tehtävänä on myös jakaa jäykisteprofiiliin kohdistuvia voimia muualle ortoosiin.

Jäykisteprofiili pitää päällystää aina vahvikkeilla ja tässä työssä käytettiin kahta kerrosta twill-prepregiä. Case esimerkissä kokeiltiin, että miten hiilikuitusukka toimii prepregin kanssa. Hiilikuitusukan käyttäminen on nopeampaa kuin prepregin asettaminen profiilin ympärille. Kyseistä vahvikkesukkaa käytetään enimmäkseen alipaineinjektiovaluisissa. Sukkan toimimisesta ei ole varmuutta, koska prepregin hartsipitoisuus on pieni, eikä se välttämättä riitä hiilikuitusukan kastamiseen kokonaan. Hiilikuitusukan toimimisesta lisää Case osion viimeisessä kappaleessa.

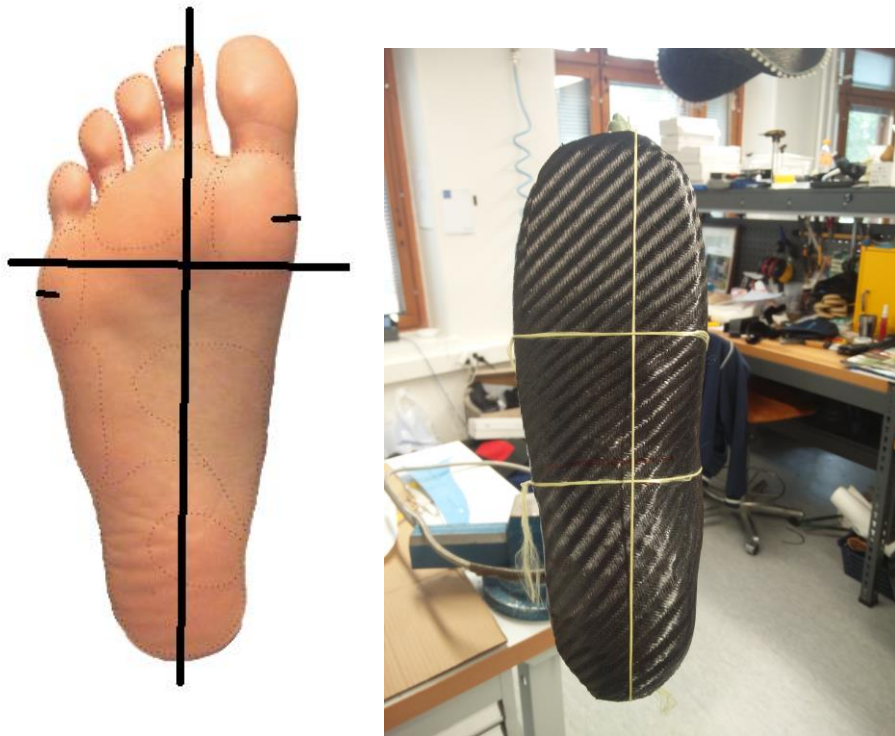
Kuidutetun profiilin päälle asetetaan samanlaiset UD ankkurit mutta leveämpänä, koska profiilin muoto vie osan nauhan leveydestä. Vahvike- ja ankkurihiilikuidut laitetaan samalla tavalla profiilin päälle, kuin allekin.



Kuvio 17. Vahvikkeet ja profiilin ankkurointi.

9.6 Jäykkä jalkaterä

Jotkut ortoosimallit tarvitsevat toimiakseen jäykän jalkaterän. Jäykkä jalkaterä voi olla tarpeen, kun aktiivinen varvastyöntö puuttuu tai se on liian heikko, jolloin tämä toteutetaan ortoosin avulla. Tällöin ortoosin jalkaterä vaatii myös etuosaan käynnin, jotta askel olisi rullaava ortoosin kanssa. Käynti tehdään esimerkiksi Fior&Gentz:in mallin mukaan siten, että vedetään suora viiva kannan keskeltä kulkien 2. varpaan säteen keskeltä. Tämän jälkeen merkataan kipsiin 1. varpaan tyven sekä 5. varpaan tyven keskikohta. Tyvien keskipisteiden välistä vedetään viiva 90° kulmassa suhteessa pituussuuntaiseen viivaan. Tämä viivan määrittää käynnin alkamispisteen ja käynnin määrä määrittyy osittain käytettävien jalkineiden mukaan.



Kuvio 18. Käyntipisteen määrittäminen

Jäykän jalkaterän toteuttamiseen on useita keinoja, joista yleisin on kokemuksen tuoma tieto tarvittavan kuitumäärän käytöstä. Fior&Gentz:llä on myös olemassa kaava, jonka mukaan he valmistavat jäykkiä jalkateriä. Kaava on todettu toimivaksi klinisen työn yhteydessä ja se ei välttämättä toimi jokaisella asiakkaalla. Lisäksi tämä menetelmä vaatii sen, että käytettävät vahvikkeet ja muut materiaalit ovat samoja, kuin mitä kyseinen yritys käyttää valmistuksessa.

Kaava on: $(\text{asiakkaan paino} + \text{kengänkoko}) / 10 = \text{jalkaterään laitettavien vahvikkeiden lukumäärä}$. Lisäksi peruskerroksia on hyvä alueella olla, eräässä mallissa jalkaterässä oli käytetty 8 peruskerrosta vahvikkeiden lisäksi.

Kuvitteellisen asiakkaan kohdalla kaava olisi siis $(86 + 44) / 10 = 13$

Eli työssä käytettäisiin 13 kerrosta UD vahvikekuitua jalkaterän vahvikkeeksi. Kerrokset asetetaan porrastetusti siten, että ensimmäinen yltää jalan keskiosasta varpasiin asti ja siitä lyheten viimeisen kerroksen yltäen käyntipisteestä varpasiin. Tällöin ei muodostu paksua kohtaa jalkaterän alle ja saadaan silti kestävä rakenne.

Ennen vahvikekerroksia on hyvä asettaa ainakin pari kerrosta esimerkiksi twill prepregiä ja vahvikkeiden jälkeen pari kerrosta, jotta tukikerrokset jäävät piiloon siistien kerrosten alle. Mainittakoon vielä, että tämä käytetty malli on suunniteltu käytettäväksi alipaineinjektion yhteydessä, joten sen toimivuudesta käytettäessä prepregiä ei ole varmuutta.



Kuvio 19. Jäykän jalkaterän vahvikkeiden asettelu ja eteneminen.

9.7 Viimeistely

Mitä paremmin jokaisen kerroksen saa asetettua paikoilleen, sitä vähemmän tarvitsee tehdä viimeistelyvaiheessa. Lisäksi jos ensimmäisten kerrosten kanssa on ongelmia, niitä ei voi välttämättä poistaa myöhemmin. Tärkeintä on saada kuitukerrokset kiinni toisiinsa ja poistaa ilmataskut painelemalla prepregiä joko sormin tai työkaluilla.

9.8 Alipainekalvon valmistus

Kun pinnan laatu on hyvä, voidaan asettaa esimerkiksi karhennuskangas prepregin päälle. Karhennuskangas toimii irroituskalvona ja se myös imee itseensä prepregistä tulevat ylimääräiset hartsit. Kankaan voi kiinnittää prepregin päälle sprayliimalla ja sen voi

tehdä useammasta palasta, kunhan reunat menevät toisten palojen päälle. On ehdottoman tärkeää, että kankaaseen ei jää ryppyjä, koska rypyt voivat näkyä lopullisessa tuotteessa. Ryppyjä voi poistaa leikkaamalla kankaaseen halkioita, sillä kyseinen kangas ei veny ollenkaan.

Karhennuskankaan jälkeen asetetaan imuhuopa positiivin ympärille. Imuhuovan tehtävänä on varmistaa alipaineen pääseminen kappaleen ympärille ja huopa myös imee itseensä ylimääräistä hartsia kovetusvaiheessa uunissa. Huovan voi kiinnittää teippaamalla.

Seuraavaksi leikataan rullasta yms. tarpeeksi pitkä pala alipainekalvo, joka mitataan silmäämääräisesti. Käyttämämme kalvo oli tuubin muotoista, mikä helpotti sen käyttöä. Kalvoa on saatavilla eri muotoisina ja eri kokoisina rullina.

Kalvon toinen pää suljettiin tiivistenauhalla ja varmistettiin teipillä. Tiivistetty pää kanttaa taittaa ja teipata kiinni kalvon kylkeen, jotta imussa tiivistetty sauma ei ”korkkaisu”. Tämän jälkeen kalvo vedetään kipsin ympärille ja kiinnitetään imuputkeen tiivistenauhalla ja teipillä tiiviiksi. Päällikalvo vedetään alipaineella kireäksi prepregin päälle.

Käyttämämme prepreg tarvitsi 120°C asteen kovetuksen uunissa viiden tunnin ajan. Alipaineen on oltava koko ajan päällä.

Kipsin kuivuusaste ja koko vaikuttavat kovetusaikaan uunissa. Jos kipsi on massiivinen, sen lämpeneminen vie aikaa todella kauan ja prepreg ei välttämättä ehdi kovettua odotetussa ajassa vaan kappaletta täytyy pitää uunissa pidempään.

Prepregin kovetuttua ja kappaleen jäähtyttyä, alipainekalvon, karhennuskankaan ja imuhuovan voi poistaa. Karhennuskangas voi olla melko tiukasti kiinni prepregissä ja irroituksessa kannattaa olla tarkkana, sillä ohut prepreg voi revetä helposti karhennuskankaan irroituksen yhteydessä.



Kuvio 20. Alipaineekalvon tiivistäminen ja valmistelu.



Kuvio 21. Karhennuskankaan ja imuhuovan asettelu.



Kuvio 22. Tuotteen sulkeminen vakuumin sisään ja alipaineistus.



Kuvio 23. Tuotteen kovettaminen.

9.9 Muotoilu

Jos prepregin leikkasi oikean kokoisiksi paloiksi, ortoosiin irroitus kipsiltä pitäisi olla helppoa. Joissain tapauksissa joutuu käyttämään kipsisahaa ylimääräisten palojen pois trimmaamiseen. Jos tuntuu siltä, että ortoosi ei kestä irroitusta positiivilla, kannattaa kipsi rikkoa mieluummin varsinkin, jos siitä on otettu kopio aikaisemmin talteen. Ortoosiin voidaan piirtää haluttu muoto ja trimmata sen myötäisesti kipsisahalla tai pistosahalla. Reunat viimeistellään hiomalla koneella ja lopuksi vielä käsin hienolla vesihiomapaperilla.



Kuvio 24. Tuote kovettamisen jälkeen.

9.10 Pintavalu

Tarvittaessa ortoosin päälle voidaan suorittaa parin kerroksen pintavalu. Syy tämän tekemiseen voi olla esimerkiksi huono tai epäsiisti ulkopinta tuotteessa. Tätä opasta varten tehdyn ortoosin ulkopinnan viimeistely oli epäsiisti, joten pintavalu päätettiin tehdä siistimään tuotteen ulkonäköä.

Pintavalua varten ortoosia ei välttämättä tarvitse/kannata irroittaa kipsiltä, jos on selvää, että pintavalu täytyy tehdä. Tämä helpottaa prosessia ja ei sisällä riskiä kipsin/ortoosin hajoamisesta toimenpiteiden välillä. Jos alukalvo on mennyt rikki eikä sitä voida paikata, niin siinä tapauksessa ortoosi täytyy irroittaa varovasti kipsiltä joko sellaisenaan, tai sahaamalla ylimääräiset pois ja tämän jälkeen irrottamalla. Alle on vedettävä uusi PVA-kalvo ja ortoosi on asetettava varovasti kalvoa rikkomatta takaisin positiivin päälle.

Ortoosin ulkopinnalta kannattaa hioa mahdollisimman hyvin mahdolliset epätasaisuudet sekä rypyt pois, mutta on syytä varoa, ettei hio tuotetta puhki. Tässä case-tapauksessa eräs kohta tuli hiottua puhki, mutta se saatiin paikattua pintavalun yhteydessä. Koko muunkin ortoosin pinta on hyvä käydä hiomakoneella läpi, jolloin pintavalu tarttuisi paremmin rikottuun pintaan. Jos ortoosia ei ole irroitettu välissä kipsiltä, hiominen kannattaa tehdä varoen, jottei alukalvo mene tässä vaiheessa puhki. Jos ortoosin irroittaa, niin hiominen on helpompi hoitaa. Kun esivalmistelut on tehty, ortoosi voidaan asettaa takaisin varovasti positiivin, jonka pinnalla on PVA-kalvo, päälle.

Kun ortoosi on positiivin päällä, niin voidaan leikata korjaavat vahvikepalat. Tässä tapauksessa käytettiin 200g/m² twill hiilikuitu kudosta. Ortoosista otettiin mittanauhalla tarvittavat mitat, jotta saatiin mitoitettua ja leikattua oikean kokoiset palat pintavalua varten. Tämän jälkeen vahvikepalat liimattiin sprayliimalla positiivin päälle. Tekstiilimallista tai ”kuivaa” vahvikekangasta täytyy vähän vetää samalla kun sen liimaa, jotta saadaan se napakasti istumaan päälle ja hiilikuitu saadaan tilaan, jossa se voi sitoa ja vapauttaa tehokkaasti energiaa. Tässä työssä käytettiin 1 kerros vahvikekangasta pinnan siloitukseen ja pintaan laitettiin vielä yksi kerros mustaa sukkahousua, joka sitoo vahvikekankaan kuidut yhteen ja luo siistin ulkopinnan.

Kun vahvikekankaat on liimattu, niin pintavalu voidaan suorittaa ortoosin päälle. Ortoosin päälle vedetään sopivan kokoinen PVA-kalvo, joka kiinnitetään tiiviisti molemmista

päistä. Tämän jälkeen, kun alipaine on saatu muodostettua kalvojen alle/väliin, niin si-dosaineena toimiva hartsi voidaan valaa sisään. Hartsi hierotaan kattamaan ortoosin alueet ja mahdollinen ilma sekä ylimääräinen hartsi pyritään ohjaamaan mahdollisimman hyvin pois ortoosin alueelta. Paras olisi käyttää mahdollisimman paljon samoja materi-aaleja, kuin mitä alkuperäinen tuote sisältää, joten epoksihartsi olisi ollut hyvä vaihtoehto prepregin kanssa. Tässä työssä käytettiin Otto Bockin hiilikuituvaluihin tarkoitettua hart-sia testimielessä ja myös sen takia, että sen asettumisaika on huomattavasti nopeampi, kuin epoksihartsilla.

Kun hartsi on asettunut/jähmettynyt, asetelma voidaan purkaa ja ortoosin irrottamista varten tehtävät toimenpiteet suorittaa. Mikäli pintavalu auttoi, on yhtenäinen ja onnistu-nut, tuotteen reunat voi trimmata ja tuote voidaan valmistaa loppuun. Mikäli pinnassa on vielä jäljellä epätasaisuutta, valu on ilmava/reikäinen yms., niin päälle voi aina tehdä uu-den ohuen pintavalun maalaisjärkeä käyttäen. Tarkoittaen tällä sitä, että jos pintavaluja tehdään yhtä monta kuin tuotteessa alun perin on ollut kerroksia, niin tulisi harkita, että olisiko uuden tuotteen valmistus ollut parempi ajatus

Jos kyseessä on puhtaasti kosmeettinen ongelma, kuten epätasainen ja viimeistelemät-tömän näköinen pinta, ennen pintavalua voi kokeilla kirkaslakka spraymaalilla pinnan kor-jaamiseksi. Ennen spraymaalin käyttöä tulee varmistaa maalin yhteensopivuus käytetty-jen materiaalien kanssa. Yleensä yksi kerros lakkaa ei riitä, vaan 3-5 kerrosta muodostaa tarpeeksi paksun ja kestäväen lakkakerroksen.



Kuvio 25. Pinnan karhennus pintavalun tarttumisen mahdollistamiseksi.



Kuvio 26. Tuote pintavalun jälkeen ja trimmattu tuote.

9.11 Profiilin ankkuroinnin lopputulema

Ajatuksemme ja arviomme alunperin oli, että prepregin sisältämä hartsimäärä ei riittäisi kastamaan vahvikesukkaa profiilin päällä. Ortoosin profiili oli päällystetty yhdeltä osalta prepregillä, sitä seuraavassa osiossa yksi kerros vahvikesukkaa ja loppuosassa oli kaksi kerrosta vahvikesukkaa. Poikkileikkauksien jälkeen näytti siltä, että prepregin sisältämä hartsimäärä profiilin ympäristöstä riitti kuin riittikin kastamaan vahvikesukat. Osio, joka oli päällystetty prepregillä, oli laminoitunut, kuten oli odotettu, hyvin.

Leikkasimme ortoosista poikkileikkauksia profiilin eri kohdista ja hioimme leikkuupintoja vesihiomapaperilla, jotta kuitukerrokset tulisivat näkyviin paremmin. Seuraavia kuvien kontrastia ja värimaailmaa on muokattu, jotta kuitukerrokset tulisivat näkyviin paremmin.



Kuvio 27. Prepregillä ankkuroidun profiilin istuvuus.

Kuvassa näkyy prepregillä vahvistettua profiilia. Kuten kuvassa näkyy, prepreg kerroksia ei asetettu tarpeeksi tiukasti paikoilleen, vaan alipaineessa molemmat alanurkat ovat auenneet ja toiselle puolelle on kertynyt epoksia. Nämä muodostavat heikkoja kohtia valuun ja niistä ortoosi voi hajota ajan kanssa.



Kuvio 28. Poikkileikkuu prepregillä vahvistetusta profiilista.



Kuvio 29. Sukalla ankkuroitu profiili.

Yhdellä hiilikuitusukalla vahvistettua profiilia. Kuvassa näkyy, kuinka sukka on muotoutunut paremmin profiilin ympärille ja se on lähes täydellisesti impregnoitunut prepregistä irronneen epoksihartsin kanssa.



Kuvio 30. Kahdella sukalla ankkuroitu profiili.

Kuvassa kahdella hiilikuitusukalla vahvistettua profiilia. hiilikuitusukat eivät ole yhtä hyvin impregnoituneet hartsilla, vaan profiilin yläreunassa ja alareunassa on selkeästi nähtävillä kuivia kuituja.



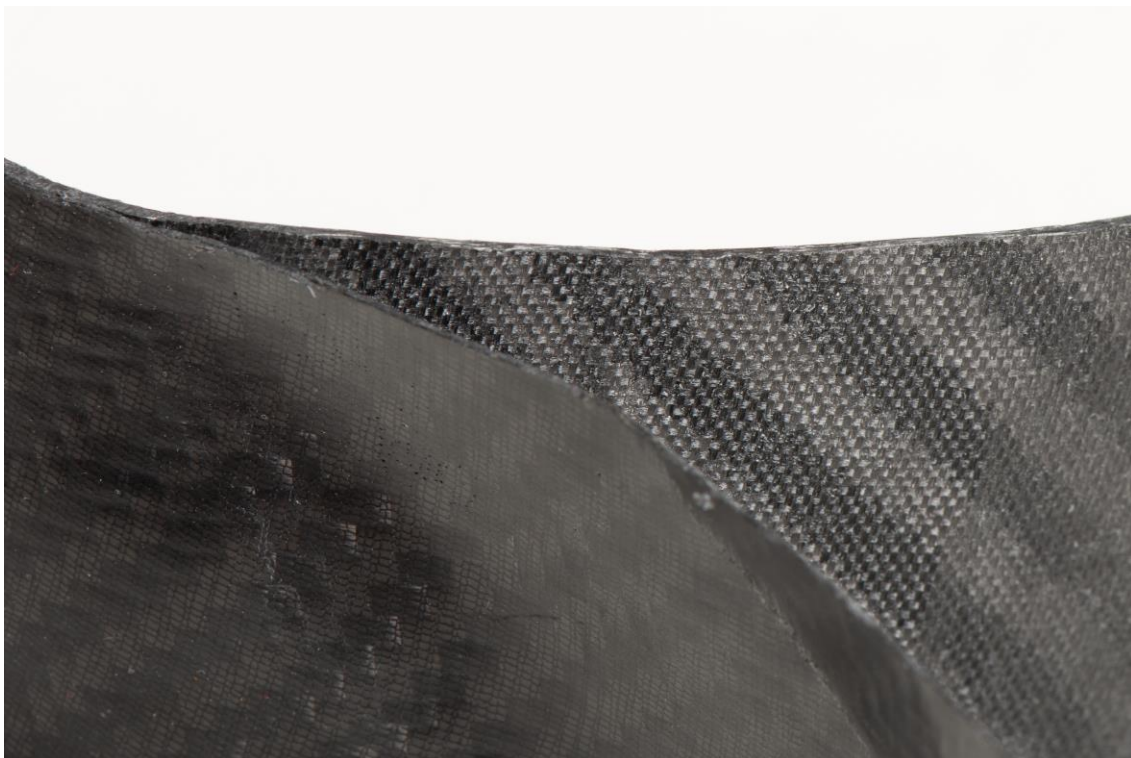
Kuvio 31. Jäykän jalkaterän vahvikekerrokset.

Kuviossa 31. poikkileikkaus ortoosin jalkapohjasta. Kuvasta erottuu selkeästi laminaatin ulko-, sisä- ja välikerrokset. Välikerrokseen on jäänyt ilmakuplia riittämättömän alipaineen takia. Ilmakuplat ovat heikkoja kohtia laminaatissa, mutta koko laminaatin paksuus on noin 6 millimetriä UD hiilikuitua, joten kuplat tuskin aiheuttavat suurta riskiä.

Tästä voidaan päätellä, että vahvikesukkien käyttö prepregiä käytettäessä voi onnistua. Vaikeaa on arvioida, että miten vahvikesukkien käyttö pelkän prepregin sijaan vaikuttaa tuotteen kestävyYTEEN ja jäykkyyteen. Sitä miten nämä eri materiaalit toimivat yhdessä olisi mielenkiintoista tutkia myöhemmin lisää.

9.12 Pohdinta valmistukseen liittyen

Itse tuotteen valmistus sujui ihan tyydyttävän hyvin. Lopputulos oli ehjä, siistipintainen valun jälkeen, vahvan tuntuinen ja melko kevyt jalkaterän kerrosmääriin nähden. Itse prepregin asetteluun liittyen tuli huomattua, että prepreg tulisi hieroa paljon tiukemmin kiinni mallin päälle. Lisäksi vahvojen muotojen kohdalla kannattaisi käyttää kuumailmapuhallinta muotoihin mukautumisen helpottamiseksi. Myös korkin käyttö on järkevämpää pehmustevarana, kuin itse pehmusteen, sillä itse pehmuste painui melko lailla kasaan. Ellei se ole ihan toivottavaa, että pehmuste painuu kasaan, jolloin tuote istuu napakammin jalassa. Nämä ovat harkinnanvaraisia kohdekeskeisiä seikkoja, joita on hyvä miettiä ennen valmistusta.



Kuvio 32. Pintavalun tarttuvuus.

Kuvassa on ortoosin yläreuna, jossa pintavalu lähti irtoamaan prepregistä. Tämä osoittaaakin kuinka tärkeää on käyttää yhteensopivia materiaaleja. Akryylihartsi ja epoksihartsi eivät sovellu keskenään käytettäväksi koska ne eivät muodosta tarpeeksi hyvää liitosta toisiinsa, vaikka laminoitava pinta olisi kuinka karkea.

Lähteet

Aramid Fiber. Fibremax Ltd. n.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.aramid.eu/characteristics.html>> Luettu 23.4.2018

BPF. Polyvinyl Chloride PVC. 2018. Verkkodokumentti.

<<http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PVC.aspx>> Luettu 9.10.2018

Britannica A. The Editors of Encyclopaedia Britannica. N.d. Polymethyl methacrylate.

Verkkodokumentti. <<https://www.britannica.com/science/polymethyl-methacrylate>> Luettu 22.10.2018

Britannica B. The Editors of Encyclopaedia Britannica. N.d. Shear modulus.

<<https://www.britannica.com/science/shear-modulus>> Luettu 2.11.2018

CompositesWorld. Thermoformable Composites Panels, Part 1. 2006. Verkkodokumentti.

<<https://www.compositesworld.com/articles/thermoformable-composite-panels-part-1>> Luettu 27.9.2018

Creative Mechanisms. Everything you need to know about polyethylene (PE). Rogers Tony. 2015. Verkkodokumentti.

<<https://www.creativemechanisms.com/blog/polyethylene-pe-for-prototypes-3d-printing-and-cnc>> Luettu 9.10.2018

Creative Mechanisms. Everything you need to know about PVC plastic. 2016. Verkkodokumentti

<<https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-pvc-plastic>> Luettu 9.10.2018

EasyComposites. Diolen. N.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.easycomposites.co.uk/#!/fabric-and-reinforcement/kevlar-aramid-diolen-etc/diolen-woven-cloth/black-diolen-200g-1200mm.html>> Luettu 23.4.2018

Engineering ToolBox A. 2003. Young's Modulus – Tensile and Yield Strength for common material. Verkkodokumentti.

<https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html> Luettu 2.11.2018

Engineering ToolBox B. 2008. Poisson's ratio. Verkkodokumentti.

<https://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html> Luettu 2.11.2018

Gurit. Guide To Composites. 2017. Verkkodokumentti.

<www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf> Luettu 23.4.2018

Hexcel Composites. 1999. Composite Repair. Verkkodokumentti.

<http://learn.skillman.eu/pluginfile.php/337/mod_resource/content/1/Composite_Repair.pdf> Luettu 27.9.2018

Muoviteollisuus ry. Muovisanastoa. n.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=16&tag=93>> Luettu 9.10.2018

Muoviteollisuus ry. Muovisanastoa. n.d. PMMA. Verkkodokumentti.

<<https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/sanasto/?ltr=16&tag=97>> Luettu 22.10.2018

Muoviteollisuus ry. Muovit. n.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/>> Luettu 23.4.2018

Muoviyhdistys. Osa 2 - valtamuovit. N.d. Verkkodokumentti.

<<http://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/15/osa-2-valtamuovit/>> Luettu 9.10.2018

Performance Composites Inc. Vacuum Infusion Process (VIP) Guide. N.d. Verkkodokumentti

<<http://www.performancecomposites.com/about-composites-technical-info/125-resin-vacuum-infusion.html>> Luettu 27.9.2018

Saarela Olli & Airasmaa, Ilkka & Kokko, Juha & Skrifvars, Mikael & Komppa, Veikko. 2003. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys ry. Helsinki. Hakapaino Oy.

Teijin Aramid. N.d. Verkkodokumentti.

<<https://www.teijinaramid.com/en/what-is-aramid/>> Luettu 23.4.2018

