

kuva: Muoviteollisuus ry

# KOMPOSIITIT

LOPUTTOMASTI MAHDOLLISUUKSIA





# KOMPOSIITIT

Komposiiteilla on monia hyviä ominaisuuksia verrattuna muihin materiaaleihin. Komposiitit ovat lujia ja kevyitä. Ne kestävät hyvin ympäristön ja sään aiheuttamia sekä kemiallisia rasituksia ja ovat näin ollen pitkäikäisiä. Komposiitteja voidaan valmistaa monimutkaisiin muotoihin kustannustehokkaasti. Lisäksi ne antavat suunnittelijalle vapauden päästää mielikuvitus valloilleen!

Suunnittelijat, insinöörit ja arkkitehdit korvaavat komposiiteilla terästä, alumiinia, puuta ja kiveä. Komposiitteja käytetään monilla eri alueilla kuten lentokoneissa, autoissa, tuulivoimaloissa, veneissä, taloissa, silloissa, mailoissa, lumilautoissa, suksissa, polkupyörissä, röntgenkuvauslaitteissa - käyttökohteet ovat lähes rajoittamattomat.

## Komposiittien rakenne

Komposiitit rakentuvat kahdesta osasta: matriisista ja lujitteista. Matriisi on liima, joka sitoo lujitteet yhteen ja suojaa niitä ympäristön vaikutukselta. Lujitteet on yleisnimi matriisiin sisällä oleville kuiduille, partikkeleille tai hiutaleille. Lujitteet voivat lujuuden lisäksi muuttaa jäykkyyttä, sähkönjohtavuutta, lämmönjohtavuutta tai jotakin muuta tarvittavaa ominaisuutta.

Esimerkkinä modernista kestopolypropylenikomposiitista ovat niin sanotut yhden polymeerin komposiitit, joissa tyypillisimmin polypropylenimatriisi on lujitettu polypropylenikuiduilla. Tämä materiaali tunnetaan kauppanimellä CURV® ja siitä valmistetaan matkalaukkuja (SAMSONITE). CURV® on viisi kertaa lujempaa ja jäykempää kuin perinteinen polypropyleni.

Tulevaisuudessa komposiittien matriiseina tullaan käyttämään lisääntyvässä määrin biopolymeerejä. Biopolymeereillä tarkoitetaan biopohjaisia muoveja, joista esimerkkinä on maitohappopohjainen polylaktidi eli PLA. PLA on biohajoava ja se voidaan siten kompostoida.



## MATRIISIT

Komposiittien matriisina voi toimia muovi, jolloin puhutaan muovikomposiiteista, polymeerikomposiiteista tai lujitemuoveista. Matriisina voi olla myös metalli (metallimatriisikomposiitit) ja keraami (keraamimatriisikomposiitit). Tässä tekstissä keskitytään muovimatriiseihin. Muovimatriisit jaetaan kesto- ja kertamuoveihin.

## KERTAMUOVIT

Yleisimmin komposiiteissa käytetään kertamuoveja. Kertamuovit myydään kahden komponentin nesteinä, hartsina ja kovetteena. Hartsi ja kovete sekoitetaan, jolloin ne reagoivat keskenään muodostaen kiinteän kappaleen, kertamuovin, jota ei voi uudelleen muotoilla muutoin kuin ainetta poistavasti (sahaaminen, poraaminen, jyrsiminen, sorvaaminen...). Yleisimmät kertamuovit ovat polyestereitä, vinyyliestereitä ja epokseja. Polyesteri on näistä hinnaltaan edullisin ja sitä käytetään, jos matriisilta ei vaadita erityisominaisuuksia. Polyesteriä käytetään tyypillisesti moottori- ja purjeveneiden komposiittien matriisimateriaalina. Vinyyliesteri on polyesteriä parempaa veden ja kemikaalien kestoltaan. Vinyyliesteriä käytetään esimerkiksi paperi- ja kemianteollisuuden putkistoissa ja säiliöissä. Yleisesti käytetyistä muovimatriiseista parhaat ominaisuudet ovat epokseilla. Epokseja käytetään muun muassa lentokone-, avaruus- ja urheiluvälineiteollisuuden komposiiteissa.

## ELASTOMEERIKOMPOSIITIT

Oman erityisen ryhmänsä muodostavat pehmeät ja joustavat komposiitit, joiden matriisina ovat elastomeerit (kumit). Esimerkkinä pehmeästä komposiitista toimii auton rengas, jossa kumimatriisi on lujitettu: esimerkiksi Nokian Hakka SUV, jonka sivupinta on vahvistettu aramidikuiduilla.

## OMINAISUUDET

### **Polyesteri**

Helppokäyttöinen

Edullinen

Kohtalaiset mekaaniset ominaisuudet

- Korkea styreenihaihtuma avomuoteissa
- Korkea kovettumiskutistuma
- Työskentelyajat rajoitetut

### **Vinyyliesteri**

Hyvä kemikaalien ja ympäristön kestävyys

Paremmat mekaaniset ominaisuudet

- Vaatii usein jälkikovuksen
- Korkea styreenipitoisuus
- Kalliimpi kuin polyesteri
- Korkea kovettumiskutistuma

### **Epoksi**

Hyvät mekaaniset ja termiset ominaisuudet

Hyvä vedenkestävyys

Pitkät työskentelyajat mahdollisia

Lämmönkestävyys jopa 140 °C

märkänä/ 220 °C kuivana

Pieni kovettumiskutistuma

- Kalliimpi kuin vinyyliesterit
- Sekoittaminen tarkkaa ominaisuuksien saavuttamiseksi
- Korrodoiva ja terveydelle haitallinen käsiteltäessä kovettumattomana



## LUJITTEET

Komposiittien lujitteet määritellään yleisesti niiden dimensoiden perusteella: kun kaikki dimensiot ovat samaa suuruusluokkaa (yleensä muutamien mikrometrien luokkaa) puhutaan partikkelikomposiiteista. Yleensä partikkeleilla ei saada aikaan merkittävää lujittavaa vaikutusta, mutta niillä voidaan vaikuttaa komposiitin muihin ominaisuuksiin, kuten tiheyteen ja ominaispainoon. Kun kaksi dimensiota ovat kolmatta suurempia, puhutaan hiutalekomposiiteista. Yleisimmin käytetään lujitteita, joiden yksi dimensio on selkeästi muita suurempi ja jolloin puhutaan kuitukomposiiteista. Kuitukomposiitit jaetaan edelleen jatkuvakuitukomposiitteihin, joiden kuitu on tyypillisesti pituudeltaan kappaleen dimensoiden luokkaa, ja lyhyt- tai katkokuitukomposiitteihin, joiden kuitu on pituudeltaan tyypillisesti 1 - 50 mm.

Tärkeimmät kuitumaiset lujitteet ovat lasikuitu, hiilikuitu ja aramidikuitu. Lisäksi käytetään luonnonkuituja.

## LUJITEKUITUJEN MEKAANISET OMINAISUUDET

	VETOLUJUUS	KIMMOMODUULI	MURTOVENYMÄ	TIHEYS
	[MPa]	[GPa]	[%]	[G/CM <sup>3</sup> ]
LASIKUITU	2400-3700	69-86	6-9	2,7
HIILIKUITU	2000-5000	160-800	0,5-2	1,8-2
ARAMIDIKUITU	3100-3600	60-180	3,5	1,4
PELLAVA	345-1050	27,6	2,7-3,2	1,5
HAMPPU	690	70	1,6	1,47
PUUVILLA	287-800	5,5-12,6	7-8	1,5-1,6

OMINAISSUUDET	ARAMIDIKUITU	HIILIKUITU	LASIKUITU
KORKEA VETOLUJUUS	●	●	●
KORKEA VETOMODULI	●	●	●
KORKEA PURISTUSLUJUUS	●	●	●
KORKEA PURISTUSMODULI	●	●	●
KORKEA JOUSTAVUUS	●	●	●
KORKEA KIMMOMODULI	●	●	●
KORKEA ISKULUJUUS	●	●	●
KORKEA KERROSTENVÄLINEN LEIKKAUSLUJUUS	●	●	●
KORKEA LEIKKAUSLUJUUS TASOSSA	●	●	●
MATALA TIHEYS	●	●	●
KORKEA VÄSYMISKESTÄVYYS	●	●	●
KORKEA PALON KESTÄVYYS	●	●	●
KORKEA LÄMMÖN ERISTE	●	●	●
KORKEA SÄHKÖN ERISTE	●	●	●
MATALA LÄMPÖLAAJENEMINEN	●	●	●
MATALAT KUSTANNUKSET	●	●	●

- ominaisuus voidaan liittää hyvin tähän kuituun
  - ominaisuus voidaan liittää melko hyvin tähän kuituun
  - ominaisuutta ei voida liittää kovin hyvin tähän kuituun
- lähde: (SP Systems Guide to Composites, 2002)

## LASIKUITU

Lasikuitu on eniten käytetty lujitekuitu. Lasikuidulla on suuri lujuus ja sen jäykkyys on samaa luokkaa alumiinin kanssa. Lasikuitu on myös selvästi muita lujitekuituja edullisempi.

Lasikuitu valmistetaan sulattamalla lasin raaka-aineet ja vetämällä sula massa platinapokkaan reikien läpi kuituiksi. Lasikuitua käytetään polyesterin kanssa veneiden valmistamisessa ja vinyyliesterin kanssa kemianteollisuudessa.

Lasikuidusta on olemassa useita eri tyyppisiä: E-lasikuitu, joka on peruslasikuitu, korkean suorituskyvyn lasikuidut (esim. S-lasi) ja kemiallisesti kestävät lasikuidut (C-lasi). Lasikuitu on väriltään valkoista tai läpinäkyvää ja se eristää sähköä. Yksittäisen lasikuidun halkaisija on tyypillisesti 17 µm.

## HIILIKUITU

Hiilikuitu valmistetaan useimmiten polyakrylinitriilistä (PAN) tai piestä lämmön avulla. Valmistuksessa muodostuu kiderakenteita, jotka orientoituvat kuidun pitemmän suuntaisesti. Tämän orientaation ansiosta on teoreettisesti mahdollista saavuttaa kuidun suunnassa 1000 GPa kimmomoduuli. Kimmomoduulia käytetään kuvaamaan aineen jäykkyyttä. Toisaalta kuitua vastaan kohtisuorassa suunnassa kuidun kimmomoduuli on teoriassa vain 30 GPa. Näille arvoille hyvän vertailukohdan antaa teräksen kimmomoduuli, joka on 210 GPa.

Hiilikuidun mekaanisiin ominaisuuksiin, jäykkyyteen ja lujuuteen, vaikutetaan valmistusolosuhteilla. Mitä korkeampaa lämpötilaa valmistuksessa käytetään, sitä paremmin kuidun rakenne on orientoitunut ja kimmomoduuli eli jäykkyys kasvaa. Toisaalta korkeammat lämpötilat johtavat suurempiin kiderakenteisiin ja lujuuden laskemiseen. Hiilikuidut jaetaan usein neljään eri ryhmään: suuren lujuuden tai standardimoduulin kuidut (SM), keskinkertaisen moduulin kuidut (IM), suuren moduulin kuidut (HM) sekä erittäin suuren moduulin kuidut (UHM). UHM-kuiduilla jäykkyys on parhaimmillaan noin 70 % grafiitin teoreettisesta jäykkyydestä. Kuidun jäykkyyden kasvessa myös kuidun hinta kasvaa merkittävästi. Hiilikuitu johtaa hyvin sähköä ja lämpöä ja on väriltään mustaa. Yksittäisen hiilikuidun halkaisija on tyypillisesti 8 µm ja hiilikuitu toimitetaan kuitukimppuina, jotka koostuvat 3 000 - 48 000 yksittäisestä kuidusta.



Esimerkiksi BMW i3- sähköautossa on 45 hiilikuitukomposiitiosaa, joiden avulla auton kokonaispainosta on säästetty 250 - 350 kg. Hiilikuidun merkitystä i3:lle kuvaa hyvin SGL Automotive Carbon Fibers, SGL:n ja BMW:n yhteisyritys, joka valmistaa BMW:tä varten hiilikuituja Moses Lakesin tehtaalla Washingtonin osavaltiossa Yhdysvalloissa. Miksi juuri Moses Lakesissa? Johtunee tarjolla olevasta halvasta energiasta: energian hinta on vain seitsemäsosan Saksan hinnasta ja vesivoimalla tuotettuna se on myös ympäristöystävällistä.

Sekä silkkiperhosen (Bombyx Mori) silkki että hämähäkin seitti ovat proteiinipohjaisia polymeerejä. Niille on tyypillistä erittäin suuri lujuus yhdistettynä korkeaan murtovenymään. Ominaisuusyhdistelmä tekee niistä erittäin hyvin energiaa absorboivia. Tämä ominaisuus lienee erittäin tavoiteltava silkkiperhosen toukan suojaamiseksi tai hämähäkin verkon ruuanpyydystystehtävään. Silkkiperhosen silkin halkaisija on noin 13 µm, kuidun pituus on 500 m - 1 km. Hämähäkin seitti on vieläkin ohuempaa, esimerkiksi Argiope seitin halkaisija on noin 4 µm.

## ARAMIDIKUIDUT

Kolmas merkittävä synteettisten lujitekuitujen ryhmä on aramidikuidut. Tunnetuin aramidikuitu on DuPontin kehittämä KEVLAR®. Aramidikuidut ovat polymeerikuituja ja niille on tyypillistä korkean lujuuden ja jäykkyyden lisäksi joustavuus. Tämän takia niitä käytetään luotisuojamateriaaleina. Aramidit kestävät myös hyvin leikkaamista ja niitä käytetään viiltosuojina, esimerkiksi lihanleikkajien suojakäsineissä. Aramidikuiduista valmistettuja köysiä käytetään myös teräsköysien tilalla, koska aramidi on lujuudeltaan parempi kuin lujat teräkset, mutta köysi painaa vain viidenneksen vastaavan kokaisen teräsköyden painosta.

## LUONNONKUIDUT

Luonnonkuidut ovat uusi mielenkiintoinen lujiteperhe ja ne voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään: kasvikuituihin, eläinkuituihin ja mineraalikuituihin. Kasvikuidut muodostuvat pääasiassa selluloosasta. Ne voidaan jakaa alkupeuran mukaan runko-, lehti-, siemen-, olki-, ruoho- ja puukuituihin. Ruohokuiduista tärkein on bambu. Eläinkuidut koostuvat proteiineista. Niitä saadaan eläinten karvoista ja kehärääjä- hyönteisten kotoista saatavista kuiduista. Eläinkuituja ovat villa, silkki, höyhenet ja hämähäkinseitti.





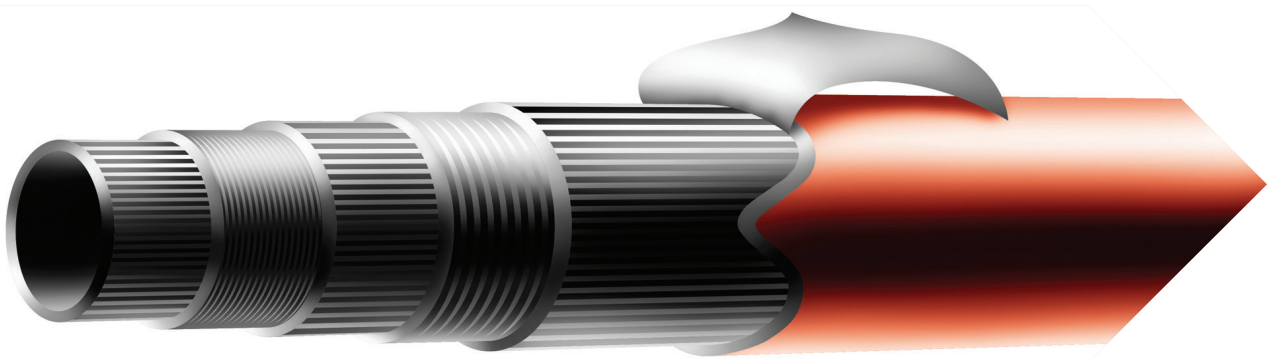
# NANOLUJITTEET JA NANOPARTIKKELIT

Nanomateriaaleilla tarkoitetaan partikkeleita, joiden vähintään yksi dimensio on pienempi kuin 100 nanometriä. Nanomateriaalit luokitellaan nolla-, yksi- ja kaksidimensionaalsiin. Nolladimensionaalinen tässä yhteydessä tarkoittaa partikkelia, jonka kaikki dimensiot ovat alle 100 nm. Vastaavasti yksidimensionaaliset nanopartikkelit ovat kuitumaisia ja kaksidimensionaaliset hiutalemaisia. Nanohiilet ovat hyvä esimerkki nanopartikkeleista, sillä niihin kuuluu sekä nolladimensionaalisia (fulleriinit), yksidimensionaalisia (hiilinanoputket) että kaksidimensionaalisia (grafeeni) materiaaleja.

Hiilinanoputket näyttävät rullalla olevalta grafeeni-levyltä ja ne jaetaan kahteen ryhmään: yksiseinäisiin (SWCNT) ja moniseinäisiin (MWCNT) hiilinanoputkiin. Yksiseinäisen nanoputken halkaisija on n. 1 nm ja pituus voi olla jopa miljoonakertainen halkaisijaan verrattuna. Yksiseinäisellä hiilinanoputkella on erinomaiset ominaisuudet, sen jäykkyys on 1 000 GPa, lujuus noin 30 GPa ja lämmönjohtavuus 3500 W/mK. Moniseinäiset hiilinanoputket ovat helpommin ja halvemmalla tuotettavia ja niitä on käytössä erityisesti urheiluvälinekomposiiteissa, kuten tennis- ja jääkiekkomailoissa. Nanoputkilla on pyrkimys kimppuuntua ja haaste niiden käytölle komposiiteissa onkin saada nanoputket yksittäisinä partikkeleina matriisiin.

Uusin jäsen nanohiilten perheessä on grafeeni. Grafeeni on yhden atomikerroksen paksuinen kuusikulmainen hiiliverkko, nanohiilistä tavallaan yksinkertaisin. Hiilinanoputki on rullalle taivutettu grafeeni ja fulleriini on palloksi pakotettu grafeeni, jossa kuusiokulmioiden välit on täytetty viisikulmioilla. Erityisesti grafeenin halvemmat ja helpommin tuotettavat versiot grafeenioksidi (GO) ja pelkistetty grafeenioksidi (rGO) ovat erittäin kiinnostavia materiaaleja elektronikan sovelluksiin.

Nanopartikkelit ovat yksittäin läpinäkyviä, koska niiden dimensio on valon aallonpituutta pienempi. Kimppuuntuneet hiilinanoputket ja usean grafeenikerroksen rakenteet ovat jo valon aallonpituutta suurempia ja ne näkyvät mustina. Nanopartikkeleita käytetään komposiiteissa funktionaalisina täyteaineina.



Kuva: Exel Composites Oyj

# KOMPOSIITTIIEN OMINAISUUDET

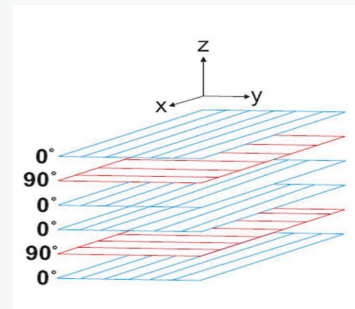
Kuitulujitettujen komposiittien ominaisuudet riippuvat kuitujen tyypistä, pituudesta, määrästä ja suunnasta. Parhaat mekaaniset ominaisuudet saadaan painoon suhteessa, kun komposiitin kaikki kuidut ovat yhdensuuntaisia ja sen ominaisuudet määritetään tässä suunnassa. Silloin kyseessä on UD eli yhdensuuntaisilla kuiduilla luji-tettu rakenne. UD-rakenne on anisotrooppinen eli sen ominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Jäykkyys tai lujuus kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa voi olla 1/30 kuitusuunnan ominaisuuksista. Haluttaessa hyvät ominaisuudet kahteen suuntaan käytetään yleensä kudottuja kankaita, joita pinotaan kerroksittain laminaatiksi kutsutuksi rakenteeksi. Tällöin kun kuidut kulkevat kahteen toisiaan vastaan kohtisuoraan suuntaan, kyseessä on 0/90 -laminaatti.

Mikäli halutaan, että komposiitilla on samat ominaisuudet kaikissa tason suunnissa, tehdään rakenne, jossa kuidut kulkevat levyssä molempien sivujen suunnassa sekä 45 asteen kulmassa sivuihin nähden. Tällaista rakennetta kutsutaan kvasi-isotrooppiseksi. Kvasi-isotrooppisen laminaatin jäykkyys on noin 40 % UD-laminaatin jäykkyydestä.

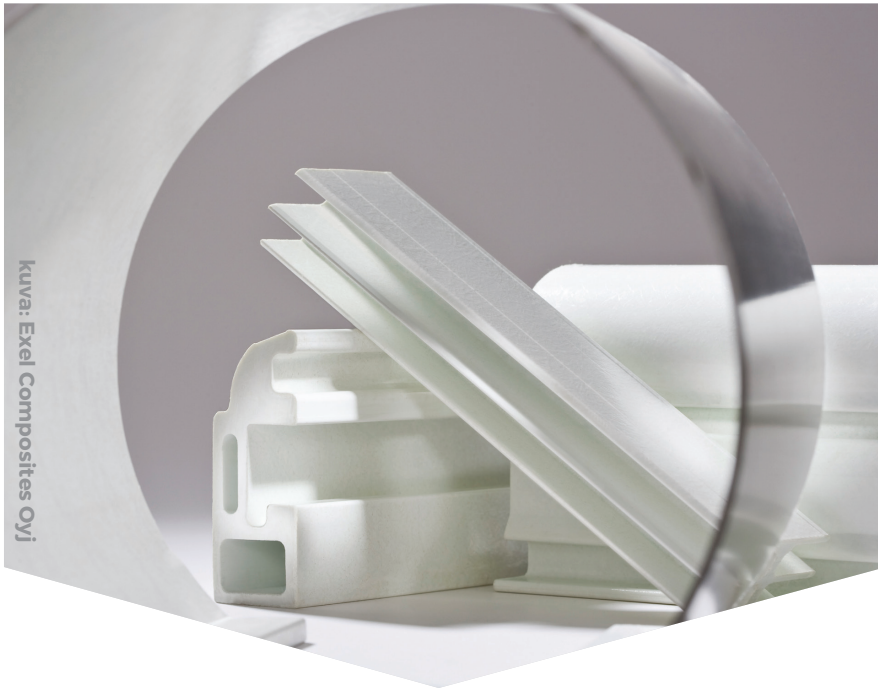
Komposiittien ominaisuudet vaihtelevat paljon riippuen kuitujen ja matriisin laadusta ja ominaisuuksien mittaussuunnasta. Huomattavaa on myös, että komposiittien lämpölaajenemiskerroin voi olla negatiivinen kuitusuunnassa, eli komposiitti puristuu kasaan lämmitettäessä. Valitsemalla kuitujen määrän ja laadun oikein, voidaan valmistaa materiaaleja, joiden lämpölaajenemiskerroin on nolla. Tällaisia materiaaleja voidaan hyödyntää mittalaitteissa tai satelliiteissa. Komposiittien lujuus on puristuksessa huonompi kuin vedossa: on yleisesti tunnettua, ettei köydellä voi työntää ja kuidut ovat esimerkki tästä. Erityisesti huomioitavaa on aramidin heikko puristuslujuus.



## 0/90 LAMINAATTI



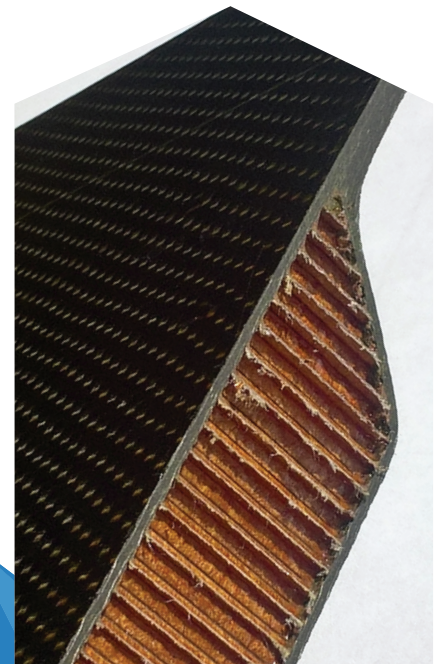
# KERROSLEVYRAKENTEET



## OMINAISUUDET

- Keveys
- Lujuus
- Jäykkyys
- Lämmön eristys
- Kemiallinen kesto
- Muotoiltavuus
- Optimoitavuus
- Kustannustehokkuus
- Ekotehokkuus

Kerroslevyrakenne on komposiittirakenne, jossa hyödynnetään mekaniikan tuntemusta lujien, jäykkien ja keveiden rakenteiden valmistamiseksi. Taivutettaessa levyä tai palkkia kuormittamalla sitä keskeltä alaspäin päiden ollessa tuetut, vaikuttaa rakenteen yläpintaan puristusjännitys ja alapintaan vetojännitys. Mutta kapaleen keskellä vallitsee tilanne, jossa jännitys on nolla. Näin ollen rakenteen keskikohdan materiaali voidaan korvata kevyemmällä ja vähemmän lujalla materiaalilla, jonka tehtävänä on pitää ylä- ja alapinta kiinni toisissaan. Kerroslevyrakenteessa ylä- ja alapinnan väliin laitetaan ydinaine, joka on tyypillisesti jäykkää muovivaahtoa tai hunajakennoa, joka on tehty fenoli-Nomex®-paperista, muovista tai alumiinista. Ydinaine voidaan suunnitella antamaan rakenteille myös muita ominaisuuksia kuten lämmöneristys.





# KOMPOSIITILAMINAATTIEN MEKAANISET OMINAISUUDET

Taulukkoon on koottu yhdensuuntaislujitettujen kuitukomposiittien ominaisuuksia, kun kuitujen tilavuusosuus on 60%. Vertailumateriaalina ovat alumiini ja teräs, joiden ominaisuudet ovat oleellisesti samat kaikissa tarkastelusuunnissa.

	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_1/\rho$	$\sigma_1 V$ (MPa)	$\sigma_2 V$ (MPa)	$\sigma_1 P$ (MPa)	$\sigma_2 P$ (MPa)	$\alpha_1$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	$\alpha_2$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
E-LASI-EPOKSI	43	9.7	21.5	1070	38	870	185	6.4	16	2.00
S-LASI-EPOKSI	52	11.7	26	1590	41	1050	234	6.2	16	2.00
ARAMIDIEPOKSI	76	5.5	55	1380	30	275	138	-2.0	57	1.38
HIILIKUITU (SM)-EPOKSI	138	10.3	89	2275	52	1590	207	-0.1	18	1.55
HIILIKUITU (IM)-EPOKSI	172	10	108	2760	50	1540	152	-0.4	18	1.60
HIILIKUITU (UHM)-EPOKSI	325	6.2	204	760	26	705	70	-0.5	18	1.59
HIILIKUITU (SM)-PEEK	134	10.1	85	2140	80	1105	200	-0.1	29	1.57
TERÄS (S355)	210		27	510		510		12		7.38
ALUMIINI (2024-T4)	73.1		26	470		470		23.2		2.78

$E_1$  (GPa) = jäykkyys kuitujen suunnassa, yksikkö Gigapascal = 1000 N/mm<sup>2</sup>

$E_2$  (GPa) = jäykkyys kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa, yksikkö Gigapascal = 1000 N/mm<sup>2</sup>

$E_1/\rho$  = ominaisjäykkyys eli jäykkyys jaettuna tiheydellä, tämä luku kuvaa kuinka

kevyt rakenteesta voidaan saada kun tavoitteena on sama jäykkyys. Yksikkönä on GPacm<sup>3</sup>/g.

$\sigma_1 V$  (MPa) = lujuus kuitujen suunnassa vedossa, yksikkö Megapascal =1 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_2 V$  (MPa) = lujuus kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa vedossa, yksikkö Megapascal =1 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_1 P$  (MPa) = lujuus kuitujen suunnassa puristuksessa, yksikkö Megapascal =1 N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_2 P$  (MPa) = lujuus kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa puristuksessa, yksikkö Megapascal =1 N/mm<sup>2</sup>




$\alpha_1$  ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) = lämpölaajenemiskerroin kuitujen suunnassa, yksikkö mm/mm Celsius astetta kohden.

$\alpha_2$  ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) = lämpölaajenemiskerroin kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa, yksikkö mm/mm Celsius astetta kohden.

$\rho$  (g/cm<sup>3</sup>) = tiheys, yksikkö g/cm<sup>3</sup>

lähde: Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, Third Edition, Leif A. Carlsson, Donald F. Adams, R. Byron Pipes, CRC Press 2002

**KERROSLEVYRAKENTEELLA  
SAAVUTETTAVIA JÄYKKYYDEN JA  
LUJUUDEN PARANNUKSIA  
SUHTESSA PAINONLISÄYKSEEN**

KUVAUS	TYYPPI	RAKENTEELLINEN JÄYKKYYS	RAKENTEELLINEN LUJUUS	PAINO
	KIINTEÄLEVY PAKSUUS 1	1.0	1.0	1.0
	KERROSLEVY PAKSUUS 2	7.0	3.5	1.03
	KERROSLEVY PAKSUUS 4	37.0	9.2	1.06

# KOMPOSIITTIIEN VALMISTUSMENETELMÄT

Komposiittien yleisimmät valmistusmenetelmät ovat ainetta lisääviä ja siten aikaansa edellä nykyisten ainetta lisäävien valmistusmenetelmien eli 3D-tulostuksen trendeissä. Perinteiset komposiittien valmistusmenetelmät jaetaan avoimen ja suljetun muotin tekniikoihin. Avoimen muotin tekniikoihin kuuluvat käsilaminointi, ruiskulaminointi ja kuitukelaus. Suljetun muotin tekniikoihin lasketaan alipaineinfuusio (API), RTM (Resin Transfer Moulding), puristusmuovaus ja pultruusio.

Automaation aste komposiittituotannossa nousee jatkuvasti ja lähes kaikki komposiittituotannon vaiheet laminoinnista kovetuksen ja koneistuksen kautta pinnoitukseen ja tarkastuksiin ovat automatisoitavissa varsinkin suurempien sarjakokojen kohdalla. Komposiittituotteita voidaan tarkastaa ja korjata nykyaikaisilla menetelmillä suhteellisen helposti.

## AVOIMEN MUOTIN TEKNIIKAT

### Käsilaminointi

Käsilaminoinnissa naarasmuottiin ladotaan tarvittava määrä lujitteita haluttuihin suuntiin. Lujitteet kostutetaan kertamuovilla levittämällä niiden päälle valmiiksi oikeassa sekoitussuhteessa sekoitettua juoksevaa hartsin ja kovetteen seosta siveltimellä, telalla tai ruiskuttamalla. Lopuksi varmistetaan telamalla, että matriisi kostuttaa lujitteet. Näin valmistetaan usein pienten sarjojen tuotteita kuten isompia veneitä tai arkkitehtonisia esineitä. Pyrittäessä parempaan laatuun voidaan muotti peittää joustavalla kalvolla ja imeä kalvon alle alipaine, jolloin ilmanpaine varmistaa kostutuksen ja tiiviin rakenteen muodostumisen. Tätä alipainesäkitystä käytetään esimerkiksi autojen osien valmistamiseen. Käsilaminoinnilla saavutetaan korkea kuitupitoisuus, yli 50 % tilavuudesta, ja siinä voidaan käyttää lähes kaikkia eri kuituja, yleensä kankaina tai kuitumattoina. Kuitumatto on lyhyistä kuiduista tai jatkuvista kuiduista valmistettu lujite, jota ei ole kankaiden tapaan kudottu vaan jossa kuidut on sidottu yhteen liimalla.



## Prepreg-laminointi

Lentokoneiteollisuudessa ja urheiluautojen valmistamisessa käytetään kehittyntä versiota käsilaminoinnista, jossa esikostutetut lujitteet eli prepregit ladotaan muottiin puhdastilassa. Nämä esikostutetut lujitteet varastoidaan pakastimessa, jotta ne eivät kovetu säilytyksen aikana ja ovat huoneen lämpötilassa teippimäisiä. Tämän jälkeen esikostutettujen lujitteiden päälle tehdään alipainesäkki ja muotti säkkeineen viedään autoklaaviin, jossa kappale kovetetaan käyttäen usein yli 6 baarin painetta ja 120-180°C lämpötilaa. Nykyaikainen menetelmä prepreg-laminoinnissa ovat automaattilaminointikoneet, joilla laminointi saadaan toteutettua nopeasti, tehokkaasti ja toistettavasti myös sen kokoisille kappaleille, jotka eivät käsin laminoiden ole mahdollisia.





### **Ruiskulaminointi**

Edullisin tapa valmistaa komposiitteja avomuotissa on ruiskulaminointi, jossa matriisi ja katkokuiduksi silputtava kuitu ruiskutetaan muottiin. Kuidun pituus on yleensä alle 25 mm ja kuitupitoisuus jää alhaiseksi, noin 30 tilavuus-% luokkaan. Ruiskulaminoinnilla valmistetaan pieniä veneitä ja esimerkiksi kylpyammeita, joissa muottina toimii alipainemuovattu akryylikuori, kylpyammeen näkyvä pinta.

### **Kuitukelaus**

Kolmas esimerkki avoimen muotin tekniikasta on kuitukelaus, jossa kuitumuodossa oleva lujite kostutetaan vetämällä se kertamuovikylvyn läpi ja kelaamalla kostutettu lujite pyörivän muotin ympärille. Näin valmistetaan erilaisia tankkeja niin rakennusteollisuudelle, kemianteollisuudelle kuin myös avaruusrakettien nestemäisen polttoaineen säiliöiksi.



## SULJETUN MUOTIN TEKNIIKAT

### **Alipaineinfuusio**

Alipaineinfuusio (API) muistuttaa käsilaminointia sillä erolla, että muottiin ladotaan kuivat lujitteet ja muotti säkitetään kuten alipainesäkityksessä. Erona on kertamuovin tuominen muottiin letkua pitkin alipaineen vetämänä. Tällä tekniikalla saavutetaan käsilaminointia siistimpi ja turvallisempi ympäristö ja useimmiten myös paremmat komposiitin ominaisuudet.

### **RTM**

Kertamuovien RTM (Resin Transfer Moulding) muistuttaa kesto-  
muovien ruiskuvalua. Siinä metallista valmistettujen muottipuolisko-  
jen väliin ruiskutetaan paineella nestemäistä kertamuovia. Ennen muotin sulkemista muottiin on ladottu halutut lujitteet. RTM-menetelmällä voidaan valmistaa suurempia sarjoja kuin käsilaminoinnilla tai API:lla, mutta tuotteiden koko on rajoittunut tarvittavien muottien ja ruiskutuslaitteistojen takia. RTM-menetelmää käytetään esimerkiksi linja-auton korin osien tai traktorinosien valmistamiseen.





### **Puristusmuovaus**

Puristusmuovauksessa käytetään taikinamaista ktkokuiduilla valmiiksi lujitettua massaa, joka lisätään muottiin ja puristetaan siten, että massa täyttää kuumennetun muotin ja kovettuu muotoonsa. Menetelmää käytetään lääkinällisten laitteiden kuoriosien valmistamiseen tai vaativissa kohteissa sähkölaitteiden koteloissa.

### **Pultruusio**

Pultruusiossa eli kuituvedossa kuidut kostutetaan vetämällä ne kertamuovilla täytetyn altaan läpi ja kovettamalla kostutetut lujitteet kuumennetussa muotissa. Menetelmä on jatkuva, eli nestemäisellä hartsilla kostutetut lujitteet tulevat muotin toisesta päästä jatkuvasti sisään ja kovettunut muotin poikileikkauksen mukainen profiili tulee jatkuvasti ulos muotin toisesta päästä. Tällä menetelmällä tehdään hyvin vaihtelevia tuotteita ikkunanpesurien hiilikuituisista ja putkimaisista teleskoopivarsista linja-autojen suuriin sivupaneeleihin. Jatkuva profiili sahataan valmistusvaiheessa halutun mittaisiksi osiksi.

Komposiittien valmistusmenetelmät ovat luonteeltaan ainetta lisääviä, mutta komposiiteille on kehitetty myös 3D-tulostusmenetelmiä. Esimerkiksi Markforged ([www.markforged.com](http://www.markforged.com)) tekee tulostimia, joissa polyamidia voidaan lujittaa hiilikuidulla, lasikuidulla ja alumiinilla. Valmistaja lupaa tulostetuille kappaleille alumiinia vastaavat lujuusominaisuudet. Tällä hetkellä 3D-tulostuksella voidaan tehdä rakenteita, joissa kuidut ovat 2D-tasossa.



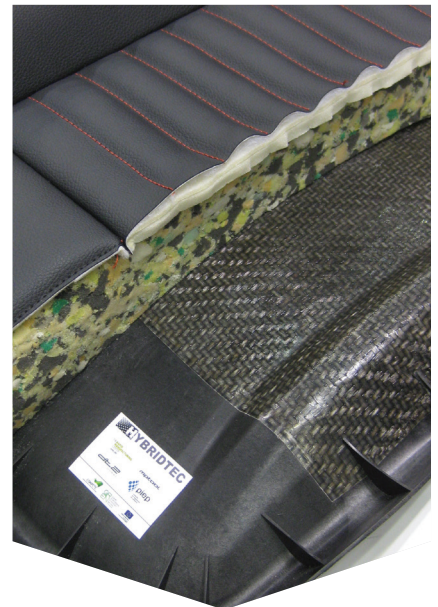
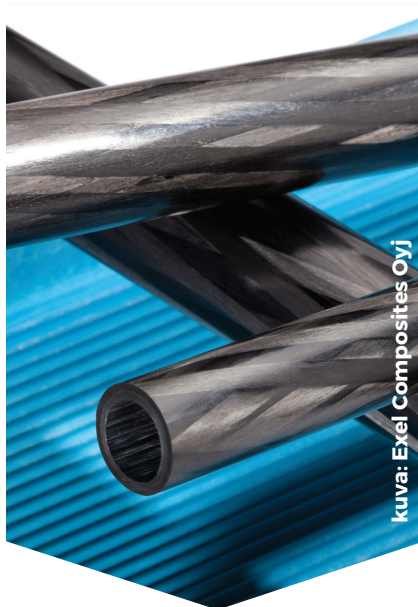


# ÄLYKKÄÄT KOMPOSIITIT

Komposiittien valmistusmenetelmät mahdollistavat älykkyyden tuomisen rakenteeseen. Komposiittiin voidaan integroida esimerkiksi antennoja, RFID- tageja, elektroniikkaa ja optisia kuituja.

SpaceShipOne-raketin hybridimoottorin kuitukelauksella valmistettu kuorirakenne on kiinteän polttoaineen jälkeisessä kerroksessa piidioksidikuidulla lujitettua fenolia. Piidioksidikuiduille on tyypillistä hyvä korkeiden lämpötilojen kesto ja fenoli on kertamuovi, joka kestää korkeita lämpötiloja ja on palonkestävä. Tämän kerroksen jälkeen on kuormaa kantava hiilikuitu-epoksi kerros. Jotta voidaan tunnistaa, ettei sisempi kuorikerros ole vaurioitunut, on kerrosten välissä optinen kuitu, jolla valvotaan moottorin kuntoa, ja joka pysäyttää ilokaasuhapettimen tuomisen kiinteän kumipolttoaineen sisälle onnettomuuden estämiseksi.

Itsekorjautuvat komposiitit perustuvat matriisiin lisättyihin onttoihin mikropalloihin tai onttoihin kuituihin. Onttojen lujitteiden sisällä on kertamuovihartsia ja matriisissa on katalyyttisiä kovetinpartikkeleita. Komposiitin murtuessa ontot lujitteet rikkoutuvat ja hartsi pääsee valumaan kosketuksiin katalyyttisen kovettajan kanssa kovettuen ja korjaten vaurion. Mikropallot toimivat vain kerran samalla kohtaa, mutta kuidut toimivat kuin verisuonet ja tuovat jo kertaalleen murtuneeseen kohtaan nestemäistä hartsia kauempaa rakenteesta, mikäli sama kohta vaurioituu uudelleen.



# KOMPOSIITTIIEN SOVELLUSKOHTEITA

Komposiittimateriaalit mahdollistavat kevyiden, kestävien ja energiatehokkaiden rakenteiden toteutuksen. Tämä on suurin syy niiden käyttämiseen erilaisissa käyttökohteissa. Nykyaikaisilla suunnittelu- ja valmistusmenetelmillä komposiittirakenteiden toteutus on myös edullisempaa kuin perinteisillä materiaaleilla.

Nykyaikaisissa lentokoneissa jo yli puolet rakenteista on komposiitteja. Tyypillisesti hiilikuiturakenteita käyttämällä painonsäästö alumiiniin nähden on noin neljäsosan verran ja teräkseen nähden yli puolet keskenään verrannollisten rakenteiden kohdalla. Kun rakenteet optimoidaan komposiittien ehdoilla, voidaan laajentaa tuotteen ominaisuuksia alueille, jotka eivät perinteisillä materiaaleilla ole edes mahdollisia. Komposiittirakenteeseen voidaan integroida useita erilaisia toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia, jotka perinteisillä materiaaleilla pitäisi toteuttaa useita eri materiaaleja käyttäen.

Komposiittien käyttö kasvaa jatkuvasti monilla sovellusalueilla kuten autoteollisuudessa ja energiantuotannossa. Syynä tähän on energiatehokkuuden kasvattaminen. Kuljetusvälineiden keventäminen pienentää niiden energiankulutusta ja samalla pienenee myös syntyvät päästöt ja hiilijalanjälki. Hyvin suunnitelluilla komposiittituotteilla voidaan myös pidentää tuotteen elinkaarta, kun olosuhdekuormitusten aiheuttama rakenteen kuluminen on hitaampaa. Komposiitit eivät ruostu, mutta ne vaativat pinnoitteen, joka suojaa esimerkiksi auringon UV-säteilyn aiheuttamalta matriisimuovin heikentymiseltä. Komposiitteja käytetään paljon kohteissa, joissa perinteiset materiaalit eivät kestä kemiallista kuormitusta. Näitä tuotteita ovat mm. erilaiset putkistot, reaktorit ja säiliöt. Tuttu kohde on selkäystävällinen komposiittinen nestekaasupullo.

Lähes kaiken voi tehdä komposiitista, mutta ihan kaikkea ei kannata siitä tehdä. Jatkossa yhä useammat kokonaisuudet koostuvat monimateriaalisista hybridirakenteista, joissa eri materiaalien parhaita ominaisuuksia ja piirteitä hyödynnetään yhdessä kokonaisuudessa. Joillakin toimialoilla komposiitit ovat jo korvanneet perinteiset materiaalit lähes kokonaan. Hyvinä esimerkkeinä ovat urheiluvälineet ja tuulivoimaloiden siivet. Myös veneteollisuudessa käytetään yhä kasvavaa määrää komposiitteja.

Tulevaisuudessa komposiittirakenteet tulevat olemaan rakenteellisen tehokkuuden lisäksi myös nykyisiä älykkäämpiä, funktionalisempia ja monipuolisempia. Uusien ominaisuuksien yhdisteleminen komposiitteihin on huomattavasti helpompaa kuin metalleihin ja hidasteena onkin vain mielikuvituksen asettamat rajat. Komposiittimateriaalit tulevat muokkaamaan tulevaisuuden maailmastamme yhä mielekkäämmän paikan elää.





## KOMPOSIITIT JA YMPÄRISTÖ

Luonnonmateriaalien käyttö komposiiteissa kasvaa koko ajan. Biohartsit ja luonnonkuitulujitteet ovat jo arkipäivää monissa kuluttajatuotteissa. Raaka-aineiden komponentteja muokataan ympäristö- ja käyttäjäystävällisimmiksi noudattaen esimerkiksi EU:n REACH-ohjelmaa. Muovimateriaaleja tehdään jo uusiutuvista lähteistä saaduista raaka-aineista fossiilisten aineiden sijaan. Komposiittien kustannustehokkaalle kierrättämiselle etsitään aktiivisesti uusia menetelmiä sen lisäksi, että komposiiteille on olemassa kierrätysjärjestelmiä, joissa hyödynnetään materiaaleja sekä uusiin käyttötarkoituksiin että otetaan aineiden energiasisältö hyödyksi kierrätysprosessiin. Kierrätyksen lopputuotteet vaihtelevat erilaisista granulaateista kuiduista tehtyihin puolivalmisteisiin.





# KOMPOSIITIT SUOMESSA

Maassamme on yli viidenkymmenen yrityksen muodostama komposiittiteollisuus, joka palvelee hyvin laajaa asiakaskuntaa sekä kotimaassa että ulkomailla.

Raaka-ainevalmistuksen puolella toimii muutamia yrityksiä, jotka tekevät muovimatriiseja ja lujitteita teollisuuden tarpeisiin. Materiaalin jälleenmyyjä on kymmenkunta, jotka toimittavat ulkomailla valmistettuja raaka-aineita teollisuudelle.

Valtaosa komposiittirytyksistä on pieniä ja keskisuuria valmistavia yrityksiä, joiden tuote- ja tuotantomenetelmien kirjo on hyvin laaja. Komposiittikonsultaatiota ja -suunnittelua tarjoavia yrityksiä on myös noin kymmenkunta. Koko alan liikevaihdon suuruusluokka on noin 400 miljoonaa euroa vuodessa ja ala työllistää noin parituhatta henkeä. Lisäksi veneteollisuus suurena komposiittitoimijana muodostaa vastaavan kokoisen toimialan. Komposiittiteollisuuden yrityksiä edustaa Muoviteollisuus ry:n Komposiittijaosto.

Komposiitteja opetetaan yliopistoissa ja korkeakouluissa sisällytettynä useimmiten materiaalioppiin. Oman oppiaineena komposiitit ovat Tampereen Teknillisessä Yliopistossa ja muutamissa ammattikorkeakouluissa. Opetuksen lisäksi komposiittien osalta on myös kattavaa tutkimustoimintaa, erityisesti luonnonkuituihin ja nanopartikkeleihin liittyvää tutkimusta. VTT:llä on kattava komposiittien analysointilaitteisto ja kokemus tutkimuksesta.

## TÄMÄN ESITYKSEN OVAT TEHNEET YHTEISTYÖSSÄ



**Patria**



Jyrki Vuorinen,  
Tampereen Teknillinen  
yliopisto  
Mika Mustakangas,  
Patria  
Minna Annala,  
Muoviteollisuus ry:n  
Komposiittijaosto