

Üveg/szén és bazalt/szén hibridszálas epoxigyanta mátrixú unidirekcionális kompozitok összehasonlítása

Tamás Péter*
PhD hallgató

Dr. Czigány Tibor*
egyetemi tanár

Unidirekcionális üvegszál/szénszál és bazaltszál/szénszál erősítésű epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok mechanikai tulajdonságait vizsgálatuk. Kimutattuk, hogy a hibridkompozitok mechanikai tulajdonságai jobbak, mint a monokompozitoké. Rámutattunk, hogy hibridkompozitok esetében is a bazaltszál - az előnyös tulajdonságainak köszönhetően - kiválthatja az üvegszálat.

1. Bevezetés

A szálerősített műanyagok az elmúlt évtizedekben meghatározó szerkezeti anyagokká váltak. A kompozitok alkalmazása azért igen kedvelt, mivel egyesítik a mátrix- és az erősítőanyag előnyös tulajdonságait. Abban az esetben, ha a kompozitok egyes komponensei is összetettek, akkor hibridkompozitokról beszélhetünk. A kompozitok definícióját [1] alapul véve, a kompozitok kétféle módon lehetnek hibridek, a mátrixanyag (pl.: hibrid gyantarendszer) [2-4], vagy az erősítőanyag oldaláról (pl.: hibrid erősítőanyag) [5-7]. Shalin megfogalmazása szerint [8] a hibrid erősítőanyagot tartalmazó kompozitok öt nagy csoportra bonthatóak. A kevert (averaged) szálas hibridkompozitoknál a különböző típusú szálak a befoglaló mátrixanyag egészében keverten, mindenféle rendezettség nélkül helyezkednek el. A rétegen belüli (intralaminar) hibridkompozitok esetében a különböző szálak egy adott rétegen belül meghatározott rendezettségben helyezkednek el (az egyes rétegek önmagukban is hibridkompozitok). Az rétegek közötti (interlaminar) hibridkompozit annyiban különbözik ettől, hogy egy rétegben csak egyféle erősítőanyag kap helyet, de a különböző rétegek adott sorrendben követik egymást (a kompozit szerkezet a különböző monokompozit rétegek egymásra helyezésével válik hibriddé). A negyedik csoportba a különálló erősítőelemek (separate reinforcing elements) tartoznak, ami magába foglalja a különálló erősítő sávokat, merevítő bordákat. Az utolsó, a szuperhibridek (superhybrids) esetében a polimer kompozit rétegek és fémlemezek vagy fóliák meghatározott minta szerint követik egymást.

A szakirodalmat tanulmányozva nagyszámú hibridkompozitokkal foglalkozó írás található. A hőre keményedő mátrixú hibrid szálerősítésű kompozitok közül a leggyakrabban használt erősítőanyag pár a szén- és az üvegszál, azonban egyre inkább teret hódítanak a különböző természetes vagy természetes eredetű szálak felhasználása is. A szénszál üvegszállal való hibridizálása nagymértékben csökkentheti a hőre keményedő mátrixú szénszálas kompozitok árát és javíthatja azok ütésállóságát. Kirk és társai [9] az elsők között foglalkoztak epoxigyantába ágyazott üveg/szénszálas hibridkompozitok törési energiáinak meghatározásával. A vizsgálataink során azt tapasztalták, hogy a hibridkompozitoknál alkalmazott hibrid keverékszabály (RoHM) használatával számított

* BME Polimertechnika Tanszék

eredmények magasabbak, mint a mért értékek. Ennek alapján kijelentették, hogy a méréseik szerint magas üveg- és szénszáltartalom mellett negatív szinergikus hatás figyelhető meg. Marson és Gabbitas [10] epoxigyanta mátrixú üveg/szén hibridkompozitok esetében vizsgálták a felületkezelés mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását. Az általuk használt rovingok vizsgálata azt mutatta, hogy a felületkezelés 7%-kal növelte a rovingok húzószilárdságát. A felületkezelt szálakat tartalmazó hibridkompozitok esetében a húzószilárdság 15%-kal volt magasabb, mint a kezeletlen szálakat tartalmazóké. Naik és társai [11] atlasz szén- és vászon üvegszövetből készített epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok, valamint epoxigyanta mátrixú atlasz szén-, vászon szén- és vászon üvegszövet monokompozitok nyomó igénybevétel hatására mutatott viselkedését tanulmányozták vastagság-, lánc- és vetülékirányban. A méréseik alapján a nyomószilárdság a deformációval arányosan növekedett. Nagy alakváltozással járó terhelés hatására a hibridkompozit nyomószilárdságára magasabb értéket kaptak, mint a szénszövettel erősített monokompozitok esetében. A hibridizáció hatására a monokompozitokhoz képest megnövekedett a deformáció. Megállapították, hogy a nyomószilárdság vastagságirányban jelentősen magasabb, mint lánc- és vetülékirányban. Tsai és Bosze [12] a nedvesség és hőmérséklet hatását vizsgálták rúdszerű unidirekcionális szén-üvegszál erősítésű epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok termikus és mechanikai tulajdonságaira. A próbatesteket 32 héten keresztül tartották ioncserélt vízben anyaganként más-más hőmérsékleteken. Megállapították, hogy magasabb hőmérsékleten az anyag sokkal több nedvességet vett fel, a nedvességtartalom növekedésével jelentősen csökkent az üvegesedési hőmérséklet és a nyírószilárdság is. De Rosa és munkatársai [13] gyantainjektálásos technológiával (RTM – Resin Transfer Molding) készített juta-üvegszál erősítésű hibridszálas poliészter mátrixú kompozitok ütésszerű terhelés utáni maradó mechanikai tulajdonságaival foglalkoztak. A próbatesteket két különböző rétegrenddel készítették és vizsgálták ezeknek hatását hajlító vizsgálattal. A mérést akusztikus emissziós berendezéssel egészítették ki. Azt tapasztalták, hogy a szendvicsszerkezetű hibridkompozitoknál az ütésszerű terhelés után megmaradó szilárdság magasabb volt, mint a másik típusú rétegrend esetén.

A hibridkompozitokkal kapcsolatban sok kutatás folyik, azonban gyakorlati használatuk is jelentős [14-18]. Burks és társai [19] pultrudált, hajlító igénybevételnek kitett, üveg-szénszál erősítésű epoxigyanta mátrixú hibridkompozit magos alumínium köpenyes (ACCC - Aluminum Conductor Composite Core) nagyfeszültségű távvezeték vizsgálták. Az anyag viselkedését véges-elemes módszerrel is modellezték. Kimutatták, hogy a távvezeték nyomószilárdsága sokkal alacsonyabb, mint a húzószilárdsága. Megállapították, hogy a hibrid mag összetétele nagymértékben befolyásolja a szerkezetben ébredő feszültségeket. Abban az esetben, amikor a magban az üvegszál aránya magasabb volt, sokkal kisebb axiális feszültség ébredt. Megfigyelték, hogy túlzottan kisméretű mag esetében az ébredő nyomófeszültség hatására nagy kiterjedésű rétegelválások keletkeztek. Zhu és kutatótársai [20] acél csövek és tartályok helyett alkalmaztak üveg/szén hibridszálas epoxi mátrixú kompozit csövet és tartályt. Vizsgálataikban kimutatták, hogy ezeknek a kompozit elemeknek a korrózióállóságuk és megfelelő szilárdsági tulajdonságuk mellett a kúszási viselkedésük is kiváló. A legújabb fejlesztések során pedig szén/üveg epoxi mátrixú hibridkompozitból készítenek gépjármű kardántengelyt, melynek köszönhetően a kisebb tömeg mellett nagyobb a rezgéselnyelő képessége [5].

Az üvegszál helyett alkalmazható a bazaltszál is, hiszen a kiváló tulajdonságú bazalt, egy a természetben sokhelyütt előforduló szálhúzásra közvetlenül alkalmas vulkanikus eredetű anyag. Kémiai összetétel és mechanikai tulajdonságai hasonlóak az üvegszáléhoz [21], viszont lúgkorrózióra kevésbé érzékeny. Olvadáspontja 1450°C, mely alkalmassá teszi magas hőmérséklettartományú területeken való működésre is. Kémia

kompozíciójának köszönhetően teljes egészében bioinert [22], környezetkárosító hatása nem ismert [23]. A szénszál bazaltszállal történő hibridizációja – csakúgy, mint az üvegszál esetében - nagymértékben csökkentheti a felhasználásukkal készülő kompozitok árát, javíthatja a szénszál kompozitok szívósságát és ütésállóságát, valamint az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásoknak is megfelel [24, 25].

A cikk célja üveg/szén és bazalt/szén hibridszállal erősített epoxigyanta mátrixú kompozitok vizsgálata és összehasonlítása.

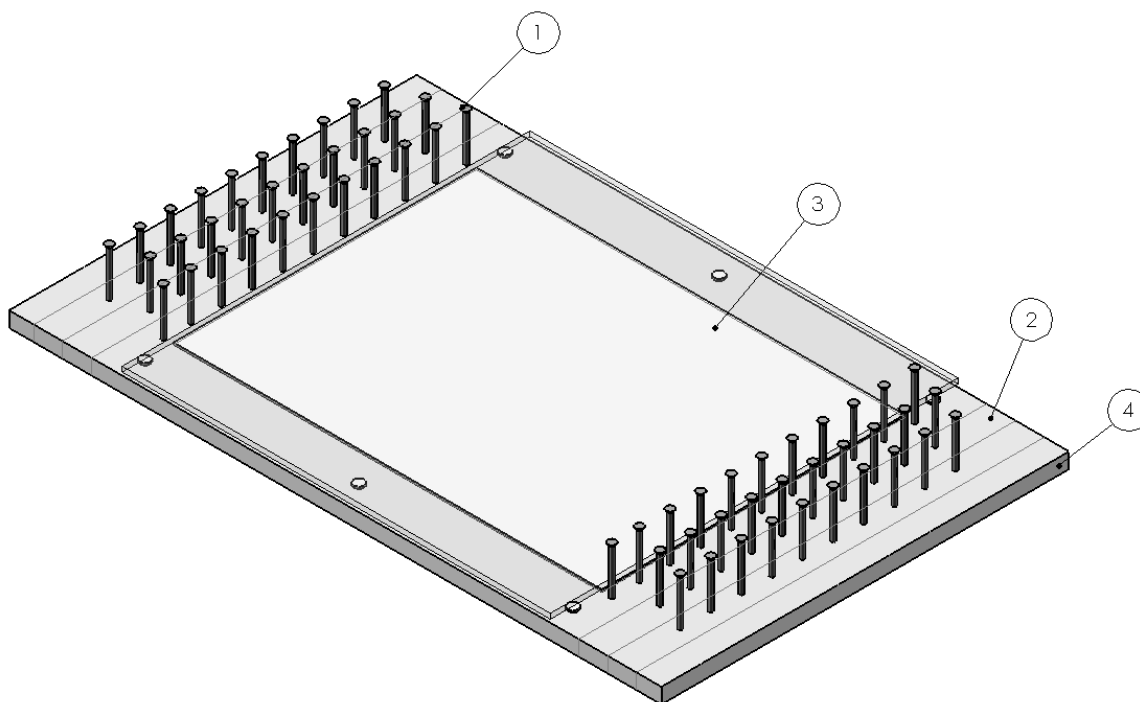
2. Felhasznált anyagok, előállításuk és vizsgálati módszereik

A vizsgálatok során felhasznált anyagok előállításánál a mátrixanyag Sika Biresin CR82 epoxigyanta (EP) volt Sika Biresin CH80-2 katalizátorral. A felhasznált erősítőanyagokat az 1. táblázat mutatja.

Száltípus	Jelölés	Roving lineáris sűrűsége	Gyártó
		[tex]	
Folytonos üvegszál	GF	1200	Owens Corning, Franciország
Folytonos bazaltszál	BF	1200	Kamenny Vek, Oroszország
Folytonos szénszál	CF	3600	Zoltek Zrt, Magyarország

1. táblázat Felhasznált erősítőanyagok

A mérésekhez szükséges unidirekcionális szálerősítésű kompozitokat egy saját tervezésű és készítésű szálfektető berendezés (1. ábra) segítségével, kézi laminálással készítettük el.



1. ábra A tervezett szálfektető berendezés
(1 állítható szegsorok, 2 szorító lapok, 3 munka felület, 4 alaplap)

A kompozitok elkészítéséhez erősítőanyagként különböző rovingokat használtunk. A szálfektető berendezéssel a hibridkompozitokat az egyes erősítőanyagok egymásra fektetésével hoztuk létre. Az állítható szegsoroknak köszönhetően változtatni lehet az egyes rovingok közti távolságot és akár három különböző erősítőanyagból álló hibridkompozitot is létre tudunk hozni. A szálfektetővel 420 mm hosszúságú, 370 mm szélességű és 3 mm vastagságú kompozit lapok készíthetők. A vizsgálatokhoz hat különböző összetételű anyagot állítottunk elő, egy erősítőanyag nélkülit (epoxigyanta), egy-egy mono- (epoxigyanta\üveg-, bazalt- és szénszál) és egy-egy hibridkompozitot (epoxigyanta\üveg-szénszál, valamint bazalt-szénszál). A gyanta két komponensének összekeverésénél különösen ügyelni kell a pontos keverési arányra (100:27) és a minél tökéletesebb elegyítésre (2 lépcsős keverés: 4 perc keverés, 2 perc pihentetés, 4 perc keverés). A rendelkezésre álló rovingok lineáris sűrűsége különböző, melyet a szálak speciális fektetésével kompenzáltunk. A kisebb lineáris sűrűségűt többször (háromszor) fektettük végig, ezzel gyakorlatilag az 1200 tex lineáris sűrűségből 3600 tex-t készítettünk. A gyanta térhálósodási fokát növelendő, a kikeményedést követően a lapokat 2 órára 60 °C hőmérsékletű Heraeus T-12 típusú hőkezelő-kemencébe helyeztük. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a kompozit lemezekből Mutronic Diadisc gyémánttárcsás vágógéppel munkáltuk ki.

Vizsgáltuk az egyes összetevők és az elkészült kompozitok mechanikai jellemzőit is. Az elemi szálak húzóvizsgálatokhoz szükséges szálakat JIS R 7601 szabvány szerint készítettük elő, mely 25 mm szabad befogási hossz alkalmazását és a szálak 10x25 mm ablakméretű papírkeretre történő felragasztását írja elő. A szilárdság kiszámításához szükséges szálátmérőt Olympus BX-51 típusú szálvizsgáló-képfeldolgozó rendszer segítségével határoztuk meg. A kompozit lemezek elkészítését követően, kiégetéssel állapítottuk meg az egyes anyagok száltartalmát. A kiégetést két lépcsőben végeztük el. A mátrixanyagot először gázláng felett égettük ki a szálak közül, majd a mintákat 600°C hőmérsékletű Nabertherm L9/11 típusú izzító kemencébe helyeztük a mátrixanyag minél tökéletesebb eltávolítása érdekében. A mechanikai tulajdonságok meghatározásához húzó- és hárompontos hajlító vizsgálatokat végeztünk. A kompozit próbatestek húzó vizsgálatát MSZ EN ISO 527 szabvány alapján végeztük el, Zwick Z050 típusú univerzális szakítógépen. A befogási hossz 150 mm, a vizsgálati sebesség 2 mm/perc volt. A próbatestek nyúlását video-extenzométerrel regisztráltuk. A hárompontos hajlító vizsgálatot MSZ EN ISO 14125 szabvány ajánlásának megfelelően hajtottuk végre. A mérés során 48 mm alátámasztási távolságot és 2 mm/perc terhelési sebességet alkalmaztunk. Minden anyagból 5-5 próbatestet vizsgáltunk. Az erősítőszálak felületén minden esetben meghagytuk a gyári felületkezelést. A gyártók adatlapjai szerint a felhasznált rovingok szilános kapcsolószerrrel voltak kezelve. A roncsolt próbatestek töretfelületeit Jeol JSM-6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk, a felvételek alapján minősíthető a határfelületi adhézió.

3. A vizsgálati eredmények és értékelésük

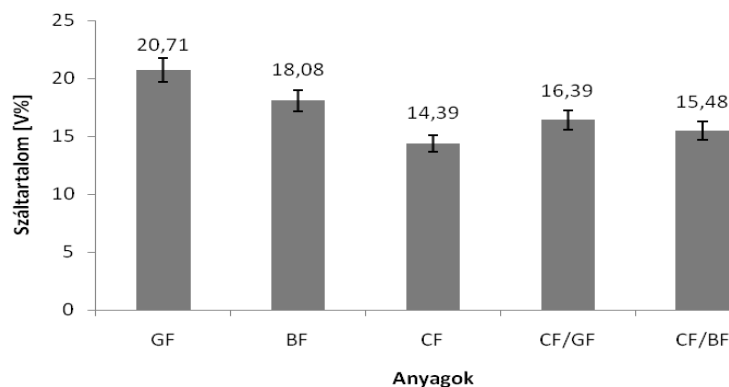
Az elemi szálak vizsgálata során minden esetben 10-10 mintát vizsgáltunk, melyet a rendelkezésünkre álló rovingokból preparáltunk. A kapott eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

Anyag	d_{av} [μm]	A_f [μm^2]	F_f [N]	σ_f [MPa]	ε_f [%]	E_f [GPa]
CF	8,1 \pm 1,8	51,5 \pm 10,2	0,17 \pm 0,04	3362 \pm 472	1,8 \pm 0,22	182 \pm 15,6
GF	18,6 \pm 2,4	272,4 \pm 49,0	0,46 \pm 0,12	1677 \pm 436	2,98 \pm 0,69	55,9 \pm 8,0
BF	14,2 \pm 1,4	160,2 \pm 30,3	0,32 \pm 0,09	2016 \pm 434	3,56 \pm 0,89	61,9 \pm 3,5

2. táblázat Elemi szálak mért és számított jellemzői
(d_{av} - átlagos szálátmérő, A_f – átlagos szál keresztmetszet, F_f – szakítóerő,
 σ_f – szakítószilárdság, ε_f – szakadási nyúlás, E_f – rugalmassági modulus)

A vizsgált szálak közül a szénszál átmérője a legkisebb, míg az üvegszálé a legnagyobb. Az eredmények alapján elmondható, hogy a bazaltszál tulajdonságai kis mértékben jobbak, mint az üvegszálé. A várakozásoknak megfelelően a szénszál jellemzői felülmúlják mindkét előző száltípusét. A szénszál szilárdsága majdnem kétszeres, míg a modulusa háromszorosa a másik kettő szálénak. A szénszál ridegségének köszönhetően a szakadási nyúlásban azonban kisebb értékeket mutat.

A kompozitok száltartalom vizsgálata során kapott eredményeket a 2. ábra mutatja. A különböző anyagok száltartalma eltérő, ami megnehezíti az anyagok mechanikai tulajdonságainak összehasonlítását.



2. ábra A száltartalom vizsgálat eredményei

A mechanikai tulajdonságok összehasonlításához a mért értékeket a száltartalommal súlyoztuk (1) és ezeket visszaszámítottuk 20 térfogat-százalékos (V%) átlagos száltartalomra.

$$x_1 = \frac{x}{V_f} \quad (1)$$

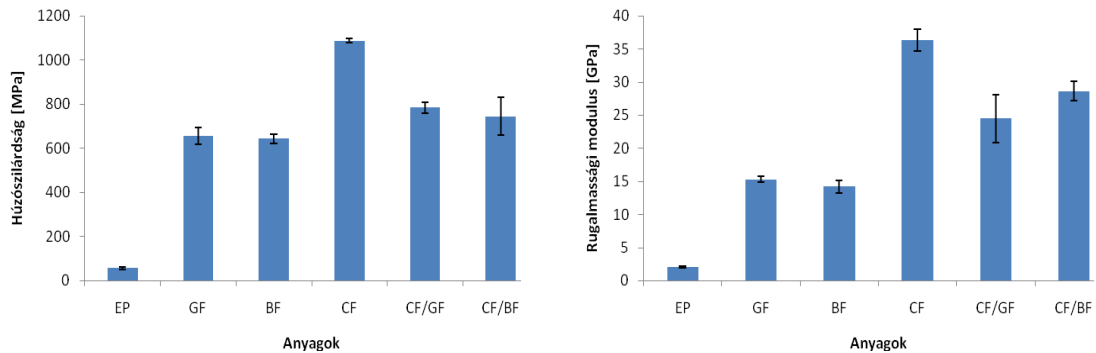
ahol x a tetszőleges mechanikai tulajdonság, x_1 a fajlagosított mechanikai tulajdonság, V_f az erősítőszál térfogathányada.

A mátrixanyag, valamint a mono- és hibridkompozitok húzóvizsgálati eredményeit a 3. táblázat mutatja. A mért értékekből húzószilárdságot és rugalmassági modulusot számítottunk. A kompenzált értékeket a 3. ábra foglalja össze.

	EP	EP-GF	EP-BF	EP-CF	EP-CF/GF	EP-CF/BF
σ_k [MPa]	55,50±5,42	679,83±38,64	580,40±19,80	781,85±7,06	641,83±19,43	576,21±66,88
E_k [GPa]	2,05±0,12	15,82±0,46	12,80±0,89	26,14±1,21	20,04±2,93	22,13±1,13

3. táblázat A húzóvizsgálat eredményei alapján számított értékek (σ_k – húzószilárdság, E_k – húzó rugalmassági modulus)

Az eredmények szerint a legjobb mechanikai tulajdonságokkal a szénszálak monokompozitok rendelkeztek. A bazalt- és üvegszálak mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságai nagyon hasonlóak, a különbség mind a szilárdság, mind pedig a modulus tekintetében 5%. A húzóvizsgálatoknál nem figyelhető meg a különböző szálak együttműködése, a terhelést minden esetben főleg a kisebb szakadási nyúlást mutató anyag viselte. Kijelenthető azonban, hogy a szálerősítés szignifikánsan javította a mechanikai tulajdonságokat.

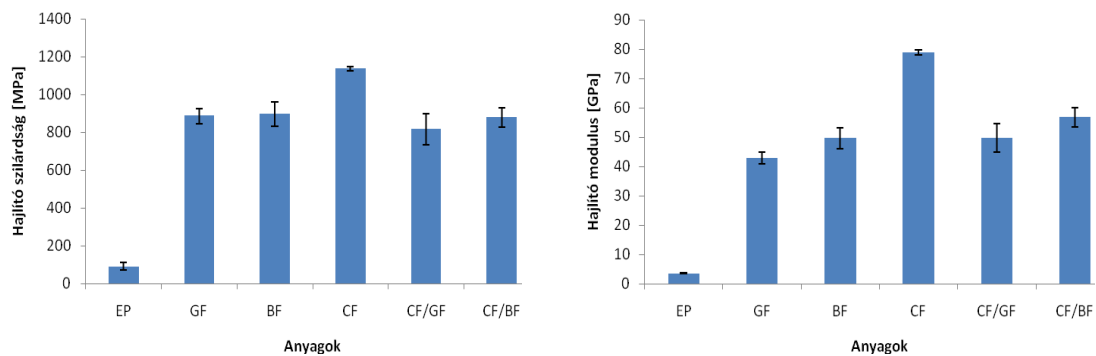


3. ábra A kompenzált húzószilárdság és rugalmassági modulus értékek

A hajlító vizsgálat eredményeit a 4. táblázat mutatja. A mért értékekből hajlítószilárdságot és hajlító moduluszt számítottunk. A kompenzált értékeket a 4. ábra ábrázolja.

	EP	EP-GF	EP-BF	EP-CF	EP-CF/GF	EP-CF/BF
σ_h [MPa]	90,69±19,70	918,59±41,57	811,50±58,51	817,67±8,88	668,56±66,22	681,40±39,60
E_h [GPa]	3,55±0,11	18,76±1,70	17,38±0,72	42,27±1,23	26,84±1,89	24,18±2,56

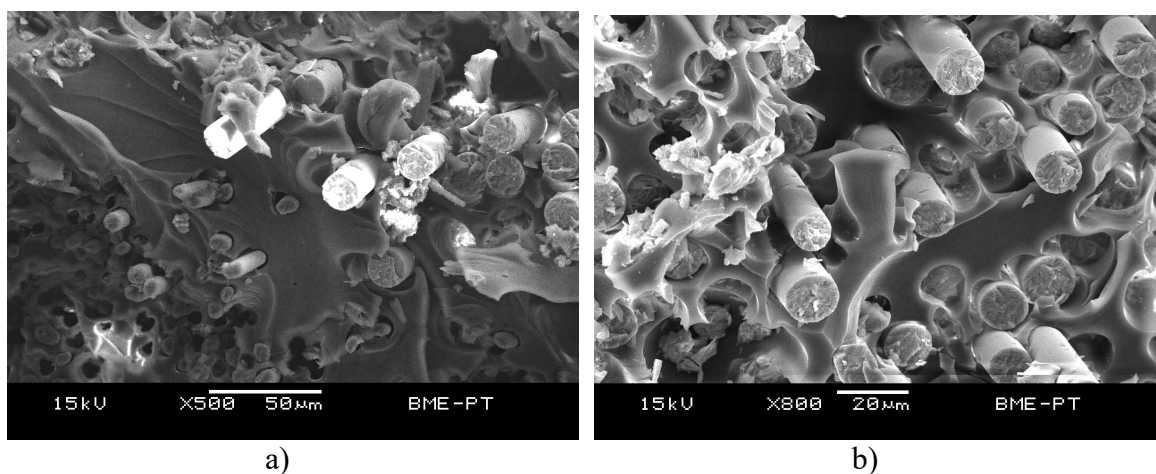
4. táblázat A hajlító vizsgálat eredményei alapján számított értékek (σ_h – hajlító szilárdság, E_h – hajlító modulus)



4. ábra A kompenzált hajlító szilárdság és hajlító modulus értékek

A hajlító vizsgálat során kapott értékek ugyanazt a trendet mutatják, mint a húzóvizsgálat eredményei, nevezetesen, a szénszálak kompozit mutatta a legjobb tulajdonságokat és a bazalt-, üvegszálak kompozitok jellemzői csak kis mértékben különböznek. A hibridkompozitok vizsgálata során minden esetben a szénszálak réteg helyezkedett el alul. A monokompozitokkal szembeni alacsonyabb mechanikai tulajdonságokat nagy bizonyossággal ez okozta, mivel a hajlítást egy húzás és egy nyomás összegeként lehet elképzelni, amelyben a szénszál magasabb, míg a másik szál alacsonyabb szilárdsággal rendelkezik.

A 5. ábra képei az üveg/szén és bazalt/szén hibridkompozit húzó próbatetek töretfelületéről készültek. A felvételek a különböző kompozit rétegek határát mutatják. A szálátmérő nagyságából be lehet azonosítani a szálakat, a kisebb átmérőjű szálak a szénszálak, a nagyobb átmérőjűek az üveg- illetve a bazaltszálak. A felvételek szerint az adhézió minősége tovább javítható.



5. ábra Az üveg/szén és bazalt/szén hibridkompozit húzó próbatetek töretfelületéről készült felvételek
a) EP-CF/GF b) EP-CF/BF

4. Összefoglalás

A szálerősítésű polimer kompozitok kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően mára a műszaki gyakorlatban szinte nélkülözhetetlen anyaggá váltak. A monokompozitok tulajdonságai azonban nem mindig felelnek meg a velük szemben támasztott összes követelménynek, melyre megoldást jelenthet a mátrix- vagy az erősítőanyag hibridizációja.

Gyakorlati szempontból az erősítőszálak társítása egyszerűbben kivitelezhető. A szénszálat általában üvegszállal szokták társítani, mivel ennek hatására jelentősen csökkenthető a szénszál kompozit ára és javítható az ütésállósága.

Az általunk tervezett és kivitelezett szálfektető berendezés használatával kézi laminálással unidirekcionális epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitokat készítettünk. Az elkészített lemezekből próbatesteket alakítottunk ki. Az anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározását húzó- és hajlító vizsgálatok alkalmazásával végeztük el. A vizsgálatok kimutatták, hogy a legjobb mechanikai tulajdonságokkal a szénszál monokompozitok rendelkeznek. A bazalt- és az üvegszál hasonló mértékben javítja a mechanikai jellemzőket mind a mono-, mind a hibridszál kompozitok esetében. A hibridizáció nem növelte a várt mértékben a mechanikai tulajdonságokat, melyet a tönkremenetel során fellépő delamináció magyaráz. A terhelés hatására a két különböző szál tartalmazó réteg elvált egymástól, ezáltal a szálak kihasználtsága drasztikusan lecsökkent, ami a szilárdság és modulus nagyságát is magyarázza. A mechanikai tulajdonságokat a gyártástechnológia javításával és fejlesztésével nagymértékben lehet javítani. Az általunk mért jellemzők ellenére a hibridszál kompozitok széleskörű elterjedése várható, mivel hibridizációval könnyebb a különböző követelményeknek megfelelő anyagot készíteni, mint az alapanyag vagy a monokompozit javításával, fejlesztésével.

Irodalomjegyzék

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [2] Jost N., Karger-Kocsis J.: On the curing of a vinylester-urethane hybrid resin. *Polymer* 43, 1383-1389 (2002)
- [3] Kubo S., Yokota H., Yokota H., Hayashi Y.: Three-year clinical evaluation of a flowable and a hybrid resin composite in non-carious cervical lesions. *Journal of Dentistry* 38, 191-200 (2010)
- [4] Collings T. A.: The use of resin hybrids to control moisture absorption in fibre-reinforced plastics. *Composites* 22, 369-372 (1991)
- [5] Abu T. A. R., Ali A., Badie M. A., Che L. N. A., Golestaneh A. F.: Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft. *Materials & Design* 31, 514-521 (2010)
- [6] Zhang Q., Zhao M., Liu Y., Cao A., Qian W., Lu Y. Wei F.: Energy-absorbing hybrid composites based on alternate carbon-nanotube and inorganic layers. *Advanced Materials* 21, 2876-2880 (2009)
- [7] Wang X., Hu B., Feng Y., Liang F., Mo J., Xiong J. Qiu Y.: Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. *Composites Science and Technology* 68, 444-450 (2008)
- [8] Shalin R. E.: *Polymer matrix composites*. Chapman & Hall, London, 1995.
- [9] Kirk J. N., Munro M., Beaumont P. W. R.: The fracture energy of hybrid carbon and glass fibre composites. *Journal of Materials Science* 13, 2197-2204 (1978)
- [10] Marston C., Gabbittas B., Adams J.: The effect of fibre sizing on fibres and bundle strength in hybrid glass carbon fibre composites. *Journal of Materials Science* 32, 1415-1423 (1997)
- [11] Naik N. K., Veerajju Ch., Kavala V.R.: Hybrid composites under high strain rate compressive loading. *Materials Science and Engineering: A* 498, 87-99 (2008)

- [12] Tsai Y.I., Bosze E.J., Barjasteh E., Nutt S.R.: Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites. *Composites Science and Technology* 69, 432-437 (2009)
- [13] De Rosa I. M., Santulli C., Sarasini F., Valente M.: Post-impact damage characterization of hybrid configurations of jute/glass polyester laminates using acoustic emission and IR thermography. *Composites Science and Technology* 69, 1142-1150 (2009)
- [14] Peters S.T.: *Handbook of composites*. Chapman&Hall, London, 1998.
- [15] Miller B.: Hybrid Process Launches - New Wave in Boat-Building. *Plastics World* 40-42 (1989)
- [16] Greene E.: *Marine Composites*. Eric Greene Associates Incorporation, Annapolis, 1999.
- [17] Harper C.A.: *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1999.
- [18] Mansour H.M., Wetzel K.K.: 3D woven carbon/glass hybrid spar cap for wind turbine rotor blade. *Journal of Solar Energy Engineering* 128, 562-573 (2006)
- [19] Burks B.M., Armentrout D.L., Baldwin M., Buckley J., Kumosa M.: Hybrid composite rods subjected to excessive bending loads. *Composites Science and Technology* 69, 2625-2632 (2009)
- [20] Zhu X., Li Z., Jin Y.: Creep behaviour of hybrid fibre (glass/carbon)-reinforced composite and its application. *Composites Science and Technology* 50, 431-439 (1994)
- [21] Deák T., Czigány T.: Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison. *Textile Research Journal* 79, 645-651 (2009)
- [22] Pott F., Roller M., Kamino K., Bellmann B.: Significance of durability of mineral fibers for their toxicity and carcinogenic potency in the abdominal cavity of rats in comparison with the low sensitivity of inhalation studies. *Environmental Health Perspectives* 102, 145-150 (1994)
- [23] Kogan F. M., Nikitina O.V. : Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action. *Environmental Health Perspectives* 102, 205-206 (1994)
- [24] Artemenko S., Kadykova Y.A.: Hybrid composite materials. *Fibre Chemistry* 40, 490-492 (2008)
- [25] Cao S., Wu Z., Wang X.: Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures. *Journal of Composite Materials* 43, 315-330 (2009)