

Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok, mint a szélerőművek ígéretes
anyagai

Tamás P., Czigány T.

Accepted for publication in Műanyag és Gumi

Published in 2014

DOI:

Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok, mint szélerőművek ígéretes anyagai

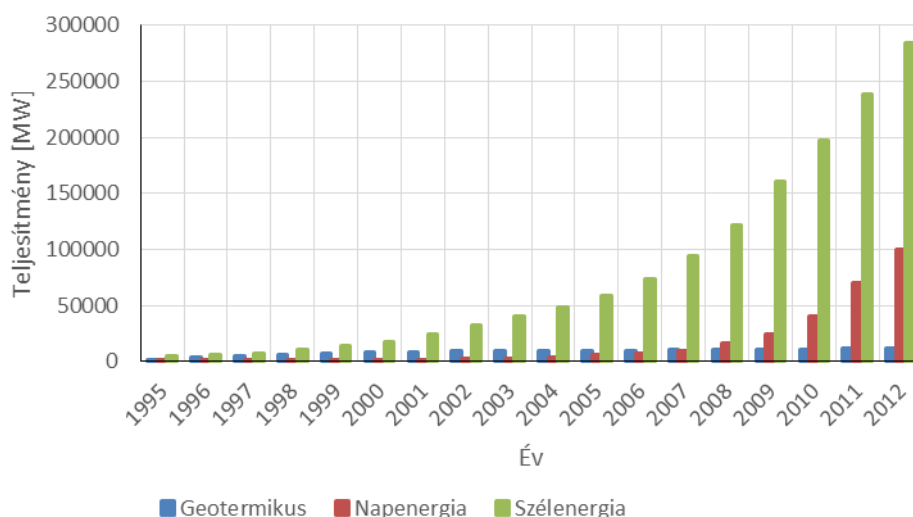
Tamás Péter^{*,**}
tudományos segédmunkatárs

Dr. Czigány Tibor^{*,**}
egyetemi tanár

Kutatásunk során üveg-, szén- és bazaltszövettel erősített epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok szélerőművek anyagaként történő alkalmazhatóságát vizsgálatuk, a mechanikai tulajdonságaikat alapul véve. Kimutattuk, hogy a hibridkompozitok esetében pozitív hibrid hatások vannak, amelynek köszönhetően a mechanikai tulajdonságaik jobbak, mint a monokompozitoké. Rámutattunk, hogy hibridkompozitok esetében a bazaltszál - az előnyös tulajdonságainak köszönhetően - kiválthatja az üvegszálat.

1. Bevezetés

A 21. század egyik legnagyobb mérnöki kihívása a fejlődő ipar és társadalom által generált „energiaéhség” kielégítése. 2012-ben a Földön több, mint 4,1 milliárd tonna kőolajat, továbbá 7,8 milliárd tonna kőszén termeltek ki. Mindezek mellett a szén-dioxid kibocsátás az elmúlt 10 évben 25%-kal növekedett. A fosszilis energiahordozók csökkenésének, valamint a szigorodó környezetvédelmi előírásoknak köszönhetően egyre inkább előtérbe kerülnek a megújuló energiaforrások. A megújuló energiaforrások közül a legdinamikusabban fejlődő ágazat a szélerőenergia (1. ábra) [1, 2].



1. ábra A megújuló energiaforrások kapacitása [1]

* BME Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék

** MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

2011-ben egyedül csak az Egyesült Királyságban 487 off-shore (tengeri) szélturbina működött, amelyek összesen 1524 MW villamos energiát termeltek és további 937 darab állt építés vagy tervezés alatt [3]. A szélturbinák számának elterjedéséhez és teljesítményének növekedéséhez kulcsfontosságú az egyes mozgó elemek tömegének minimalizálása, a szilárdság jelentős romlása nélkül. A rotor anyagául szolgáló kompozitokat korábban üveg- és szénszállal erősített poliésztergyantából készítették [4], napjainkban azonban epoxigyantára cserélték a mátrixanyagot [5]. Egy – manapság is használatos – 3 MW teljesítményű szélturbina rotorjának teljes tömege megközelítőleg 40 tonna, amelyből a szálerősített alkatrészek 20 tonnát tesznek ki [6]. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldtől távolabb, a tengerben helyezik el egymással összekapcsolva, a tengerfenékhez horgonyozva. Az off-shore szélerőművek jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérséklet-ingadozás, az erős szél, a villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütésszerű és a fárasztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek [7-9].

A különböző igénybevételeknek és környezeti hatásoknak a kompozitok egyféle erősítőanyaggal a legkritább esetekben képesek ellenállni, ezért különböző erősítőanyagok társítanak egymással. Ebben az esetben hibridkompozitokról beszélhetünk, amelyek egyesíthetik az egyes komponensek előnyös tulajdonságait. A hőre keményedő mátrixú hibrid szálerősítésű kompozitok közül a leggyakrabban használt erősítőanyagpár 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 szénszál kompozitok árát továbbá javíthatja azok ütésállóságát [10]. Naik és társai [11] szén- és üvegszövetből készített epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok nyomó igénybevétel hatására bekövetkező viselkedését tanulmányozták különböző irányokban. 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 anyagoként 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. A hibridkompozitokkal kapcsolatban sok kutatás folyik, azonban gyakorlati használatuk is jelentős [13-17]. 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 [18], viszont lúgkorrozíóra kevésbé érzékeny. Olvadáspontja 1450°C, mely alkalmassá teszi magas hőmérséklettartományú területeken való működésre is. Kémia összetételének köszönhetően teljes egészében bioinert [19], környezetkárosító hatása nem ismert [20]. 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 [21].

Artemenko és Kadykova [22] szén-üveg és szén-bazalt hibridszálakkal erősített fenol-formaldehid gyanta mátrixú hibrid- és mono kompozitok mechanikai tulajdonságait, keménységét és vízfelvételét vizsgálták. A bazaltszállal erősített rendszerek az üvegszállal erősítettekhez képest 58-60%-kal jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. Az

anyagok 2 órán át tartó ioncserélt vízben történő áztatása nem változtatta meg a mechanikai tulajdonságokat. Kimutatták, hogy az üvegszállal történő hibridizáció, a szénszálak monokompozitjához képest, 44-50%-kal rontotta a szilárdságot, amíg a bazaltszál mindössze 14%-os szilárdságcsökkenést eredményezett. Wei és társai [23-26] üveg- és bazaltszállal erősített epoxigyanta mátrixú kompozitok degradációjával foglalkoztak kutatásuk során. Bebizonyították, hogy a bazaltszállal erősített rendszer kevésbé érzékeny a környezeti hatásokra, mint az üvegszállal erősített kompozit. A szakirodalom alapján a bazaltszövet alkalmas lehet, az üvegszövet helyettesítésére, ezáltal szélerőművek optimális alapanyaga lehet.

A cikk célja bazaltszövettel erősített epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok - mint a szélerőművek lehetséges alapanyagainak - vizsgálata és összehasonlítása.

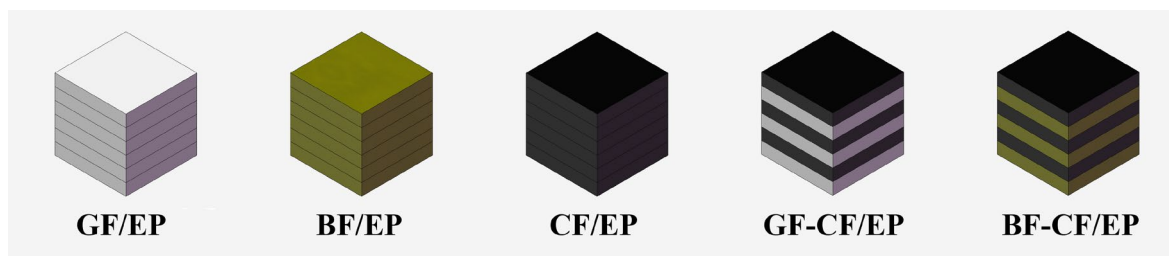
2. Felhasznált anyagok, előállításuk és vizsgálati módszereik

A vizsgálatok során felhasznált anyagok előállításánál a mátrixanyag IpoX FM-20 epoxigyanta (EP) volt IpoX MH-3120 katalizátorral (keverési arány 100:20). A felhasznált vászonkötésű erősítőanyagokat, amelyek mechanikai tulajdonságai lánca és vetületek irányban megegyeznek, az 1. táblázat mutatja.

Szövet típusa	Jelölés	Szövet területi sűrűsége	Gyártó
		[g/m ²]	
Üvegszövet	GF	220	Saint-Gobain Vetrotex
Bazaltszövet	BF	220	Basaltex
Szénszövet	CF	220	SGL Group

1. táblázat Felhasznált erősítőanyagok

A mérésekhez szükséges kompozit lemezeket kézi laminálással készítettük el 6-6 réteg erősítőszövet egymásra építésével, amelyeket a hibrid rendszerek esetében váltakozó rétegrendben helyeztünk el. A gyanta térhálósodási fokát növelendő, a kikeményedést követően a lapokat 2 órára 60 °C hőmérsékletű Heraeus T-12 típusú hőkezelő-kemencébe helyeztük. Az elkészített kompozit lemezek szerkezetét a 2. ábra mutatja. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a kompozit lemezekből Mutronic Diadisc 4200 gyémánttárcsás vágógéppel munkáltuk ki.



2. ábra Az elkészített kompozit lemezek felépítése

(GF/EP üvegszövettel, BF/EP bazaltszövettel, CF/EP szénszövettel, GF-CF/EP üveg/szénszövettel, BF-CF/EP bazalt/szénszövettel erősített epoxi gyanta mátrixú kompozitok)

Az erősítőanyagok mechanikai tulajdonságát sávszakító vizsgálatokkal határoztuk meg MSZ EN ISO 13934-1:2000 szabvány szerint, egy Zwick Z020 típusú számítógép-vezérlésű univerzális terhelőgéppel. A méréseket szövetenként 10-10 mintán végeztük el, majd ezek alapján számítottuk ki a mérések eredményeinek átlagát és szórását. A szövetek szakítószilárdságát (σ_f és rugalmassági modulusát (E_f) a sávot felépítő rovingok, valamint a rovingokat alkotó elemi szálak számának és átmérőjének, továbbá az erősítőszövet szakító erejének ismeretében számítottuk ki. A szilárdság kiszámításához szükséges szálátmérőt Olympus BX-51 típusú szálvizsgáló-képfeldolgozó rendszer segítségével határoztuk meg. A mechanikai tulajdonságok meghatározásához húzó- és hárompontos hajlító vizsgálatokat végeztünk. A kompozit próbatestek húzó vizsgálatát MSZ EN ISO 527 szabvány alapján végeztük el, Zwick Z020 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. A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot az MSZ EN ISO 179 szabvány alapján végeztük el, egy CEAST Resil Impactor Junior típusú gép alkalmazásával, hornyolatlan 2x10 mm keresztmetszetű próbatesten. Az alkalmazott üténergia 25 J, a becsapódás sebessége 3,3 m/s, az alátámasztási távolság 80 mm volt. A mérés során a próbatest által elnyelt energiát regisztráltuk, és ebből határoztuk meg a Charpy-féle ütőszilárdságot Mérésenként és anyagonként 5-5 próbatestet vizsgáltunk. Az eredmények ismeretében a szakirodalom szerint [27] elterjedten alkalmazott hibrid keverékszabályt (RoHM) alapul véve kimutattuk pozitív hibrid hatások jelenlétét. Az erősítőszálak felületén minden esetben meghagytuk a gyári felületkezelést. A gyártók adatlapjai szerint a felhasznált erősítőszövetek szilános kapcsolószerrel 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

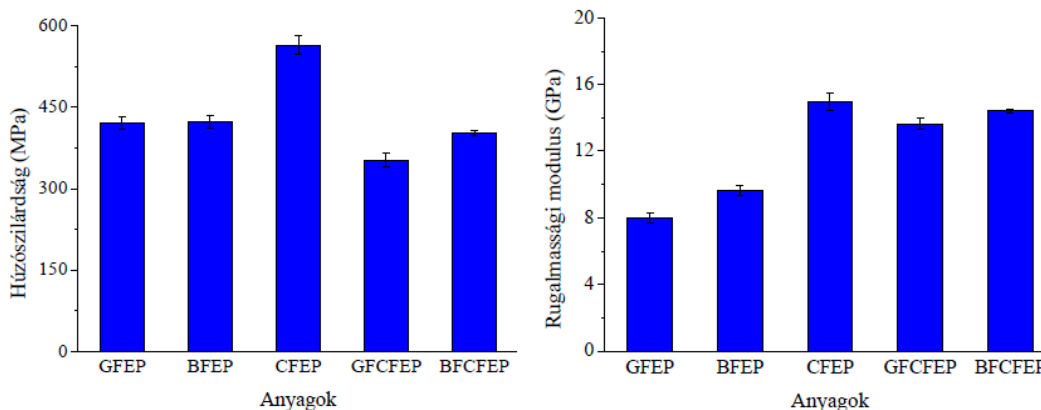
Az erősítőszövetek vizsgálata során minden esetben 10-10 mintát vizsgáltunk, amelyet a rendelkezésünkre álló szövetekből preparáltunk. A kapott eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

Anyag	σ_f [MPa]	ε_f [%]	E_f [GPa]
CF	3521±220	10,38±0,14	84±7
GF	2174±105	13,03±1,24	51±5
BF	1897±95	16,59±1,33	53±6

2. táblázat Erősítőszövetek főbb mechanikai tulajdonságai
(σ_f – szakítószilárdság, ε_f – szakadási nyúlás, E_f – rugalmassági modulus)

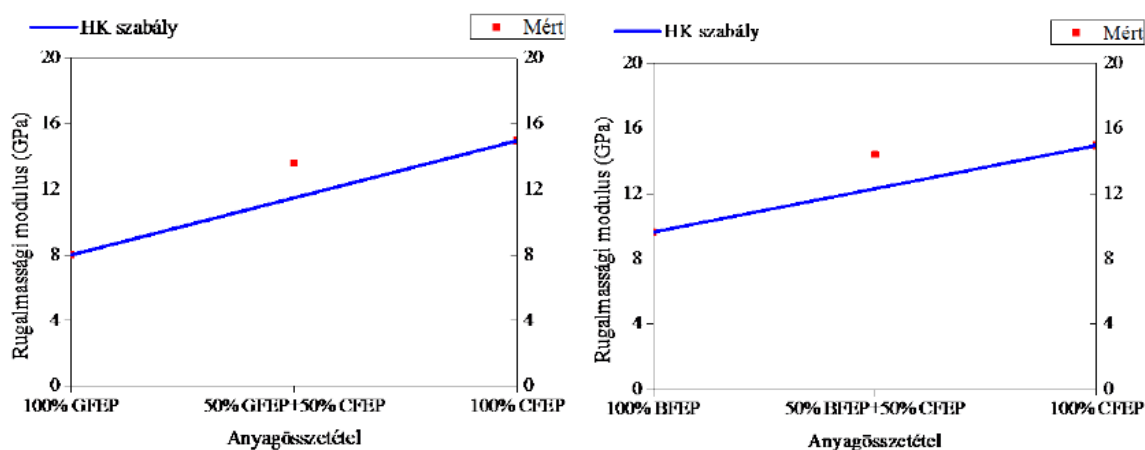
Az eredmények alapján megállapítható, hogy a bazaltszövet szakadási nyúlása és rugalmassági modulusa kis mértékben nagyobb, mint az üvegszöveté. A várakozásoknak megfelelően a szénszövet jellemzői felülmúlják mindkét előző szövet típusát. A szénszövet szilárdsága és modulusa majdnem a másik kettő szövetének. A szénszövet ridegségének köszönhetően a szakadási nyúlásban azonban kisebb értékeket mutat.

A mono- és hibridkompozitok húzóvizsgálati eredményeit a 3. ábra foglalja össze. A monokompozitok közül a szénszövettel erősített kompozitok rendelkeztek a legnagyobb húzószilárdsággal és rugalmassági modulussal. A hibridkompozitok közül egyértelműen a bazalt/szén kombinációjú kompozitok húzószilárdsága volt a legnagyobb, kimutatható hibrid hatást azonban nem tapasztaltunk.



3. ábra A vizsgált mono- és hibridkompozitok húzószilárdsága és rugalmassági modulusa (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP - szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

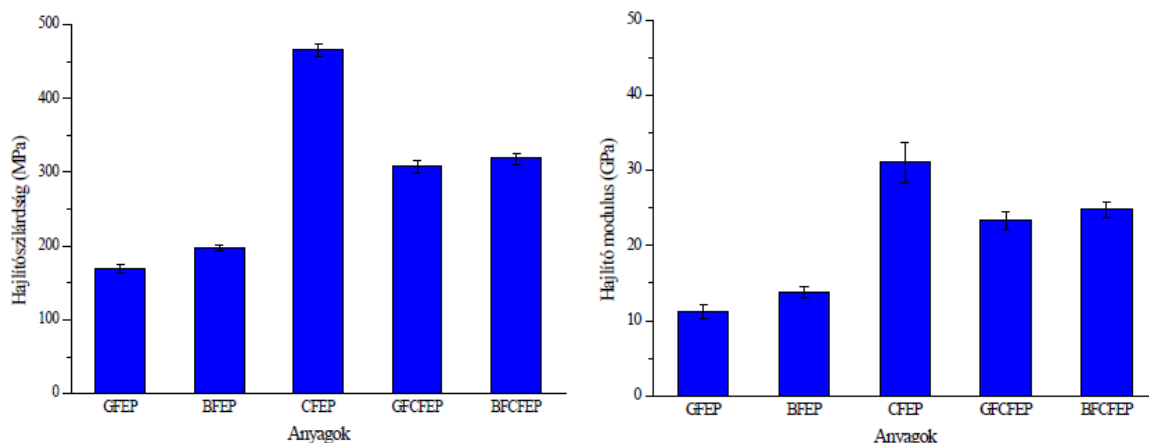
A modulus tekintetében azonban már megfigyelhető a hibrid rendszerek üveg-, bazaltszövettel erősített monokompozitokkal szembeni nagyobb modulusa, mind az üveg/szénszövet, mind pedig a bazalt/szénszövettel erősített rendszer esetében, amit a pozitív hibrid hatás jelenléte magyaráz, amelyet a hibrid keverékszabály (HK szabály) szerinti számítás alapján készített diagram (4. ábra) is alátámaszt.



4. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

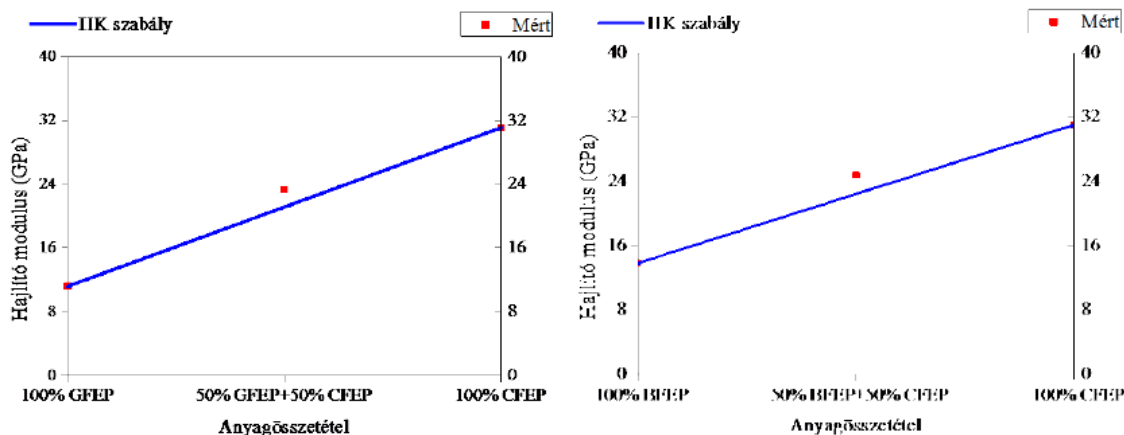
A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos hajlító vizsgálata során mért adatokból számított hajlítószilárdságot és hajlító rugalmassági modulusát az 5. ábra mutatja. A monokompozitok közül a szénszövettel erősítettek mutatták a legnagyobb hajlítószilárdságot és hajlító modulusát. A hibridek hajlító vizsgálat során meghatározott jellemzők (a hajlítószilárdság több mint 30%, a hajlító modulus 20%-kal) kisebbek a

szénszövettel erősített kompozitokétól. Ennek oka a hibrid rendszereket felépítő rétegek elrendezése.



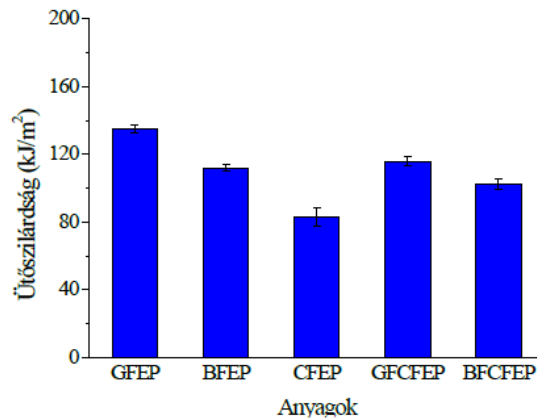
5. ábra A mono- és hibridkompozitok hajlítószilárdsága és hajlító rugalmassági modulusa (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP - szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

A szén/üvegszövettel és szén/bazaltszövettel erősített hibridkompozitok hajlító vizsgálatnál meghatározott jellemzői közti különbség a hajlítószilárdság tekintetében 3%, a modulusnál pedig mindössze 6%. A hajlítószilárdságok tekintetében nem tapasztaltunk hibrid hatást, a modulusok tekintetében azonban már felfedezhető szinergikus hatás (6. ábra).



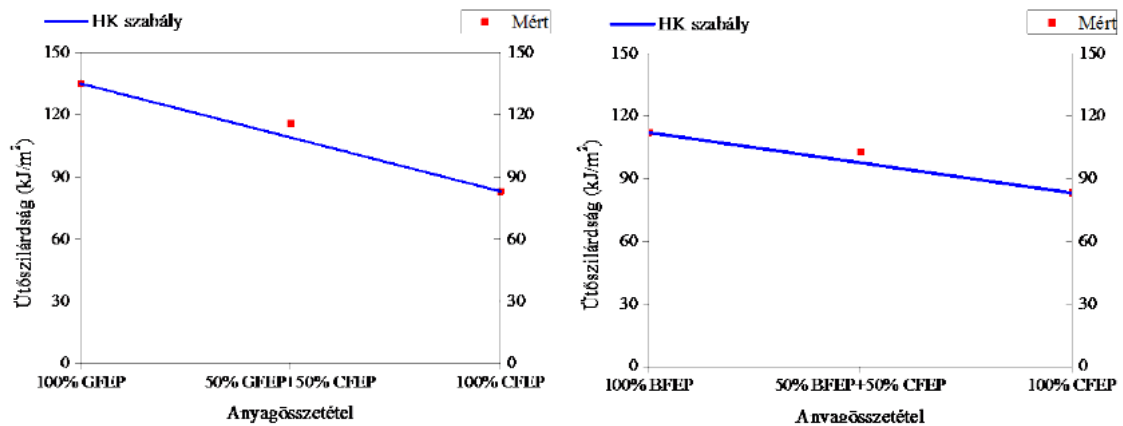
6. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos ütvehajlító vizsgálata (Charpy vizsgálat) során mért adatokból számított ütőszilárdságokat a 7. ábra mutatja. A monokompozitok közül az üvegszálak kompozitok álltak ellen a legnagyobb mértékben a dinamikus igénybevételnek. A szénszövettel erősített kompozitok – a szénszövet törékenysége miatt – ridegen törtek, amit a kis ütőszilárdságuk is mutat. Az ütőszilárdság tekintetében, a hibrid rendszerek esetében pozitív hibrid hatás (8. ábra) tapasztalható.



7. ábra A mono- és hibridkompozitok ütőszilárdsága

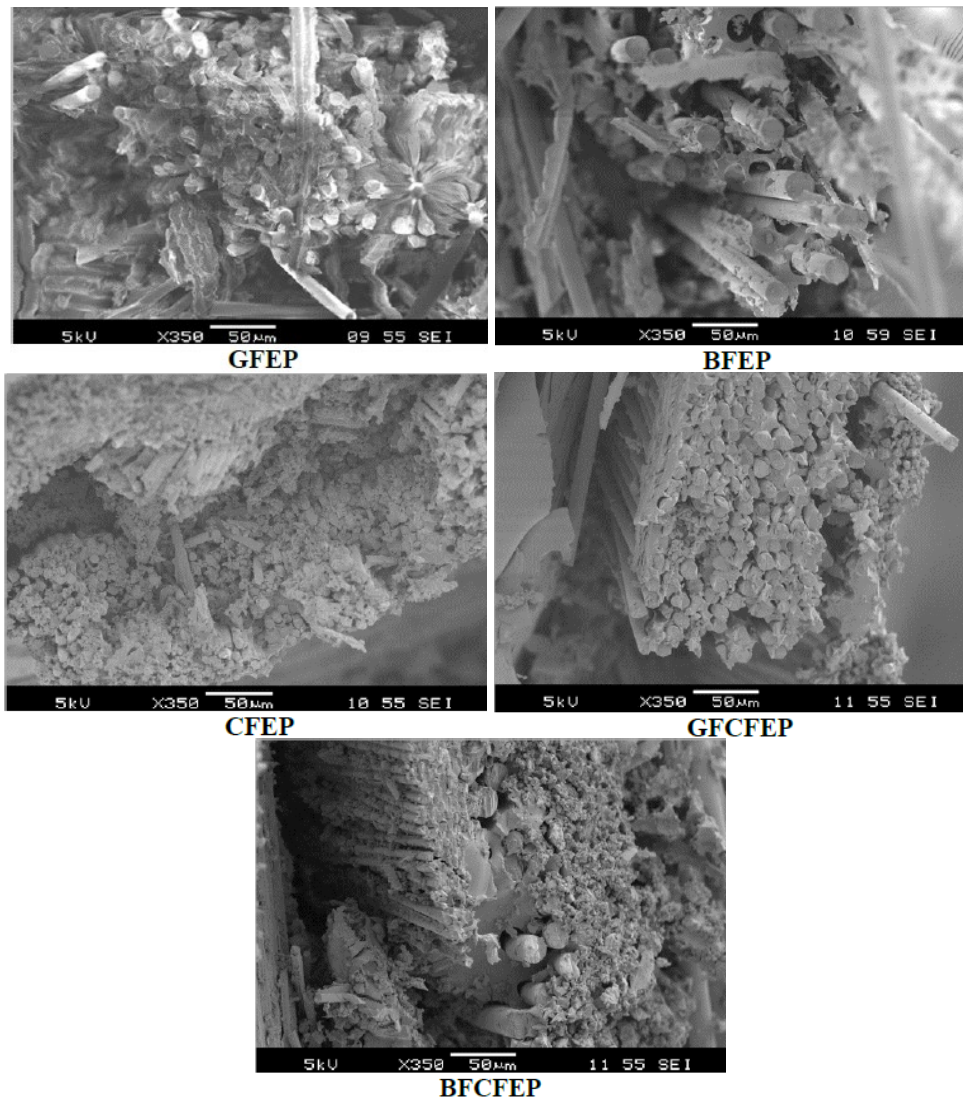
(GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP - szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)



8. ábra A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

A kompozitok töretfelületéről készített pásztázó elektronmikroszkópi felvételeit a 9. ábra foglalja össze. A hibridkompozitokról készült képek a különböző kompozit rétegek határát mutatják. A szálatmérő nagyságából be lehet azonosítani a különböző elemi szálakat, a kisebb átmérőjű szálak a szénszálak, a nagyobb átmérőjűek az üveg-, illetve a bazaltszálak. A felvételek alapján az adhézió minősége tovább javítható, amely célra a szakirodalom szerint [28, 29] eredményesen használhatóak különböző nanorészecskék.

Kijelenthető, hogy a bazaltszál eredményesen alkalmazható az üvegszál helyett, amelynek következtében széleskörű elterjedése várható a szélerőművek anyagaként is, főleg hibrid szálerősítésű kompozitokban.



9. ábra A különböző mono- és hibridkompozitok töretfelületeiről készített SEM felvételek (GFEP - üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP - bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP - szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP - üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP - bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

4. Összefoglalás

A fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenésével egyre inkább előtérbe kerül a megújuló energiaforrások használata és az ezekhez szükséges anyagok fejlesztése is. A szálerősítésű polimer kompozitok kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően mára a műszaki gyakorlatban nélkülözhetetlen anyaggá váltak. A szakirodalom szerint a szálerősített kompozitok felhasználása tekintetében a legfrekvenciáltabb energiacsoport a szélenergia, amelynek kihasználása folyamatosan emelkedő tendenciát mutat. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldről távolabb – egymással összekapcsolva – a tengerben helyezik el úgy, hogy az egyes erőművek a tengerfenékhez vannak horgonyozva (off-shore rendszer). Az off-shore szélenergia jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérséklet-ingadozás, az erős szél, a

villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütésszerű és fárasztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek. 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 szénszálás kompozit ára és javítható az ütésállósága.

Az általunk elkészített kompozit anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározását húzó- és hajlító vizsgálatok alkalmazásával végeztük el. A vizsgálatok kimutatták, hogy a legjobb mechanikai tulajdonságokkal a szénszálás monokompozitok rendelkeznek. A bazalt- és az üvegszál hasonló mértékben javítja a mechanikai jellemzőket mind a mono-, mind a hibridszálás kompozitok esetében. A hibridizáció eredményesen növelte a kompozitok húzó és hajlító rugalmassági modulusát, továbbá az ütőszilárdságát is, amelynek köszönhetően jobban ellenáll az ütésszerű igénybevételeknek. A kapott eredmények alapján a hibridszálás kompozitok széleskörű elterjedése várható, mivel hibridizációval könnyebb a különböző követelményeknek megfelelő anyagot készíteni, mint az alapanyag vagy a monokompozit javításával, fejlesztésével.

5. Köszönetnyilvánítás

A cikkben közölt eredmények megjelenését az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA K105355), valamint a TÉT_12_CN-1-2012-0011 pályázatai támogatták.

Irodalomjegyzék

- [1] British Petrol: BP Statistical Review of World Energy. 2013.
- [2] Half-year Report. World Wind Energy Association Bonn, Germany 2013.
- [3] Tait J.: Offshore wind opportunities for UK composites. Reinforced Plastics, 54, 26-30, (2010)
- [4] Corbet D.C.: Investigation of materials and manufacturing methods for wind turbine blades - Report. Energy Technology Support Unit, Harwell, United Kingdom 1991.
- [5] Ghasemnejad H., Occhineri L., Swift-Hook D. T.: Post-buckling failure in multi-delaminated composite wind turbine blade materials. Materials & Design, 32, 5106-5112, (2011)
- [6] Crawford R.H.: Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2653-2660, (2009)
- [7] Andersons J., Korsgaard J.: Residual strength of GFRP at high-cycle fatigue. Mechanics of Composite Materials, 35, 395-402, (1999)
- [8] Grujicic M., Arakere G., Subramanian E., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M.: Structural-Response Analysis, Fatigue-Life Prediction, and Material Selection for 1 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. Journal of Materials Engineering and Performance, 19, 790-801, (2010)
- [9] Grujicic M., Arakere G., Pandurangan B., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M.: Multidisciplinary Design Optimization for Glass-Fiber Epoxy-Matrix Composite

- 5 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19, 1116-1127, (2010)
- [10] 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)
 - [11] Naik N. K., Veerajulu 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] Peters S.T.: *Handbook of composites*. Chapman&Hall, London, 1998.
 - [14] Miller B.: *Hybrid Process Launches - New Wave in Boat-Building*. *Plastics World*, 40-42, (1989)
 - [15] Greene E.: *Marine Composites*. Eric Greene Associates Incorporation, Annapolis, 1999.
 - [16] Harper C.A.: *Modern Plastics Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1999.
 - [17] 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)
 - [18] Deák T., Czigány T.: Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison. *Textile Research Journal*, 79, 645-651, (2009)
 - [19] 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)
 - [20] 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)
 - [21] 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)
 - [22] Artemenko S., Kadykova Y.A.: Hybrid composite materials. *Fibre Chemistry*, 40, 490-492, (2008)
 - [23] Wei B., Cao H., Song S.: Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*, 31, 4244-4250, (2010)
 - [24] Wei B., Cao H., Song S.: Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering: A*, 527, 4708-4715, (2010)
 - [25] Wei B., Cao H., Song S.: Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science*, 53, 426-431, (2011)
 - [26] Wei B. C. H., Song S.: Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 22-29, (2011)
 - [27] Czigány T.: Hibrid szálerősítésű polimer kompozitok. *Anyagvizsgálók Lapja*, 2, (2004)
 - [28] Inam F., Bhat B. R., Luhyna N., Vo T.: Comparison of structural health assessment capabilities in epoxy – carbon black and epoxy – carbon nanotube nanocomposites. *eXPRESS Polymer Letters*, 8, 55-61, (2014)
 - [29] Molnár K., Kostáková E., Mészáros L.: The effect of needleless electrospun nanofibrous interleaves on mechanical properties of carbon fabrics/epoxy laminates. *eXPRESS Polymer Letters*, 8, 62-72, (2014)