

SÁNTHA PÉTER<sup>1</sup>, TAMÁS-BÉNYEI PÉTER<sup>1,2</sup>

# ÚJRAHASZNOSÍTOTT SZÉNSZÁLAT TARTALMAZÓ NYOMTATÓFILAMENT FEJLESZTÉSE ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁHOZ

ÁRRIPORT

## DEVELOPMENT OF A PRINTING FILAMENT WITH RECYCLED CARBON FIBRES FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Kutatásunk során az újrahasznosított szénuszálak alkalmazhatóságát vizsgáltuk az additív gyártástechnológiában. Új és újrahasznosított szénuszállal erősített ABS mátrixú filamenteket állítottunk elő FDM típusú háromdimenziós nyomtatáshoz. Elemeztük a kompaundálás hatását a szálhosszra, valamint megvizsgáltuk a szálerősítés hatását a mechanikai jellemzőkre.

In our research we investigated the applicability of recycled carbon fibre as reinforcement in additive manufacturing. We produced ABS based printing filaments with virgin and recycled carbon fibres. The influence of compounding on the fibre length was analysed, and we investigated the mechanical properties of carbon fibre reinforced composites on printed samples.

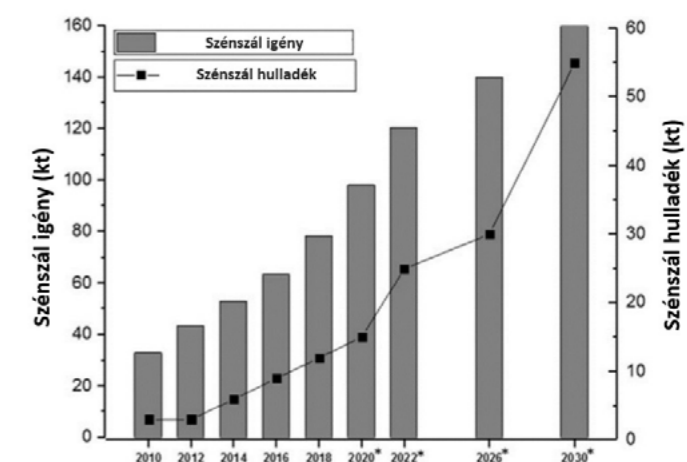
### 1. BEVEZETÉS

A szerkezeti anyagok területén a polimer kompozitok egyre nagyobb teret hódítanak maguknak, köszönhetően annak, hogy nagy fajlagos szilárdsággal rendelkeznek, ami a szálerősítésből adódik. Számos erősítőanyagot alkalmaznak a kompozit iparban, amelyeket rendszerint térhálós mátrixanyaggal társítanak. A leggyakrabban használt erősítőanyagok az üvegszál, a szénuszál és az aramiduszál. Ezek mellett azonban egyre több természetes eredetű (többségében növényi vagy ásványi) szál alkalmazhatóságát vizsgálják a kutatók.

A nagy igénybevételű alkalmazások piacvezető anyagai a szénuszállal erősített polimer kompozitok (CFRP). A világpiaci kereslet a CFRP anyagok iránt stabil növekedést mutat mind a hagyományos, mind pedig új ipari szegmensekben. A kereslet 2010-től 2020-ig közel a háromszorosára nőtt, és az előrejelzések alapján 2050-ig várhatóan meghaladja majd a 190 kt éves mennyiséget (1. ábra) [1–3].

A szénuszálás kompozitok elterjedésével együtt egyre hangsúlyosabb probléma a gyártás és felhasználás során keletkező hulladékok kezelése. Mivel a szénuszálgártás magas energiaigényű folyamat (260 MJ/kg) és az eredeti szénuszálak piaci ára is magas, ezért az újrahasznosított szénuszálak (legyen szó akár a gyártásközi hulladékból, akár az életútja végére ért kompozitból visszanyertről) alternatív nyersanyagforrást biztosíthatnak bizonyos felhasználási területeken. A jelenleg rendelkezésre álló újrahasznosítási technológiák részben már lehetővé teszik a szénuszálás erősítőanyagok korlátozott szintű visszanyerését.

A gyártás és felhasználás során keletkező szálas hulladékot három nagy csoportba sorolhatjuk: impregnátlan (száraz), impregnált (prepeg), illetve impregnált és konszolidált késztermékek [4].



△ 1. ábra: A szénuszál iránti globális kereslet alakulása és a keletkező hulladék mennyisége [9]

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

<sup>2</sup> ELKH-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Ez utóbbi osztályba beletartozik a gyártás során keletkező vágási felesleg, selejtes termékek, tönkrement és életútjuk végére ért (EoL) kompozit termékek.

Jelenleg a kompozit hulladékok újrahasznosítására mechanikus, termikus és kémiai eljárásokat alkalmaznak. A mechanikus úton történő aprítással létrehozott reciklátumok alapvetően töltőanyagként kerülhetnek felhasználásra. Az impregnált szálak esetén az erősítőanyag újbóli felhasználásához mindenképp szükség van a szálak kíméletes visszanyerésére. A termikus technológiák során, mint például a pirolízis és a fluidágyas eljárások, magas hőmérsékleten a mátrixanyag elbomlik, a szénszálak pedig jelentősebb tulajdonságmérési nélkül visszamaradnak [4, 5]. A kémiai eljárásoknál különleges körülmények között oldószerek segítségével választják el a mátrixanyagot a száaktól [6, 7]. A felsorolt technológiákon kívül létezik még néhány kísérleti eljárás, mint például az elektrohidraulikus fragmentáció [2] vagy a nagy nyomású túlhevített gőzt alkalmazó ciklikus tisztítási eljárás, azonban jelenleg egyedül a pirolízis az a technológia, ami ipari léptékben is megvalósításra került, a többi eljárás, kihozataluk miatt, jelenleg nem rentábilis.

A szénszál újrahasznosítás egyik fő kihívása a visszanyert szálak újrafeldolgozása az anyagáram körkörösé tételéhez. Ez egy összetett kérdéskör, ugyanis a kompozit hulladék vegyesen tartalmazhat különböző minőségű (átmérő, modulusz, felületkezelés) szénszálakat, egyéb erősítő anyagokat, maganyagot és inzertereket, amelyek az újrahasznosított anyag állandó minőségben tartása szempontjából problémát okoznak. A reciklált szálak alkalmazhatósága kapcsán a legkritikusabb pont a szálak hosszának változása. Amíg a kompozit szerkezeti anyagokban kvázi végtelen hosszú, folytonos elemi szálak találhatóak, addig a visszanyert szálak többségükben elveszítik folytonosságukat és rövid szálaknak tekinthetők. A rövid szálak hosszeloszlása ráadásul széles tartományban mozog, a pár tíz mikrontól akár a több száz milliméterig is terjedhet. Ezekből a rövid szálakból száraz és nedves szálfektetési technológiákkal kvázi-izotróp szálpaplanok állíthatók elő, amelyek elsősorban préseléses és infúziós technológiákkal dolgozhatók fel. A reciklált rövid szálak termoplasztikus polimerekkel is kiválóan társíthatók, például a

fröccsöntésnél kiválthatják az eredeti rövid szálakat. Mivel az újrahasznosított szálak anyagi tulajdonságai kismértékben eltérnek az eredeti szálakétól (2. ábra), ezért az értéknövelt újrahasznosítás érdekében szükség van a rövidszál erősítőanyagok orientálására.

A rövid szálak orientálására több lehetőség is kínálkozik: az egyik a rövid szálaból fonál készítése, a másik pedig a szálak fektetéssel történő orientálása (például nedves technológiával).

Abdkader és társai [3] újrahasznosított szénszálból és termoplasztikus poliamid (PA) szálaból készítettek sodort hibrid fonalakat, amelyekből textiltechnológiai eljárásokkal gyártottak hőpréseléssel feldolgozható szöveteket. A hibrid fonalakban a rövid szálak orientációja megközelítőleg azonos, a fonál feldolgozása pedig textiltechnológiai eljárásokkal könnyen megvalósítható. A fonalak feldolgozása során a termoplasztikus szálak a magas hőmérséklet hatására megolvadnak, a nagy nyomás következtében pedig impregnálják az erősítőszálakat a zárt szerszámban.

Van de Werken és társai [11] egy olyan rendszert fejlesztettek ki, amelyenél a reciklált szénszálak vizes keverékét egy forgó dob belső felületére vitték fel fúvókákkal. A fúvókával orientált elemi szálak a centrifugális erő hatására a henger belső felületére tapadtak.

A fektetési eljárások közül az egyik legígéretesebb technológia a Bristol Egyetem kutatói által fejlesztett és szabadalmaztatott HiPerDiF [12]. Ennek a technológiának a lényege, hogy a vizes szálak keverékét fúvókákon keresztül terelőlemezeknek ütköztetik. A vízszögben található szálak a lendületvesztésük miatt beállnak a lemezekkel párhuzamosan. Ezt követően a szálak egy perforált futószalagra kerülnek, ahol a szalagon keresztül egy vákuumszivattyú elszívja a vizet. Az így előállított szalagokban a szálak orientációja  $\pm 5^\circ$ , a gyantafilmmel impregnált kompozitok szakítószilárdsága pedig eléri a 1200 MPa-t.

A szálak orientálása termoplasztikus mátrixanyaggal együtt is megvalósítható például extrúzióval vagy egy ahhoz nagyon hasonló eljárással, mint például az FDM típusú additív gyártástechnológia. Az elmúlt években egyre több kutatás és ipari fejlesztés tárgyává váltak a 3D nyomtatott szálerősített kompozitok. Ezzel egyidejűleg piacra kerültek a különféle szálerősítést tartalmazó filamentek és eltérő eljárásokon alapuló gyártóberendezések is.

A filamentek erősítésére folytonos és rövid szénszálat használhatnak. Mivel a nyomtatott szénszálak kompozitokat elsősorban funkcionális prototípusoknál, illetve nagyteljesítményű alkatrészeknél használják, ezért ezeket jellemzően olyan nagyteljesítményű termoplasztikus mátrixanyagokkal társítják, mint az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), a poli(éter-éter-keton) (PEEK) vagy a poliamid [13]. Természetesen ezen kívül elérhető a hobbi nyomtatásban elterjedt olcsóbb filamentek anyagok is, mint a politejsav (PLA) vagy a poli(etilén-tereftalát) (PETG). A szálerősített additív technológiákkal használható ki jobban a kompozitokra jellemző anizotrópia, ugyanis a nyomtatófejekkel nagyobb tervezési szabadsággal fektethetjük az erősítést a termék geometriája mentén. A többfejes nyomtatók lehetővé teszik, hogy a szálerősítést meghatározott helyeken lokálisan alkalmazzuk. Ezeket a lehetőségeket kihasználhatjuk a topológiai optimalizálás területén is, ezzel a terméktervezés és gyártás még hatékonyabbá tehető.

Van de Werken és társai [13] széleskörű összefoglalót készítettek a szálerősített additív gyártástechnológia jelenlegi állásáról. Publikációjukban összefoglalták az alapvető szálerősített nyomtatási eljárásokat. Ezen technológiák közé tartozik az extrúzió alapú fused filament fabrication (FFF), ahol jellemzően az előre impregnált szálak a nyomtató filamentben találhatóak. Liu és társai [14] kémiai újrahasznosítással visszanyert szénszállal erősített PEEK kompozitokat állítottak elő FDM technológiával. A kompozit hulladékból szuperkritikus n-butanol oldószerezrel nyerték vissza a szénszálakat, amelyeket mechanikus őrlés után ikercsigás extruderrel kompaundálták a PEEK mátrixszal. A 10 m/m% szálerősítésnek köszönhetően a nyomtatott próbatetek szakítószilárdsága 17,23%-kal (91,89 MPa), a hajlítószilárdsága pedig 10,18%-kal (118,41 MPa) növekedett a referencia töltetlen PEEK-hez képest. A mechanikai tulajdonságok mellett jelentősen nőtt az anyagok kopásállósága (74,68%), elektromos- (96,69%) és hővezetőképessége (21,65%). Su és társai [15] széleskörűen vizsgálták az általuk előállított, reciklált szénszállal erősített PA nyomtatófilamentek és az ebből FDM technológiával nyomtatott próbatetek tulajdonságait. A mechanikai tulajdonságok szálartalom függése mellett termogravimetriával (TGA) és differenciál pászttázó kalorimetriával (DSC) vizsgálták az anyagok termikus tulajdonságait, az elemi szálak orientációját és a gyártás során keletkező légzárványokat is. Mantelli és társai [16] termikus módszerrel újrahasznosított szénszálak alkalmazását vizsgálták fotopolimer kompozitok additív gyártásához. A pirolízissel visszanyert szálakat felületkezelés és mechanikai őrlés után akrilát alapú fotopolimer gyantába keverték, majd a keveréket UV fényvel segített fotopolimer nyomtatással (UV-DIW) dolgozták fel.

A kompaundált, szénszálerősített granulátumok feldolgozhatók ipari méretű, nagy munkaterű nyomtatási technológiákkal (BAAM) [14, 15]. Itt lényegében a granulátumot egy függőleges extruder csiga dolgozza fel, amely három tengely mentén mozgatható egy nagy méretű, akár több méter oldalhosszúságú munkatérben. Ezzel az eljárással nagy méretű termékek gyártathatók, illetve a termelékenység fokozható a nagy kihozatalnak (25-50 kg/h) köszönhetően. A technológia további előnye, hogy nincs szükség a köztes gyártmány, a filament előállítására. Emellett léteznek olyan BAAM technológiák, ahol reaktív extrúzióval gyártanak szálerősített termékeket [19].

A szálerősített termoplasztikus kompozitok additív gyártástechnológiáinak fejlesztése egy viszonylag új, dinamikusan fejlődő terület, amellyel egyre több kutatás és startup cég

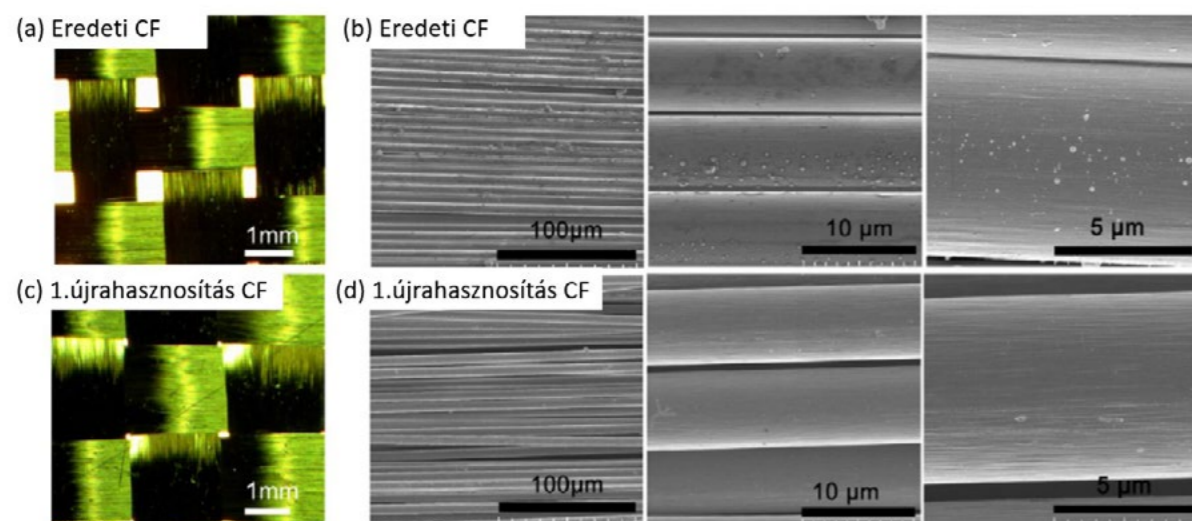
foglalkozik. A technológiák még nem kiforrottak, számos lehetőség van a folyamatok és az alapanyagok optimalizálására a legjobb minőség eléréséhez. Az viszont bizonyos, hogy az újrahasznosított szénszálak eredményesen felhasználhatók additív gyártástechnológiákban. A folytonosságuk elvesztése nem okoz problémát, ugyanis a szálak és a termoplasztikus mátrixanyag kompaundálásakor fellépő nyíróerők hatására jelentős a száltörledélődés, ami még új szálaknál is az átlagos szálhossz csökkentését eredményezi. A nyomtatási technológiákkal elérhető, hogy a rétegekben a rövid szálak adott orientációt felvéve javítsák a mechanikai tulajdonságokat. Reciklált szálak alkalmazásával jellemzően növelhetők a szilárdsági jellemzők, viszont a szénszál nagy merevsége miatt rideggé is válhatnak. Az elemi szálak különleges fizikai tulajdonságainak köszönhetően akár multifunkcionális kompozitok is gyárthatók additív technológiákkal..

## 2. ANYAGOK, MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben bemutatjuk a felhasznált anyagokat és mérési módszereket.

### 2.1. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK

Kísérleteink során új vágott szénszálat (PX35 Chopped pellet – type 45, Zoltek Zrt., Magyarország), újrahasznosított őrlött (Caribso CT+ SM45D-06-50, ELG Carbon Fibre, Egyesült Királyság; Recycled Milled Carbon Fibre, Zoltek Zrt., Magyarország), illetve újrahasznosított vágott szénszálat (Recycled Chopped Carbon Fibre – type 45, Zoltek Zrt. Magyarország) kevertünk a mátrixanyagba. A feldolgozás előtt a reciklált szálakat külön nem felületkezeltük. Mátrixanyagként ABS-t használtunk, amely az FDM technológiáknál előszeretettel alkalmazott műszaki célú polimer. Az ABS a Terluran GP-35 (INEOS Styrolution Group GmbH, Németország) nagy folyóképességű, általános célú fröccsöntő anyag volt. Feldolgozás előtt a granulátumot 80 °C-on három órán keresztül szárítottuk KDCL típusú szárítószekrényben. A keverékkészítés során először a vágott szénszálat és a szárított ABS granulátumot az irodalomkutatás alapján meghatározott tömegarányban, 10 m/m%-ban szárazon elkevertük. A keverékek kompaundálását egy Labtech LTE 26-44 ikercsigás extruderrel (Labtech Engineering Co., Ltd., Thaiföld) végeztük kétfuratos szerszámmal. A feldolgozás során típusonként 1 kg kompaundot készítettünk. A kompaundálás során a csiga fordulatszáma 60 fordulat/perc, az extruder zónák hőmérsékletei pedig a garattól haladva rendre 200; 210; 220; 220 °C voltak. A keverékekből 3,5 mm hosszúságú granulátumot készítettünk egy Labtech LZ-120/VS (Labtech Engineering Co., Ltd., Thaiföld) granuláló berendezéssel. A filament gyártáshoz a granulált keverékeket újraextrudáltuk egy 1,75 mm átmérőjű szerszámon az ikercsigás extruderrel. Az extrudátumot gépi elhűtés mellett levegőn hűtöttük le. A gyártás közben folyamatosan ellenőriztük a filament átmérőjét, amely 1,55 és 1,85 mm között ingadozott. Mivel a szálerősített filamentek ridegek voltak és könnyen törtek, ezért a hagyományosnál nagyobb átmérőjű orsót használtunk a kész filamentek feltekercselésére. A kész filamentekből egy CraftBot Plus (CraftUnique Kft., Magyarország) FDM nyomtatóval



△ 2. ábra: Az eredeti felületkezelt szénszálak (a, b) és az újrahasznosított szénszálak (c, d) felületének összehasonlítása optikai (a, c) és pásztázó elektron mikroszkópi (SEM) felvételeken (b, d) [10]

gyártottunk próbatesteket. A nyomtatások során 0,8 mm átmérőjű, 250 °C hőmérsékletű rézfűvókát használtunk, a tárgyasztal hőmérséklete pedig 80 °C volt. A nyomtatásnál 100%-os kitöltést és 200 µm rétegvastagságot alkalmaztunk..

## 2.2. MÉRÉSI MÓDSZEREK

A kész próbatesteből a valós száltartalom meghatározáshoz mintát vettünk. A méréshez a mintákról leégettük a mátrixanyagot egy Denkal 6B izzítókemencében 500 °C-on 3 órán keresztül. A kiégetés során visszamaradt szálak hosszát Olympus BX51M optikai mikroszkóppal (Olympus, Németország) határoztuk meg. A vizsgált minták elemszáma mindegyik esetben 300-300 darab volt. A minták sűrűségét egy Sartorius Quintix 125d-1s típusú félmikro mérleggel mértük meg sűrűségmérő feltét alkalmazásával. A mechanikai jellemzőket Zwick 2005 típusú univerzális szakítógéppel (Zwick Roell Testing Systems GmbH., Németország) végzett kvázistatikus szakító és hajlító vizsgálatokkal határoztuk meg, a próbatestek húzó és hajlító rugalmassági modulusát, valamint szakító- és hajlítószilárdságát, továbbá az ezekhez tartozó nyúlás és lehajlás értékeit mértük. Az MSZ EN ISO 527-2:2012 szabvány szerint végrehajtott szakítóvizsgálat során a próbatesteket 10 kN teherbírási ékpályás befogókkal rögzítettük. Az alkalmazott befogási hossz 30 mm, az előterhelés 0,1 MPa, a vizsgálati sebesség pedig 5 mm/perc volt. A hárompontos hajlítóvizsgálatokat az MSZ EN ISO 178:2011 szabvány szerint 5 mm/perc vizsgálati sebességgel végeztük. Az alkalmazott támaszköz 64 mm, az előterhelés 0,1 MPa, a határlehajlás pedig 6,4 mm volt. A minták fajlagos ütmunka értékeinek meghatározásához műszerezett Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot használtunk MSZ EN ISO 179:2010 szabvány szerint, 2 J energiájú kalapáccsal, bemetszett próbatesteken, 62 mm támaszköz mellett, élrányú ütessel.

## 3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetjük az elvégzett mérések eredményeit és az értékelésüket.

### 3.1. SZÁLHOSSZ-ELOSZLÁS MÉRÉSEK

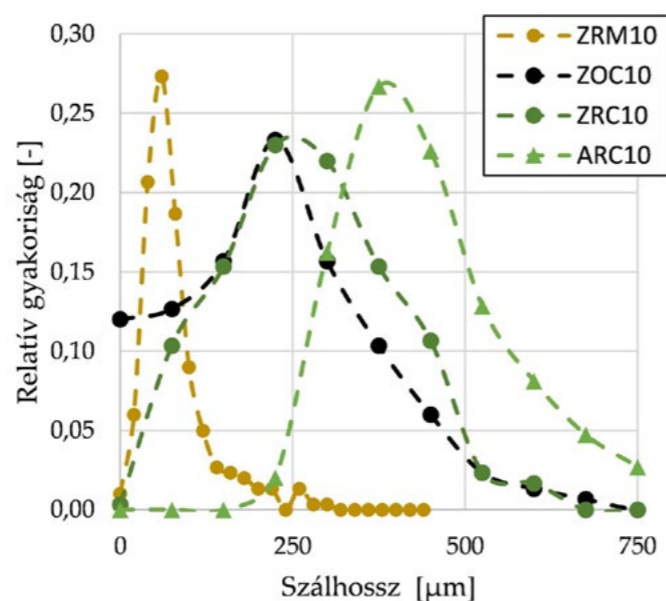
A nyomtatott próbatesteből származó minták száltartalmát, valamint a mért átlagos szálhossz értékeit az 1. táblázat foglalja össze, a szálhosszak eloszlását pedig a 3. ábra szemlélteti.

1. táblázat: A nyomtatott minták száltartalma, maradó szálhosszai és sűrűségük

Mennyiségek	Keverékek				Referencia
	ZRM10	ZOC10	ZRC10	ARC10	ABS
Szál típus	őrölt, újrah.	vágott, ered.	vágott, újrah.	vágott, újrah.	-
Száltartalom [m/m%]	9,07	8,92	9,7	9,71	-
Szálhossz [µm]	81±35	262±144	310±120	500±161	-
Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	993±14	962±53	1031±5	958±6	1012±1

Az elméleti száltartalomhoz (10 m/m%) képest alacsonyabb értékeket kaptunk. A legnagyobb eltérést a ZOC10 rövidszálas keverékek esetén tapasztaltuk (10,8%). Az eredmények azt mutatják, hogy a feldolgozásból adódó száltörédelődés jelentős, mivel a vágott szálak kezdeti szálhossza 6 mm körüli. A legkisebb átlagos szálhossz a ZOC10 minták esetén volt, ez körülbelül 95%-os szálhossz csökkentést jelent. A 3. ábrán látható eloszlás diagramokon elkülönülnek egymástól az őrölt, illetve vágott szénszálak.

Az őrölt szálakra (ZRM10) az 50-150 µm szálhossz tartomány a jellemző. Ez lefedi a gyártói adatlapon feltüntetett szálhossz tartományt, tehát az őrölt szálaknál nem történt számottevő rövidülés. A ZOC10 és ZRC10 mintákhoz tartozó szálhossz eloszlások kis mértékben térnek el egymástól, a maradó szálhosszak nagyrészt a 200-300 µm tartományba esnek. A különböző forrásból származó ARC10 reciklált szálak többsége a 300-500 µm tartományba esik, és jóval több szál található az 500 µm fölötti tartományban, mint a többi vágott szálas minta esetén. Az eredményeket szakirodalmi adatokkal összehasonlítva megállapítható, hogy az általunk készített kompozitok maradó szálhossza megegyezik vagy nagyobb a vizsgált kutatásokban közölt szálhossz eredményeknél [14, 15].



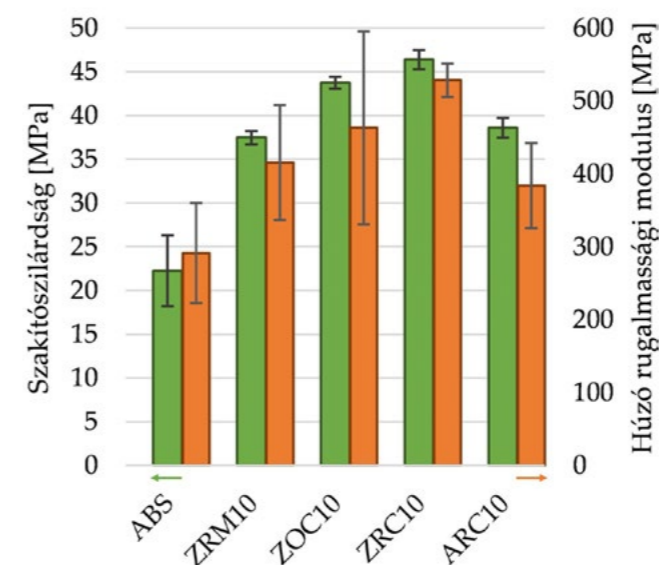
3. ábra: Szálhossz eloszlás feldolgozott anyagmintákból

Mivel a feldolgozás során jelentős volt a szálhossz csökkenése, ezért szakirodalmi adatokra támaszkodva meghatároztuk az ABS mátrixanyagra vonatkoztatott kritikus szálhosszt, amely szénszál esetében ~640 µm. Látható, hogy a mért maradó szálhossz átlagértéke egyik alapanyagban sem éri el ezt az elméleti értéket, viszont az ARC10 minta esetén már vannak olyan szálak, amelyek meghaladják a kritikus szálhosszt. A maradó szálhossz a kíméletesebb feldolgozással növelhető, a kritikus szálhossz pedig csökkenthető a szálak megfelelő felületkezelésével.

### 3.2. MECHANIKAI TULAJDONSÁGOK

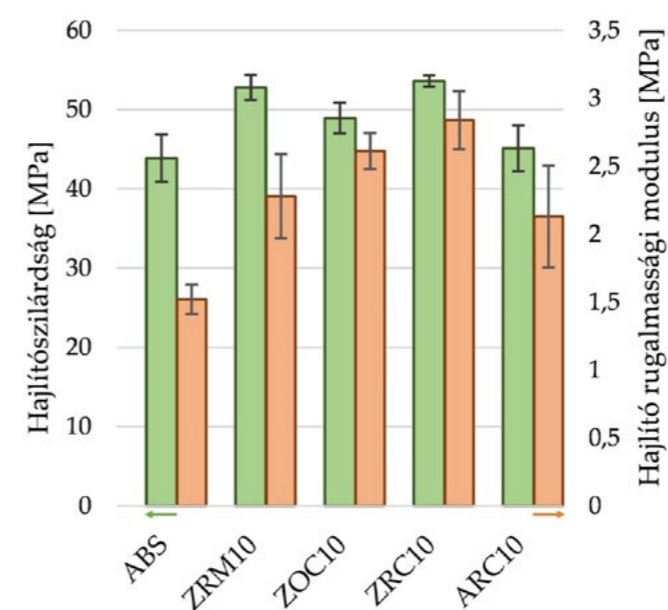
A kvázistatikus szakítóvizsgálatok eredményei a 4. ábrán láthatók. A referencia ABS mátrixanyaghoz képest a szálerősítés minden keverék esetében növelte a szakítószilárdságot és a húzó

rugalmassági moduluszt. Annak ellenére, hogy az anyagokban található szálak nagyrésze az elméleti kritikus szálhossznál rövidebb, mégis jelentősen növelték a szilárdsági értékeket. A szakítási jellemzők tekintetében a ZRC10 anyag érte el a legmagasabb értékeket, a szakítószilárdsága 108%-kal, húzó rugalmassági modulusza pedig 81%-kal magasabb, mint a referencia ABS anyagé. Az őrölt szálat tartalmazó ZRM10 anyag szilárdsága – az alacsonyabb szálhossz értékek miatt – alulmaradt a vágott szálas mintákhoz képest.



4. ábra: A szakítószilárdság és a húzó rugalmassági modulusz értékek

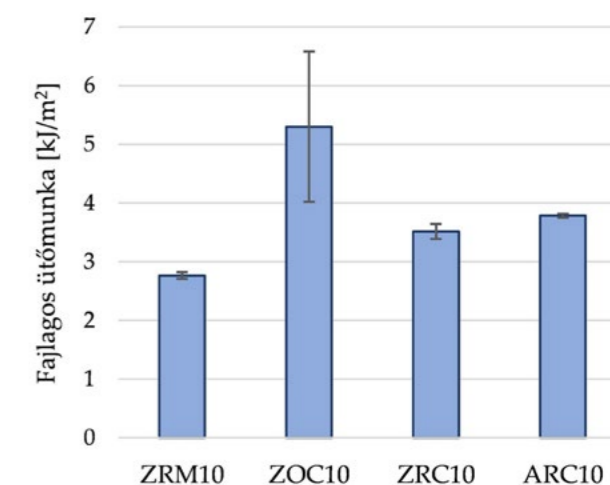
A kvázistatikus hajlítóvizsgálatok eredményeit az 5. ábra mutatja. A kompozitok szilárdsági értékei ennél a vizsgálatnál is meghaladták a referencia anyag értékeit. A hajlító rugalmassági modulusz tekintetében a legnagyobb eltérést szintén a ZRC10 (reciklált szénszál) minta érte el, amely 86% növekedést jelentett. A szálerősítés a hajlítószilárdságot csak kis mértékben



5. ábra: Hajlítószilárdság és hajlító rugalmassági modulusz értékek

javította, a legnagyobb javulást a ZRC10 anyag mutatta (22%). A hajlítószilárdság szempontjából az őrölt és vágott szálas minták nem különültek el szignifikánsan.

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok eredményei a 6. ábrán láthatók. A kompozit minták jellemzően ridegen viselkedtek az anyagokban levő rövid szénszálak és a feldolgozás során kialakult üregek miatt. A legnagyobb törési szilárdságot az új szálat tartalmazó ZOC10 keverék érte el, igaz ebben az esetben volt a legnagyobb a szórás is. Az újrashasznosított szálakat tartalmazó minták esetén elért alacsonyabb törési szilárdság pontos okának meghatározásához további vizsgálatok szükségesek. Feltételezhető azonban, hogy a szálakról eltávolított felületkezelés miatt maradtak alul a ZOC10 mintához képest. A rövidebb szálakat tartalmazó ZRM10 minta esetén tapasztaltuk a legacsonyabb törési szilárdságot, ugyanis terhelésnél a rövidebb szálak könnyebben kihúzódhatnak a mátrixból.



6. ábra: Fajlagos ütmunka értékek

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során megvizsgáltuk az újrashasznosított szénszálak alkalmazhatóságát FDM típusú additív gyártástechnológiában. Különböző típusú rövid szénszálak és ABS termoplasztikus mátrixanyag társításával 10 m/m% száltartalmú nyomtató filamenteket állítottunk elő. Elemeztük a kompaundálás hatását száltörédelődésre és kiszámítottuk a szálhossz-eloszlásokat. A mechanikai tulajdonságokat kvázistatikus szakító és hajlító vizsgálatokkal, valamint Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatokkal határoztuk meg.

A szálerősítés alkalmazása jelentős növelte a húzó- és hajlítószilárdságot is, azonban csökkentette a kompozitok törési szilárdságát. Eredményeinek szerint kijelenthető, hogy az újrashasznosított szénszálak alkalmazhatók erősítőanyagként FDM típusú additív gyártástechnológiákban, ezzel a kompozit hulladékból származó szálakat újra felhasználhatjuk kompozit termékek előállításánál.

Kutatásunk folytatásaként elemezni fogjuk a magasabb száltartalom, valamint a felületkezelés hatását, továbbá optimalizálni fogjuk a gyártástechnológiát a száltörédelődés csökkentése érdekében.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00658/21/6), valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-5-BME-309 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [ 1 ] Ronkay, F.; Dobrovsky, K.; Toldy, A.: Műanyagok újrahasznosítása, BME GPK PT., Budapest, Printer (2014).
- [ 2 ] Zhang, J.; Chevali, V. S.; Wang, H.; Wang, C.-H.: Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling, Composites Part B: Engineering, vol. 193, p. 108053 (2020).
- [ 3 ] Markets and Markets. Carbon fiber market by raw material (PAN, Pitch, Rayon), fibre type (virgin, recycled), product type, modulus, application (composite, noncomposite), end-use industry (A & D, automotive, wind energy), and region – global forecast to 2029, Research and Markets (2019), <https://www.marketresearch.com/MarketsandMarkets-v3719/Carbon-Fiber-Raw-Material-PAN-12674277/>
- [ 4 ] Abdkader, A.; Hengstermann, M.; Cherif, C.: Innovative high-performance hybrid yarns made from recycled carbon fibers for light-weight structures, Chemical Fibers International, vol. 67, pp. 153–155 (2017).
- [ 5 ] Naqvi, S. R.; Prabhakara, H. M.; Bramer, E. A.; Dierkes, W.; Akkerman, R.; Brem, G.: A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy, Resources, Conservation and Recycling, vol. 136, pp. 118–129 (2018).
- [ 6 ] Onwudili, J. A.; Miskolczi, N.; Nagy, T.; Lipóczy, G.: Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix, Composites Part B: Engineering, vol. 91, pp. 154–161 (2016).
- [ 7 ] Morin, C.; Loppinet-Serani, A.; Cansell, F.; Aymonier, C.: Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art, The Journal of Supercritical Fluids, vol. 66, pp. 232–240 (2012).
- [ 8 ] Piñero-Hernanz, R. et al.: Chemical recycling of carbon fibre reinforced composites in nearcritical and supercritical water, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 39, no. 3, pp. 454–461 (2008).
- [ 9 ] Khurshid, M. F.; Hengstermann, M.; Mohammad Badrul Hasan, M.; Abdkader, A.; Cherif, C.: Recent developments in the processing of waste carbon fibre for thermoplastic composites – A review, Journal of Composite Materials.
- [ 10 ] Kuang, X.; Zhou, Y.; Shi, Q.; Wang, T.; Qi, H. J.: Recycling of Epoxy Thermoset and Composites via Good Solvent Assisted and Small Molecules Participated Exchange Reactions, ACS Sustainable Chem. Eng., vol. 6, no. 7, pp. 9189–9197 (2018).
- [ 11 ] van de Werken, N.; Reese, M. S.; Taha, M. R.; Tehrani, M.: Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 119, pp. 38–47 (2019).
- [ 12 ] Longana, M. L.; Yu, H.; Hamerton, I.; Potter, K. D.: Development and application of a quality control and property assurance methodology for reclaimed carbon fibers based on the HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) method and interlaminated hybrid specimens, Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, vol. 4, no. 2, pp. 48–55 (2018).
- [ 13 ] van de Werken, N.; Tekinalp, H.; Khanbolouki, P.; Ozcan, S.; Williams, A.; Tehrani, M.: Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective, Additive Manufacturing, vol. 31, p. 100962 (2020).
- [ 14 ] Liu, W.; Huang, H.; Zhu, L.; Liu, Z.: Integrating carbon fiber reclamation and additive manufacturing for recycling CFRP waste, Composites Part B: Engineering, vol. 215, p. 108808 (2021).
- [ 15 ] Su, N.; Pierce, R. S.; Rudd, C.; Liu, X.: Comprehensive investigation of reclaimed carbon fibre reinforced polyamide (rCF/PA) filaments and FDM printed composites, Composites Part B: Engineering, vol. 233, p. 109646 (2022).
- [ 16 ] Mantelli, A. et al.: UV-Assisted 3D Printing of Polymer Composites from Thermally and Mechanically Recycled Carbon Fibers, Polymers, vol. 13, no. 5, Art. no. 5 (2021).
- [ 17 ] Compton, B. G.; Post, B. K.; Duty, C. E.; Love, L.; Kunc, V.: Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites, Additive Manufacturing, vol. 17, pp. 77–86 (2017).
- [ 18 ] Kunc, V.; Kishore, V.; Chen, X.; Ajinjeru, C.; Duty, C.; Hassen, A. A.: High performance poly(etherketoneketone) (PEKK) composite parts fabricated using Big Area Additive Manufacturing (BAAM) processes, Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Manufacturing Demonstration Facility (MDF), ORNL/TM-2016/728 (2016).
- [ 19 ] Rios, O. et al.: 3D printing via ambient reactive extrusion, Materials Today Communications, vol. 15, pp. 333–336 (2018).

# Tekints a jövőbe!



## HUNGEXPO



**2023. május 16–19.**



## IPAR NAPJAI Nemzetközi ipari szakkiallítás

**Társrendezvény:**  
AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiallítás

**Magyarország legjelentősebb üzleti eseménye és találkozója az iparban**

**Helyszín:**  
HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

**Kedvezményes jelentkezési határidő a kiállítók részére: 2023. február 28.**

Bővebb információ: [www.iparnapjai.hu](http://www.iparnapjai.hu)