

# VISSZANYERT SZÉNSZÁLAK

**A műanyagok mindennapi életünk szerves részét képezik. Felhasználási területük a hétköznapi csomagolástechnikai alkalmazásoktól kezdve az orvostechnikán keresztül egészen az űrtechnikáig terjed. A tavalyi évben globálisan mintegy 510 millió tonna műanyagot használt fel az emberiség. Az újrahasznosítás nagy lépés lenne ekkora mennyiségű anyag kezelésében – de vajon minden típusú műanyag esetében alkalmazható?**

A cikk a BME, a Pro Progressio Alapítvány és az Élet és Tudomány közös cikkpályázatára érkezett.

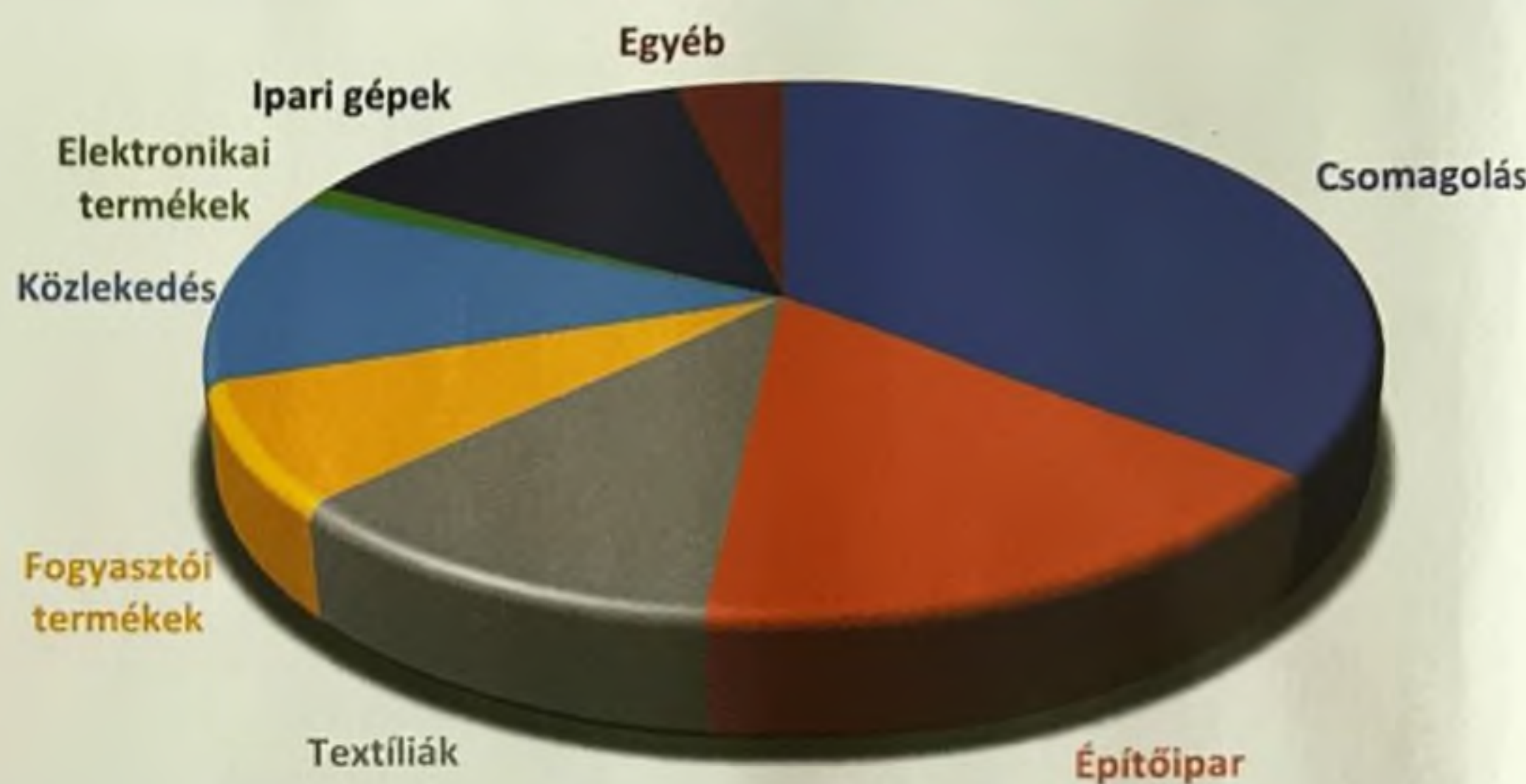


**A** műanyagok felhasználási területei közül a három legdominánsabb a csomagolástechnika, az építőipar és az ipari gépek, amely a teljes műanyagtermégyártás több mint 65%-át lefedi.

Ebből a mennyiségből a rövid életciklusú, hőre lágyuló műanyag termékek kezelésére, újrahasznosítására már több megoldás is rendelkezésre áll, azonban a hosszú (több év) élettartamú vagy erősítőanyagot tartalmazó kompozitok már több nehézséget jelentenek. Különösen nagy kihívásokat okoz, hogy egyes, életútjuk végére érő polimer kompozit termékek igen nagy méretűek lehetnek – gondoljunk csak a szélerőművek lapátjaira – ami még inkább megnehezíti és költségessé teszi az újrahasznosításukat.

## Társított anyagok

A szerkezeti anyagokat három nagy csoportra lehet bontani, amelyek közül az egyik a polimereket foglalja magába. A szerkezeti anyagok alapegységeinek (fémek, polimerek, kerámiák) egymással vagy önmagukkal társított rendszereit kompozitoknak nevezzük. A kompozitok egyik fő ismérve, hogy az őket felépítő részegységek (mátrix és erősítőanyag) között kiváló kapcsolat áll fenn, amely lehetőséget ad az egyes komponensek előnyös tulajdonságainak kombinálására. A térhálós szerkezetű polimerek újrahasznosítása azért jelent nehézséget, mivel a termégyártás során egy irreverzibilis kémiai folyamat (térhálósodás) során kerül kialakításra a termék.



A műanyagok alkalmazási terület szerinti mennyiségi eloszlása

A kompozitok egyre szélesebb körű alkalmazásával párhuzamosan folyamatosan nőtt a szálerősített hulladékok mennyisége is, amelyet 2020 végére 62 000 tonnára becsültek. Ez a helyzet komoly kihívásokat vet fel, különösen azért, mert az iparágak hosszú ideig nem fordítottak kellő figyelmet ezeknek az anyagoknak az életútjuk után (End of Life, EoL) történő megfelelő kezelésére. Évtizedeken keresztül a hulladéklerakás és az égetés volt a leggyakoribb kezelési módszer a kompozit iparban, amelyek környezetvédelmi szempontból ma már nem elfogadhatók. A hulladékkezelésre további politikai intézkedések is érvényesek, például az Európai Unió rendelete, amely az autóiparban az EoL-anyagok 85%-os újrahasznosítását írja elő. Ez arra ösztönzi az iparágakat, hogy fenntartható

és környezetbarát megoldásokat fejlesszenek ki a kompozit hulladékok kezelésére. Különösen indokolt ez a körkörös gazdasági szemlélet miatt, például a visszanyert erősítőanyag újbóli felhasználása, amikor nem áll rendelkezésre elegendő új szénszál vagy az adott alkalmazási terület miatt nem engedhető meg annak magas ára. Mindezek mellett az első generációs szélerőművek az elkövetkező néhány éven belül érnek életciklusuk végére és jelennek meg nagyobb mennyiségben a kompozit hulladékok között.

## Kezelési módszerek

A hulladékok kezelésének több szintje van, amelyek hierarchikusan rendre a megelőzés, a minimalizálás, az újrahasználat, az újrahasznosítás, a visszanyerés és a lerakás.

A térhálós mátrixú kompozitok esetében a szerkezet miatt nem mindegyik eljárás alkalmazható gazdaságosan, azonban a környezetvédelmi megfontolások árnyalják a döntéseket. A térhálós kompozitok esetében az első potenciális lépés a hulladék mennyiségének csökkentésében a gyártási folyamat során keletkező hulladék mennyiségének minimalizálása lehet. Ezt jellemzően technológiai fejlesztések révén érhetjük el, aminek köszönhetően az utóbbi időben népszerűvé vált a kompozitok újrahasznosításának kutatása.

Ahhoz, hogy a térhálós mátrixú kompozitokat hatékonyan lehessen újrahasznosítani, szükség szerű a hulladék megfelelő szintű osztályozása. A szénszál kompozit (CFRP) hulladékokat alapvetően három nagy csoportra lehet bontani. Az első csoportot a feldolgozási folyamat során keletkező vágási hulladékok és az impregnálatlan szövetek, illetve rovingok alkotják. A második csoport a prepregeket foglalja magában, ahol a gyanta mint mátrixanyag már jelen van a rendszerben. Ebben a szakaszban már megindul a térhálósodási folyamat, bár a gyanta még nem teljesen térhálósodott ki, ezért viszonylag könnyen feldolgozhatók. E csoport hulladékai általában a feldolgozás során felhalmozódó feleslegek, mert a prepregek általában viszonylag rövid ideig (0,5-1 évig) használhatóak fel, a szavatossági idő lejártával ezek az előgyártmányok már nem kerülnek felhasználásra. A harmadik kategória azokat a kompozitokat tartalmazza, amelyek élettartamuk végére érkeztek, vagy még azelőtt sérültek meg. Ezenkívül ebbe a csoportba tartoznak azok a már impregnált és konzolidált kompozitok is, amelyek egyes termékek gyártása során keletkeznek.



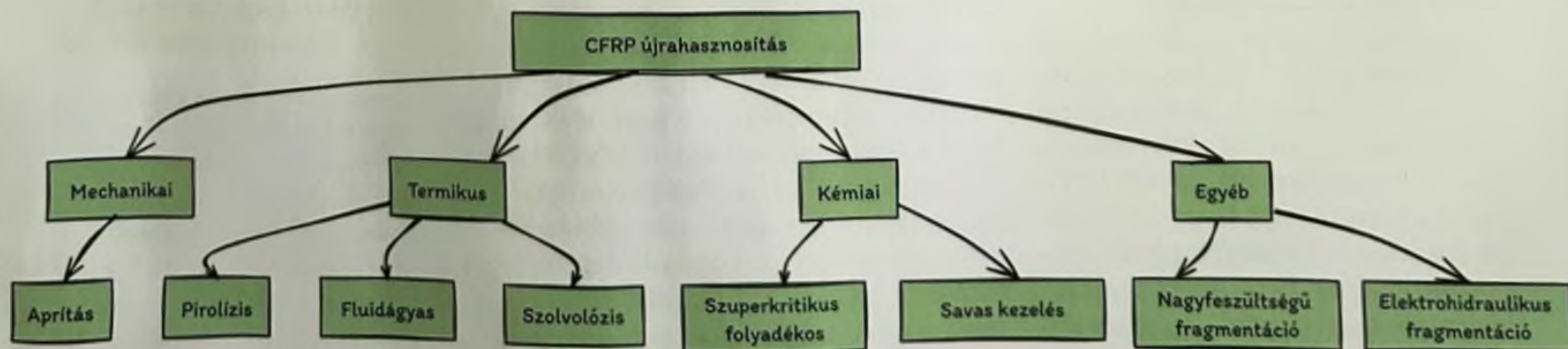
A térhálós polimer kompozitok újrahasznosítási módszerei három csoportba oszthatók: mechanikai, termikus és kémiai.

A mechanikai újrahasznosítás folyamatának első lépésében a hulladékot 50-100 milliméter nagyságú darabokra őrlik, majd eltávolítják belőle a fémekeket, aztán a darálékot tovább aprítják, amíg a kívánt hosszmeretet el nem érik. Mivel a reciklátumok általában kisebbek a kritikus szálhossznál, ezért ezeket többnyire töltőanyagként használják fel.

A hagyományos termikus újrahasznosítás során a kompozit hulladékot magas hőmérsékleten (400-700 °C) kezelik, ahol a mátrixanyag szinte teljesen degradálódik (energiatartalma részben visszanyerésre kerül), és csak az értékes szénszálak maradnak meg. Kutatások igazolták, hogy a szénszálerősítésű kompozitok termikus újrahasznosítása körülbelül 30 MJ/kg energiát szabadít fel. A hőmérséklet megfelelő beállítása kritikus, mivel amennyiben a hőmérséklet túl alacsony, akkor a mátrixanyag nem bomlik le megfelelően,

míg túl magas hőmérséklet esetén az elemi szálak károsodhatnak. Mindezek mellett a termikus újrahasznosítás során keletkező melléktermékek kezelése is problémát jelenthet. A termikus technológiák között a pirolízist és a fluidágyas eljárásokat különböztethetjük meg, amelyek közül a pirolízis a legelterjedtebb, mivel ez alkalmazható rentábilisan mind üveg-, mind szénszál kompozitok esetében. A módszer jelentősége abban rejlik, hogy a fenntartásához szükséges energia csupán 5-10%-a az eredeti szénszál előállításának. Az eljárás oxigénmentes, vákuumban vagy nitrogéndús közegben, nagy hőmérsékleten történik, amely során olajok, szerves gázok és szilárd végtermékek maradnak vissza. A szilárd végterméket maga az erősítőszál és a polimermátrixból visszamaradt pirolíziskoksz alkotja attól függően, hogy a pirolízis inert (oxigénmentes, általában tiszta nitrogén) vagy oxidáló atmoszférában történik. Ha a pirolízis inert atmoszférában történik, akkor a szénszál mechanikai tulajdonságai nem romlanak, viszont a felületén kis

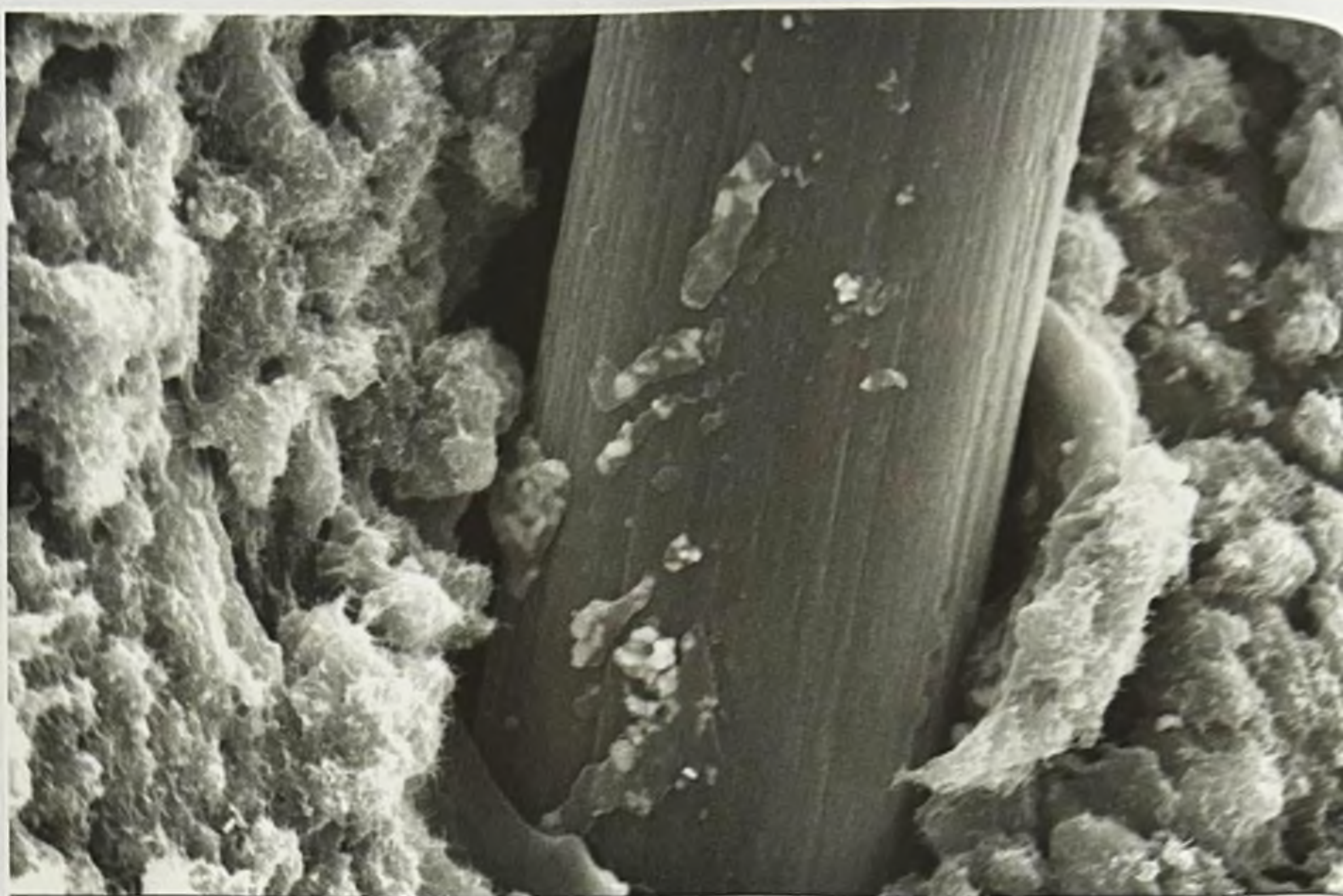
A térhálós mátrixú szénszál polimer kompozitok lehetséges újrahasznosítási módszerei



mennyiségű, a degradálódott mátrix-anyagból visszamaradó pirolízis kokszt jelenik meg. A szénhidrogén alapú melléktermékek további alkalmazásokban hasznosíthatók. A pirolízis egyik új, lehetséges megvalósítási módja a mikrohullámú pirolízis, amely során a szénszál hulladékot mikrohullámú sugárzásnak vetik alá. A mikrohullámú fűtés jellemzői közé tartozik a belső, gyors és szelektív melegítés, amely jelentős fejlesztési potenciállal bír az anyagok előkészítésében és újrahasznosításában is. A mikrohullámú sugárzás által generált hő hatására a mátrix anyaga pirolizálódik. Ezt követően egy oxidációs folyamat során eltávolítják a visszamaradt szenet és szerves anyagokat a szénszálak felületéről, így a folyamat végén újrahasznosított szénszálakat nyernek vissza a kompozitból. Mint minden újrahasznosítási módszernek, a pirolízisnek is vannak hátrányai, például az elemi szálak felszínén hibák keletkezhetnek, és a mechanikai tulajdonságok romolhatnak, bár ezek a problémák csökkenthetők a pirolízis paramétereinek optimalizálásával és kémiai utókezelésekkel.

A kémiai újrahasznosítás során a mátrixanyagot lényegében leoldják az erősítőanyagról, amelynek melléktermékeként az oldószer függvényében savas vagy bázikus kémhatású oldat keletkezik. Az eljárás során az erősítőanyag hosszváltozás nélkül visszanyerhető, valamint az elemi szálak károsodásának esélye is csekély. Ideális esetben az oldott mátrixanyagot tartalmazó oldatból – a mátrixanyag típusától függően – lehetőség van annak valamilyen szintű visszanyerésére is. A kémiai újrahasznosítás hátrányaként említhető meg, hogy a szálakon lévő felületkezelő szer a mátrixanyaggal együtt eltávolításra kerül (hasonlóan, mint a pirolízisnél), amely azonban különböző eljárásokkal utólagosan újra felvihető a szálak felületére.

A szénszálak felületkezelésére használt legelterjedtebb felületkezelési eljárások az oxidáció, a plazmasugaras felületkezelés, valamint a bevonatképzés, illetve ezek kombinációja. Az oxidációs eljárások célja, hogy a szénszálak felületén különböző funkciócsoportok jöjjenek létre, mert ezek jelenléte javítja a határfelületi adhéziót. A plazmasugaras felületkezelés során a szénszálakat nagy energiasűrűségű



*Elastomerekben alkalmazott hibrid erősítőanyag (újrahasznosított őrölt szénszál és szén nanocső) mikroszkópi felvétele*

plazmával bombázzák, aminek hatására az elemi szálak külső rétegének fizikai és kémiai szerkezete megváltozik. A felületen levő oxigénatomok aránya megnő, amely jobb szál/mátrix adhézióhoz vezet. A bevonatképzés során a szénszálakat valamilyen felületkezelő szert (például szilánt) tartalmazó oldatba áztatják, vagy ilyen oldattal vonják be a szálak felületét, majd az oldószert eltávolítják, amely által létrejön a szálak felületén a folytonos bevonat, amely kompatibilis a mátrixanyaggal.

### **Erősít az őrölt szál**

Kutatásunk során sikeresen alkalmaztunk visszanyert őrölt szénszálakat erősítőanyagként elastomerekben, valamint epoxigyantában is. Kimutattuk, hogy a pirolitikus szálvisszanyerés során az őrölt szénszál mechanikai jellemzői nem károsodnak szignifikánsan az új őrölt szénszálakhoz képest. Elastomerekben önállóan használva és szén nanocsővel hibridizálva is elemeztük az őrölt szénszál hatását a mechanikai jellemzőkre. Kimutattuk, hogy az őrölt szénszál mennyiségével arányosan növelhető a Shore keménység, valamint növelhető a továbbcsukító szilárdság és a kopásállóság is. Sikeresen kifejlesztettünk újrahasznosított vágott szénszálakat tartalmazó nyomtatófilamenteket 3D-nyomtatáshoz. Vágott újrahasznosított szénszál

felhasználásával úgynevezett „forged” kompozitból készítettünk alkatrészt versenyhajóhoz. Nem-szőtt újrahasznosított szénszál erősítőanyag felhasználásával pedig eredményesen hozunk létre multifunkciós kompozitokat és fémhabot tartalmazó fenntartható szendvicsszerkezeteket is.

Jól látható, hogy a különböző szálvisszanyerési eljárások során más és más jellemzőkkel rendelkező újrahasznosított szálak és szálstruktúrák (például: őrölt, vágott, nem-szőtt, fonott) hozhatók létre, amelyek a potenciális alkalmazási területeket is behatárolják. A visszanyert szálak mechanikai tulajdonságainak változása felveti a kérdést, hogy a visszanyert szénszálak milyen műszaki alkalmazásokban és milyen mértékben használhatók fel, amely kérdéskör jelenleg a kompozitokból visszanyert szálakkal foglalkozó kutatások egyik fő fókuszterületét képezik.

**TAMÁS-BÉNYEI PÉTER**  
BME Gépészmérnöki Kar,  
Polimertechnika Tanszék

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-427 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00658/21/6) támogatásával készült.