

## Szálerősítésű polimer kompozitok újrahasznosítási módszerei

Vitathatatlan előnyeik ellenére a szálerősítésű kompozitok elterjedését gátolja az a tény, hogy a hőre lágyuló műanyagoknál is nehezebb az újrafeldolgozásuk. Az alábbiakban az ilyen kompozitok hasznosítására rendelkezésre álló módszereket tekintjük át. Ezek közül ipari léptékben sajnos csak az erősítőanyagok tulajdonságromlásával járó mechanikai aprítást használják. A többi laboratóriumi léptékben működik.

*Tárgyszavak: őrlés, égestés, pirolízis, kémiai lebontás*

Az építőipar a globális szén-dioxid-kibocsátás közel egyharmadát termeli. Fenntartható technológiákra és alapanyagokra van szükség ahhoz, hogy energiahatékony és rugalmas építőipari ágazaton keresztül támogassuk a nettó nulla szén-dioxid-kibocsátásra való áttérést. A szálerősítésű polimer (FRP) kompozitok környezetbarát anyagok, amelyeknek kisebb a szénlábnyoma, mint a hagyományos anyagoknak, mint például a betonnak, acélnek, falazatnak és fának. Az FRP-ket számos iparágban használják, az építőipartól kezdve a repülőgépiparon, az autóiparon, a hajózáson és az elektronikán át egészen a szélenergia-ágazatig. Az FRP-k növekedésének fő okai közé tartoznak kiváló mechanikai tulajdonságaik, könnyű súlyuk, alakíthatóságuk és korrózióállóságuk.

Párhuzamosan az FRP anyagok növekvő használatával az iparban, a hulladékká váló FRP termékek mennyisége is megnövekedett, ezeknek az újrahasznosítása jelentős környezetvédelmi kihívássá válik. Fenntartható eszközöket és módszereket kell alkalmazni az FRP-hulladék hatékony hasznosítására és ártalmatlanítására.

A szálerősítésű polimer (FRP) kompozit anyagok gyantamátrixba helyezett szálakat tartalmaznak. A szálak biztosítják a szilárdságot és a merevséget, a gyanta pedig a szálak kötőanyagaként szolgál. Az FRP kompozit alkatrészekhez általában szintetikus vagy mesterséges szálakat használnak. Ezek közé tartoznak a szén-, üveg- és aramid-szálak. De ismert a bazaltkőzetből készült, félig természetes bazaltszálak, mint erősítő struktúrák felhasználása szerkezeti alkalmazásokhoz. Tudományos kutatások állnak rendelkezésre a természetes szálak – például a kender-, szizál-, len- és bambuszszálak FRP-ben történő alkalmazásáról (kereskedelmi FRP-termékek természetes szálak felhasználásával azonban még nem kerültek piacra).

Általában hőre keményedő gyantákat, például poliésztert, vinilésztert vagy epoxit használnak. Léteznek hőre lágyuló gyanták is, bár a szerkezetépítésben nem használják őket széles körben. A hőre keményedő gyanták molekulái térhálósodnak; ha egyszer megszilárdultak, nem lehet őket újra formázni. A hőre keményedő alapú FRP kompozitokat nehéz újrahasznosítani anélkül, hogy a visszanyert szálak vagy a gyanta ne degradálódna. A hőre lágyuló gyanták gyenge intermolekuláris kötéseik miatt kis energiaráfordítás mellett újra ömledékké alakíthatók, így újrafarmálhatók. Könnyen újrahasznosíthatók és újra feldolgozhatók.

Az Európai Kompozitipari Szövetség (EuCia) szerint 2020-ban az összes FRP anyag több mint 90%-a üvegszállal erősített FRP kompozit. A felhasznált összes gyanta körülbelül 2/3-a hőre keményedő, 1/3-a pedig hőre lágyuló gyanta.

2026-ra a szálerősítésű polimer kompozitok globális piaca a 2019-es 228 milliárd USD-ről várhatóan 375 milliárd USD-t fog elérni, 7,3%-os éves növekedési ütemmel. Az FRP kompozitokat több mint 15 iparágban alkalmazzák, a becsült termelési érték 2021-ben 100 milliárd USD és 12,1 millió tonnás

volumen. A legnagyobb növekedés az építőiparban, a közlekedésben, a szélenergia-, a repülőgépiparban, az elektromos és az elektronikai ágazatban várható. Az FRP-ipar fő kihívásai a jövőben az FRP termékek élettartalon túli kezelésük és újrahasznosításuk, a környezetvédelmi határértékek és a kormányzati jogszabályok betartása mellett. A körforgásos gazdaságban egy zárt ciklusú megközelítésre van szükség ahhoz, hogy az FRP kompozit hulladékból értékes erőforrás váljon.

A hulladék a gyártás és a termék életciklusának a végén keletkezik. A különböző iparágakban keletkező FRP kompozit hulladék becsült mennyiségét az 1. ábra mutatja.

Az Európai Unió 2008/98/EK irányelve által kidolgozott négy szintű hulladékgazdálkodási hierarchia szerint – amint azt az 1. ábra mutatja – a hulladékot a lehető legkisebbre kell csökkenteni, hogy megőrizzük a hulladéklerakók értékes helyét. Az FRP-hulladék ártalmatlanítási lehetőségei fontossági sorrendben a következők: minimalizálás/megelőzés, újrafelhasználás, újrafeldolgozás, égetés energiaszennyezéssel vagy anélkül, valamint hulladéklerakóba helyezés.

A fő hangsúlyt a hulladék minimalizálására vagy megelőzésére kell helyezni, ezt követi az újrahasználat, az újrafeldolgozás/reciklálás, a hasznosítás és az ártalmatlanítás. Az FRP hulladékok negatívan hatnak a helyi környezetre a talaj, a levegő és a talajvíz szennyezésével. A hulladéklerakás és az égetés a hagyományos értelemben nem tekinthető újrahasznosítási módszereknek, mivel az FRP égetése után a hulladékanyag 50%-át továbbra is lerakóba kell elhelyezni.

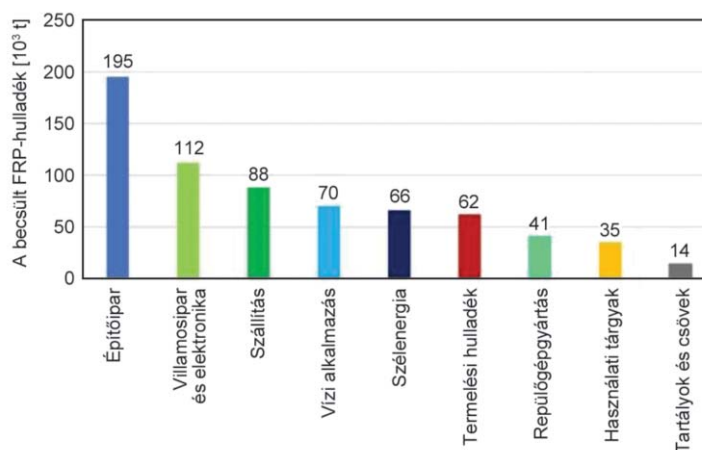
A hulladék ártalmatlanításának a legkörnyezetbarátabb módja a hulladék minimalizálása. Az FRP elemek és alkatrészek gyártása és előállításuk jelentős mennyiségű hulladékot termel. Az FRP gyártási technikákat javítani kell a gyártási hulladék csökkentése érdekében. A nagy hatékonyságú automatikus eljárásokban, például a pultrudálásban keletkező FRP gyártási hulladék (selejt) 2–5% között mozog. Ehhez képest kézi módszerek, például kézi rétegezés esetén akár 15%-ra is nőhet. A CFRP prepreg hulladék a repülőgépgyártásban akár a 40%-ot is elérheti. Az átlagos FRP gyártási hulladék vagy technológiai hulladék a becslések szerint a gyártási mennyiség 10%-a.

A legtöbb FRP gyártási hulladék sajnos a hulladéklerakóban végzi.

A következő prioritás az FRP-alkatrészek újrahasználatának élettartamuk végén, ha a hulladék keletkezése nem megelőzhető vagy minimalizálható. Az újrafelhasználás azt jelenti, hogy az FRP-alkatrészeket élettartamuk lejárt után ugyanabban a formában használják fel, akár egy másik iparágban, általában az eredeti alkalmazásnál alacsonyabb értékű alkalmazásban.

Például az üvegszálerősítésű FRP szélturbina lapátok újrafelhasználhatók szerkezeti gerendákként vagy oszlopokként. Az írországi Corkban 2022-ben egy használaton kívüli szélturbinák lapátjaiból készült gyaloghíd helyeztek üzembe (3. ábra). A híd 5 m hosszú és 3,5 m széles, és beton támaszokon nyugszik.

A szélturbinalapátokat 20–25 éves élettartamra tervezték. Állapotuktól függetlenül, élettartamuk végén leszerelik őket. E lapátok újbóli felhasználása új szerkezeti alkalmazásokban jelentősen csökkenti a hulladéklerakóba kerülő hulladékot.



1. ábra. A becsült FRP-hulladék ezer tonnában kifejezve 2025-ben.

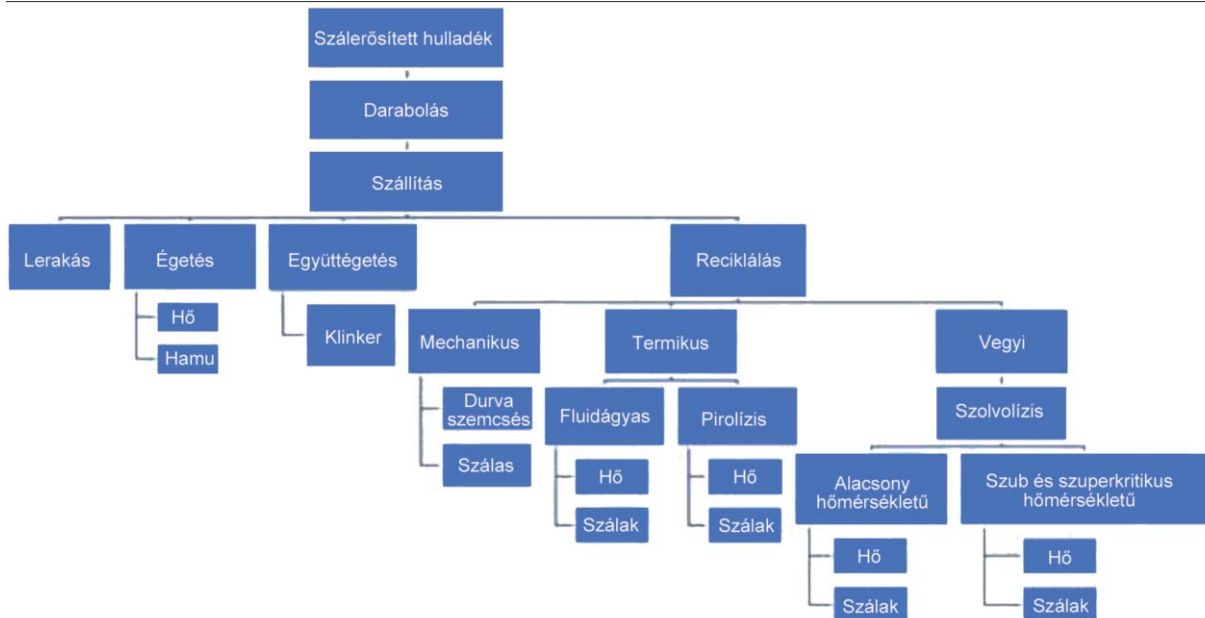


2. ábra. A hulladékfeldolgozás módjai



3. ábra. Elhasznált üvegszálerősítésű FRP szélturbina lapátokból kialakított gyaloghíd.

A reciklálás/anyagában történő újrahasznosítás a hulladék kezelés harmadik elfogadott módja. Több reciklási eljárás létezik: mechanikai, termikus, kémiai, és elektrokémiai újrahasznosítás (4. ábra).



4. ábra. A szálerősített hulladékok újrahasznosítási módjai

A *termikus újrahasznosítás* ismét három kategóriába sorolható: pirólízis, fluidizált ágyak és mikro-hullámok.

A *kémiai újrahasznosításnak* is több típusa van: az alacsony hőmérsékletű szolvólízis valamint a szub- és a szuperkritikus szolvólízis.

A *mechanikai reciklás* alatt általában tágabb folyamatkategóriákat értünk, mint például az aprítás, a kalapácsos őrlés, a marás és az őrlés, ezek kombinálhatók a kívánt méretű újrahasznosított darálék/zúzalék előállításához. A mechanikai újrahasznosítási eljárás előnyei: az ipari méretezhetőség, a folyamat gazdasági fenntarthatósága (alacsony energia igény) és a környezeti fenntarthatóság (nem szükséges vegyszerek alkalmazása). Másrészt ezt az újrahasznosítási módszert néhány hátrány is jellemzi. Először is, nem teszi lehetővé az újrahasznosított szálak méretének megőrzését, rövid szálakhoz vezet; továbbá olyan visszanyert szálakat eredményez, amelyek a felületen mátrixmaradványokat tartalmaznak. Ezért ez a módszer olyan reciklált kompozit terméket eredményez, amelynek a mechanikai tulajdonságai csökkentek az eredeti kompozitéhoz képest, az alacsony hosszúság/szálmérő arány, valamint gyenge tapadás

miatt a szál-mátrix határfelületen. Jelenleg a mechanikai újrahasznosítás egyes aspektusai még mindig nem tisztázottak, például a visszanyert szálak mechanikai tulajdonságai, amelyek nincsenek jól meghatározva, valamint az aprító és szortírozó berendezések geometriájának hatása a szálak végső méretarányára. További vizsgálatokat kell végezni annak tisztázására, hogy a folyamat paraméterei hogyan befolyásolják a visszanyert szálak mechanikai tulajdonságait, a mátrix eltávolításának arányát és az újrahasznosított anyag és az új gyanta közötti határfelület hatékonyságát.

A *termikus újrahasznosítás* a szálak visszanyerése érdekében a mátrix (a gyanta komponens) hővel történő bomlásán alapul. A pirolízis a legelterjedtebb termikus újrahasznosítási változat. Több kutatási eredmény azt mutatja, hogy a pirolízis során kielégítő a mátrixbomlás, azonban néhány esetben, különösen, ha más eljárásokkal, például mikrohullámú besugárzással kombinálva végzik, nem teszi lehetővé a teljes mátrix eltávolítását. Ezért a visszanyert szálak felületén előfordulhat, hogy a régi mátrix maradványai találhatók, amelyek a későbbi termékben rossz tapadást eredményeznek a szál-mátrix határfelületen, csökkentve az újrahasznosított kompozit anyagok mechanikai tulajdonságait. Egyes vizsgálatok során megfigyelték a szénszálak átmérőjének a csökkenését is a pirolízis során végbemenő oxidáció hatására. Mivel a pirolízis során jellemzően magas hőmérsékletet (400–1000 °C) alkalmaznak, nagyon energia igényes folyamat.

A *kémiai újrahasznosítás* vagy szolvólízis a gyantát kémiai eljárással oldja fel, ami biztosítja, hogy a szálak megőrizzék integritásukat az eljárás során. A kémiai újrahasznosítás alkalmasabb a szénszálak kompozitok esetén, mint az üvegszál-erősítés esetén, mivel a visszanyert szénszálak mechanikai tulajdonságai nem romlanak. Másrészt azonban a kémiai újrahasznosítás magas költséggel jár, ezért ezeket az eljárásokat csak a szénszálak visszanyerésére indokolt alkalmazni.

A kémiai és a termikus újrahasznosítás ipari méretű alkalmazása jelenleg még nem valósult meg. Ezeket az eljárásokat a laboratóriumi léptékről a kereskedelmi szempontból életképes ipari szintre emelni a jövő feladata.

Az *elektrokémiai újrahasznosítási* eljárás a mátrix nagy elektromos árammal történő eltávolításából áll. A módszer során vagy magát a kompozit hulladékot használják elektródaként, vagy a hulladékot vizes közegbe helyezve, elektródok között nagy elektromos impulzusokat generálnak. Ez az eljárás repedéseket generál a mátrixban, amelyek a folyamat során keletkező gázok miatt jönnek létre. A mátrix így eltávolítható, de a repedések a szálkötegek feldarabolódását is okozzák, következésképpen csökkentik a visszanyert szálak mechanikai tulajdonságait. Emellett ennek a folyamatnak magas az energiaigénye is, így az eddigi kutatások eredménye szerint az elektrokémiai eljárás alkalmatlan a szálak visszanyerésére.

A kompozit anyagok újrahasznosításának jelenlegi állása rávilágít arra, hogy a kémiai, elektrokémiai és a termikus újrahasznosítási eljárások nagy energiafelhasználást és megfelelő laboratóriumi berendezéseket igényelnek, valamint súlyos környezeti hatásokkal járnak. Emellett ezek a módszerek erősen degradálják az üvegszálak minőségét. A mechanikai újrahasznosítási módszer, még ha rövid szálakkal erősített kompozit anyagokat eredményez is, vonzó módszernek tűnik mivel környezetbarát és alacsony energia igényű.

A jövőben szükséges a kutatás-fejlesztések folytatása az újrahasznosítási folyamatok tekintetében. Innovatív és gazdaságilag versenyképes újrafeldolgozási módszerekre van szükség. A cél, olyan reciklált üveg- és szénszálak termékek gyártása, amelyekben a szálak és a mátrix közötti határfelületi adhézió optimalizált, a mechanikai tulajdonságok a reciklált termék igénybevételének megfelelőek. Így kialakítható a körforgásos gazdaság filozófiájának megfelelő zárt körfolyamat.

Összeállította: Fourné Csukat Gabriella (Novia Kft)

A Review on the Recycling Technologies of Fibre-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Industrial Fields – Dario De Fazio, Luca Boccarusso, Antonio Formisano, Antonio Viscusi, Massimo Durante (J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11(4), 851) <https://doi.org/10.3390/jmse11040851>

A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges – Jawed Qureshi (Fibers 2023, 11(5), 40) <https://doi.org/10.3390/fib11050040>