

# Farost-erősítésű kompozit előállítása szelektíven gyűjtött poliolefin kupakból és fa hulladékból

## Production of wood-plastic composite from selectively collected polyolefin cap and wood waste

DREMÁK Csenge<sup>1</sup>, Dr. GERE Dániel<sup>1</sup>, Dr. CZIGÁNY Tibor<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék,

<sup>2</sup>HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

### Abstract

*Due to the high demand for polyolefins, their recycling can help reducing plastic waste pollution. The use of degradable materials, such as wood fibers as a by-product of wood processing, can also contribute to waste reduction. The processing of these two materials into wood-plastic composites could be a possible solution for recycling plastic and wood waste. An analysis of the mechanical properties of the produced test specimens was carried out.*

**Keywords:** wood fiber, composite, polyolefin, waste reduction, recycling

### Kivonat

*A poliolefinnek iránti kiemelt kereslet miatt újrahasznosításuk a műanyag hulladék-szennyezés mérséklését előmozdíthatja. A hulladékcsökkentéshez hozzájárulhat a lebomló anyagok, például a faipari eljárások melléktermékeként képződő farost használata is. E két anyag farost-erősítésű kompozitként történő feldolgozása a műanyag és fa hulladék újrahasznosítására lehetséges megoldást jelenthet. Kutatásunk során az előállított próbatestek mechanikai tulajdonságainak elemzését valósítottuk meg.*

**Kulcsszavak:** farost, kompozit, poliolefin, hulladékcsökkentés, újrahasznosítás

## 1. BEVEZETÉS

2022-ben a globális műanyagtermelés 400,3 millió tonnát tett ki. Az össztermelés 45,2%-a poliolefin volt, amely polietilént és polipropilént foglal magába (PE és PP). Ehhez Európa 58,7 millió tonna termelésével járult hozzá, amelynek 37,5%-a poliolefin volt. Ugyanebben az évben a globális műanyagtermelés kevesebb, mint 9%-át tették ki a mechanikailag vagy kémiai újrhasznosított műanyagok. A poliolefinnek a fogyasztás utáni összműanyag hulladék közel kétharmadát teszik ki, amelyből az a következtetés vonható le, hogy a poliolefinnek újrahasznosításának kérdése sürgető megoldásra váró probléma [1-2].

Manapság kiemelt figyelem övezi a vizekben úszó műanyag hulladékokat. Az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSZ) Környezetvédelmi Programjának egyik előrejelzése szerint, megfelelő intézkedések nélkül a vízi ökoszisztémába kerülő évi 9-14 millió tonna műanyag hulladék 2040-re az évi 23-37 millió tonna hulladékot is elérheti [3]. Ennek következtében érdemes a vizekbe kerülő hulladékok összetételét jobban megvizsgálni. Minden évben megrendezésre kerül az International Coastal Cleanup elnevezésű gyűjtőakció, amelynek keretében globálisan önkéntesek tisztítják meg a partszakaszokat és a vizeket a különböző hulladékoktól. A 2022. évben az önkéntesek összesen 3 700 589 kg, 15 519 392 db hulladékot gyűjtöttek össze, amelyek közül a 10 legnagyobb mértékben előforduló hulladék közül a műanyag kupak a 4. helyen végzett 844 375 db gyűjtött mennyiséggel [4].

A farost-erősítésű kompozit lebomló erősítőanyag alkalmazásával a műanyag kupak hulladék fenntartható újrahasznosítását teheti lehetővé, így érdemes bővebb tárgyalást szentelni a kompozitok e típusának. A kompozit Czvikovszky és társai munkája [5] szerint egy többfázisú, összetett szerkezeti anyag, amely nagyobb igénybevétel esetén is kiváló adhéziós kapcsolatot fenntartó nagy szilárdságú és rugalmassági modulusú erősítőanyagot és szívós befoglaló anyagot tartalmaz. A kompoziton belül a farost-erősítésű kompozit értelmezésében megoszlának a szakirodalmak. Ashori [6] a növényi szálabból és hőre lágyuló vagy

hőre nem lágyuló polimerekből, Gardner és társai [7] a faanyagból, illetve hőre lágyuló és hőre nem lágyuló polimerekből, míg Bhaskar és társai [8] a faanyagból és hőre lágyuló polimerekből felépülő kompozitokat értik alatta.

Számos munka született poliolefinekből előállított farost-erősítésű kompozitok elemzésével kapcsolatban. Pokhrel és társai [9] vizsgálták kompatibilizálószer, maleinsav-anhidriddel ojtott polipropilén (MAPP), faliszt-, és pellet, illetve különböző fafajok alkalmazásának hatását az előállított kompozitok tulajdonságaira. Mosavi-Mirkolaei és társai [10] az általuk készített kompozitokban újrahasznosított műanyagok alkalmazásának hatását mérték fel a műanyagok ikercsigás extruderrel végzett termomechanikus degradációjának segítségével. Ezzahrae és társai, illetve Chaharmahali és társai [11-12] különböző fatartalmú, nagysűrűségű polietilént (HDPE) tartalmazó kompozitok tulajdonságait vizsgálták. Najafi és társai [13] originál és újrahasznosított poliolefinek alkalmazásának hatását vizsgálták az előállított kompozitok mechanikai tulajdonságaira.

A kutatás célja az volt, hogy felmérjük a megfelelő fatartalmat, amely esetén még megvalósítható a gyártás és a fa erősítőanyagként viselkedik. Ennek vizsgálatához 25 m/m%-os, 50 m/m%-os és 60 m/m%-os lucfenyő tartalmú kompozitokat gyártottunk, amelyekhez 5 pph (egész keverék 100%-os tömegére vonatkoztatott) mennyiségű kompatibilizálószer is adtunk. A próbatestek gyártását extrúzió és fröccsöntés segítségével valósítottuk meg. A mechanikai tulajdonságok elemzéséhez szakító-, hajlító-, illetve Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot végeztünk.

## 2. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

### 2.1. Felhasznált alapanyagok

A kutatás során alkalmazott alapanyagok az 1. táblázatban találhatók.

Felhasznált alapanyagok jellemzői

1. táblázat

Jelölés	Megnevezés	Alapanyag típus	Származási hely	Jellemző
PEPP	Szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladék	PE, PP	Jász-Plasztik Kft. (Jászberény)	Mosott, válogatott kupakdarálék, amely tipikusan 80 m/m% PE-t és 20 m/m% PP-t tartalmaz.
F250	Fafeldolgozási hulladék	Lucfenyő	Szalay Fatelep (Szigetszentmiklós)	Szemcseméret: <250 µm
F500	Fafeldolgozási hulladék	Lucfenyő	Szalay Fatelep (Szigetszentmiklós)	Szemcseméret: 250-500 µm
MAPE	Kompatibilizálószer	Fusabond E100	Dow (USA)	Maleinsav anhidriddel ojtott HDPE

### 2.2. Mintaelőkészítés

A fahulladékot BA – 200N típusú szitarázó géppel 250 µm alatti, illetve 250-500 µm közötti szemcseméretűre szitáltuk 5 perces ciklusidő (9 s álló, 1 s rázó mód), 2 mm-es amplitúdó, 4 db rendre 1000 µm, 710 µm, 500 µm és 250 µm cellaméretű szita alkalmazásával. A szitált fahulladékot (F250 és F500), illetve a rendelkezésünkre bocsátott szelektíven gyűjtött poliolefin kupakdarálékot (PEPP) Yamato DKN600 típusú szárítószekrényben 80 °C hőmérsékleten, 4 órán át szárítottuk.

A 250 µm alatti és 250-500 µm közötti szemcseméretű faanyagból 25 m/m%-os, 50 m/m%-os és 60 m/m%-os fatartalmú keverékek készültek. Minden fatartalmú keverékhez 5 pph MAPE (maleinsav-

anhidriddel ojtott HDPE) került hozzáadásra. Ezen kívül a faanyag jelenlétének hatásának felmérésére szelektíven gyűjtött kupakból referencia készült.

A keverékek kompaundálását Labtech Scientific 26-44 típusú ikercsigás extruderrel végeztük el a következő paraméterek alkalmazásával: 150 1/perces csigafordulatszám, 30-60 bar ömledéknyomás, garattól a szerszám felé haladva 190 – 190 – 195 – 195 – 200 – 200 – 205 – 205 – 210 – 210 – 210°C hőmérsékletprofil. A kompaundok hűtése és granulálása rendre levegő hűtésű ventilátoros szalag és LZ-120/VS típusú granuláló felhasználásával valósultak meg, 3 mm-es granulátum hossz megválasztásával. A próbatetek Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 típusú fröccsöntőgéppel készültek az alábbi paraméterek mellett: 30°C szerszámhőmérséklet, 50 cm<sup>3</sup>/s befroccsöntési sebesség, 185 – 190 – 195 – 200 – 200°C hőmérsékletprofil, 30 s maradék hűtési idő, 5,20 s utónyomási idő, 100-300 bar utónyomás.

## 2.3. Vizsgálati módszerek

### 2.3.1. Szakítóvizsgálat

A méréseket Zwick Z005 típusú univerzális szakítógéppel hajtottuk végre MSZ EN ISO 527-2/1A típusú, 4x10x170 mm méretű próbatettel, 50 mm/perc szakítási sebesség és 115 mm befogási hossz mellett szobahőmérsékleten, 45%-os páratartalom esetén.

### 2.3.2. Hajlítóvizsgálat

A méréseket Zwick Z005 típusú univerzális szakító gép segítségével hajtottuk végre, MSZ EN ISO 178:2019 típusú, 4x10x80 mm méretű próbatettel, 10 mm/perc hajítási sebesség, 64 mm alátámasztási távolság és 10%-os maximális lehajlás beállításával, szobahőmérsékleten, 43%-os páratartalom mellett.

### 2.3.3 Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat

A méréseket Ceast Resil Impactor Junior típusú ütőmű alkalmazásával végeztük, MSZ EN ISO 179-1/1eA típusú, 4x10x80 mm méretű próbatettel, 62 mm alátámasztási távolság mellett szobahőmérsékleten, 42%-os páratartalom mellett. A próbatetekeken a bemetszés mérete 2 mm volt, az alkalmazott kalapács üténergiája 15 J, az általa bejárt szög 115° volt.

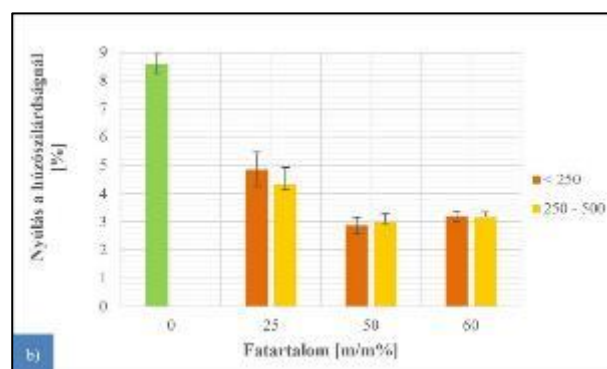
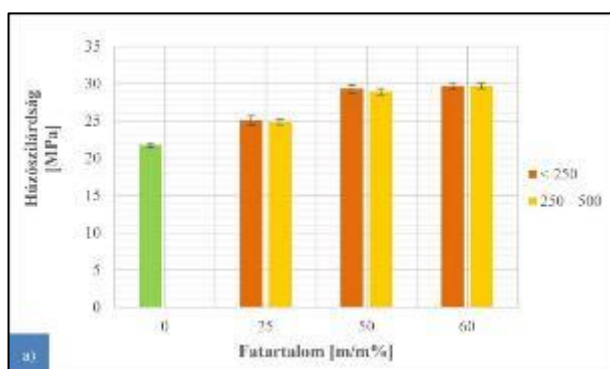
### 2.3.4. Fénymikroszkópi vizsgálat

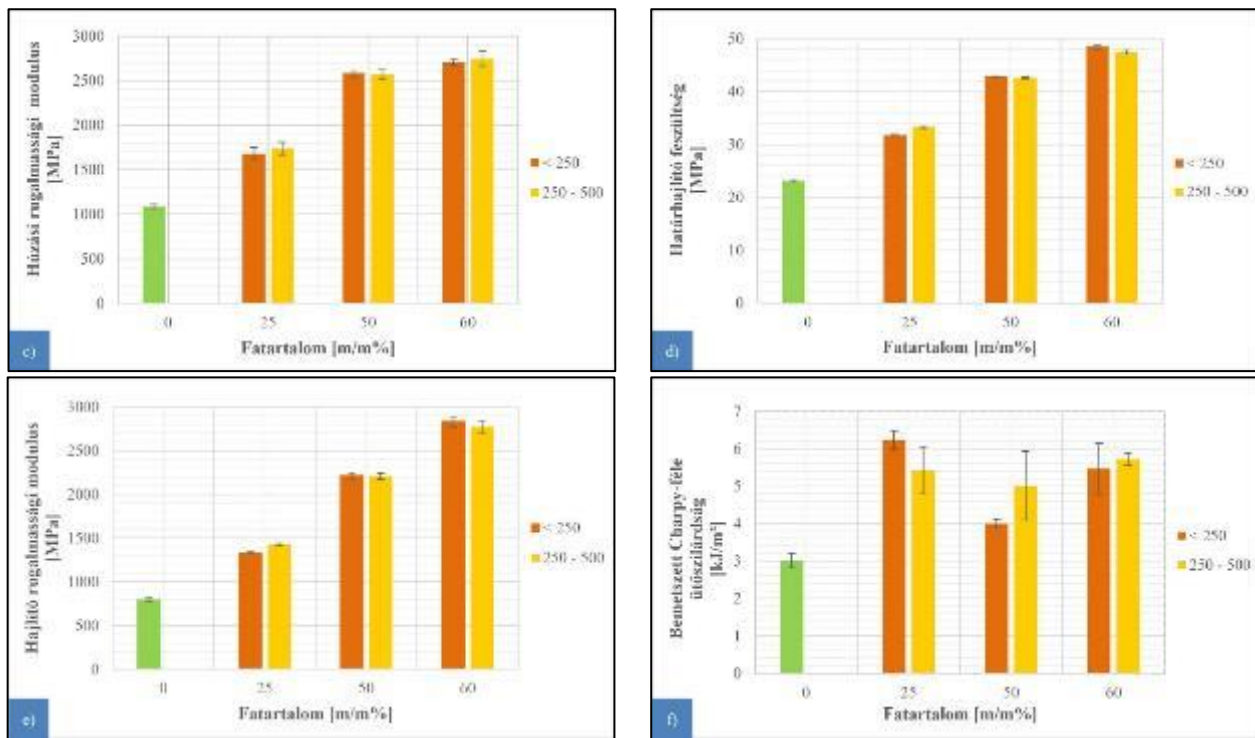
A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok során létrejött töretfelületek vizsgálatát végeztük el Keyence VHX-5000 típusú fénymikroszkóp alkalmazásával.

## 3. KIÉRTÉKELÉS

### 3.1. Mechanikai vizsgálatok

Hatféle összetételű farost-erősítésű kompozit és szelektíven gyűjtött kupakból előállított referencia szakító-, hajlító-, illetve Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatát végeztük el (1. ábra).





1. ábra. a) Húzószilárdság a fatartalom függvényében, b) Nyúlás a húzószilárdságnál a fatartalom függvényében, c) Húzási rugalmassági modulus a fatartalom függvényében, d) Határhajlító feszültség a fatartalom függvényében, e) Hajlító rugalmassági modulus a fatartalom függvényében, f) Bemetszett Charpy-féle ütőszilárdság a fatartalom függvényében

A húzószilárdság (1.a ábra) a fatartalom növelésével nőtt a vizsgált tartományon belül 50 m/m%-os mennyiségig, 60 m/m%-nál változatlan ez az érték. Az eredmények alapján elmondható, hogy a referenciához képest a fa erősítőanyagként viselkedett a kompozitokban.

A nyúlás a húzószilárdságnál (1.b ábra) értéke csökkent a fatartalom emelkedésével a vizsgált tartományon belül a referenciához képest. 25 m/m%-os fatartalom esetén viszonylag jelentős csökkenést követően 50 m/m%-ot elérve stagnált az értéke.

A húzási rugalmassági modulus (1.c ábra) értéke nőtt a vizsgált tartományon belül a referenciához képest a fatartalom növelésével. A vizsgált modulus értéke 50 m/m%-os fatartalom esetén több mint kétszeresére nőtt és 60 m/m% esetén további növekedés figyelhető meg. Ez arra vezethető vissza, hogy a lucfenyő húzási rugalmassági modulusa nagyobb, mint a poliolefineknek [14].

A határhajlító feszültség (1.d ábra) értéke nőtt a fatartalom emelkedésével a referenciához képest a vizsgált tartományon belül. 60 m/m%-os faanyag jelenlétével közel kétszeres feszültség növekedés figyelhető meg a referenciához képest. Az eredmények azt a fentebb tett állítást támasztják alá, hogy a fa erősítőanyagként viselkedett a kompozitokban a referenciához képest.

A hajlító rugalmassági modulus (1.e ábra) értéke a vizsgált tartományon belül a fatartalom növelésével nőtt a referenciához képest. Ez a növekedés 60 m/m%-os fatartalom esetén a referenciához képest három és félszeres szorzót eredményezett. Ez azzal hozható összefüggésbe, hogy a lucfenyő hajlító rugalmassági modulusa nagyobb, mint a poliolefineknek [14].

Az eddig elemzett mechanikai tulajdonságok esetében látható, hogy a fa szemcsemérete a vizsgált tartományon belül nem gyakorolt hatást a mechanikai tulajdonságok mérőszámi értékeire.

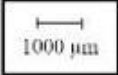
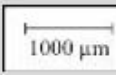








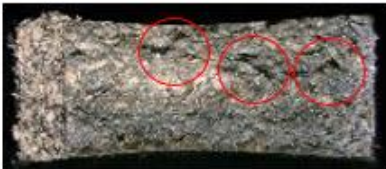





A bemetszett Charpy-féle ütőszilárdság eredményei (1.f ábra) esetén a szórásmezők átfedése figyelhető meg, így a fatartalom változására vonatkozóan nem vonható le egyértelmű következtetés. Azonban az megállapítható, hogy a faanyagot tartalmazó próbatestek bemetszett Charpy-féle ütőszilárdsága minden esetben nagyobb volt a referenciához képest.

**3.2. Fénymikroszkópi vizsgálat**

Minden összetétel Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatából származó töretfelület 20x és 100x nagyítású felvételeit a 2. táblázat tartalmazza.

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatok során kapott töretfelületek

2. táblázat

Összetétel	Nagyítás	
	20x 	100x 
Ref		
25_250		
25_250-500		
50_250		
50_250-500		
60_250		
60_250-500		

A mikroszkópi képeken a polimer mátrix és a fa szemcsék között megfigyelhető a jó adhéziós kapcsolat és a fa szemcsék egyenletes eloszlása a próbatestek töretfelülete mentén. Viszont egyes esetekben, a piros körökkel jelölt területeken kitört szemcsék vagy lunkerképződés jelei láthatók.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során a poliolefinnek, azon belül is a poliolefin kupakhulladék újrahasznosítását tűztük ki célul lebomló anyag felhasználásával. Farost-erősítésű kompozit próbatesteket állítottunk elő fafeldolgozási hulladék és szelektíven gyűjtött poliolefin kupakhulladék felhasználásával. A kompozitok háromféle, 25 m/m%-os, 50 m/m%-os és 60 m/m%-os, fatartalommal és kétféle, 250 µm alatti és 250-500 µm közötti, szemcseméretű faanyagból készültek. Az extrúzió és fröccsöntés alkalmazásával gyártott próbatestek szakítóvizsgálatát, hajlítóvizsgálatát, illetve Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatát végeztük el. A mérések eredményei alapján megállapítottuk, hogy a vizsgált tartományon belül a Charpy-féle ütvehajlító szilárdság kivételével a szemcseméret nem befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, illetve, hogy 60 m/m%-os fatartalom alkalmazása egyes esetekben javítja, egyes esetekben pedig nem rontja a mechanikai tulajdonságokat.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00894/23/6) és a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-453 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának, valamint a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) PD 146135 pályázatának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Plastics Europe: *Plastics-the fast Facts 2023*. Plastics Europe, Brussels, 2023.
- [2] Plastics Europe: *Polyolefins*.  
<https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/polyolefins-2/> (Utolsó megtekintés: 2024. 02. 20.).
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP): *From pollution to solution – a global assessment of marine litter and plastic pollution*, Nairobi, 2021.
- [4] Ocean Conservancy: *International Coastal Cleanup 2023 Report*, Washington, D.C., 2023.
- [5] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J. *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [6] Ashori A.: Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries!. *Bioresource technology*, 2008, 99(11), 4661-4667.
- [7] Gardner D. J., Han Y., Wang L. *Wood–plastic composite technology*. *Current Forestry Reports*, 2015, 1, 139-150.
- [8] Bhaskar K., Jayabalakrishnan D., Kumar M. V., Sendilvelan S., Prabhakar M. *Analysis on mechanical properties of wood plastic composite*. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45, 5886-5891.
- [9] Pokhrel G., Gardner D. J., Han Y. *Properties of wood–plastic composites manufactured from two different wood feedstocks: wood flour and wood pellets*. *Polymers*, 2021, 13(16), 2769.
- [10] Mosavi-Mirkolaei S. T., Najafi S. K., Tajvidi M. *Physical and mechanical properties of wood-plastic composites made with microfibrillar blends of LDPE, HDPE and PET*. *Fibers and Polymers*, 2019, 20, 2156-2165.
- [11] Ezzahrae M. F., Nacer A., Latifa E., Abdellah Z., Mohamed I., Mustapha, J. *Thermal and mechanical properties of a high-density polyethylene (HDPE) composite reinforced with wood flour*. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72, 3602-3608.
- [12] Chaharmahali M., Mirbagheri J., Tajvidi M., Najafi S. K., Mirbagheri Y. *Mechanical and physical properties of wood-plastic composite panels*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(2), 310-319.
- [13] Najafi S. K., Hamidinia E., Tajvidi M. *Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 100(5), 3641-3645.
- [14] Bárczy P. *Faanyagok alkalmazástechnikája*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2009.