

Reciklált polimpropilén nanokompozitok idő és hőmérsékletfüggő mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Time and temperature dependent mechanical properties of recycled polypropylene nanocomposites

GERSE Péter¹, Dr.BATA Attila¹

¹6000 Kecskemét, Neumann János Egyetem GAMF Kar
Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

Abstract

In this study, the effects of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) content and recycling on the mechanical properties and time and temperature dependent mechanical properties of polypropylene homopolymer (PP) were investigated. The nanocomposites and their recycles were prepared using twin-screw extruders with 0.3, 0.5 and 1 m/m% MWCNT content and test specimens were injection moulded to perform the tests.

The results of the mechanical test showed that the PPH/MWCNT recycles exhibited an increase in elastic modulus of ~4% at 0.3 m/m%, ~9% at 0.5 m/m% and ~11% at 1 m/m% reinforcement, compared to the unfilled PPH base material. A negligible increase was observed in the stress values associated with the neck formation. A significant decrease was observed in the tensile elongation values.

Based on the dynamic mechanical results, it was found that the incorporation of MWCNTs improves the storage modulus values over the whole measurement range.

From the creep to failure results, it was found that due to the favourable mechanical properties of MWCNTs and their effect on stiffness, the creep tendency of composites and their recycling was significantly reduced.

Keywords: PP, MWCNT, recycling, creep, reinforcement

Kivonat

Ebben a tanulmányban a többfalú szén nanocsövek (MWCNT) tartalmának, valamint a reciklálás hatását vizsgáltuk a polipropilén homopolimer (PP) mechanikai, valamint idő és hőmérséklet függő mechanikai tulajdonságaira. A nanokompozitokat valamint ezek reciklátumait ikercsigás extrúder segítségével állítottuk elő 0,3, 0,5 valamint 1 m/m% MWCNT tartalom mellett majd a vizsgálatok elvégzéséhez próbatesteket fröccsöntöttünk.

A mechanikai vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a PPH/MWCNT reciklátumok 0,3 m/m%-nál ~4%, 0,5 m/m%-nál ~9%, míg 1 m/m% erősítés esetében ~11%-os rugalmassági modulus növekedést mutatnak, a töltetlen PPH alapanyaghoz hasonlítva. A nyakképződéshez tartozó feszültségi értékekben elhanyagolható növekedést tapasztaltunk. A szakadási nyúlás értékeiben jelentős csökkenést tapasztaltunk.

A dinamikus mechanikai eredmények alapján megállapítottuk, hogy az MWCNT-k beépítése javítja a tárolási modulus értékét a teljes mérési tartományban.

A tönkremenetelig tartó kúszás eredményeiből mállapítottuk, hogy az MWCNT kedvező mechanikai tulajdonságainak, valamint a merevségre kifejtett hatása miatt kompozitok, valamint azok reciklátumainak kúszási hajlama jelentősen csökkent.

Kulcszavak: PP, MWCNT, újrafeldolgozás, kúszás, erősítés

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a PP-t rendkívül előnyös tulajdonság/árviszonyok jellemzik [1]. A polipropilén az autópárházban széles körben használt műanyagok közé tartozik [1]. Az **1. ábrán** látható egy személygépjármű hátsó lökhárítója és annak elemei. Rengeteg fő-segéd alkatrész készül PP-ből és kompozitjaiból (PP/EPDM; PP/EPDM/talkum stb.), nem beszélve a többi beépülő, segéd, illetve fő alkatrészekről [2].

A polimerek mechanikai jellemzőinek javítása érdekében különböző típusú szálakat, valamint különböző alakú és méretű részecskéket juttatnak a polimer mátrixba. Az utóbbi években a szénelapú nanoanyagok (pl. szén nanocső-CNT, szén nanoszálak-CNF és grafénszármazékok) váltak a legfontosabb töltőanyagokká a polimerek fizikai tulajdonságainak javítására [3], [4]. A szén nanocsövek kiváló szerkezeti és fizikai tulajdonságai, mint például az egydimenziós (1D) geometria, a rendkívül nagy alakíthatóság, a rugalmassági modulus (200-1000 GPa) és a szilárdság (200-900 GPa), az elektromos és hővezető képesség, kiváló jelöltté teszik őket tömeg/műszaki polimer nanokompozitok előállítására [5]–[6].

| Szerző (év) | Általuk mért eredmény | Hivatkozás |
|----------------------|--|------------|
| Y. Zou. (2004) | young modulus (HDPE) 25 °C: 500 MPa-ról 900 MPa (1 m/m% MWCNT) | [7] |
| T. Ogasawara. (2004) | young modulus (PI) 25 °C: 2,8 GPa-ról 3,07 GPa (3,3 m/m% MWCNT) | [8] |
| M.-K. Seo. (2004) | young modulus (PP) 25 °C: 547 MPa-ról 833MPa (7,5 m/m% MWCNT) | [9] |
| F. Thiébaud. (2009) | young modulus (PP) 25 °C 604 MPa-ra növelte (2 m/m% MWCNT) | [10] |
| D. Bikiaris (2010) | young modulus (PP) 25 °C 650 MPa-ról 750 MPa (2 m/m% MWCNT) | [11] |

Mindemellett Yetgin [12] kutatása során megállapította, hogy az eredeti PP képlékeny viselkedést mutat. Az MWCNT hozzáadása a polimer mátrixhoz azonban a szakadási nyúlás jelentős csökkenéséhez vezet.

Yang és társai [13] PP nanokompozitok kúszási tulajdonságait vizsgálta. A töltőanyag hatására 20 MPa terhelés mellett a próbatestek élettartama mintegy 800%-kal nőtt a tiszta PP-hez képest. Az erősítő hatás magasabb hőmérsékleten (50°C) is érvényesült, adott terhelés mellett mintegy fele akkora volt a deformáció a töltött minták esetén, mint a tiszta polimernél. A terhelésátvitel esetén három tényezőt emel ki, amely hozzájárulhat a csökkenő deformáció változáshoz, azaz a jobb kúszási jellemzőkhöz.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a szakirodalom széleskörűen tanulmányozta a PP nanokompozitok mechanikai tulajdonságait, viszont nem tér ki a PP homopolimer/MWCNT kompozitok reciklációjának mechanikai vizsgálatára, továbbá nagy molekulatömegű PP homopolimer/MWCNT vizsgálatáról sem számol be.

2. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK TECHNOLÓGIÁK

2.1 Alapanyagok

Kiindulási mátrix alapanyagként a **MOL Petrolkémia Zrt.** által gyártott polipropilén homopolimer típusokat alkalmaztuk (TIPLLEN H880). Kiváló mechanikai tulajdonsággal bír a piacon elérhető PP homopolimerrekhez képest, és hőstabilitása, hegeszthetősége is kimagasló.

Erősítő anyagként a Nanocyl S A. által gyártott PLASTICYL™ PP2001 típusú többfalú szén nanocső (MWCNT) mesterkeveréket alkalmaztuk [14]. A PP/nanocső mesterkeverék, technikai adatlap alapján 20 m/m%-ban tartalmaz többfalú szén nanocsövet.

2.2 Vizsgálatok és kiértékelési módszerek

Kutatásunk során különböző reciklált PP/MWCNT keverékeket állítunk elő, ami reprodukálja az ipari closed-loop visszaforgatást. A reciklált PP alapanyagok jelentős tulajdonság romlásokkal mennek keresztül, ezért újrafelhasználhatóságuk csökken, főként a nagy igénybevételnek (nyomás, hőmérséklet) kitett alkatrészek esetében [13]. A nanocső erősítő hatása azonban elősegítheti az alapanyag többszöri felhasználását.

A nanokompozitokat ikercsigás extrúder segítségével állítottam elő [14]. A berendezés osztott csigaházzal épül, ahol minden hengermodul hossza 4D vagy 104 mm. L/D aránya 44. A csigák átmérője 26 mm, egy irányba forognak, szegmensekből álló ikercsigás kialakítás, amelyre bármely csigatest a hexagonális keresztmetszetű tengelyen tetszőleges helyre szerelhető [14].

Mivel a H880-as alapanyag egy nagy moltömegű, a PP-k között is kiemelkedő fizikai tulajdonságokkal bíró alapanyag, ezért az elkészült PPH/MWCNT nanokompozitot ikercsigás extrúder használatával újrafeldolgoztam, és ezáltal előállítottam a reciklált PPH/MWCNT keverékeket. Az újrafeldolgozás szimulálja a PPH/MWCNT kompozit gyártástechnológia során elszenvedett mechanikai és termikus igénybevételeit (ipari zárt rendszerű visszaforgatás).

Célom az volt, hogy minél nagyobb mértékű nyírási igénybevételnek tegyem ki a reciklált keverékeket. Gyártástechnológia (extrúzió) beállítások módosításával meghatároztam azt a fordulatszám tartományt, ahol a nyíróerő már kellőképpen degradálja a kiindulási PP-alapanyagokat.

A mechanikai tulajdonságokat standard próbatesteken mértük INSTRON 3366 univerzális mérőberendezés [23] segítségével. A PPH bázisú nanokompozitok esetében a keresztfej sebesség 1 mm/perc 0,3% megnyúlásig, majd 5 mm/perc tönkremenetelig, ASTM D638 szabványnak megfelelően

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

3.1 PP/MWCNT és reciklátumaik mechanikai tulajdonságainak eredményei

A mechanikai tulajdonságok, mint például a rugalmassági modulus vagy a nyakképződéshez tartozó feszültség fontos fizikai jellemzők.

1. táblázat PP, PP/MWCNT kompozitok és reciklátumaik mechanikai tulajdonságainak eredményei

| Kompozitok megnevezése | Young modulusz (MPa) | | Nyakképződéshez tartozó feszültség (Mpa) | | | Nyakképződéshez tartozó nyúlás (%) | | | |
|---------------------------|----------------------|--------------|---|--|--------------|--|------------------------------------|--------------|--|
| | Young modulusz (MPa) | Szórás (MPa) | Különbség a töltetlen PP-hez képest(%) | Nyakképződéshez tartozó feszültség (Mpa) | Szórás (MPa) | Különbség a töltetlen PP-hez képest(%) | Nyakképződéshez tartozó nyúlás (%) | Szórás (MPa) | Különbség a töltetlen PP-hez képest(%) |
| PPH | 1662 | 16,7 | - | 38,37 | 0,14 | - | 9,46 | 0,08 | - |
| PPH REG | 1662 | 13,8 | 0,0 | 38,25 | 0,16 | -0,3 | 9,43 | 0,09 | -0,2 |
| PPH 0,3/MWCNT | 1753 | 12,1 | 5,5 | 39,46 | 0,13 | 2,9 | 8,99 | 0,40 | -4,9 |
| PPH 0,3/MWCNT REG | 1734 | 15,0 | 4,3 | 39,46 | 0,14 | 2,8 | 8,75 | 0,02 | -7,5 |
| PPH 0,5/MWCNT | 1835 | 23,0 | 10,4 | 39,84 | 0,27 | 3,8 | 8,72 | 0,05 | -7,8 |
| PPH 0,5/MWCNT REG | 1813 | 8,7 | 9,1 | 39,61 | 0,24 | 3,2 | 8,67 | 0,01 | -8,3 |
| PPH 1/MWCNT | 1874 | 17,8 | 12,8 | 40,09 | 0,43 | 4,5 | 8,43 | 0,12 | -10,8 |
| PPH 1/MWCNT REG | 1849 | 28,4 | 11,3 | 39,22 | 0,69 | 2,2 | 8,20 | 0,24 | -13,2 |

Az erősítetlen PPH modulus értéke 1662 MPa-ról 1874 MPa-ra nőtt 1 m/m% MWCNT-vel töltött PP nanokompozit esetében. A javulás mértéke közel ~13%. A PP/MWCNT reciklátumok 0,3 m/m%-nál ~4%, 0,5 m/m%-nál ~9%, míg 1 m/m% erősítés esetében ~11%-os rugalmassági modulus növekedést mutatnak, a töltetlen PPH alapanyaghoz hasonlítva. A nyakképződéshez tartozó feszültségi értékekben elhanyagolható növekedést tapasztaltam, kivéve az 1 m/m%-os PP/MWCNT keveréket, ami ~4,5%-os növekedést mutatott az erősítetlen PP alapanyaghoz viszonyítva. A szakadási nyúlás értékeiben a PP nanokompozitok esetében is jelentős csökkenést tapasztaltam. Az 0,5 m/m%-os MWCNT reciklátum esetében 300%-os a csökkenés mértéke a töltetlen PP REG alapanyaghoz képest.

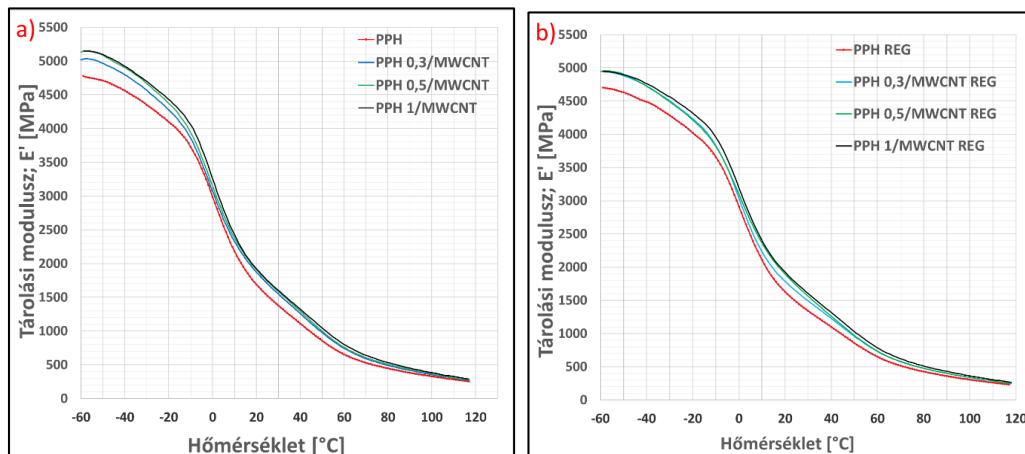
A PP nanokompozitok mechanikai tulajdonságainak eredményei alapján elmondható, hogy mind az MWCNT töltöttsége növeli a rugalmassági modulus értékét. A kialakult MWCNT fizikai térháló szerkezet, és az MWCNT kristályszerkezetre gyakorolt együttes hatása, ami kiváltja az erősítő hatást. A nyakképződési feszültség értékeiben szignifikáns különbséget nem tapasztaltam, viszont jelentősen csökkentik a szakadási nyúlás értékét. A PP/MWCNT reciklátumok minden esetben nagyobb merevséggel bírnak, mint a töltetlen PP alapanyagok. Az 1 m/m%-os PP/MWCNT REG rugalmassági modulus értéke szinte megegyezik az 1 m/m%-os PP/MWCNT keverékkel. A nyakképződési feszültség értékei a két reciklált PP bázisú nanokompozitnál nem változnak az újrafeldolgozás hatására.

A PP/MWCNT és reciklátumait összehasonlítva minimális különbséget tapasztalhatunk a rugalmassági modulus értékeiben. Az újrafeldolgozás hatása nem befolyásolta a merevségi tulajdonságait.

3.2 Dinamikus mechanikus analízis eredményeinek bemutatása

A PP bázisú nanokompozitok DMA mérései során vizsgálom a rugalmassági modulus valós részét, azaz a tárolási (E') és veszteségi (E'') modulus hőmérsékletfüggését. A tárolási modulus a deformált testben rugalmasan tárolt energiával arányos, míg a veszteségi modulus a rugalmassági modulus képzetes része, ami a testben disszipálódó, azaz hővé alakuló energiával arányos.

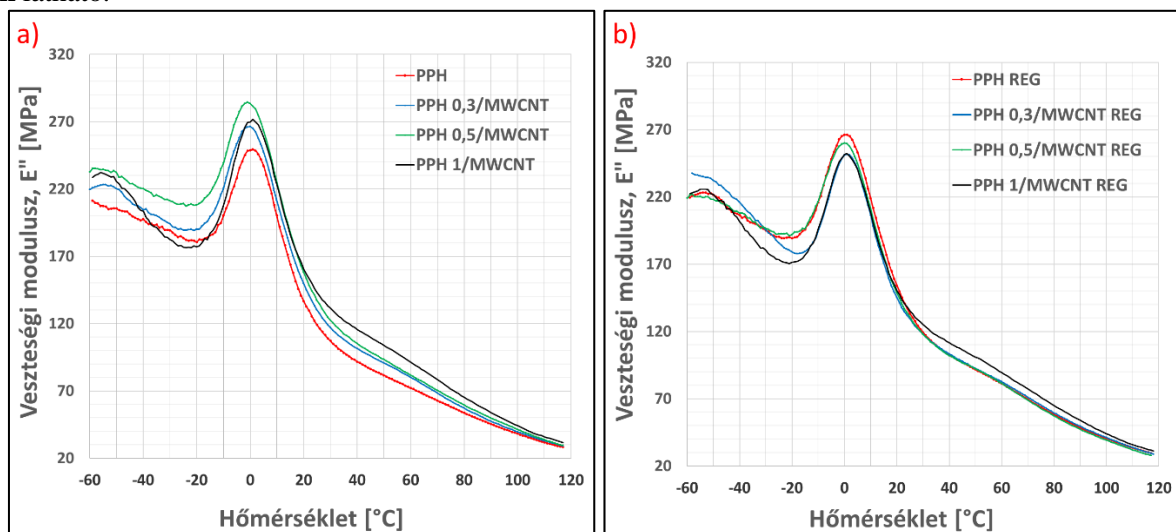
A homopolimer bázisú nanokompozitok (PP/MWCNT) és reciklátumai tárolási modulusainak hőmérsékletfüggését az **1. ábra** mutatja be.



1. ábra a) PP; PP/MWCNT kompozitok és b) PP REG; PP/MWCNT REG kompozitok tárolási modulusai (E') a hőmérséklet függvényében

A PP bázisú MWCNT kompozitok tárolási modulus értéke között releváns különbségek láthatóak T_g alatt a töltetlen PP alapanyaghoz képest. Az üvegedési hőmérséklet tartomány alatt magasabb merevségi tulajdonságokkal bírnak a PP/MWCNT kompozitok. A reciklátumok is hasonló tulajdonságot mutatnak, viszont a REG kompozitok alacsonyabb tárolási modulus értékkel (~5000MPa) rendelkeznek. A REG kompozitoknál T_g alatti tartományban az eltérő MWCNT töltöttségnek (0,3-0,5-1 m/m%) nincs hatása a tárolási modulus értékeire. A görbealakok a vizsgált hőmérséklet tartományban (-60°C-tól – 120°C-ig) mind a két kompozit rendszer esetében hasonlóak.

A PP, illetve PP/MWCNT kompozitok és reciklátumainak veszteségi modulus (E'') hőmérsékletfüggése **2. ábrán** látható.

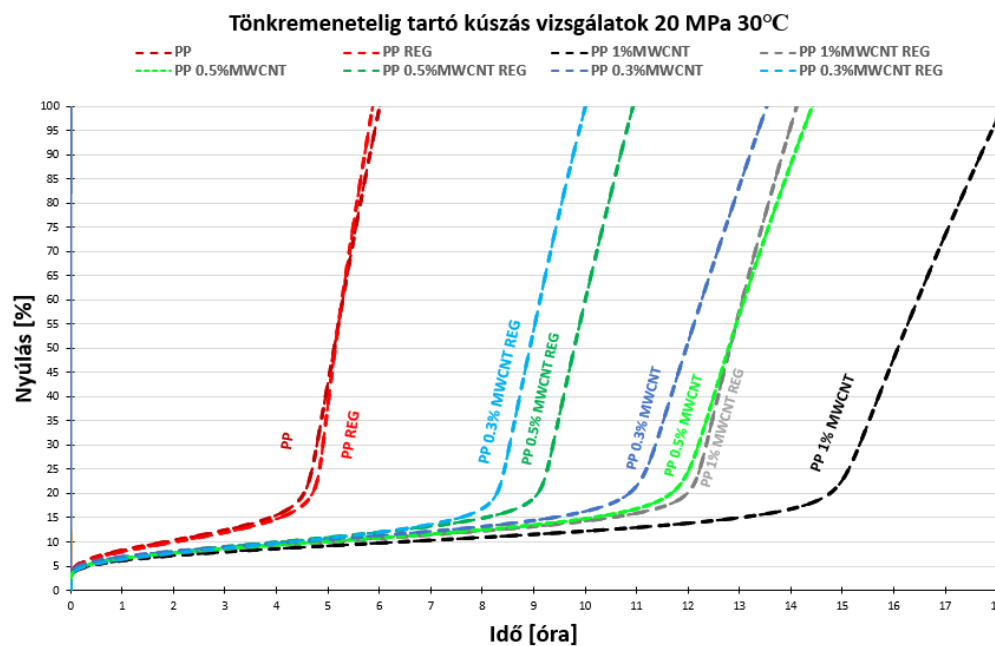


2. ábra a) PP; PP/MWCNT kompozitok és b) PP REG; PP/MWCNT REG kompozitok veszteségi modulusai (E'') a hőmérséklet függvényében

A PP/MWCNT kompozitok energia elnyelő képessége mind a három töltöttség (0,3-0,5-1 m/m%) esetében magasabb a vizsgált hőmérséklet tartományban (-60°C-tól – 120°C-ig), mint a PPH alapanyagé. A reciklátumok alacsonyabb veszteségi modulus értékkel bírnak a PPH REG alapanyaghoz képest. Magasabb hőmérsékleteken (20°C-tól 100°C-ig) mind a két (PPH/MWCNT, PPH/MWCNT REG) kompozit rendszernél magasabb értékeket láthatunk az erősítetlen alapanyaghoz képest.

3.3 PP/MWCNT és reciklátumainak kúszási tulajdonságainak kiértékelése

A mérésorozatot folyamán a próbatesteket állandó 30°C-on egy nagyobb, 20MPa-os terhelésnek tettem ki, ezzel tönkremenetelig kúszatva a mintákat. A görbék extrapolálása után pontosan meg tudtam határozni, az egyes kompozitok tönkremeneteli idejét.



3. ábra: Tönkremenetelig tartó kúszásvizsgálatok

Az ábrázolt kúszásgörbék alátámasztják az MWCNT megnöveli a PP alapanyag merevségét, valamint megnöveli a mechanikai igénybevétel szembeni ellenállását, ami több tanulmányban is említésre került [15][20]. Ez a mechanikai tulajdonságokra kifejtett erősítő hatás az én mérésomban a tönkremeneteli idő növekedését eredményezi az PP/MWCNT és a PP/MWCNT REG mintái esetében. Annak érdekében, hogy pontosan meghatározhassam mekkora is ez az erősítő hatás, a kúszásgörbéket extrapoláltam, majd az így kapott idő értékeket valamint a százalékos eltérést a PP alapanyaghoz képest táblázatba foglaltam.

2. táblázat: Az extrapolált tönkremeneteli pontok és az Originál PP alapanyagtól való eltérések százalékban

| MINTA NEVE | Extrapolált tönkremeneteli pont* (óra) | Originál PP alapanyagtól való eltérés (%) |
|-------------------|---|--|
| PP | 4,5 | - |
| PP REG | 4,7 | 4 |
| PP 0.3% MWCNT | 10,9 | 143 |
| PP 0.3% MWCNT REG | 8,2 | 82 |
| PP 0.5 MWCNT | 11,7 | 160 |
| PP 0.5% MWCNT REG | 9,0 | 101 |
| PP 1% MWCNT | 14,6 | 224 |
| PP 1% MWCNT REG | 12,0 | 166 |

*extrapolált tönkremeneteli pont: A kúszásgörbe tönkremenetel előtti és a tönkremenetel utáni szakaszára egy egyenest illesztettem, ezek metszéspontja megadja a tönkremenetel időpontját a vizsgált idő intervallumon.

Az extrapolációt követően minden mintát a natúr PP alapanyaghoz hasonlítottam. Az MWCNT töltés jelentősen növelte a minták kúszással szembeni ellenállását, ami 0.5%MWCNT töltés esetén 160%-kal az 1%MWCNT töltés esetén 224%-kal emelkedett a natúr PP alapanyaghoz képest, azaz több mint megháromszorozta a töltetlen alapanyag tönkremeneteli idejét.

Bár a degradáció hatása befolyásolta az MWCNT töltés erősítő hatásának mértékét a töltetlen PP-hez képest PP 0.3% MWCNT REG esetében 82% a PP 0.5% MWCNT REG esetében 101%-os a PP 1% MWCNT REG esetében pedig 166%-os erősítő hatást láthatunk, ami közel háromszoros tönkremeneteli időt jelent a natúr PP alapanyaghoz képest.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk elsődleges célkitűzése, annak a lehetőségnek a megvizsgálása, hogy az autópárházban széleskörben elterjedt polipropilén termékekből keletkező „selejt alapanyagok” MWCNT-vel történő újrafeldolgozása, képes lehet-e felvenni a versenyt az original alapanyagokkal és azok tulajdonságaival, ezáltal elősegítve az újrahasznosított alapanyagok visszaforgatását az ipari zárt gyártási körfolyamatba

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatából megállapítottuk, hogy a PPH/MWCNT és reciklátumait összehasonlítva minimális különbséget tapasztalhatunk a rugalmassági modulus értékeiben. Az újrafeldolgozás hatása nem befolyásolta a merevségi tulajdonságait a PPH alapanyagok.

A dinamikus mechanikai eredmények alapján megállapítható, hogy az MWCNT-k beépítése javítja a tárolási modulus értékét mind a PP bázisú kompozitban és reciklátumaikban egyaránt. A kompozitok és reciklátumainak üvegesedési hőmérsékleti értékei (T_g) 2-3°C-al csökkennek átlagosan, tehát elmondható, hogy a változás nem szignifikáns

Időfüggő mechanikai vizsgálatok (kúszás) releváns különbséget mutattak. A tönkremenetelig tartó kúszás eredményeiből állapítható, hogy az MWCNT kedvező mechanikai tulajdonságainak, valamint a merevségre kifejtett hatása miatt a PP/MWCNT, illetve PP/MWCNT REG minták kúszási hajlama jelentősen csökkent

5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052 számú pályázat támogatásával jött létre. A projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által meghirdetett pályázat keretében valósult meg.

6. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Yashas GT Girijappa; Vinod Ayyappan; Madhu Puttegowda; Sanjay M Rangappa; Jyotishkumar Parameswaranpillai; and Suchart Siengchin, “Plastics in Automotive Applications,” Amsterdam: Elsevier, 2020.
- [2] S. A. Pradeep, R. K. Iyer, H. Kazan, and S. Pilla, “Automotive Applications of Plastics: Past, Present, and Future,” in *Applied Plastics Engineering Handbook*, Elsevier, 2017, pp. 651–673. doi: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00031-6.
- [3] A. Patti, R. Barretta, F. Marotti de Sciarra, G. Mensitieri, C. Menna, and P. Russo, “Flexural properties of multi-wall carbon nanotube/polypropylene composites: Experimental investigation and nonlocal modeling,” *Compos Struct*, vol. 131, pp. 282–289, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.05.002.
- [4] H. M. Zidan, E. M. Abdelrazek, A. M. Abdelghany, and A. E. Tarabiah, “Characterization and some physical studies of PVA/PVP filled with MWCNTs,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 904–913, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.04.023.
- [5] S. Bansal, N. Kumar, and P. Jindal, “Effect of MWCNT Composition on the Hardness of PP/MWCNT Composites,” *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 2, pp. 3867–3871, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.285.
- [6] M. Kartel, Yu. Sementsov, S. Mahno, V. Trachevskiy, and W. Bo, “Polymer Composites Filled with Multiwall Carbon Nanotubes,” *Universal Journal of Materials Science*, vol. 4, no. 2, pp. 23–31, Mar. 2016, doi: 10.13189/ujms.2016.040202.
- [7] Y. Zou, Y. Feng, L. Wang, and X. Liu, “Processing and properties of MWNT/HDPE composites,” *Carbon N Y*, vol. 42, no. 2, pp. 271–277, 2004, doi: 10.1016/j.carbon.2003.10.028.

-
- [8] T. Ogasawara, Y. Ishida, T. Ishikawa, and R. Yokota, "Characterization of multi-walled carbon nanotube/phenylethynyl terminated polyimide composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 35, no. 1, pp. 67–74, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2003.09.003.
- [9] M.-K. Seo and S.-J. Park, "Electrical resistivity and rheological behaviors of carbon nanotubes-filled polypropylene composites," *Chem Phys Lett*, vol. 395, no. 1–3, pp. 44–48, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.cplett.2004.07.047.
- [10] F. Thiébaud and J. C. Gelin, "Multiwalled carbon nanotube/polypropylene composites : investigation of the melt processing by injection molding and analysis of the resulting mechanical behaviour," *International Journal of Material Forming*, vol. 2, no. S1, pp. 149–152, Aug. 2009, doi: 10.1007/s12289-009-0474-0.
- [11] D. Bikiaris, "Microstructure and Properties of Polypropylene/Carbon Nanotube Nanocomposites," *Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 2884–2946, Apr. 2010, doi: 10.3390/ma3042884.
- [12] K. Prashantha, J. Soulestin, M. F. Lacrampe, P. Krawczak, G. Dupin, and M. Claes, "Masterbatch-based multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites: Assessment of rheological and mechanical properties," *Compos Sci Technol*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1756–1763, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.10.005.
- [13] S. H. Yetgin, "Effect of multi walled carbon nanotube on mechanical, thermal and rheological properties of polypropylene," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4725–4735, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.08.018.
- [14] J. Yang, Z. Zhang, K. Friedrich, and A. K. Schlarb, "Creep resistant polymer nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes," *Macromol Rapid Commun*, vol. 28, no. 8, 2007, doi: 10.1002/marc.200600866.
- [15] "<https://www.nanocyl.com/product/plasticyl-pp2001/> 2023.03.30."
- [16] "<https://www.inteszt.hu/adatlap/muanyag-es-gumivizsgalat/mintaelokeszito-feldolgozo-gepek/extruderek/scientific-modularis-ikercsigas-extruder> 2023.02.21."