

KISS LÓRÁNT<sup>1</sup>, SZAKÁCS ÁKOS<sup>1</sup>, HOMLOK RENÁTA<sup>2</sup>, TEGZE ANNA<sup>2</sup>, MÉSZÁROS LÁSZLÓ<sup>1,3</sup>

# GUMIŐRLEMÉNY FELÜLETAKTIVÁLÁSA VÍZ KÖZEGŰ, ELEKTRONSUGÁRZÁSOS KEZELÉSSSEL ÉS ALKALMAZÁSA GUMIKEVERÉKEKBEN

## SURFACE ACTIVATION OF GROUND TIRE RUBBER VIA WATER-BASED ELECTRON BEAM IRRADIATION AND ITS APPLICABILITY IN RUBBER MIXTURES

Az életútjuk végére ért gumiabroncsok körforgásos gazdaságba történő integrálása jelenleg még nem teljesen megoldott, az anyagában történő újrahasznosításuk során új és gazdaságos technológiák kifejlesztése szükséges. Ebben a kutatásban egy újfajta, víz közegű sugárkezelést végeztünk el hulladék gumiőrleményen (GTR) elektronsugárzás segítségével, különböző elnyelt dózissal felületaktiválásának céljából. A sugárkezelt gumiőrleményeket természetes kaucsuk alapú keverékekben alkalmaztuk, majd vizsgáltuk a vulkanizációs és mechanikai tulajdonságaikat a sugárkezelés hatásának függvényében. A vulkanizációs görbék alapján elmondható, hogy a besugárzás hatására a maximális nyomatékok magasabb tartományban mozogtak, a keverékek deformációval szembeni ellenállása javult, ami a fázisok közötti jobb kapcsolatra utal. A sugárkezelés hatására a vulkanizátumok szakítószilárdsága nőtt, a legjobb eredményt 40 kGy elnyelt dózis esetén értük el (16%-os növekedés). A szakadási nyúlás értékek nem csökkentek, ami előnyös, ezenkívül a továbbszakító szilárdság 3%-kal nőtt 80 kGy elnyelt dózis esetén. A felületaktiválás hatására tehát a GTR tartalmú vulkanizátumokban a fázisok közötti kapcsolat javult, ami a jobb mechanikai tulajdonságokban mutatkozott meg.

The integration of end-of-life tires into the circular economy is still not fully resolved, and the development of new, cost-effective technologies for their recycling is necessary. In this research, a novel water-based irradiation treatment was performed on ground tire rubber using electron beam radiation with various absorbed doses to activate the surface of ground tire rubber (GTR). The irradiated GTRs were incorporated into natural rubber-based compounds, and their vulcanization and mechanical properties were examined to explore the effect of the radiation treatment. Based on the vulcanization curves, it can be stated that the maximum torque values increased due to irradiation, enhancing the resistance of the compounds to deformation that refers to improved adhesion between phases. The tensile strength of the vulcanizates increased with irradiation, achieving the best results at an absorbed dose of 40 kGy, where an improvement of 16% compared to the reference was observed. Along with the increase in strength, the elongation at break values did not decrease, which is advantageous, and the tear strength increased by 3% at an absorbed dose of 80 kGy. Thus, surface activation improved the interphase interactions in GTR-containing vulcanizates, resulting in better mechanical properties.

### 1. BEVEZETÉS

Az utakon napjainkban egyre több gépjármű jelenik meg, ez a gyors növekedés évente óriási mennyiségű hulladék abroncsot eredményez [1]. 2020-ban csak Európában több mint 324 millió új abroncsot értékesítettek és ez napjainkban is növekvő tendenciát mutat. A hulladék abroncsok mennyisége várhatóan 2030-ra eléri az 5 milliárdot, és bár ezeknek a begyűjtési aránya

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

<sup>2</sup> HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Felületkémi és Katalízis Laboratórium, Sugárgémi Csoport, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29-33.

<sup>3</sup> HUN-REN-BME Kompozittechnológia Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Európában közel 95%-ra nőtt, csupán 42%-ukat hasznosítják újra [2, 3]. Ezt mindenképpen növelni kell, ugyanis az abroncsok hulladéklerakókban történő elhelyezése rengeteg kockázattal jár, mérgező anyagok oldódhatnak ki belőlük, továbbá ezek a lerakatok felgyulladhatnak és eloltásuk szinte lehetetlen (lásd Kuvaitban) [4]. Az életútjuk végére ért abroncsokat magas fűtőérté-  
kükből kifolyólag cementégető kemencékben alkalmazzák (energetikai hasznosítás), azonban ebben az esetben is mérgező anyagok juthatnak a környezetbe, továbbá az értékes nyersanyagok végleg elvesznek [5, 6]. A körforgásos gazdaság kialakítása érdekében tehát a legjobb megoldás az ún. anyagában történő újrahasznosítás megvalósítása lenne, amikor az abroncsokat alkotó anyagoknak új „életet” vagyunk képesek adni.

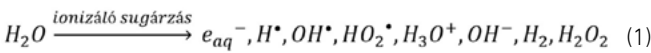
Az életciklusuk végére ért abroncsok anyagában történő újrahasznosításának első lépése a méretcsökkentés. Itt valamilyen őrlési módszerrel (kriogén, vízsugaras stb.) kis részecskeméretű gumiőrleményt (GTR) állítanak elő [7]. Az előállított GTR-t ezt követően új mátrixban használják fel, ami lehet bitumen [8, 9], termoplasztikus polimer [10, 11], illetve gumi [12, 13] is. Az így létrejött anyagokat pedig új termékek gyártásához lehet használni, így visszakerülve a körforgásba és elősegítve a körforgásos gazdaság kialakítását [14]. Az esetek legnagyobb részében a GTR és a mátrix anyag nem tud megfelelően együttműködni (rossz kompatibilitás), így ennek eredményeképpen a kész keverékek is gyenge mechanikai tulajdonságokkal fognak rendelkezni, ami korlátozza a felhasználási területeket. A fázisok közötti kapcsolatot különböző módszerekkel javítani lehet, ilyenek a felületaktíváló technológiák, amelyek során a gumiőrlemény felületét aktívabbá teszik, így az erősebben tud kapcsolódni a mátrixhoz [3].

Az első ilyen felületmódosító technológiák a vegyszeres kezelések voltak [15, 16], gyakran alkalmaztak erős savakat, amik képesek voltak a GTR felületét szegmentáltabbá tenni, illetve aktív csoportokat is létrehozni rajta, így segítve a jobb kapcsolat kialakítását a mátrixszal. Ezeknek a technológiáknak a méret-növelése, továbbá a vegyszerek ártalmatlanítása költséges és nehézkes, ezért nem terjedtek el az iparban [3]. Lehetséges a gumiőrlemény felületén kémiaiilag aktív csoportokat ionizáló sugárzásos technológiákkal is létrehozni, ami egy intenzíven kutatott terület napjainkban [17-19]. A nagyenergiájú sugárzások és a polimerek kölcsönhatása során több, egymással versengő reakció megy végbe, ilyen a térhálósodás, lánctördelődés, ojtás és oxidáció. Utóbbi különösen fontos az újrahasznosítás szempontjából [20].

A sugárkezelések leggyakrabban levegőben történnek, ebben az esetben két folyamat segíti a GTR felületének aktiválását. A sugárzás hatására reaktív gyökök keletkeznek, amelyek képesek a levegő oxigénjével reakcióba lépni, továbbá a keletkező ozon is meg tudja támadni a felületet, így oxigén tartalmú funkciók csoportokat létrehozni [21]. Ezek a feldolgozás során hatékonyan reakcióba lépnek a friss gumi vulkanizáló rendszerével, ezáltal több és erősebb kötéseket alakítanak ki a mátrixszal, így biztosítva a jobb kompatibilitást a fázisok között, javítva a mechanikai tulajdonságokat és szélesíteni a felhasználási területeket. Korábbi kutatásunk [22] szerint a GTR levegőben történő sugárkezelésének hatására bekövetkező felület aktiválás segíti a jobb kapcsolat kialakulását a mátrixszal. Ennek eredményeképpen az anyagok mechanikai tulajdonságai, mint a szakító- és továbbszakító szilárdság, javultak a nyúlási tulajdonságok romlása nélkül. Ezekben az esetekben a legjobb eredményeket 60-80 kGy

elnyelt dózissal értük el, azonban gazdasági és környezeti szempontból is érdemes lenne ezt csökkenteni.

A víz radiolízise (1) során nagyon erős oxidálószer keletkezik [23], amelyek képesek a GTR felületét megtámadni és ott reaktív funkciók csoportokat (peroxidok, hidroperoxidok stb.) létrehozni [24]. Korábbi kutatásainkban [24, 25] bebizonyítottuk, hogy víz közegben történő sugárkezelés során már kisebb dózisok esetén is jelentősen megnövekedik a felületi oxigén mennyisége, így ez egy sokkal intenzívebb felületkezelési módszer. A felületkezelés hatására a fázisok közötti adhézió nagymértékben javult, ami a GTR tartalmú vulkanizátumok mechanikai tulajdonságainak jelentős javulását eredményezte. A kísérleteket <sup>60</sup>Co sugárforrással végeztük, gazdasági szempontból fontos lenne a gumiőrlemény felületének aktiválását elektronsugárzással megvalósítani, ez ugyanis egy sokkal gyorsabb és olcsóbb technológia.



Mindezek alapján elmondható, hogy az életútjuk végére ért gumiabroncsok kezelése komoly kihívást jelent, a körforgásos gazdaság kialakítása érdekében szükséges gazdaságos és környezetbarát anyagában történő újrahasznosítási technológiák kidolgozása. Következésképpen, ebben a tanulmányban egy újfajta, víz közegben elektronsugárzással megvalósított felületaktiválási technológiát dolgoztunk ki, hogy a fázisok közötti kapcsolatot javítani tudjuk. A különböző dózissal kezelt GTR-eket természetes kaucsuk alapú keverékekben alkalmaztuk. Meghatároztuk ezek vulkanizációs tulajdonságait és különböző mechanikai (szakító és továbbszakító) vizsgálatokat is elvégeztünk a sugárkezelés hatásának vizsgálatára érdekében.

2. ALAPANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. ALAPANYAGOK

A kutatásunk során a Hungarojet Kft. által nagynyomású vízsugaras őrléssel tehergépjárművek oldalfalából előállított gumiőrleményt használtunk. A GTR közelítő összetétele a következő volt: 50-55 phr természetes kaucsuk, 45-50 phr szintetikus kaucsuk, 33-37 phr korom, 7,5 phr maradék adalékanyagok, 6 phr olaj. Az eredményeket termogravimetriás analízissel határozták meg Simon és társai [26] egy korábbi kutatásban.

A felhasznált GTR szemcseméret eloszlását az 1. táblázatban foglaltuk össze, amelyet BA 200N típusú szitarázóval (CISA Cedaceria Industrial, Barcelona, Spanyolország) 75, 125, 250 és 500 µm-es szitákkal határoztunk meg.

1. táblázat: Az alkalmazott GTR szemcseméret eloszlása

| Méret (µm) | Tömegszázalék (%) |
|------------|-------------------|
| >500       | 1,7               |
| 250-500    | 21,7              |
| 125-250    | 55,9              |
| 75-125     | 16,1              |
| <75        | 4,6               |

2. táblázat: A gumikeverékek előállításához alkalmazott alapanyagok

| Anyag                                        | Gyártó                                         | Márkanév           | Funkció         |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----------------|
| Természetes kaucsuk (NR)                     | Sud Comoé Caoutchouc (Adaou, Elefántcsontpart) | NR CV 60           | mátrix          |
| Sztearinsav                                  | Oleon (Ertvelde, Belgium)                      | Radiacid 0444      | aktivátor       |
| Cink-oxid (ZnO)                              | Werco Metal (Zlatna, Románia)                  | ZnO WZ-1           | aktivátor       |
| Paraffinos olaj                              | Hansen und Rosenthal (Hamburg, Németország)    | Tudalen 3036       | lágító          |
| N-ciklohexil-2-benzotiazol-szulfénamid (CBS) | Rhein Chemie (Mannheim, Németország)           | Rhenogran® CBS-80  | gyorsító        |
| Tetrametil-tiurám-diszulfid (TMTD)           | Lanxess (Köln, Németország)                    | Rhenogran® TMTD-70 | gyorsító        |
| N 772 korom (CB)                             | Omsk Carbon Group (Omsk, Oroszország)          | N-772 OMSK         | töltőanyag      |
| Kén                                          | Ningbo Actmix Rubber Chemicals (Ningbo, Kína)  | Curekind Sulphur   | térhálósítószer |

A gumikeverékek előállításához felhasznált anyagokat, továbbá azok funkcióját az 2. táblázatban foglaltuk össze.

## 2.2. GUMIÖRLEMÉNY KEZELÉSE ELEKTRONSUGÁRZÁSSAL

A GTR sugárkezelését a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Felületkémi és Katalízis Laboratórium, Sugárkémi Csoportjánál végeztük el egy TESLA LINAC LPR-4 típusú elektrongyorsító segítségével. Ezzel 4 MeV energiájú, 800 ns impulzusidejű felgyorsított elektronokat lehet előállítani. Minden dózis esetében 25 g GTR-t sugaraztunk be 100 ml desztillált víz közegben, amelyhez a besugárzás előtt 0,5 ml Triton X-100 (Sigma-Aldrich, Missouri, USA) felületaktív adalékanyagot adtunk. A besugárzást négyszer ismételtük meg az egyes dózisok esetén, így összesen 100 g felületaktivált GTR-t állítottunk elő a kísérletek során. Az adalékanyag nélkül nem lennének képesek megfelelő szuszpenziót létrehozni a GTR hidrofób jellege miatt, nagymértékben rontva a

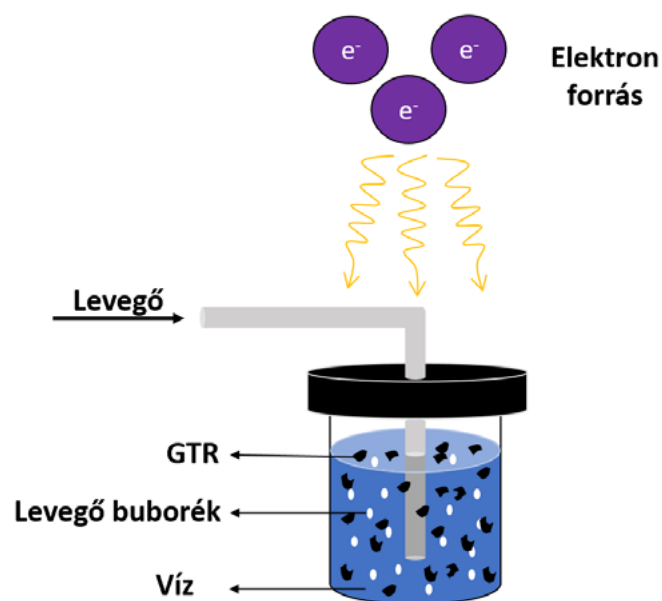
sugárkezelés hatékonyságát. A besugárzás során egy szilikon csövön keresztül levegő buborékoltatást végeztünk folyamatos kevertetés mellett, ezzel biztosítva a megfelelő mennyiségű oxidálószer jelenlétét a radiolízishez, illetve megakadályozva a GTR edény aljára történő kiülepedését. Az általunk vizsgált dózisok: 0 (referencia), 20, 40, 60 és 80 kGy voltak. Az elektronsugárzásos kezelés során alkalmazott elrendezés az 1. ábrán látható.

## 2.3. RECEPTÚRA ÉS KEVERÉKKÉSZÍTÉS

A kísérleteink során alkalmazott gumikeverékek receptúráját a 3. táblázatban foglaltuk össze. A GTR\* az adott dózist elnyelt gumiorleményt jelöli. A referencia minden esetben kezeletlen GTR-t tartalmazott. Az anyagok 3. táblázatban bemutatott sorrendje (felülről lefelé) megegyezik a keverési sorrenddel is.

3. táblázat: Az egy lépéses keverés során alkalmazott receptúra

| Alapanyag     | Mennyiség (phr) |
|---------------|-----------------|
| NR            | 100             |
| CB            | 60              |
| ZnO           | 5               |
| Sztearinsav   | 2               |
| GTR*          | 100             |
| Paraffin olaj | 10              |
| CBS           | 1,25            |
| TMTD          | 0,6             |
| Kén           | 0,6             |



△ 1. ábra: Az elektronsugárzás során alkalmazott elrendezés sematikus ábrázolása

A gumikeverékeket egy Brabender Plasti-Corder (Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, Németország) típusú berendezéssel állítottuk elő. A keverőn a zónahőmérsékletek minden esetben 50 °C-ra voltak állítva, illetve a maximálisan alkalmazott fordulatszám 40 1/perc volt. Az utolsó alkotó hozzáadása után a keveréket még 2 percig kevertettük a megfelelő homogenitás elérése érdekében.

A keverékek vulkanizációs tulajdonságainak meghatározására egy MonTech D-RPA 3000 vulkamétert (MonTech Werkstoffprüfmaschinen GmbH, Buchen, Németország) használtunk. A reométerrel

20 perces vizsgálati idő, 160 °C hőmérséklet, 1°-os amplitúdó és 1,67 Hz frekvencia mellett végeztük a méréseket.

A belső keverőben előállított keverékekből Teach-Line Platen Press 200E (Dr. Collin GmbH, München, Németország) típusú hidraulikus prés segítségével állítottuk elő a vulkanizált lapokat (200 mm x 200 mm x 2 mm). A préselést 160 °C-on, 2,8 MPa nyomáson végeztük a vulkanizációs görbékből kapott vulkanizációs időkhöz ( $t_{90}$ ).

## 2.4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A szakítóvizsgálatokat a DIN 53504 szabvány alapján végeztük, 60 mm-es befogási hosszt és 500 mm/perc szakítási sebességet alkalmazva 1-es típusú próbatesteken. A továbbszakító vizsgálatokat ASTM D624 szabvány szerint végeztük, 56 mm-es befogási hosszal és 500 mm/perc szakítási sebességgel C-típusú próbatesteken. A továbbszakító vizsgálatok esetén egy szike segítségével a próbatesteken 1 mm-es bemetszést ejtettünk. A méréseket szobahőmérsékleten végeztük Zwick Z005 (Zwick GmbH, Ulm, Németország) típusú szakítógépen.

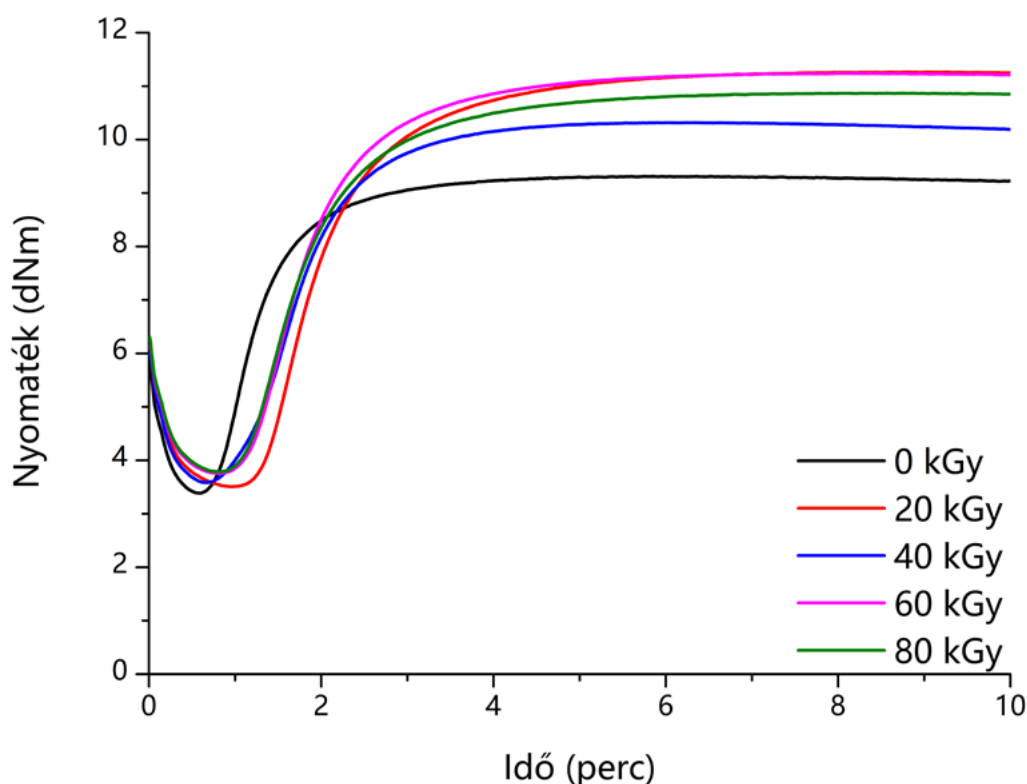
## 3. EREDMÉNYEK

A vizsgált keverékek vulkanizációs görbéit a 2. ábrán mutatjuk be. Az eredmények alapján elmondható, hogy a görbék minimális nyomaték értékeiben változás nem következett be. A maximális nyomaték értékek az elnyelt dózissal növekedtek a kezeletlen (referencia) GTR-t tartalmazó keverékhez képest. A legnagyobb

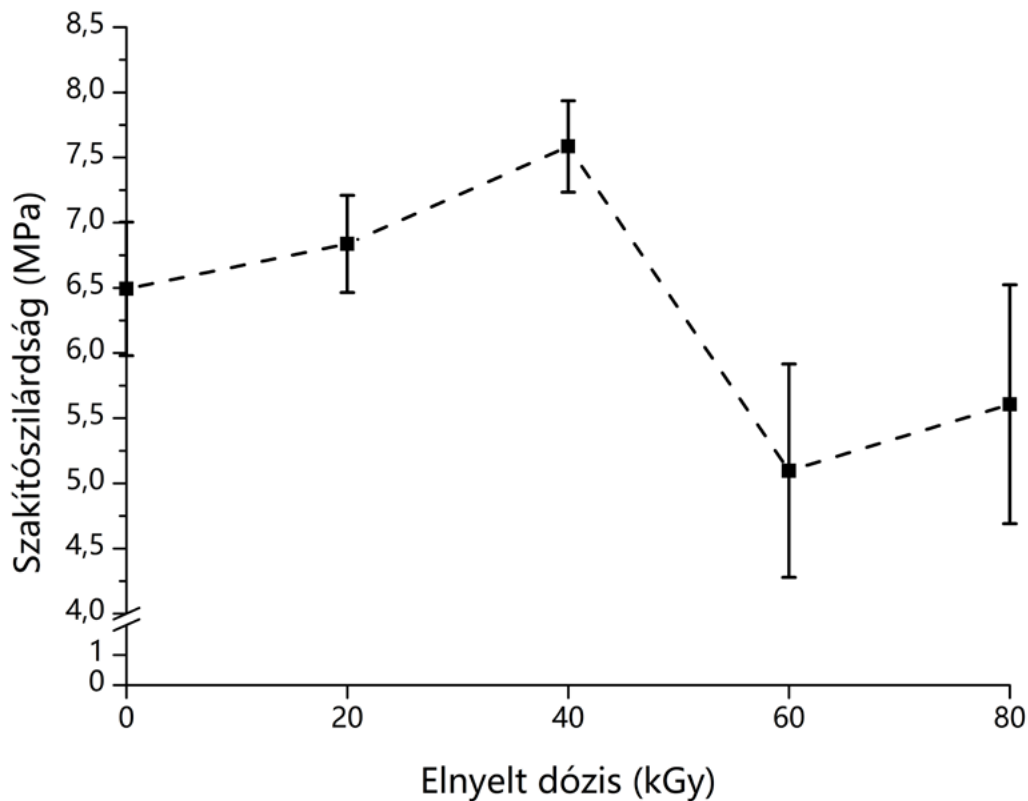
nyomaték értékeket a 20 és 60 kGy dózist elnyelt minták mutatták, ezekben az esetekben a referenciához képest több mint 20%-kal növekedett, illetve a többi dózis esetén is hasonlóan magas tartományban mozgott. Ezeknek a keverékeknek a deformációval szembeni ellenállása nagyobb volt, mint a referencia mintának, ami arra utal, hogy a fázisok között jobb kapcsolat alakult ki a sugárkezelés hatására. A nyerskeverékek vulkanizációs ideje 3 perc körül volt, ami a sugárkezelés hatására szignifikánsan nem változott.

A vulkanizátumok szakítószilárdság értékeit a 3. ábrán mutatjuk be. Az eredmények alapján látható, hogy kis elnyelt dózisok esetén a szilárdság nőtt. A 20 kGy dózissal kezelt GTR-t tartalmazó minta szakítószilárdsága több mint 5%-kal, a legjobb eredményt a 40 kGy dózissal kezelt minta érte el, ebben az esetben a referenciához képest több mint 16%-kal nőtt a szilárdság. A sugárkezelés hatására a felületen megjelenő, kémiaiailag reaktív csoportok képesek voltak a feldolgozás során jobb kapcsolatot kialakítani a mátrixszal, így ennek eredményeképpen a szilárdság nagymértékben javult. Megfigyelhető 60 kGy esetén egy jelentős csökkenés és a szórás is megnő, amely a sugárzás hatására bekövetkező degradáció eredménye lehet.

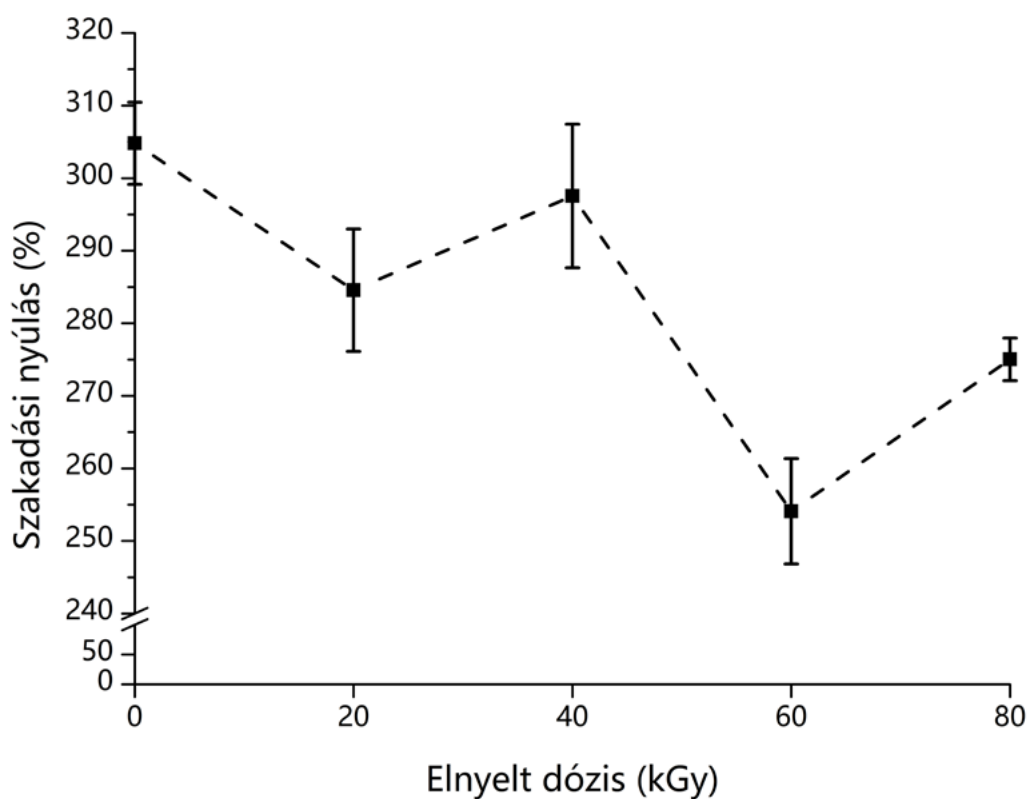
A GTR tartalmú vulkanizátumok szakadási nyúlás értékei (4. ábra) hasonló tendenciát mutatnak, mint az előbbieken bemutatott szakítószilárdság. A kisebb dózisok esetén a nyúlás értékek a referencia értéke (~300%) körül mozogtak, ami kifejezetten jó, ugyanis ezekben az esetekben sikerül a szilárdságot növelnünk a deformációs tulajdonságok romlása nélkül. Fontos továbbá megemlíteni, hogy ilyen nagy mértékben hulladék GTR-rel töltött rendszerek esetén ezek a nagy szakadási nyúlás értékek kifejezetten jónak mondhatók. Hasonlóan, 60 kGy esetén egy csökkenést látunk, ami a degradáció következménye lehet.



2. ábra: A vizsgált keverékek vulkanizációs görbéi



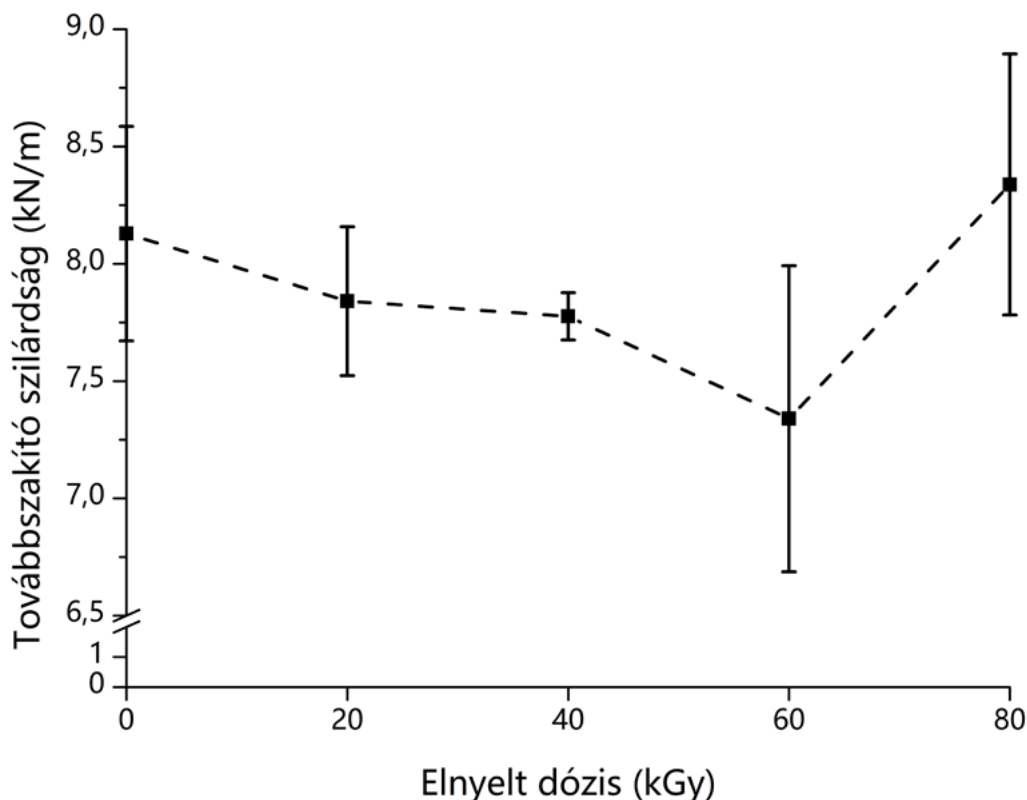
3. ábra: A vulkanizátumok szakítószilárdság értékei



4. ábra: A vulkanizátumok szakadási nyúlás értékei

Végezetül a vulkanizátumok továbbszakító szilárdságát vizsgáltuk, ez ugyanis jól jellemzi a repedésterjedéssel szembeni ellenállását az anyagnak. Mivel töltött rendszerek esetén a leggyengébb hely a fázisok határfelülete, ezért nagy valószínűséggel a repedés is ezen az úton megy végig a tönkremenetelig. Kisebb dózisok esetén jelentős változás nem következett be.

Az eredmények alapján a referenciához képest a nagyobb dózisoknál növekedés tapasztalható, 80 kGy elnyelt dózis esetén ez 3%. A nagyobb dózisoknál feltehetően a bekövetkezett degradáció miatt a GTR szerkezete kissé felbomlott, így jobban együtt tudott deformálódni a mátrixszal.



◀ 5. ábra: A vulkanizátumok továbbszakító szilárdsága

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kutatás során egy újfajta, víz közegű sugárkezelést végeztünk el hulladék gumiőrleményen elektronsugárzás segítségével, különböző elnyelt dózissal annak érdekében, hogy a GTR felületét aktívabbá tegyük. A gumiőrleményt ezt követően természetes kaucsuk alapú keverékekben alkalmaztuk, majd vizsgáltuk ezek mechanikai tulajdonságainak változását a sugárkezelés hatására. Az elnyelt dózissal a vulkanizációs görbék maximális nyomaték értéke növekedett, ami a keverékek deformációval szembeni ellenállásának javulására utal, amely a fázisok között kialakult jobb adhézióknak tulajdonítható. A jobb kapcsolat hatására a vulkanizátumok szakítószilárdsága 20 és 40 kGy esetén nőtt a referenciához képest, utóbbinál több mint 16%-kal, ami jelentősnek mondható. Ezzel párhuzamosan a szakadási nyúlás értékei nem mutattak jelentős csökkenést, így képesek voltunk a kezeléssel a szilárdságot növelni a deformációs tulajdonságok romlása nélkül. A továbbszakító szilárdságban a referenciához képest a legnagyobb növekedést a 80 kGy-es mintánál tapasztaltuk (3%), ami szintén a jobb kapcsolatnak tulajdonítható.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kiss Lóránt köszönetét fejezi ki az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP-24-3) támogatásáért. Köszönet illeti a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Atomenergia-kutató Intézet, Sugárbiztonsági Laboratóriumát a dozimetriai vizsgálatok során nyújtott szakmai tanácsokért.

### IRODALOMJEGYZÉK

- [ 1 ] Li J., Chen Z., Xiao F., Amirkhanian S. N.: Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt. Resources, Conservation and Recycling, 169, 105518 (2021).
- [ 2 ] Adhikari J., Das A., Sinha T., Saha P., Kim J. K.: Grinding of waste rubber. in 'Rubber recycling: Challenges and developments' (ed.: Kim J. K., Saha P., Thomas S., Haponiuk J. T., Aswathi M. K.), The Royal Society of Chemistry, London, Egyesült Királyság, 1-23 (2018).
- [ 3 ] Karger-Kocsis J., Mészáros L., Bárány T.: Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. Journal of Materials Science, 48, 1-38 (2013).
- [ 4 ] Susik A., Rodak A., Cañavate J., Colom X., Wang S., Formela K.: Processing, mechanical and morphological properties of GTR modified by SBS copolymers. Materials, 16, 1788 (2023).
- [ 5 ] Abbas-Abadi M. S., Kusenberg M., Shirazi H. M., Goshayeshi B., Van Geem K. M.: Towards full recyclability of end-of-life tyres: Challenges and opportunities. Journal of Cleaner Production, 374, 134036 (2022).
- [ 6 ] Valentini F., Pegoretti A.: End-of-life options of tyres. A review. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 5, 203-213 (2022).
- [ 7 ] Xiao Z., Pramanik A., Basak A. K., Prakash C., Shankar S.: Material recovery and recycling of waste tyres - a review. Cleaner Materials, 5, 100115 (2022).
- [ 8 ] Ibrahim H., Marini S., Desidery L., Lanotte M.: Recycled plastics and rubber for green roads: The case study of



- devulcanized tire rubber and waste plastics compounds to enhance bitumen performance. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 18, 200157 (2023).
- [ 9 ] Lo Presti D.: Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881 (2013).
- [ 10 ] Fazli A., Rodrigue D.: Thermoplastic elastomer based on recycled HDPE/ground tire rubber interfacially modified with an elastomer: Effect of mixing sequence and elastomer type/content. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61, 1021-1038 (2022).
- [ 11 ] Mészáros L., Bárány T., Czvikovszky T.: Eb-promoted recycling of waste tire rubber with polyolefins. *Radiation Physics and Chemistry*, 81, 1357-1360 (2012).
- [ 12 ] Simon D. Á., Bárány T.: Microwave devulcanization of ground tire rubber and its improved utilization in natural rubber compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11, 1797-1808 (2023).
- [ 13 ] Görbe Á., Kohári A., Bárány T.: Rubber compounds from devulcanized ground tire rubber: Recipe formulation and characterization. *Polymers*, 16, 455 (2024).
- [ 14 ] Araujo-Morera J., Verdejo R., López-Manchado M. A., Hernández Santana M.: Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Management*, 126, 309-322 (2021).
- [ 15 ] Colom X., Carrillo F., Cañavate J.: Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 44-50 (2007).
- [ 16 ] Elenien K. F. A., Abdel-Wahab A., ElGamsy R., Abdellatif M. H.: Assessment of the properties of PP composite with addition of recycled tire rubber. *Ain Shams Engineering Journal*, 9, 3271-3276 (2018).
- [ 17 ] Czvikovszky T.: Expected and unexpected achievements and trends in radiation processing of polymers. *Radiation Physics and Chemistry*, 67, 437-440 (2003).
- [ 18 ] Mészáros L., Kiss L.: Ionizing radiation: An effective aid in the recycling of polymer waste. *Express Polymer Letters*, 15, 1018-1018 (2021).
- [ 19 ] Ponomarev A. V., Gohs U., T Ratnam C., Horak C.: Keystone and stumbling blocks in the use of ionizing radiation for recycling plastics. *Radiation Physics and Chemistry*, 201, 110397 (2022).
- [ 20 ] Keizo M., Song C.: Basic concepts of radiation processing. in 'Radiation processing of polymer materials and its industrial applications' (ed.: Keizo M., Song C.) John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 1-25 (2012).
- [ 21 ] Sonnier R., Leroy E., Clerc L., Bergeret A., Lopez-Cuesta J. M.: Polyethylene/ground tyre rubber blends: Influence of particle morphology and oxidation on mechanical properties. *Polymer Testing*, 26, 274-281 (2007).
- [ 22 ] Kiss L., Simon D. Á., Bárány T., Mészáros L.: Synergistic effects of gamma pre-irradiation and additional vulcanizing agent in case of ground tire rubber containing vulcanizates. *Radiation Physics and Chemistry*, 201, 110414 (2022).
- [ 23 ] Le Caër S.: Water radiolysis: Influence of oxide surfaces on H<sub>2</sub> production under ionizing radiation. *Water*, 3, 235-253 (2011).
- [ 24 ] Kiss L., Berényi A. E., Németh M., Tegze A., Homlok R., Takács E., Mészáros L.: Enhanced surface activation of ground tire rubber via the radiolysis of water for effective rubber recycling. *Heliyon*, 10, e37454 (2024).
- [ 25 ] Kiss L., Mészáros L.: Recycling waste tire rubber through an innovative water-medium ionizing radiation treatment: Enhancing compatibility and mechanical performance. *Radiation Physics and Chemistry*, 216, 111475 (2024).
- [ 26 ] Simon D. Á., Pirityi D., Tamás-Bényei P., Bárány T.: Microwave devulcanization of ground tire rubber and applicability in SBR compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 137, 48351 (2020).

A POLIMEREK szakmai folyóiratot a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya hazai, lektorált tudományos folyóiratnak fogadja el, a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT) is magyar nyelvű, lektorált folyóiratként van nyilvántartva.

**Ezt jelzi Lektorált tudományos közlemények rovatunk, amelyben az egyetemektől és tudományos kutatóintézetektől kapott tudományos cikkeket a nemzetközi elvárásoknak megfelelően, a Tudományos Szerkesztőbizottságunk (egyetemi tanárok, MTA doktorok) lektorálása után közöljük.**

A tudományos cikkeknek külön jelölve van a rovatcímében, hogy *Lektorált tudományos közlemény*, ezek felépítése megfelel a szigorú nemzetközi normáknak, a magyar mellett angol nyelvű absztrakt foglalja össze az eredményeket, a cikk bevezetése tartalmazza a tudomány jelenlegi állását megfelelően alátámasztva hivatkozásokkal. A következő részben modern eszközökkel és módszerekkel elért eredményeket mutatják be a szerzők, az összefoglalás pedig rendszerezi a cikk eredményeit. A cikkek végén a köszönetnyilvánítás és az egyetemes irodalmi hivatkozás szerepel. Mindezek alapján valósulhatott meg, hogy a POLIMEREK az MTMT-ben lektoráltként szerepel mind a PhD, mind az MTA doktori eljárásokban – elismert és elfogadott folyóiratként.