

VIRÁG ÁBRIS DÁVID¹, MOLNÁR KOLOS^{1,2}

FERTŐTLENÍTŐ UV-C SUGÁRZÁS POLITEJSAVRA GYAKOROLT RONCSOLÓ HATÁSA

THE DESTRUCTIVE EFFECT OF GERMICIDAL UV-C RADIATION ON POLYLACTIC ACID

Jelen munkában fertőtlenítő UV-C sugárzás politejsav (PLA) fóliákra gyakorolt hatását vizsgáltuk. A fóliákat különböző sugárdózisokkal kezeltük. A sugárzás degradáló hatását gélpermeációs kromatográfiai vizsgálatokkal minősítettük. Megállapítottuk, hogy a besugárzás 0,5 óra elteltével a kiindulási értékhez képest 48%-kal, 8 óra elteltével pedig 94%-kal csökkentette a szám szerinti átlagos molekulatömeget. Ezután megvizsgáltuk a sugárzás mechanikai és reológiai tulajdonságokra gyakorolt hatását. Megállapítottuk, hogy mindkettő jelentős mértékben romlott a besugárzás hatására. A kutatás eredményeként meghatároztunk olyan paramétereket (szakadási nyúlás, nullviszkozitás), amelyek alkalmasak a fóliák degradációjának számszerűsítésére.

In the present work, the effect of germicidal UV-C radiation on polylactic acid (PLA) films was investigated. The films were treated with different irradiation doses. The degradative effect of the radiation was quantified by gel permeation chromatography. We found that irradiation reduced the number average molecular weight of the film by 48% after 0,5 h and by 94% after 8 h of irradiation. Then, we investigated the effect of irradiation on the mechanical and rheological properties. It was found that both properties were significantly deteriorated by irradiation. In this study, we provided parameters (elongation at break, zero shear viscosity) that are suitable for quantifying the extent of degradation of the films.

1. BEVEZETÉS

Az ultraibolya sugárzást hullámhossz alapján három részre oszthatjuk: UV-A (400-320 nm), UV-B (320-290 nm) és UV-C sugárzásra (290-200 nm). A Napból érkező UV sugárzás UV-C hullámhosszú részét a légkör kiszűri, így a természetben, földközélen csak az UV-A és UV-B sugárzással találkozhatunk [1]. Régóta ismert, hogy az UV-C sugárzás kiválóan alkalmas fertőtlenítésre, mert gátolja a különböző mikroorganizmusok (vírusok és baktériumok) növekedését, továbbá képes azok hatékony elpusztítására [2]. Éppen ezért az UV-C sugárzást kibocsájtó lámpatesteket évtizedek óta alkalmaznak medencék és akváriumok vizének [3, 4], továbbá középületek (pl. iskolák, kórházak) levegőjének [5, 6] fertőtlenítésére. A Covid-19 világjárvány alatt azonban nagy mennyiségben és viszonylag olcsón kerültek kereskedelmi forgalomba olyan UV-C sugárzást kibocsájtó, otthoni felhasználásra

szánt eszközök, amelyek segítségével fertőtleníthetjük a telefonokat, háztartási eszközeinket, illetve a különböző felületeket, pl. kilincseket [7]. Ugyanakkor az UV-C sugárzás műszaki anyagokra gyakorolt hatása hosszú távú expozíció esetén jelenleg még kevésbé feltárt.

2024-re a műanyag termékek sorsa és jövője az egyik legmeghatározóbb gazdaságpolitikai kérdéssé vált. Az Európai Unió 2019/904-es irányelve [8] célul tűzte ki bizonyos műanyag termékek környezetre (különösen a vízi környezetre) és az emberi egészségre gyakorolt negatív hatásainak megelőzését és csökkentését,

valamint betiltotta számos egyszer használatos műanyag termék (többek között az evőeszközök, tányérok és szívószalak) forgalomba hozatalát. Ennek következtében Magyarországon 2021. július 1-jén lépett hatályba a köznyelvben csak „magyar műanyag törvényként” emlegetett 2020. évi XCI. törvény [9] bizonyos egyszer használatos műanyagok forgalomba hozatalának betiltásáról, amely többek között betiltotta a 15-50 µm közötti falvastagságú műanyag zacskók gyártását, továbbá jelentősen növelte számos más műanyag termék termékárát. Mindezen szabályozások célja a műanyag hulladékok mennyiségének csökkentése a fenntartható, többször használatos alternatív eszközök révén, ezáltal a körforgásos gazdaság és a fenntarthatóság megvalósítása.

Ugyanakkor számos olyan terület van, ahol az egyszer használatos műanyagok egyelőre hatékonyan nem helyettesíthetők mással, ilyenek például az orvostechikai eszközök és csomagolásaik [10, 11]. Az Egészségügyi Műanyag Újrahasznosító Tanács (Healthcare Plastics Recycling Council) adatai alapján az Amerikai Egyesült Államok egészségügyi intézményei körülbelül 14 000 tonna hulladékot termelnek naponta(!), amelynek kb. 20-25%-a műanyag csomagolásnak és termékeknek tulajdonítható [12]. Ezekben az esetekben, ahol a műanyag csomagolás mellőzése vagy alternatív alapanyaggal való helyettesítése egészségügyi és/vagy higiéniai okokból nem megoldható, a legfenntarthatóbb megoldást jelenleg a lebontható bioműanyagok alkalmazása jelenti.

A European Bioplastics definíciója alapján a bioműanyagok biológiai erőforrásból származó és/vagy biológiai úton lebontható műanyagok [13]. A bioműanyagok közül napjainkban a legígéretesebb az ún. politejsav (PLA). Ezt jól mutatja az a tény, hogy a 2023-ban előállított bioműanyagok 31%-a PLA volt [14]. A politejsav egy biológiai erőforrásból (jellemzően kukoricából) előállított bioműanyag, amelyről általánosságban elmondható, hogy kifejezetten érzékeny a környezeti hatásokra (pl. nedvesség, magas hőmérséklet, fény) [15]. Az ilyen környezeti hatások következtében a politejsav hosszú láncmolekulái elkezdnek törledni, ezáltal csökken az átlagos molekulatömeg, amit degradációnak nevezünk [16]. Éppen ezért a politejsav UV-C sugárzás hatására bekövetkező degradációja kiemelt fontosságú lehet.

Jelen munkában PLA fóliákat különböző dózisu UV-C besugárzásnak tettünk ki, majd megvizsgáltuk, hogy a széles körben elérhető szakító és reológiai vizsgálatok mennyire alkalmasak a sugárzás hatására bekövetkező degradáció előrejelzésére. A kutatás célja olyan vizsgálati paraméterek meghatározása, amelyekkel a későbbiekben lehetővé válik a politejsav fóliákban bekövetkező degradáció mértékének számszerűsítése a költséges és kevés helyen elérhető, polimerek molekulatömeg-eloszlásának közvetlen meghatározására alkalmas gélpermeációs kromatográfiai vizsgálatok elvégzése nélkül.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

2.1. VIZSGÁLATI MINTÁK ELŐÁLLÍTÁSA

A vizsgálatokhoz szükséges fóliákat az Ingeo 4032D típusú politejsav (NatureWorks LLC, USA) anyagból állítottuk elő. A felhasznált

politejsav sűrűsége 1,24 g/cm³, D-laktid tartalma 1,4-2%, szám- (M_n) és tömeg- (M_w) szerinti átlagos molekulatömege pedig – gélpermeációs kromatográfiai méréseink alapján – rendre 124,0 és 228,9 kg/mol volt.

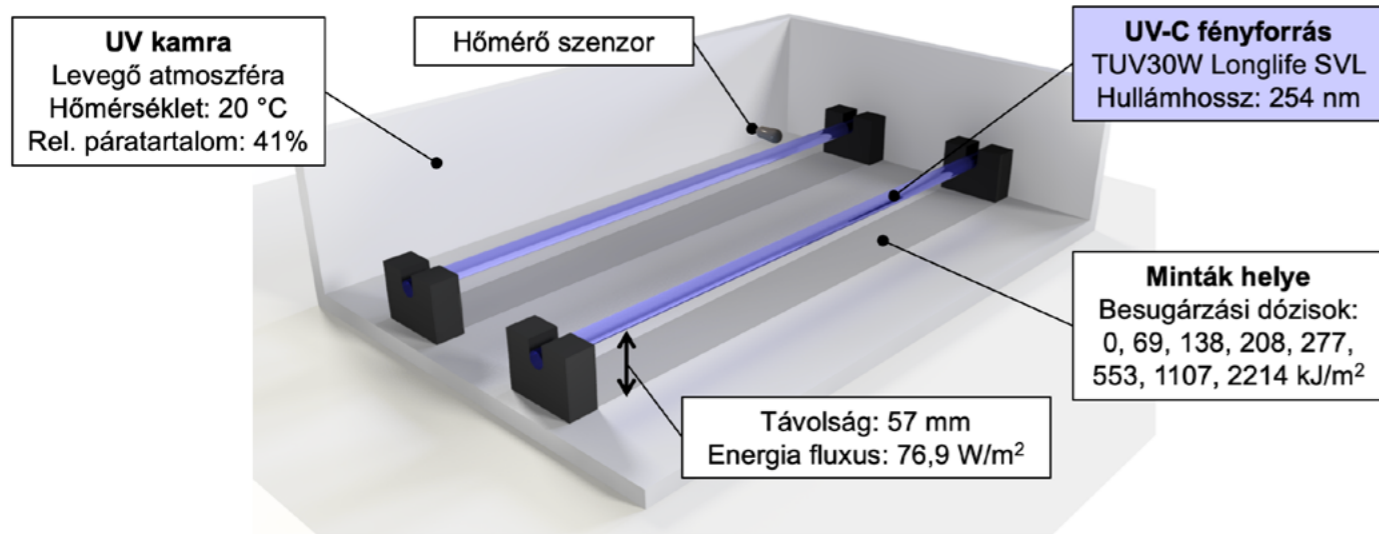
A feldolgozás előtt az alapanyagot egy Faithful WGLL-125 BE (Faithful Instrument (Hebei) Co. Ltd., Kína) forrólevegős szárítóban szárítottuk 4 órán keresztül, 80 °C-on. A vizsgálatokhoz szükséges PLA fóliát egy Labtech Scientific 25-30 C egységigás extruderrel (Labtech Engineering, Thaiföld) és egy LCR300 követő hengerral (Labtech Engineering, Thaiföld) állítottuk elő. Az extruder egy 25 mm átmérőjű, általános célú, háromzónás csigát tartalmazott, amelynek hossz/átmérő aránya (L/D) 30 volt. A fóliák előállításához egy 300 mm széles, 0,6 mm-es hézagmérettel rendelkező szélesrésű extruderszármot használtunk. A hőmérsékletprofil a garattól a szerszámig 200-200-210-210 °C volt, a szerszám hőmérsékletét pedig 220 °C-ra állítottuk be. A csiga sebessége 35 fordulat/perc volt. Az edzett, polírozott elhúzóhenger hőmérséklete 60 °C és kerületi sebessége 1 m/perc volt. Az ezt követő húzóhenger kerületi sebességét 1,8 m/perc-re állítottuk, így a nyújtási arány 1,8-ra adódott. Az előállított fóliák vastagsága 170±20 µm volt. Az extrudálás után a politejsav fóliák tulajdonságai még néhány napig jelentősen változhatnak az anyagban végbemenő relaxációs folyamatok miatt. Ezért annak érdekében, hogy kizárjuk a nedvesség és a relaxációs folyamatok anyagtulajdonságokra gyakorolt hatását, a mintákat egy hétig szilikagél szemcséket tartalmazó, lezárt tasakokban pihentettük.

2.2. FÓLIA MINTÁK BESUGÁRZÁSA

Az UV-besugárzáshoz egy saját készítésű besugárzó kamrát használtunk, amelyet két TUV30W Longlife SVL (Philips, Hollandia) higanygőzcsoves lámpával szereltünk fel. A kamra sematikus vázlatát az 1. ábra mutatja. A 28 mm átmérőjű és 0,9 m hosszúságú UV-csővek 254 nm hullámhosszú, szűk spektrális eloszlású sugárzást bocsátanak ki. A lámpatestek energia fluxusának mérésére egy RM-12 típusú radiométert használtunk UVBB radiometrikus érzékeldővel (UV Messtechnik Opsytec Dr Gröbel GmbH, Németország), amely a 230-400 nm-es spektrális tartományban érzékeny. A két fényforrást olyan távolságban (400 mm) helyeztük el, hogy csak az egyik fényforrásnak legyen degradáló hatása a cső alá helyezett próbatestre. Az előállított fóliákból kivágtott korong és piskóta alakú mintadarabokat közvetlenül a csövek alá helyeztük el. A minta és a cső közötti távolság 57 mm volt. A PLA fóliákat levegő atmoszférában, 20 °C környezeti hőmérsékleten és 41% relatív páratartalom mellett különböző expozíciós időket alkalmazva sugaraztuk be. Az alkalmazott besugárzási idők a következők voltak: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 4 és 8 h. Az UV-C sugárdózist (kJ/m²) az energia fluxus (Φ=76,9 W/m²) és a besugárzási idő (s) szorzataként határoztuk meg, így a következő dózisértékek adódtak: 0, 69, 138, 208, 277, 553, 1107 és 2214 kJ/m². Ezen dózisértékek értelmezését segíti, hogy a H1N1 vagy SARS-CoV-2 vírussal fertőzött, egészségügyben alkalmazott eszközökre az ajánlott fertőtlenítő UV-C sugárdózis 10 kJ/m² [17, 18].

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

² HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.



△ 1. ábra: A besugárzáshoz alkalmazott UV kamra sematikus vázlata

2.3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Az UV-C sugárzás hatására bekövetkező molekulatömeg csökkenés meghatározása érdekében gélpermeációs kromatográfiai (GPC) vizsgálatokat végeztünk. A besugárzott minták közül a 0; 0,25; 0,5; 1; 2 és 8 órán keresztül besugárzottakat vizsgáltuk. Ehhez egy VE 1122 oldószeres szállítórendszert (Viscotek, Malvern Panalytical, Egyesült Királyság) használtunk Shodex SE 61 törésmutató detektorral (Showa Denko, Japán). Az analízist 10 μ l térfogatú kloroform oldattal végeztük 0,5%-os m/V koncentrációval, 35 °C-on, 1 ml/perc áramlási sebességgel. Két Mixed-C Styragel típusú oszlopot használtunk (Agilent Technologies Inc., USA), amelyek a tömeg szerinti átlagos molekulatömeget tekintve (M_w) 200-2 000 000 g/mol közötti tartomány mérésére képesek. A kalibrációs görbe előállításához EasiCal Pre-prepared Calibration Kits polisztirol standardokat (Agilent Technologies Inc., USA) használtunk, amelyek szűk molekulatömeg-eloszlásúak.

A mechanikai tulajdonságokban bekövetkező változás elemzése érdekében szakítóvizsgálatokat végeztünk ISO 527-2:2012 szabvány szerint. Az extrudált fóliákból a gyártás irányával párhuzamosan, kézi stancológép segítségével szakító próbatesteket munkáltunk ki. A próbatestek alakja megfelelt az ISO 527-2:2012 szabvány 5A típusú, 75 mm hosszúságú piskóta alakú próbatest-jének. Az egytengelyű szakítóvizsgálatokat 25 °C-on végeztük egy Z005 típusú (Zwick GmbH, Németország) univerzális szakítógéppel, Zwick 8131 típusú, 200 N névleges teherbírású befogókkal. Minden esetben 9 elmozdulás-vezérelt vizsgálatot végeztünk, 50 mm-es kezdeti befogási hosszt és 2 mm/perc keresztfej sebességet alkalmazva. Az erőt egy nagy pontosságú Zwick 5 kN-os erőmérő cellával mértük, melynek felbontása 0,01 N. Az alakváltozást a keresztfej elmozdulás és a kezdeti befogási hossz hányadosaként számoltuk ki. A húzási rugalmassági moduluszt a 0,05% és 0,15%-os alakváltozás közötti húr meredekségként határoztuk meg. Azért választottuk a 0,15%-ot (a szabványos 0,25% helyett), mert az erősen degradált minták szakadási nyúlása kisebb volt, mint 0,25%. A törési munkát (W) J/cm³-ben

számoltuk ki a feszültség-nyúlás (σ - ϵ) görbe alatti terület integrálásával, ahol a feszültség és a nyúlás mértékegysége MPa, illetve 1. A 8 órán át besugárzott minta olyan mértékben degradálódott, hogy a befogás során eltört, így ezt már nem lehetett vizsgálni.

A referencia és a besugárzott minták reológiai tulajdonságait az ISO 6721-6:2019 szabvány szerint egy MCR-301 (Anton-Paar, Ausztria) rotációs reométerrel vizsgáltuk lap-lap elrendezésben, 25 mm-es átmérőjű lapokkal és 1 mm-es résmérettel. A méréseket 180 °C-on, oszcillációs módban végeztük. Az extrudált lemezekből 25 mm átmérőjű korongokat vágunk ki, majd hat korongot helyeztünk egymásra, hogy az 1 mm-es résméretet kitöltsük. A minták betöltése után öt perces tartózkodási időt alkalmaztunk annak érdekében, hogy a relaxációs folyamatok végbemenjenek és elérjük a termikus egyensúlyt. A lineárisan viszkoelasztikus régió (LVER) meghatározásához 0,1% és 10% közötti amplitúdóval nyúlás söpréseket végeztünk, $\omega=628$ rad/s körfrekvenciát alkalmazva, majd az amplitúdó söprések alapján minden esetben 5%-os nyúlás-amplitúdójú frekvencia söpréseket végeztünk 0,0628-628 rad/s körfrekvencia tartományban. A nyírósebességfüggő látszólagos viszkozitás értékeket, a Cox-Merz-szabályt alkalmazva, a frekvenciafüggő komplex viszkozitás értékekből határoztuk meg. A nullviszkozitás értékeket a frekvencia tartományban mért komplex viszkozitásgörbék első 5 pontjának átlagértékeként határoztuk meg.

3. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

3.1. A BESUGÁRZÁS MOLEKULATÖMEGRE GYAKOROLT HATÁSA

A referencia minták molekulatömegének mérése mellett gélpermeációs kromatográfiai (GPC) vizsgálatokkal számszerűsítettük a besugárzás okozta degradációt is. A 2/a ábra a PLA minták

molekulatömeg-eloszlását mutatja. A besugárzási idő növekedésével az eloszlásgörbék az alacsonyabb molekulatömegek felé tolódtak el, de a monomodális eloszlási görbék alakja és jellemzői 2 óráig hasonlóak maradtak (homogén degradáció). A diszperzitás (D), más néven polidiszperzitási index, 2 órás besugárzási időig csupán 2%-kal, majd 8 óra alatt 25%-kal nőtt.

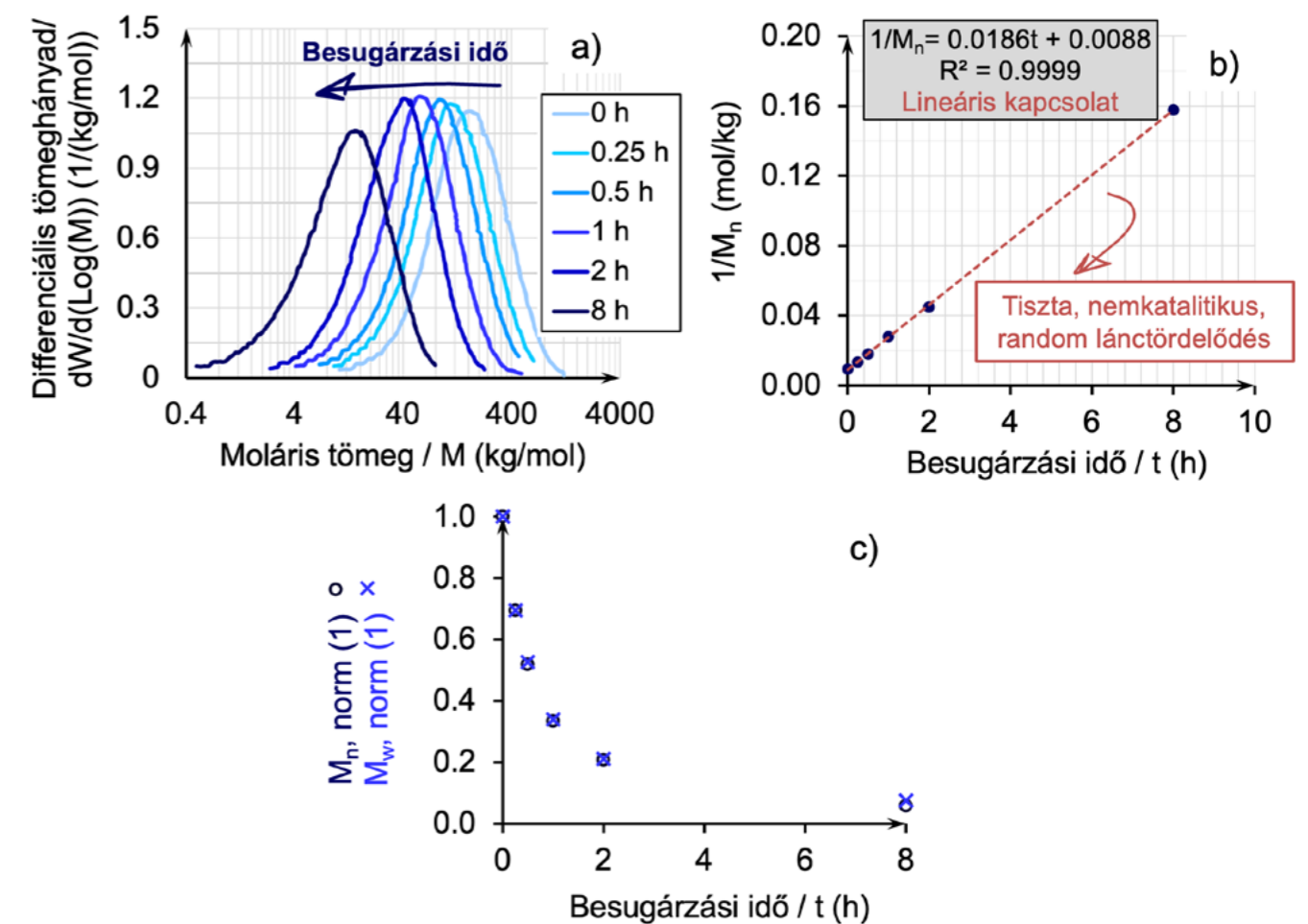
A bomlási folyamat jellege meghatározható a szám szerinti átlagos molekulatömeg (M_n) és a besugárzási idő (t) közötti fordított arányosságból. A 2/b ábra alapján látható, hogy jelen esetben ezek között szoros lineáris kapcsolat van ($R^2>0,995$), így arra következtethetünk, hogy a besugárzás hatására lejátszódó fotodegradációs folyamat egy tiszta, nem katalitikus, véletlenszerű lánc-töréldelési folyamat volt [19].

A 2/c ábra a normalizált ($M_{n, norm}$ és $M_{w, norm}$) szám- és tömeg szerinti átlagos molekulatömeg értékeket mutatja a besugárzási idő függvényében. A normalizálást úgy végeztük el, hogy az egyes adatsorokat elosztottuk az adott adatsor maximális értékével. A besugárzás 0,5 óra elteltével 48%-kal, 2 óra alatt pedig 79%-kal csökkentette a szám- és tömeg szerinti átlagos molekulatömeget a referencia PLA-hoz képest. 8 óra alatt pedig az $M_{n, norm}$ értéke a kiindulási érték 6%-ára csökkent. Ezek alapján megállapítható, hogy az alkalmazott besugárzási beállítások esetén az UV-C sugárzás igen erőteljes roncsoló hatással volt a politejsav fóliákra.

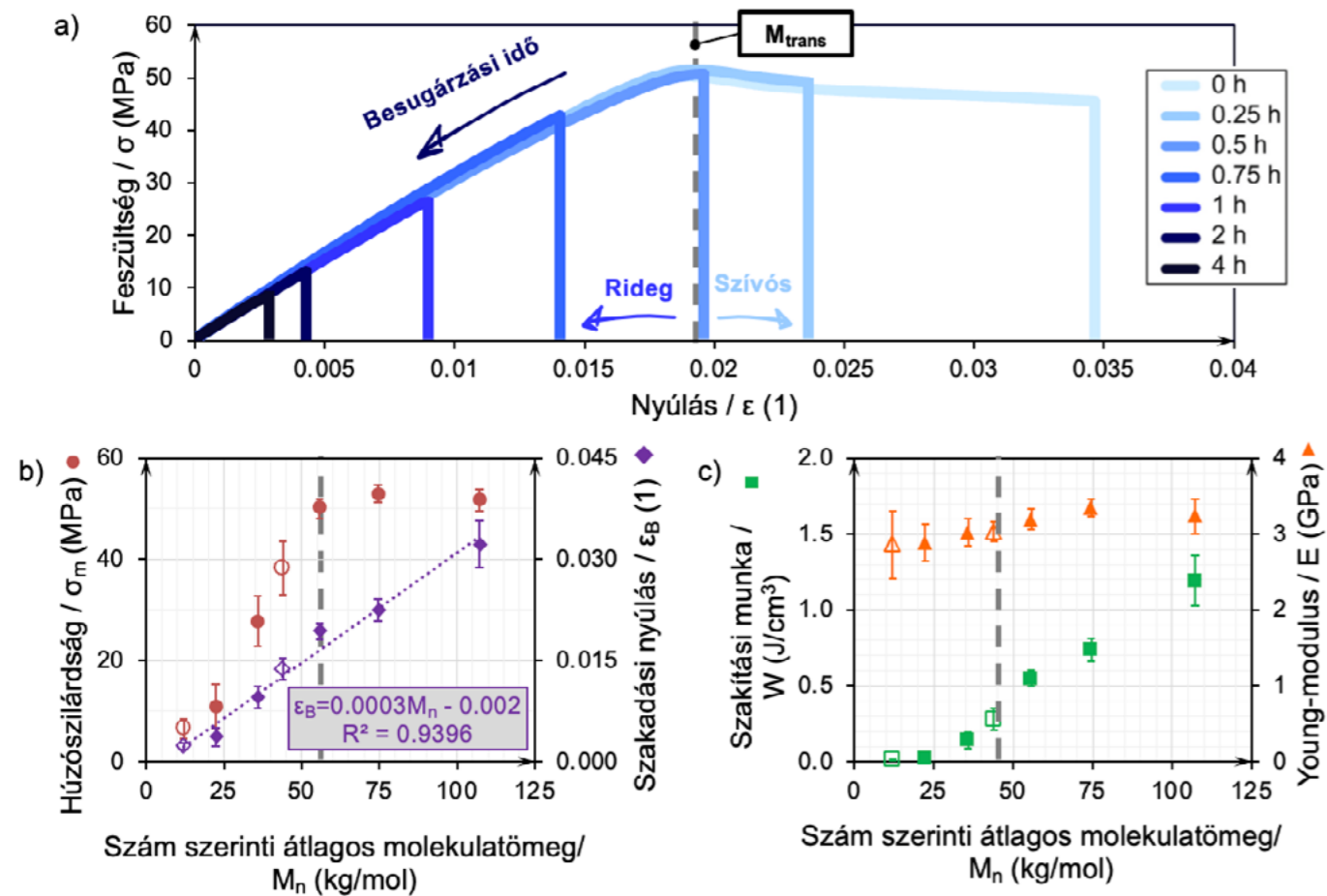
3.2. A BESUGÁRZÁS MECHANIKAI TULAJDONSÁGOKRA GYAKOROLT HATÁSA

A mechanikai tulajdonságok változásainak elemzésére szakítóvizsgálatokat végeztünk. A 3/a ábra a szakítógörbe változását mutatja a besugárzási idő függvényében. Látható, hogy a besugárzási idő növekedésével a görbe alakja változatlan marad, csak a szakadási nyúlás csökken. Olyan, mintha a besugárzási idő növelésével ugyanannak a görbének egyre kisebb, kezdeti szakaszát kapnánk meg. Az ábrán látható, hogy 0,5 órás besugárzási időnél definiálható egy átmeneti molekulatömeg érték ($M_{trans}=55,74$ kg/mol), amely felett az anyag szívós, alatta pedig rideg viselkedést mutat.

A 3/b ábra a szakítószilárdságot és a szakadási nyúlást, míg a 3/c ábra a szakítószilárdságot és a Young-moduluszt mutatja a szám szerinti átlagos molekulatömeg (M_n) függvényében. A szakadási nyúlás és a szakítási munka már kis besugárzási idő esetén is jelentősen csökkent. 0,5 óránál rövidebb UV-C sugárkezelésekkel (M_{trans} felett) a besugárzott minták szakítószilárdsága nem mutatott szignifikáns különbséget a referencia mintához képest. 0,5 óránál hosszabb besugárzási idő esetén (M_{trans} alatt) a szakítószilárdság csökkent. A degradált minták moduluszai statisztikailag megegyeznek a referencia polimer moduluszával.



△ 2. ábra: A molekulatömeg változása a besugárzási idő függvényében: a) a besugárzott PLA minták molekulatömeg-eloszlása, b) a szám szerinti átlagos molekulatömeg és a besugárzási idő inverze közötti kapcsolat, c) normalizált szám- és tömeg szerinti átlagos molekulatömeg.



△ 3. ábra: a) A szakítógörbe alakjának változása a besugárzás hatására. b) A húzószilárdság és a szakadási nyúlás alakulása a tömeg szerinti átlagos molekulatömeg függvényében. c) A szakítási munka és a Young-modulus alakulása a szám szerinti átlagos molekulatömeg függvényében. A teli körök a mért molekulatömegekhez tartozó tulajdonságok, az üres körök a lineáris regresszióból becsült molekulatömegekhez tartozó mért tulajdonságok. Az illesztéshez csak a teli körrel jelölt adatokat használtuk.

Ennek oka, hogy az üvegszerű polimerek merevsége a másodlagos kötésektől függ [20].

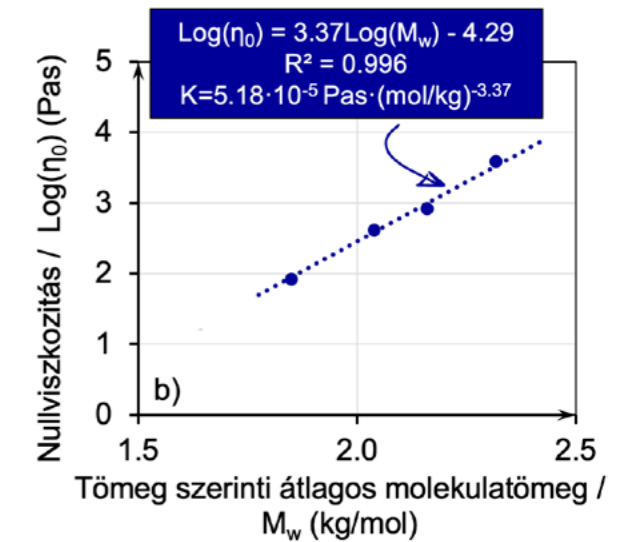
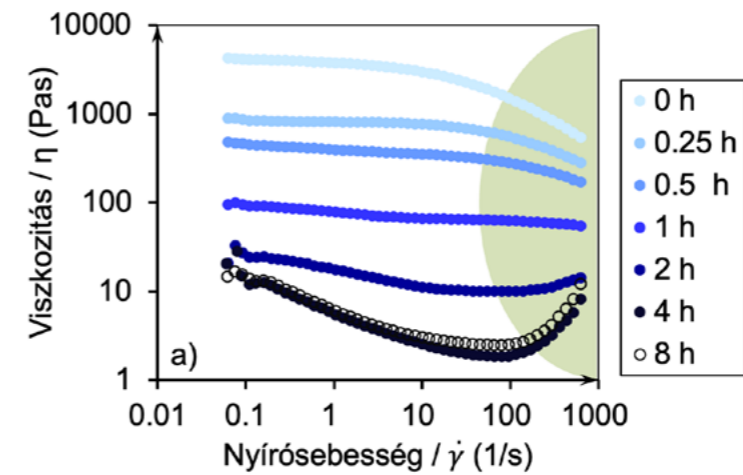
Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált jellemzők közül leginkább a szakadási nyúlás alkalmas a fóliákban bekövetkező degradáció (molekulatömeg csökkenés) nyomon követésére, hiszen a molekulatömeg csökkenés hatására csökken a szakadási nyúlás és a két mennyiség között lineáris trend tapasztalható (3/b ábra).

3.3. A BESUGÁRZÁS FOLYÁSI TULAJDONSÁGOKRA GYAKOROLT HATÁSA

A dinamikus reológiai tulajdonságokban bekövetkező változások vizsgálatát rotációs reométerrel végeztük. A 4/a ábra a nyírósebesség függő viszkozitásgörbét mutatja a besugárzási idő függvényében. A viszkozitás az 1 s⁻¹ nyírósebesség értéknél rendre 78%-kal, 98%-kal és 99,9%-kal csökkent a 0,25, 1 és 8 órás besugárzás időt követően. A molekulatömeg csökkenésével a polimer ömledék nyírósebesség-függő viselkedése is megváltozott. A referencia minta alacsonyabb nyírési sebességeknél newtoni viselkedést, majd 100 1/s felett nyírásra vékonyodó jelleget mutatott.

(Ez egy ömledék állapotú lineáris polimer várható viselkedése.) A növekvő nyírósebesség hatására a molekulaláncok az áramlás irányába rendeződnek és csökken a köztük lévő fizikai áthurkolódások száma, ami nagyobb mobilitást tesz lehetővé, így csökken a viszkozitás. Ahogy a molekulaláncok a degradáció miatt megszakadnak, a relaxációs idők lerövidülnek, ezért a molekulák gyorsabban reagálnak a nyíró hatásra. Ez a folyamat a viszkozitás csökkenését és a nyírásra vékonyodó szakasz fokozatos eltűnését eredményezi. 1 órás besugárzásnál a viszkozitásgörbe a teljes vizsgált nyírósebesség tartományban newtoni folyadék jellegű viselkedést mutat. $M_n = 36$ kg/mol alatt (1 óránál hosszabb besugárzás esetén) azt látjuk, hogy a viszkozitás nyírósebesség függő viselkedése tovább változik. A nyírósebesség növelése 100 1/s-ig nyírásra vékonyodást idéz elő, majd ezután nyírásra vastagodás figyelhető meg. Ennek oka feltehetően az, hogy a magas hőmérséklet hatására a molekulaláncokban elágazások jönnek létre és/vagy a molekulaláncok között kereszt-kötések alakulnak ki [21, 22].

A viszkozitás görbe felhasználható az átlagos molekulatömeg becslésére is. Szoros lineáris kapcsolat van a nullviszkozitás (η_0) és a lineáris amorf polimerek tömeg szerinti molekulatömege (M_w) között (Fox-Loshaek összefüggés) [23]:



△ 4. ábra: UV-C besugárzás hatása a viszkozításra: a) nyírósebességfüggő viszkozitás, b) nullviszkozitás a tömeg szerinti átlagos molekulatömeg függvényében

$$\eta_0 = K \cdot M_w^\alpha \quad (1)$$

ahol K egy anyag- és hőmérsékletfüggő konstans, α pedig a hatványkitevő. Az (1) összefüggést logaritmizálva a következő lineáris összefüggést kapjuk:

$$\text{Log}(\eta_0) = \alpha \cdot \text{Log}(M_w) + \text{Log}(K) \quad (2)$$

Ezt az összefüggést illesztettük a tömeg szerinti átlagos molekulatömeg függő nullviszkozitás értékekre (4/b ábra). Megállapítható, hogy 1 órás besugárzási időig, ameddig értelmezhető a nullviszkozitás (azaz a kiinduláshoz képest kb. 70%-os molekulatömeg csökkenésig) a degradáció mértéke jól becsülhető a nullviszkozitás alapján, mivel az illesztett lineáris összefüggés determinációs együtthatója 1 közeli értékre adódott ($R^2 > 0,99$).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkában a fertőtlenítő UV-C sugárzás amorf politejsav fóliák molekuláris szerkezetére, valamint mechanikai és reológiai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáltuk. A mintákat egy egyedi építésű kamrában sugaraztuk be, amely 254 nm-es hullámhosszú, monokromatikus fényt kibocsájtó higanygőz lámpatestekkel volt felszerelve. A besugárzást különböző időtartamokig végeztük. A maximális besugárzási idő 8 óra volt, ami az alkalmazott beállításokkal 2214 kJ/m²-es sugárdózisnak felelt meg. Gélpermeációs kromatográfiai vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy az UV-C sugárzás hatására a politejsav fóliák jelentős mértékben degradálódtak. A kiindulási molekulatömeg

0,5 óra alatt kb. 50%-kal, 8 óra alatt pedig 94%-kal csökkent. A degradációs mechanizmus jellege nemkatalitikus, véletlenszerű lánchasadás volt. Szakítóvizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a besugárzási idő növekedésével a kiindulási szakítógörbe egyre kisebb szakadási nyúláshoz tartozó szakaszait kaptuk meg, így a szakadási nyúlás alkalmas az UV-C sugárzás hatására bekövetkező degradáció becslésére. Rotációs reométerrel végzett mérések alapján megállapítottuk, hogy a sugárzás hatására jelentősen csökkent a minták nullviszkozitása, továbbá, hogy ez a jellemző szintén jó indikátora a degradáció mértékének.

Eredményeink azt mutatják, hogy az egészségügyben alkalmazott fertőtlenítési előírásokat figyelembe véve, a vizsgált PLA fólia legfeljebb mintegy 13 UV-C fertőtlenítési ciklust bír ki a funkcionalitás szempontjából kulcsfontosságú szakítószilárdság és modulusz jelentős változása nélkül.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 138501) pályázata támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] B. L. Diffey, Sources and measurement of ultraviolet radiation, Methods 28 (2002) 4-13.
- [2] C. Stevens, V. A. Khan, J. Y. Lu, C. L. Wilson, P. L. Pusey, M. K. Kabwe, E. C. K. Igwegbe, E. Chalutz, S. Droby, The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches, Crop Protection 17 (1998) 75-84.

- [3] K. Song, M. Mohseni, F. Taghipour, Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review, *Water Res.* 94 (2016) 341–349.
- [4] D. Cassan, B. Mercier, F. Castex, A. Rambaud, Effects of medium-pressure UV lamps radiation on water quality in a chlorinated indoor swimming pool, *Chemosphere* 62 (2006) 1507–1513.
- [5] G. Volchenkov, Experience with UV-C Air Disinfection in Some Russian Hospitals, *Photochem. Photobiol.* 97 (2021) 549–551.
- [6] T. Dumyahn, M. First, Characterization of Ultraviolet Upper Room Air Disinfection Devices, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 60 (1999) 219–227.
- [7] P. Palakornkitti, P. Pinyowiwat, S. Tanrattanakorn, N. Rajatanavin, P. Rattanakaemakorn, The effectiveness of commercial household ultraviolet C germicidal devices in Thailand, *Sci. Rep.* 11 (2021) 23859.
- [8] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=EN>
- [9] <https://mkogy.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2000091.TV>
- [10] <https://www.nationalgeographic.com/science/article/can-medical-care-exist-without-plastic>
- [11] C. Rizan, F. Mortimer, R. Stancliffe, M. F. Bhutta, Plastics in healthcare: time for a re-evaluation, *J. R. Soc. Med.* 113 (2020) 49–53.
- [12] <https://www.hprc.org/resources/hospital-waste-characterization/>
- [13] <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- [14] https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2023/EUBP_Market_Data_Report_2023.pdf
- [15] A. Bher, Y. Cho, R. Auras, Boosting Degradation of Biodegradable Polymers, *Macromol. Rapid Commun.* 44 (2023) 2200769.
- [16] F. P. La Mantia, M. Morreale, L. Botta, M. C. Mistretta, M. Ceraulo, R. Scaffaro, Degradation of polymer blends: A brief review, *Polym. Degrad. Stab.* 145 (2017) 79–92.
- [17] C. P. Sabino, F. P. Sellera, D. F. Sales-Medina, R. R. G. Machado, E. L. Durigon, L. H. Freitas-Junior, M. S. Ribeiro, UV-C (254 nm) lethal doses for SARS-CoV-2, *Photodiagnosis Photodyn. Ther.* 32 (2020) 101995.
- [18] S. Narla, A. B. Lyons, I. Kohli, A. E. Torres, A. Parks-Miller, D. M. Ozog, I. H. Hamzavi, H. W. Lim, The importance of the minimum dosage necessary for UVC decontamination of N95 respirators during the COVID-19 pandemic, *Photo-dermatol. Photoimmunol. Photomed.* 36 (2020) 324–325.
- [19] A. Gleadall, J. Pan, M. A. Kruff, M. Kellomäki, Degradation mechanisms of bioresorbable polyesters. Part 1. Effects of random scission, end scission and autocatalysis, *Acta Biomater.* 10 (2014) 2223–2232.
- [20] Z. Bin Ahmad, M. F. Ashby, Failure-mechanism maps for engineering polymers, *J. Mater. Sci.* 23 (1988) 2037–2050.
- [21] M. Przybysz-Romatowska, J. Haponiuk, K. Formela, Poly(ϵ -caprolactone)/poly(lactic acid) blends compatibilized by peroxide initiators: Comparison of two strategies, *Polymers (Basel)* 12 (2020).
- [22] A. A. Marek, V. Verney, Influence of the viscoelastic regime onto the UV reactivity of poly(lactic acid), *Eur. Polym. J.* 110 (2019) 138–144.
- [23] T. G. Fox, S. Loshaek, Isothermal viscosity-molecular weight dependence for long polymer chains, *J. Appl. Phys.* 26 (1955) 1080–1082.

A technológia az átalakuláshoz itt van.



MACH-TECH

16. Nemzetközi gépgyártás-technológiai és hegesztéstechnikai szakkonferencia



IPAR NAPJAI

11. Nemzetközi ipari szakkonferencia



2024. május 7–10.

GL events hungexpo

MACH-TECH és IPAR NAPJAI szakkonferenciák

Társrendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkonferencia

Látogasson el Ön is Magyarország legnagyobb és legjelentősebb üzleti eseményére és találkozási pontjára, mely májusban várja az ipari szegmens szereplőit! Tekintse meg a széles kiállítói kínálatot, a cégek innovációit, vegyen részt a magas színvonalú szakmai programokon!

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

Látogatók részére előzetes online regisztráció a díjmentes belépésért:

www.iparnapjai.hu/polimerek

Bővebb információ: www.iparnapjai.hu