

Bioalapú epoxigyanta égésgátlása foszforszármazékokkal

Szolnoki Beáta¹, Pankucsi Orsolya Fanni¹, Toldy Andrea², Marosi György¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Szerves Kémia és Technológia Tanszék

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

Kereskedelmi forgalomban kapható bioepoxi gyanta égésgátlását ismerteti ez a közlemény. Az új anyag kifejlesztéséhez háromféle additív típusú égésgátló vizsgálatára volt szükség, változtatva azok koncentrációját. Az egyes adalékok hatékonyságát termogravimetriás, oxigénindex, UL-94 és mass loss kalorimetriás vizsgálatok segítségével hasonlítottuk össze.

1. BEVEZETÉS

Az epoxigyanták egyik fontos felhasználási területe a repülőgépipar, ahol a szigorú biztonsági előírások között szerepel az alkalmazott anyagok csökkentett éghetősége. A gyúlékony szerves fázis az epoxigyanták esetében komoly hátrányt jelent a fémes szerkezeti anyagokhoz képest, így az anyagfejlesztés egyik legnagyobb kihívása az égésgátlásra irányul. A korábban széles körben elterjedt, de legtöbbször káros hatású halogéntartalmú égésgátló anyagokkal szemben elsősorban a foszforszármazékok jelentenek a környezetre kevésbé ártalmas hatású alternatívát. A foszforszármazékokat adalék vagy monomer formában alkalmazva viszonylag kis mennyiségben is kedvező hatás érhető el. A foszfortartalmú égésgátló rendszerek a szilárd- vagy a gázfázisban – illetve sok esetben mindkettőben – fejtik ki a hatásukat. Az égés során keletkező foszfortartalmú gázok kevésbé toxikusak, mint a halogéntartalmú égésgátlók bomlástermékei [1], valamint a keletkező foszforsav a degradálódott polimerrel reagálva egy stabil, elszenesedett felületi réteget alkot [2], ami csökkenti a káros hatású gázok mennyiségét. Gázfázisban a foszfortartalmú égésgátló pirolízise során keletkező HPO₂ és PO₂ gyök reagálni tudnak a H₂ és •OH gyökökkel, ezzel csökkentve a lángban végbemenő gyökös reakciók sebességét [3, 4]. Szilárd fázisban hatékonyságukat többnyire poli- és metafoszforsav védőréteg kialakulásával magyarázzák, valamint ezen anyagok savkatalízise szénréteg képződését eredményezheti a polimer felszínén. A nitrogént tartalmazó, nagy térhálósodási fokkal jellemezhető gyanták esetén jelentős habképződést figyeltek meg, ami azzal magyarázható, hogy a fejlődő nitrogéntartalmú gázok a savkatalízis hatására kialakult szénréteget felhabosítják [5]. E tulajdonságok miatt a foszfortartalmú égésgátlók jelentősége egyre nagyobb.

A jelenleg forgalomba kerülő epoxi komponensek között a legerterjedtebb típus a biszfenol-A diglicidil étere (DGEBA), melynek részesevé az összes alkalmazott epoxi komponens között eléri a 75%-ot [6], más források szerint akár a 90%-ot is [7]. Ennek magyarázata, hogy előállítása egyszerű, merevsége, szívóssága, valamint adhéziós készsége szénszálakhoz

kitűnő, és ezek alkalmassá teszik magas műszaki értékű kompozitok előállítására. Ugyanakkor az utóbbi évek kutatásai bebizonyították, hogy prekuzora, a biszfenol-A (BPA) pszeudo-hormonhatású vegyület, amely kis mennyiségben is káros hatású lehet a reprodukcióra, illetve a magzatok és a csecsemők fejlődésére egyaránt [8].

Az egyre terjedő kompozitfelhasználással összefüggésben ez a felfedezés, valamint a környezettudatos gondolkodásmód széleskörű elterjedése arra ösztönzi a kutatókat, hogy új, megújuló nyersanyagforrásból származó epoxigyanta-komponenseket állítsanak elő, amelyek újrahasznosíthatók, és/vagy az életciklusuk végén biodegradálhatók. Ugyanakkor az új vegyületeknek számos követelménynek kell megfelelni: gyártásuk nem lehet lényegesen drágább, mint a jelenleg elterjedt anyagok és mechanikai tulajdonságaikban is versenyképesnek kell lenniük. Míg a hőre lágyuló műanyagok között egyértelmű a politejsav térnyerése, addig a hőre keményedő polimerek esetében még várat magára az ipari környezet számára is megfelelő megoldás. A növényi olaj alapú vegyületeknek, valamint a ligninből előállítható epoxi monomereknek szerteágazó irodalma van [9, 10], ugyanakkor mindkét vegyületcsaládnak vannak jelentős hátrányos tulajdonságai (az előbbieket az alacsony üvegesedési hőmérséklet, utóbbiaknál a nehezen reprodukálható szerkezet), amelyek akadályozzák az elterjedésüket műszaki alkalmazásokban. A cellulózszármazékok közül az izoszorbid-alapú epoxi monomer áll a kutatók figyelmének középpontjában [11–13], ugyanakkor eddig még ezzel a vegyülettel sem sikerült átütő eredményt elérni.

A szorbit a glükóz hidrogénezésével előállított cukoralkohol, amely hat OH-csoportot tartalmaz hat C-atomon. A hidroxilcsoportok epiklórhidrinnel történő reakciójával a már kereskedelmi forgalomban kapható szorbit-poliglicidil éterhez (SPE) jutunk. A következőkben az SPE-alapú bioepoxi gyanták égésgátlását mutatjuk be.

2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK

Erisys GE-60 (Emerald Performance Materials) típusú, 160–

195 g/ekv epoxi ekvivalensű, 25 °C-on 8000–18 000 mPa-s viszkozitású szorbit poliglicidil étert (SPE), és ipox MH 3122 (IpoX Chemicals) típusú, 464–490 mg KOH/g aminoszámu, 25 °C-on 80–120 mPa-s viszkozitású cikloalifás amint (3,3'-dimetil-4,4'-diamino-diciklohexil-metán) használtunk fel a bioepoxi mátrix előállításához. Az epoxi komponens és a térhálósító tömegaránya minden esetben 4:1 volt.

Égésgátló adalékként vörös foszfort (RP), DOPO-sav ammónium sóját (9,10-dihidro-10-hidroxi-9-oxa-10-foszfafenantrén-10-oxid ammónium só, DXA) és DOPO-sav melamin sóját (9,10-dihidro-10-hidroxi-9-oxa-10-foszfafenantrén-10-oxid melamin só, DXM) alkalmaztunk. Tulajdonságaikat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat.

Az alkalmazott égésgátlók tulajdonságai

| Jelölés | Márkanév | Gyártó | Megjelenés | P-tartalom [%] |
|---------|----------|-----------|-------------------|----------------|
| RP | RP 6500 | Clariant | vörösbarna paszta | 43–47 |
| DXA | DXA-12 | Metadynea | fehér por | 12,0–12,5 |
| DXM | DXM-11 | Metadynea | fehér por | 8,4–8,7 |

2.2. MINTAKÉSZÍTÉS

Mintakészítés során először a komponenseket megfelelő arányban egy kristályosító csészébe kimértük, majd homogén elegy eléréséig kevertük. Égésgátló minták esetében a számított mennyiségű égésgátlót az epoxi komponenshez adtuk, majd miután homogénre kevertük, hozzákevertük a térhálósító komponens is. Ezt követően megfelelő geometriájú szilikon szerszámba öntöttük a gyantát, és szobahőmérsékleten egy napig térhálósítottuk, majd kemencében 30 percig 80 °C-on, majd 2 órán át 120 °C-on utótérhálósítottuk a végleges tulajdonságok elérése érdekében.

A szükséges égésgátló mennyiségét úgy határoztuk meg, hogy az összfoszfortartalmat egy-egy tömegszázalékkal fokozatosan megnöveltük 3%-ig. Ehhez az alkalmazott gyanta (epoxi monomer és térhálósító komponens) mennyiségét csökkentettük annyival, amennyi égésgátló adalékban a megfelelő mennyiségű foszfor található. Rendre 1, 2 és 3% foszfor atomot tartalmazó mintákat készítettünk, kivéve a DXM égésgátló esetét, ahol a 3%P-tartalmú minta nagy viszkozitása lehetetlenné tette a próbatetek elkészítését.

2.3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A minták termikus stabilitását *termogravimetriás* módszerrel vizsgáltuk, TA INSTRUMENTS Q5000 típusú berendezésben, 10 °C/perc fűtési sebességgel N₂ atmoszférában 800 °C-ig. Méreseként 15–20 mg mintát használtunk.

UL-94 vizsgálat (ISO 9772 és ISO 9773) során vízszintesen, illetve függőlegesen befogott minták szabványos meggyújtása után mérni kell a láng kialvásához szükséges időt. Éghető anyag esetén a minta jellemzésére a vízszintesen mért lángterjedési sebesség szolgál. Amennyiben a minta vízszintesen nem ég végig, a következő kategóriák egyikébe soroljuk:

- **HB:** a vízszintes vizsgálat szerint, ha a láng a második jelig eljutott; és ha nem ég végig, de a függőleges vizsgálati módszer szerinti V-2, V-1, és V-0-ás fokozatnak sem tesz eleget.
- **V-2:** ha a függőleges vizsgálati módszer szerint az anyag többek között megfelel a következőknek: a próbatetek nem égnék 30 másodpercnél tovább és legalább egy próbatest égése közben a keletkező lángoló cseppek meggyújtották a próbatest alatt elhelyezett vattát.
- **V-1:** ha a függőleges vizsgálati módszer szerint az anyag többek között megfelel a következőknek: a próbatetek nem égnék 30 másodpercnél tovább és egyetlen próbatest égésekor sem keletkeztek lángoló cseppek, amelyek meggyújtották a próbatest alatt elhelyezett vattát.
- **V-0:** ha a függőleges vizsgálati módszer szerint az anyag többek között megfelel a következőknek: a próbatetek nem égnék 10 másodpercnél tovább és egyetlen próbatest égésekor sem keletkeztek lángoló cseppek, amelyek meggyújtották a próbatest alatt elhelyezett vattát.

Az *oxigénindex* (OI) meghatározását az MSZ EN ISO 4589-1 és 4589-2 (2000) szabvány szerint végeztük. A mérés eredményeként egy mérőszámot kapunk az anyag éghetőségére. Oxigénindexnek nevezzük egy meghatározott sebességgel áramló oxigén-nitrogén gázkeveréknek azt a minimális oxigéntartalmát térfogatszázalékban kifejezve, amelyben a vizsgálandó anyagból készített próbatest még ég. Minél nagyobb ez az érték, annál nagyobb a vizsgált anyag stabilitása.

Mindkét módszer esetében a próbatetek geometriája 120 mm×15 mm×4 mm volt.

A *mass loss kaloriméter* (FTT INC.) az égés komplex jellemzőinek meghatározására szolgáló berendezés. A valós tűzestekhez hasonló körülményeket szimulálva vizsgálja a minta gyulladási idejét, a kibocsátott hőmennyiséget és az égés folyamata alatt a minta tömegvesztését. Méréseink során az ISO 13927 szabvány alapján 25 kW/m² sugárzó hőnek tettük ki a 100 mm×100 mm×2 mm méretű mintákat. A vizsgálat közben jól megfigyelhető az anyag viselkedése, az esetleges felhabosodás mértéke, illetve az égési maradék állaga és szerkezete.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. TERMIKUS STABILITÁS

Az előállított minták termikus stabilitását TGA módszerrel határoztuk meg. A mérésekből kapott számszerű adatokat a 2. táblázat, míg a referencia mátrix, és az egyes égésgátlókkal előállított legnagyobb foszfortartalmú minták bomlási görbéit az 1. ábra szemlélteti.

Az 5%-os tömegcsökkenéshez tartozó adatokat (2. táblázat) összehasonlítva látható, hogy függetlenül az alkalmazott égésgátló szerkezetétől, illetve mennyiségétől, a bioepoxi gyanta termikus stabilitása nőtt. Legnagyobb mértékben a vörös foszfor hozzáadása javított a hőstabilitáson, ez esetben a számottevő bomlás megindulása 20 °C-kal magasabb hőmérsékleten kezdődött, mint a referencia gyanta esetében. Ugyanakkor a tömegcsökkenés maximális sebessége az RP esetében a legnagyobb, és az ehhez az értékhez tartozó hőmérséklet, a referencia gyantához hasonlóan, egybeesik a bomlás megindulá-

2. táblázat.

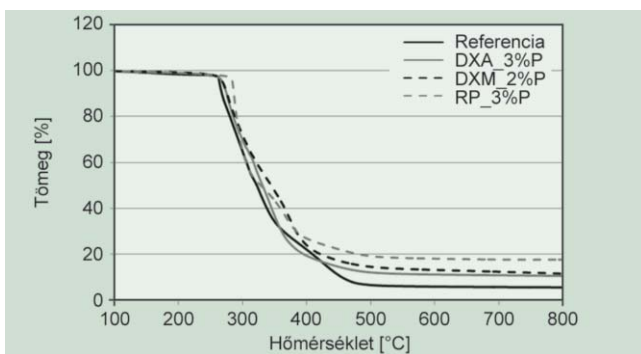
Az egyes minták termikus bomlása

| Minta | $T_{-5\%}$ [°C] | $T_{-50\%}$ [°C] | dTG_{max} [%/°C] | $T_{dTG_{max}}$ [°C] | Maradék [%] |
|------------|-----------------|------------------|--------------------|----------------------|-------------|
| Referencia | 263,5 | 322,1 | -1,5 | 263,2 | 5,6 |
| DXA_1%P | 276,7 | 324,7 | -1,6 | 282,7 | 10,2 |
| DXA_2%P | 273,0 | 333,3 | -1,2 | 281,5 | 13,0 |
| DXA_3%P | 268,1 | 330,9 | -1,0 | 277,9 | 10,6 |
| DXM_1%P | 269,4 | 330,3 | -1,3 | 277,1 | 9,9 |
| DXM_2%P | 268,9 | 344,6 | -0,9 | 277,6 | 11,5 |
| RP_1%P | 282,9 | 315,2 | -2,7 | 285,8 | 9,7 |
| RP_2%P | 286,2 | 321,0 | -2,6 | 289,9 | 9,9 |
| RP_3%P | 284,0 | 328,1 | -2,3 | 288,1 | 17,7 |

$T_{-5\%}$: 5%-os tömegcsökkenéshez tartozó hőmérséklet; $T_{-50\%}$: 50%-os tömegcsökkenéshez tartozó hőmérséklet; dTG_{max} : tömegcsökkenés maximális sebessége; $T_{dTG_{max}}$: dTG_{max} -hoz tartozó hőmérséklet

sával, ami arra utal, hogy a vörös foszfor hatékonyan késlelteti a bomlás megindulását, ugyanakkor magasabb hőmérsékleten a gátló hatása nem érvényesül, így elnyújtott, kiegyensúlyozott tömegcsökkenés helyett, és hirtelen nagy mennyiségű bomlástermék keletkezik. A DXA és DXM égésgátlók esetében a $T_{-5\%}$ értéke mindösszesen 5–10 °C-kal magasabb a módosított SPE gyantáénál, azonban esetükben a bomlási folyamat valamelyest elnyújtott a referenciához képest (1. ábra).

Az 50%-os tömegcsökkenéshez tartozó hőmérsékletek esetén a tendencia megfordul: az RP tartalmú minták hőmérséklet értékei gyakorlatilag megegyeznek a referencia bioepoxi gyantáéval, míg a DXA és DXM égésgátlók esetében 10–20 °C-kal magasabb hőmérsékleten bomlik el az anyag fele. Ez a megfigyelés is alátámasztja a DOPO-származékok bomlást elnyújtó hatását.



1. ábra. Az előállított legnagyobb égésgátló tartalmú minták TGA görbéi

A referencia SPE-hez képest az égésgátló minták szén maradékának mennyisége a duplájára nőtt, függetlenül az égésgátló szerkezetétől, illetve mennyiségétől. Egyetlen kivételként az RP_3%P minta esetében a 800 °C-on mért maradék tömeg a referencia 5,6%-áról 17,7%-ra nőtt (2. táblázat), ami a vörös foszfor szilárd fázisban kifejtett szénésítő hatásának köszönhető.

3.2. OXIGÉNINDEX ÉS UL-94 VIZSGÁLAT

A referencia és az égésgátló minták oxigénindexét és UL-94 besorolását a 3. táblázat tartalmazza. Az égésgátlók hozzáadásának hatására nőtt a bioepoxi gyanta termikus stabilitása (lásd 2. táblázat), ezzel együtt a referencia mátrixhoz képest nőtt az egyes minták oxigénindexe is. A DOPO-származékok esetében a növekvő foszfortartalommal párhuzamosan növekszik az OI értéke is, azonban a vörös foszfort tartalmazó minták esetében nincs számottevő különbség a különböző P-tartalmú minták között. Ennek magyarázata abban keresendő, hogy az RP a szilárd fázisban szénésítő komponensként fejt ki hatását, a gázfázisba gyakorlatilag nem tud kilépni, így az égés gyökös folyamatait sem képes befolyásolni.

3. táblázat.

Az egyes minták oxigénindexe és UL-94 besorolása

| Minta | OI [V/V%] | UL-94 besorolás |
|------------|-----------|----------------------------|
| Referencia | 20 | HB (20 mm/perc) |
| DXA_1%P | 25 | HB (függőleges 1. gyújtás) |
| DXA_2%P | 27 | HB (függőleges 2. gyújtás) |
| DXA_3%P | 29 | V-0 |
| DXM_1%P | 27 | HB (függőleges 1. gyújtás) |
| DXM_2%P | 29 | HB (függőleges 2. gyújtás) |
| RP_1%P | 26 | HB (függőleges 1. gyújtás) |
| RP_2%P | 25 | V-1 |
| RP_3%P | 25 | V-0 |

Az egyes minták UL-94 besorolása fokozatosan javul a hozzáadott foszfortartalom hatására. Míg a referencia mátrix már a vízszintes vizsgálat során végig ég, az égésgátló tartalmazó összetételek esetében a függőleges vizsgálat elvégzése is szükséges volt. Epoxigyanták esetében általában 3% foszfortartalom bevitelére szükséges a V-0 fokozat eléréséhez [14], amely állítást a mérési eredményeink is alátámasztják. Mind a vörös foszfor, mind a DXA esetében a 3% P-t tartalmazó minták minősítése V-0 lett, míg a DXM esetében – amikor a minta viszkozitása csak 2% P-tartalom bevitelét tette lehetővé – HB besorolást lehetett elérni.

3.3. MASS LOSS KALORIMETRIA

A minták meggyújthatóságára jellemző vizsgálatok után az égési folyamatot jellemző mass loss kalorimetriás vizsgálatokra került sor. Ennek során a mért adatokat, illetve az azokból számított értékeket a 4. táblázat tartalmazza, míg a referencia mátrix, és az egyes égésgátlókkal előállított legnagyobb foszfortartalmú minták hőkibocsátási görbéit a 2. ábra szemlélteti.

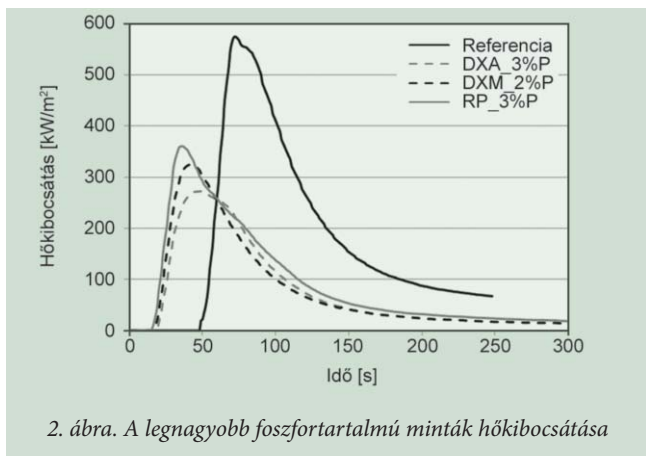
A referencia és az égésgátló minták begyulladás idejét, illetve a hőkibocsátási maximumhoz tartozó időket összehasonlítva szembevetendő, hogy mindkét érték lényegesen nagyobb a módosított SPE bioepoxi gyanta esetében. Az égésgátló minták fél-negyed annyi idő alatt begyulladnak, mint a referenciaanyag, és az égés intenzitása is fele-kétharmada idő alatt éri el a maximumot. Általánosságban elmondható az eredm-

nyekről, hogy növekvő foszfortartalommal csökken a hőkibocsátás, és értéke a DXA_3%P minta esetében (272 kW/m²) kevesebb, a referencia felénél (575 kW/m²). Az egyes égésgátlók eredményeit vizsgálva a DOPO-származékok (DXA és DXM) esetében hasonló tendencia figyelhető meg, azaz a hőkibocsátás maximális értéke annál alacsonyabb, és annál későbbre tolódik, minél több a foszfor a gyantában. A DXA esetében a maximum értékének csökkenése a foszfortartalom növelésével jóval kifejezettebb, mint a DXM alkalmazásával. Ha a 2% P-tartalmú DXA és DXM mintákat hasonlítjuk össze, látható, hogy a hőkibocsátásban nincs számottevő különbség, azonban a melamin-só esetében a maximum megjelenése időben későbbre tolódott (4. táblázat), valamint a teljes kibocsátott hőmennyiség is kevesebb.

A vörös foszforral égésgátolt minták ezzel szemben az egyre növekvő foszfortartalommal egyre hamarabb érik el a hőkibocsátási maximumot, melyek értéke is általában nagyobb, mint a DOPO-származékok esetében.

A teljes kibocsátott hőmennyiségeket összehasonlítva a hőkibocsátási maximumhoz hasonló tendencia figyelhető meg. Mindhárom égésgátló esetében a foszfortartalom növelésével csökken ez az érték, azonban lényeges különbség figyelhető meg az egyes adalékok között. Míg a DXA esetében a csökkenés lépcsőzetes, addig a másik két komponens esetében nem számottevő az eltérés a különböző koncentrációk között. A DXM esetében már 1% P atom jelenléte 40%-kal csökkentette a teljes kibocsátott hőmennyiséget, azonban a foszfortartalom növelésének nem volt további lényeges hatása. Az RP esetében ugyanez mondható el, ellenben ott a 3%-os minta által leadott hőmennyiség mindössze 35%-kal kevesebb, mint a referencia bioepoxi gyantáé.

Az égés utáni maradékok mennyisége a DXA és a DXM esetében a foszfortartalommal együtt nő, míg a vörös foszforral égésgátolt minták esetében nincs számottevő különbség az egyes koncentrációk között, valamint a referenciához képest



2. ábra. A legnagyobb foszfortartalmú minták hőkibocsátása

4. táblázat.

A mass loss kaloriméteres vizsgálat során mért és az azokból számított értékek

| Minta | Begyulladási idő [s] | Hőkibocsátás maximális értéke [kW/m ²] | Hőkibocsátás maximum ideje [s] | Teljes kibocsátott hőmennyiség [MJ/m ²] | Maradék tömeg [%] |
|------------|----------------------|--|--------------------------------|---|-------------------|
| Referencia | 45 | 575 | 72 | 43,2 | <1 |
| DXA_1%P | 21 | 530 | 33 | 34,2 | 1,2 |
| DXA_2%P | 12 | 320 | 34 | 27,2 | 4,6 |
| DXA_3%P | 21 | 272 | 48 | 19,6 | 11,0 |
| DXM_1%P | 15 | 336 | 35 | 25,6 | 6,7 |
| DXM_2%P | 15 | 325 | 42 | 23,6 | 8,7 |
| RP_1%P | 15 | 490 | 43 | 32,8 | 2,4 |
| RP_2%P | 21 | 413 | 40 | 31,4 | 2,0 |
| RP_3%P | 16 | 361 | 36 | 28,4 | 4,3 |

sem. Ez a jelenség annak fényében meglepő, hogy az RP szilárd fázisban szenesítő hatást fejt ki (lásd TGA maradék tömeg, 2. táblázat), ám az eredmények arra utalnak, hogy ez a kialakult szenes réteg oxigén jelenlétében elbomlik.

A 2. ábra mutatja be az egyes égésgátlókkal előállított legnagyobb foszfortartalmú minták hőkibocsátási görbéit, amelyeket összehasonlítva egyértelműen megállapítható, hogy a mass loss kaloriméteres vizsgálat során a DOPO-sav ammónium sója (DXA) teljesített a legjobban.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkában egy kereskedelmi forgalomban kapható bioepoxi gyanta (szorbit poliglicidil éter) égésgátlását vizsgáltuk háromféle additív égésgátló (vörös foszfor és két DOPO-származék) alkalmazásával. Az egyes égésgátlók felhasználásával növekvő foszfortartalmú mintákat állítottunk elő. Vizsgáltuk a minták termikus stabilitását, oxigénindexét, UL-94 besorolását, valamint mass loss kalorimetriás mérésel a begyulladásig eltelt időt, valamint a hőkibocsátást. Az égésgátlók alkalmazásával a nőtt a minták termikus stabilitása, valamint a 800 °C-on mért maradék tömeg mennyisége is. A vörös foszfor esetében a bomlás jellege nem változott a referenciához képest, csak valamelyest magasabb hőmérsékletre tolódott, míg a DOPO-származékok esetében a bomlási folyamat elnyújtottabb lett. Az oxigénindex a P-tartalom növelésével nőtt a DXA és a DXM égésgátlók esetében, míg a vörös foszfor esetében gázfázisú hatás hiányában az alkalmazott koncentrációtól független volt a mért oxigénindex. Az UL-94 vizsgálati módszer esetében növekvő P-tartalommal fokozatosan javult a minták besorolása, de a V-0 eléréséhez minden esetben szükséges volt a 3% foszfor jelenléte. A mass loss kalorimetriás mérés alapján elmondható, hogy mind a hőkibocsátás maximuma, mind az teljes kibocsátott hőmennyiség csökkent a foszfortartalom növelésével, míg az égés utáni maradékok tömege nőtt.

Az összes vizsgálati eredményt figyelembe véve megállapítható, hogy a jelen munka során vizsgált háromféle égésgátló közül a DOPO-sav ammónium sója (DXA) bizonyult a leghatékonyabbnak az SPE bioepoxi mátrix égésgátlására.

A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA K-112644 számú projekt által nyújtott anyagi támogatásért. Toldy Andrea köszöni a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatását.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Chung, Y.; Kim, Y.; Kim, S.: Flame retardant properties of polyurethane produced by the addition of phosphorous containing polyurethane oligomers (II), *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15, 888–893 (2009).
- [2] Gérard, C.; Fontaine, G.; Bellayer, S.; Bourbigot, S.: Reaction to fire of an intumescent epoxy resin: Protection mechanism and synergy, *Polymer Degradation and Stability*, 97, 1366–1386 (2012).
- [3] Braun, U.; Balabanovich, A. I.; Scharrel, B.; Knoll, U.; Artner, J.; Ciesielski, M.; Döring, M.; Perez, R.; Sandler, J. K. W.; Altstädt, V.; Hoffmann, T.; Pospiech, D.: Influence of the oxidation state of phosphorus on the decomposition and fire behaviour of flame-retarded epoxy resin composites, *Polymer*, 47, 8495–8508 (2006).
- [4] Zhang, W.; He, X.; Song, T.; Jiao, Q.; Yang, R.: The influence of the phosphorus-based flame retardant on the flame retardancy of the epoxy resins, *Polymer Degradation and Stability*, 109, 209–217 (2014).
- [5] Kandola, B. K.; Horrocks, A. R.: *Composites in 'Fire retardant materials'* (Szerk.: Horrocks, A. R.; Price, D.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 182–213 (2001).
- [6] Shen, L.; Haufe, J.; Patel, M. K.: Product overview and market projection of emerging bio-based plastics, PRO-BIP Final report (2009).
- [7] Raquez, J. M.; Deléglise, M.; Lacrampe, M. F.; Krawczak, P.: Thermosetting (bio)materials derived from renewable resources: A critical review, *Progress in Polymer Science*, 35, 487–509 (2010).
- [8] Chapin, R.; Adams, J.; Boekelheide, K.; Gray Jr., L. E.; Hayward, S. W.; Lees, P. S. J.; McIntyre, B. S.; Porthier, K. M.; Schnorr, T. M.; Selevan, S. G.; Vandenberg, J. G.; Woskie, S. R.: NTP-CERHR expert panel report on the reproductive and developmental toxicity of bisphenol A, *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology*, 3, 157–395 (2008).
- [9] Güner, F. S.; Yağcı, Y.; Erciyes, A. T.: Polymers from triglyceride oils, *Progress in Polymer Science*, 31, 633–670 (2006).
- [10] Laurichesse, S.; Avérous, L.: Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers, *Progress in Polymer Science*, 39, 1266–1290 (2014).
- [11] Feng, X.; East, A. J.; Hammond, W. B.; Zhang, Y.; Jaffe, M.: Overview of advances in sugar-based polymers, *Polymers for Advanced Technologies*, 22, 139–150 (2011).
- [12] Chrysanthos, M.; Galy, J.; Pascault, J. P.: Preparation and properties of bio-based epoxy networks derived from isosorbide diglycidyl ether, *Polymer*, 52, 3611–3620 (2011).
- [13] Hong, J.; Radojčić, D.; Ionescu, M.; Petrović, Z. S.; Eastwood, E.: Advanced materials from corn: isosorbide-based epoxy resins, *Polymer Chemistry*, 5, 5360–5368 (2014).
- [14] Hergenrother, P. M.; Thompson, C. M.; Smith Jr., J. G.; Connell, J. W.; Hinkley, J. A.; Lyon, R. E.; Moulton, R.: Flame retardant aircraft epoxy resins containing phosphorus, *Polymer*, 46, 5012–5024 (2005).