

Funkcionális polimer rendszerek, technológiák – evolúció*

MAROSI György**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar,
Szerves Kémia és Technológia Tanszék Műegyetem rkp. 3. 1111 Budapest, Magyarország

1. Előzmények, fogalmak, példák

A *funkcionális* jelző teleologikus kapcsolatot fejez ki egy objektum (pl. polimer, technológia, stb.) jellemzői és annak hasznosulási célja között, más szóval egy kapcsolat a műszaki tényezők világa és a felhasználói igények között¹. A természet funkcionális polimer rendszerei, az élővilágban kifejlődött biokompozitok – pl. az élőlények biztonságát szolgáló szálak és réteges struktúrák – az evolúció előrehaladásával egyre több információt hordozó, egyre intelligensebben szabályozott anyagrendszereké váltak. Ennek a motorja a törekvés a létezés biztonságára, adaptálódva a környezet változásaihoz – „az élet egy információfeldolgozó rendszer... az igazi titok a szoftver, nem pedig a hardver”². A biztonságot az anyagrendszer („genotípus” jellegű) és a körülmények, valamint a véletlen által is meghatározott („fenotípus” jellegű) tényezők optimális viszonya eredményezi. Az információkat hordozó makromolekulák fejlődésének eredményeként létrejött legbonyolultabb „funkcionális polimer rendszer” – az ember – által alkotott anyagok és azok gyártástechnológiái szintén csak a biztonság feltételeinek megteremtésével tudják optimálisan betölteni a funkciójukat.

Az ember által átalakított világ biztonságát az anyag – környezet – információ – technológia adaptív kölcsönhatása tudja fenntartani. A biztonság fogalma ennek értelmében szintén fejlődésen ment keresztül: a kezdeti biztonságérzetre irányuló értelmezés helyett egy globális fogalom jelent meg, amely számos fontos gazdasági, műszaki, életminőségi területet foglal magába – mint pl. a gazdaságbiztonság, a minőség biztonsága, energiabiztonság, kiberbiztonság, biológiai biztonság, kémiai biztonság, gyógyszerbiztonság – és szerepe rohamosan növekszik.



1. Ábra. A biztonság egyes részterületei, ahol a funkcionális polimer rendszerek szerepe jelentős (a többlet vonal jelzi, hogy a sor folytatható)

Az 1. ábrán látható területek biztonságát szolgáló valamely igénynek megfelelő funkcionális anyagrendszer alkotórésze bármilyen anyagfajta (fém, kerámia, félvezető, polimer, bioanyag) lehet, célirányos – részecske, szál, vékonyréteg,

nanostruktúrált objektum, vagy kompozit – formában. Ha egy társított kombinációban polimer a domináns komponens, akkor az funkcionális polimer rendszernek tekinthető.

Így ezeknek az anyagrendszereknek a közös alapja az anyagtudomány és kapcsolódhatnak a kémia, fizika, biológia, geológia mellett, a gépészmérnöki, villamosmérnöki, vegyészmérnöki, gyógyszerészeti, valamint orvostudományi tudományterületekhez. Egy funkcionális polimer rendszer valamely felhasználói igényhez alkalmazkodik. A mechanikai igényekhez alkalmazkodó anyagokat szerkezeti anyagok megnevezéssel is megkülönböztetik. A szükséges funkciók betöltésére sajátos tulajdonságaik révén alkalmaznak, ilyenek pl. a nagy felület/térfogat arány, szupramolekuláris szerkezet, tűzgátló jelleg, piezoelektromosság, mágnesesség, lumineszcens, fotovoltaiikus, vagy egyéb sajátos elektronikai, optikai, nukleáris, vagy biológiai jellemző, rezponzív, alakemlékező, öngyógyító, energiatároló képesség. Egy polimer funkcionálizálása – funkciók csoportok, vagy adalékanyagok bejuttatásával – jobb reakcióképességet, fázisszétválasztást, fokozott összeférhetőséget (kompatibilitást), szupramolekuláris önszerveződést, vagy külső stimulációra válaszoló (rezponzív, adaptív) viselkedést eredményezhet. A funkcionálizálásnak – s így a funkcionális anyagok alkalmazásával elérhető megnövekedett biztonságának – természetesen költsége van, amely az optimálisan betöltött funkcióban térül meg egy gazdaságos funkcionális polimer rendszer esetében. Ennek változását az igények és az innováció függvényében számos funkcionális polimer rendszer műszaki története jelzi, mint pl. a cellofán, a gumiabroncs, a szemészeti lencsék, a tablettabevonó polimer rendszerek¹⁻⁶.

A funkcionális polimer rendszerek fő alkalmazási területei közé a járműipar, a biztonságos élelmiszer-csomagolás, az egészségipar, a bionika, robotika, energetika, elektronika, az építőipar, és a biztonsági technológiák (katasztrófa- és honvédelem) tartoznak. E területeken új stabilizátorok, katalizátorok, hatóanyag-hordozó rendszerek, felületi lerakódást gátló (antifouling), vagy bioadhéziót növelő rétegek, polimer membránok, biomimetikus vázstruktúrák, teranosztikumok, bioszenzorok, stb. készülhetnek funkcionális polimer struktúrákból⁷. A *multifunkcionális rendszerek* több funkció – pl. tűzvédelmi, szilárdságnövelő, hőszigetelő, energiatároló, gyógyszerhordozó, stabilitásnövelő képesség – szinergikus kombinálásával készülnek.

* A közlemény Marosi György, az MTA levelező tagja által tartott székfoglaló előadás szerkesztett változata

** Tel.: 36 1 463-3654, e-mail: marosi.gyorgy@vbk.bme.hu

Új funkciók kialakítása *funkcionális technológiák* megvalósításával történik, ami magában foglalhatja új anyagok változó alkalmazási igényei szerinti flexibilis szintézisét, feldolgozását, minőségbiztosítását és az eljárás modellalapú fejlesztését. A funkcionális technológiák jellemző példái a chipgyártás, a gyógyszeripari amorf szilárd diszperziók előállítás, robotok intelligens anyagfajtáinak kifejlesztése.

A hasonlóan fontos, feltörekvő technológiák azonosítása funkcionális megközelítést alkalmazó *technológia-előrelzési* eljárással történhet, amely a fejlődési minták felderítésére alkalmas kétváltozós kovariációs (más néven „functional reasoning”) statisztikai módszer. Ez számos dolgot egyszerre tud figyelembe venni (pl. a kölcsönhatásokat, a rövid és hosszú távú viselkedést, stb.) és integrálható olyan szövegbányászati algoritmusokkal, melyeket szabadalmi dokumentumokra, szakértői ismeretekre specializáltak, valamint beépíthető a természetes nyelvi feldolgozó elemző eszközláncba („toolchain”)¹.

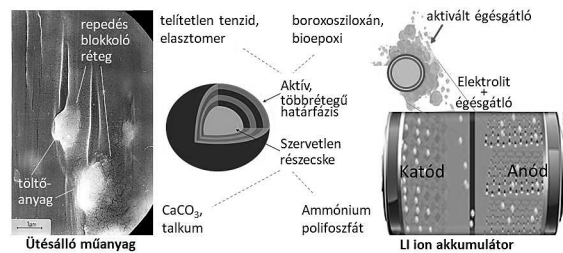
A statisztikai módszerek alkalmazásának nagy szerepe van abban is, hogy a funkcionális technológiákban maximálisan érvényre jussanak az Ipar 4.0 elvek, mint pl. a gyártóegységek kommunikációja egymással, a folyamatmegértésen alapuló számítógépes irányítás, a technológia digitális másának létrehozása, alkalmazása és folyamatos fejlesztése, valamint az önszervező mechanizmusokon alapuló decentralizáció. A decentralizált hálózatokba szervezett gyártás rugalmasan tud alkalmazkodni a dinamikusan változó igényekhez és külső tényezőkhöz. A teljesen integrált, automatikusan ellenőrzött, állandóan javuló technológia így a hatékonyság mellett a megbízhatóság magas szintjét tudja biztosítani.

2. Sajat kutatási területekről választott példák

A kiválasztott területeken a példák sokasága miatt nincs mód a kapcsolódó eredmények részletes ismertetésére, így a legtöbb esetben a részletek tekintetében a hivatkozott publikációra kell támaszkodni. Csúpan néhány esetben kerül sor a vonatkozó funkcionális polimer rendszer bővebb bemutatására és alkalmazási lehetőségeinek ismertetésére.

2.1. Közlekedésbiztonság

A mechanikai biztonság megteremtése hagyományosan a járműipar kiemelt céljai közé tartozik, az elektromos autók előretörése óta emellett a tűzbiztonság is hasonló fontosságúvá vált. Az anyagválasztást az utóbbi időben a környezetbiztonság is befolyásolja, amit jól mutat az Európai Unió ELV direktívája⁸. E célok elérésére ütköző és műszerfal előállítására alkalmas kompozitok kedvező merevség-szívósság arányát többretegű (kémiai és fizikai kompatibilizáló) fázishatárreteg kialakításával⁹, valamint erősített polimer rendszerekben először alkalmazott (telítetlen) reaktív felületaktív anyagokkal^{10,11}, az égésgátlást pedig termikusan adaptív (hő hatására aktiválódó) adalékrendszerrel¹² oldottuk meg. A rétegstruktúrából a megnövekedő hőmérséklet hatására kiszabaduló, aktivált égésgátló hatása a 2. ábra szerint megelőzheti a lítium-ion akkumulátorokból kiinduló gépjárműtüzeket.



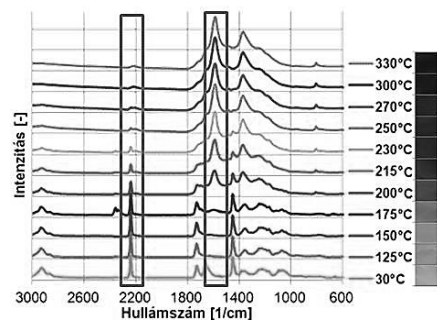
2. Ábra. Ütközési energiát szétoszlató és égésgátlást szabályozó fázishatár-retegek gépjárművek funkcionális komponenseihez

Felismertük, hogy önerősített kompozitok (önmagukban éghető) orientált polimer szálai az erősítés mellett, a hő hatására bekövetkező zsugorodásuk eredményeként aktív szerepet tölthetnek be az égésgátlásban, jelentősen csökkentve az önkioltó szint eléréséhez szükséges adaléktartalmat¹³. Így pl., biztonságos, könnyű bukósisakok előállítására alkalmas égésgátló, önerősített és 100%-ban újrahasznosítható, polimer struktúrák készíthetők.

Repülőgépek biztonságához kapcsolódó egyik feladat a villámvédelem, amely nélkül súlyos károk érik a burkolatot. Egyre nagyobb igény van radarabszorbens repülőgépekre, amelyek esetében vezetőképes, égésgátló, fémmentes bevonat kifejlesztése volt a feladatunk. E célokra megfelelő funkcionális polimer felületi réteg kialakítása a 3. ábrán látható több lépésből állt. Az első lépés a szálképzés során egy irányba rendeződő szén nanocső (CNT) köteget tartalmazó vezetőképes poliakrilnitril (PAN) szálak szövédékének előállítása volt, ezt folyamatos kemencében végzett kontrollált szenesítés követte. A szálak – orientálás után – égésgátló epoxigyanta (EP) rétegbe lettek beágyazva, létrehozva a kívánt villámvédő bevonatot. A 4. ábrán látható a C=N csoportok képződése a nitril csoportok helyett a hőkezelés során. További részletek az eljárás publikálható részét tartalmazó közleményben található¹⁴.



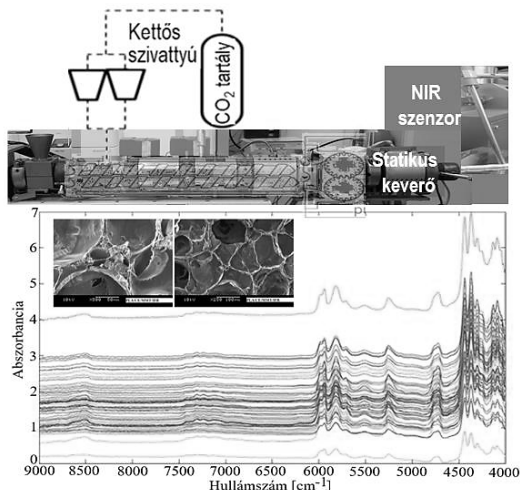
3. Ábra. Repülőgép villámvédelmére szolgáló vezetőképes, epoxigyanta réteg kialakításának lépései



4. Ábra. Poliakrilnitril szálak átalakulásának IR spektruma a hőmérséklet függvényében

2.2. Élelmiszerbiztonság

Az élelmiszerbiztonság része a csomagolás biztonsága. A legfőbb cél a becsomagolt élelmiszerek biokémiai és mechanikai védelme. Ezek fokozására szolgáló funkcionális polimer rendszereket több projekt keretében is fejlesztettük, amelyek közül most a poliészterek szuperkritikus széndioxiddal megvalósított habosításával kapcsolatos eredményeket említjük^{15,16}. A polimer habok előállítását az 5. ábrán látható berendezéssel valósítottuk meg. A CO₂ adagolás egyenletességének fokozására kettős szivattyút alkalmazunk, az egyenletes tömegáram, valamint a gázeloszlás diszperzitásának javítására pedig ömledékszivattyúval és statikus keverővel szereltük fel a folyamatos gyártást biztosító ikercsigás extrudert. A kémiai és fizikai összetétel mellett a gyártás legkritikusabb minőségi jellemzője a cellasűrűség. Ezek határozzák meg a funkcionális céltulajdonságokat, de ezek szimultán, a gyártással egy idejű, in-line vizsgálatára korábban nem volt lehetőség. Megállapítottuk, hogy korreláció áll fenn a termék NIR spektruma, összetétele és cellasűrűsége között, így in-line NIR szenzor alkalmazásával, a spektrális információkra támaszkodva, modell alapú szabályozással sikerült megvalósítani az egyenletes, biztonságos habgyártást.



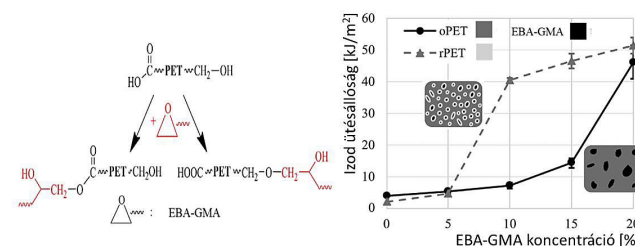
5. Ábra. Polimer hab biztonságos, egyenletes gyártását biztosító berendezés és az in-line minőségbiztosításra szolgáló NIR szenzorból származó spektrumsorozat

2.3. Környezetbiztonság

A műanyag csomagolóanyagokat a természetes környezet egyik fő ellenségének tekinti a közvélemény, mivel a korábbi fejlesztések a környezetbiztonsági szempontokra nem fordítottak kellő figyelmet. A legfontosabb cél ezért a hulladékmentes, körforgásos gazdaság megvalósítása, mégpedig az újrahasznosítás és a biológiai lebontás lehetőségeinek feltárásával és kihasználásával.

A műanyagpalack-hulladékok újrafeldolgozási hányadának növelését a silány, nagymértékben degradálódott polietilén-tereftalát (rPET) akadályozza. Felismertük, hogy a 6. ábrán látható kompatibilizálási reakció eredményeként ez az értéktelen hulladék hasznos adalékká válhat, ha ütésálló

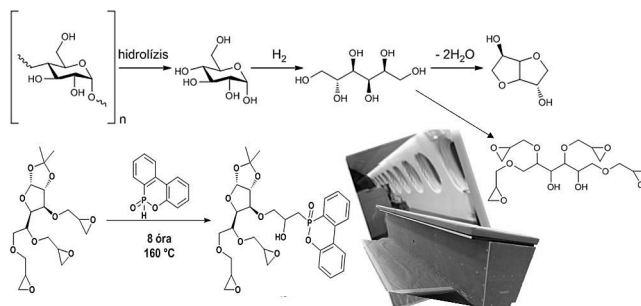
műszaki műanyagot állítunk elő belőle. Az ábrán látható, hogy az rPET többszörösére növeli az anyag ütőszilárdságát etilén-butil-akrilát-glicidil-metakrilát terpolimer (EBA-GMA) jelenlétében az eredeti molekulatömegű oPET-hez viszonyítva. Következésképpen, 50%-kal kevesebb reaktív szivósító adalék (10% EBA-GMA) elegendő hasonló ütőszilárdság eléréséhez a hulladék rPET használatával, mint oPET-tel. A jelentősen megnövekedett ütésállóság a reaktív, rövid láncú rPET makromolekulák jelenlétében létrejövő ún. „Toughening Enhancer Interphase (TEI)” kedvező hatásának tulajdonítható.



6. Ábra. A kompatibilizálási reakció és az ütőállóságnövekedés rPET jelenlétében kialakuló közvetítő határréteg hatására¹⁷

A felismerésből született találmányi bejelentésből kitűnik, hogy az eljárásból adódó széleskörű hasznosítási lehetőségek jelentősen hozzájárulhatnak a környezetbiztonsági célok realizálásához¹⁸.

Az újrafeldolgozás a hőre keményedő funkcionális polimer rendszerek esetében nem megoldható, ezért egy EU-projekt¹⁹ keretében bio-epoxi kompozitot fejlesztettünk ki repüléstechnikai célokra, együttműködve a Dassault Aviation repülőgépgyártóval. A megújuló nyersanyagforrásból származó glükóz 7. ábrán látható átalakításával nyert epoxigyanta monomerek (pl. triepoxipropil-izopropilidén glükofuranozid) térhálósításával olyan epoxigyanta kompozitokat sikerült előállítani, amelyek a szigorú repüléstechnikai előírásoknak minden tekintetben megfelelnek.



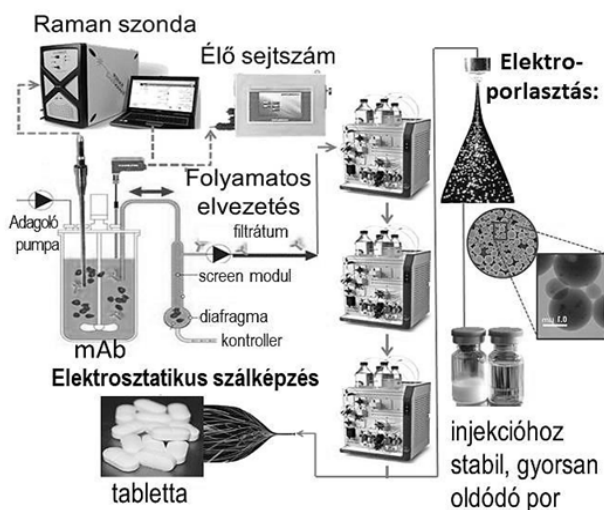
7. Ábra. Megújuló nyersanyagból (keményítő, cellulóz) szintetizált epoxi-gyanta monomerek és a felhasználásukkal előállított égésgátolt belső kompozit elemek repülőgépekhez²⁰

Az epoxigyantákra korábban kidolgozott öngyógyító jelleg²¹ ezekre az anyagokra még nem sikerült adaptálni. Az eljárás költségcsökkentésére szolgáló enzimatis reakciólépés jelenleg is fejlesztés alatt van annak érdekében, hogy a felhasználás ne csak csúcstechnológiai területre korlátozódjon.

2.4. Egészségbiztonság

Az egészségben töltött életszakasz meghosszabbításához nagy szükség van érzékeny, nagy flexibilitású bioszenzorokra, az azokból származó adatok elemzésére, valamint olyan modelleszközök kifejlesztésére, amelyek előre jelzik bioaktív molekulák oldódását és felszívódását az emésztőrendszer viszonyai között. Ezek az igényelt funkciók iniciálták egyrészt piezoelektromos érzékelő képességű hajlítható, csavarható és nyújtható PLA hab kifejlesztését és hatékony extrúziós technológiájának kidolgozását – amelynek részleteit egy találmányi bejelentésünk²² tartalmazza – másrészt méretkizárásos polimer membrán alkalmazását formulációs adalékok biotranszportra gyakorolt hatásának modellezésére, előrejelzésére²³.

A szakterület aktuális céljaihoz kapcsolódóan kifejlesztett további polimer struktúrák közül érdemes még megemlíteni a rossz vízoldhatóságú hatóanyagok biohasznosulásának javítására szolgáló nagy fajlagos felületű funkcionális amorf-szilárd polimer diszperziókat²⁵, az új receptúrájú, nedvességzáró (TiO₂-mentes) tablettabevonó polimerfilmeket²⁶, a sejtenyészésre alkalmazható polimer vázstruktúrákat (bioadhéziót növelő felületmódosítással)²⁷, valamint a biohatóanyagok kíméletes stabilitásnövelésére szolgáló polimer gyógyszerhordozó-rendszereket²⁸. Utóbbi esetben a monoklonális antitestek (mAb), mint makromolekuláris hatóanyagok kontrollált perfúziós (folyamatos) gyártásától a bio-nanogyógyszerek készítménytechnológiáig, a 8. ábrán látható minden fázisra vonatkozóan publikáltunk új, biztonságos megoldásokat^{29,30}.



8. Ábra. Monoklonális antitest perfúziós (folyamatos) gyártása és kíméletes feldolgozása gyógyszerkészítménnyé funkcionális segédanyaggal

A monoklonális antitestekre kidolgozott eljárás továbbfejlesztése más biológiai készítmények előállítására, mint pl. a vakcinálás és a sejtterápiák biztonságának megnövelésére jelenleg is folyamatban van.

2.5. Technológiai biztonság

Az alkalmazási célokhoz precíziósan illeszkedő funkcionális polimer rendszerek nem állíthatók elő biztonságosan (sejtmentesen) a hagyományos technológiák alkalmazásával. Az igények egyre inkább személyre szabottak, így az új, funkcionális technológiáknak a változó igényekhez is flexibilisen alkalmazkodniuk kell. Mindez a technológiai egységek működési paramétereire korlátozott (hagyományos) szabályozás helyett, a teljes gyártási láncra kiterjedő minőség alapú technológiai tervezés, azaz a „quality by design” (QbD) és a gyártással azonos időben (real time) megvalósított termékminőségi információ alapuló beavatkozás, azaz a „process analytical technology” (PAT) bevezetésével válik lehetővé. Az Ipar 4.0 koncepció autonóm működésű egységek kommunikációját, integrált szabályozását (pl. modell alapú digitális ikerpár hasznosításával), decentralizált döntéshozatalt és a valós, valamint virtuális („soft”) szenzorokból származó hatalmas adathalmazon (big data) alapuló folyamatos optimalizálást is célul tűzi ki, a megbízható és hatékony gyártás érdekében. Ezekhez a célokhoz kapcsolódó számos funkcionális technológiai megoldást elsőként dolgoztunk ki, pl. a kristályosítás Raman-spektrum alapú nyomon követését és szabályozását³¹, valamint a biogyógyszergyártás sokkomponensű tápközegének Raman és NIR spektrumokra épített modell alapú koncentrációs szabályozását^{32,33}. Az új technológiai elveknek – a hagyományos szakaszos gyártástechnológia helyett – a folyamatos eljárások integrálása felel meg a legjobban. Ennek víziója látható a 9. ábrán.



9. Ábra. Folyamatos (flow) gyógyszeripari eljárások összekapcsolása „end-to-end” integrált „smart” gyártástechnológiává³⁹

A „real time” információkon alapuló okos (smart) döntések „smart” gyártást tesznek lehetővé, amelyek előnyeire nem csak következtettünk, hanem bizonyítottuk is az acetil-szalicilsav „end-to-end” folyamatos technológiájának kidolgozásával³⁴. Ennek része lehet a folyamatos porkeverési technológia, melynek digitális ikerpárját („digital twin”) kidolgozva optimalizálni tudtuk a feldolgozott anyagok tartózkodási időeloszlását („residence time distribution”, RTD)³⁵. Mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásával megbízható és „humán-centrikus”, gépi látáson alapuló részecskeanalizálót³⁶, valamint a folyamatparamétereiből generált „soft” szenzort kifejlesztve járultunk hozzá a gyógyszerek „real-time” minősítését (RTRT) és gyors piac-

ra jutását lehetővé tevő technológiák megszületéséhez³⁷. A gyártási adathalmaz (big data) értelmezése MI (pl. „interpretable artificial neural networks”) segítségével elősegíti a (QbD) folyamattervezést és optimalizálást³⁸.

A folyamatos technológiával kombinált QbD, PAT, Ipar 4.0 és MI felsorolt elemei, kiegészítve a technológiai egységek közötti 5G alapú kommunikáció alkalmazásával, lehetővé teszik a személyre szabott funkcionális polimer rendszerek gyártását a tömegtermelés előnyeinek megtartása mellett.

3. Megoldandó feladatok és konklúzió

Bár a funkcionális polimer rendszerek fejlődése végigkísérte az evolúciót, majd az ember alkotta technológiák és az informatika egyre rohamosabb fejlődésével együttesen napjainkra a jövőnk alakulásának meghatározó tényezővé vált, számos kihívás továbbra is fennáll ezen a területen. Ezt a következő néhány példán keresztül is érzékeltetni lehet:

1.) A multifunkcionális polimer rendszerek területén előrelépésre van szükség a jelérzékelésre és hasznosításra képes nagyrugalmasságú anyagok – pl. „smart” égésgátolt bioelasztomerek – területén, valamint fontos lenne a színváltoztató és az alakemlékező képességek integrálása oly módon, hogy külső jel hatására a szín és az alak szinergetikusan megváltozhasson.

2.) Az öngyógyító tulajdonság jelenleg elsősorban mozgékony makromolekulákkal valósítható meg, míg a jó mechanikai tulajdonságú polimerek dinamikus képességei általában gyengék. Utóbbiakban dinamikus kovalens kötések beépítésével (pl. vitrimerek szintézisével) kell kialakítani a rezponzivitást a külső ingerekre, pl. fény, vagy tűzhatásra.

3.) A lítium-ion akkumulátorok elektródjaként és a vezeték nélküli kommunikációs iparban is használt vezetőképes polimer rendszerek esetében ultraalacsony dielektromos állandójú funkcionális polimer rendszereket kell megtervezni és előállítani, úgy hogy más tulajdonságaik ne romoljanak.

4.) A rugalmas, hajlítható, csavarható és nyújtható szenzorok, energiátároló eszközök gyártása még kezdeti szakaszban van, ezért szükséges olyan termelékeny stratégiák kidolgozása az ilyen eszközök gyártására, mint pl. a piezoelektromos hab már említett extrúziója.

5.) A polimer membránok élettartamát csökkentő, eltömődést okozó felületi szennyeződések, valamint vízzel érintkező felületek nem kívánatos bioszennyeződésének (biofouling) csökkentésére hatékony és hosszú élettartamú lerakódásgátló polimer rétegek kifejlesztése kívánatos.

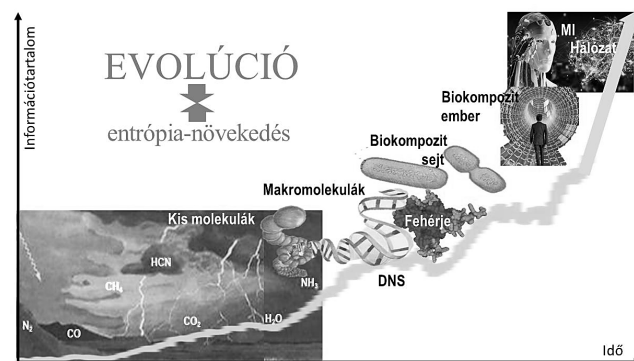
6.) Az egészségbiztonság területén foglalkozni kell a stabilitáselőrejelzés anyagtudományi és statisztikai módszereinek kidolgozásával, a szabályozott gyógyszerbejuttatást elősegítő és a biológiai akadályok leküzdéséhez hozzájáruló nanostrukturált gyógyszersegédanyagok kifejlesztésével,

valamint biointegrált (tenyésztett szövetekkel társított) polimer rendszerek célzott (pl. robotikai) alkalmazásával.

7.) A funkcionális technológiák fejlesztésének következő jelentős lépcsőfoka az ipar 5.0 elvek bevezetése lesz, amely építve az autonóm, precíziós, decentralizált gyártástechnológia eredményeire, kombinálja azokat az emberi képzelőerő és kezűgyesség előnyeivel, kiaknázva az agyban rejlő potenciált. Mesterséges intelligencia határozza meg – pszichológiai elemzések alapján – a személyre szabott igényeket, s azonosítja azokat a gazdasági/technológiai mintázatokat és trendeket, amelyek megalapozhatják a döntéshozatalt. Egyszerre mindent figyelembe véve avatkozik be és az irányított kíváncsiságot hasznosító innovációösztönzéssel optimálisan adaptálódik a változásokhoz. Ennek során a hatékonyságnövelés mellett, kiemelt figyelmet kell fordítani a biztonságos, körforgásos, emberközpontú technológiák fejlesztésére, és egyben az ipar 5.0 vonatkozásában felmerülő szabványosítási és „benchmarking” problémákat is meg kell oldani.

A funkcionális polimerek és technológiák tehát kritikus szerepet játszanak a társadalom fejlődésében a jövőben is. Más területekkel együttműködve járulnak hozzá azoknak a hatalmas kihívásoknak a megoldásához, amelyekkel emberi fajként és földi bioszféraként szembesülünk.

Ezek a kihívások azért is tűnhetnek nyomasztónak, mert a gyorsuló változással nehéz lépést tartani. Az evolúció kezdete óta az anyagi világunk információtartalma növekszik, mégpedig az 10. ábrán illusztrált módon, exponenciálisan. „Az evolúció gyorsul” olvashatjuk a Science folyóiratban⁴⁰.



10. Ábra. Az anyag információtartalmának a növekedését illusztráló jellegzőgörbe

Kis molekuláknál információgazdagabbak a polimerek – különösen a DNS és fehérje makromolekulák – de szinte összemérhetetlenül több információ van egyetlen „biokompozit-sejtben”. Ezekhez képest hogyan is tudnánk kifejezni a „biokompozit-ember” információtartalmát? A digitalizáció útján járó „ember-anyag” ugrásszerűen növekvő információtartalma jelenleg az informatikai hálózatok és a MI szintjét érte el. Ez a trend – mint egy vektor – „az információ szélsőértéke” (vagy más szóval az „abszolút információ”) irányába mutat. A változás nem egyenletes, hanem a válságokat követő evolúciós ugrások jellemzik. Ez remény-

re ad okot, hogy súlyos válságok sem akadályozhatják meg egyfajta „bioszféra-homeosztázis” megszületését. Az evolúció nem áll meg...

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki a FirePharma kutatócsoport jelenlegi és korábbi tagjainak, valamint hazai és külföldi együttműködő partnereinek, azaz mindazoknak, akik a felsorolt publikációkban szerzőként szerepelnek, valamint a háttérben önzetlenül tevékenykedő, meg nem nevezett, segítőknek. A munka jelentős része az RRF-2.3.1-21-2022-00015 számú projekt keretében az Európai Unió támogatásával valósult meg, s köszönet illeti az NKFIH-t a 2019–1.3.1- KK-2019–000 04, GINOP_PLUSZ-2.1.1-21-2022-00041 és OTKA K 143039 számú projektek keretében nyújtott támogatásért. Az ipari partnereket (akik felsorolására itt nincs lehetőség) illeti a köszönhet azért, hogy munkánknek gyakorlati irányt szabnak.

Hivatkozások

1. Apreda, R., Bonaccorsi, A., dell'Orletta, F. Fantoni G. *Eur J Futures Res* **2016** 4, 13, 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s40309-016-0093-1>
2. Davies, P. Life force, *New Scientist* **1999** 163(2204), 27–30.
3. Cellophane, *Encyclopedia Britannica*, Encyclopædia Britannica, Inc: Edinburgh, **2010**.
4. Al-Najati, I., A. H., Chan K. W., Pu S., *IJPEDS* **2022** 13(1), <https://doi.org/10.11591/ijped.v13.i1>
5. McMahon, T.T., Zadnik, K. *Cornea*. **2000** 19(5):730-40.
<https://doi.org/10.1097/00003226-200009000-00018>
6. Salawi, A. *Polymers* **2022**, 14, 3318.
<https://doi.org/10.3390/polym14163318>
7. Wang, K., Amin K., An Z., et al. *Mater. Chem. Front.*, **2020** 4, 1803-1915.
8. Directive 2000/53/EC on end of life vehicles Guidance Document, European Commission, **2005**.
9. Marosi, G., Bertalan, G., Rusznák, I., Anna, P., *Coll. Surf.* **1989** 23(3), 185–198.
[https://doi.org/10.1016/0166-6622\(89\)80334-8](https://doi.org/10.1016/0166-6622(89)80334-8)
10. Marosi, G., Anna, P., Csontos, I., Márton, A., Bertalan, G. *Macromolecular Symposia* **2001** 176, 189–198. Wiley Online Library.
[https://doi.org/10.1002/1521-3900\(200112\)176:1<189::AID-MASY189>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1521-3900(200112)176:1<189::AID-MASY189>3.0.CO;2-Z)
11. Marosi, G., Márton, A., Csontos, I., Matkó, S., Szép, A., Anna, P., Bertalan, G., Kiss É. In: *From Colloids to Nanotechnology. Progress in Colloid and Polymer Science*, Zrinyi, M., Hörvölgyi, Z. Eds.: Springer, Berlin, Heidelberg. **2004** 125. 189–193.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-45119-8_32
12. Marosi, G., Anna, P., Marton, A., Bertalan, G., Bota, A., Toth, A., Mohai M. Racz, I. *Polym. Adv. Techn.*, **2002** 13(10-12), 1103–1111.
<https://doi.org/10.1002/pat.284>
13. Bocz, K., Simon, D., Bárány, T., Marosi, G. *Polymers*, **2016** 8(8) 289.
<https://doi.org/10.3390/polym8080289>
14. Molnár, K., Szabó, G., Szolnoki, B., Marosi, G., Vas, L. M., Toldy, A. *Polym. Adv. Techn.*, **2014** 25(9), 981–988.
<https://doi.org/10.1002/pat.3339>
15. Vadas, D., Igricz, T., Sarazin, J., Bourbigot, S., Marosi, G., Bordácsné Bocz, K. *Polym. Deg. Stab.*, **2018** 153. 100-108.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.021>
16. Bocz, K., Ronkay, F., Molnár, B., Vadas, D., Gyürkés, M., Gere D., Marosi, G., Czigany, T. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, **2021** 4, (3), 178-186.
<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.03.002>
17. Bocz, K., Ronkay, F., Decsov, K., Molnár, B., Marosi, G. *Polym. Deg. Stab.*, **2021** 185, 1-11. 109505,
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109505>
18. Patent filed Hungary P2000393 **2020**
19. Innovative natural resins for airplane applications (Clean Sky) EU7 project, No: 298090
20. Toldy, A., Niedermann, P., Rapi, Z. Szolnoki, B. *Polym. Deg. Stab.* **2017** 62-68.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.05.024>
21. Kling, S., Czigány, T. *Comp. Sci. Techn.*, **2014** 99, 82-88
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.020>
22. Patent filed Hungary P2000412 **2020**
23. Borbás, E., Tözsér, P., Tsinman, K., Tsinman, O., Takács-Novák, K., Völgyi, G., Sinkó, B., Nagy, ZK. *Mol Pharm.* **2018** 15(8), 3308-3317.
<https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.8b00343>
24. Nagy, ZK., Balogh, A., Drávavölgyi, G., Ferguson, J., Pataki, H., Vajna, B., Marosi, G. *J. Pharm. Sci.*, **2013** 102, (2), 508-517,
<https://doi.org/10.1002/jps.23374>
25. Szabó, E., Záhonyi, P., Brecka, D., Galata, D. L., Mészáros, L., Madarász, L., Csorba, K., Vass, P., Hirsch, E., Szafraniec-Szczęsny, J., Csontos, I., Farkas, A., Van denMooter, G., Nagy, ZK., Marosi, G. *Mol. Pharm.* **2021** 18, 1, 317–327
<https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.0c00965>
26. Csontos, I., Rónaszegi, K., Szabó, A., Keszei, S., Anna, P., Fekete, P., Marosi, Gy. Nagy, T. *Polym. Adv. Techn.*, **2006** 17(11-12), 884–888.
<https://doi.org/10.1002/pat.773>
27. Hirsch, E., Nacs, M., Ender, F., Mohai, M., Nagy, ZK., Marosi, G. *Period. Polytechn. Chem. Eng.*, **2018** 62(4), pp. 510–518.,
<https://doi.org/10.3311/PPch.12854>
28. Hirsch, E., Pantea, E., Vass, P., Domján, J., Molnár, M., Suhajda, A., Andersen, S. K., Vigh, T., Verreck, G., Marosi, G., Nagy, ZK. *Food and Bioproducts Processing*, **2021** 128, 84-94,
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.04.016>
29. Vass, P., Démuth, B., Hirsch, E., Nagy, B., Andersen, S. K., Vigh, T., Verreck, G., Csontos, I., Nagy, ZK., Marosi, G. *J. Control. Release*, **2019** 296, 162-17.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.01.023>
30. Domján, J., Pantea, E., Gyürkés, M., Madarász, L., Kozák, D., Farkas, A., Horváth, B., Benkő, Z., Nagy, ZK Marosi, G., Hirsch, E. *Biotechn. J.* **2022** 17, 5 2100395.
<https://doi.org/10.1002/biot.202100395>
31. Pataki, H., Csontos, I., Nagy, ZK., Vajna, B., Molnar, M., Katona, L., Marosi, G. *Org. Process Res. Dev.* **2013** 17, (3), 493–499.
<https://doi.org/10.1021/op300062t>
32. Kozma, B., Hirsch, E., Gergely, S., Párta, L., Pataki, H., Salgó, A. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **2017** 145, 346-355.
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2017.06.070>
33. Domján, J., Fricška, A., Madarász, L., Gyürkés, M., Köte, Á., Farkas, A., Vass, P., Fehér, Cs., Horváth, B., Könczöl, K., Pataki, H., Nagy, ZK., Marosi G., Hirsch, E. *Biotechn. Prog.* **2020** 36, (11) e3052
<https://doi.org/10.1002/btpr.3052>

34. Balogh, A., Domokos, A., Farkas, B., Farkas, A., Rapi, Z., Kiss, D., Nyíri, Z., Eke, Z., Szarka, G., Örkényi, R., Mátravölgyi, B., Faigl, F., Marosi, G., Nagy, ZK. *Chem. Eng. J.*, **2018** 350, 290-299.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.188>
35. Beke, Á. K., Gyürkés, M., Nagy, ZK., Marosi, G., Farkas, A. *Eu. J. Pharm. Biopharm.*, **2021** 169, 64-77.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.09.006>
36. Madarász, L., Köte, Á., Hambalkó, B., Csorba, K., Kovács, V., Lengyel, L., Marosi, G., Farkas, A., Nagy, ZK., Domokos, A. *Int. J. Pharm.*, **2022** 612, 121280.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.121280>
37. Gyürkés, M., Madarász, L., Záhonyi, P., Köte, Á., Nagy, B., Pataki, H., Nagy, ZK., Domokos, A., Farkas, A. *Int. J. Pharm.*, **2022** 624, 121950.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.121950>
38. Nagy, B., Szabados-Nacsa, Á., Fülöp, G., Turák Nagyné, A., Galata, D. L., Farkas, A., Mészáros, L. A., Nagy, NK., Marosi, G. *Int. J. Pharm.*, **2023** 633, 122620.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.122620>
39. Marosi, G., Hirsch, E., Bocz, K., Toldy, A., Szolnoki, B., Bodzay, B., Csontos, I., Farkas, A., Balogh, A., Démuth, B., Nagy, ZK., Pataki, H. *Period. Polytechn. Chem. Eng.*, **2018** 62 (4), 457-466.
<https://doi.org/10.3311/PPch.12870>
40. Bonnet T. et al. *Science* **2022** 376, 6596 1012-1016.
<https://doi.org/10.1126/science.abk0853>

Functional polymer systems, technologies – evolution

Biocomposites created by living organisms are the functional polymer systems **of the nature**, e.g. fibrous and layered structures serving the safety of these organisms. With the progress of evolution, they have become more and more intelligently regulated material systems carrying more and more information.

The **safety** (Figure 1) of the man-made world can be maintained by the adaptive interaction of the following terms: materials – environment – information – technology. A functional polymer system adapts to a user's or environmental needs and serves safety. Functionalization – and thus the safety increased by functional materials – has naturally a cost, which is repaid in the optimally fulfilled function of an economical functional polymer system. **Multifunctional systems** have several functions combining e.g. fire-protecting, strength-enhancing, heat-insulating, energy-storing, medicine-carrying, or stability-enhancing capabilities synergistically. New functions are created by implementing **functional technologies**. It is important that the principles of Industry 4.0 are realized entirely in current functional technologies. The fully integrated, controlled, constantly improving technologies can thus ensure a high level of efficiency and reliability.

A few selected examples of our own research topics are presented here showing their application possibilities, while in other cases only the cited publications are referred.

In the field of **transportation-safety**, the traditionally important mechanical safety is accompanied with fire safety since the spreading of electric cars. In order to achieve these goals, the favorable stiffness-toughness ratio of composites (suitable for the production of bumpers and dashboards) is achieved by creating a multifunctional (chemical and physical compatibilizing) interfacial layer⁹ (shown in Figure 2), as well as by (unsaturated) reactive surfactants (used for the first time in reinforced polymer systems)^{10,11}, while the combustion inhibition was solved with a thermo-adaptive additive system¹². In the case of radar-absorbing aircraft, our task was to develop a conductive, flame-retardant, metal-free coating. The formation of a functional polymer surface layer, corresponding to these goals, consisted of the steps shown in Figure 3. The first step (during fiber formation) was the production of a web of conductive polyacrylonitrile (PAN) fibers containing bundles of longitudinally arranged carbon nanotubes (CNT). It was followed by controlled carbonization in a continuous oven. The fibers – after orientation – were embedded in a

flame-retardant epoxy resin (EP) layer, creating the desired lightning protection coating¹⁴.

For **food-safety** purposes packaging polymer foams were produced with the equipment shown in Figure 5. We found that there is a correlation between the NIR spectrum, composition and cell density of the product, so by using an in-line NIR sensor, it was possible to achieve uniform, safe foam production through model-based control utilizing the spectral information^{15,16}.

Regarding the **environmental safety**, we realized that the largely degraded polyethylene terephthalate (rPET) fraction of plastic bottle waste increases the impact strength of the material in the presence of ethylene-butyl-acrylate-glycidyl-methacrylate terpolymer (EBA-GMA) much better than the oPET with original molecular weight. The significantly increased impact resistance, shown in Figure 6, is the consequence of the presence of reactive, short-chain rPET macromolecules. These can induce the formation of beneficial “Toughening Enhancer Interphase (TEI)” around the EBA-GMA particles¹⁷.

For aeronautical purposes we developed a bio-epoxy composite in cooperation with the aircraft manufacturer Dassault Aviation. By cross-linking the epoxy resin monomers, obtained by the conversion of glucose from a renewable raw material source (see in Figure 7), it was possible to produce epoxy resin composites that meet the strict aviation regulations in all respects.

For ensuring **health-safety** new poorly soluble drugs and biodrugs are more and more important. Polymer structures, developed in connection with the current goals of the field, are the functional amorphous-solid polymer dispersions with a large specific surface area for improving the bioavailability of poorly water-soluble active pharmaceutical ingredients²⁵, tablet-coating polymer films were formulated in a moisture-proof (TiO₂-free) form²⁶, polymer scaffolds applicable (with surface modification that increases bioadhesion) for cell culture proliferation²⁷ and polymer drug carrier systems for increasing the stability of bioactive substances gently²⁸. The controlled manufacturing technology, including perfusion (continuous) production of monoclonal antibodies (mAb) (being macromolecular active substances) and formulation of bio-nanomedicines, is shown in Figure 8. For each phases of this process new, safe solutions have been published^{29,30}. Further applications for the production of other biological products rations, such as safe vaccines and cell-therapies, are currently under development.

The realization of **technological safety** is necessary for the waste-free production of functional polymer systems that precisely match the application goals and are increasingly personalized. We were the first to develop the Raman spectrum-based monitoring and control of crystallization technology³¹, as well as the model-based concentration control (based on Raman and NIR spectra) of multi-component media for biopharmaceutical production^{32,33}.

The **integration of continuous processes** best suits the new technological principles (instead of the traditional batch pharmaceutical technology). A vision of this approach can be seen in Figure 9. We demonstrated the advantages of this continuous technology by developing the “end-to-end” flow production of acetylsalicylic acid³⁴. By using artificial intelligence (AI), we have developed a reliable and “human-centered” particle analyzer, based on machine vision³⁶, as well as a “soft” sensor, generated from process

parameters. This way we contributed to the establishment of technologies enabling the real-time release testing (RTRT) and thus to the rapid market access of medicines³⁷.

Functional polymers and technologies will continue to play a critical role in the development of society. The information content of the materials increases faster and faster with the progress of evolution, as illustrated in Figure 10. Polymers – especially DNA and protein macromolecules – are rich in information much more than the small molecules. There is almost incomparably more information in a single “biocomposite cell”. However, compared to these, how could we express the information content of a “biocomposite” man? The exponentially increasing information content of “human-material” reached currently – through digitalization – the level of IT-networks and AI. This trend – like a vector – is directed to the “extreme value of information” (or “absolute information”). Evolution does not stop...