

[49] R. S. Kovats et. al., The effect of temperature on food poisoning: Time series analysis in 10 European counties. *Epidemiology Infection* (2004) 132, 443.

[50] P. Bi et. al., Climate variability and Salmonella infection in an Australian temperate climate city. In: Conference of the international society of environmental epidemiologists, Dublin, 2009.

[51] R. S. Kovats, Climate variability and campylobacter infection: An international study. *International Journal of Biometeorology* (2005) 49, 207–214.

[52] M. Zimmermann et. al., Variability of total and pathogenic vibrio parahaemolyticus densities in Northern Gulf of Mexico water and oysters. *Applied and Environmental Microbiology* (2007) 73, 7589–7596.

[53] I. R. Lake et. al., A re-evaluation of the impact of temperature and climate change on foodborne illness. *Epidemiol. Infect.* (2009) 137, 1538–1547.

[54] U. Confalonieri et. al., in: *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II. to the fourth assessment report of the inter-governmental panel on climate change.* Cambridge University Press, 2007, 391–431.

[55] R. Poulin, K. N. Mouristen, Climate change, parasitism and the structure of intertidal ecosystems. *Journal of Helminthology* (2006) 80, 183–191.

[56] K. S. Pereira et. al., Transmission of Chagas disease by food. *Advances in Food and Nutrition Research* (2010) 59, 63–85.

[57] K. S. Utaaker, L. J. Robertson, Climate change and foodborne transmission of parasites: A consider of possible interactions and impacts for selected parasites. *Food Research International* (2015) 68, 16–23.

[58] J. D. Miller, Mycotoxins in small grains and maize. *Food Additives and Contaminants* (2008) 25, 219–230.

[59] Synthesis and assessment product 4.3, USDA. The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity in the United States. USDA, 2008.

[60] L. Bopp et. al., Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters* (2005) 32, 1–4.

[61] S. K. Moore et. al., Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environmental Health* (2008) 7 (Suppl. 2), S4.

[62] M. J. Edwards et. al., Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic. *Limnology and Oceanography* (2006) 51, 820–829.

[63] G. Hallegraeff et. al., Recent range expansion of the red-tide dinoflagellate in Australian coastal waters. *IOC–UNESCO Harmful Algae Newsletter* (2008) 38, 10–11.

[64] G. Umlauf et. al., The situation of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs after the flooding of river Elbe and Mulde in 2002. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* (2005) 33, 543–554.

[65] J. Manuel, In Katrina’s wake. *Environmental Health Perspectives* (2006) 114, 32–39.

[66] Soil erosion and run-off cropland. In: Report from the USA, Soil and Water Conservation Society, 2003, 63.

[67] C. Rosenzweig et. al., Climate change, crop pests and diseases. In: *Climate change futures: Health, ecological and economic dimensions.* 2005, 70–77.

[68] Global food policy report. In: *Extended results of the IMPACT model.* IFPRI, Washington, DC, 2017.

[69] K. Grace et. al., Linking climate change and health outcomes: Examining the relationship between temperature, precipitation and birth weight in Africa. *Glob. Environ. Chang.* (2015) 35, 125–137.

[70] J. Fanzo et. al., Climate change and variability. What are the risk for nutrition, diets and food systems? In: IFPRI discussion paper 1645. Washington, DC, 2017.

[71] M. Springmann et. al., Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study. *Lancet* (2016) 387, 1937–1946.

[72] J. Ranganathan et. al., Shifting diets for a sustainable food future. In: *Creating a sustainable food future.* Washington, DC, 2016.

[73] S. S. Myers et. al., Effects of increased concentration of atmospheric CO2 on the global threat of Zn deficiency: a modelling study. *Lancet Glob. Heal.* (2015) 3, e639–e645.

[74] L. Bouwman et. al., Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (2013) 110, 20882–20887.

[75] J. A. Foley. A five-step global plan could double food production by 2050 while greatly reducing environmental damage. *Sci. Am.* (2011) 305, 60–65.

[76] J. de Boer et. al., Help the climate, change your diet: a cross-sectional study on how to involve consumers in a transition to a low-carbon society. *Appetite* (2016) 98, 19–27.

[77] W. You, M. Henneberg, Meat consumption providing a surplus energy in modern diet contributes to obesity prevalence: an ecological analysis. *BMC Nutr.* (2016) 2, 22.

[78] L. Lipper et. al., Climate-smart agriculture for food security. *Nat. Clim. Chang.* (2014) 4, 1068–1072.

[79] J. Fanzo et. al., The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security* (2018) 18, 12–19.

[80] M. T. van Wijk et. al., Farm household models to analyse food security in a changing climate: A review. *Global Food Security* (2014) 3, 77–84.

[81] H. J. P. Marvin et. al., Proactive system for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point. *Food Control* (2013) 34, 444–456.

ÖSSZEFOGLALÁS

SALGÓ ANDRÁS: AZ ÉLELMISZERIPAR KIHÍVÁSAI: A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSAI AZ ÉLELMISZERBIZTONSÁGRA

A globális klímaváltozás és annak intenzív variabilitása az élelmiszerláncra és az élelmiszer-biztonságra, valamint az ellátásbiztonságra vonatkozóan jelentős veszélyeket hordoz az elsődleges nyersanyagtermeléstől a fogyasztóig. Cikkünk a klímaváltozás hatásai-ként az élelmiszernyersanyag-termelésre gyakorolt hatásokkal (vízellátás, légszennyezés, nyersanyag-változékonyság, védekezésben használt anyagok); az élelmiszer-biztonságra kifejtett hatások változásaival (mikrobiológiai változások, paraziták, mikotoxinok, egyéb környezet szennyezők); és a táplálkozástani következményekkel, a humán hatások várható következményeivel foglalkozik. Összefoglaljuk a klímaváltozás lehetséges modellezési módszereinek fejlődési tendenciáit és kitekintést adunk a várható tendenciák és javaslatok tekintetében.

Nagyházi Márton – Tuba Róbert

■ Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet | tuba.robort@ttk.hu

A zöld kémia válasza az éghajlatváltozásra

A történelem minden időszakában voltak már világméretű válságok. Mára talán elég bölcs és érett az emberiség arra, hogy a tudomány eszközeivel előre jelezze az efféle vészterhes korszakokat, és azokra idejében megfelelő válaszokat adjon. S bár tudjuk jól, hogy a természet is ezer veszedelemmel leselkedik az emberi életre, a legnagyobb veszélyt kétségkívül mégis maga az ember jelentheti saját magára. Ennek legutóbbi s vélhetően legnagyobb kicsúcsosodása a bolygóméretű éghajlatváltozás.

Földünkön az élet azért alakulhatott ki, mert páradús légkör lehetővé tette a víz körforgásának beindulását. A légkörünket alkotó gázokból néhány ugyanis képes a beérkező napfényből kép-

ződő hőenergiát (infravörös sugárzást) megkötni, és így szabályozni a Föld légkörének hőmérsékletét. Ezért többek között ezeknek a gázoknak is köszönhető, hogy olyan klíma jött létre a Föld felszínén, amely lehetővé tette az élet kialakulását. Ezt nevezzük üvegházhatásnak. E jelenség hiányában bolygónkon nap és árnyék közt akár kétszáz fok hőmérséklet-különbség is lehetne, ahogyan ez a Holdon vagy a Merkúron is van [1]. Ha viszont a jelenség túlszalad, és a légkör túl sok energiát köt a felszínhez, akkor az időjárás a Vénuszon uralkodóhoz válik hasonlónak, amelyen 4–500 °C-os forráság tombol (itt a légkör több mint 90%-a szén-dioxid). S bár ez a bolygó nyilvánvalóan közelebb kering a

Naphoz, mint a Föld, szén-dioxid-dús légköre mintegy kétszáz fokot emel a felszín hőmérsékletén [2].

Nagyon fontos tehát, hogy tisztában legyünk a Föld légkörének állapotával, mert annak összetétele közvetlenül befolyásolja éghajlatunkat. Az utóbbi évtizedekben a megfigyelések egyértelműen az üvegházhatás fokozódását mutatják, amint azt a felmelegedés, valamint az időjárás szélsőségesse válása is jelzi.

Mi lehet mindennek az oka? Geológiai megfigyelések és mérések arra engednek következtetni, hogy a bolygónk történetében volt már a mainál sokkal melegebb és hűvösebb időjárás is [3]. A jelenleg tapasztalható felmelegedés fő okának az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának utóbbi évszázadban bekövetkezett növekedését tartják, ezzel korrelál a hőmérséklet-emelkedés is. Mivel az üvegházhatású gázok az ipari forradalom óta döntő többségében emberi tevékenységekből származnak, ezért joggal feltételezzük, hogy a felmelegedés fő oka az emberi tevékenység.

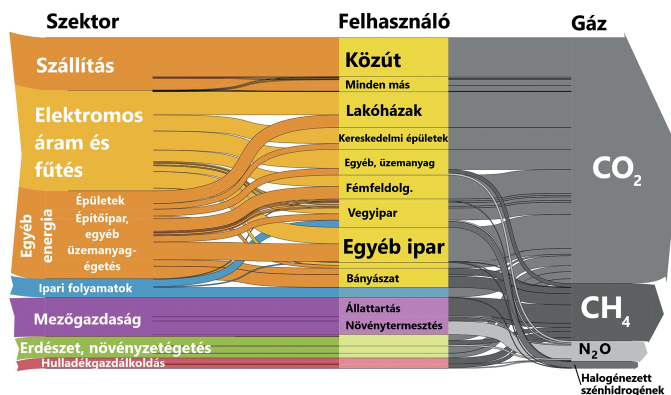
Az üvegházhatású gázok a légkörnek csekély részét alkotják. A leggyakrabban előforduló ilyen gáz a szén-dioxid, melynek átlagos koncentrációja a légkörben 390 ppm [4]. Emellett találhatóak más gázok is a légkörben, melyek ilyen hatást mutatnak – s bár koncentrációjuk ennél kisebb, a hősugárzást visszatartó hatásuk nagyobb (Global Warming Potential, GWP), mint a szén-dioxidé (GWP = 1). Így ezekkel is számolni kell, ha valós képet szeretnénk kapni a hővisszatartásra gyakorolt hatásokról [5]. Ide tartoznak a nitrogén-oxidok (GWP = 60–300 [itt a nitrogén és az oxigén összes kombinációját értjük]), a metán (GWP = 25) és a halogénezett szénhidrogének (GWP = 12,200–22,800) [6]. Emellett figyelembe kell venni az egyes komponensek légköri tartózkodási idejét is. Mivel a Föld légköre oxidatív jellegű, a metán [7] és a nitrogén-oxidok [8] idővel átalakulnak, és a csapadék a földfelszínre mossa őket. Szintjük azért nem csökken, mert természetes körforgásban vannak, melynek egyenlege – nagyrészt az emberi kibocsátás miatt – pozitív [7,8]. A halogénezett szénhidrogének is képesek bomlani a légkörben (elsősorban a Nap sugárzásának hatására), ám ez nagyon lassú folyamat.

E hatásokat összevetve arányos, súlyozott képet kaphatunk arról, melyik gáz milyen mértékben járul hozzá az üvegházhatáshoz. Látható, hogy bár a halogénezett szénhidrogének, a metán és a nitrogén-oxidok térfogatarányukhoz képest jóval nagyobb mértékben járulnak hozzá ehhez, még így is a szén-dioxid felelős a hővisszatartás döntő többségeért (1. ábra).

Szerepet játszik az üvegházhatásban még a légkör vízgőztartalma és az aeroszolok (por, felhők) árnyékoló hatása is. Kimu-

1. ábra. A világ üvegházhatásúgáz-kibocsátási értékei fajtára és szektorra bontva szén-dioxid-ekvivalensben megadva

Forrás: World Resources Institute, a Climate Watch adatai alapján



tatható ugyan, hogy a vízgőz is hozzájárul a hővisszatartáshoz, azonban ez a tényező a víz körforgása miatt közel állandó hatásnak tekinthető, mely csak a hőmérséklet függvénye, arra pedig a többi üvegházhatást okozó gáz koncentrációjának növekedése is képes hatni. A felhőzet és egyéb aeroszolok árnyékolják a Föld felszínét, s ezért ezek mérsékelik az üvegházhatást [9]. Minden hatást összevetve azonban egyértelműen látszik, hogy az üvegházhatás erősödik, bolygónk melegszik.

Az üvegházhatású gázok közül tehát a legjelentősebb a szén-dioxid. Ez széntartalmú anyagok oxidációja során keletkezik, döntő többségében tüzelőanyagok égetéséből, de termelődik valamennyi például karbonátos kőzetek hevítésekor (építőanyaggyártás), illetve bányászati, ipari melléktermékek égetésekor. Az emberiség a napi szükségletek fedezéséhez szükséges energiát túlnyomórészt – nagyon leegyszerűsítve – abban a kémiai reakcióban nyeri, melyben a szén oxigénnel egyesítve hőt szabadít fel, és szén-dioxid keletkezik. Jó jel, hogy a megújuló energia részaránya mindezek mellett is folyamatosan emelkedik.

Mivel az égetéshez nem tiszta oxigént, hanem levegőt használunk fel, az égetés hőmérsékletén a nitrogén is reagál az oxigénnel: ez eredményezi a szén-dioxidhoz képest akár nagyságrendekkel nagyobb hővisszatartó képességű nitrogén-oxidok keletkezését [10,11]. Jelentős mennyiségű nitrogén-oxid-kibocsátással jár továbbá a mezőgazdaságban a nitrogén-műtrágyázás [12].

A metán (GWP = 25) jellemzően élő szervezetekben termelődik, legnagyobb kibocsátója az állattartás. Kisebb részben lápos, mocsaras vidékeken is keletkezik anaerob bomlás következtében [13]. Ez a tundravídekek mocsaraiban az utóbbi időben felgyorsult, ugyanis a felmelegedés miatt felengedő lápos talajból elszökik az addig a fagy fogságában tartott metángáz [14].

A halogénezett szénhidrogének (GWP = 12,200–22,800) légköri térfogataránya ugyan nagyon kicsi, ehhez képest mégis számottevő mértékben járulnak hozzá a felmelegedéshez. Forrásuk elsősorban egy elavult technológia: ezeket az anyagokat hűtőgépekben használták nemrég elrendelt betiltásukig, ugyanis mérgező hatásuk mellett súlyosan károsítják a Föld ózonrétegét. Napjainkban már létezik alternatíva a kiváltásukra. Bár arányuk a légkörben lassan csökken, élettartamuk viszonylag nagy, és ezért egy jó darabig még biztosan számolni kell a jelenlétükkel [15,16].

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának részaránya nagyban függ a régiótól, a gazdaság különböző szektorainak arányától. Világszinten vizsgálva a kérdést kijelenthető, hogy a kibocsátás bő háromnegyedéért az ipar, az energiatermelés és a szállítmányozás a felelős, míg a maradékon a mezőgazdaság és a fogyasztók (háztartások, kereskedelem) osztoznak (1. ábra).

Akármely forrásból tájékozódjunk is az ember, vitán felül áll, hogy az energiatermelés a legnagyobb kibocsátó. Az energia legnagyobb részét – a felhasználó szektortól függetlenül – még mindig széntartalmú anyagok elégetésével állítják elő.

A szénnek mint primer energiahordozónak alternatívája jelenlegi tudásunk szerint a hasadóanyagok és a megújuló energiaforrások (nap-, szél-, víz-, geotermikus energia) lehetnek. A szén és a szénvegyületek olyan mértékben univerzálisan használható energiaforrások, hogy ehhez mérhetően jelenlegi technikai fejlettségünk szintjén csak az elektromos áram lenne reális alternatíva, mely viszont már szekunder energiahordozó. De még ez is döntően fosszilis eredetű, széntartalmú anyagok égetésével állítják elő. Az atomenergia számos országban – biztonsági és társadalmi szempontból – nem szívesen látott alternatíva, a megújuló energiaforrások kiaknázása pedig függ a természeti adottságoktól, és még nem kellően hatékony. Ráadásul gazdaságos meg-

oldást kellene találni az energiátárolás és -szállítás problémájára is, mely legalább enyhíteni tudná az elektromosáram-felhasználás ingadozásából adódó veszteségeket, valamint a termelés területi inhomogenitását [17].

Mit tehet ilyen helyzetben a szűkebb értelemben vett vegyipar? E kérdés megválaszolása azért is különösen fontos, mert a társadalom az ágazattal szemben sajnos kevesebb bizalommal van, mint más kibocsátókkal. Mindezek ellenére amíg más ágazatok (például a közlekedés és az energiatermelés) úgynevezett zöldítése társadalmi és politikai nyomásra is látványosan halad, a vegyipar esetén ez a hatás inkább tudományos és gazdasági eredetű, tehát az szakma jobbra magát újítja meg. Az új szemlélet előfutára az úgynevezett zöld kémiai alapelvek megjelenése volt a kilencvenes években [18]. Az elv megalkotói tizenkét pontban fogalmazták meg, mely szempontok érvényesítésére kell nagyobb hangsúlyt fektetnie a vegyiparnak ahhoz, hogy eljárásainak káros környezeti hatásai mérséklődjenek, és lehetőség szerint gazdaságosak is legyenek.

Mivel a tizenkét pont közül több is rímél egymásra, ezért jobbnak láttuk csoportosítani őket a következő négy fő terület szerint: 1) energiahatékonyság, 2) takarékoság, 3) termékjellemzők és 4) biztonság. Az üvegházhatású gázok kibocsátására leginkább az energiafelhasználás van közvetlen hatással, de a termékektől és a folyamattól függően az anyagtakarékossági, termékminőségi és biztonsági kérdéseknek is komoly energetikai és károsanyag-kibocsátási vonzata lehet. Így lényegében az összes elv a környezet védelmére és az éghajlatváltozás mérséklésére irányul.

Energiahatékonysági szempontból kívánatos a reakciókat, vegyipari folyamatokat és műveleteket oly módon megvalósítani, hogy a melegítésre, hűtésre, magas, illetve alacsony nyomás előállítására szánt energiabefektetés minél kisebb legyen. Ehhez járul hozzá például a hulladék hő helyes felhasználása (exergiaelemzés) és a katalitikus reakciók előtérbe helyezése (aktiválási energia csökkentése).

Fontos **takarékossági** szempont a nagy atomhatékonyságú és kevés lépésből álló szintézisek alkalmazása, amelyek a lehető legkevesebb melléktermék képződésével járnak. Tipikus környezetbarát és fenntartható példa az úgynevezett többkomponensű reakciók alkalmazása. E reakciók például egy edényben több reakciótermék együttes jelenlétében dominóreakcióba lépve magas hozzáadott értékű, gyógyszerhatóanyagokban előforduló heterociklusos vegyületek előállítására alkalmasak [19]. Takarékoskodni megéri – és nemcsak az adott gyártás anyagaival érdemes, hanem a környezet véges erőforrásaival is, mert a nem megújuló alapanyagok pazarló felhasználása előbb-utóbb visszaüt; drasztikusan emelkedhetnek a beszerzési árak, vagy erőltetett technológiaváltásra lehet szükség [20].

A **termékjellemzők** helyes beállítása is fontos szerepet játszik a zöld kémia alapelvei közt. Az elv lényege, hogy a gyártó számoljon az általa gyártott termék utóéletével (életciklus-elemzés, Life Cycle Assessment, LCA). Gondoskodjon a termék kritikus minőségi paramétereinek helyes beállításáról már a tervezés, majd a gyártás során is, lehetővé téve az újrahasznosítást és csökkentve a termék használatakor és az után fellépő környezetterhelést. Napjaink talán egyik legfontosabb kihívása a műanyagok újrahasznosítása, és olyan újszerű polimerek szintézise, amelyek felhasználásukat követően a természetbe kerülve belátható időn belül lebomlanak [21].

Végül meg kell említeni a zöld kémia **biztonsági** vonatkozásait is. A megfogalmazott irányelvek értelmében törekedni kell kevésbé veszélyes vagy ártalmatlan alapanyagok, köztitermékek, re-

agensok, segédanyagok és folyamati paraméterek megválasztására [22].

Mindezen alapelvek kétségtelenül hozzájárulnak a környezet védelméhez, ideértve mind a természetet, mind pedig a társadalmat. Ugyanakkor az utóbbi években szárnyra kapott egy olyan közelítésmód, mely a környezetvédelem helyett a fenntarthatóságot helyezi súlypontba. Úgy véljük, eme megközelítés nem elveti a zöld kémia fent megfogalmazott elveit, hanem továbbgondolja, részben átalakítja és meghaladja azokat. A továbblépést az jelenti, hogy a fenntarthatóság alaposabban veszi figyelembe a technológiaváltás gazdasági vonatkozásait, és a zöld kémia elveit aszerint súlyozza, hogy valóban érdemes-e belevágni egy technológiaváltásba [23].

A következőkben vegyünk sorra néhány példát, miben segít a zöld kémia a társadalomnak, és hogyan enyhíti a környezetre nehezedő terhelést!

A szállítmányozási szektor „zöldítésére” kétféle jelentős irányvonal bontakozott ki az utóbbi két évtizedben. Az egyik a szénalapú tüzelőanyagok reformja [24], a másik pedig az elektromos meghajtás térnyerése. (Az előbbivel kapcsolatban Hancsók Jenő ugyanebben a lapszámban megjelent írására, 41. oldal, az utóbbi esetben pedig Tompos András cikkére utalunk, 36. oldal.)

Kétségtelen, hogy a fosszilis (szénalapú) energiaelőállítás nem fenntartható, ennek ellenére még mindig az energia döntő többségét, csaknem kétharmadát így állítják elő [25]. Hosszú távon azzal számolnak, hogy az energia egyre kisebb környezetterheléssel állítható majd elő, és az elektromos árammal mint szekunder energiahordozóval lehet meghajtani mind a közlekedési eszközöket, mind pedig az ipar egyéb berendezéseit, gépeit és technológiáit is.

A legegyszerűbbnek az tűnik, hogy a széntüzelésű erőműveket kiváltjuk olyanokkal, melyek nem bocsátanak ki szén-dioxidot. Vannak már jelenleg is olyan országok, melyek képesek energiaellátásukat szén-dioxid-kibocsátás nélkül biztosítani [26]. Ez jellemzően olyan régiókban lehetséges, ahol a természeti adottságok ideálisak vízi erőművek telepítésére (pl. Albánia, Norvégia, Etiópia, Paraguay), illetve jelentős az atomenergia felhasználása (pl. Franciaországban kb. 70%) [27].

A társadalmi szemléletváltás és az erőművi technológiák fejlesztése nem kizárólag és nem elsősorban a vegyipar feladata, azonban az energiaválság megoldásához a vegyipar nagymértékben járulhat hozzá. Az energiátárolás forradalmasítása például hatékonyabbá tehetné a jelenleg alacsony hatásfokú megújuló energiaforrásokat. Különösen igaz ez a nap- és a szélenergiára, ugyanis a nap nem mindig akkor süt, a szél nem mindig akkor fúj, amikor a társadalom nagyobb energiaigénye megjelenik.

Az elektromos energia tárolására leginkább telepek használata, melyeket energiabőség esetén töltenek, hiány esetén pedig hálózatra kapcsolva kisütnek. Széles körben elterjedtek az átmeneitím-hidrides és az alkálifémes technológiával működő akkumulátorok. Égetően fontos, hogy megoldást találjunk ezek összetevőinek fenntartható előteremtésére, mert a készítésükhöz felhasznált fémek készletei jelenlegi felhasználási szinten végesek [28].

A hidrogén is jó alternatíva lehet az energia tárolására, mert könnyű elem, előállítására számos lehetőség és alapanyag van, energiasűrűsége pedig a szénhidrogéneknek közel háromszorosa [29]. Gazdaságos tárolása egyelőre nem megoldott, hiszen elemi állapotban robbanásveszélyes, más anyagokban tárolva pedig számolni kell a hidrogénezés és dehidrogénezés energiaigényével. Tárolnak már hidrogént szénhidrogénekben, erre kísérleti üzem

is épült Németországban [30]. Lehetséges továbbá szilárd hordozón (pl. zeolitokban), a szén bizonyos módosulataiban (grafit, szén nanocsövek), hidrogéngazdag sószerű vegyületekben (pl. NaNH_2 , NH_3BH_3 , MgH_2) [31] vagy ötvözetekben is [32] hidrogént raktározni.

Az energiatárolás kihívásai mellett jól mutatja a zöld kémia gyakorlati hasznosítását néhány polimerkémiai példa.

Biológiai úton lebomló polimerek. A műanyagok felhasználásának kiemelkedő problémája, hogy használat után nem vagy csak nagyon lassan bomlanak le természetes körülmények között. Az elhasznált műanyag termékeket jobb esetben elégetjük – ezáltal növeljük az üvegházhatású gázok kibocsátását –, rosszabb esetben lerakjuk őket. E „megoldás” nemcsak tájidegen, hanem természetidegen is, és károsíthatja az élővilágot. Szemléletes példát adnak erre a világtengereken úszó szemétszigetek [33], melyek legnagyobb részben műanyag hulladékból állnak. A műanyagok lassú degradációja (pl. UV-sugárzás), illetve használata (pl. műszálak textíliák mosása, egyes kozmetikai cikkek alkalmazása) során kisméretű műanyag töredékek (mikroműanyagok) keletkeznek, melyek bizonyos típusai különösen veszélyesek az élővilágra [34]. Bár egyelőre minden kétséget kizáróan nem erősítették meg, hogy ezek az anyagok közvetlenül veszélyesek az emberekre is [35], a velük kapcsolatos aggodalmak folyamatosan növekednek – különös tekintettel a Föld ökoszisztémájára vonatkozóan.

A polimerek lebonthatóságát alkalmazási területeik nagyban befolyásolják. Amíg az autókban alkalmazott műanyag bevonatokkal szemben általános elvárás a hosszú, akár több tízéves élettartam, addig a csomagolóiparban ez egy-két órától pár hónapig terjedhet. A műanyagok felhasználása ezért kihát a természetben történő lebomlásukra is. A biodegradálható polimerek széles palettájában kiemelt helyet foglalnak el az utóbbi évtizedekben piacon is megjelenő, ipari körülmények között komposztálható polimerek, mint például a polisztirol kiváltására is alkalmas politejsav [36,37]. A környezetbarát polimerek közé sorolhatók még a biodegradálható polivinil-alkohol kopolimerek is, amelyek polaritásának finomhangolásával a csomagolóanyagok oxigénátengedő képessége is szabályozható [38]. Így nemcsak természetben lebomló polimert kapunk, hanem olyan csomagolóanyagot is, amelyben az élelmiszer – akár védőgáz csomagolásban – hosszabb ideig tárolható.

Polipenténamerek mint újrahasznosítható gumialapanyagok. Ismeretes, hogy olefinekből számos polimerféleség készíthető. Ilyenek a legelterjedtebbek is, például a polietilén és a polipropilén. A kőolaj pirolitikus feldolgozása során azonban nemcsak ezek alapanyagai, az etilén és a propilén keletkeznek, hanem más, több szénatomot tartalmazó alkének is, melyeket eddig csak tüzeléssel energiatermelésre hasznosítottak. A ciklopentén, a ciklopentadién olyan, a kőolaj pirolízise során keletkező meléktermékek, melyeket szintén fel lehet használni polimerek előállítására, és így egységnyi ásványolajból több, magas hozzáadott értékű anyagot lehet előállítani. A polipenténamerek hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a természetes gumi, ezért az egyik legfontosabb felhasználási területük a nagy igénybevételnek kitett gumiabroncsok gyártása. A polipenténamereket egyensúlyi, gyűrűnyitó metatézis-polimerizációval állítják elő [39]. Ez nemcsak azt teszi lehetővé, hogy felépítsük a polimerláncokat, hanem használatuk után, a reakciókörülmények megváltoztatásával, azokat vissza lehet bontani alkotóelemekre, amelyek aztán újból hasznosítók egyazon katalizátorrendszer segítségével [40].

Nejlón és poliuretán monomerek megújuló alapanyagokból. Sok helyen és intenzíven kutatják a kereskedelmi forgalomban beszerezhető műanyagok előállítását megújuló alapanyagokból, például ligninekből, növényi olajokból vagy akár foszfolipidekből kiindulva. Ligninekből például tereftálsav-származékok állíthatók elő [41,42]. A többszörös telítetlen kötések tartalmazó növényi olajokból, lipidekből és foszfolipidekből akár adipinsav- (nejlón-66 monomere) származékok vagy 1,6-hexándiol (poliuretán monomer) is gyárthatók [43,44]. Noha e monomerek megújuló alapanyagokból kiinduló szintézisét a szakirodalomban már leírták, azok gazdaságos, ipari megvalósításához még további fejlesztések szükségesek.

A növényvédelemnek az éghajlatváltozásra gyakorolt hatása közvetett, mégis nagymértékben mérsékelhető az éghajlatváltozás hatásai, ha a mezőgazdaságban is teret nyerne a zöld technológiák. A környezettudatos földművelés mellett a klasszikus növényvédelmi eljárások, a totál irtószerek a jogi szabályozásoknak köszönhetően folyamatosan háttérbe szorulnak, és helyüket a bio-növényvédőszeresek veszik át. Ezek számos esetben olyan szemiokemikáliák, amelyek a kártevők kommunikációjában játszanak fontos szerepet. Ezek a vegyületek alkalmasak a kártevők csalogatására, csapdázására, és így akár azok befogására és szelektív ritkítására is. A bio-növényvédőszeresek legnagyobb jelentősége többek között a fajspecifikusság, amelynek köszönhetően csak a célkártevők ellen hatnak, így az ökoszisztémára nincsenek káros hatással. A bio-növényvédőszeresek – amelyek általában természetben előforduló vegyületek – nagyon kevés anyagot tartalmaznak (tulajdonképpen illatok), így azok környezetterhelése a klasszikus növényvédőszeresekkel szemben, beleértve a kijuttatásukra szolgáló, nagy teljesítményű mezőgazdasági gépek működtetését is, elhanyagolható. Fontos szempont továbbá, hogy a mezőgazdasági termények nem érintkeznek e vegyületekkel, így lehetőség nyílik környezetbarát és növényvédőszermentes nagyipari (bio-) zöldség- és gyümölcsstermesztésre.


A szemiokemikáliák között sok, telítetlen kettős kötések tartalmazó zsíralkohol-származékot találunk, melyek Z-orientáltak. Leghatékonyabban Z-szelektív, olefin-metatézis katalizátorokkal lehet őket előállítani [45,46]. Az elmúlt időszakban számos molylepkeferomont szintetizáltak nagy szelektivitású, homogén katalitikus eljárással [47,48].

A környezetvédelem fontossága vitán felül áll. Egy nemrégiben publikált tanulmány szerint hazánkban a lakosság is tisztában van ezzel, olykor más országokat is megelőző mértékű ez a konszenzus [49]. Nem hunyhatunk szemet azonban afelett, hogy körünk társadalma hozzászólt jelenlegi jólétéhez és ragaszkodik a lehető legkényelmesebb és legolcsóbb életviteli megoldásokhoz. Az a technológiaváltás, amely nem versenyképes, nem fog elterjedni. A társadalmi szemléletváltozás támogatása is eredményes lehet. Amennyiben ugyanis az állampolgárok meggyőződhetők arról, hogy a kényelem hosszú távon árt mindnyájunk egészségének és jólétének, akkor többen lesznek hajlandóak olyan életvitelt folytatni, olyan termékeket vásárolni, egyszóval olyan javakat fogyasztani, melyeknek előállítása és használata kevésbé terheli környezetünket. Az emberek meggyőződhetők a jóról, és ha kell, tömegesen is helyesen tájékoztathatók. Mindezek mellett elengedhetetlen a zöld szemlélet integrációja a közoktatásba.

Az ideji világválság jól megmutatta, hogy emberek tömegei képesek a szükséges szintre redukálni a fogyasztásukat, mert világosan látták, hogy a túlfogyasztás nem opció ilyen vészhelyzet idején. Megtanulták, hogy nem kell mindenáron autóból ülniük, repülőre szállniuk, ha szabadidejüket aktívan és értelmesen sze-

retnek eltölteni. Felértékelődtek a személyes kapcsolatok, mind ezek mellett az otthoni munkavégzés térnyerésével csökkentek az irodák fenntartásával, a munkahelyi bejárással, a munkahely környékén történő fogyasztással kapcsolatos környezetterhelési többletek. Mindezzel egy időben felértékelődött a minél teljesebb körű önellátás, mely az iparra is kihatott. Mennyivel környezetkímélőbb lenne az ellátási láncot a lehető legrövidebbre tervezni, hogy ne kelljen egy-egy ipari köztterméknek vagy alkatrésznek a fél világot beutaznia, mire rendeltetési helyére kerül.

A zöld kémia és más ágazatok zöld megközelítései nagyban hozzájárulnak az éghajlatváltozás mérsékléséhez. Ahogy láttuk, a vegyiparban ez nemcsak környezetvédelmi szempontokból, hanem gazdaságilag is előnyös lehet. Nemcsak a vegyiparban, hanem más iparágakban és mindennapjainkban is sokat nyerhetünk szemléletünk változtatásával és új, környezetkímélő technológiák bevezetésével.

Nem az a végső cél, hogy olyan kémiát adjunk az iparnak és a társadalomnak, mely mindenképpen vagy mindenáron zöld, hanem a legjobb, leghatékonyabb és legtakarékosabb kémiát, mely épp ezért zöld is. 

IRODALOM

[1] Atmospheres and Planetary Temperatures – American Chemical Society, (n.d.). <https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/energybalance/planetarytemperatures.html> (accessed June 29, 2020).

[2] R. Wolfson, Environment and Climate, 2nd edition. WW. Norton & Company Ltd., New York, 2012.

[3] S. A. Marcott et al., A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* (2013) 339, 1198–1201.

[4] B. Ekwurzel et al., The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. *Clim. Change*. (2017) 144, 579–590.

[5] J. S. Fuglestedt et al., Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. *Clim. Change* (2003) 58, 267–331.

[6] T. Stocker et al., Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2013.

[7] M. Wahlen, THE GLOBAL METHANE CYCLE, 1993. www.annualreviews.org (accessed June 29, 2020).

[8] J. N. Galloway et al., The Nitrogen Cascade. *Bioscience* (2003) 53, 341–356.

[9] R. Zhang et al., Have aerosols caused the observed atlantic multidecadal variability? *J. Atmos. Sci.* (2013) 70, 1135–1144.

[10] K. A. Smith et al., The role of N₂O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* (2012) 367, 1169–1174.

[11] G. Martini et al., Effect of fuel ethanol content on exhaust emissions of a flexible fuel vehicle. *JRC Sci. Tech. Reports*, 2011.

[12] M. Almaraz et al., Agriculture is a major source of NO_x pollution in California. *Sci. Adv.* (2018) 4.

[13] The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. *Popul. Environ.* (1994) 16, 109–137.

[14] N. Shakhova, The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle. *Geophys. Res. Lett.* (2005) 32, L09601.

[15] Fluorinated greenhouse gases – Climate Action, (n.d.). https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas_en (accessed June 29, 2020).

[16] N. Abas et al., Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2018) 90, 557–569.

[17] Data & Statistics – IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed June 29, 2020).

[18] P. T. Anastas, J.C. Warner, Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press, New York, U.S.A., 1998.

[19] I. A. Ibarra, A. Islas-Jácome, E. González-Zamora, Synthesis of polyheterocycles via multicomponent reactions, *Org. Biomol. Chem.* (2018) 16, 1402–1418.

[20] J. F. Mercure, P. Salas, On the global economic potentials and marginal costs of non-renewable resources and the price of energy commodities. *Energy Policy* (2013) 63, 469–483.

[21] M. A. Ilgin, S. M. Gupta, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *J. Environ. Manage.* (2010) 91, 563–591.

[22] H. F. Sneddon, Safety first. *Green Chem.* (2016) 18, 5082–5085.

[23] E. J. Yanarella, R. S. Levine, R. W. Lancaster, Research and Solutions: “Green” vs. Sustainability: From Semantics to Enlightenment. *Sustain. J. Rec.* (2009) 2, 296–302.

[24] Alternative Fuels Data Center: Alternative Fuels and Advanced Vehicles, (n.d.). <https://afdc.energy.gov/fuels/> (accessed June 29, 2020).

[25] Fossil Fuels – Our World in Data, (n.d.). <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (accessed June 29, 2020).

[26] World Development Indicators | The World Bank, (n.d.). <http://wdi.worldbank.org/table/3.7> (accessed June 29, 2020).

[27] Nuclear shares of electricity generation – World Nuclear Association, (n.d.). <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx> (accessed June 29, 2020).

[28] N. T. Nassar et al., Evaluating the mineral commodity supply risk of the U.S. Manufacturing sector. *Sci. Adv.* (2020) 6, eaay8647.

[29] G. Jeong et al., Nanotechnology enabled rechargeable Li-SO₂ batteries: Another approach towards post-lithium-ion battery systems. *Energy Environ. Sci.* (2015) 8, 3173–3180.

[30] P. Preuster, C. Papp, P. Wasserscheid, Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Toward a hydrogen-free hydrogen economy. *Acc. Chem. Res.* (2017) 50, 74–85.

[31] G. Jungmeier et al., Treibhausgasemissionen, Geschätzte Verkehrssystemen. Von Pkw-basierten, 2019.

[32] M. Hirscher, et al., Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook. *J. Alloys Compd.* (2020) 827, 153548.

[33] O. J. Dameron et al., Marine debris accumulation in the Northwestern Hawaiian Islands: An examination of rates and processes. *Mar. Pollut. Bull.* (2007) 54, 423–433.

[34] S. Zhang J. et al., Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC – Trends Anal. Chem.* (2019) 111, 62–72.

[35] Microplastics: more research needed - BfR, (n.d.). https://www.bfr.bund.de/en/press_information/2019/04/microplastics__more_research_needed-240153.html (accessed June 30, 2020).

[36] S. Muniyasamy et al., Mineralization of poly(lactic acid) (PLA), Poly(3-hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) and PLA/PHBV blend in compost and soil environments. *J. Renew. Mater.* (2016) 4, 133–145.

[37] J. Lunt, Large-scale production, properties and commercial applications of poly lactic acid polymers. *Polym. Degrad. Stab.* (1998) 59, 145–152.

[38] R. Tuba et al., One-pot synthesis of poly(vinyl alcohol) (PVA) copolymers via ruthenium catalyzed equilibrium ring-opening metathesis polymerization of hydroxyl functionalized cyclopentene. *Macromolecules* (2014) 47, 8190–8195.

[39] R. Tuba, R. H. Grubbs, Ruthenium catalyzed equilibrium ring-opening metathesis polymerization of cyclopentene. *Polym. Chem.* (2013) 4, 3959–3962.

[40] R. Tuba et al., Synthesis of recyclable tire additives via equilibrium ring-opening metathesis polymerization. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2016) 4, 6090–6094.

[41] D. Ferdous et al., Pyrolysis of Lignins: Experimental and Kinetics Studies. *Energy & Fuels* (2002) 16, 1405–1412.

[42] Z. Bai et al., Production of Terephthalic Acid from Lignin-Based Phenolic Acids by a Cascade Fixed-Bed Process. *ACS Catal.* (2016) 6, 6141–6145.

[43] E. Kovács et al., Synthesis of 1,6-Hexandiol, Polyurethane Monomer Derivatives via Isomerization Metathesis of Methyl Linolenate. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2017) 5, 11215–11220.

[44] M. Nagyházi et al., Towards Sustainable Catalysis – Highly Efficient Olefin Metathesis in Protic Media Using Phase Labelled Cyclic Alkyl Amino Carbene (CAAC) Ruthenium Catalysts. *ChemCatChem.* (2020) 12, 1953–1957.

[45] M. B. Herbert, R. H. Grubbs, Z-selective cross metathesis with ruthenium catalysts: Synthetic applications and mechanistic implications. *Angew. Chemie – Int. Ed.* (2015) 54, 5018–5024.

[46] M. B. Herbert et al., Concise syntheses of insect pheromones using Z-Selective cross metathesis. *Angew. Chemie – Int. Ed.* (2013) 52, 310–314.

[47] R. L. Pederson et al., Applications of olefin cross metathesis to commercial products. *Adv. Synth. Catal.* (2002) 344, 728–735.

[48] G. Turczel et al., Synthesis of Semiochemicals via Olefin Metathesis. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2019) 7, 33–48.

[49] How does the world view climate change and Covid-19?, 2020. <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2020-04/earth-day-2020-ipsos.pdf> (accessed June 29, 2020).

ÖSSZEFOGLALÁS

NAGYHÁZI MÁRTON, TUBA RÓBERT: A ZÖLD KÉMIA VÁLASZAI AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁSRA

A globális éghajlatváltozás számos ágazat zöldülését eredményezte már. Mitől lesz egy kémiai reakció, egy vegyipari folyamat vagy éppen egy vegyi úton előállított termék környezetbarát? Mi hívta életre, milyen problémákra és kihívásokra adhat választ, és milyen buktatók elé nézhet a zöld kémia? Írásunk áttekintést ad a szemlélet elvi-tudományos háttéréről, és néhány való életből vett példával mutat rá a modern vegyészet új kihívásaira, új lehetőségeire, melyek nem csupán a környezet védelmét, hanem a gazdaságosságot és a fenntarthatóságot is szolgálhatják.