

ZÖLD KÉMIA

Horváth István Tamás
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Kémiai Technológiai és Környezetkémiai Tanszék

Bevezetés

A világ népességének növekedésével és az átlagos életszínvonal javulásával arányosan növekszik a vegyipar termelése, melynek következtében jelentősen megnőtt a környezetre és az egészségre károsan ható anyagok kibocsátásának a lehetősége. Számos ország már a hetvenes években felismerte a probléma jelentőségét és új környezetvédelmi törvényeket vezetett be [1]. Sajnos ezek a szabályozások nem mindig hozták meg a kívánt eredményt és a nyolcvanas évek végére nyilvánvalóvá vált, hogy hatékonyabb stratégiára van szükség. Az 1990-ben elfogadott amerikai szennyezésmegelőzési törvény [2] a hagyományos „parancsolj és szabályozz” irányítási módszer helyett a környezeti szennyezők forrásának csökkentésére helyezte a hangsúlyt. A *megelőzési stratégia* alapja az az egyszerű felismerés, mely szerint *ha egy szennyező anyag nem keletkezik, akkor az nem okozhat környezeti problémát. Azaz nem elég a környezeti problémák eredetét megérteni és azokat utólag, rohamlépésben megoldani, hanem törekedni kell olyan új vegyipari folyamatok és termékek kifejlesztésére, amelyek a fejlesztés idején rendelkezésre álló és hiteles adatok szerint nem lesznek az egészségre és a környezetre károsak.* A zöld „szemüveg” feltétele ahhoz vezet, hogy számos rutinszerűen használt vegyület, módszer és technológiai megoldás azonnal láthatatlanná válik és a célok elérése gyakran számottevően megnehezedik. A zöld kémia erre a kihívásra próbál válaszolni úgy, hogy útmutatót ad a környezeti szempontból jobb megoldások kialakításához [3].

Az első zöld kémiai kutatási programot „Alternatív szintetikus utak” címmel 1991-ben írta ki az Amerikai Környezeti Minisztérium (EPA), amelyet egy évvel később követett az Amerikai Tudományos Alap (NSF) hasonló célú „Környezetbarát szintézisek és eljárások” nevű programjának meghirdetése. 1993-ban az Amerikai Környezeti Minisztérium hivatalos programjává vált a zöld kémia (U.S. Green Chemistry Program) [4]. Az Európai Közösségben először az 1993-ban Velencében 30 egyetem közreműködésével megalakult konzorcium indított zöld kémiai programot [5]. Nem sokkal később az Egyesült Királyságban a „Green Chemistry Network” [6] majd Japánban a „Green and Sustainable Chemistry

Network” [7] kezdte meg működését. 2002-ben indult el az európai COST program zöld kémiai akciója (COST Action D29 on „Sustainable/Green Chemistry and Chemical Technology”) [8].

A zöld kémiának az elmúlt tíz évben világszerte tapasztalható rohamos terjedése annak a felismerésnek köszönhető, mely szerint a környezetbarát és egészségre ártalmatlan termékek és technológiák hosszútávon a leggazdaságosabbak.

A zöld kémia 12 alapelve

Anastas és Warner a zöld kémia alapelveit 12 pontban foglalták össze a „Zöld kémia: elmélet és gyakorlat” című könyvükben [3]:

1. Jobb megelőzni a hulladék keletkezését, mint keletkezése után kezelni.
2. Szintézisek tervezésénél törekedni kell a kiindulási anyagok maximális felhasználására (minél nagyobb atomhatékonyságra).
3. Lehetőség szerint már a szintézisek tervezésénél olyan reakciókat célszerű választani, melyekben az alkalmazott és a keletkező anyagok nem mérgező hatásúak és a természetes környezetre nem ártalmasak.
4. Kémiai termékek tervezésénél törekedni kell arra, hogy a termékekkel szembeni elvárások teljesítése mellett mérgező hatásuk minél kisebb mértékű legyen.
5. Segédanyagok (oldószerek, elválasztást elősegítő reagensek, stb.) használatát minimalizálni kell, s amennyiben szükséges, ezek „zöldek” legyenek.
6. Az energiafelhasználás csökkentésére kell törekedni (szobahőmérséklet és atmoszférikus nyomás)
7. Megújuló nyersanyagokból válasszunk vegyipari alapanyagokat.
8. A felesleges származékkészítést kerülni kell.
9. Reagensek helyett szelektív katalizátorok alkalmazását kell előtérbe helyezni.
10. A kémiai termékeket úgy kell megtervezni, hogy használatuk végeztével ne maradjanak a környezetben és bomlásuk környezetre ártalmatlan termékek képződéséhez vezessen.
11. Új és érzékeny analitikai módszereket kell használni a vegyipari folyamatok in situ ellenőrzésére, hogy a veszélyes anyagok keletkezését idejében észlelni lehessen.
12. A vegyipari folyamatokban olyan anyagokat kell használni, amelyek csökkentik a vegyipari balesetek (kémiai anyagok kibocsátása, robbanás, tűz) valószínűségét.

Anastas és Warner a zöld kémiát úgy definiálta, mint a kémiai termékek tervezését, termelését és felhasználását irányító 12 elv egységes alkalmazása, melyek eredményeként csökken vagy megszűnik a környezetre veszélyes anyagok előállítása és felhasználása. Az elmúlt évtizedben évről évre egyre több olyan tudományos cikk és szabadalom jelent meg, amelyek már figyelembe vették a zöld kémia 12 alapelvét. Az első, csak zöld kémiával kapcsolatos híreket és kutatásokat bemutató folyóirat 1999-től Zöld Kémia (Green Chemistry) címmel az Angol Kémiai Egyesület (Royal Society of Chemistry) gondozásában jelenik meg [9]. Fontos megjegyezni, hogy noha a 12 alapelv közül számos triviálisnak tűnik, az alapelvek együttes alkalmazása egy adott probléma megoldására gyakran megkívánja, hogy az alapoktól induljon egy új termék vagy folyamat tervezése. Ennek következtében a zöld kémia az alapvető kutatások fontosságára irányítja a figyelmet.

Mivel a zöld kémia 12 alapelvééről és alkalmazásáról már megjelent egy magyar nyelvű összefoglaló [10], itt néhány példa illusztrálja a zöld kémia lényegét.

A termelés szempontjából hulladéknak tekinthető minden olyan anyag, amelyet már nem lehet továbbhasznosítani, így az nem hoz profitot a termelőnek, sőt fizetnie kell a biztonságos elszállításért, tárolásért, és felelős lehet a későbbi esetleges környezeti károkért. Mivel a hulladék valamilyen formában tartalmazza a folyamatban használt anyagok egy részét, amelyeket a gyártó egyszer már kifizetett, a hulladék újrahasznosítása (elválasztás, tisztítás, kémiai átalakítás) nem kívánatos „ismételt” költséget jelent. Különös tekintettel kell eljárni olyan hulladékok esetében, amelyek bizonyítottan káros hatásúak lehetnek az egészségre és/vagy a környezetre. Gondoskodni kell arról, hogy ezek a környezetbe ne kerüljenek ki! A veszélyes hulladék kezelése, tárolása, esetleges kémiai átalakítása mind csökkenti a folyamat gazdaságosságát. Ugyanakkor, még fokozott ellenőrzés mellett sem lehet teljesen kizárni egy esetleges szivárgás vagy baleset bekövetkezését.

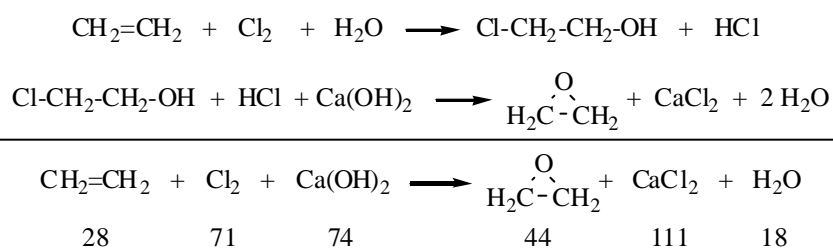
Adott reakció vagy folyamat hatásfokának klasszikus jellemzése a hozam. Így, ha egy móltól kiindulási anyagból egy mólt kívánt termék lesz, akkor a hozam 100%-os és a szintézis tökéletesnek tűnik. Ez a jelzőszám azonban nem veszi figyelembe a hulladék keletkezését. Gyakran előfordul, hogy egy “tökéletes hozamú” szintézisben annyi hulladék keletkezik, aminek mennyisége többszöröse a terméknek. Egy folyamatban keletkező hulladék mennyiségét jellemzi a környezeti faktor (E- vagy environmental factor), mely az 1 kg termékre eső hulladék tömegét adja meg [11]. A különböző, kémiai eljárásokat alkalmazó

iparágakra jellemző, hogy minél nagyobb a termelés volumene, annál kisebb a környezeti faktor:

Iparág	Termék (t)	Környezeti faktor
Olajfinomítás	$10^6 - 10^8$	~ 0.1
Vegyipari alapanyaggyártás	$10^4 - 10^6$	< 1 – 5
Finomvegyiszergyártás	$1^2 - 10^4$	5– 50
Gyógyszergyártás	$10^1 - 10^3$	25 – 100+

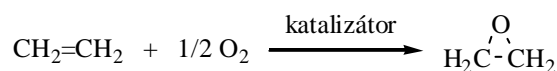
Ez valószínűleg abból adódik, hogy a nagy volumenu folyamatok káros környezeti hatása sokkal nagyobb lehet, így a gyártó cég mellett mind a szabályozó állami szervek, mind a környezetvédők ellenőrzése sokkal szigorúbb.

A hulladékképződéssel kapcsolatos problémát jól szemlélteti az etilén-oxid klórhidrin-eljárással történő hagyományos előállítása (1. ábra) [12], mely során 1 kg termék mellett



1. ábra. Az etilén-oxid előállítása a klórhidrin-eljárással.

2.93 kg hulladék képződik [*környezeti faktor* = $(111+18)/44 = 2.93$]. Ezzel szemben az etilén katalitikus oxidációja során (2. ábra) csak etilén-oxid keletkezik. Mivel a terméket könnyű



2. ábra. Az etilén-oxid előállítása katalitikus oxidációval.

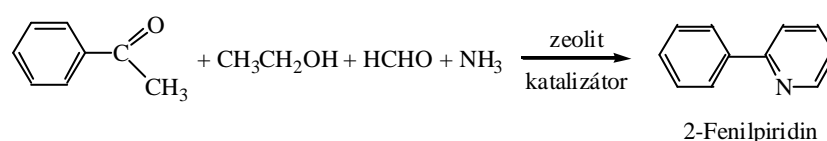
elválasztani az ezüstalapú heterogén katalizátortól ($\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$), elméletileg hulladék nem keletkezik (*környezeti faktor* = 0) [12]. Szintén általános gyakorlat a kémiában, hogy a kémiai egyenletek csak a reakció kiindulási anyagait és céltermékeit sorolják fel. Az adalékok, reagensek, oldószerek használata, vagy a melléktermékek keletkezése viszont komoly problémát jelent egy nagyipari technológiában, különösen ha ezek nem használhatók fel

sem mire, így hulladéknak számítanak és elválasztásuk költségnövelő tényezőként jelentkezik. Egy zöld kémiai szempontból ideális reakcióban, vagy folyamatban az összes kiindulási atom megjelenik a termékben. Ezt az atomhatékonyság megállapításával lehet meghatározni [13], ami megmutatja, hogy a kiindulási anyagok atomjai milyen százalékban alakulnak át a céltermékké:

$$\text{atomhatékonyság} = (\text{céltermék molekulatömege} / \text{kiindulási anyagok molekulatömege}) \cdot 100$$

A klasszikus etilén-oxid szintézis (1. ábra) atomhatékonysága csak 25% $[44 / (28 + 71 + 74)]$ a viszonylag nagy molekulatömegeu kalciumnak és klórnak köszönhetően. Ezzel szemben az etilén katalitikus oxidációja (2. ábra) 100 %-os atomhatékonyságú. Ebből a példából jól látható, hogy a katalitikus reakciók atomhatékonysága mindig magasabb, mint a sztöchiometrikus reakcióké.

A szerves kémiai hulladékok nagy részének képződése többlépéses reakcióknak köszönhető. Minden egyes lépést elválasztás és gyakran tisztítás követ, melyek mindegyike oldószert fogyaszt és szennyezést termelhet. Ezzel szemben az egylépéses reakciók nagymértékben csökkentik a felhasznált vegyszerek mennyiségét. A fenilpiridint és származékait széles körben használja az orvostudomány, a mezőgazdaság, és a koordinációs kémia. A fenilpiridint piridin fenillítiummal történő arilezésével, Grignard reakcióval, vagy benzonitril és etilén Co(I)-kompleksek által katalizált reakciójával állítják elő. Ezekben az eljárásokban a termékelegy feldolgozása komoly problémát jelent. A fenilpiridin előállítható egy lépésben acetofenon, etanol, formaldehid és ammónia gáz fázisú reakciójával zeolit katalizátor jelenlétében 400°C-on (3. ábra) [14].

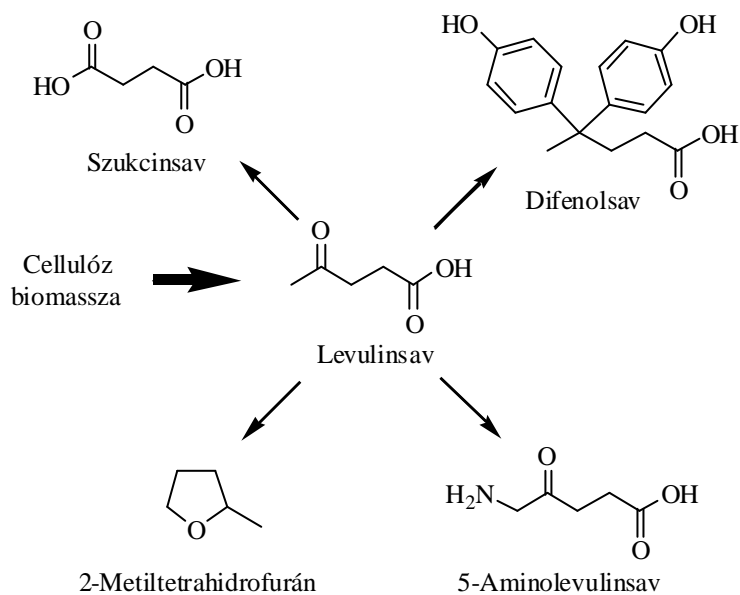


3. ábra. A 2-fenilpiridin előállítása.

Az imidazol szubsztituált származékai fontos intermedierei a gyógyszergyártásnak és fontos szerepük van biokémiai eljárásokban. Szintézisükre sok módszer áll rendelkezésre, de ezek nagy mennyiségű hulladékot termelnek. Ezzel szemben a dionok, aldehidek, aminok, és ammónium-acetát kondenzációját egy lépésben is meg lehet valósítani zeolit katalizátor jelenlétében mikrohullámú (MW) fűtés alkalmazásával. Ebben az esetben oldószert nem kell használni és a zeolit könnyen elválasztható a termékelegtől (4. ábra) [15].

Fontos megjegyezni, hogy a hagyományos nyersanyagok (szén, olaj, földgáz) háromdimenziósak, vagyis a lelohely mélységében is kiterjedt, így kis helyen nagy mennyiség koncentrálódhat belőle. Az ültetvények viszont két dimenzióban terjeszkednek, így azonos mennyiségű alapanyag előállítása sokkal nagyobb területet igényel. A növényi eredetű nyersanyagok szükségszerűen időszakos jellegűek, csak az év egy bizonyos részében állnak rendelkezésre. Az ipari termelés és a szükségletek jelentkezése viszont időben folyamatos, nem lehet évszaktól és időjárástól függővé tenni az alapanyagellátást.

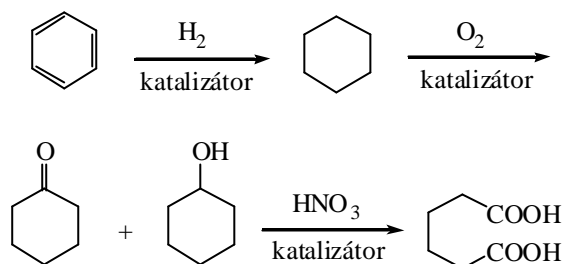
Az Egyesült Államokban minden emberre átlagosan 1 kg cellulóz hulladék jut. Ez nem meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy a kidobott szemét 70%-ban tartalmazza ezt a poliszaharidot. A Biofine vállalatnak sikerült átalakítania ezt a szénhidrátot egy szerves kémiai alapanyaggá a levulinsavvá [18]. A szilárd cellulóz hulladékot kénsavban feloldják és 200-220°C között 15 perc elteltével levulinsav képződik. Amíg a hagyományos szintézis alacsony hozamú, ezzel az eljárással 70-90%-os kitermelést lehet elérni a hulladék minőségétől függően. A levulinsav piaci ára 10 dollár körüli, míg a Biofine eljárással készült levulinsavé mindössze 64 cent. Már kifejlesztettek levulinsavra alapuló szintéziseket (5. ábra).



5. ábra. Kémiai termékek előállítása levulinsavból.

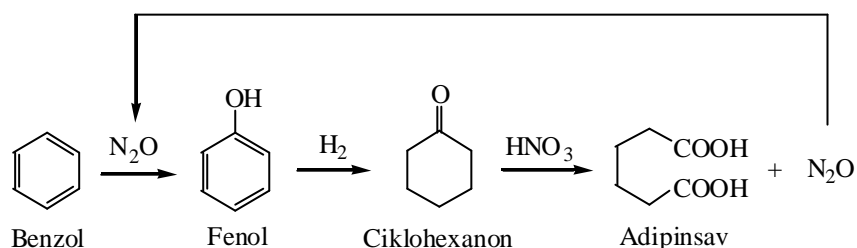
A difenolsav alkalmazható polikarbonátok és epoxigyanták monomereként. Amíg a 2-metiltetrahidrofurán felhasználható benziladalékként, addig az 5-aminolevulinsav nem mérgező és biodegradálódó gyomirtószerként használható.

amit két katalitikus oxidációs lépés követ (8. ábra) [21]. A második oxidációs lépésben a ciklohexanol/ciklohexanon keverék oxidációja salétromsavval történik. A folyamat végén



8. ábra. Az adipinsav hagyományos előállítási módja.

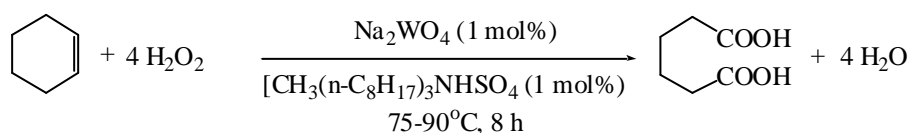
jelentős mennyiségű dinitrogén-oxid keletkezik [22]. A dinitrogén oxidról kimutatták, hogy szerepet játszik a szmog, a savas eső és az üvegházhatás kialakulásában. A Solutia cég eljárásában a keletkező dinitrogén oxidot a benzol oxidálására használják fel (9. ábra). Ezzel a zöld kémiai megoldással az előállítás költségeit olyan mértékben sikerült csökkenteni, hogy a



9. ábra. Az adipinsav szintézise újrahasznosított nitrogén oxiddal.

Solutia eljárását tartják a jelenlegi legolcsóbb előállítási módszernek [23].

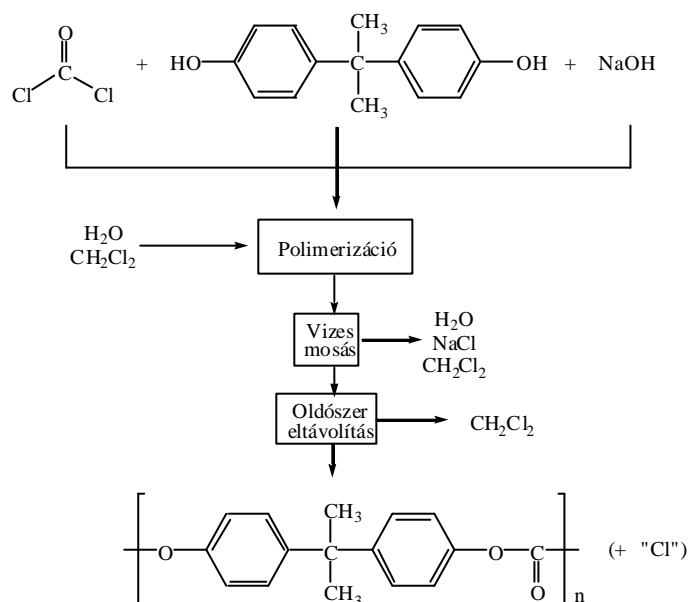
Az adipinsavat nemcsak benzolból, hanem ciklohexénből is elő lehet állítani. Egy új környezetbarát adipinsavsintézisben a ciklohexént 30%-os vízben oldott hidrogén peroxiddal oxidálják egy volfrámalapú katalizátor jelenlétében (10. ábra) [24]. A fázistranszfert segítő



10. ábra. Az adipinsav környezetbarát szintézise.

reagens egy kvaterner ammónium hidrogénszulfát $[\text{CH}_3(\text{n-C}_8\text{H}_{17})_3\text{NHSO}_4]$. A módszer elonye, hogy egyedüli mellékterméke a víz, az oxidálószer kevésbé veszélyes, korróziót nem okoz és a reakció nem igényel magas hőmérsékletet és nyomást.

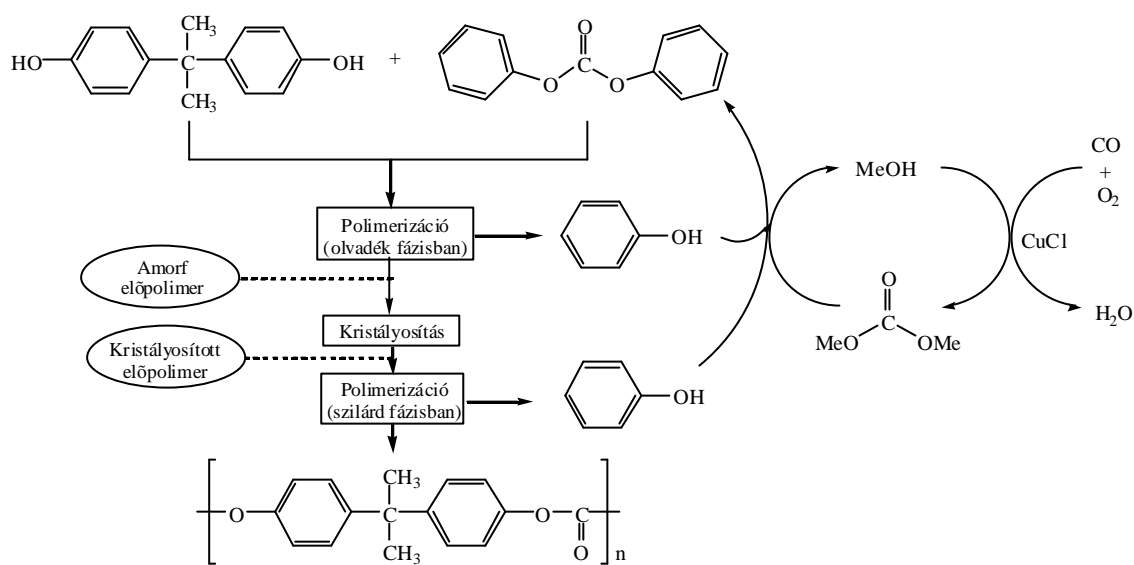
A zöld kémiai megoldásokkal kapcsolatos nehézségekre jó példa a polikarbonátok előállítására kifejlesztett „zöld” eljárás. A hagyományos eljárásban a foszgén, biszfenol-A, nátrium-hidroxid, víz és diklórometán jelenlétében vezetett reakciójában képződik a polikarbonát (11. ábra). A foszgén mérgező anyag, a benzol és a diklórometán rákkeltő. Mivel a folyamatban nagy mennyiségű vizet és klórozott oldószert kell a terméktől elválasztani, mind a szennyvízbe, mind a termékbe kerülhet klórtartalmú szennyezés.



11. ábra. Polikarbonátok hagyományos előállítása

A „zöld” eljárásban a foszgént és a nátrium-hidroxidot difenilkarbonát helyettesíti (12. ábra), így úgy lehet, hogy a termék nem tartalmaz klórtartalmú szennyezést. Az eljárásban fenol képződik, amelyet vissza kell alakítani difenilkarbonáttá. Mivel a fenol oxidatív karbonilezésére alkalmazható katalizátorok nem gazdaságosak, a difenilkarbonátot a fenol és dimetilkarbonát reakciójával állítják elő. Így, zöld kémiai szempontból meg kell vizsgálni a dimetilkarbonát termelő eljárást is, mely a metanol közepes nyomású katalitikus oxidatív karbonilezésén alapul [25]. Az iparilag alkalmazott réz-klorid katalizátor számos probléma okozója. A reakcióban melléktermékként keletkező víz és a katalizátor regenerálására használt sósav annyira korrozív, hogy a reaktorokat, szelepeket, csöveket vagy korrozióálló

anyagból kell készíteni, vagy a felületüket üveggel kell bevonni. Az utóbbi megoldás került gyakorlati alkalmazásra, amelynek nagy hátránya, hogy az üveg repedése esetén a vizes sósav az üvegen kívül található nem saválló felületeken korroziót és elobb vagy utóbb balesetet okoz. A másik környezeti probléma az lehet, hogy klórtartalmú szennyezés kerülhet a dimetilkarbonátba, amely szennyezheti a difenilkarbonátot és így a végtermék polikarbonátot is.



12. ábra. Polikarbonátok zöld előállítás

A difenilkarbonátot alkalmazó polikarbonát eljárást tehát csak akkor nevezhetjük környezetbarátnak vagy zöldnek, ha sikerül gazdaságos klórmentes katalizátort kidolgozni a dimetilkarbonát előállítására. A legfontosabb tanulság ebből a példából az, hogy környezeti szempontból a „bölcsötöl a temetőig” kell a kapcsolt folyamatokat elemezni és csak akkor hívható egy termék zöldnek, ha sikerül az előállítására alkalmazott kapcsolódó folyamatok mindegyikét környezetbaráttá tenni.

Zöld vegyipari eljárások

A zöld kémia 12 alapelve segítségével kifejlesztett kémiailag reakciók és termékek sikeres alkalmazásához már a vegyipari eljárások tervezése és megvalósítása során figyelembe kell venni az eljárások környezetre és egészségre való hatását is. Erre az egyik legalkalmasabb stratégia a vegyipar eljárások intenzifikálása (process intensification) elméleten alapul [26]. Célja az eljárás méretének és a befektetési költségek csökkentése mellett a biztonság, az

energia felhasználás hatékonyságának és gyakran a termék minőségének javítása, melyet a gyártási folyamatot felépítő vegyipari műveletek mindegyikére alkalmazni kell. Egy intenzifikált eljárásra jellemző, hogy (1) minden molekula azonos körülményekkel találkozik, (2) a keverési és tömeg átadási sebességek összhangban vannak a reakció sebességgel, (3) a hő és tömeg átadás megfelelő, (4) az eljárás alapját adó reakció lejátszódásának sebességét nem a készülék hanem a reakció kinetikája határozza meg, (5) növeli a konverziót és a szelektivitást, (6) növeli a termék minőségét és a minőség állandóan tartását, (7) lehetővé teszi a különböző alapanyagok közötti gyors cserét rövid időtartamú tisztítás után, (8) és gyorsan követi a folyamat paramétereinek változtatását.

A fenntartható fejlődés és a zöld kémia

Az emberiség legfontosabb célja az, hogy a civilizáció folyamatos fejlődése mellett az emberek egyéni és kollektív tevékenysége folytatható legyen a végtelen jövőben legalább azonos, de ha lehet jobb életkörülmények között. A tudósok és a mérnökök kulcsszerepet töltenek be a fenntartható civilizáció kialakításában, lévén felfedezéseik eredményei gyakran csak évtizedekkel később kerülnek alkalmazásra és hatnak elonyösen vagy hátrányosan a civilizáció fejlődésére. Ebből következően a társadalom számára fontos problémák megoldásakor nem mindig használható az adott tudományág teljes tudáskészlete, hanem már a kutatómunka tervezésekor ki kell kerülni a jövő generációra biztosan vagy várhatóan negatívan ható módszereket és megoldásokat. Az 1987-ben megjelent „Közös jövőnk” című könyv [27] azon ritka művek közé tartozik, amely jelentős változást eredményezett az emberiség jövőjével kapcsolatban. A könyv legfontosabb üzenete az, hogy folyamatos ipari és társadalmi fejlődésre van szükség ahhoz, hogy a gyorsan növekvő népességet élelmezni lehessen elfogadható életminőség biztosítása mellett. A fejlődésnek természetesen hosszútávon fenntarthatónak kell lennie, vagyis úgy kell kielégíteni a mai generáció igényeit, hogy azt a jövő generáció is meg tudja tenni. Az 1999-ben megjelent „Közös utazásunk” című könyv a fenntartható fejlődés koncepció fontosságának elismerése mellett tovább fejlesztette az elméletet [28]. A „fenntartható fejlődés” koncepció széleskörben került elfogadásra és alkalmazásra, melynek két fontos eleme van:

1. Olyan sebességgel kell a természetes nyersanyagokat felhasználni, hogy ne csökkenjen mennyiségük egy elfogadhatatlanul alacsony szint alá.
2. A hulladékok képződésének és környezetbe való jutásának sebessége nem lehet gyorsabb mint a környezet feldolgozási képessége.

Ennek következtében a zöld kémiai céloknál tovább kell lépni és figyelembe kell venni a technológiák hosszútávú környezeti hatását. A fenntartható fejlődés megkívánja a vegyipar és a környezet kölcsönhatásának mérésére szolgáló új módszerek kidolgozását és alkalmazását. Természetesen az új mérési módszereknek alkalmazhatóknak kell lenniük globálisan és lokálisan is - beleértve egy teljes technológiát, egy folyamat lépését, vagy akár egy kémiai kutató laboratóriumot. A fenntartható fejlődés sikeréhez meg kell határozni hogy mi, hogy ki által, és nem utolsó sorban, hogy meddig legyen fenntartható.

A vegyipar és a kémiát alkalmazó más iparágak szempontjából négy zöld kémiai cél fenntarthatóvá való tétele tunik fontosnak: (1) a petrokémiai nyersanyagok kiváltása biotechnológiai nyersanyagokkal, (2) a nyersanyagok átalakításához alkalmazott foszilis és biomassza alapú energia kiváltása fenntartható energiával, (3) olyan technológiai megoldások kifejlesztése, amelyek a víz felhasználását a lokálisan rendelkezésre álló mennyiségre vagy annál kevesebbre csökkentik, és (4) közel-nulla mennyiségű hulladék kibocsájtás. Ezen célok valószínűleg megvalósíthatók a jelen évszázadban:

Év	Nyersanyagok (%)		Energia (%)		Hulladék kibocsájtás (%) 2000-re vonatkoztatva
	Petrokémiai	Biotechnológiai	Foszilis és Biomassza alapú	Fenntartható	
2000	100	0	77	23	100
2025	40	60	60	40	50
2050	25	75	40	60	0
2075	0	100	220	80	
2100			0	100	

A zöld kémia tehát irányelveket ad és segít a hosszútávon alkalmazható (azaz fenntartható) molekulák és eljárások tervezésében. A zöld kémia néhány napjainkban fontos kihívása [29]:

- A víz hatékony bontása látható fénnel.
- Olyan oldószer rendszerek tervezése, amelyek a hő és az anyagátadás mellett katalizátorként is működnek és lehetővé teszik a termékek könnyű elválasztását.
- Molekuláris építokocka rendszer tervezése atomhatékony és környezetbarát szintézisekhez.

- Olyan adalékmentes műanyagok kifejlesztése, amelyek használat utáni természetes bomlása környezetre ártalmatlan anyagok képződéséhez vezet.
- Újrafelhasználható anyagok tervezése.
- Nem-éghető és nem-anyagintéző energia források alkalmazása.
- Széndioxid alapú kémiai termékek kifejlesztése.
- Olyan új felületek és anyagok kifejlesztése, amelyek sokáig használhatók és nem kívánnak felületi védőanyagokat és/vagy felületi tisztítást.

Ahhoz hogy a fenntartható civilizáció és ezen belül a fenntartható kémia kihívásaira válaszolni tudjunk molekuláris szinten, a zöld kémia fejlődését tudatosan gyorsítani kell a következő években. A zöld kémia akkor lesz sikeres, ha a zöld jelzot elhagyhatjuk és az emberek bizalommal várják a kémikusok és a vegyész mérnökök által kifejlesztett termékek és eljárások bevezetését.

Irodalom

1. Anastas, P. T.; Kirchhoff, M. M. *Chem. & Eng. News* **2000**, 25.
2. Pollution Prevention Act of 1990. 42 U.S.C., Sections 13101-13109 (1990).
3. (a) Anastas, P. T.; Warner, J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford (1998); (b) Clark, J.-Macquarrie, D.: *Handbook of Green Chemistry and Technology*, Blackwell Science Ltd., Oxford (2002).
4. EPA Green Chemistry – USA (www.epa.gov/greenchemistry).
5. Inter-University Consortium for the Environment – Italy (www.helios.unive.it/inca).
6. Green Chemistry Network – United Kingdom (www.chemsoc.org/networks/gcn).
7. Green & Sustainable Chemistry Network – Japan (www.gscn.net).
8. COST Action D29 on Sustainable/Green Chemistry and Chemical Technology (www.unil.ch/cost/chem).
9. Green Chemistry (www.rsc.org/is/journals/current/green/greenpub.htm).
10. Barta, K.; Csékei, M.; Csihony, S.; Mehdi, H.; Horváth, I. T.; Pusztai, Z.; Vlád, G. *Magy. Kém. Lapja* **2000**, 55, 173.
11. Sheldon, R. A. *CHEMTECH* **1994**, 24, 38.
12. Weissermel, K.; Arpe, H.-J. *Ipari szerves kémia*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1993) 141-147.
13. Trost, B. M. *Science* **1991**, 254, 1471.

14. Gopal, D. V.; Subrahmanyam, M. *Green Chem.* **2001**, *3*, 233.
15. Balalaie, S.; Arabanian, A. *Green Chem.* **2000**, *2*, 274.
16. Evans, J. *Chemistry in Britain* **1999**, 38.
17. Danner, H.; Braun, R. *Chem. Soc. Rev.* **1999**, *28*, 395.
18. Dagani, R. *Chem. & Eng. News* **1999**, 30.
19. Emons, C.H.; Kuster, B.F.M.; Vekemans, J.A.J.M.; Sheldon, R. A. *Tetrahedron Asymm.* **1991**, *2*, 359.
20. Draths, K. M.; Frost, J. W. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*, 399.
21. Clark, J.: *Green Chem.* **1999**, *1*, 1.
22. Carlson, R. *Silent Spring*, Houghton Mifflin Co., New York (1962).
23. Stinson, S. C. *Chem. & Eng. News*, **2000**, 35.
24. Stinson, S. C. *Chem. & Eng. News*, **2001**, 77.
25. Romano, U., Tesei, R.; Mauri, M. M.; Rebora, P. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* **1980**, *19*, 396.
26. (a) Ramshaw, C. *Chem. Eng.* **1985**, *415*, 30; (b) Stankiewicz, A. I.; Moulijn, J. A. *Chem. Eng. Prog.* **2000**, *96*, 22; (c) Hendershot, D. C.. *Chem. Eng. Prog.* **2000**, *96*, 35; (d) Johnson, J. *Chem. & Eng. News*, **2003**, 23-26.
27. World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford (1987).
28. Board on Sustainable Development, *Our Common Journey*, National Academy Press, Washington D. C. (1999).
29. Anastas, P. T.; Kirchoff, M. M. *Acc. Chem. Res.* **2002**, *35*, 686.