

BARTA KATALIN*
CSÉKEI MÁRTON*
CSIHONY SZILÁRD*
MEHDI HASAN*
HORVÁTH ISTVÁN TAMÁS*
PUSZTAI ZOLTÁN*
VLÁD GÁBOR*

Bevezetés, a tizenkét alapelv

Amíg a kémikusok és vegyészmérnökök hisznek abban, hogy a kémia és a vegyipar központi és pozitív szerepet foglal el a társadalom legkülönbözőbb igényeinek folyamatos kielégítésében, addig az európai és amerikai átlag polgár legalább kétharmada negatívan értékeli a vegyipart az ezredfordulón [1]. A kémikusok és vegyészmérnökök társadalmi elismerésének az elmúlt három évtizedben tapasztalható rohamos csökkenése a nagyszámú kémiai felfedezések, valamint az ezekből származó új technológiák és termékek sikeres bevezetése ellenére alakult ki. Ehhez elég volt néhány szintetikus termékéről kimutatni, hogy a környezetre és/vagy az egészségre káros hatásúak.

A modern környezetvédelmi mozgalom a DDT nevű klórozott rovarirtószer káros ökológiai hatásait bemutató „Csendes tavasz” című könyv megjelenésével indult el [2]. A terhes nők által Európában használt thalidomid hatóanyagú gyógyszer nem várt mellékhatása miatt 1961-ben a közel tízezer fejlődési rendellenességgel világra jött kisbaba kulcsszerepet játszott abban, hogy a közvélemény fél a „szintetikus” vegyületektől. A hatvanas évek közepétől számos további kémiai termék került bevezetésre, amelyeknek nem várt, környezetre és/vagy egészségre káros hatásuk volt. Például a hűtőszekrényekben alkalmazott freonokat a kén-dioxid és ammónia helyettesítésére fejlesztették ki a harmincas években. A freonok ózonbontó hatása nem volt előre látható. Hasonlóan a tetraetil-ólmot addig használták benzinadalékként, amíg ki nem derült, hogy ólommérgezést okoz és jelentősen csökkenti a gyermekek IQ szintjét. A különböző vegyipari balesetek is negatívan hatottak a vegyipar megítélésére. Itt elég megemlíteni az 1984. december 3-án az indiai Bhopal városban történt robbanást. Egy rovarirtószer gyártó üzemből 40 tonna metil-izocianát került a város sűrűn lakott részei fölé, melynek következtében 3500-an meghaltak és 150000-en megbetegedtek.

Az emberek bizalmatlanokká váltak a kémikusokkal és a vegyiparral szemben és ma már nyugodtan állíthatjuk, hogy a „kemofóbia” jelentősen megnőtt. Az emberek általában azt hiszik, hogy a vegyi anyagok „rosszak” és a természetes anyagok „jobbak”, bár sokuk azt sem tudja, hogy mi is egy vegyi anyag. Az a vélemény, hogy a „természetes” jobb, mint a „kémiai”, megalapozatlan. A természetben bőven található olyan vegyület, amely káros

biológiai hatással rendelkezik. Noha ez igaz, ennek ismételt hangoztatásával nem tudjuk a romló megítélést megváltoztatni. Amikor a kémikus azt mondja, hogy „én tudom, hogy hogyan kell veszélyes anyagokkal dolgozni”, akkor a potenciális baleseteket nem küszöbölte ki, csak elodázta, mivel nincs 100%-os balesetmentesség! A veszélyes anyagokkal kapcsolatos baleseteket egyféleképpen lehet biztosan elkerülni: *a veszélyes anyagok helyett veszélytelen anyagokat kell alkalmazni!*

A kémia és a vegyipar megítélésének javításához nekünk kémikusoknak és vegyészmérnököknek nem elég a problémák eredetét megértenünk, azokat el is kell fogadnunk. Törekednünk kell olyan vegyipari folyamatok és termékek kifejlesztésére, ahol nem utólag korrigáljuk a problémákat, hanem már az alapötlet sokszor keserves megszületése során figyelembe vesszük a jövőbeni hatásokat mind az egészségre, mind a környezetre. A zöld „szemüveg” feltétele után természetesen számos rutinszerűen használt vegyület, módszer és technológiai megoldás azonnal láthatatlanná válik és a célok elérését gyakran számottevően nehezebbé teszi. A zöld kémia erre a kihívásra próbál válaszolni úgy, hogy útmutatót ad a környezeti szempontból jobb, vagy zöld megoldások kialakításához.

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 leggazdagabbak. A zöld kémia céljait összefoglaló 12 alapelvet Anastas és Warner foglalták össze az 1998-ban megjelent „Zöld kémia: elmélet és gyakorlat” című könyvükben [3]. Ezek:

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.*

* Eötvös Loránd Tudományegyetem, Szerves Kémiai Tanszék, Budapest

6. Az energiafelhasználás csökkentésére kell törekedni (szobahőmérséklet és atmoszférikus nyomás).
7. Megújuló nyersanyagokból válasszunk vegyipari alapanyagokat.
8. A felesleges származékkészítést kerülni kell.
9. Reagens helyett szelektív katalizátorok alkalmazását kell előtérbe helyezni.
10. A kémiai termékeket úgy kell megtervezni, hogy használatuk végétével 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 észleljük.
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. Cikkünk célja a 12 alapelv bemutatása és a zöld kémiai szemlélet magyarországi elterjesztése.

A zöld kémia 12 alapelvének alkalmazása

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 februárjától Green Chemistry címmel a Royal Society of Chemistry gondozásában jelenik meg [4]. A hely hiánya miatt a zöld kémia 12 alapelvének rövid ismertetése mellett csak néhány példa bemutatására van lehetőségünk. Fontos megjegyezni, hogy noha a 12 alapelv közül számos triviálisnak tűnik, a 12 alapelv együttes alkalmazása egy adott probléma megoldására gyakran megkívánja, hogy az alapoktól induljon egy új termék vagy folyamat tervezése. Ennek következtében a zöld kémia az alapkutatások fontosságára irányítja a figyelmet.

1. alapelv: Jobb megelőzni a hulladék keletkezését, mint keletkezése után kezelni

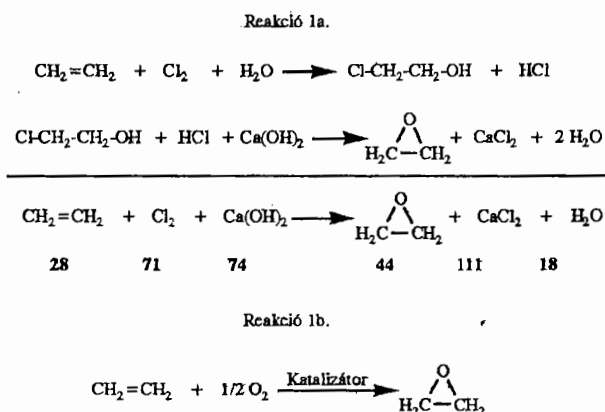
A termelés szempontjából hulladéknak tekinthető minden olyan anyag, amelyet már nem lehet tovább hasznosítani, így az nem hoz profitot a termelőnek, sőt fizetnie kell a biztonságos elszállításért, tárolásért, és felelős lesz a későbbi esetleges környezeti károkért. Mivel a hulladék valamilyen formában 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.

Adott reakció vagy folyamat hatásfokának klasszikus jellemzése a hozam. Így, ha egy mól kiindulási anyagból egy mól 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 [5]. A különböző, kémiai eljárásokat alkalmazó iparágakra jellemző, hogy minél nagyobb a termelés volume-ne, annál kisebb a környezeti faktor:

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

Ez valószínűleg abból adódik, hogy a nagy volumenű 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, 1a reakció) [6], mely során 1 kg termék mellett 2,93 kg hulladék képződik [környezeti faktor=(111+18)/44=2,93]. Ezzel szemben az etilén katalitikus oxidációja során (1. ábra, 1b reakció) 100 %-os hozam mellett csak etilén-oxid keletkezik [6]. Mivel a terméket könnyű elválasztani az ezüstalapú heterogén katalizátortól (Ag/Al₂O₃), elméletileg hulladék nem keletkezik (környezeti faktor=0).



1. ábra. Az etilén-oxid előállítása a klórhidrin-eljárással és közvetlen oxidációval

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. A veszélyes hulladékokkal kapcsolatos általános problémát jól mutatja be a következő kérdés-felelet:

Kérdés: Mi egy hordó veszélyes hulladék és egy csepp pezsgő keverékének a neve?

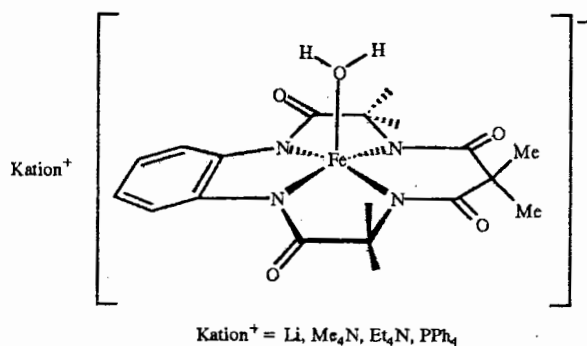
Válasz: Veszélyes hulladék!

Kérdés: Mi egy hordó pezsgő és egy csepp veszélyes hulladék neve?

Válasz: VESZÉLYES HULLADÉK!

A második kérdésre adott választ tudatosítani kell mindenkivel, aki veszélyes anyagokkal dolgozik.

A hagyományos papírféherítési eljárásokban a klórtartalmú oxidációs szerek (Cl_2 , Cl_2O) alkalmazása miatt nagy mennyiségű káros, klórtartalmú szerves hulladék keletkezik (többek között dioxin is). Egy új vasalapú katalizátor (2. ábra) kidolgozásának köszönhetően a féherítés már alacsony hőmérsékleten ($0-90^\circ\text{C}$) hidrogén-peroxid alkalmazásával is elvégezhető [7]. Noha ez az eljárás még iparilag nincs alkalmazva, számos előnye van: (1) a folyamat klórmentes, (2) elsősorban nem a cellulózt, hanem a lignint oxidálja, (3) jóval kevesebb veszélyes hulladék keletkezik, és (4) biztonságosabb oxidálószer alkalmaz.



2. ábra. A papírféherítéshez kifejlesztett vasalapú katalizátor szerkezete

2. alapelv: Szintézisek tervezésénél törekedni kell a kiindulási anyagok maximális felhasználására (minél nagyobb atomhatékonyságra)

Általános gyakorlat a kémiában, hogy a kémiai egyenletek csak a szintézis céltermékeit sorolják fel, a melléktermékekkel nem foglalkoznak, pedig azok elválasztása a termékektől komoly problémát jelenthetnek egy ipari eljárásban. Amennyiben a melléktermékek nem használhatók fel semmire, akkor azok is hulladéknak számítanak. Egy zöld kémiai szempontból ideális reakcióban, vagy folyamatban az összes kiindulási atom megjelenik a termékben. Ezt az atomhatékonyság megállapításával lehet meghatározni [8], ami megmutatja, hogy a kiindulási anyagok atomjai milyen százalékban alakulnak át a céltermékké:

atomhatékonyság = (céltermék molekulatömege/kiindulási anyagok molekulatömege)•100

Az 1. ábra 1a reakciójában bemutatott klasszikus etilén-oxid szintézis atomhatékonysága 25% [$44/(28+71+74)$], ami a viszonylag nagy molekulatömegű kalciumnak és klórnak köszönhető. Ezzel szemben az etilén katalitikus oxidációja (1. ábra, 1b reakció) 100 %-os atomhatékonyságú. Ebből a példából is jól látható, hogy a katalitikus reakció atomhatékonysága mindig magasabb, mint a sztöchiometrikus reakcióé.

A reakciótípusok szempontjából az átrendeződéses és az addíciós reakciók az igazán hatékonyak. Az átrendeződéses reakciók során a molekulát alkotó atomok átszerveződnek, és új molekulát hoznak létre, tehát az összes kiindulási anyag a termékben van, ezért az összes ilyen reakció 100%-os atomhatékonyságú. Az addíció során két (vagy több) molekulából keletkezik egy molekula melléktermékek képződése nélkül, ezért az atomhatékonyság szükségszerűen 100%.

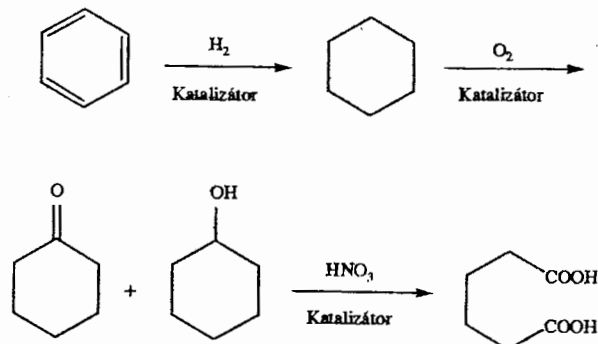
A szubsztitúciós reakciók során feltétlenül képződik melléktermék, ami hulladéknak minősül, így csökkenti az atomhatékonyságot. Hogy mennyire, az a szubsztrátumtól és a reagensektől függ. Az eliminációs reakciók során egy molekulából hasad ki egy kisebb molekula, ami nem része a terméknek, azaz veszteség. Az atomhatékonyság mindenképpen kisebb lesz, mint 100%. Az alapvető szintetikus reakciótípusok közül ez a legkevésbé atom-hatékony. Egy ipari eljárásban az eliminációs és szubsztitúciós reakciókat minimalizálni kell, hogy minél kevesebb mellékterméket kapjunk.

Amennyiben a melléktermékek képződése nem kerülhető el, olyan reakciókat érdemes választani, amelyekben a melléktermék minél kisebb molekulatömegű és a terméktől könnyen elválasztható anyag.

3. alapelv: Lehetőség szerint már a szintézisek tervezésénél olyan reakciókat célszerű választani, melyekben az alkalmazott és a keletkező anyagok nem mérgező hatásúak és a természetes környezetet nem ártalmasak

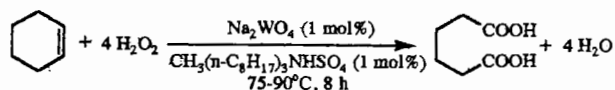
Amennyiben egy reakcióban veszélyes és mérgező anyagokat használunk, esély van arra, hogy a szállítás, vagy a gyártási folyamat során olyan baleset történjen, amely tragédiát okoz. A balesetek és az azokból származó egészségi és környezeti károk elkerülésének szokásos módja a veszélyes anyagokkal való érintkezés minimalizálása. Fontos megjegyezni, hogy a veszélyes és mérgező anyagokat használó folyamatok veszélyessége megfelelő védőruházat és biztonsági intézkedések alkalmazásával csökkenthető, de teljes biztonságot nem lehet elérni. Célszerűbb tehát a veszélynek még a lehetőségét is kizárni maguknak a veszélyes kiindulási anyagoknak, reagenseknek, termékeknek és folyamatoknak a mellőzésével.

Az adipinsav ipari szintézisének első lépése a benzol katalitikus hidrogénezése, amit két katalitikus oxidációs lépés követ (3. ábra). Amennyiben a második oxidációs lépésben a ciklohexanol/ciklohexanon keverék oxidációja salétromsavval történik, akkor jelentős mennyiségű dinitrogén-oxid keletkezik [9]. A dinitrogén-oxidról kimutatták, hogy szerepet játszik a szmog, a savas eső és az üvegházhatás kialakulásában. Az új környezetbarát adipin-



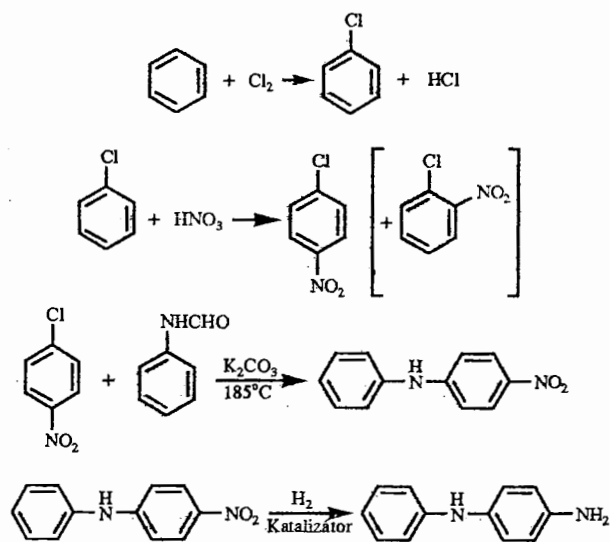
3. ábra. Az adipinsav hagyományos előállítási módja

savsintézisben a ciklohexént 30%-os hidrogén-peroxidal oxidálják egy volfrámalapú katalizátor jelenlétében (4. ábra) [10]. A módszer előnye, hogy egyedüli mellékterméke a víz, az oxidálószer kevésbé veszélyes és a reakció nem igényel magas hőmérsékletet és nyomást.



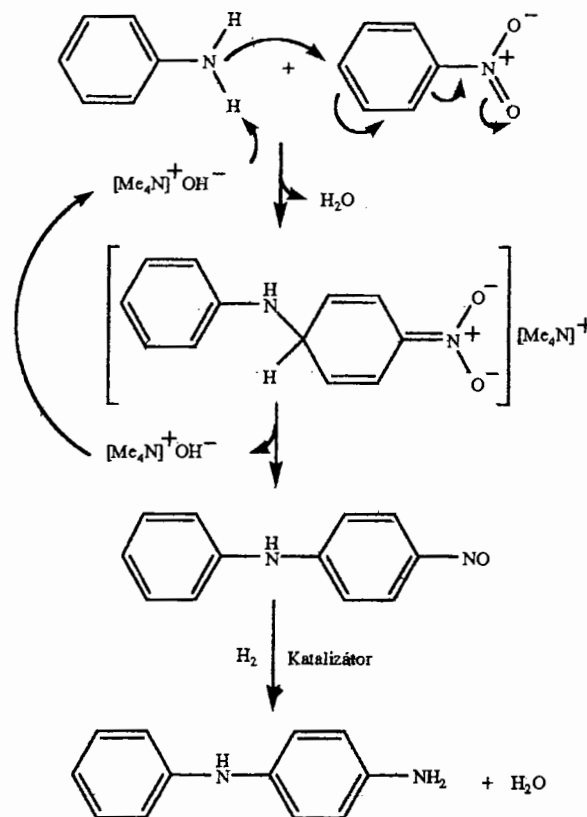
4. ábra. Az adipinsav környezetbarát szintézise

A 4-amino-difenilamin hagyományos ipari előállítása (5. ábra) jó példa a veszélyes anyagok és reakciók nagyméretű alkalmazására [11]. A folyamat egyik fontos intermedijere a p-nitro-klórbenzol, amit el kell választani az o-nitro-klórbenzoltól. Noha a klór funkciós csoport kialakítása kritikus a szintézis szempontjából, a klóratomok nem a termékben, hanem a szennyvízben (KCl formában) hagyják el a folyamatot. A Monsanto által kifejlesztett új eljárás (Flexsys process) kikerüli a halogén intermedier használatát [11]. A nitrobenzol és az anilin tetrametil-ammonium-hidroxid jelenlétében lejátszódó reakciójában keletkező in-



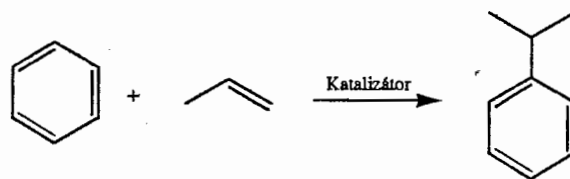
5. ábra. 4-amino-difenil-amin hagyományos előállítása

termedier katalitikus hidrogénezése 4-amino-difenil-amint eredményez (6. ábra). A Flexsys-eljárásban 74%-kal kevesebb szerves hulladék, 99%-kal kevesebb szervesetlen hulladék és 97%-kal kevesebb szennyvíz képződik.



6. ábra. A 4-amino-difenilamin szintézisére kidolgozott Flexsys-eljárás

A kumolt előállító hagyományos eljárásokban a benzol propilénnel történő alkilezését (7. ábra) szilárd foszforsav (H_3PO_4 / BF_3 -promotor / SiO_2) vagy alumínium-klorid katalizátorok jelenlétében végzik [12]. Mindkét katalizátor nagyon korrozív és használat után veszélyes hulladéknak számít. Ezzel szemben a Mobil-Badger nevű eljárásban alkalmazott zeolit katalizátor környezeti szempontból inert és a kumul jó hozammal termelhető [13]. Az új folyamatban kevesebb hulladék képződik, kevesebb energiát igényel, és kevésbé korrozív katalizátort használ.



7. ábra. A kumul katalitikus előállítása

Néha elkerülhetetlen, hogy veszélyes kiindulási anyagokat alkalmazzunk. Ebben az esetben törekedni kell arra, hogy a veszélyes anyag keletkezése pillanatában elreagáljon, mert így minimalizálható az eljárás egészségkárosító és környezetszennyező hatása. Több cég ilyen módon használja a nagyon veszélyes foszgent.

4. alapelv: Kémiai termékek tervezésénél törekedni kell arra, hogy a termékekkel szembeni elvárások teljesítése mellett mérgező hatásuk minél kisebb mértékű legyen

A zöld kémiának fontos területe a biztonságos kémiai termékek tervezése és a tervezéshez szükséges módszerek ki- vagy továbbfejlesztése. A hagyományos kémiai terméktervezés elsősorban az alkalmazhatóságot és így az eladhatóságot meghatározó tulajdonságokat (szín, sűrűség, viszkozitás, szilárdság, kémiai reaktivitás stb.) vette figyelembe. Az egészségre, vagy a környezetre való hatások vizsgálata gyakran csak a széleskörű alkalmazás után kezdődött el. Biztonságos kémiai termék tervezése során viszont mind az emberre, mind a környezetre ható káros tulajdonságok minimalizálása is fontos szempont. Ezt úgy lehet elérni, hogy az új kémiai termék tervezése során a molekuláris szintű szerkezet és a termék kívánt tulajdonsága, vagy funkciója közötti összefüggések becslése mellett az emberre és a környezetre ható káros tulajdonságok szerkezetfüggését is figyelembe vesszük.

Természetesen nem könnyű széles körben gyártott és jól bevált, de a környezetre és/vagy egészségre káros hatású anyagot „zöld termékre” cserélni. Ennek egyik feltétele az, hogy a „természetbarát anyag” tulajdonságai és minősége legalább olyan jó legyen, de ha lehet, múlja felül az alkalmazott termékét. Fontos szempont, hogy ameddig a megszokott terméket előállító eljárás kifizetődőbbnek tűnik a zöld termék gyártásánál, addig valószínű, hogy nem kerül sor újításra. A „zöld termékek” versenyképesnek kell lennie!

5. alapelv: Segédanyagok (oldószerek, elválasztást elősegítő reagensek stb.) használatát minimalizálni kell, s amennyiben szükséges, ezek „zöldek” legyenek

Szinte minden reakcióban használunk olyan segédanyagokat, amelyek elősegíthetik a kémiai reakció lejárásodását, vagy a termékek elválasztását, de nem lesznek részei a termékeknek. Az oldószerek például nem reagálnak a reakcióban résztvevő vegyületekkel, csak egy fázisban tartják őket. Sok segédanyag oly mértékben lett része a mindennapi gyakorlatnak, hogy sokszor csak megszokásból használjuk. Ez különösen igaz oldószerekre és elválasztó reagensekre.

A segédanyagoknak lehetnek emberre és környezetre ártalmas tulajdonságai. Gyakran használt oldószerek a klórozott szénhidrogének (diklór-metán, kloroform, tetraklór-etilén, szén-tetraklorid), amelyek általában rákkeltő hatásúak. Az aromás szénvegyületek, mint például a benzol más mechanizmus szerint fejtik ki rákkeltő hatásukat, de a végeredmény ugyanaz. Egy másik gyakori probléma, hogy egy új, látszólag egészségre és környezetre nem káros segédanyag esetleges negatív tulajdonsága lehet, hogy csak évek, évtizedek múlva jelentkezik. Így történt ez a tisztítószerként és hűtőfolyadékként nagy mennyiségben használt freonok esetében is, amelyek toxicitása általában kicsi, nem gyúlékonyak és nem robbanékonyak. Jóval a széleskörű elterjedés után derült ki, hogy mekkora pusztítást vég-

zett az ózonpajzsban.¹ Azóta betiltották és hatalmas költségek árán sikerült kifejleszteni egy hasonló tulajdonságú, de az ózonpajzsról nem káros anyagot.

Az oldószerekkel kapcsolatos másik probléma az, hogy a reakció végén el kell választani a terméktől. Ezt történhet desztillációval vagy kristályosítással, melyek energiaigényes műveletek. Amennyiben az elválasztás után az oldószert szennyezett marad, vagy meg kell semmisíteni, vagy ha túl drága, tovább kell tisztítani, hogy újrafelhasználható legyen. Ezért a legjobb megoldás, ha nem használunk oldószert, vagy ha használata elkerülhetetlen, olyan oldószert alkalmazunk, amely könnyen elválasztható a terméktől (szuperkritikus oldószerek [14], víz [15], fluoros oldószerek [16] és ionos oldatok [17]).

6. alapelv: Az energiafelhasználás csökkentésére kell törekedni (szobahőmérséklet és atmoszférikus nyomás)

Az energiatermelésnek és az energiafogyasztásnak súlyos környezeti hatásai vannak, és a világ energiaigényének folyamatos növekedése miatt ez egyre komolyabb problémát jelent. Jelenleg a fejlett államok energiafogyasztásának legnagyobb részéért az ipar a felelős. Általános szabály, hogy minél kevesebb energia kell egy termék előállításához, annál versenyképesebb, mert az energia drágulása nem érinti olyan drasztikus mértékben a termék árát, mint a kevésbé hatékony eljárással készülő versenytárs termékét. Mivel a vegyipar és a kőolaj-feldolgozás energiafogyasztása jelentős, arra kell törekedni, hogy minél kisebb energiaigényű legyen egy folyamat.

A legtöbb energiát hőközlésre fordítjuk. Erre azért van szükség, hogy meggyorsítsuk a reakciókat, vagy hogy egy kívánt reakciót kerüljön előtérbe. A megfelelő aktiválási energia biztosításával elő tudjuk segíteni a kívánt átalakulást. A katalizátorok egyik nagy előnye az, hogy az aktiválási energia csökkentésével alacsonyabb hőmérsékleten is végbemegy a kívánt folyamat. Nem mindegy az sem, hogy mennyi ideig kell melegíteni egy reakcióelegyet. Ha a reakcióidőt nem optimalizáljuk, akkor lehet, hogy feleslegesen pazaroljuk el a fűtésre használt energiát, mert a reakció már rég lejátszódott. Ha pedig túl rövid ideig végezzük a reakciót, akkor nem lesz megfelelő az átalakítás határfoka, és esetleg az elválasztásnál kell sokkal több energiát befektetnünk. Jelentősen csökkenhet az energiaigény, ha nem hőenergiát használunk. Például mikrohullámú besugárzás hatására sok reakció jóval kedvezőbb kitermeléssel megy végbe percek alatt, így akár több napos melegítést is helyettesíteni lehet 5-10 perces besugárzással [19]. Hasonló hatása lehet ultrahangos kezelésnek is [20].

7. alapelv: Megújuló nyersanyagokból válasszuk a vegyipari alapanyagokat

Adott kémiai termék gyártása a kiindulási anyag megválasztásával kezdődik. A legtöbb esetben ez a döntés

¹ Az ózonnyuk napi helyzete megtekinthető a www.badc.rl.ac.uk honlapon.

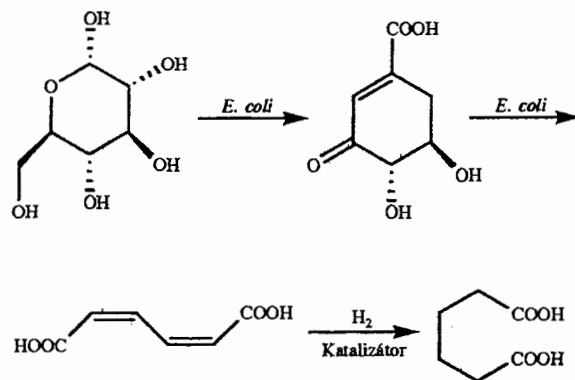
meghatározza a szintézis környezetre gyakorolt hatását nem csak azért, hogy mennyire veszélyes maga az anyag, hanem azzal is, hogy milyen nyersanyagból tudjuk gazdaságosan előállítani. A kiindulási anyag származhat kimerülő, vagy megújuló nyersanyagforrásból. A felosztást az emberi élet időskálája alapján végezzük. Ezzel mérve a kimerülő forrás tipikus példája a kőolaj, noha geológiai időskálán mérve megújuló, csak nagyon lassan képződik. Ugyanaz az a nyersanyag mind a két típusba is tartozhat, attól függően, hogy honnan nyerjük. Ha a széndioxidot fosszilis üzemanyag égetésével kapjuk, akkor kimerülő nyersanyagforrásnak, ha növények elégetésével, akkor megújulónak is lehet venni. Ha két kiindulási anyag valamennyi tényezőben megegyezik, akkor a megújuló nyersanyagforrásnak előnyt kell élveznie a kimerülővel szemben. A megújuló kiindulási anyagok tipikus példái a biológiai eredetű, főleg növényi eredetű anyagok.

A vegyipari szerves alapanyagok és intermedierek több mint 95%-ának nyersanyaga a kőolaj. Ugyanakkor a belső égésű motorok számának rohamos növekedésével a közlekedés is egyre több olajat fogyaszt, a növekvő energiafelhasználás miatt pedig hatalmas mennyiségeket égetünk el erőművekben. Ezek a folyamatok azt eredményezték, hogy a rendelkezésre álló kőolaj belátható időn belül el fog fogyni [21], a jelenlegi gyakorlat tehát hosszú távon nem tartható fenn. A kőolaj közvetlen és közvetett környezeti károkat is okozhat. Ha kiömlik, a természetes vizeket és a talajt károsítja. Az indirekt hatása azon alapszik, hogy a szénhidrogénekben a szénatomok redukált állapotban vannak, így feldolgozás közben gyakran oxidálni kell őket. A jelenlegi oxidációs folyamatok rendkívül szennyezőek, mert általában nehézfémek használatát igénylik és az alacsony szelektivitás miatt sok hulladék keletkezik. Ezzel szemben növényi eredetű nyersanyagok nagy mértékben oxidáltak, gyakran királisak és a sok funkció csoport miatt könnyű továbbalakítani őket [22]. Amellett, hogy összetételük nagyon változatos, génszintézis alkalmazásával növelni lehet a termelési kapacitást és módosítani lehet az alapanyag szerkezetét.

Fontos megjegyezni, hogy a hagyományos nyersanyagok (szén, olaj, földgáz) háromdimenziósak, vagyis a leőhely mélységében is kiterjedt, így kis helyen nagy mennyiség koncentrálódhat belőle. Az ültetvények viszont két dimenzióban terjeszkednek, így azonos mennyiségű alapanyag előállításához 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 alapanyag ellátást.

A megújuló alapanyagokra eddig leírt alkalmazások többségében a mezőgazdaság által nagy mennyiségben termelt növényekből, illetve a belőlük kinyerhető anyagokból állítanak elő fontos ipari alapanyagokat vagy intermediereket. A glükóz, mint az egyik leggyakoribb vegyület a Földön, nagyon jó alternatív kiindulási anyag nagy mennyiségben gyártott vegyipari termékekhez. A sok funkció csoportnak köszönhetően könnyen át lehet alakítani, további oxidálást pedig általában nem igényel. Vízben kitűnően

oldódik és biotechnológiai módszerek kombinálásával változatos átalakításokat végezhetünk el rajta. Erre jó példa a glükózalapú adipinsavszintézis (8. ábra) [23], amelyhez átalakítást végző *E. coli* baktériumot génszintézeti úton állították elő oly módon, hogy bevitték a megfelelő átalakításokat végző enzimek géneit.



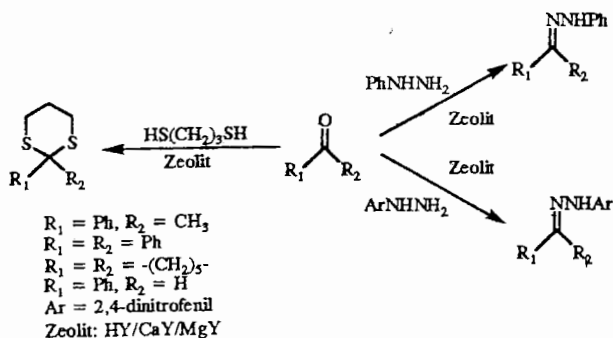
8. ábra. Az adipinsav előállítása glükózból

8. alapelv: A felesleges származékkészítést kerülni kell

A reakciók lejátszódásához gyakran szükséges az anyag viszkozitását, megoszlási hányadosát, gőznyomását, vízdékonyságát megváltoztatni, amelyet például sóképzéssel lehet megoldani. Ezek a folyamatok segédanyagokat használnak fel, amelyek az eredeti anyag viszszalakítása után hulladékot eredményezhetnek.

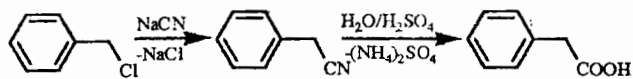
Komplex molekulák szintézise során gyakran használt módszer az olyan védőcsoportok alkalmazása, amelyek védik a kiindulási vegyületekben található reaktív funkció csoportokat. Az ilyen típusú módszerek egyik jellegzetes példája az alkoholok védelme benziléter képzésével. Ilyenkor például egy oxidációs reakció végrehajtható a molekula egy másik részén anélkül, hogy hatással lenne az alkoholcsoportra. Ha az oxidáció befejeződött, az alkohol könnyen visszaalakítható a benziléter hasításával. Az ilyen típusú származékképzések különösen elterjedtek a finomkémiai szintézisekben, gyógyszerknél, rovarirtó szerekknél és bizonyos festékekknél. Zöld kémiai szempontból a legjobb védőcsoport, ha nincs védőcsoport.

A magas termékszelektivitás érdekében néha elkerülhetetlen a reaktív funkció csoportok védelme. Ilyenkor arra kell törekedni, hogy a reakciók során ne használjunk veszélyes anyagokat és minél kevesebb hulladék keletkezzék. A karbonilcsoport védelme gyakran 1,3-ditián, oxim, fenil-hidrazon, 2,4-dinitro-fenil-hidrazon származék képzésével érhető el. Az előállításuknál alkalmazott hagyományos savak nagyon korrozívak és számos veszélyes anyag keletkezik. A szilárd fázisú savas zeolitokkal ez a probléma kikerülhető (9. ábra) [24]. További előnyük a folyadék fázisú savakhoz képest, hogy jó hozammal hajtható végre a kívánt reakció, könnyű a termékek elválasztása, újrahasznosíthatóak, és enyhébb reakciókörülményeket igényelnek.



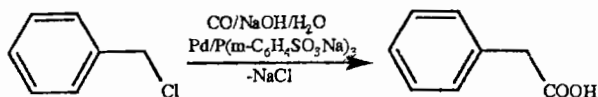
9. ábra. Karbonilcsoport védeése zeolit segítségével

Új reakcióutak kifejlesztésével kikerülhető a felesleges hulladékot termelő származékok alkalmazása. A 2-fenil-ecetsav hagyományos előállításánál az első lépésben a benzil-kloridot a mérgező nátrium-cianidval reagáltatják és nukleofil szubsztitúciós reakcióban a klórt cianidcsoportra cserélik. Ezután a benzil-cianid savas hidrolízise fenil-ecetsavat és ammónium-szulfátot eredményez (10. ábra).



10. ábra. A 2-fenil-ecetsav hagyományos szintézise

A reakcióban keletkező nátrium-klorid és ammónium-szulfát hulladéknak tekinthető. Ezzel szemben a benzil-klorid palládiumkatalizátor jelenlétében vizes nátrium-hidroxidban lejátszódó karbonilezési reakciójában fenil-ecetsav és nátrium-klorid keletkezik (11. ábra) [25]. Az új módszerrel 96 %-os konverzióval, 92 %-os szelektivitással állítható elő a fenil-ecetsav. A keletkező sók mennyisége 60 %-kal kevesebb és a termék elválasztása is könnyebb, mint az eredetiben és kikerültünk egy szükségtelen származékképzést. Továbbá az új eljárás olcsóbb is, hiszen a nátrium-cianid ára többszöröse a szén-monoxidénak.



11. ábra. A 2-fenil-ecetsav előállítása benzil-klorid karbonilezésével

9. alapelv: Reagens helyett szelektív katalizátorok alkalmazását kell előtérbe helyezni

Egy adott kémiai termékhez vezető folyamat tervezése során gyakran van lehetőség arra, hogy sztöchiometrikus, vagy katalitikus reakciót válasszunk. Természetesen a 100%-os atomhatékonyságú átrendező és addíciós reakciók, amelyek definíció szerint sztöchiometrikusak, zöld kémiai szempontból elfogadhatóak. Ezzel szemben, valamennyi reakció, amelyben sztöchiometrikus mennyiségű reagens is részt vesz, a „használt reagens” képződé-

se elkerülhetetlen. Elég itt emlékeztetni a Wittig-reagensre ($R^1R^2C=PPh_3$), amelyet olefin előállítására lehet alkalmazni. A reakció szükségszerű mellékterméke a trifenil-foszfín-oxid ($Ph_3P=O$), melynek tömege akár többszöröse is lehet az olefinnek. A reagens alkalmazásával kapcsolatos további probléma a „használt reagens” elválasztása a terméktől, ami gyakran további segédanyagok használatát igényli. Így a folyamatban keletkező hulladék mennyisége sokszorosára nőhet.

A katalitikus reakciók alkalmazása azért lehet előnyösebb, mert a katalizátor definíció szerint nem lesz része a terméknek.² Itt fontos kiemelni, hogy zöld kémiai szempontból csak azok a katalitikus reakciók jöhetnek számításba, melyekben a termékszelektivitás teljes konverzióval is megközelíti a 100%-ot és a katalizátort könnyű elválasztani a terméktől [26]. A magas termékszelektivitás és a terméktől való elválaszthatóság függ a katalizátorok típusától. Amíg heterogén katalizátorokat könnyű elválasztani a terméktől, addig a homogén- és biokatalizátorok elválasztása nehézkes lehet ipari méretekben. Ezzel szemben a homogén- és különösen a biokatalizátorok szelektivitása általában messze meghaladja a heterogén katalizátorokét. Ebből adódóan a zöld kémia célja könnyen elválasztható homogén- és biokatalizátorok, valamint szelektív heterogén katalizátorok kifejlesztése és alkalmazása.

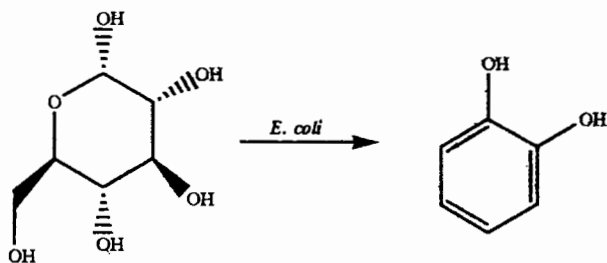
Folyadékfázisban működő homogén katalizátorok elválaszthatóságának növelésére számos módszer áll rendelkezésünkre, melyekből néhányat érdemes megemlíteni. A katalizátor kovalens kötésekkel kapcsolódik egy szilárd hordozó felületéhez [27]. Olyan két, egymással nem elegyedő folyadékfázist alkalmazunk, melyek közül az egyikben a katalizátor, a másikban a termék található. A katalizátort tartalmazó fázis lehet alkohol [28], víz [15], fluoros oldószer [16], ionos oldat, [17] és szuperkritikus szén-dioxid [14]. A katalizátor méretét úgy választjuk meg, hogy az egy membránnal elválasztható legyen a terméktől [29].

A biokatalizált reakciók általában vizes közegben, közeli szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson mennek végbe, ami alkalmazásukat viszonylag olcsóvá és környezetbaráttá teszi [30]. Hátrányuk, hogy nagyon érzékenyek a reakciókörülmények változásaira, továbbá, az ipari alkalmazásnak határt szabhat, hogy gyakran csak híg oldatokban működőképesek. A géntechnológia azonban lehetőséget ad arra, hogy ne csak a természetben meglévő enzimeket, mikroorganizmusokat használjuk, hanem előállítsunk újakat is, amelyek jobb tulajdonságokkal rendelkeznek. Például, az *E. coli* genetikai módosításával nyert mikroorganizmus (*E. coli* AB2834/pKD136/pKD9.069A) segítségével egy lépésben lehet glükózból pirokatechint előállítani (12. ábra) [31].

A hagyományos heterogén katalizátorok hátránya, hogy a felületen található katalitikusan aktív centrumok aktivitása és szelektivitása gyakran különböző, melynek eredményeként csökken a termékszelektivitás. Ezt növelni lehet

² Ez alól csak olyan katalitikus reakciók kivételek, amelyekben a katalizátor kovalensen kötődik a termékhez és a kiindulási anyagok jelenlétében aktív, de azok elfogyása után a reakció megáll (pl. élőpolimerizáció).

azonos szerkezetű aktív centrumok (single site) [32] vagy meghatározott méretű pórusszerkezet kialakításával [33]. Az utóbbi esetben a termék képződését elsősorban az alak szelektivitás határozza meg. Ennek köszönhető a zeolitok széleskörű alkalmazása a zöld kémiában [24].



12. ábra. Az pirokatechin előállítása glükózból

10. alapelv: A kémiai termékeket úgy kell megtervezni, hogy használatuk végeztével ne maradjanak a környezetben és bomlásuk környezetre ártalmatlan termékek képződéséhez vezessen

Az évezred végén használt vegyipari termékeknek egyik aggasztó problémája az, hogy nem képesek lebomlani a természetben. Ez azt jelenti, hogy az elhasznált, környezetünkbe kiengedett vegyi anyagok általában eredeti állapotukban maradnak meg és állati ill. növényi szervezetekbe felszívódva felhalmozódhatnak. Ez a felhalmozódás gyakran káros lehet (direkt vagy közvetett úton) az adott élőlényre. Az olyan kémiai termékek értékesítése, amelyek kifejlesztése során nem számoltak a környezetre és az emberi szervezetre gyakorolt esetleges hatásokkal, sok probléma okozója lehet. Csak egy a sok közül: elsődleges funkciójuk teljesítés után a természetbe jutva nem képesek lebomlani.

Érdemes megemlíteni, hogy az elmúlt évtizedekben óriási mennyiségben alkalmazott műanyagok éppen tartósságuknak és hosszú élettartalmuknak köszönhetik népszerűségüket. Ezen előnyös kémiai és fizikai tulajdonságok viszont a természetes környezetben komoly környezeti problémák okozói lehetnek. Nem ritka, hogy a madarak tápláléknak hiszik és megeszik az emészthetetlen műanyagtartalmú hulladékokat. A zöld kémia egyik célja olyan műanyagok előállítása, amelyek a természetes környezetbe jutva könnyen lebomlanak.

Minden alkalommal, amikor új kémiai vegyületet tervezünk az első dolog az, hogy eldöntsük, milyen tulajdonsággal kell rendelkeznie a molekulának. A környezetünkben a korábbi mulasztások miatt felhalmozódott vegyi anyagok által okozott károk ismeretében az újonnan kifejlesztett kémiai vegyületeknek nemcsak az elsődleges célnak kell tökéletesen megfelelniük, hanem a környezetvédelmi elvárásoknak is. Például, egy műanyag szemétszákkal szemben az elvárás az, hogy miután elhasznált és a természetes környezetbe jut, ne őrizze meg sokáig eredeti kémiai/fizikai állapotát.

Stabil kémiai anyag lebomlásának elősegítése megoldható olyan funkciós csoport(ok) beépítésével, amely megakadályozza a természetes felhalmozódást azáltal, hogy

az anyagot hidrolízisre, fotolízisre, vagy egyéb szerkezeti változást kiváltó környezeti hatásokra teszi érzékenyebbé. Nem szabad azonban arról sem megfeledkezni, hogy maguk a bomlástermékek is rendelkezhetnek káros tulajdonságokkal. Nyilvánvaló, hogyha ezt a szempontot kihagyjuk a számításaink közül és a kifejlesztett „zöld termék” olyan vegyületekre bomlik szét, amelyek növelik a környezetvédelmi problémák számát, öngölt rúgtunk.

11. alapelv: Új és érzékeny analitikai módszereket kell használni a vegyipari folyamatok *in situ* ellenőrzésére, hogy a veszélyes anyagok keletkezését idejében észleljük

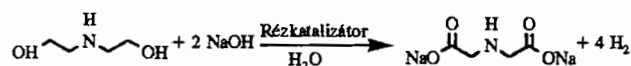
A környezeti problémákkal kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy amit nem lehet mérni, azt nem lehet ellenőrizni és szabályozni. A zöld kémia célja olyan analitikai módszerek és technológiák kifejlesztése, amelyekkel mérhető a veszélyes anyagok mennyisége az ipari folyamatokban és a környezetben. Ezek a technikák lehetővé teszik a reakció során keletkező veszélyes melléktermékek és mellékreakcióknak a követését. Amikor sikerül egy toxikus anyagot akár nagyon kis mennyiségben is detektálni, csak akkor nyílik lehetőségünk arra, hogy a reakció paramétereit úgy állítsuk be, hogy keletkezését csökkentjük, vagy megszüntessük. Ha a folyamatba beépített érzékelők közvetlen kapcsolatban állnak a szabályozással, a veszélyek csökkentése automatizálható.

A modern analitikai módszerek felhasználásának egy másik lehetősége a reakció előrehaladásának nyomon követése a reakció végének meghatározása céljából. Sok esetben a kémiai eljárás megköveteli a reagens folyamatos adagolását a reakció befejeződéséig. Például, ha rendelkezünk egy olyan *in situ* mérésre alkalmas analitikai készülékkel, amellyel megállapítható a reakció vége, elkerülhető a felesleges reagens hozzáadása és így csökkenthetjük a hulladék mennyiségét.

12. alapelv: A vegyipari folyamatokban olyan anyagokat kell használni, amelyek csökkentik a vegyipari balesetek (kémiai anyagok kibocsátása, robbanás, tűz) valószínűségét

Nagyon fontos, hogy új kémiai folyamatok tervezésekor figyelembe vegyünk az alkalmazott anyagok toxikussága mellett a tűz- és robbanásveszélyesség miatt fellépő kockázati tényezőket is. Gyakran előfordul, hogy a szennyező anyagok kibocsátásának csökkentése növeli a „véletlen” balesetek előfordulásának valószínűségét. Így az oldószerek újrahasznosítása ugyan csökkentheti a szennyező anyagok kibocsátását, ugyanakkor viszont többszörösére növelheti a tűz- és robbanásveszélyt. A biztonságos kémiai technológia tervezésének egyik alapkövetelménye, hogy a kémiai balesetek fő okozói, azaz a gázok és az illékony folyadékok helyett kis tenziójú folyadékokat, vagy szilárd halmazállapotú anyagokat alkalmazzunk.

A dinátrium-iminodiacetát fontos közti termék a Monsanto cég Roundup nevű herbicidjének gyártásában. A Monsanto is, mint sok más cég, a dinátrium-iminodiacetátot Strecker-szintézissel állította elő ammóniát, formaldehidet, hidrogén-cianidot és sósavat használva. A hidrogén-cianid különleges bánásmódot igényel, mert nagyon mérgező. A reakció exoterm voltából következik, hogy lejátszódása folyamán instabil intermedierek is képződhetnek. A folyamatban 1 kg termékre nézve 7 kg olyan hulladék képződik, ami formaldehidet és cianidokat is tartalmaz. A Monsanto új eljárásában dietanol-amint dehidrogéneznak rézkatalizátor jelenlétében (13. ábra) [26]. A felhasznált anyagok kevésbé toxikusak, mint a hagyományos eljárásban használtak. A dehidrogénezés egy lépéses endoterm folyamat, tehát biztonságosabb. Környezetre ártalmas hulladék nem keletkezik, a katalizátor a reakcióelegy szűrésével visszanyerhető.



13. ábra. A dinátrium-imino-diacetát katalitikus szintézise

Zöld kémiai szempontból igen nagy jelentőséggel bírnak az úgynevezett *in situ* technológiák. Lényegük, hogy a veszélyes reagensok közvetlenül a reakcióelegyben keletkeznek és azonnal fel is használódnak. Az a vegyipari cég, amely ezt a technológiát alkalmazza, kiküszöbölheti azokat a problémákat, amelyek a veszélyes anyagok tárolásából és szállításából adódnak.

IRODALOM

- [1] Clark J.: Green Chemistry, 1, 1 (1999).
- [2] Carlson, R.: Silent Spring. Houghton Mifflin Co., New York, 1962.
- [3] Anastas, P. T. - Warner, J. C.: Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, Oxford, 1998.
- [4] Green Chemistry honlapja: www.rsc.org/greenchem
- [5] Sheldon, R. A.: CHEMTECH, 24, 38 (1994).
- [6] Weissermel, K. - Arpe, H.-J.: Ipari szerves kémia, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1993) 142-147. old.
- [7] Horwitz, C. P. - Fooksman, D. R. - Vuocolo, L. D. - Gordon-Wylie, S. W. - Cox, N. J. - Collins, T. J.: J. Am. Chem. Soc., 120, 4867 (1998).

ÖSSZEFOGLALÁS

Barta Katalin — Csékei Márton — Csihony Szilárd — Mehdi Hasan — Horváth István Tamás — Pusztai Zoltán — Vlád Gábor: A zöld kémia tizenkét alapelve

Bemutatjuk a zöld kémia tizenkét alapelvét és néhány példát azok alkalmazására. A zöld kémia lényege és célja a kémiai termékek tervezését, termelését és felhasználását irányító alapelvek egységes alkalmazása, amelynek eredményeként csökken vagy megszűnik a környezetre veszélyes anyagok előállítása és felhasználása. Noha a tizenkét alapelv közül számos triviálisnak tűnik, mégis együttes alkalmazásuk egy adott probléma megoldására gyakran megkívánja, hogy az alapoktól induljon a termék és folyamat tervezése. Ennek következtében a zöld kémia az alaputatások fontosságára irányítja a figyelmet.

[Magy. Kém. Lapja 55, 173, 2000]

- [8] Trost, B. M.: Science, 254, 1471 (1991).
- [9] Weissermel, K. - Arpe, H.-J.: Ipari szerves kémia, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1993) 238-241. old.
- [10] Sato, K. - Aoki, M. - Noyori, R.: Science, 281, 1646 (1998).
- [11] Bashkin, J. - Rains, R. - Stern, M.: Green Chemistry, 1, G41 (1999).
- [12] Weissermel, K. - Arpe, H.-J.: Ipari szerves kémia, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (1993) 346-347. old.
- [13] Ertl, G. - Knözinger, H. - Weitkamp, J.: Handbook of Heterogeneous Catalysis, Wiley - VCH, Weinheim (1997) 2127 old.
- [14] Jessop, P. G. - Leitner, W.: Chemical Synthesis Using Supercritical Fluids, Wiley - VCH, Weinheim (1999).
- [15] Cornils, B. - Herrmann, W. A.: Aqueous-Phase Organometallic Catalysis, Wiley - VCH, Weinheim (1998).
- [16] Horváth, I. T.: Acc. Chem. Res. 31, 641 (1998).
- [17] Welton, T.: Chem. Rev. 99, 2071 (1999).
- [18] Bozell, J. J. - Landucci, R.: Alternative Feedstocks Program Technical and Economical Assessment. Thermal/Chemical and Bioprocessing Components, US Department of Energy Office of Industrial Technologies (1993), 23 old.
- [19] Varma, R. S. Green Chemistry, 1, 43 (1999).
- [20] Cintas, P. - Luche, J. L.: Green Chemistry, 1, 115 (1999).
- [21] Evans, J.: Chemistry in Britain, 38 (1999) és www.bpamoco.com/worldenergy
- [22] Danner, H. - Braun, R.: Chem. Soc. Rev., 28, 395 (1999).
- [23] Draths, K. M. - Frost, J. W.: J. Am. Chem. Soc. 116, 399 (1994).
- [24] Lalitha, A. - Pitchumani, K. - Srinivasan, C.: Green Chemistry, 1, 173 (1999).
- [25] Kohlpainter, C. W. - Beller, M.: J. Mol. Cat. A: Chemical, 116, 259 (1997).
- [26] Anastas, P. T. - Bartlett, L. B. - Kirchhoff, M. M. - Williamson, T. C.: Catalysis Today, 55, 11 (2000).
- [27] Cornils, B. - Herrmann, W. A.: Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Catalysts, Wiley - VCH, Weinheim (1996), 605-618 old.
- [28] Cornils, B. - Herrmann, W. A.: Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Catalysts, Wiley - VCH, Weinheim (1996), 251-256 old.
- [29] Knapen, J. W. J. - van der Made, A. W. - de Wilde, J. C. - van Leeuwen, P. W. N. M. - Wijkens, P. - Grove, D. M. - van Koten, G.: Nature, 372, 659 (1994).
- [30] Abramowicz, D. A.: Biocatalysis, van Nostrand Reinhold, New York (1990).
- [31] Draths, K. M. - Frost, J. W.: J. Am. Chem. Soc. 117, 2395 (1995).
- [32] Vidal, V. - Théolier, A. - Thivolle-Cazat, J. - Basset, J. M.: Science, 276, 99 (1997).
- [33] Jansen, J. C. - Stocker, M. - Karge, H. G. - Weitkamp, H. G.: Advanced Zeolite Science and Applications, Elsevier, Amsterdam (1994).

Irodalomgyűjtés lezárva: 2000. január

SUMMARY

K. Barta — M. Csékei — Sz. Csihony — H. Mehdi — I. T. Horváth — Z. Pusztai — G. Vlád: The Twelve Principles of Green Chemistry

The definition and selected applications of the twelve principles of green chemistry are described. Green chemistry is the utilization of a set of principles that reduces or eliminates the use or generation of hazardous substances in the design, manufacture, and applications of chemical products. Although many of the 12 principles seem trivial, their concerted application frequently requires to start the design of new products or processes from the fundamentals.