

# BIOLÓGIAI ALAPÚ KÉMIA

Sevella Béla

a kémiai tudomány kandidátusa,  
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék  
bsevella@mail.bme.hu

## Bevezetés

Ma a világon a vegyi anyagok több mint 90%-át a kőolajipar által szolgáltatott fosszilis alapanyagok átalakítása útján nyerjük. Ez az arány az USA-ban 98%. Előrejelzések szerint 2025-ben az USA olajszükségletének már mintegy 70%-át behozatalból kell majd fedezni. Ehhez járul még, hogy a fosszilis energia-, illetve nyersanyagkészletek belátható időn belül jelentősen csökkennek, sőt ki is merülhetnek. Mindezek alapján teljesen érthető, hogy az elmúlt tíz évben nagyon felgyorsultak az alternatív alapanyagforrások iránti kutatások, mind az USA-ban, mind a világ más részein.

Mielőtt a szén-, illetve kőolaj alapú vegyipar kialakult volna, egy sor kémiai tömegterméket és szerves vegyületet mezőgazdasági biomasszából, mikroorganizmusok közreműködésével megvalósított fermentációkkal állították elő. E technológiák a már évezredek óta használt élelmiszeripari fermentációkból (sör-, bor-, ecet-, sajtgyártás) fejlődtek ki, és a 19. században már tudományos megalapozást is nyertek.

Ma e technológiák újrafelfedezésének vagyunk tanúi: egyre több figyelem fordul a kémiai alapanyagok előállításakor a mikroorganizmusok tevékenységét kihasználó *bioalapú ipari eljárások* felé. Elterjedőben van az ún.

*bio-refinery* koncepció (NREL, 2005), melynek alapján megújuló alapanyagokból (gabona, fa, olajos magvak) kiindulva kémiai alapanyagok tucatjai, majd ezekből vegyipari termékek százai állíthatók elő.

## A biotechnológiák jellemzői

A 21. századot sokan a biotechnológia századának tekintik, és úgy vélik, hogy ma már a *biotársadalom* kialakulásának lehetünk tanúi. A biotársadalom mint fogalom azt jelenti, hogy az élet valamennyi területét átszövi a biotechnológia: a felhasznált nyersanyagok, alapanyagok és energia, valamint az alkalmazott technológiák jelentős része is valamiképpen kapcsolódik a biotechnológiákhoz. A biotechnológiákat manapság három fő csoportba sorolják: az elsőbe az ún. vörös biotechnológia tartozik, ami az emberi és állati egészséggel összefüggő biotechnológiai termékekre és szolgáltatásokra utal. A második a zöld biotechnológia, amely a mezőgazdasági és élelmiszergazdasági biotechnológiai felhasználásokat jelenti, és végül a fehér biotechnológia az ipar (beleértve az energiaipart is) biotechnológiája.

E területek közül ebben a tanulmányban csupán a *fehér biotechnológiát* érintjük, azon belül is csupán a kémiai ipari vonulattal foglalkozunk, a bioenergiáról nem lesz szó. Mielőtt azonban a tényleges témakörre rátérnénk,

tekintsük át röviden a biotechnológiák jellemzőit és nyersanyagait.

A bioiparok, így a jövő kémiai iparainak is alapvető nyersanyaga a biomassza, ez az évenként megújuló, a napfény kimeríthetetlen energiáját befogó és fotoszintézissel kémiai energiává alakító növényi anyag. A biomassza évente sokmillió tonnányi mennyiségben áll rendelkezésre akár elsődleges növényi termék, keményítő vagy növényi olaj, vagy másodlagos, lignocellulóz tartalmú mezőgazdasági termékek formájában.

A cukor-, illetve növényolaj alapú vegyi anyagok előállításának rendkívül kedvezőek a társadalmi hatásai. Ezek közül néhányat az alábbiakban lehet összefoglalni:

- a mezőgazdaság és erdőgazdaság számára ma még kiaknázatlan termelési lehetőségeket teremt,
- környezeti, illetve klimatikus hatása kedvező, hiszen nem termel plusz szén-dioxidot,
- csökkenti az olajtól való függőséget, ezáltal nagyobb politikai és gazdasági biztonságot nyújt,
- kedvező tulajdonságú, nagy hozzáadott értéket képviselő termékeket állít elő és
- feltehetően ez esetben a génmanipuláltságot is elnézőbben fogadja a közvélemény, mint az élelmiszercélú mezőgazdasági terményeknél.

Fontos hangsúlyozni, hogy a kémiai alapanyagokat előállító, a környezetvédelemmel fog-

lalkozó és a humán vagy egyéb gyógyszereket gyártó cégek (vagyis az összes, vörös, fehér és zöld terméket előállító vállalkozás) ugyanazt a biotechnológiát (rekombináns technikát, genomikát, proteomikát stb., ill. biomérnöki alapokat) alkalmazza; mára viszonylag egységes biotechnológiai tudományos háttér és mérnöki alkalmazási módszertan alakult ki.

A biotechnológiai eljárások alapvetően kétféleképpen lehetnek: (i) *de novo* fermentációk és (ii) bio-átalakítások (biotranszformációk) (1. ábra).

A biotechnológiai eljárások főbb jellemzői az alábbiakban foglalhatók össze:

Egyetlen fermentációs lépésben komplex, szintetikus csak több lépésben előállítható molekulák termelhetők.

Az előállítások nagymértékben specifikusak, pl. tiszta optikai izomerek állíthatók elő.

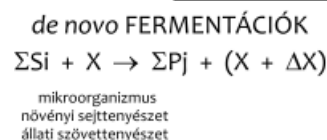
A reakciók enyhe, ún. fiziológiai körülmények között, rendszerint vizes oldatokban zajlanak le. Ugyanakkor egyes enzimekkel különleges reakciókörülmények (szerves oldószerek használata, nagyon magas hőmérséklet) is megvalósíthatók.

Nagy hozam, kisebb energiaigény jellemzi ezeket az eljárásokat.

## Biotechnológiai eredetű platformok

Általánosságban elmondható, hogy a biotechnológiai alapú vegyipar alapvetően a mikroorganizmusok ún. elsődleges anyagcseretermékeinek *de novo* szintézisére épül, és ebben

### BIOTECHNOLÓGIAI ELJÁRÁSOK



1. ábra • A biotechnológiai eljárások két típusa

a legegyszerűbb két anyagcsere folyamat, a glikolízis és a citrátkör játszanak főszerepet.

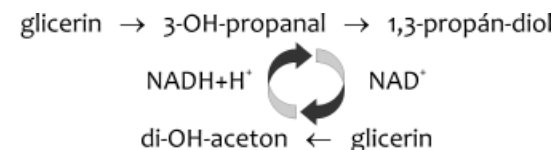
A legismertebb példát, az *etanolt* átugorva (mivel az manapság elsősorban mint energiahordozó kerül szóba) legyen másik, két szénatomot tartalmazó példánk az *ecetsav*, mint a glikolízis több ezer év óta ismert és előállított egyik lehetséges anyagcsere-terméke. Ez az egyszerű szerkezetű szerves sav egész sor további vegyület, illetve kémiai termék alapanyaga lehet (2. ábra)

A három szénatomot tartalmazó alapvegyületek közül a *tejsav* példáját nem lehet megkerülni, hiszen ez az egyik már jelenleg is hatalmas vegyipari jelentőségű anyagcsere-termék. A tejsav platformnak olyan jelentős elemei vannak, mint az akrilsav (polimer alapanyag), a tejsav-észterek (például az etil- és butil-laktát), amelyeket zöld oldószerekként tartanak számon. Legjelentősebbnek azonban a dimer laktid tűnik, amelyből politejsav (PLA) állítható elő. A módszer már egy 1932-es DuPont-szabadalomból ismert. Az igazi termelési technológiát azonban egy amerikai kukoricatermelő és feldolgozó vállalat, a Cargill fejlesztette ki, a Dow Chemical céggel közösen. A technológiára alapozott 140 000

t/év kapacitású PLA-üzemet a Nebraska állambeli Blairben építették meg, 1997-ben.

A PLA-nak rendkívül kedvező tulajdonságai vannak: többek között felhasználás után összeolvasható és újrahasznosítható vagy komposztálható, azaz biológiailag teljes mértékben lebontható. Lényegesen kedvezőbb feltételek mellett állítható elő, mint egy sor, manapság használatos polimer: például előállításának fosszilis energiaigénye 30–50%-kal kisebb, mint a polisztirolé, illetve a PET-é. Fermentációja során nem képződik szén-dioxid, azaz a fotoszintézissel a légkörből kivont CO<sub>2</sub> mindaddig nem kerül oda vissza, amíg a tejsav le nem bomlik. Mindezek miatt a PLA nagy lehetőségekkel kecsegtető polimer: hasznosítható termoplasztikus csomagolóanyagként, textilipari szálak anyagként, és mivel biokompatibilis, implantátumként, illetve célzott hatóanyag bejuttatására szolgáló hordozóanyagként is.

A három szénatomos *glicerín* kétféleképpen is képbe kerül, ha a fehér biotechnológia lehetőségeit vizsgáljuk. Egyrészt a glicerín maga fermentációs úton, cukorból állítható elő. E módszer azonban napjainkra, amikor a bioenergia egyik letéteményese a biodízel,



3. ábra • Az 1,3-propán-diol enzimes előállítás

lényegében jelentőségét veszítette. A biodízel előállításakor, a növényi trigliceridek átészterezésekor ugyanis nagy mennyiségű glicerín képződik. A problémát nem a glicerín előállítás, hanem inkább az jelenti, hogy ez a glicerín felesleg milyen hasznos termékké alakítható át.

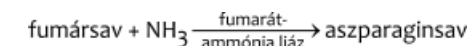
Ismeretes, hogy az 1,3-propándiol (1,3PD) tereftálsavval alkotott kopolimerje a politrimetilén-tereftalát igen ígéretes műanyag, amelyet a Shell Corterra®, míg a DuPont Sorona® márkanéven nagy mennyiségben gyárt. E cégek az 1,3PD-t részben szintetikus úton, részben pedig már biotechnológiai módszerekkel, glükózból kiinduló *de novo* fermentációval állítják elő. A BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszékén egy olyan eljárás kifejlesztésén dolgozunk, amely az 1,3PD-t enzimes úton, glicerínből állítja elő, miközben az alapanyagként használt glicerín egy időben két különböző terméké diszproporcionálódik: az 1,3PD mellett ekvimoláris mennyiségű dihidroxi-aceton is képződik (3. ábra).

A négy szénatomos alapanyagok közül a *borostyánkősavat* és az *aszparaginsavat* kell kiemelni. Előbbi anaerob baktériumokkal végzett fermentációkor a citrátkör egyes enzimeinek a megszokottól ellentétes irányban történő működése során keletkezik vegyes terméként, vagy több termékes fermentációban esetleg egyedüli terméként. A borostyánkősav előállítása kapcsán nagy szerepe jósolható a modern biotechnikáknak és a

bioinformatika „omikáinak”, azaz a proteomikának, metabolomikának, valamint a metabolit mérnökségnek; e fermentáción ugyanis mind a végtiter, mind a produktivitás szempontjából még sokat lehet javítani.

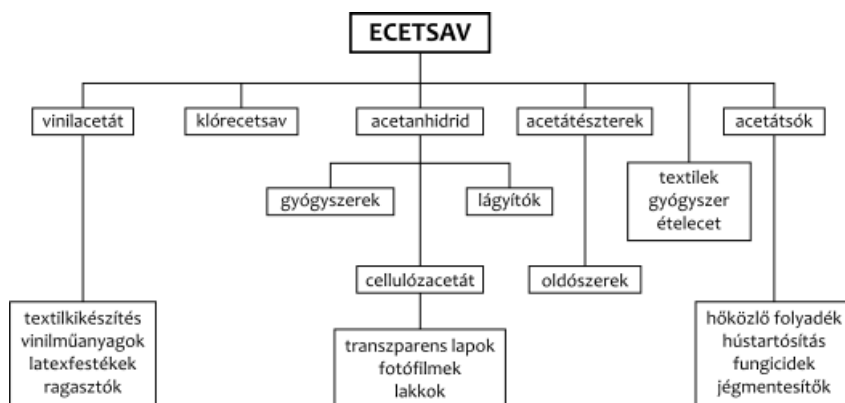
A borostyánkősav egy sor oldószerek, intermedierek, műanyagok lehet alapanyaga. Ezek közé tartozik a polibutilén-tereftalát, ill. a különböző poliszterek, így a biológiailag lebontható Bionolle és más poliamidok.

Az ugyancsak sokféle terméké továbbalakítható aszparaginsav közvetlen, *de novo* fermentációja még nem ismert. Előállítási módszerként egy enzimes eljárás, a fumársav biotechnológiai átalakítása jöhet számításba:



Ez esetben is nagy szerepe lehet az anyagcsere-mérnöki leleménynek, főképp a közvetlen fermentáció kidolgozásában.

Az öt szénatomos alapanyagok közül a *glutaminsav* az egyik, nagyipari körülmények között legrégebben előállított fermentációs ipari termék. Japánban már a hatvanas évek elején több ezer tonnát állítottak elő, ma több tízezer tonna az évenkénti világtermelés. Pontosabban nem a szabad savat, hanem elsősorban annak egy nátriumatomot tartalmazó sóját állítják elő, mivel az ötödik alapizért, az *umami*ért ez a vegyület a felelős. Jóllehet a nátriumsó természetesen átalakítható szabad savvá, az anyagcsere-mérnöki fejlesztések ez esetben olyan fermentációs eljárás kialakítására irányulnak, ahol fő terméként maga a



2. ábra • Az ecetsav platform

szabad sav képződik. A szabad sav azután egy sor vegyület, például a glutársav, a prolin, vagy az 1,5-pentán-diol kiindulási anyaga lehet.

Mind az öt szénatomos glutaminsav mind a szintén öt szénatomos *itakonsav* ugyancsak a központi anyagcsereút, a citromsav ciklus terméke. Bizonyos fonalas gombákban a citromsav → izocitromsav átalakulás köztiterméke, a cisz-akonitinsav átalakulhat a telítetlen kötést tartalmazó itakonsavvá. Az itakonsav mellett, hogy platform-alkotó, azaz egy sor vegyület kiindulási anyaga, maga is széleskörű felhasználással rendelkezik. Keresztkötő ágens vinil-vegyületekben, textilszálak gyártásánál, akril-polimereknél mint harmadik monomert használják. Az itakonsav-kopolimerekből átlátszó, plexi tulajdonságú és speciális lencsék alapanyagául használható műanyagok készíthetők, akrilsav és itakonsav kopolimerizációjával kelátképző gyanták hozhatók létre és így tovább.

A biotechnológiában tehát – akár a *de novo* eljárásokat, akár a bioátalakításokat tekintjük – nagy lehetőség rejlik amiatt, hogy egyes, hagyományosan petrokkémiai alapon gyártott alapanyagok felválthatók cukoralapú alapanyagokkal. Egy-egy ilyen alapvegyületből nagyszámú intermedier, illetve végtermék állítható elő.

A bioeljárások területén nagyon gyors fejlődés várható. Ennek következményeként

a kémiai ipar jelentősen át fog alakulni, és a mai vegyipari technológiák meghatározó részét biotechnológiák fogják felváltani. A fentiekben említett eljárások zöme már ma is adott, csupán gazdasági kérdés, hogy mikor kerülnek bevezetésre.

A gyors fejlődést az teszi lehetővé, hogy a biotechnológiában hihetetlen sebességgel keletkeznek új tudományos eredmények. Genomikai és proteomikai technológiák új enzimekhez, biokatalizátorokhoz vezetnek, amelyeket alapanyagok, intermedierek és termékek előállítására lehet felhasználni. Rekombináns technológiával és a genetikai mérnökség eredményeinek felhasználásával új mikrobákat állítanak elő, illetve extremofileket és más új exotikus mikrobákat vonnak be az ipari és környezetvédelmi eljárásokba. Ezáltal biomasszából kiindulva kémiai alapanyagok, polimerek, enzimek, üzemanyagok állíthatók elő (Frost, 2005).

A várható fejlődési ütemet jelzi, hogy egy kormányzati bizottsági jelentés szerint az USA-ban a biomassza mai, kb. 5%-os részeseését a vegyi anyagok előállításában 2010-re 12, 2020-ra 18, míg 2030-ra 25%-ra kívánatos növelni (Gavrilescu – Chisti, 2005)

Kulcsszavak: *biotársadalom, fehér biotechnológia, cukoralapú technológiák, platformalkotó vegyületek*

nology—A Sustainable Alternative for Chemical Industry. *Biotechnology Advances*. **23**, 471–499.  
NREL – National Renewable Energy Laboratory (2005): *What is a Biorefinery?* <http://www.nrel.gov/biomass>

## GAMMA-VALEROLAKTON, A FENNTARTHATÓ VEGYIPAR EGYIK LEHETSÉGES FOLYÉKONY ALAPANYAGA

Horváth István Tamás

az MTA doktora,  
Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézet  
istvan.t.horvath@att.net

Az emberiség legfontosabb célja, hogy a civilizáció folyamatos fejlődése mellett az emberek egyéni és kollektív tevékenysége folytatható legyen a végtelen jövőben a mostanival legalább azonos, de ha lehet még jobb életkörülmények között. A fejlődésnek hosszú távon is fenntarthatónak kell lennie, vagyis úgy kell kielégíteni egy adott generáció igényeit, hogy ennek lehetőségét ne vegyék el a következő generációktól. A *fenntartható fejlődés* koncepciójának egyik fontos eleme, hogy olyan sebességgel kell a természetes nyersanyagokat felhasználni, hogy azok mennyisége ne csökkenjen egy elfogadhatatlanul alacsony szint alá. A vegyipari szerves alapanyagok és intermedierek több mint 90%-át kőolajból állítjuk elő. Ugyanakkor, a belső égésű motorok számának rohamos növekedésével a közlekedés is egyre több kőolajat fogyaszt, a növekvő energiafelhasználás miatt pedig hatalmas mennyiségeket égetünk el erőművekben. Mivel e folyamatok eredményeként a rendelkezésre álló kőolaj belátható időn belül el fog fogyni, a fenntartható civilizáció egyik legfontosabb technológiai kihívása a kimerülőben lévő szén alapú nyersanyagok kiváltása az energiatermelésben és a vegyiparban. A molekuláris hidrogén (H<sub>2</sub>)

várhatóan már századunk közepén jelentős szerepet fog játszani a különböző fenntartható energia rendszerekben (Turner, 1999, Hoffert et al., 2000). Míg a következő huszonöt-ötven évben a hidrogént szénhidrogénekből állítják elő, a későbbiekben a fenntartható energiával működtetett vízbontás veszi majd át a kulcsszerepet. Ennek várhatóan az lesz a következménye, hogy jelentős mennyiségű és aránylag olcsó hidrogén áll a vegyipar rendelkezésére. Így logikusnak tűnik egy olyan új vegyipar felvázolása, amely a szerves alapanyagokat és intermediereket növényi eredetű, azaz újratermelhető nyersanyagok részleges vagy teljes hidrogénezésével állítja elő. A hidrogénezésre azért van szükség, mert a növényi eredetű nyersanyagok nagymértékben oxidáltak, és sok, általában oxigéntartalmú funkciós csoporttal rendelkeznek. Például a glükóz (szőlőcukor), amely az egyik leggyakoribb szerves vegyület a Földön, a hexán-1-ol vagy akár n-hexán alternatív nyersanyaga lehetne. Amíg a hexán-1-olból könnyedén lehetne hex-1-ént előállítani, addig a n-hexán a „megújuló szintetikus olaj” szerepét tölthetné be, amelyből minden – ma kőolajból gyártott – petrokkémiai és szerves vegyipari terméket elő lehetne állítani.