

HULLADÉKKEZELÉS – BIOLÓGIAI ELJÁRÁSOKKAL

Biológiaiainak (biokémiaiainak) nevezzük azokat az eljárásokat amelyek során a szükséges anyagminőség módosítást élőlényekkel (vagy biokémiai reagensekkel, enzimekkel) végeztetjük el.

A biológiai eljárások előnyei

- szemben a termikus és a legtöbb kémiai eljárással, a biológiai eljárások természetközeli, hiszen a kezelést élő organizmusok végzik, ezért kockázatuk is kisebb (bár egyes esetekben nem elhanyagolható)
- nagymértékben célraorientáltak és szelektívek, (ezeket a tulajdonságokat igyekeznek kihasználni például a gyógyszeripar az anyaghatékonyság javítása céljából)
- végrehajtásuk pedig nem igényel extrém körülményeket (magas hőmérséklet, nyomás, különleges pH, stb.). Ez alól kivétel például az alapanyagként akár hulladékot is használó tisztakultúrák gyógyszeripari fermentáció, ahol elengedhetetlen feltétel a teljes sterilitás.

A biológiai eljárások hátrányai

A biológiai eljárásoknak két olyan momentuma van, amelyek nem kellő odafigyelés esetén gondot okozhatnak, tehát – kis túlzással – hátránynak is nevezhetők.

- Az egyes mesterséges vegyületek hatékony elbontásához patogénekre lehet (van) szükség.
- A lebontási folyamatokban előfordulhatnak olyan reakció-utak, amelyek során toxikus (a kiindulási anyagnál toxikusabb) metabolit keletkezik.

Az első gond kellő odafigyeléssel, az eljárás megfelelő vezetésével jól kézbe tartható. Eddig érdemi problémák nem jelentkeztek. A második esetben viszont a folyamat megváltoztatására – új ágens, új körülmények – van szükség.

A biológiai eljárások természettudományos alapjai

A természetben a szervesanyag körfolyamat azzal zárul, hogy a reducens szervezetek (rovarok, férgek, mikroorganizmusok) anyagcseréjük során több lépésben átalakítják, ezzel zárul a kör és ezáltal válik lehetővé a ciklus folytatása. Ebben a komplex folyamatban a lebontás során nyert energia felhasználásával alakítják át és építik be szervezetükbe a szükséges anyagokat. Lényegében ez az a folyamat, amit a természet „hulladékemésztő”, az élővizek „öntisztuló” képességének is nevezünk. Ha ezt (ezeket) a folyamat(oka)t „megszelídítve”, intenzifikálva a környezetvédelem szolgálatába tudjuk állítani, rendkívül hatékony és – természetesen – környezetbarát eszközhöz jutunk.

A biológiai eljárások csoportosítása

Biológiai kezelési eljárás részben a szusztrátum (kezelendő, feldolgozandó anyag), részben a közreműködő élő szervezetek változatossága (biodiverzitás) következtében igen sokféle lehet, de elég jól csoportosíthatók, tipizálhatók. A csoportképzés három fő szempont alkalmazásával oldható meg:

- eredmény
 - vagy valamilyen termék előállítása a cél
 - vagy valamely anyagnak a lebontása a cél
- a résztvevő organizmusok
 - enzimek
 - mikroorganizmusok

- növények
- magasabb rendű állati szervezetek
- O₂ jelenléte
 - aerobok, ha működésükhöz oxigént igényelnek
 - anaerobok, ha csak oxigén kizárásával képesek működni és
 - fakultatív anaerobok, ha – mérsékelt mennyiségű – oxigén jelenlétében is képesek működni, de ilyenkor más típusú tevékenységet folytatnak.

Termék előállításnál (amely történhet primer és szekunder alapanyagokból is) a legfontosabb az élő szervezetek szelektív működése, vagyis az a tulajdonság, hogy egy megcélzott reakciót hajtanak végre, terméket állítanak elő.

A lebontásnál, amit főleg mikrobák végeznek, a cél valamely (többnyire veszélyesnek minősülő) molekula minél tökéletesebb átalakítása, „megsemmisítése” és ezzel a talaj és a víz (mint természeti elemek) védelme, illetve megtisztítása.

Megjegyzendő, hogy egyes bonyolultabb bomlási folyamatokhoz több mikroba törzs, vagy akár egész biocönózisok közreműködése szükséges.

A biológiai eljárások kivitelezése

A biológiai eljárások végrehajtását három szakaszra bonthatjuk:

- a kezelendő, hasznosítandó hulladék (szubsztrátum) és az élő szervezet (ágens) közötti kapcsolat létrehozása
- a szükséges körülmények kialakítása és fenntartása
- a folyamat befejezése
 - lebontásnál a határérték elérésének ellenőrzése
 - átalakításnál a termék kinyerése

A kapcsolat kialakítása két lépésből áll

- Ki kell választani az optimális szubsztrátum – élő – szervezet párokat a biológiai folyamat minden egyes lépéséhez.
- Gondoskodni kell arról, hogy a kiválasztott élőlény(ek) a szükséges mennyiségben kerüljenek kapcsolatba a hulladékkal.

Az alkalmazott élőlények optimális életkörülményeinek megteremtése – szükség esetén – a hulladék összetételének korrekciójával kezdődik. Előfordulhat ugyanis, hogy a hulladék olyan abiotikus anyago(ka)t tartalmaz, amely(ek) lehetlenné teszi(k) a folyamat lejátódását. Másrészt a hulladék minőségének módosítását hasznosítási célú anyagátalakításoknál a termék minősége is megkívánhatja.

A már létrehozott szubsztátum élőlény elegy esetében a körülmények optimalizálása egyértelműen az alkalmazott élőlény igényei szerint történik, tehát ha többféle organizmust alkalmazunk, akkor egyes paramétereket akár a folyamat lejátódása közben is változtatni kell:

- oxigén ellátás
- nedvesség
- hőmérséklet
- tápelemek (elsősorban N és P) és a szerves szén aránya
- fény

Gyakorlati példák

A biológiai eljárások elméleti elemzése után szükséges két – ipari méretekben is elterjedten alkalmazott – konkrét eljárást bemutatni. A két eljárás a komposztálás és a biogáztermelés.

Komposztálás

A komposztálás a mérsékelt égövben folyamatosan lezajló humuszképződésnek (... talaj) „megszelídített” formája. Lényege, hogy aerob (mikro) biológiai úton a természetes szervesanyagok (nemcsak primer biomassza!) nagy humusztartalmú talajjavító anyaggá, komposztá alakulnak.

Az eljárás – az elméleti bevezetésben leírtakat követve – az alábbiak szerint zajlik:

- a szubsztrátum előkészítési lépésben vizsgálni kell a komposztálásra kerülő hulladék esetleges mérgezőanyag tartalmát, különös tekintettel a (mérgező) nehézfém komponensek jelenlétére, koncentrációjára. Célszerű a nem komposztálódó komponensek (üveg, műanyag, stb.) egyszerű módszerekkel leválasztható részének eltávolítása. A következő lépés a visszamaradt részek közel homogén szemcseméretre (néhány mm) való aprítása és „struktúr”-anyagokkal (például aprított kukoricaszár) való adalékolása
- kezelést (komposztálást) végző ágens kiválasztása – mivel csak a természeti folyamat intenzifikálásáról van szó – egyszerű: végezzék a „munkát” ugyanazok, vagyis a hulladékban már megtalálható sokféle mikroorganizmus (különböző gombák, baktériumok), de a természetesnél sokkal kedvezőbb, közel optimális feltételek mellett. Így tehát oltásról, inokulumból (oltóanyagból) nem kell gondoskodni, a mikrobák szaporítását in situ kell megoldani
- a folyamat körülményeinek optimalizálásánál három paraméterről kell gondoskodni:
 - oxigén
 - víz
 - tápelemek

Komposztálni nemcsak nagyméretű, központosított helyen lehet, hanem otthon a kiskertben is. A magyarországinál eggyel magasabb fokozatú szelektív gyűjtéshez (maradék hulladék két részre választva: komposztálható és nem) gyártanak olyan – a levegőcserét lehetővé tévő – gyűjtő edényzetet, amelyben az előkomposztálás (mikrobák elszaporodása) le tud játszódni.

Biogáz termelés

A biogáz CH_4 és CO_2 1:1 arányú elegye, természetes, megújuló energiahordozó, lényegét tekintve közel azonos a lerakóknál említett „depóniagázzal”. Fűtőértéke ugyan – nyilvánvalóan – kisebb a földgázénál, azonban előnyei is vannak: halmazállapotából következő egyszerű felhasználhatósága (gázmotor → villamos energia + hő), relatív olcsósága, valamint – bár ez még nem sokak számára világos – az a tény, hogy eltüzelésével nem a légkör CO_2 tartalmát növeljük, hanem egy ciklust zárunk, vonzóvá kellene tegyék.

A biogáz – ellentétben a komposztálással – csak mikrobiológiai, mégpedig csak anaerob mikrobiológiai folyamatban keletkezik. A folyamat két lépcsőben, két teljesen eltérő mikroba populáció közreműködésével zajlik. Az első szakasz a „savképző” fázis, amelyben fakultatív anaerob mikrobák a hosszabb szénláncú anyagokból rövidebb szénláncú szerves savakat állítanak elő.

Ez a folyamat általában gond nélkül simán lejátsszódik. A gond (esetleges technológiai problémák) a második szakaszban, a „metanogén” fázisban van (lehet). Ebben a folyamatban

szigorúan anaerob, úgynevezett metanogén baktériumok vesznek részt. A metanogének egyrészt termofilek (tehát csak melegben képesek működni), másrészt mivel a redukív reakciókból viszonylag kevés energiát képesek előállítani, lassan szaporodnak, harmadrészt pedig számos szerves mérgező anyag (mérgező anionok és nehézfémek) képes blokkolni a működésüket.

Ahhoz tehát, hogy a biogáz előállítás sikeres legyen vagy hagyományos (szervesanyagokat is befogadó) települési szilárd hulladéklerakót kell üzemeltetni, vagy a célnak megfelelő technológiát kell működtetni. Ez utóbbi azért előnyös, mert kis méretben is üzemeltethető. A technológia megfelelősége döntően két tényezőtől múlik. Az egyik az adagolás, amellyel a mérgező hatásokat jelentősen mérsékelni lehet, a másik a megfelelő berendezés (teljesen légzáró, hőszigetelt).

Egyéb gyakorlati példák

Bio-hidrometallurgia

A rendelkezésre álló - egyre kisebb fémtartalmú és egyre nehezebben hozzáférhető - érckészletek vagy meddőhányók, fémtartalmú hulladékok feldolgozása hagyományos kémiai módszerekkel nem minden esetben gazdaságos. Ezért napjainkban előtérbe kerülnek új módszerek is, mint például a bio-hidrometallurgia, ami a fémek kioldását jelenti kőzetekből mikroorganizmusok segítségével.

A mikroorganizmusok hasznosítása számos előnnyel jár: energiaigényük csekély, hatékonyan működnek, emberi élő és holtmunkát váltanak ki, továbbá kevés környezetvédelmi problémát okoznak. Nagy mélységekben is alkalmazhatók és az üzemelés költsége is alacsony.

A bio-hidrometallurgiai folyamatokban legfontosabb mikroorganizmus a *Thiobacillus ferrooxidans*, amely elemi ként vagy redukált alakját és vas(II)-t hasznosít energiaforrásként. Legfontosabb előfordulási helyei: a szénbányák savanyúvizei és a szulfidérclelőhelyek. Emellett más mikroszervezetek, mikrobaközösségek is szerepet játszhatnak a hidrometallurgiai folyamatokban.

Nagy lehetőségeket rejt a génszűrés, amellyel fokozható a mikroorganizmusok fémkinyerő képessége, bővíthető a kinyerhető fémek köre, fokozható a sebesség, a szelektivitás, a mély fekvésű kőzeteknél szükséges hőtűrés.

A baktériumos *kilúgozás indirekt mechanizmusa* a következő:

- mikroorganizmusok tenyésztése, a kilúgozó oldat előállítása ill. az elhasznált, vas(II)-szulfát tartalmú kilúgozó oldat regenerálása;
- a fémtartalmú anyag kilúgozása, oldatba vitele,
- $2\text{MeS} + 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 = 2\text{MeSO}_4 + 4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$,
- ahol Me valamilyen fém;
- a fém kinyerése az oldatból (pl. elektrolízissel);
- a kilúgozó oldat regenerálása a mikroorganizmusok segítségével, azaz a vas(II)-szulfát vas(III)-szulfáttá oxidálása.

A folyamat elvben korlátlan ideig ismétlődő.

A kénvegyületek biológiai oxidációja során keletkező kénsav megfelelő környezetet biztosít a savkedvelő mikroorganizmus számára. Az oxidáció során keletkező vas(III) ion rendkívül hatékony oxidáns. Segítségével minden olyan fém oldatba vihető, amely szulfát alakban

oldódik és a vas(II) - vas(III) rendszernél negatívabb redoxipotenciálú. A Thiobacillus ferrooxidans aerob, autotróf szervezet, amely CO₂-t használ szénforrásként.

A *direkt kilúgozás* során a mikroorganizmus enzimeji segítségével közvetlenül támadja meg az oxidációra alkalmas ércásványt.

Természetes körülmények között a két mechanizmus együttes hatásával kell számolni. A gyakorlatban a kilúgozás folyamata történhet:

- *ex situ*, halomba rakva, vagy lejtőn, ahol az ércen vagy hulladékon átszivárgó kilúgozó folyadék a halom vagy a lejtő alján összegyűlik. Ezt vagy visszavezetik a halom tetejére, vagy végleges gyűjtőhelyre juttatják;
- *in situ* módszerrel, amikor az ércet eredeti települési helyén furatok segítségével bejuttatott kilúgozó szerrel kezelik (furatból furatba, furatból bányába).

A módszer alkalmazható pl. vörösiszap, meddő, szálló porok, piritpörkölő üzemek maradéka, erőművi pernye, hamu, salak, olvasztói salak, hamu, páclé, forgács, galvániszap stb. fémtartalmának eltávolítására, hasznosítására.

Enzimes fermentáció

A *fermentáció* (erjedés) a szénhidrát anyagcserének a mikroorganizmusokra jellemző formája. A szervezetük felépítéséhez és az életműködésükhöz szükséges energiát szolgáltatja.

Az enzimek katalitikus tulajdonságú fehérjék, amelyek különböző reakciókat gyorsítanak meg.

Hulladékkezelési szempontból az enzimes fermentáció a mezőgazdasági, élelmiszeripari és papíripari hulladékok kezelésében rejt sok lehetőséget. A hulladék cellulóz tartalma, vagy az egyszerűbb szénhidrátokká bontott cellulózanyagok, cukrok alakíthatók etanollá vagy más szerves vegyipari alapanyaggá.

A folyamat három szakasza különíthető el:

1. szakasz cellulóz hidrolízise cukorrá,
2. szakasz fermentáció etanollá és más szerves anyaggá,
3. szakasz etanol koncentrációja desztillációval.

A fermentorokból kikerülő biomassza nagy fehérjetartalma miatt ideális táplálékkiegészítő lehet.

Irodalom:

Árvay József (szerk.): Hulladékgazdálkodási kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1993

Takáts-Bódi-Sándor: Hulladékgazdálkodás és környéke. Jegyzet, BME VKKT

Dr. Szvitacsné Marton Katalin: Hulladékgazdálkodás, veszélyes hulladékok kezelése. Janus Pannonius Tudományegyetem, Pécs, 1998