

A BIODEGRADÁCIÓ MODELLEZÉSE A SZENNYVÍZTISZTÍTÁSBAN

BEZSENYI ANIKÓ

FŐVÁROSI CSATORNÁZÁSI MŰVEK ZRT. / ÓBUDAI EGYETEM, ANYAGTUDOMÁNYOK
ÉS TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA

NAGY-MEZEI CSENGE

FŐVÁROSI CSATORNÁZÁSI MŰVEK ZRT./ MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM,
KÖRNYEZETTUDOMÁNYI INTÉZET, AGRÁRKÖRNYEZETTANI TANSZÉK

MAKÓ MAGDOLNA

FŐVÁROSI CSATORNÁZÁSI MŰVEK ZRT.

Absztrakt

A természetes vizek az öntisztulási képességüknek megfelelően tolerálnak bizonyos mértékű szennyezést. A szennyvíztisztítás feladata az, hogy a szennyvíz szennyezőanyagait olyan mértékben távolítsa el, hogy a visszamaradó szennyeződést a természetes befogadó képes legyen eliminálni. Ez a szennyvízkezelési tevékenység korábban – körülbelül a 80'-as évekig – elsősorban a szennyvíz szervesanyag- és lebegőanyag tartalmára irányult, de a környezetvédelmi igények bővülésével a növényi tápanyagokra (nitrogén- és foszforformák) is kiterjedt. A szennyvíztisztító telepek iszapkezelési technológiájának részeként működő rothasztás (anaerob iszapstabilizálás) megfelelő szabad kapacitás esetén alkalmas a főként mezőgazdaságban és élelmiszeriparban képződő nagy szervesanyag-tartalmú, folyékony és darabos hulladékanyagok energetikai célú hasznosítására (biogáz termelés és hasznosítás). Tehát a szennyvíztisztítás hagyományos szerepe mára kibővült. Az anaerob rothasztókkal rendelkező szennyvíztisztító telepek a hulladékkezelés és -gazdálkodás jelentős regionális központjai lehetnek. A szerves hulladék ártalmatlanításnak ez a módja nemcsak környezetkímélő, hanem zöldenergia forrása is. A szennyvíztisztítás és az iszapkezelés stabil üzemeltetése azonban elsődleges cél, amelyet a gazdasági célok nem írhatnak felül, a fogadott szerves hulladékok minősége nem veszélyeztetheti a normál üzemi működést. A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. szakembereinek a szerves hulladékok hasznosításával kapcsolatos közel 20 éves tapasztalata alapján mára részletes és alapos vizsgálati protokoll alakult ki, amely a biztonságos hulladékfogadás alapjait teremtette meg. A főként biológiai bonthatósági vizsgálatokra építkező vizsgálati protokollt írjuk le részletesen ezen cikksorozatunkban, amelynek első része a vizsgálatok rendszerét tekinti át és a megértéshez szükséges háttérinformációkat foglalja össze.

AZ IPARI LÉTESÍTMÉNYEK TERÜLETÉN KELETKEZŐ SZENNYVÍZ ÉS A BESZÁLLÍTOTT HULLADÉK FOGADÁSA

A vízszennyező anyagok kibocsátására vonatkozó határértékeket a 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet^[1] tartalmazza, a keletkező ipari szennyvizek közcsatornába való bevezetésének további előírásait pedig üzemeltetési vagy környezethasználati engedélyben határozzák meg.

A közcsatornába vezetett szennyvíz minőségének vizsgálata (gyárvizsgálat) az FCSM Zrt.-nél a 220/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet^[2] előírásai szerint történik. Az ellenőrzést a Környezetvédelmi Osztály munkatársai végzik, melynek során mintát vesznek a kibocsátott szennyvízből, helyszíni jegyzőkönyvet készítenek, majd a szükséges vizsgálatok elvégzése érdekében a tartósított mintákat a Központi Laboratóriumba szállítják. Amennyiben küszöbérték feletti kibocsátás, káros anyagok környezetbe juttatása állapítható meg, a kibocsátót csatornabírság megfizetésére javasolják kötelezni a Területi Vízügyi Hatóságnál.

A biogáztermelés intenzifikálása érdekében az Észak-pesti és a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep külső forrásból érkező, nagy szervesanyag-tartalmú növényi- és állati eredetű szerves hulladékokat (biogáz alapanyagokat) fogad. A beszállított hulladékok kezeléséhez tartozó előírásokat a telepek Hulladékgazdálkodási engedélyei írják elő. Az engedélyek tartalmazzák a telepeken fogadható hulladékok fajtáját azonosítójuk szerint, valamint a fogadható mennyiséget, melyet szerződött partnerek szállítanak be a telephelyekre együttműködési megállapodásban rögzítettek szerint.

A szennyvízkezelés során leválasztott magas szervesanyag-tartalmú iszap, illetve a szerves hulladékok együttes anaerob fermentációja során képződő biogáz felhasználásával elektromos- és hőenergia állítható elő, ami jelentős mértékben csökkenti a szennyvíztisztítási folyamatok energiaköltségeit. Az elsődleges cél mindig a szennyvíztisztítás és az iszapkezelés stabil üzemeltetése, amelyet a gazdasági célok nem írhatnak felül. A tisztítóműveken fogadott magas szervesanyag tartalmú folyékony és darabos hulladékok minősége nem veszélyeztetheti a normál üzemi működést, ezért a befogadást megelőzően alapos biológiai és kémiai felmérést végzünk. Közel 20 éves tapasztalatok alapján mára részletes és alapos vizsgálati protokoll alakult ki, mely megteremtette a biztonságos hulladékfogadás alapjait. A főként biológiai bonthatósági vizsgálatokra építkező vizsgálati protokoll hosszadalmas és munkaigényes, azonban a szennyvíztisztítás és iszapkezelés stabil üzemeltetésének érdekében elengedhetetlennek bizonyult.

Azon folyékony hulladékok hasznosítása, melyek döntően biológiailag könnyen bontható szerves vegyületeket tartalmaznak, nemcsak anaerob fermentációval történhet. Ezen anyagok szerves szénforrásként hasznosíthatók a szennyvíztisztítási technológia elődenitrifikációs folyamatában, vagy a biológiai többletfoszfor eltávolítás során, ahol fokozzák a biológiai folyamatok sebességét, hatékonyságát. Darabos hulladékokat csak a rothasztóba (anaerob) tudunk betáplálni, így aerob vizsgálatokat nem végzünk ezekből.

A vizsgálatok eredményei alapján az alábbi kérdésekre keressük a választ:

- Aerob vagy anaerob módon bontható megfelelően a szerves hulladék?
- Toxikus-e a vizsgált hulladék az aerob/anaerob folyamatokra?
- Hígítással változik-e a toxicitás?
- Aerob kezelésnél/hasznosításnál a szervesanyag hány százaléka bomlik le?
- Milyen hígulásnál érhetjük el a lebontási maximumot?
- Tartalmaz-e gyorsan bontható szervesanyag frakciót a folyékony hulladék?
- Megfelelő-e a tápanyagarány (C:N:P)?
- Anaerob hasznosításnál mekkora gázhozam várható, milyen gázfejlődési dinamikával?
- Anaerob hasznosításnál mekkora a képződő biogáz metántartalma?

Ezeket a vizsgálatokat csak akkor tudjuk kiértékelni és az eredményeket értelmezni, ha tisztában vagyunk a háttérben zajló biokémiai, mikrobiológiai folyamatokkal. Ha megértjük, hogy a különböző szervesanyag frakciók hogyan és mikor hasznosulnak, könnyebben tudunk megfelelő döntéseket hozni a hulladékfogadással kapcsolatban.

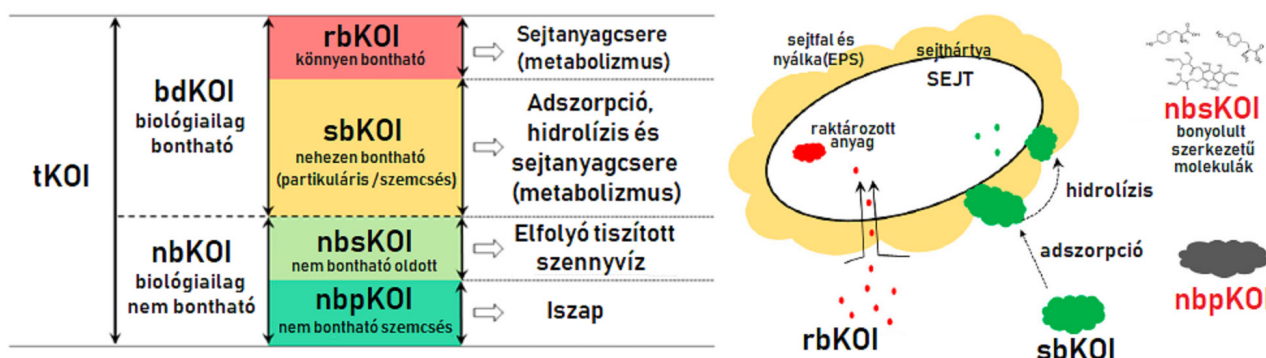
MILYEN FORMÁBAN VAN JELEN A SZERVESANYAG A SZENNYVÍZBEN ÉS MI ENNEK A MIKROBIOLÓGIAI JELENTŐSÉGE?

A szennyvízben megjelenő szervesanyagokat sokáig minden megkülönböztetés nélkül, egységesen kezelték. Mennyiségüket olyan összeítő paraméter alapján becsülték, mint a Kémiai Oxigénigény (KOI) és a Biokémiai Oxigénigény (BOI). Azonban a tápanyagok (nitrogén, foszfor) és a rezisztens (a biológiai lebontásnak ellenálló) szerves anyagok eltávolítását szolgáló

kezelési eljárások alkalmazása megköveteli a szennyvíz szervesanyagának frakciók szerinti osztályozását.

A szennyvíz összes, KOI-ban kifejezett szervesanyagtartalma négy frakcióra osztható: biológiailag könnyen/gyorsan bontható KOI (rbKOI), biológiailag nehezen/lassan bontható KOI (sbKOI), biológiailag nem bontható, oldható KOI (nbdsKOI) és a biológiailag nem bontható, szemcsés KOI (nbdpKOI).

- **Könnyen bontható KOI frakció = rbKOI (Readily biodegradable, rbCOD):** A heterotróf mikroorganizmusok számára közvetlenül elérhető kis molekulák (illékony zsírsavak, alkoholok, aminosavak, egyszerű cukrok) csoportja.
- **Nehezen bontható KOI frakció = sbKOI (Slowly biodegradable, sbCOD):** Nagyobb molekulákból álló csoport, amelyek hidrolízist (extracelluláris lebontást, lsd. később) igényelnek, mielőtt a heterotróf (szervesanyag-fogyasztó) mikroorganizmusok elfogyasztnák (pl. fehérjék, zsírok/lipidek, összetett szénhidrátok).
- **Biológiailag nem bontható, oldott frakció = nbsKOI (Soluble non-biodegradable, nbsCOD):** Az oldható frakció ezen részét nem befolyásolja a biomasszával való érintkezés, a kezelés során nem változik, és a szennyvízzel együtt távozik. Főként ipari forrásból származnak. Például aromás vegyületek, lignin és származékai (papíripar).
- **Biológiailag nem bontható, szemcsés frakció = nbpKOI (Particulate non-biodegradable, nbpCOD):** Biológiailag nem lebontható, de könnyen eltávolítható ülepítéssel. A szemcsés frakció a primer és/vagy a szekunder iszap jelentős részét képezheti. Jelentősen befolyásolja a szennyvíztisztítótelep iszaptermelését és az iszap anaerob kezelését (fermentálhatóság).^[3] (1. ábra)

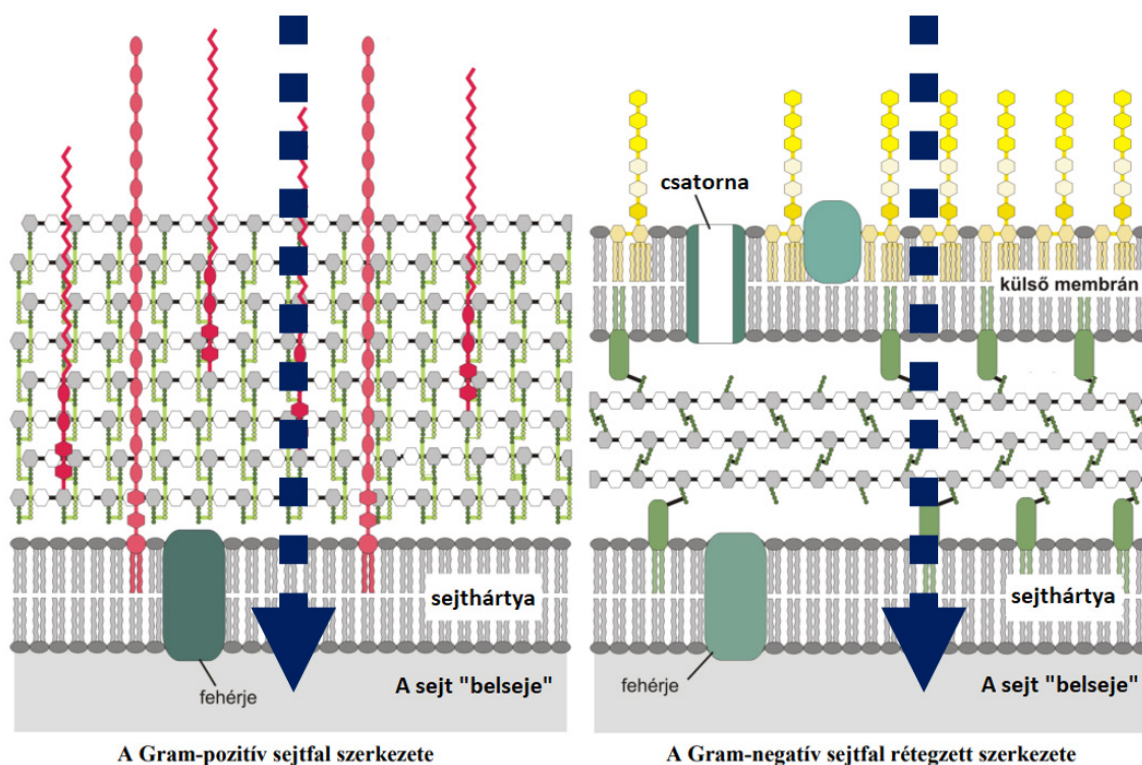


1.ábra A Kémiai Oxigénigény (KOI) frakciók és sorsuk egy biológiai szennyvíztisztító telepen^[3]

Miért bontható nehezen a szemcsés szerves anyag? Erre a választ a baktériumok felépítésében kell keresni.

A baktériumokat több réteg választja el a külvilágtól. Közvetlenül a baktériumokat a sejthártya (sejtmembrán) határolja. Ezzel minden élő sejt rendelkezik. Tulajdonképpen szelektív gátat jelent a sejt és környezete között. Kívülről ezt

veszi körbe a sejtfal, amely nem létfontosságú sejtalkotó. A legtöbb baktériumnak rendelkezik vele és a sejt szerkezeti stabilitását biztosítja. Sok anyag számára relatíve jól átjárható. A sejtfalon kívül helyezkedhet el a glikokalix (tok, nyák, mikrokapszula), amely szintén létfontosságú. Funkciója a sejt védelme, valamint segíti tápanyagok felvételét és a mikroorganizmusok különböző felszínekhez való kötődését.^[4]

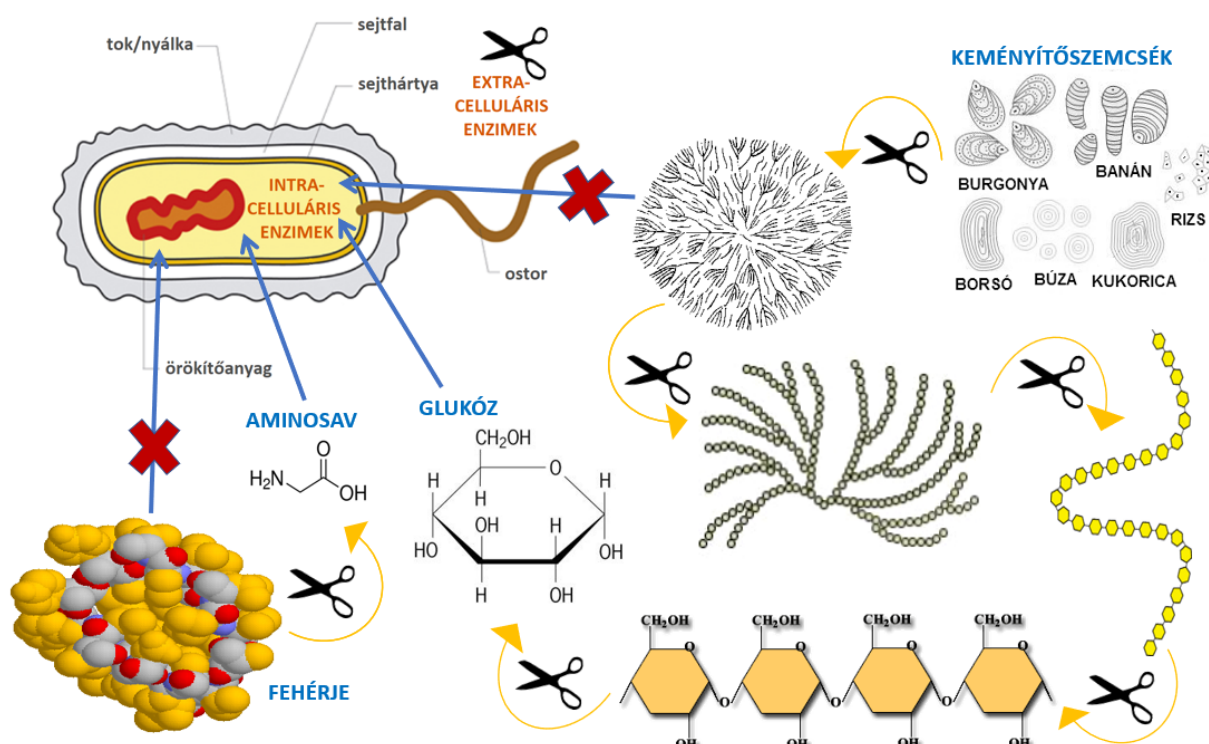


2.ábra A baktériumok sejtfala és sejthártyája, amelyek akadályozzák a nagy molekulák bejutását a sejtbe. (Gram-pozitív és Gram-negatív a baktériumok két nagy csoportja, amelyet a festődési tulajdonságaik alapján különítenek el.)

A mikroorganizmusok nem képesek tetszőlegesen nagy molekulák, vegyületek felvételére. A sejtfal és a sejthártya fizikai akadályt jelent, amelyeken a tápanyagoknak át kell hatolniuk ahhoz, hogy a sejtbe bejussanak. A sejtfal „szűrőhatása” elsősorban méretbeli korlátozást eredményez, de kémiai szelektivitás is valószínűsíthető. Az oldott anyagok útját ténylegesen a sejthártya korlátozza, melyek csak akkor képesek áthaladni rajta, ha valamilyen hajtóerő fejt ki a hatását (koncentrációkülönbség, nyomáskülönbség). A legtöbb molekula olyan specifikus szállítót igényel, amely a sejthártyában helyezkedik el.^{[4][5]} A 2. ábra alapján jól felmérhető a sejthártya és a sejtfal szűrőhatása.

Hogyan tudja áthidalni a baktérium azt a problémát, hogy nagyobb molekulákat nem tud közvetlenül elfogyasztani, mert azok nem képesek a sejtbe bejutni?

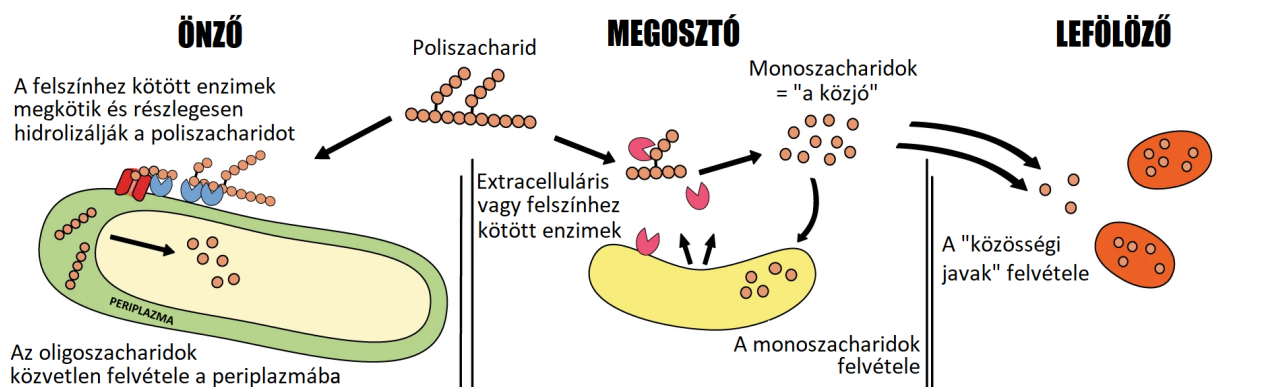
A baktériumok olyan enzimeket termelnek, amelyek kijutnak a sejtől és a külvilágban (a baktérium környezetében) bontják le az óriásmolekulákat olyan kis méretű molekulákra, amelyek már képesek a sejtbe bejutni, a sejtben belüli enzimek pedig befejezik a lebontást. Az előbbieket **extracelluláris (sejten kívüli)**, az utóbbiakat **intracelluláris (sejten belüli)** enzimeknek nevezzük. Maga az enzim kifejezés egy biokatalizátor molekulát jelöl, amely valamilyen kémiai reakciót gyorsít, segít elő. Jelen esetben az enzimek a lebontási folyamatokat katalizálják. Nagyon erős egyszerűsítéssel élve feldarabolják, hasítják a molekulákat és ezzel kisebb építőelemekre bontják. Az enzimek döntő többségben fehérjék. A 3. ábrán látható a keményítőszemcsék lebontása legkisebb alkotóelemmé, amely a glükóz molekula. Csupán a glükóz képes bejutni a baktériumba, ennél nagyobb részlete a keményítőmolekulának nem. A fehérjék esetében is hasonló a helyzet, mivel csak a fehérjéket felépítő aminosavak juthat át a sejthártyán.



3. ábra A baktériumok enzimtípusai, az óriásmolekulák lebontása és bejutása a sejtbe

Az intracelluláris és az extracelluláris enzimek is a sejtben termelődnek. Az intracelluláris enzimek a sejtben belül fejtik ki hatásukat, az extracelluláris enzimek viszont kijutnak a sejtől. A baktérium környezetében található óriásmolekulák szemcsés, darabos formájúak. Ezekből az extracelluláris enzimek segítségével, a lebontási folyamatok során vízben oldható, egyszerű szerkezetű molekulák képződnek, amelyek már képesek bejutni a sejtbe. Az extracelluláris enzimek termelése és az óriásmolekulák egységekre bontása több órát vehet igénybe.^[6] A folyamat időtartamát növeli, hogy az enzimek mindig csak a szemcsé felületéhez férnek hozzá. A fehérjéket a proteázok, a zsírokat a lipázok, a komplex szerkezetű szénhidrátokat az amilázok (keményítő) és a celluláz

Közösségi szinten háromféle stratégia figyelhető meg a baktériumok között. Az **önzők** termelnek extracelluláris enzime(ke)t, de a sejtek felületére kapcsolódó enzimeket használnak, és a lebontás során képződő molekulákat közvetlenül felveszik és hasznosítják. A **megosztók** a sejtek felületéhez kapcsolódó vagy „szabad” extracelluláris enzimeket használnak. A lebontás (hidrolízis) termékei a környezetbe kerülnek, vagyis a „közjavak” előállítása jelentős. A **lefölöző** baktériumok nem képesek, vagy egyszerűen nem termelnek extracelluláris enzimeket. Felveszik a más szervezetek által előállított közjavakat. [Hiba! A hivatkozási forrás nem található.] (4. ábra)



4. ábra Hogyan bántak a baktériumok az extracelluláris enzimekkel: önző, megosztó és lefölöző baktériumok. [Hiba! A hivatkozási forrás nem található.]

enzimek (cellulóz) bontják. A nagy méretű molekulák lebontását **hidrolízisnek** nevezzük.

Minden baktérium termel intracelluláris enzimeket, de nem mindegyik termel extracelluláris enzimeket, illetve ez utóbbiból nem minden fajtát (proteázok, lipázok stb.) a szennyvíz/iszap változatos szemcsés szerves szennyezőinek lebontásához. Tehát fajgazdag (diverz) baktériumközösség szükséges a szervesanyagok lebontásához, intracelluláris és extracelluláris enzimek sokaságával.^[6]

Ezután már könnyebb az 1. ábrát értelmezni. Az rbKOI gyorsan fogyasztható szervesanyag-forrást jelent a mikroorganizmusok számára, amelyet felhasználnak az anyagcseréjük során és végső soron a baktériumtömeget növeli, azaz beépül az eleveniszapba. Gyorsan fogyasztható, hiszen vízoldható formában jelen lévő kis méretű molekulákat jelöl (pl. glükóz, egyszerű szerves savak és alkoholok). Az sbKOI szemcsés, így végső soron szintén az eleveniszap tömegét növeli, de nem rögtön a sejtzaporulaton keresztül, hanem rátapad

(adszorpció) a baktériumok felületére. A kitapadó szemcsét a baktériumok az extracelluláris enzimekkel felbontják alkotóelemeire. Végül soron, a legkisebb építőelemeiket már képesek elfogyasztani a baktériumok, ami a szaporodásukat szolgálja és ezzel az iszap tömegét növeli. A nem bontható formák közül az oldott frakció (nbsKOl) a tisztított szennyvízzel távozik a szennyvíztisztító telepről. A szemcsés frakció (nbpKOl) az iszaptömeget gyarapítja, de nem bomlik le. A befolyó szennyvízben jelentős mennyiségben jelen lévő nbsKOl (> a KOl 25%-a) azt eredményezheti, hogy a KOl a határérték fölé kerül az elfolyó tisztított szennyvízben. A nagy mennyiségű nbpKOl az iszapp mennyiség drasztikus növekedését okozhatja.

A SZERVESANYAGOK HASZNOSULÁSA A SZENNYVÍZ- ÉS ISZAPKEZELÉSBEN

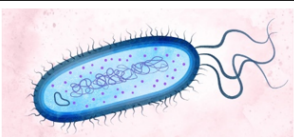
A biodegradáció anyagok, elsősorban szerves vegyületek lebontása élő szervezetek, illetve az általuk termelt enzimek segítségével. A szerves anyagok lebontása alapvetően lejátszódhat anaerob (oxigén nélkül) ill. aerob (oxigént felhasználó) módon.

Szervesanyag-fogyasztó (heterotrófok/organotrófok) szervezetek szerves anyagot fogyasztanak, de nem feltétlenül lélegeznek oxigént. Ha oxigént lélegeznek, akkor aerobok. Ha nem oxigént lélegeznek, akkor esetleg nitrátot (anaerob légzők, lsd. denitrifikálók). Ha nem lélegeznek, akkor fermentálók.

Persze az is lehetséges, hogy nem fogyaszt szervesanyagot a baktérium (pl. nitrifikálók), hanem más jelenti számára az energiaforrást (pl. ammónia). Ettől függetlenül lehet aerob vagy anaerob is. (5. ábra)

Bár ebben a cikkben elsősorban a szervesanyag eltávolításával foglalkozunk, a szennyvíztisztítás szempontjából a nitrogén- és a foszforeltávolítás ugyanolyan fontos.

A szennyvízkezelés során a KOl biológiailag bontható (bKOl) frakciójának átalakulása zajlik, a nem bontható frakció (nbKOl) nagyjából változatlan marad. Valójában a nbKOl vegyületei is módosulhatnak biotranszformáción keresztül, amely egy szervezet által végzett kémiai módosítást jelent. Ebben az esetben is a nbKOl frakcióban marad a molekula, csak más formában.

		„MIT LÉLEGZIK” (= ELEKTRON AKCEPTOR)		
		SZERVETLEN		SZERVES
		AEROB LÉGZŐK (O ₂)	ANAEROB LÉGZŐK (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , S ₀ , Fe ³⁺ , CO ₂)	
„MIT ESZIK” (=ELEKTRON DONOR)	SZERVETLEN (LITOTRÓF) NH ₃ /NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , S ²⁻ , S ₀ , Fe ²⁺ , H ₂	<u>NITRIFIKÁLÓK</u> NH ₄ ⁺ + 1,5 O ₂ → NO ₂ ⁻ + H ₂ O + 2 H ⁺ + Energia NO ₂ ⁻ + 0,5 O ₂ → NO ₃ ⁻ + Energia	<u>METÁNTERMELŐK (= hidrogénfogyasztó CO₂ légzők)</u> 4 H ₂ + CO ₂ → CH ₄ + 2 H ₂ O	
	SZERVES (ORGANOTRÓF) C-C kötés (általában a szervesanyagok) vagy C1-vegyületek (1 szénatom = CO, metanol, metán, hangyasav, formaldehid, metil-amin stb.)	<u>DENITRIFIKÁLÓK, ha van O₂</u> általában egyszerű szerves savakat, alkoholokat fogyasztanak és O ₂ -t lélegeznek, ha levegőztetjük <u>METILOTRÓFOK (C1 vegyület hasznosítók)</u> pl. metanol → formaldehid → hangyasav → CO ₂ → a sejt saját szervesanyaga (biomassza) és oxigént lélegeznek, ha levegőztetjük	<u>DENITRIFIKÁLÓK, ha nincs O₂ (nincs levegőztetés)</u> egyszerű szerves savak/alkoholok de METILOTRÓFOK (C1 vegyület hasznosítók) is lehetnek és nitrátot lélegeznek: NO ₃ ⁻ → NO ₂ ⁻ → NO + N ₂ O → N ₂ <u>METÁNTERMELŐK (= ecetsavfogyasztó CO₂ légzők)</u> CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ → CH ₄ + CO ₂	FERMENTÁLÓK

5.ábra A baktériumok anyagcseréjének változatossága ⁽⁴⁾ alapján

A KOI biológiailag bontható (bKOI) frakcióját a szervesanyag-fogyasztó (~heterotróf) mikroorganizmusok képesek lebontani. A lebontási folyamatok során az sbKOI átalakul rbKOI formává, így a baktériumok számára gyorsan hasznosíthatóvá válik.

A szerves anyag átalakulása különböző lebontási folyamatokon keresztül zajlik a levegőztetett és nem levegőztetett terekben. Az **oxikus terekben**, ahol molekuláris oxigén (O_2) van jelen, a baktériumok oxigénnel bontják le, azaz oxidálják a szerves tápanyagokat. Tulajdonképpen elégetik, mint az üzemanyagot. Ugyanaz a folyamat zajlik, mint az égés során, csak több időt vesz igénybe (lassú égés). Azokat a baktériumokat, amelyek oxigént lélegeznek aeroboknak nevezzük. Ezekben a terekben elsősorban az rbKOI-t fogyasztják a mikroorganizmusok.

Az **anoxikus tereket** nem levegőztetik a technológiában, de itt is oxidációs folyamatok zajlanak. A baktériumok nem oxigénnel oxidálnak, hanem főként nitráttal (NO_3^-) vagy szulfáttal (SO_4^{2-}). Ez az 5. ábrán látható ún. anaerob légzők világa. Ezek a baktériumok lélegeznek, de nem oxigént, hanem valamilyen más oxidált vegyület (NO_3^- , SO_4^{2-}). Fontos tudnunk azt is, hogy energetikailag a mikroorganizmusok számára az oxigén légzése a legkedvezőbb. Az elégetett/eloxidált szervesanyagból oxigénnel szabadul fel a legtöbb energia. A nitrátlégzés kevésbé kedvező, a szulfáté még kedvezőtlenebb. A szennyvízben jelenlévő baktériumok 80% azonban fakultatív anaerob, azaz oxigén jelenlétében oxigént lélegzik, hiányában áttér például nitrátlégzésre. A fakultatív jelző a váltás

lehetőségét mutatja. A denitrifikáló baktériumok esetében ez kiemelten fontos, mivel a nitráteltávolítás a légzésen keresztül zajlik. Ha oxigén van jelen a közegben, akkor a baktériumok oxigént lélegeznek és nem nitrátot. Az rbKOI a táplálék a denitrifikálók számára, amelyet oxigénnel vagy nitráttal oxidálnak („égetnek”) el.

Az **anarob terekben** nincs jelen olyan molekula, amelyet ellélegezhetnek a baktériumok. Ez a fermentációs folyamatok (erjedés) tere (5. ábra). Ebben a környezetben a szerves anyagok biodegradációja során a vegyületek egy része oxidálódik, más része redukálódik. Sokféle szerves sav (ecetsav, propionsav, vajsav, hangyasav) és alkohol termelődhet a vegyes savas erjedések (acidogenezis) során. Ezek gyorsan bontható vegyületek, vagyis az rbKOI mennyiségét gyarapítják. Ezek alapján egy nagyon fontos következtetést vonhatunk le: ahhoz, hogy ne csökkenjen az rbKOI mennyisége, hanem növekedjen, anaerob környezetre van szükség, ahol fermentációs folyamatok zajlanak. A fermentáló baktériumok extracelluláris enzimek végzik el a közegben az ún. hidrolízist is, az sb KOI átalakítását rbKOI-vá. Ezek a baktériumok jelen vannak az anoxikus terekben is, de nem hidrolizálnak, hanem a jelen lévő rbKOI-t hasznosítják. Csak anaerob körülmények között vetik be extracelluláris enzimkészletüket. ^[4]

^[6] A fermentációs termékek minősége és aránya a lebontott tápanyagtípustól is függ. Szénhidrátok (pl. keményítő) biodegradációja esetén főként propionsav és vajsav képződik, zsíroknál leginkább ecetsav és propionsav. ^[8] (1. táblázat)

Tápanyagtípus	Fermentációs Termékek
Szénhidrátok	Főként propionsav, vajsav, tejsav, etanol
Fehérjék	Főként ammónia, szén-dioxid, hidrogén, kén-hidrogén, hangyasav, ecetsav, propionsav, vajsavak, valeriansav, tejsav, etanol
Zsírok és olajok	Főként ecetsav, propionsav, hidrogén

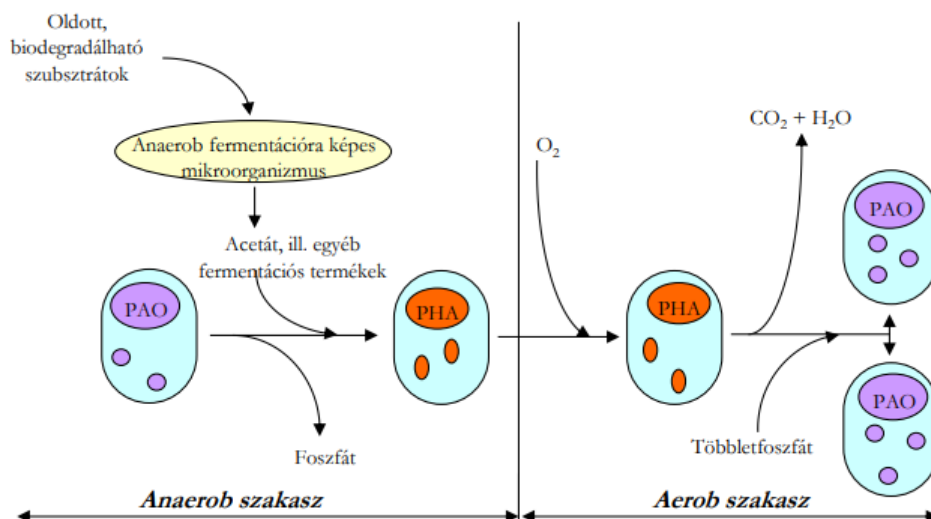
1.táblázat A tápanyagtípusok és a lebontásuk során képződő legfontosabb fermentációs termékek [8]

A szennyvízben rendelkezésre álló rbKOl tartalommal jól kell gazdálkodnia az üzemeltetőnek, mert ez a tápláléka a denitrifikáló baktériumoknak és a foszforeltávolítóknak (PAO = Polyphosphate-Accumulating Organism) egyaránt. Az oxikus terekben gyorsan hasznosul (elég) az rbKOl és végső soron az iszapszaporulatot növeli.

Az eleveniszap valamennyi mikroorganizmusa tartalmaz foszfort különböző formákban. A foszfortartalom a sejtek szárazanyagtartalmára vonatkoztatva átlagosan 1 - 3 % a baktériumokban. Jó tápanyag ellátottság és optimális környezeti feltételek esetén jelentősebb mennyiségű foszfort is képesek felvenni. Számos mikroorganizmus azonban ennél jóval több foszfor felvételére is ráveető, a sejt szárazanyagtartalmára vonatkoztatva akár 12 % foszfor felhalmozására is. A többletfoszfort sejtjeikben polifoszfát (poli-P, szervesen) formájában raktározzák, így polifoszfát akkumuláló szervezeteknek (PAO = Polyphosphate-Accumulating Organism) nevezték el ezt a rendkívül heterogén csoportot.^{[4][9]} Ugyanolyan fontosak a foszforeltávolításban, mint a nitrifikáló és denitrifikáló szervezetek a nitrogéneltávolításban. A PAOk – a denitrifikálókhoz hasonlóan – egyszerű szerves anyagot (rbKOl) fogyasztanak.

Anaerob közegben elengedik a raktározott foszfort (ortofoszfátként) és rbKOl-t (főként ecetsav, propionsav) vesznek fel, amelyből zsírjellegű (PHA = polihidroxialkanoát) raktározott anyagot építenek. Oxikus/aerob környezetben a raktározott készleteket élék fel és foszfort vesznek fel a környezetükből. Jellemzően nagyobb mennyiséget, mint amit elengedtek az anaerob térben. (6. ábra)

Az illékony zsírsavak mellett nagy százalékban a szennyvíz egyéb komponenseit (pl. cukrokat, alkoholokat) is hasznosítják a PAOk anaerob környezetben.^[11] A denitrifikálók is egyszerű szerves vegyületeket (savakat, alkoholokat) fogyasztanak és talán kevésbé válogatósak, mint a PAOk. A hasznosított szervesanyag azonban befolyásolja a denitrifikáció hatékonyságát és az iszapszaporulatot is.^[12] A denitrifikálók versenyképesebbek a PAOknál, mivel energetikailag kedvezőbb módon hasznosítják az rbKOl-t. Ezért az rbKOl általában nem, vagy kevésbé hozzáférhető a szennyvízben a PAO-k számára és szűkös szénforrás kínálat esetén a biológiai többlet foszforeltávolítás elégtelen. A foszforeltávolítás persze vegyszer adagolásával (pl. vas-klorid, vas-szulfát) is megoldható, a nitrogéneltávolításhoz azonban szükség van a megfelelő mennyiségű rbKOl-ra.



6.ábra A polifoszfát akkumuláló szervezeteknek (PAO = Polyphosphate-Accumulating Organism) anyagcsereciklusai^[10]

Az rbKOl forrása lehet^[13]:

- a nyers szennyvíz rb KOl tartalma
- szemcsés (és kolloid) komponensek (sbKOl) biológiai hidrolízise során képződő rbKOl (anaerob terek)
- endogén sejt pusztulás (az iszap önmészése) során képződő rbKOl
- külső forrásból származó rbKOl (metanol, acetát, etanol, cukor, glicerol, kukorica szirup, melasz, különböző sörfőzési, desztillációs és élelmiszeripari hulladékok)^{[14][15]}

A nagy mennyiségű rbKOl-nak sem lehet felhőtlenül örülni, hiszen az egyrészt a nitrifikációt gátolhatja, másrészt kis oxigénkoncentrációnál a baktériumok gyorsan elhasználják az oxigént a gyors szervesanyagforrás elégetésére. Ezzel nem kívánt anoxikus zóna alakulhat ki a levegőztető medencékben, amely szepticitást (kén-hidrogén fejlődés) eredményezhet.

A **rothasztókban** alapvetően ugyanazok a folyamatok zajlanak, mint a szennyvíztisztítás anaerob tereiben. A **hidrolízis** során az anaerob mikroorganizmusok extracelluláris enzimeket termelnek a komplex szerkezetű szervesanyagok lebontásához, majd az egyszerű, kis méretű bomlástermékeket (pl. glükóz, aminosavak) a mikroorganizmusok felveszik és sejten belül hasznosítják az intracelluláris enzimek közreműködésével. A nagy méretű molekulák ebben az esetben is szemcsések, míg a kis méretű molekulák vízoldhatók és könnyebben hozzáférhetők. Tulajdonképpen egy anaerob táplálkozási lánc alakul ki, amelyben az egyik baktériumcsoport által létrehozott végterméket egy másik baktériumcsoport képes hasznosítani, így egyre egyszerűbb összetételű szerves anyagok jönnek létre. Mivel anaerob közegről van szó, a baktériumok zöme fermentál és az anyagcse-refolyamataik során szerves savak, alkoholok

képződnek (szén-dioxid, hidrogén, ammónia és kén-hidrogén mellett).^{[8][16]} Ez az **első savtermelési fázis (acidogenezis = savképződés)**. Fermentatív savtermelésnek is nevezik, mert ugyanazok a fermentáló mikroorganizmusok termelik a savakat, amelyek a hidrolízishez a környezetbe bocsátják az extracelluláris enzimeket. Az illósavak közül legnagyobb mennyiségben ecetsav, propionsav és vajsav keletkezik. A **második savtermelési fázisban (acetogenezis = ecetsavképződés)** a baktériumok átalakítják ecetsavvá, hidrogénné és szén-dioxiddá az első savtermelési fázisban képződött illósavakat. Az anaerob lebontási folyamat utolsó lépcsője a **metántermelés (metanogenezis)**, amely a szerves savak lebontásával valósul meg. Itt alakul át a fermentatív savtermelési szakaszban keletkező szén-dioxid és hidrogén is, amelyek végül metánná transzformálódnak. Az anaerob lebontási folyamat lépései valójában sem időben, sem térben nem különülnek el egymástól, és sorrendjük meghatározott.

A VIZSGÁLATI PROTOKOLL FELÉPÍTÉSE ÉS AZ EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE

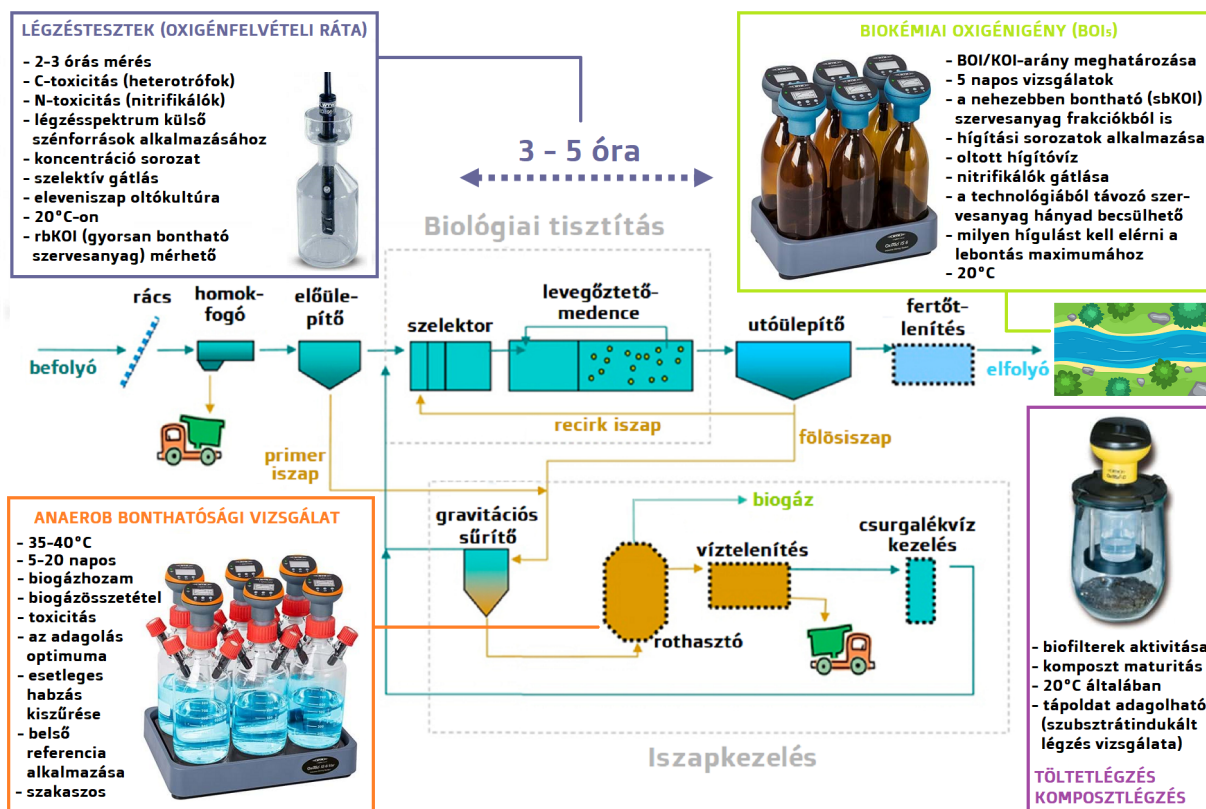
Először azt kell eldöntenünk, hogy a hulladékot a szennyvíztisztítási technológiában hasznosítjuk szénforrásként, vagy a rothasztóba tápláljuk és bevonjuk a biogáztermelésbe. Az előbbi csak folyékony hulladék esetében merülhet fel. Ebben az esetben teljes körű vizsgálatot végzünk, amelyben aerob és anaerob vizsgálatok is helyet kapnak. Az eredmények alapján döntjük el, hogy hol hasznosulhat leggazdaságosabban és a legkisebb kockázattal a hulladék. Szilárd (darabos) hulladékok esetében kizárólag anaerob bonthatósági tesztet és a kiegészítő kémiai vizsgálatokat végezzük el.

Az anaerob vizsgálatok körébe tartozik az eleveniszappal végzett légzésteszt (OUR = Oxigénfelvételi ráta meghatározás) és a hígítási sorozattal elkészített

BOI vizsgálat. Az anaerob bonthatósági vizsgálat a rothasztók működését modellezi és ebben az esetben is koncentrációsorozatot vizsgálunk.

A légzéstartesztet ún. Karlsruher-palackokkal végezzük (7. ábra). Eredetileg ezt nevezzük toxicitás tesztnek. Egyszerű, az oldott oxigénkoncentráció (D.O. = Dissolved Oxygen) meghatározásán alapuló mérés. Mivel háromféle koncentrációban (0,1-1,0-10 tf%) vizsgáljuk a folyékony hulladék hatását, így nem csak maga a toxicitás ténye, hanem az a terhelési szint is meghatározható, amelynél a nem kívánt hatás megjelenik. Standard módon táplált (ecetsav, műszennyvíz) eleveniszapkultúrával dolgozunk. Az oldott oxigéntartalom változását oxigénelektóddal három órán keresztül rögzítjük állandó hőmérsékleten (20°C). A vizsgálat során a minta rbKOl tartalmát fogyasztják a mikroorganizmusok, tehát a gyorsan bontható szervesanyag-tartalom monitorozható. A teszt

a levegőztető medencében zajló folyamatokat modellezi. A toxicitás tesztnek két formája van: a C-toxicitás és az N-toxicitás. A vizsgálat körülményeinek megfelelő változtatásával (ammónium adagolás, szelektív gátlószerek) nem csak a heterotróf mikroorganizmusok rbKOl fogyasztása mérhető (C-toxicitás), hanem a nitrifikáló mikroorganizmusokra gyakorolt toxicitás is vizsgálható (N-toxicitás). Azért érdemes a nitrifikálókat külön kezelni, mert sokkal érzékenyebbek a szerves szennyeződésekre és önmagában már a jelentősebb mennyiségű rbKOl is gátolhatja a működésüket. Mindemellett légzéspektrum-vizsgálatokat is végezhetünk. Ebben az esetben egy adott eleveniszap esetében mérhetjük fel a potenciális külső szénforrások körét. Ha konkrét folyékony hulladékkal kapcsolatban merül fel a lehetősége annak, hogy külső szénforrásként alkalmazható elődenitrifikációhoz, szintén megfelelő választás ez a vizsgálat.



7. ábra A biológiai bonthatósági vizsgálatok köre

A BOI vizsgálat a biológiailag bontható szervesanyagok hosszabb távú biodegradációját jellemzi. A folyékony hulladékokból speciális oltóvízzel hígítási sorozatot készítünk. Az oltókultúra tulajdonképpen bármilyen baktériumokat tartalmazó szennyvíz, felszíni víz lehet. Leginkább az utóülepítők vize ajánlható erre a célra, de ha nem megfelelő az aktivitása, akkor az eleveniszap szűrlete biztosan elegendő lebegő biomasszát tartalmaz. A hígítási sor elemeit 500 mL-es barna üvegekbe mérjük és 5 napon keresztül, állandó hőmérsékleten, folyamatos keverés mellett rögzítjük az oxigénfogyasztást. Erre a célra speciális nyomásérzékelő fejek (OxiTop mérőrendszer) szolgálnak, amelyek az üvegekben mérhető nyomásváltozást fordítják át BOI-értékre (oxigénfogyasztás). Az üvegben a mikroorganizmusok 5 nap alatt nem csak az rbKOl-hoz férnek hozzá, hanem a sbKOl lebontása is nagyrészt megtörténik. Általában a szerves vegyületek teljes biológiai lebontása 20 nap után befejezettnek tekinthető, bár elméletileg végtelen időtartam szükséges hozzá. A tapasztalatok szerint szennyvíz esetében a BOI_5 érték a BOI_{20} érték 70–80 %-a. A nitrifikálók oxigénfogyasztását szelektív gátlószerekkel blokkoljuk, így kizárólag a heterotróf szervezetek oxigénfogyasztását mérjük. Általában háromféle vagy ötféle koncentrációnál mérjük meg a BOI-értéket és a BOI/KOl arány maximumát keressük. A KOI az összes szervesanyag, a BOI a biológiailag bontható szervesanyag mennyiségét mutatja. A legnagyobb BOI/KOl arány a biodegradáció maximumát jelzi és az ehhez tartozó koncentráció, illetve hígítási fok irányadó a folyékony hulladékok fogadásánál. A BOI/KOl-arány valóban a biodegradációs maximumot mutatja, amely a teljes szennyvíztisztítási folyamat során elérhető. Ha ez nagy érték (legalább 60–70%), akkor a hulladék szervesanyagtartalmának nagy része hasznosul. Az rbKOl és az sbKOl együttes mennyiségét jelzi. Ha túl kevés ez az arány (pl. 30%), akkor nem érdemes szénforrásként fogadni

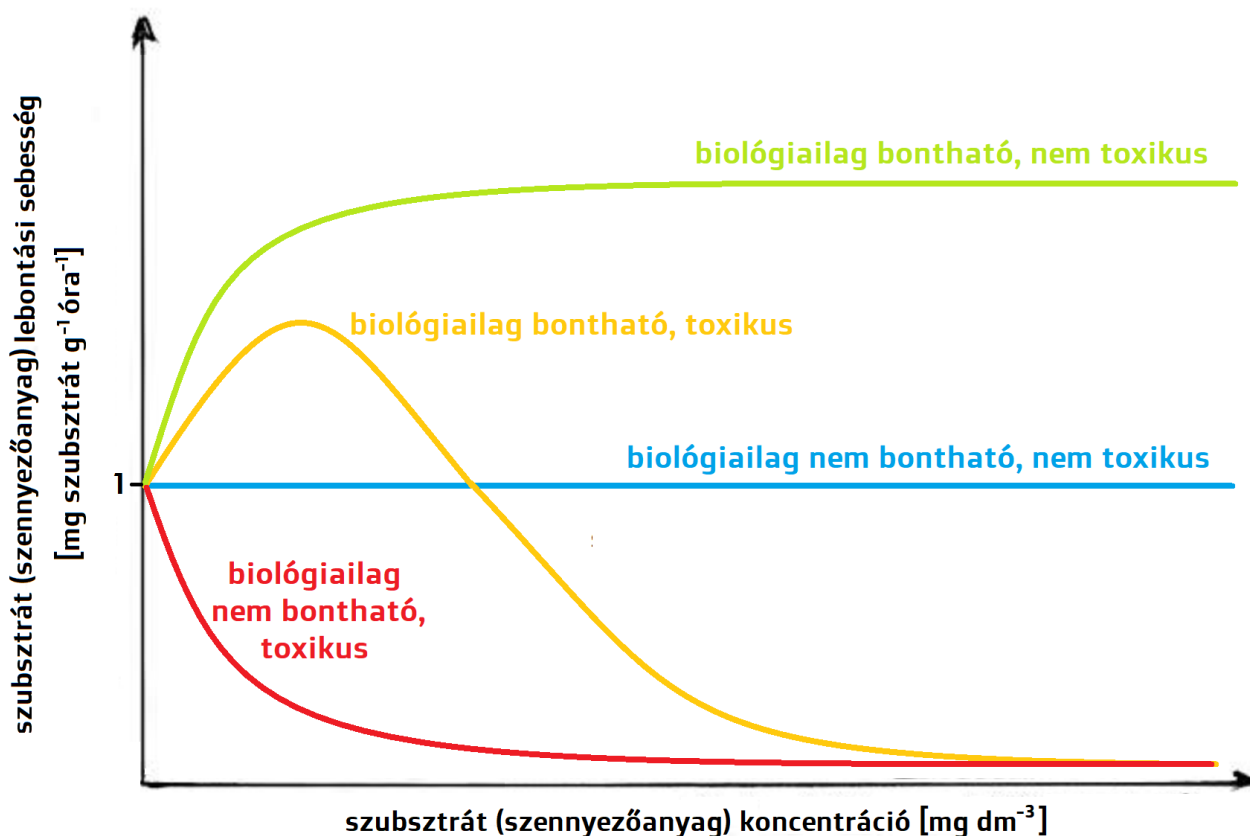
a hulladékot, akkor sem, ha a légzésszettek nagy oxigénfelvételi rátát mutatnak, mert a szervesanyag nagyobb része változatlan formában távozik a szennyvíztisztítómból. A BOI és a légzésszettek eredménye közvetlenül nem vethető össze, mert a légzésszettek az rbKOl fogyasztásához kapcsolt vizsgálatok, a BOI pedig az rbKOl-t és az sbKOl-t együtt jellemzi.

Az anaerob bonthatósági vizsgálattal a rothasztóban zajló folyamatokat modellezzük. Szakaszos rátáplálással végezzük. Folyamatos rátáplálásra nincs lehetőség, hiszen zárt üvegpalackokat használunk. A BOI vizsgálathoz hasonló felépítésű. OxiTop mérőrendszerrel dolgozunk ebben az esetben is, folyamatos keverés mellett, állandó hőmérsékleten (37°C). A hőmérsékletet a modellezni kívánt rothasztó szerint választjuk meg. Az oltókultúra rothasztott iszap (fermentlé). 1000 mL térfogatú üvegedényeket használunk, amelyekben 400 mL az iszap-minta együttes térfogat, és 600 mL a gáztérfogat. Szintén koncentráció-sorozattal dolgozunk. Belső kontrollként glükózt használunk, amelynek ismert a gázhozama, és ehhez viszonyítjuk a minta gáztermelését. Egyszerű üvegekkel csak a teljes (kumulatív) gázhozam mérhető, illetve a fajlagos gázkihozatal számolható. Speciális, háromszájú üvegek segítségével a gáz minősége, pontosabban a metántartalom is meghatározható. (7. ábra) A gázfejlődés dinamikáját leolvashatjuk a fejek által rögzített nyomásváltozás-görbéről. Ez az adaptációs időről is fontos információkat árul el. A vizsgálatok 5–20 naposak. Igény szerint alakítjuk, de célszerű a modellezni kívánt rothasztó tartózkodási idejét lekövetni. Ezen felül lehetőségünk van mini-rothasztókkal (15–20 L, dupla falú, rozsdamentes acél edények), folyamatos rátáplálással tesztelni a hulladékokat. Az üzemeltetés körülményeit sokkal jobban közelítik ezek a mérések, mivel az adaptációs folyamatokat is modellezhetjük.

A biológiai vizsgálatokat természetesen fizikai-kémiai paraméterekkel egészítjük ki. Minden mérés előzetes feltétele a KOI és a pH-mérés. A biológiai vizsgálatok esetében a pH-értéket általában 6 és 9 között kell tartani. A hulladékok bevizsgálása során célszerű ezt a lépést kihagyni, hiszen a valóságos körülményeket kell modelleznünk. Nincs lehetőség a hulladékanyagok pH-beállítására a gyakorlatban. A nem megfelelő pH tulajdonképpen a toxicitás egyik forrása lehet. Az adagolások beállítása a KOI-értékek alapján történik általában.

Az anaerob vonal felméréséhez száraz- és szervesanyag-tartalom (száritási és izzítási maradék) adatok is szükségesek. Szilárd hulladékok esetén a beméréseket az iszap és a minta szervesanyag-aránya alapján állapítjuk meg, továbbá a fajlagos gázhozam számításához is szükséges a szervesanyagtartalom ismerete. Hasznos

információkat hordoz az összes szén (TC) és az összes nitrogén (TN) elemvizsgáló meghatározása, valamint az összes foszfor- és kén-tartalom felmérése is. A KOI és TC értékekkel a fejlődő biogáz metántartalma becsülhető. Az összes szén-, nitrogén- és foszfor-tartalom alapján a hulladék C:N:P aránya számolható. A nitrogéntartalom alapján a rothasztás során képződő ammónia, a kén-tartalom alapján a képződő kén-hidrogén mennyisége becsülhető. Nem árt ellenőrizni a különböző fémek koncentrációját a mintákban (ólom, kadmium, króm, nikkel, antimon stb.), főleg olyan esetekben, amikor nagy mennyiségű hulladék rendszeres fogadása körvonalazódik. A nehézfémek koncentrációja nem lépheti át a megengedett értéket az iszapban, illetve bizonyos nyomelemek (Fe, Co, Ni, Zn, Mn, Cu, Se, Mo) hiánya is okozhat problémát hosszútávon.



8.ábra A biodegradáció koncentrációfüggése ^[17] alapján

A biológiai bonthatósági vizsgálatok köre ennél szélesebb, de nem minden vizsgálat használható a beszállított hulladékok felmérésére. A teljesség igénye nélkül említjük meg, hogy az OxiTop mérőrendszer minden olyan teszt elvégzésére alkalmas, ahol az oxigén vagy a szén-dioxid képződését monitorozzuk. A komposzt érettség (maturitás) meghatározásához komposztlégzésteztesztet végezhetünk vele, valamint a biofilterek (szagtalanítás) aktivitásának vizsgálata is elvégezhető légzésvizsgálatokon keresztül.

A cikksorozat következő részeiben a bonthatósági vizsgálatokat sorra vesszük és részletesen tárgyaljuk.

A hulladékvizsgálat során az elsődleges kérdés a biológiai bonthatóság és a toxicitás, amelyek egymástól elválaszthatatlanok. A bonthatósági vizsgálatok egyben toxicitástezteszt is, mivel minden esetben egy koncentrációsorozatot vizsgálunk. A tesztek eredményeként biológiai bonthatóságra és a toxicitásra nézve is igen/nem válasz létezik, de ezek szabadon kombinálódnak, így négyféle szubsztráttípust (itt hulladék) különböztetünk meg:

- biológiailag bontható, nem toxikus
- biológiailag bontható, toxikus
- biológiailag nem bontható, nem toxikus
- biológiailag nem bontható, toxikus. (8. ábra)

A megfelelő mérési paramétert a koncentráció függvényében ábrázolva a 8. ábrán látható görbék valamelyikét kapjuk. A görbe lefutása alapján azonosíthatjuk a szubsztráttípust. Az y-tengely a légzéstezteszt esetében az oxigénfelvételi ráta (OUR), esetleg az oxigénfogyasztás gátlása (% gátlásgörbe). BOI esetében maga a BOI-érték, esetleg a BOI/KOI-arány (%) jól használható. Az anaerob bonthatósági vizsgálatoknál a gázhozamértékeket

ábrázolhatjuk a koncentráció függvényében. Valójában az x-tengely is szabadon variálható. A lényeg az, hogy olyan paramétert alkalmazunk, amely a koncentrációviszonyokat hűen tükrözi. A rothasztás modellezésénél az adagolási térfogatarány (tf%) megfelelő paraméter lehet, illetve a KOI-ban kifejezett terhelés is használható. A görbék lefutása segít a biztonságos adagolási tartomány megválasztásában is. A biológiailag nem bontható hulladékokat természetesen nem fogadjuk, de a bontható változaton akkor is érdemes elgondolkodni, ha bizonyos koncentráció felett toxikus. Erre jó példa az etil-alkohol. Ha megfelelően kihígítjuk, akkor 100%-a biodegradálható, de töményen elpusztítja a baktériumokat.

Gondoljunk arra, hogy sütünk egy tálca süteményt. Azzal próbáljuk felmérni a sütemény minőségét (mennyire finom), hogy teszteljük a gyerekünkön. Ha mindet megeszi egy ültő helyében, akkor finom. Ám a gyerek nem bír vele, csupán három szeletet eszik meg a 30-ból. Ezek alapján azt gondolnánk, hogy rosszul sikerült a sütemény, pedig csak a gyerek kapacitása véges. Ha áthívjuk két barátját vendégségbe, ők is elfogyasztanak fejenként hármat, így már 9 sütemény hiányzik a harmincból. Azt gondolhatjuk, hogy nem is rossz a sütemény, de lehetne jobb is. Ha nem két barátját hívjuk meg, hanem a fél osztályt, akkor az összes sütemény elfogy pillanatok alatt. Rögtön megnövekszik az önbi-zalmunk, hiszen nagyon kapós volt a sütemény.

Így működik ez a hígításokkal is. Mindig oltott vízzel hígítunk, így a hígítás mértékének növekedésével ugyanannyi baktériumra egyre kevesebb szervesanyag jut. Addig hígítom a mintát, míg elérem a baktériumok kapacitásának a maximumát. További hígítással már nem növekszik a biológiai lebontás hatékonysága.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS A KÖVETKEZŐ RÉSZ AJÁNLÓJA

A Dél-pesti és az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen a biogáz-termelés intenzifikálása érdekében külső forrásból érkező szilárd és folyékony szerves hulladékok szennyvíztisztításból származó iszappal történő együttes kezelése (ko-fermentáció) történik. A szerves hulladékok ártalmatlanításának ez a módja környezetkímélő és jelentős mennyiségű zöldenergia forrása is. A túlnyomórészt rbKOI-t tartalmazó folyékony hulladékok szervesanyag-forrásként a szennyvízkezelésben is hasznosíthatók. A biztonságos üzemeltetés feltétele ezen hulladékok alapos bevizsgálása. A közel 20 év alatt kidolgozott és folyamatos fejlesztés alatt álló hulladékvizsgálati protokoll segít abban, hogy döntéshozói szinten minden információ rendelkezésre álljon a potenciális biogáz alapanyagok

hasznosíthatóságáról. A biológiai bonthatósági vizsgálatok széles repertoárját használjuk a mindennapi gyakorlatban. Szeretnénk a gyakorlati tapasztalatokat továbbadni, hogy ezzel a szintén ko-fermentációval üzemelő telepek kollégáinak munkáját segítsük, és nem utolsósorban azért, hogy e vizsgálatok hasznát hozzanak más vállalatok számára is.

A cikksorozatunk következő részében az aerob lebontási folyamatok (biodegradáció) modellezéséről írunk. Részletesen bemutatjuk a légzés-teszteket és a Biokémiai Oxigénigény vizsgálat (BOI) különböző változatait. Kitérünk a hibalehetőségekre és megvizsgáljuk a tesztek valódi információ-tartalmát.

► IRODALOMJEGYZÉK

SZERZŐ:



Bezsényi Anikó: 2007 óta dolgozik a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt-nél biológus-mérnökként. 2017-től az Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolájának PhD-hallgatója. Témája a „Mikroszennyezők eltávolítása szennyvízből”. Szakértőként és oktatóként több országban képviselte a céget (Bukarest - 2011. július-október és 2013. április; Szófia - 2013. július; Zágráb - 2017. január; Nur-Szultan - 2019. július). 2012-ben a bajai Eötvös József Főiskola és az EMVIR Nonprofit Kft. közös rendezésében meghirdetett 'Települési biológiai szennyvíztisztító telepek működés-optimalizációja' szakmai tanfolyamon oktatóként vett részt. A szennyvízkezelés, rothasztás és komposztálás biológiai optimalizálásával, problémamegoldással, fejlesztési feladatokkal széleskörűen foglalkozik.