

AZ AEROB LEBONTÁSI FOLYAMATOK (BIODEGRADÁCIÓ) MODELLEZÉSE A VÍZVONALON

BEZSENYI ANIKÓ^{1,2}, NAGY-MEZEI^{1,3} CSENGE, MAKÓ MAGDOLNA¹

ABSZTRAKT

Az aerob biológiai bonthatósági vizsgálatok körébe tartozik az eleveniszappal végzett légzéseszt (OUR = Oxigénfelvételi ráta meghatározás) és a hígítási sorozattal elkészített BOI (Biokémiai Oxigénigény) vizsgálat. Mindkettő szabványos eljárás, amely indokolt esetben rugalmasan változtatható. A mérések esetenkénti rugalmas változtatására azért van szükség, mert a vizsgált szennyvizek, folyékony hulladékanyagok nagy változatosságot mutatnak, és olykor szigorúan szabványos formában nem vizsgálhatók (túl nagy KOI, az oldószertartalom veszélyezteti az elektródot, hidrogén-peroxid jelenléte stb.). Mindemellett egy adott szennyvíztisztítási technológia modellezéséhez is gyakran van szükség bizonyos paraméterek módosítására. Mindkét módszer az oxigénfogyasztás meghatározásán alapul. A légzéseszteknél oxigénelektóddal mérjük az oldott oxigénkoncentráció változását 2-3 órán keresztül, a BOI5 teszteknél egy nyomásérzékelő fej (OxiTop® mérőrendszer) a mérőedényben 5 napon át rögzített nyomásváltozást fordítja le oxigénfogyasztás

értékekre. Az oxigént a mikroorganizmusok használják fel a közeg szervesanyag-tartalmának lebontásához. A közös elvek mellett azonban sok az eltérés a két mérés között. Míg a légzésesztek a levegőztetőmedencében zajló folyamatokkal korrelálnak jól, és a gyorsan bontható KOI (rbKOI = readily biodegradable KOI) mennyiségéről szolgáltatnak információt, addig a BOI₅ vizsgálatok során a lassan bontható KOI-frakció (sbKOI = slowly biodegradable KOI) felhasználására is sor kerülhet, hiszen 5 napig tarjuk az üvegeket optimális körülmények között. A legnagyobb BOI₅/KOI-arány a biodegradáció maximumát jelzi, amely a teljes szennyvíztisztítási folyamat során elérhető. A két vizsgálat nem versenytársa, hanem hasznos kiegészítője egymásnak.

BEVEZETÉS

A közműhálózaton keresztül a vízvonalra beérkező (vízvonalon fogadott), közvetlenül a vízvonalon fogadott, illetve a csatornába bocsátott különféle szennyvizek, valamint a külső szénforrásként (denitrifikálók számára) alkalmazható folyékony anyagok aerob

¹ Fővárosi Csatornázási Művek Zrt., 1087 Budapest, Asztalos Sándor út 4.

² Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest

³ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Agrárkörnyezettani Tanszék 1118 Budapest, Villányi út 29-43.

bonthatóságának vizsgálatára használjuk a légzéstartesztet és a Biokémiai Oxigénigény (BOI) vizsgálatot. Mint ahogyan azt a cikksorozatunk első részében részleteztük mindkét vizsgálatot bonthatósági (biodegradációs) és toxicitás tesztként egyaránt kezelhetjük, hiszen minden méréshez hígítási sorozatot készítünk és a sorozat összes elemét teszteljük. Biológiai bontható, toxikus anyagoknál a toxicitás csak hígítás kérdése, így a biodegradációhoz szükséges hígítás mértéke is egyidejűleg meghatározható.

Mindkét módszer az oxigénfogyasztás meghatározásán alapul. A légzéstartesteknél oxigénelektóddal mérjük az oldott oxigénkoncentráció (Dissolved Oxygen, D.O.) változását 2-3 órán keresztül, a BOI tesztekénél pedig egy nyomásérzékelő fej (OxiTop® mérőrendszer) a mérőedényben 5 napon át rögzített nyomásváltozást fordítja le oxigénfogyasztás értékekre. Az oxigént a mikroorganizmusok használják fel (légzés) a közeg szervesanyag-tartalmának lebontásához (elégetéséhez).

Azokat a baktériumokat, amelyek oxigént lélegeznek aeroboknak nevezzük. Ezek között akadnak olyanok, amelyek kizárólag oxigént képesek lélegezni (obligát aerob), és vannak olyanok, amelyek oxigén hiányában más molekulákat (nitrát, szulfát stb.) is képesek ellélegezni. Ezeket fakultatív anaeroboknak nevezzük. Az eleveniszap baktériumainak 80%-a ebbe a típusba tartozik. Tehát oxigénhiány esetén is elboldogul az eleveniszap, és a rothasztókba kerülve képes gyorsan létrehozni egy új, anaerob kultúrát, amely oxigénmentes környezetben működik. A fakultatív anaerobok előnyben részesítik az oxigént, mert több energiát nyernek az oxigén ellélegzésével, mint más molekulákéval. Oxigén jelenlétében mindig

oxigént lélegeznek, ezért a fellevegőztetett, oxigénben dús vizsgálati körülmények között a szervesanyagok lebontását (tkp. elégetését) oxigénnel végzik el. Tehát mind a légzéstartestek, mind a BOI₅ vizsgálatok tökéletesen alkalmasak arra, hogy az oxigénfogyasztáson keresztül ezeket a lebontási folyamatokat modellezzék.

LÉGZÉSTARTESTEK

Eredetileg ezt nevezik eleveniszapos toxicitás tesztnek. Alapvetően az MSZ EN ISO 81 92 (Vízminőség. Az eleveniszap oxigénfogyasztás-gátlásának vizsgálata ISO 8192:1986) szabvány alapján végezzük el. A szabványt több ponton a felhasznált oltóanyaghoz kell igazítani, mert az oltóanyagot nem lehet standardizálni. A nagyterhelésű eleveniszap jóval nagyobb légzésintenzitással jellemezhető, mint a kis-közepes terhelésű telepeké, így az alkalmazott oltóanyagmennyiség tág határok között mozoghat.

A szabványos vizsgálatban műszennyvízzel (szubsztrát) táplálják az eleveniszapot, amelynek az összetétele az 1. táblázatban látható.

A szennyvizek összetétele is nagyon változatos, de a műszennyvíz összetételét nem feltétlenül közelíti. A műszennyvíz megfelelő arányban tartalmaz makro- és mikroelemeket, amely a lebontási folyamatokat segíti. Ha azonban a technológiai körülmények modellezése a cél egy vizsgálat során, akkor nem feltétlenül kell műszennyvizet használnunk. A gyakorlatban sem adagolnánk külön mikro- és nyomelemeket, így csak meghamisítaná az eredményeket. Ilyen esetekben érdemes a műszennyvizet egyszerűbb szubsztrátra cserélni. Mi leggyakrabban ecetsavat (nátrium-acetát) használunk.

ALKOTÓRÉSZ	MENNYISÉG
Pepton	16 g
Húskivonat	11 g
Karbamid	3 g
Nátrium-klorid, NaCl	0,7 g
Kalcium-klorid-víz(1/2), $\text{CaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	0,4 g
Magnézium-szulfát-víz(1/7), $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$	0,2 g
Dikálium-hidrogén-foszfát, K_2HPO_4	2,8 g
Víz	1000 mL

1. táblázat Szintetikus tápközeg (az MSZ EN ISO 81 92 szabvány alapján)

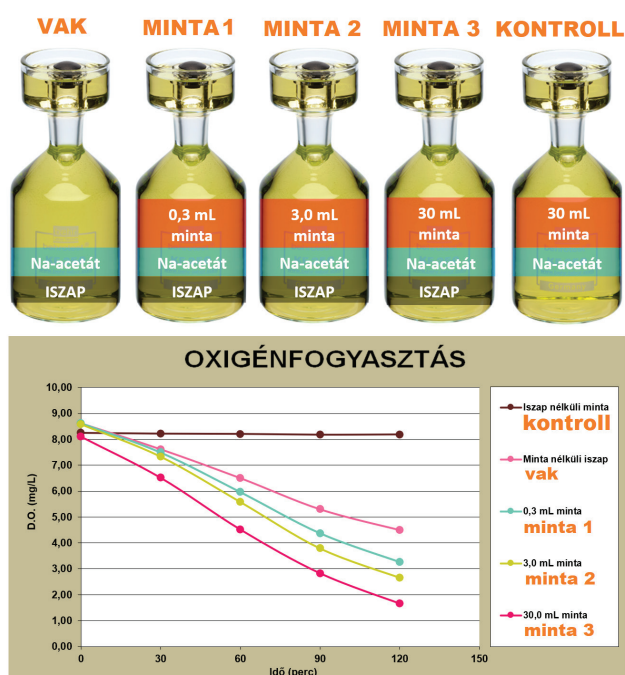
Az oltóanyagként alkalmazott eleveniszapot frissen vesszük valamelyik levegőztető medencéből, majd háromszor mossuk: ülepítés után dekantáljuk (leöntjük a felülúszó vizes fázist), majd felöntjük 20°C-os, fellevegőztetett csapvízzel. A harmadik felöntésnél literes mérőhengerbe öntjük és ott töltjük jelig, majd folyamatosan levegőztetjük a felhasználásig. A levegőztetés az eleveniszapot homogenizálja is, így könnyebb lesz az oltóanyag megfelelő adagolása. Az így előkészített iszapból meghatározzuk az összes lebegőanyag-tartalmat.

A légzéstartekhez 300 ml-es Karlsruher-palackokat (1. ábra, bal kép) használunk. Ebből 5 darabot készítünk elő egy vizsgálathoz. Ezekbe a beméréseket a 2. ábra alapján végezzük. Minden palackba bemérünk 150 mg KOI-ekvivalens nátrium-acetátot (Na-acetát). A Na-acetát oldat (~80-120 g/L) kémiai oxigénigény (KOI) vizsgálatára is szükség van. A vak nem tartalmaz mintát, ebben csak eleveniszap és Na-acetát oldat van. A „minta 1-2-3” elnevezésű üvegekbe növekvő koncentrációban mérjük be a mintát: 0,3 mL/palack; 3,0 mL/palack;



1. ábra A Karlsruher-palack oxigénelektóddal (balra), és BOI5 vizsgálat OxiTop® rendszerrel (jobbra)

30 mL/palack. Mivel 300 mL-es a palack, így a bemérések 0,1 tf%, 1 tf% és 10 tf%-nak felelnek meg. Az utolsó üveg a kontroll, amelyben nincs eleveniszap, csak Na-acetát és 30 mL minta. A kontroll jelzi, ha a minta és a Na-acetát olyan reakcióba lép, amely oxigénfogyasztással vagy oxigéntermeléssel jár. Ebben az esetben nem értékelhető a légzés-teszt eredménye.



2. ábra A légzéseszt (eleveniszapos toxicitás teszt) összeállítása és az oldott oxigéntartalom változása egy biológiailag bomtható, nem toxikus minta esetén.

Utoljára mérjük be a palackokba a 25 mg szárazanyag-ekvivalens eleveniszapot, így minden esetben 6 mg KOI/mg iszap szárazanyag (MLSS= Mixed liquor suspended solids, iszap-koncentráció) a terhelésünk. Ez a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep (SZVTT) eleveniszapjának optimális terhelése, így ugyanis 2-3 óra alatt sem fogy el teljesen a palackokból az oxigén. A mérés bevezetésénél a helyi viszonyokra kell szabni ezt a terhelésértéket.

Az iszap bemérése után a palackokat galériig felöntjük 20°C-ra termosztált, fel-levegőztetett csapvízzel. A palackokban 2-3-(esetleg 4) órán keresztül fél óránként az oldott oxigéntartalmat (D.O.) FDO® 925 oxigénszenzorral megmérjük. (1. ábra, bal kép és 2. ábra) A mért értékekből az oxigénfogyasztási rátát (OUR, Oxygen Uptake Rate) számoljuk, amelyet $\text{mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{óra}^{-1}$ formában adunk meg (3. ábra). A vak értékéhez viszonyítjuk a többi oxigénfogyasztási görbét. Nem toxikus a minta, ha a „minta 1-2-3” üvegekben a vak értékénél nagyobb oxigénfogyasztást mérünk. A kontroll esetében az a megfelelő, ha nem változik jelentősen az oxigénkoncentráció (hiszen nincs benne eleveniszap).

Az OUR-ból meghatározhatjuk a SOUR (Specific Oxygen Uptake Rate, fajlagos oxigénfelvételi ráta, légzéssebesség) értékét is, amely egy gramm illékony szuszpendált szilárd anyag (VSS = Volatile Suspended Solids) óránként elfogyasztott oxigén milligrammja. Ezt $\text{mg O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ iszap szervesanyag} \cdot \text{óra}^{-1}$ formában fejezzük ki. Ehhez a lebegőanyag szervesanyag-tartalmát kell meghatároznunk hamumentes szűrőpapír alkalmazásával.

Gátlási görbe is szerkeszthető, amely a vizsgált koncentrációk logaritmusának függvényében ábrázolja az oxigénfogyasztás-gátlás %-os értékét. Ez a következőképpen számolható:

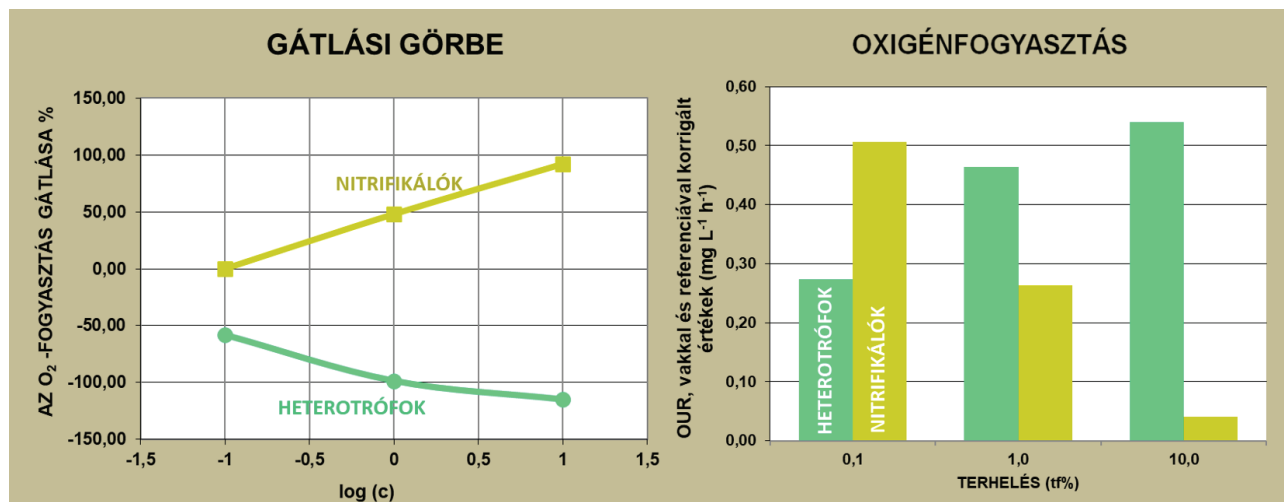
$$I = \left[\frac{F_{\text{vak}} - (F_{\text{minta}} - F_{\text{kontroll}})}{F_{\text{vak}}} \right] \cdot 100$$

Ahol:

- I = oxigénfogyasztás-gátlás (%)
- F_{vak} = a vak OUR értéke
- F_{minta} = a minta (1-2-3) OUR értéke
- F_{kontroll} = a kontroll OUR értéke

Az I értékét mindhárom mintakoncentrációra (minta 1-2-3 = 0,1 tf%; 1 tf%; 10 tf%) számoljuk, majd a koncentráció logaritmusának (-1; 0; 1) függvényében ábrázoljuk. Ilyen gátlási görbe látható a 3. ábrán.

hiszen a mérések során Na-acetáttal (rbKOl; readily biodegradable KOI = gyorsan vagy könnyen bontható szerves anyag frakció) tápláltuk az eleveniszapot. Az eddigi teszteket ezért **C-toxicitás**nak (C = szén) nevez-



3. ábra Heterotróf és nitrifikáló szervezetek gátlási görbéje (balra) és oxigénfogyasztási rátája (OUR) ugyanazon minta tesztelése során.

A heterotróf szervezetekre nem toxikus a vizsgált oldat, de a nitrifikálókat negatívan befolyásolják a nagyobb koncentrációk. Az 0,1 tf%-os adagolás alkalmazható a gyakorlatban. A gátlási görbe a szabványos kifejezése és ábrázolása a vizsgálati eredményeknek, bár általában a felhasználók nem kedvelik. A nullánál nagyobb értékek a gátlást jelzik. Minél pozitívabb az oxigénfogyasztás-gátlás értéke, annál toxikusabb a minta. Ha a gátlásértékek nullánál kisebbek, akkor nincs jelen gátló hatás. Minél negatívabb a gátlás, annál jobban bontható biológiailag a vizsgált minta.

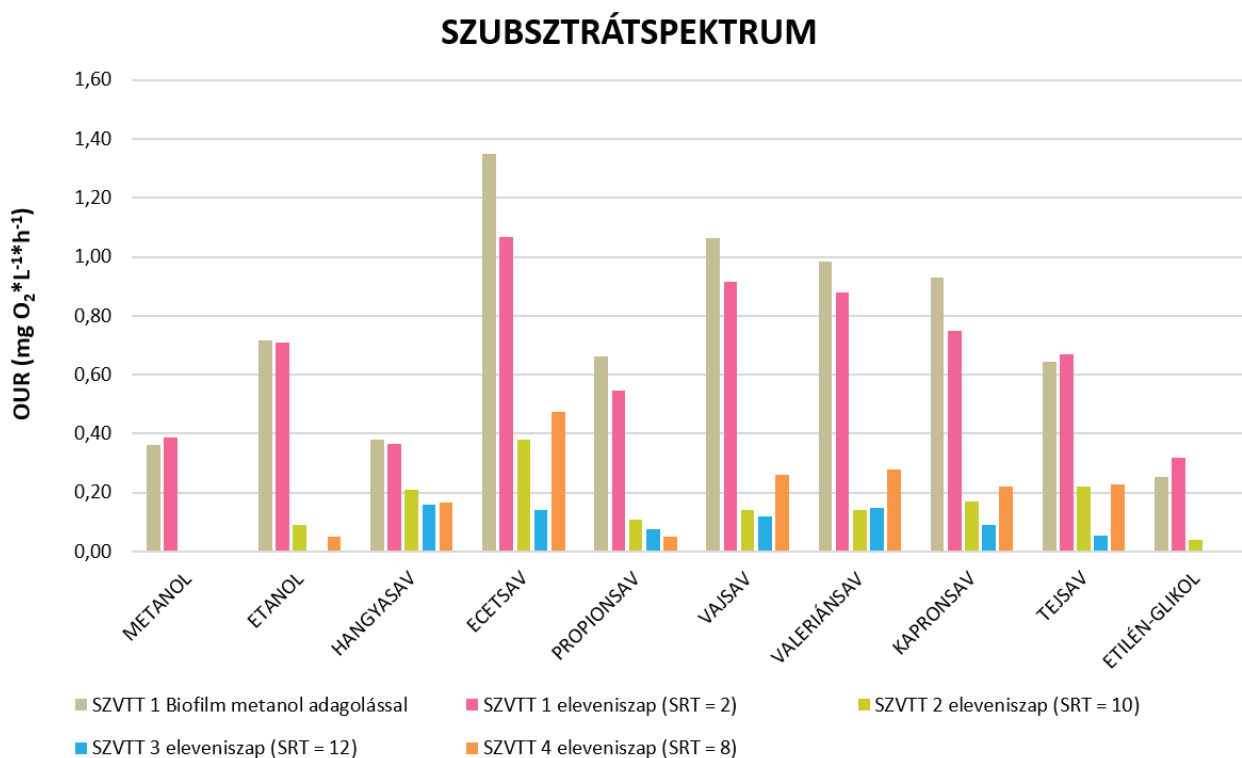
Látványosabb és könnyebben értékelhető grafikont kapunk, ha a terhelés (térfogat%) függvényében ábrázoljuk az OUR értékeket. Ez közelíti meg leginkább a technológusok gondolkodását és igényeit (3. ábra).

Az eddigiekben csak a szervesanyag fogyasztó (heterotróf) szervezeteket vizsgáltuk,

zük. A vizsgálat körülményeinek megfelelő változtatásával (ammónium adagolás, szelektív gátlószerek) nem csak a heterotróf mikroorganizmusokra, hanem a nitrifikáló mikroorganizmusokra gyakorolt toxicitás is vizsgálható. Ez az **N-toxicitás**. (3. ábra) Azért érdemes a nitrifikálókat külön kezelni, mert sokkal érzékenyebbek a szerves szennyeződésekre és önmagában már a jelentősebb mennyiségű rbKOI is gátolhatja a működésüket. Az N-toxicitás esetében a Na-acetátot lecseréljük ammónium-kloridra (1,43 mL 1g/l-es NH₄Cl-oldat) és a „minta 1-2-3” üvegeket két párhuzamosban készítjük elő. Az egyik sorozat mintáihoz nem adagolunk gátlószert, a másik sorozat mintáihoz N-allil-tiokarbamidot (ATU) teszünk (0,35 mL 5 g/L-es ATU-oldat). A nem gátolt OUR értékekből kivonjuk a gátolt változatokat és a továbbiakban ezekkel számolunk (3. ábra).

Végezhetünk **szubsztrátspektrum**-vizsgálatokat is. Ennél a módszernél egy adott eleveniszap esetében mérjük fel a potenciális külső szénforrások körét, illetve folyékony hulladékokat (metanol, etanol, ecetsav, hangyasav stb.) tesztelhetünk – mint szénforrást – az elő- és utódenitrifikációhoz. A 4. ábrán különböző szennyvíztisztító telepek (SZVTT) eleveniszapjának és egy biofilmes rendszernek a szubsztrátspektruma látható.

Leginkább a teszt 5 napos változata terjedt el, amelyet BOI_5 -ként (mg/L) jelölünk. Ez a szabványos változat is (MSZ EN 1899-1:2000, MSZ EN 1899-2:2000). Valójában a napok számát szabadon változtathatjuk (BOI_x), ha a kísérleti körülmények úgy kívánják. A szabványos teszt egy liter minta öt nap során felhasznált biológiai oxigénigényét adja meg, mg O_2 -ben kifejezve, 20°C-on. A teljes biológiai lebontáshoz elméletileg végtelen időtartam szükséges,



4. ábra Négy különböző SZVTT eleveniszapjának szubsztrátspektruma. Az egyik telep (SZVTT 1) rendelkezik egy metanollal táplált bioszűrőrendszerrel is.

BIOKÉMIAI OXIGÉNIGÉNY (BOI_5) VIZSGÁLATOK

A BOI_5 vizsgálat során a heterotróf szervezetek az rbKOI mellett az sbKOI frakciót is hasznosítani tudják, hiszen 5 nap áll a rendelkezésükre. Így a BOI_5 tesztek a biológiaiag bontható szervesanyagok hosszabb távú biodegradációját jellemzik.

azonban a lebontás 20 nap után befejezettnek tekinthető. A BOI_5 érték nagyjából a BOI_{20} érték 70-80%-a.

A vizsgálathoz standard, barna üvegedényeket ($V = 0,5$ L) használunk (1. ábra, jobb kép). A beletöltött mintát állandó keverés mellett 5 napig termoszálljuk (20°C). Az OxiTop® tesztrendszerrel (6. ábra és 7. ábra) végzett manometrikus mérési elv lényege, hogy az aerob

biológiai bontás során felszabaduló CO_2 -t a gáztérben abszorberrel (nátrium-hidroxid) megkötjük. Az üvegekben így kialakuló nyomásváltozás (negatív) a BOI-értékkel arányos. A nyomásváltozást az OxiTop® fejek érzékelik és regisztrálják, majd automatikusan átalakítják BOI-értékekké (mg/L) az adatsort. A mintákat eredeti állapotukban mérjük be a barna üvegekbe, ha az mikroorganizmusokat tartalmaz. Ha nincs saját biomasszája a mintának, vagy nem elégséges, akkor biztosítani kell a megfelelő oltóanyagot, azaz a lebontást végző mikroorganizmusok jelenlétét. Ezen felül tápanyagokat és nyomelemeket is szolgáltatnunk kell a baktériumok számára, amelyeket a hígításnál használt speciális hígítóvízzel adagolunk. A mérés szempontjából korlátlan mennyiségű oxigénforrásnak kell rendelkezésre állnia. Ezt az hígítóvíz levegőztetésével juttatjuk a folyadékfázisba.

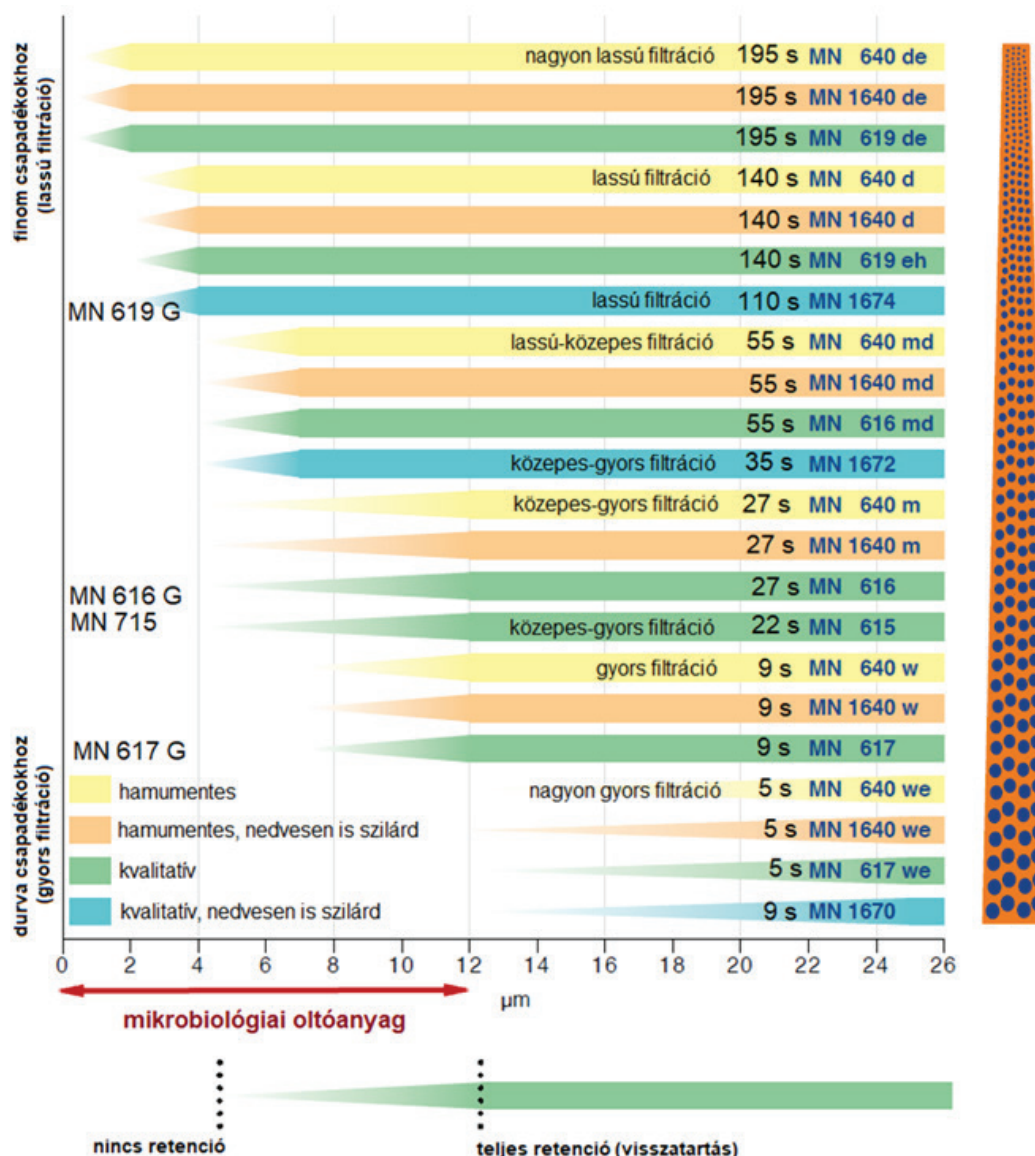
Ezeket a feltételeket úgy tudjuk megteremteni, hogy a vizsgált mintákból speciális oltó-hígító vízzel hígítási sorozatot készítünk. A használt hígítóvíz a szabványnak megfelelően készül, és ásványi sókat, valamint puffert tartalmaz. (Pro L: 1 mL 22,5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1 mL 27,5 g/L CaCl_2 , 1 mL 0,25 g/L $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 1 mL foszfátpuffer pH 7,2). Ezt a hígítóvizet 1 órán keresztül levegőztetjük, majd további egy órán keresztül állni hagyjuk a termosztátban (nyitott fedéllel). Ezután ellenőrizzük a pH-ját és ha szükséges, akkor beállítjuk ($\text{pH} = 7,2 \pm 0,2$) sósavval/nátrium-hidroxiddal. Az előkészített hígítóvízbe keverjük bele az oltóanyagot (5-20 mL/liter hígítóvíz), így már oltó-hígító vízként funkcionál.

Az oltókultúra tulajdonképpen bármilyen baktériumokat tartalmazó szennyvíz, felszíni víz lehet. Leginkább az utóülepítők elfolyó

tisztított szennyvize ajánlható erre a célra, ha megfelelő az aktivitása, de az eleveniszap szűrlete biztosan elegendő lebegő biomasszát tartalmaz.

Az oltóanyag szűrésére a vakértékek minimalizálása miatt van szükség. Természetesen a megfelelően hosszú idejű ülepítés is hatásosan kizárhatja az extra szervesanyagszennyeződés bevitelét az oltó-hígítóvízbe, de gyakran az oltóanyagra ennél gyorsabban van szükség. A szűrés azért is jobb megoldás, mert segítségével standard módon választjuk le a mikroorganizmusokat. Az eleveniszap partikuláris (szemcsés) és kolloidális szervesanyagtartalma nem konstans. Ha a pelyhek lazábbak, szétesettebbek, akkor bizonyos méretű pehelydarabok nem ülepednek megfelelően és belekerülnek az oltóanyagba, ezzel a BOI-értékeket növelik. Tehát eleveniszap eredetű oltóanyag esetében mindenképpen érdemes szűrést alkalmazni.

A szűrőpapír megválasztása kulcsfontosságú, mert a papír pórusmérete a baktériumok mérettartományába eshet és megakadályozhatja az átjutásukat. Lehetőleg az összes szabadon lebegő baktériumnak át kell jutnia a papíron, mert egyébként szelektíven szűrünk, azaz méret szerint válogatunk közöttük, és ezzel a biodegradáció valószínűségét, hatékonyságát rontjuk. A baktériumok átlagos átmérője általában nem haladja meg az 1-2 μm -t, de a hosszuk is számít, hiszen nem csak gömb formájúak (kokkus) léteznek, hanem pálca formájúak is. Biztosra mehetünk, ha olyan szűrőpapírt használunk, amely kb. 10-12 μm -ig tart vissza. Ezeket jellemzően a gyors, illetve nagyon gyors filtrációt biztosító szűrőpapírok között kell keresnünk. A szűrőpapír kiválasztásához nyújt segítséget a 5. ábra.



5. ábra A részecskevisszatartó kapacitás fontos jellemzője a szűrőpapíroknak [1].

Az oltó-hígító vízzel elkészített hígítási sor elemeit az 500 mL-es barna üvegekbe mérjük. A mintát sötétben kell tartani, így a mért oldott oxigénértékeket az algák O_2 -termelése nem befolyásolja. Ha ezt nem így tesszük, a mért BOI érték lényegesen csökkenhet. A hígítási sort úgy érdemes összeállítani, hogy a 2. táblázatban látható BOI méréstartományt lefedje. A legnagyobb hígítás a 250-365 mL-es bemérés területére, a legkisebb hígítás a 22,7-43,5 mL-es bemérésekre essen. A klasszikus BOI_5 vizsgálatok esetében a

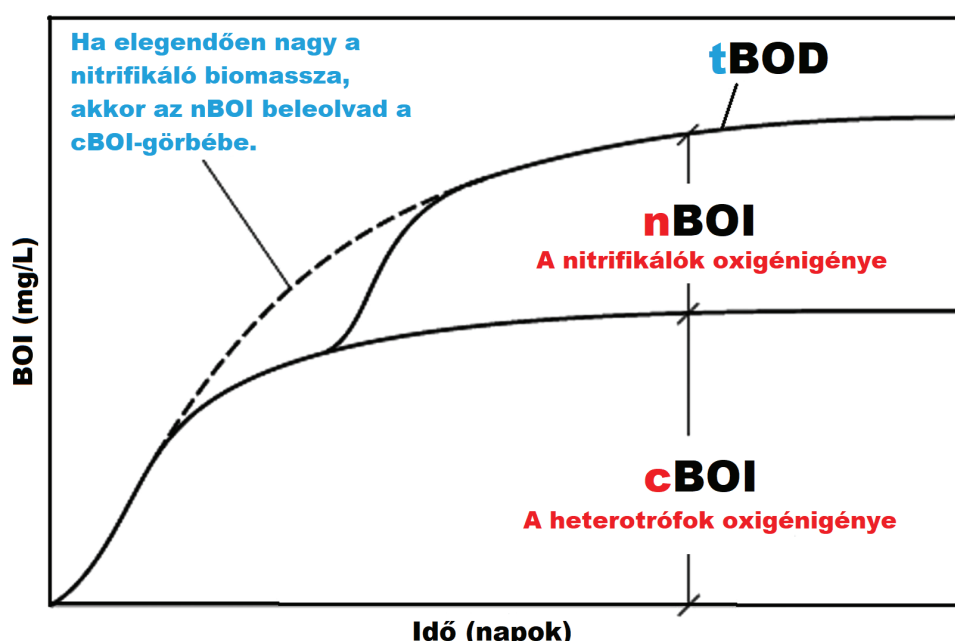
KOI érték alapján becsüljük az elméleti BOI -t ($thBOI$, a 2. táblázat első oszlopa), ami a KOI érték 80%-a, és ehhez az értékhez választjuk ki a bemért mintatérfogatot. Valójában csak abban lehetünk biztosak, hogy a KOI-nál kisebb értékre számíthatunk. A szennyvíztisztító telepek szennyvize esetében is változik a BOI/KOI -arány a kezelés során. A befolyó, nyers szennyvízben még megközelítheti ezt a 80%-ot, de az elfolyóvíz esetében már csak a KOI 10-30% százaléka a BOI_5 .

BOI-méréstartomány (mg/L)	Mintatérfogot (mL)	Adagolt ATU (μ L/üveg)
0 – 40	432	450
0 – 80	365	350
0 – 200	250	250
0 – 400	164	150
0 – 800	97	100
0 – 2000	43,5	50
0 – 4000	22,7	50

2. táblázat BOI vizsgálatok során alkalmazható mintatérfogatok összefoglaló táblázata. Feltüntettük a nitrifikálók gátlására adagolandó 5 g/L-es N-allil-tiokarbamid (ATU) oldat mennyiségét is.

Nem csak a heterotrófok fogyasztanak oxigént, hanem a nitrifikálók is. A heterotrófok a szervesanyagot égetik el a rendelkezésre álló oxigénnel, a nitrifikálók pedig az ammóniát, amely számukra ugyanúgy energiaforrásként szolgál. Mivel mi csak a minták biológiailag bontható szervesanyag-tartalmára vagyunk kíváncsiak, így a nitrifikálók oxigénfogyasztását (nBOI) szelektív gátlószerezrel (N-allil-tiokarbamid, ATU) blokkoljuk. Tehát kizárólag a heterotróf szervezetek oxigénfogyasztását mérjük (cBOI). Gátlószer hiányában a cBOI-t

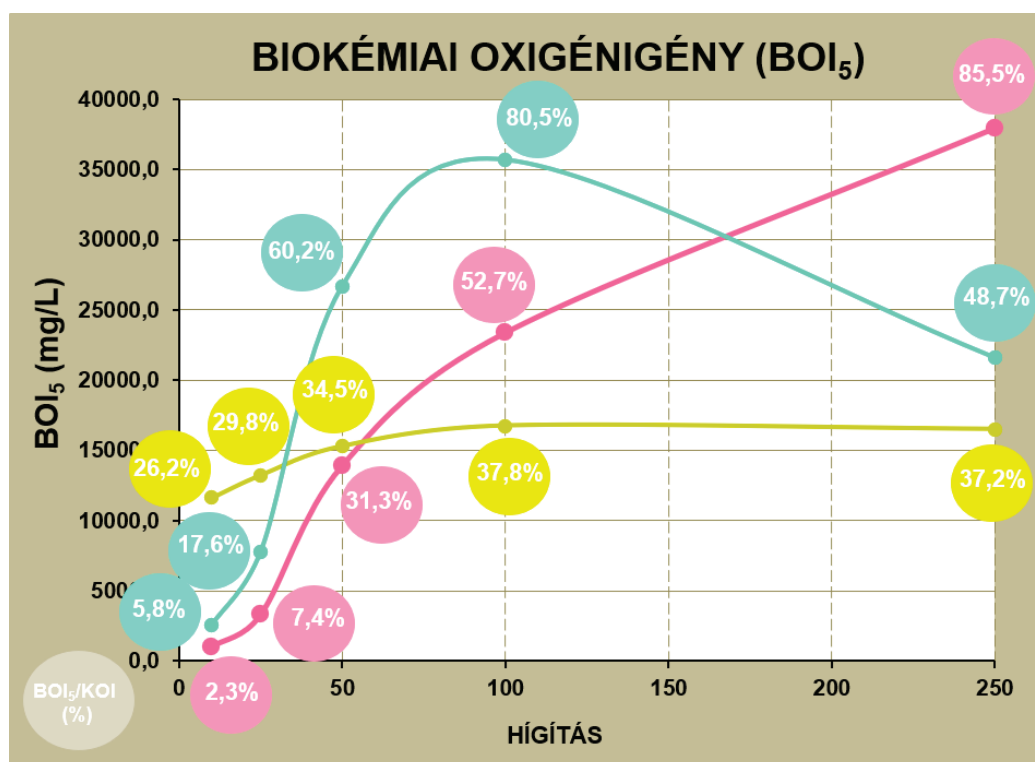
és az nBOI-t együttesen mérnénk (tBOI, teljes BOI) (6. ábra). Az nBOI-görbe – a nitrifikáló szervezetek lassú szaporodása miatt – általában 5 napon belül nem jelenik meg, de intenzíven nitrifikáló eleveniszap esetében ennek a lehetőségét sem zárhatjuk ki. Ráadásul ilyen rendszereknél a két görbe egybeolvad. Egyéb esetekben az nBOI jól láthatóan ráül a cBOI vonalára, ahogyan ez az 6. ábrán is megfigyelhető. Az ATU adagolás a 2. táblázatban követhető nyomon.



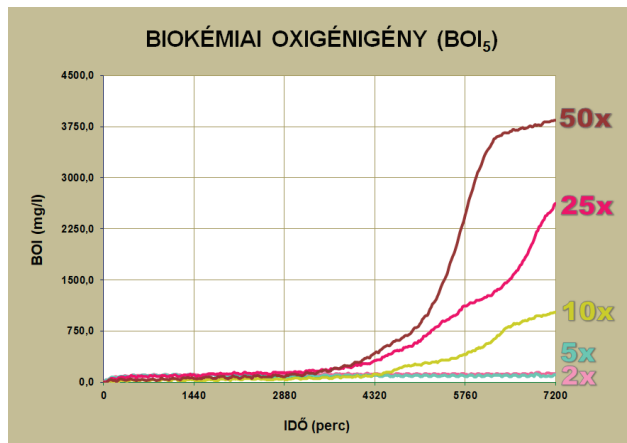
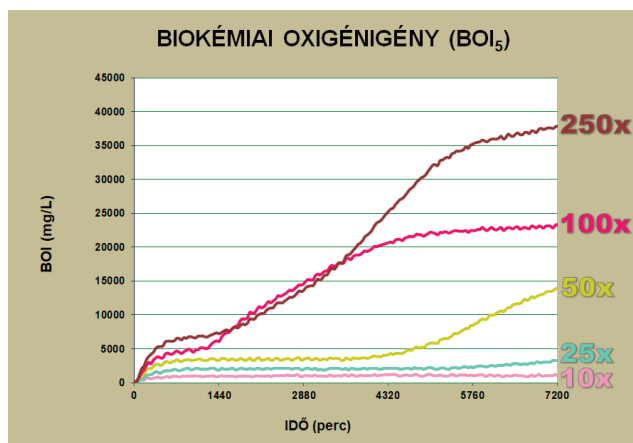
6. ábra A cBOI és az nBOI megjelenése a BOI-tesztek során, nem gátolt (ATU) mintáknál.

Általában háromféle vagy ötféle koncentrációnál mérjük meg a BOI-értéket és a BOI/KOI arány maximumát keressük. A KOI az összes szervesanyag, a BOI a biológiailag bontható szervesanyag mennyiségét mutatja. A legnagyobb BOI/KOI arány a biodegradáció maximumát jelzi és

az ehhez tartozó koncentráció, illetve hígítási fok irányadó lehet a folyékony hulladékok fogadásánál. A BOI/KOI-arány valóban a biodegradációs maximumot mutatja, amely a teljes szennyvíztisztítási folyamat során elérhető. Ehhez a maximumhoz tartozó hígítási fok fontos



7. ábra A BOI₅-értékek és a BOI/KOI-arány változása hígítással három különböző minta esetében. A világoskék adatsornál 100x-os, a sárga adatsornál 100x-os, a rózsaszín adatsornál a 250x-es hígítás eredményezi a legnagyobb lebontási hatékonyságot.



8. ábra A BOI₅-görbék változása a hígítással két különböző minta esetén. Az adaptációs idő nem feltétlenül rövidül le a hígítással (jobbra)

információt jelenthet a technológia számára. Ezért alkalmazzuk azt az ábrázolási formát, amely a 7. ábrán látható. A hígítás mértékének függvényében ábrázoljuk a BOI_5 -értékeket és a BOI/KOI -arányszámokat is feltüntetjük minden méréspontnál. Önmagában a BOI_5 -görbék lefutása is informatív (8. ábra). Erről a két módszer összehasonlításánál részletesen szó lesz.

AZ AEROB BONTHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK ÖSSZEVEETÉSE

A két tesztípus közötti különbség nem csak az alkalmazott felszerelésben és a vizsgálatok időintervallumában keresendő, az oltóanyag csíraszama is jelentősen eltér. A légzésvizsgálatok esetében közvetlenül az eleveniszapot használjuk oltásra, a BOI_5 vizsgálatoknál az eleveniszap szűrletét. Így a légzésesztek kiindulási összcsíraszama (a 22°C-on növe heterotróf aerob baktériumok száma) 10^4 nagyságrendet képvisel ml-ként, míg a BOI_5 vizsgálatok esetében csupán 10^2 érték körül mozog. Az öt napos tesztek során természetesen a baktériumok felszaporodnak az elfogyasztott tápanyagon és ml-ként 10^6 összcsírászámmal zárul a vizsgálat, de egy-két napig még jól bontható minták esetében sem közelítik meg a légzésesztek baktériumszámát.

A légzésesztek rövid mérési időintervalluma alatt (2-3 óra) a baktériumok nem feltétlenül szaporodnak. Elvileg a legoptimálisabb feltételek mellett bizonyos baktériumtörzsek akár 10-20 perc alatt is osztódhatnak (generációs idő), de a szennyvíz sem hőmérsékletét, sem egyéb fizikai-kémia paramétereit tekintve sem olyan ideális közeg, mint a baktériumtenyésztéshez használt táptalajok. Így nem járunk messze a valóságtól azzal a közelítéssel, hogy a légzésesztek alatt a baktériumok nem osztódnak, nincs elég idejük rá. Illetve, ha a vizsgált minta nem tartalmaz elegendő $rbKOI$ -t, akkor megfelelő minőségű és mennyiségű tápanyag sincs a szaporodáshoz. Néhány baktérium jellemző generációs ideje látható a 3. táblázatban. Ezzel ellentétben a BOI_5 vizsgálatok során bőven van idő a szaporodásra, ha a felkínált szervesanyag megfelelő a baktériumok számára. Valójában a BOI -görbe jellegzetes alakja is a baktériumok szaporodásgörbéjét követi le, amelyet a 9. ábra szemléltet.

Egy friss tápközegbe oltott baktériumtenyészetben a sejtek osztódása általában nem indul el rögtön. Hosszabb-rövidebb időre van szüksége a sejteknek az adaptációhoz, amely során a sejtek hozzászoknak a tenyésztési körülményekhez. Ez az ún. lag vagy késedelmi fázis, melynek időtartama a tenyészet

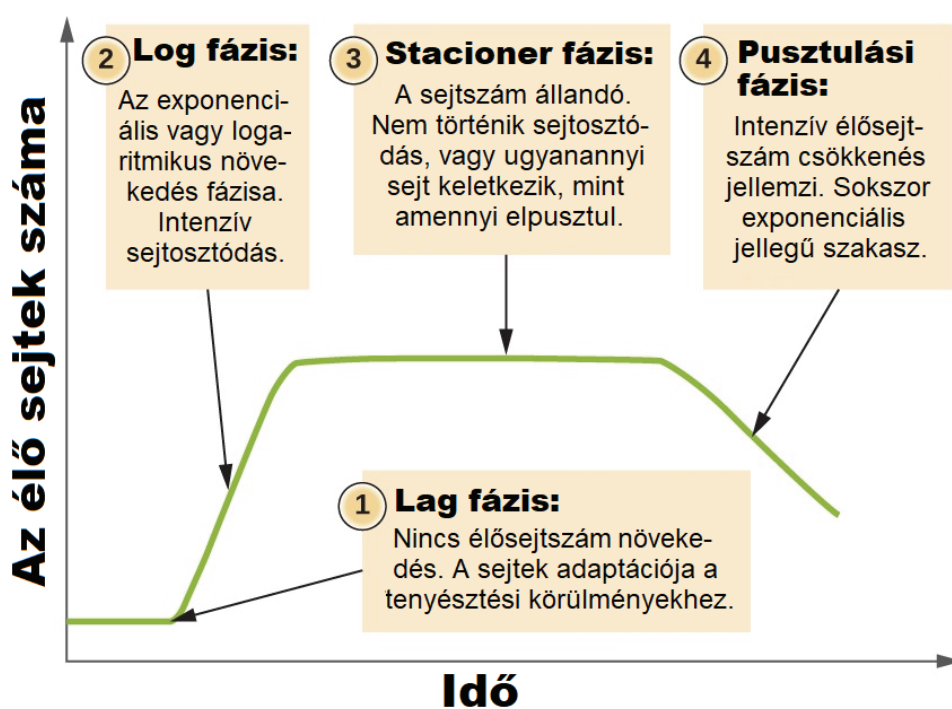
Faj	Inkubációs hőmérséklet (°C)	Generációs idő
Beneckea (Vibrio) natrieigenis	37	10 perc
Escherichia coli	40	21 perc
Bacillus subtilis	40	26 perc
Staphylococcus aureus	37	28 perc
Pseudomonas aeruginosa	37	35 perc
Clostridium botulinum	37	35 perc
Mycobacterium tuberculosis	37	12 óra
Treponema pallidum	37	33 óra

3. táblázat Néhány baktérium jellemző minimális generációs ideje [2]

állapotától és a tenyésztés körülményeitől is függ. Ez a szakasz el is maradhat, ha a kultúra optimális közegbe kerül és egy exponenciálisan növekvő szakasz indul az oltás pillanatától. Ilyen körülmények között a baktériumoknak nincs szükségük adaptációra. Ebben az esetben feltételezhető, hogy a tenyészet korábban is hasonló körülmények között szaporodott. Az adaptációs idő, azaz a lag fázis jelenléte pedig azt tükrözi, hogy az adott környezeti

segítségével bontják le a mikroorganizmusok. [2]

A lag fázist követi egy exponenciális/logaritmikus növekedési szakasz, amelyet a logaritmikus növekedés miatt log fázisnak neveznek. A sejtek osztódása lényegében korlátlan, minden sejtből kettő lesz a generációs idő elteltével. A növekedés mértékét a tenyészet adottságai (pl. anyagcsere típusa) és az inkubációs körülmények határozzák meg.



9. ábra Baktériumtenyészetek szaporodásgörbéje [2 alapján]

feltételeknél megfelelően működő enzimek előállítására van szüksége a mikroorganizmusoknak, mert nem a megszokott szénforrás áll rendelkezésükre. Esetleg a sejteknek az osztódást megelőzően fel kell töltekezniük a megfelelő sejtalkotó molekulákkal. Az enzimek biokatalizátorok, amelyek a sejtekben zajló kémiai folyamatokat a reakciósebesség növelésével felgyorsítják. A környezetben jelenlévő szervesanyagokat is enzimek

Azonban a tápanyagok egy idő után elfogynak és a korlátlan növekedés véget ér. Esetleg olyan anyagcseretermékek halmozódhatnak fel a tápközegben, amelyek a további növekedést gátolják. Ez az ún. stacioner (vagy stacionárius) fázis. Az élősejtszám ebben a fázisban állandó. Nem történik sejtosztódás, vagy ugyanannyi sejt keletkezik, mint amennyi elpusztul (kriptikus növekedés), de a sejtek továbbra is aktív anyagcserét folytathatnak.

A sejtek anyagcseréje azonban eltérhet a gyors növekedésű log fázis során működőtől (pl. másodlagos anyagcseretermékek képződése).

Végül a tenyészet egy leromló fázisba ér, amelyet már az intenzív élősejtszám csökkenés, azaz sejtpusztulás jellemez. Gyakran a log fázishoz hasonló lefutása van ennek a szakasznak is, de ellenkező előjellel és a pusztulás sebessége is lassúbb. Ez az ún. pusztulási fázis. Nem feltétlenül pusztul el a teljes baktériumpopuláció. Spórák formájában hosszú ideig megőrizheti életképességét. [2]

A szaporodási görbe egyes részeinek lefutása a gyakorlatban nagymértékben eltérhet egymástól, így a BOI-görbék alakja és lefutása is sokféle lehet. Az adaptációs folyamatokat tükröző lag fázis hossza hordozza talán a legfontosabb információt. Ha ez a szakasz elmarad és az oltókultúra rögtön a log fázisba lép, akkor a rbKOI dominál a mintában. Ha a lag fázis túlzottan elnyúlik, akkor az oltókultúrában nagyon kevés olyan mikroorganizmus van jelen, amely a minta szervesanyag-tartalmának lebontásához szükséges enzimek előállítására (szintézis) képes. Esetleg ezek a baktériumok lassan szaporodnak (faji sajátosság), vagy a szervesanyagforrás nem biztosít elég energiát a gyorsabb szaporodáshoz. A légzésesztek esetében az adaptáció nem működik, hiszen túl rövid a mérési idő ahhoz, hogy a megfelelő baktériumok felszaporodjanak.

A baktériumok anyagcseréje nagyon takarékos. A legfontosabb enzimeket folyamatosan termelik (konstitutív enzimek), de az enzimek többségét csak akkor, ha az enzim célmolekulája megjelenik a környezetben (induktív enzimek). Például a cellulózbontó baktériumokban a celluláz enzim termelése folyamatos (konstitutív), míg a gombákban csak akkor

következik be, ha a celluláztermelést kiváltja környezetben felbukkanó cellulózmolekula. Baktériumok esetében a keményítőt bontó amilázokat ugyancsak indukálni szükséges, tehát a keményítőt nem tudják gyorsan bontani. Azonban az induktív enzimek előállításához is idő kell, így a légzésesztek során valószínűleg inkább a már meglévő, folyamatosan termelődő enzimeket tudják használni a baktériumok.

Vannak olyan változások tehát, amelyek egy baktériumgeneráción belül lezajlanak. Gyors és összehangolt váltásokra képesek egyes mikroorganizmusok mind az anyagcserében, mind a viselkedésben. Ezt a jelenséget akklimatizációnak nevezzük [3][4]. Ilyen a fentebb említett induktív enzimek termelése is, amely a bakteriális anyagcsere idomulása a környezetben megjelenő újfajta szervesanyaghoz. Az adaptáció folyamata már nem egyéni esemény, hanem populációs/közösségi szinten értelmezhető. Ehhez már a baktériumok szaporodására is szükség van, hogy generációról-generációra megtörténhessen a változás, ami az adott feltételekhez legjobban idomuló, leginkább életképes baktériumok felszaporodása a közösségen belül. Tehát a fajösszetételben történik eltolódás. Míg a rövid légzésesztek során csupán akklimatizációs folyamatok zajlanak, addig az ötnapos BOI vizsgálatok már az adaptációs folyamatoknak is teret adnak.

A két vizsgálat alapvetően mást mutat számunkra. Mint a cikksorozatunk első részében is felhívtuk rá a figyelmet, a 2-3 órás légzésesztek a gyorsan bontható KOI (rbKOI) lebontását tükrözik és a levegőztetőmedencékben zajló folyamatokat modellezik. Ezzel szemben a BOI₅ vizsgálatok során a lassan bontható KOI-frakció (sbKOI) is sorra kerülhet, hiszen 5 napig tarjuk az üvegeket optimális

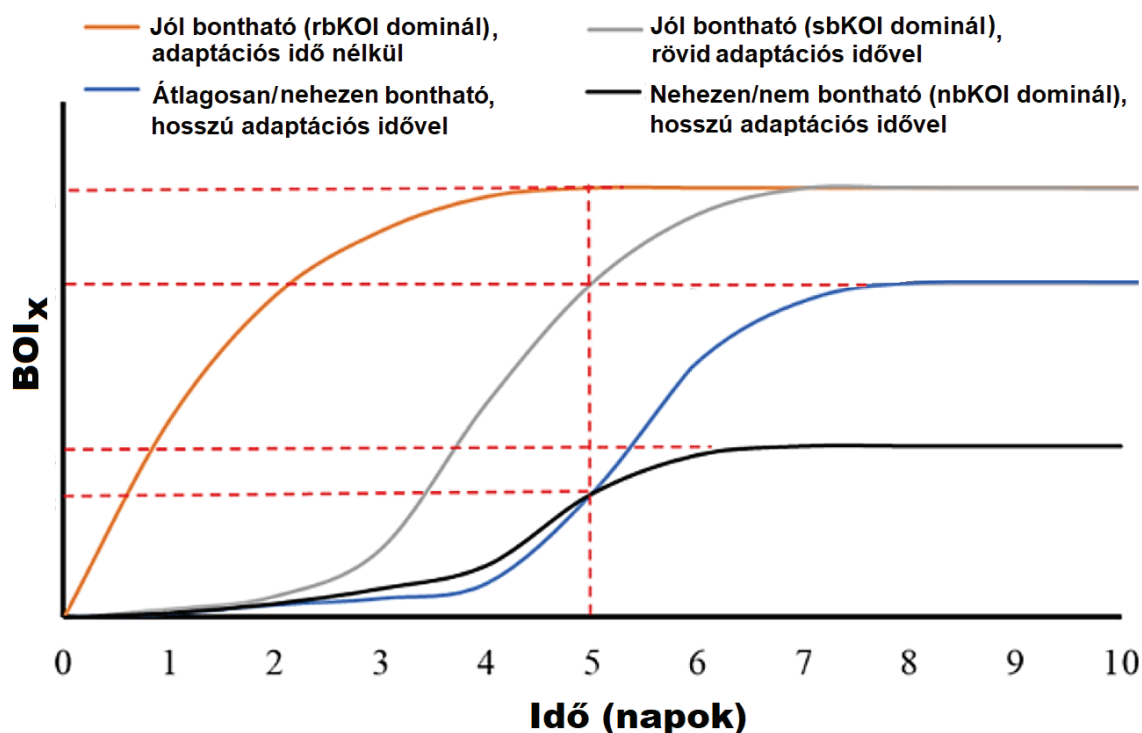
körülmények között. Miközben a baktériumok összcsíraszama 10^2 értékről négy nagyságrendet ugrik és eléri a 10^6 értéket, az rb-KOI és az sb-KOI egy része is tápanyagforrássul szolgál.

A BOI_5/KOI -arány a biodegradációs maximumot mutatja, amely a teljes szennyvíztisztítási folyamat során elérhető. Az arányszám közvetlenül utal a minta szervesanyag-tartalmának biológiai bonthatóságára, amely alapján a minta négy kategóriába sorolható: biológiailag nem bontható, lassan bontható, átlagosan, illetve gyorsan bontható. A kategóriákat és a hozzájuk tartozó arányszámokat a 4. táblázatban foglaljuk össze.

A BOI/KOI -arány értéke és a BOI -görbék lefutása együttesen megmutatja, hogy a vizsgált minta milyen biodegradációs sajátosságokkal rendelkezik. Erre láthatunk példákat a 10. ábrán. A nagy BOI/KOI -aránnyal jellemezhető, lag fázis (adaptációs idő) nélküli, gyorsan felfutó BOI -görbét rajzoló minták pozitív elbírálás alá esnek. Valószínűleg az rb-KOI frakció dominál bennük, így a biológiai tisztítóművekben jól hasznosulnak. Hasonlóan nagy BOI/KOI -aránnyal, de pár napos adaptációs idővel még mindig jól kezelhető szennyvizet/folyékony hulladékot fogadhatunk. Az iszap adaptációja gyorsabb lebontást biztosíthat rendszeres rátáplálás esetén.

A szerves anyag biológiai bonthatósága				
	nem bontható	nehezen bontható	átlagos	jól bontható
BOI/KOI	<0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,8

4. táblázat A BOI/KOI -arány és a szervesanyagok biológiai bonthatósága (biodegradáció) [5]



10. ábra A BOI/KOI -arány értéke és a BOI -görbék lefutása együttesen megmutatja, hogy a vizsgált minta milyen biodegradációs sajátosságokkal rendelkezik. [6]

Még megfelelő BOI/KOI-aránnyal, de hosszú adaptációs idővel rendelkező minták már előkezelést igényelnek a biológiai tisztításhoz (pl. kémiai oxidáció). A nagyon kicsi BOI/KOI-arány esetén a biológiai kezelés gazdaságosan nem valósítható meg.

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 rb-KOI-t tartalmazó folyékony hulladékok szervesanyag-forrásként a szennyvízkezelésben is hasznosíthatók (pl. elődenitrifikációhoz). 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.

A cikksorozatunk aktuális részében az aerob bonthatósági vizsgálatokat részleteztük. Komplex leírást adtunk a légzéstechnikáról és a biokémiai oxigénigény (BOI_5) vizsgálatról. Írtunk a két tesztípus hasonlóságairól és különbségeiről, valamint az adatsorok sokrétű értelmezéséről.

A cikksorozatunk következő részében az anaerob lebontási folyamatok (biodegradáció) modellezéséről írunk. Részletesen bemutatjuk a szakaszos üzemű OxiTop® rendszerrel végzett anaerob bonthatósági vizsgálatot, valamint a rothasztók pontosabb modellezését lehetővé tevő, folyamatos üzemű mini-rothasztók működését. Kitérünk a hibalehetőségekre és megvizsgáljuk a tesztek valódi információ-tartalmát.

IRODALOMJEGYZÉK