

A ROTHASZTÓK ANAEROB LEBONTÁSI FOLYAMATAINAK (BIODEGRADÁCIÓ) MODELLEZÉSE

BEZSENYI ANIKÓ^{1,2}, NAGY-MEZEI CSENGE^{1,3}, GYARMATI IMRE¹, MAKÓ MAGDOLNA¹

ABSZTRAKT

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). A Dél-pesti és az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen a biogáztermelés 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 egyben. Tehát a szennyvíztisztítás hagyományos szerepe mára kibővült. Az anaerob rothasztókkal rendelkező szennyvíztisztító telepek a hulladékkezelés és -gazdálkodás jelentős regionális központjai lehetnek. 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 a rögzítettek szerint. Azonban a szennyvíztisztítás és iszapkezelés stabil üzemeltetésének érdekében elengedhetetlen ezen biogázalapanyagok előzetes vizsgálata, amely során a fajlagos biogázhozamot, annak dinamikáját és a toxicitást mérjük fel.

BEVEZETÉS

A rothasztók mikroorganizmus közössége a nagy molekulatömegű komplex szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok) több lépésben metánná és szén-dioxiddá alakítja át. Kisebb mennyiségben egyéb termékek is keletkeznek (pl. kén-hidrogén). A biológiai átalakítás, lebontás közösségi szinten zajlik, több mikroorganizmuscsoport együttműködését igényli. Ennek az összetett folyamatsornak a felépülése látható az 1. ábrán. Tulajdonképpen egy anaerob táplálkozási

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

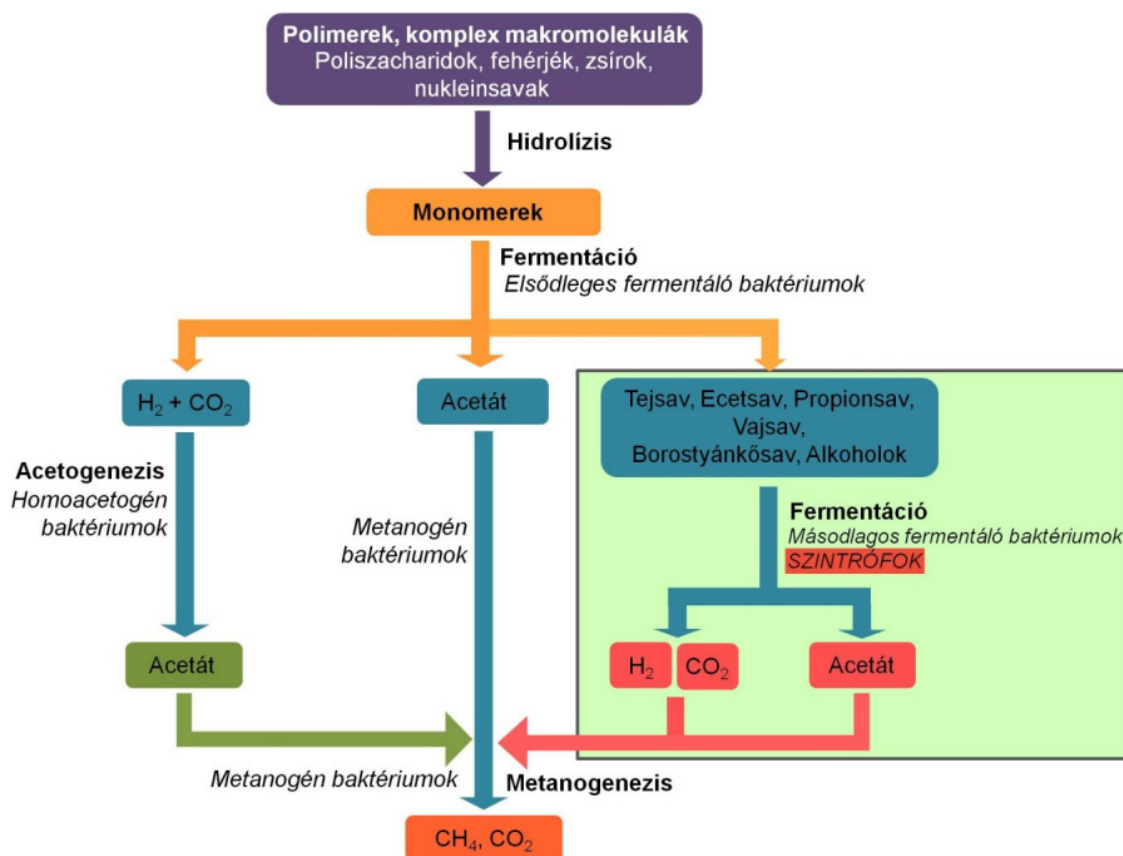
² Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest

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

lánc épül fel. Az egyik baktériumcsoport által végtermékként létrehozott szerves anyagokat egy másik baktériumcsoport felhasználja szubsztrátként (tápanyag). A tápláléklánc mentén a bonyolultabb összetételű szerves anyagok fokozatosan egyszerűbbekké alakulnak át.

Természetes anaerob közegben a komplex szerves anyagokat sokféle mikroorganizmuscsoport képes bontani. Cikksorozatunk első részében részletesen tárgyaltuk a baktériumok (sensu lato, azaz a továbbiakban az Archaeákat is beleértve) anyagcsere sajátosságait. Utalva az ott leírt részletekre megjegyezzük, hogy a mikroorganizmusok nem képesek teljesen nagy molekulák, vegyületek felvételeire, mivel a sejtfal és a sejthártya fizikai akadályt jelent. Molekuláris szűrőként viselkedik,

amely elsősorban méretbeli korlátozást eredményez, de kémiai szelektivitás is valószínűsíthető. Tulajdonképpen ez a sejt első védelmi vonala a toxikus anyagokkal szemben. Hogy ez mégse jelentsen éhezést a sejt számára, a baktériumok sejten kívüli (extracelluláris) 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. [1] A sejtben belüli (intracelluláris) enzimek fejezik be a lebontást. 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 nagy molekulákat és ezzel kisebb



1. ábra A szerves anyagok anaerob bontásának folyamata [1]

építőelemekre (pl. monomerekre) bontják. Az olyan óriásmolekulák, mint a cellulóz, vízben nem oldhatók, de a feldarabolódás során egyre inkább vízoldható molekulákhoz jutunk. Ez megkönnyíti a molekulák felvételét. Szinte csak a legkisebb építőelemek képesek bejutni a sejtbe. Például keményítő és a cellulóz esetében a glükózmolekula, a fehérjék esetében az aminosavak. [2]

Az extracelluláris enzimek termelése és az óriásmolekulák egységekre bontása általában több órát vesz igénybe, amelyhez hozzá járul, hogy az enzimek mindig csak a szubsztrát felszínéhez férnek hozzá. A fehérjéket a proteázok, a zsírokat a lipázok, a komplex szerkezetű szénhidrátokat az amilázok (keményítő) és a celluláz enzimek (cellulóz) bontják. A nagy méretű molekulák lebontását hidrolízisnek nevezzük. [2]

Intracelluláris enzimeket minden baktérium termel, de extracelluláris enzimeket nem feltétlenül. Az extracelluláris enzimek repertoárja széles, hiszen a mikroorganizmusok környezetében sokféle elfogyasztható szerves anyag van, de egyetlen baktériumfaj sem képes az összes enzimféle előállítására. Tehát fajgazdag (diverz) baktériumközösség szükséges a szervesanyagok lebontásához, intracelluláris és extracelluláris enzimek sokaságával. [2]

A hidrolízis eredményeként oldható, egyszerű szerves anyagok (glükóz, aminosavak) keletkeznek, amelyeket főként maguk az enzimeket termelő baktériumok fogyasztanak el és az anyagcserefolyamataik során szerves savakká (ecetsav, propionsav, hangyasav, tejsav, vajsav, borostyánkősav), alkoholokká, ketonokká, szén-dioxiddá és hidrogénné konvertálják. Ezeket a mikroorganizmusokat **elsődleges fermentálók**nak (elsődleges

savtermelők) nevezzük, a folyamatot pedig **savtermelés**nek (acidogenezis). A szerves savak és egyéb fermentációs termékek sem halmozódnak a közegben, hanem valamely mikroorganizmus hasznosítja majd azokat. Az ecetsavat, a hidrogént, a szén-dioxidot és az egy szénatomos molekulákat (pl. metanol) a metántermelők közvetlenül metánná és szén-dioxiddá alakítják, de a bonyolultabb molekulákat a metántermelők nem képesek közvetlenül hasznosítani. Ilyenek a hosszú szénláncú zsírsavak, a két szénatomnál hosszabb alkoholok, az elágazó szénláncú és aromás zsírsavak. Ezeket a termékeket az ún. **másodlagos fermentálók** (szintrófi-kus) baktériumok ecetsavvá, szén-dioxiddá, hidrogénné és hangyasavvá alakítják, amelyeket a metántermelők már képesek felhasználni. A folyamat a **másodlagos savtermelés** (acetogenezis = ecetsavtermelés). A **szint-rófia** kifejezés olyan anyagcsere-függést jelent, amikor két vagy több mikroorganizmus egyesíti anyagcsere-képességét egy olyan szubsztrát lebontására, amelyet külön-külön nem képesek hasznosítani. A rothasztók biomasszájának 90 %-át a savtermelő baktériumok alkotják. [1][3][4] A hidrolízissel együtt elindul a savképződés (illósav) is, azaz a két folyamatot nem lehet szétválasztani. A fehérjék és a zsírok hidrolízise gyors és a folyamat során képződő illósavak koncentrációja megnőhet, amely a metántermelő baktériumok szaporodását akadályozhatja. A szénhidrátok (pl. keményítő) még az előbbieknél is gyorsabban hidrolizálnak és szén-dioxidban gazdagabb biogázt produkálnak. A cellulóz- vagy lignintartalmú szubsztrátok esetében a hidrolízis lassú folyamat. A savtermelés során képződő illósavak közül a legnagyobb mennyiségben ecetsav, propionsav és vajsav jelenik meg

a rendszerben, kisebb mértékben hangyasav, tejsav és valeriansav. [3] A két savtermelő fázis alatt képződő fermentációs termékeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Az anaerob tápláléklánc utolsó láncszeme a metántermelés, azaz a szerves savak degradációja, ill. redukciója metánig. A szerves anyagok lebontása során keletkező szén-dioxid egy része ugyancsak részt vesz ebben a folyamatban és metánná konvertálódik. A metántermelő baktériumokat a szakirodalom általában három csoportba sorolja a hasznosított szubsztrátok szerint: **hidrogén-hasznosító metántermelők (hidrogenotróf metanogének), ecetsav-hasznosítók (acetotróf metanogének)**

és egy szénatomos (C1) egyszerű szerves vegyületeket hasznosítók (metilotróf metanogének). [3]

Mikrobiológiai oldalról megközelítve árnyaltabb a helyzet. Az ecetsav bontására nem képes metántermelőket illetjük hidrogenotróf kifejezéssel, mivel mindegyikük képes hidrogénből és szén-dioxidból metán létrehozására. Azonban egyéb szubsztrátjaik is lehetnek: etanol, hangyasav, metanol, metilaminok és a metántiolok. Az utóbbi C1 vegyületek felhasználóit nevezik metilotróf metanogéneknek. Ezek nem különülnek el élesen a hidrogenotrófoktól, mivel a körülményektől függően képesek lehetnek a szubsztrátok közötti váltásra.

1. táblázat A savtermelő fázisok (acidogenezis és acetogenezis) fontosabb fermentációs termékeinek összefoglaló táblázata. A harmadik oszlopban jelöltük, hogy az adott termék hasznosítható-e a metántermelők számára. [1][2][5]

FERMENTÁCIÓS TERMÉK	KÉMIAI KÉPLET	METANOGÉN HASZNOSÍTÁS
Szén-dioxid	CO ₂	+
Szén-monoxid	CO	+
Hidrogén	H ₂	+
Ammónia	NH ₃	+ (N-forrás)
Kén-hidrogén	H ₂ S	+/- (S-forrás)
Metanol (metil-alkohol)	CH ₃ OH	+
Metil-amin	CH ₃ NH ₂	+
Etanol (etil-alkohol)	CH ₃ -CH ₂ -OH	+
Hangyasav (formiát)	HCOOH	+
Ecetsav (acetát)	CH ₃ COOH	+
Propionsav	CH ₃ CH ₂ COOH	-
Vajsav (butánsav)	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH	-
Valeriansav (pentánsav, propilecetsav)	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ COOH	-
Kapronsav	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH	-
Borostyánkősav (szukcinát, butándisav)	HOOC-CH ₂ -CH ₂ -COOH	-
Tejsav (laktát, 2-hidroxi-propánsav)	CH ₃ -CH(OH)-COOH	-
További fermentációs termékek: butanol, fumársav, almasav, ornitin, citrulin, piroszölősavak (indol-piroszölősav), metil-merkaptán, vajsavak (α -keto-vajsav, α - és β -metil-vajsav), glutaminsav, formamid, δ -amino-valeriansav, acetaldehid, alaninsav, glicin, indol-propionsav, indol, fenol, p-krezol, p-hidroxi-fenil-ecetsav, p-hidroxi-fenil-akrilsav, p-hidroxi-fenil-tejsavak stb.		

A metántermelők többsége általában egy-néhány szubsztráttípust hasznosít. A szerves anyagok anaerob lebontása során mindig képződik hidrogén. A hidrogén nagy részét a metántermelő baktériumok szén-dioxid redukciójára használják fel. A metilotróf metanogenezis jelentősége speciális körülmények között növekedhet (metanol, metil-aminok megjelenése a rothasztóban pektint, kolint vagy betaint tartalmazó alapanyagokból). [1] A metanogenezis kiindulási vegyületei és a kapcsolt reakciók az 2. táblázatban láthatók.

A hidrogén és szén-dioxid felhasználásával történő metanogenezissel a sejtek nagyobb energiamennyiséghez jutnak, mint az ecetsav hasznosítása révén, így az acetotróf metántermelők lassabban szaporodnak. Ennek ellenére a rothasztókban a metán közel 70%-a ecetsavból képződik, mivel korlátozott mennyiségű hidrogén áll rendelkezésre. [2][3] A metanogének lassú szaporodásának oka a biokémiai folyamatok során felszabaduló viszonylag csekély energia, de a hasznosított szubsztrátok száma is korlátozott. Nagy mennyiségű szubsztrát lebontására

van szükség ahhoz, hogy a sejtek szaporodásához, illetve a baktériumok energiaellátásához elegendő legyen a felszabaduló energia. Ebből kifolyólag a nagy mennyiségű betáplált biomasszához képest a fermentációs maradékban viszonylag kevés metanogén sejt található. [2] Az anaerob tápláléklánc elemei sem időben, sem térben nem különülnek el, de egymásra épülő folyamatok, így sorrendjük meghatározott. [2]

Ezen anaerob biológiai transzformációs folyamatok során képződő gázkeveréket biogáznak nevezzük, és alapvetően két komponensből áll, metánból és szén-dioxidból, de kis mennyiségben kén-hidrogént (H_2S), szén-monoxidot (CO), nitrogéngázt (N_2) és hidrogént (H_2) is tartalmaz. A metanogén mikroorganizmusok obligát (szigorúan) anaerobok, az oxigén kis koncentrációban is mérgező számukra. Normál életműködéseikhez, szaporodásukhoz legalább 50%-os víztartalmú közeget igényelnek. [5][6] A biogáz minőségét elsősorban a metán/szén-dioxid arány határozza meg. A szén-dioxid „haszontalan” gáz, tulajdonképpen csak hígítja

2. táblázat A metanogenezis kiindulási anyagai és a reakciók nettó egyenlete [1]

Szubsztrát	Reakció
Hidrogén/ CO_2	$4 \text{ H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{ H}_2\text{O}$
Formiát	$4 \text{ HCOO}^- + 4 \text{ H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
Szénmonoxid	$4 \text{ CO} + 5 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{ HCO}_3^- + 3 \text{ H}^+$
Etanol	$2 \text{ CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{ CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
H_2 /Metanol	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
Metanol	$4 \text{ CH}_3\text{OH} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$
Trimetilamin	$4 \text{ CH}_3\text{NH}^+ + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 4 \text{ NH}_4 + 3 \text{ H}^+$
Dimetilszulfid	$2 (\text{CH}_3)_2\text{S} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 2 \text{ H}_2\text{S} + \text{H}^+$
Acetát	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$
Piruvát	$4 \text{ CH}_3\text{COCO}_2\text{H} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{ CH}_4 + 7 \text{ CO}_2$

a biogázt, hiszen a gázmotorok a metán égetésével termelnek energiát. Nyilvánvaló tehát, hogy minél nagyobb metántartalomra kell törekedni. Az elérhető metántartalom 50-71% között mozog, a szén-dioxidtartalom általában 29-40%. A metántartalmat befolyásolja a rothasztási folyamat típusa (egylépcsős, kétlépcsős), az alapanyag tápanyagösszetétele (3. táblázat) és a hőmérséklet. A korrozív hatása miatt a kén-hidrogén kritikus komponens. A mennyisége – fehérjetartalomtól függően – csupán 0-1% között mozog. A biogáz kéntelenítésére több technológiai megoldás is ismert, amelyek között biológiai és kémiai módszerek egyaránt találhatók. [5] [6]

SZAKASZOS ÜZEMŰ LABORATÓRIUMI REAKTORTÍPUSOK A ROTHASZTÁS MODELLEZÉSÉRE

A szakaszos üzemű reaktorokba csak az üzembe helyezéskor adagolunk tápanyagot (szubsztrát). A rothasztókban zajló biológiai lebontási folyamatok modellezésére két, különböző alapelven működő rendszert használunk. A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. laboratóriumában a nyomásváltozás mérésén alapuló vizsgálatokat végezzük, az aerob lebontási vizsgálatok során már megismert **OxiTop® mérőrendszerrel** (cikksorozatunk második része). Kutatás-fejlesztési vizsgálatok során az Óbudai Egyetem Bánki

Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Biogáz Laboratóriumában alkalmazott Batch-rendszerrel is dolgoztunk, amely víz-kiszorításos elven működik. A következőkben mindkét rendszert bemutatjuk. Mindkét esetben a rothasztott iszapot oltókultúráként használjuk, amely a hozzá adagolt szerves szubsztrát (szilárd vagy folyékony, nagy szerves anyag tartalmú hulladék) lebontásával biogázt termel. A gázhozam, illetve bizonyos esetekben a gázminőség meghatározása a cél.

A nyomásváltozás mérés elvén működő OxiTop® Control AN6/AN12 mérőrendszer

elemeiből szerelhető össze. A rendszer része maga a modell-rothasztó, amely egy egyszerű, 1000 L űrtartalmú laboratóriumi üvegedény. Ebből kétféle típust használhatunk. Egynyílású: a teljes biogáz mennyiség meghatározására és a gázfejlődési görbe felvételére megfelelő.

Többnyílású: bevezetőnyílással és két szeptummal lezárt csonkkal rendelkezik, a gázösszetétel meghatározására is alkalmas.

A többnyílású üvegedénnyel végzett méréseknél a szeptumon keresztül a rendszer manipulálható: egy fecskendővel a gumikosárba adagolt lúggal (KOH) a szén-dioxid abszorbeálható (2. ábra). Az üvegedényeket biogázzal vagy inert gázzal (N₂) töltjük fel, így

3. táblázat Az alapvető szubsztrátcsoportok (szénhidrátok, fehérjék, zsír) elméleti biogáz- és metánhozama a lebontott szervesanyagra vonatkoztatva [5]

TÁPANYAG	ELMÉLETI GÁZTERMELÉS (m ³ /kg szerves a.)		GÁZÖSSZETÉTEL (%)	
	Biogáz	Metán	CH ⁴	CO ²
Szénhidrátok	0,75 – 83	0,38 – 0,42	50	50
Fehérjék	0,70 – 0,72	0,50	71	29
Zsír	1,25 – 1,43	0,86 – 1,04	68 – 70	30 – 32



2. ábra Az OxiTop® Control AN6/AN12 mérőrendszerrel végzett vizsgálatokhoz használható üvegedények (balra) és a befecskendezés a több nyílású üvegbe (jobbra)

biztosítva az anaerob környezetet a kísérletek során. Az üvegedények biogázzal való feltöltéséhez a rothasztók gázmintavételi csomját használjuk, amelyre csavaros csatlakozással illeszthetünk megfelelő méretű szilikoncsövet.

A mérőrendszerben mindig a modellezni kívánt rothasztókból származó iszapot használjuk oltókultúráként, amelyet az adott rothasztó üzemi hőmérsékletén tesztelünk (az FCsM zrt. telepein ez 37°C). A vizsgálatokhoz bemért iszapmennyiség üzemenként eltérő lehet (25–200 ml, vizsgálatainknál általában 50 mL), így előzetes felmérést igényel a módszer

helyi viszonyokhoz igazítása. A bemért iszap mennyisége az iszap mikrobiális aktivitásától is függ. Előfordulhat tehát, hogy néha igazítani kell a már jól bevált adagolásokon.

Az iszap bakteriális biomasszájának anyagcserefolyamatai során képződik a biogáz, és emiatt az üvegedények gázterében a nyomás folyamatosan változik. Az OxiTop-C mérőfejek (3. ábra) ezt a nyomásátváltozást regisztrálják, és a kísérlet teljes időtartamára automatikusan eltárolják. A rendszer részét képező vezérlő egységgel, a controllerrel (OxiTop® OC 110 Controller) (3. ábra) a mérőpalackok felnyitása nélkül tudjuk nyomon



3. ábra A szubsztrát és iszap keverékével feltöltött OxiTop üvegedények (balra) és az OxiTop® OC 110 Controller elnevezésű vezérlőegység (jobbra)

követni a biogáztermelést, és a rögzített adatok vezeték nélkül, infravörös hullám útján beolvashatóak. Az adatsorok a mérések közben, illetve végén számítógépre menthetők, majd Excel programmal feldolgozhatóak. A mérés indítása, a mért adatok beolvasása és a mérésbeállítások aktualizálása is a kontrollerrel történik.

Mint fentebb említettük, a mérések összeállítását több szempontból is optimalizálni kell, mivel a nyomásérzékelő fejek mérési tartománya komoly korlátozást jelent. A mérési tartomány elméletben <500 hPa, de a gyakorlatban ez inkább <350 hPa. A nyomásváltozás a mérés során negatív tartományban is mozoghat. A vizsgálatok körülményeit úgy kell alakítani, hogy a nyomásváltozás-görbék ezen a szűk mérési tartományon belül maradjanak. A rothasztott iszap mennyiségének helyes megválasztása mellett a vizsgált szubsztrát adagolt mennyisége is hosszas előtesztelések során optimalizálható. Az üvegedényeket megnyitni csak a vizsgálat lezárásával lehet, hiszen azok zárt rendszerként működnek. Ebből következik, hogy ez a rendszer alapvetően szakszos rátáplálással működtethető, azaz a vizsgálat elején, egyetlen alkalommal adagolunk szubsztrátot az iszaphoz.

Többnyílású üvegedények használata esetén az egyik csonkba, a szeptumos csavar alá gumikosarat illesztünk (2. ábra), a másikat pedig csak a szeptummal zárjuk le. Az üvegedényeket – ebben az esetben is – még a bemérés előtt a rothasztók (gáz) mintavevő csonkján keresztül biogázzal töltjük fel. Nitrogéngáz használata esetén a gázzal az üveg a bemérés után is átmosható, a két oldalsó csonkon keresztül. Az üvegek 1000 mL-es osztérfogatából 400 mL a mintatérfogó, 600 mL a gáztér. A 400 mL-es mintatérfogót a rothasztók iszapja,

csapvíz és a tesztelni kívánt szubsztrát tölti ki együttesen. Ezek aránya mérésről-mérésre változhat. Az üvegedényeket az ún. „fejfel” zárjuk le. Egynyílású üvegek esetén ez az egyetlen zárható rész. A beoltott mintákkal töltött, lezárt mérőedényeket 37° C hőmérsékleten inkubáljuk standard módon 5 napig, sötétben (3. ábra). Az 5 napos mérésidőtől eltérhetünk, ha a rothasztó tartózkodási idejét szeretnénk modellezni. Az üvegreaktorok tartalmát mágneses keverőbabák és indukciós keverőlapok segítségével folyamatosan mozgásban tartjuk. Érdekes az iszapot a vizsgálatok előtt 1 napig éheztetni, vagyis a rothasztóból kiemelt mennyiséget szubsztrát rátáplálása nélkül 37°C-on termosztálni, így kiküszöböljük a rothasztókba táplált könnyen bomló szubsztrátok méréstorzító hatását. Az éhezés során az iszap saját szerves anyagát bontja, azaz endogén fázisba kerül. A biomassza egy része elpusztul, és tápanyagként szolgál az életben maradó biomasszahányad számára. Nincs szükség éheztetésre, ha nincs ko-fermentáció az üzemben.

Többféle szubsztrát adagolási módszert alkalmazhatunk.

1. KOI-alapú (Kémiai Oxigénigény) adagolás
 - Egyszerű gázhozam meghatározásnál üvegenként 500 mg KOI-ekvivalens mintamennyiség adagolása optimális. Belső kontrollként glükózt használunk, amelynek szakirodalomból ismert a gázhozama (0,75 Nliter / g glükóz). Ebben az esetben készítünk vakot (csak iszap és csapvíz), egy kontrollt (iszap, víz és 500 mg KOI glükóz) és egy mintát (iszap, csapvíz és 500 mg KOI-ekvivalens minta) bemérést. A gázhozamot a glükóz által produkált nyomásváltozáshoz viszonyítva számoljuk. (4. ábra)

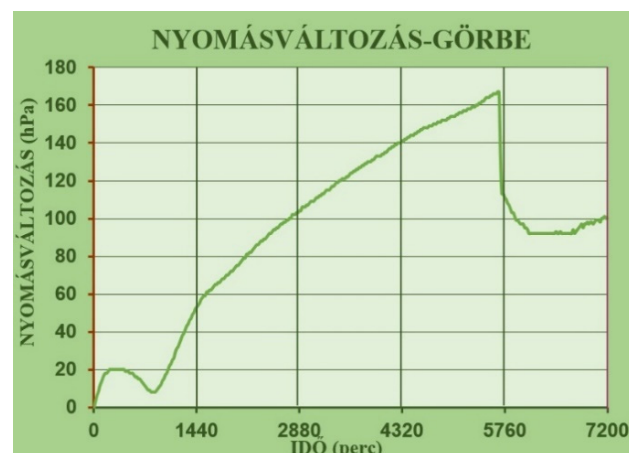
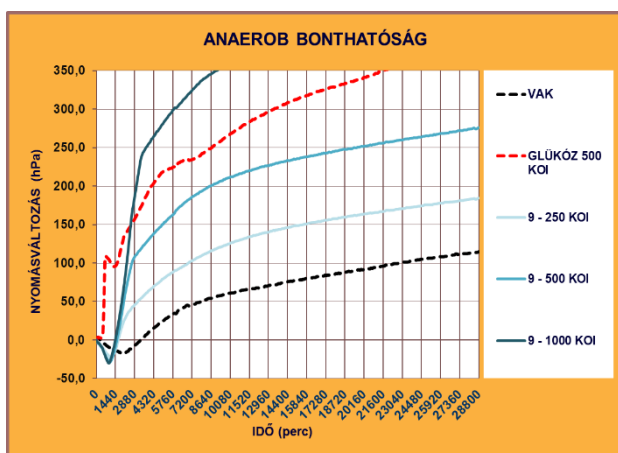
- A toxicitás tesztelése és az üzemi adagolás megválasztása okán minden minta esetében egységesen három adagolást vizsgálunk: 250, 500 és 1000 mg KOI-ekvivalens mennyiséget. A gázhozamgörbéket egymáshoz viszonyítva vizsgáljuk. A legnagyobb fajlagos gázhozamot eredményező adagolás választható üzemeltetésnél, illetve a vak felett futó nyomásgörbék mutatják, hogy a minta nem toxikus. (4. ábra, balra)
- Ha nagyon kis mennyiségű anyag toxicitását vizsgáljuk, amely a módszerrel mérhető nyomásváltozást nem ad, akkor glükóz mellé adagolva láthatjuk, hogy mennyire és milyen irányban módosítja a glükóz gázhozamát. (5. ábra, balra)

2. Szerves anyag arány alapú adagolás esetén 1:0,5 (iszap : szubsztrát szerves anyag) alkalmazható sikeresen. Ebben az esetben is készítünk vakot, esetleg glükóz kontroll is használható (a glükóz 100% szerves anyag). Ez a megközelítés az üzemeltetők számára jobban értelmezhető, de nem minden alapanyag esetén alkalmazható sikeresen.

3. Térfogat alapú adagolás is választható, amely folyékony hulladékok esetében hasznos.

Fontos kiemelni, hogy minden bemérés esetén három párhuzamos mérést indítunk. Egyrészt alapvetően biológiai vizsgálatról van szó, így a vizsgálatok során nagy szórásértékekre számíthatunk. Másrészt az OxiTop-C mérőfejek a rendszeres használat során bármikor meghibásodhatnak, esetleg lemerülhet az elem, így elveszhet a rögzített adatsor. Minden méréssorozathoz szubsztrát nélküli vakok (csak iszap és csapvíz) is készülnek, amelyek negatív kontrollként szolgálnak. A szubsztrát jelenlétében képződő gázmenyiséget, illetve a gáznyomásváltozás-görbéket a vakmintához képest értékeljük.

Többnyílású edény használatánál a 4. napon (illetve a mérési idő lejártá előtt egy nappal) a szeptumon keresztül fecskendővel 1 mL KOH-ot (30% v/v) adagolunk a gumikosárba. A KOH megkötö a CO₂-ot a gáztérben, és így az 5. napra csökkent nyomást mérhetünk az üvegben. A visszamaradó (csökkent) nyomás megfelel a képződött metánhányadnak



4. ábra A nyomásváltozásgörbék KOI-alapú adagolás esetén (balra) és a többnyílású üvegedénnyel rögzíthető görbe (jobbra), amelyről a gázminőség is leolvasható. A nyomásváltozás-görbén gyors csökkenés látható a gáztérbe adagolt KOH hatására, mivel a KOH megkötö a szén-dioxidot (jobbra)

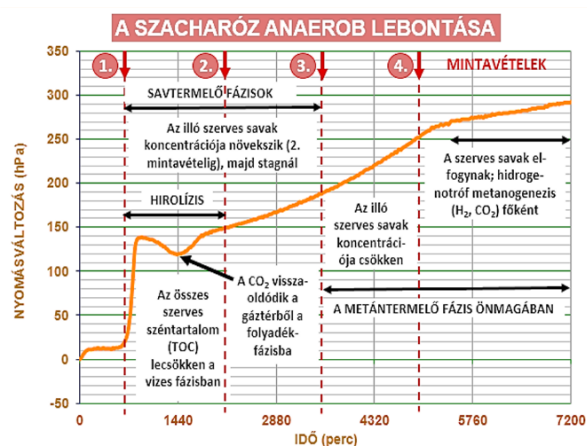
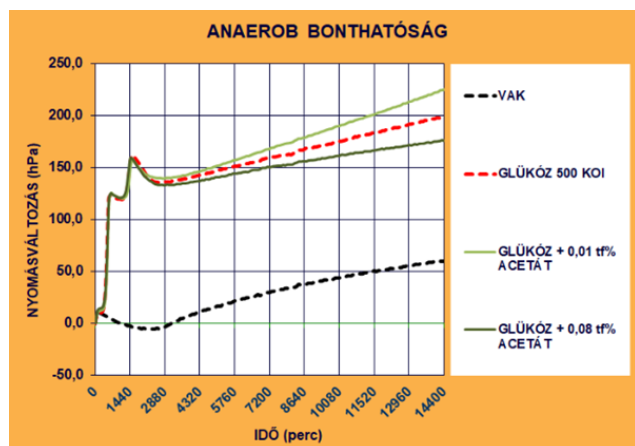
(4. ábra, jobbra). Egynyílású edények használatánál a fej a teljes gáztermelést/gázhozamot mutatja a nyomásváltozáson keresztül.

A bonthatósági vizsgálatokhoz kémiai analízist (KOI, TOC/TIC, pH, összes illósav) is csatolhatunk, amelyet az iszapból, vagy annak folyadék fázisából (centrifugálás) végzünk. Ezzel részletes képet alkothatunk az üvegreaktorokban zajló folyamatokról.

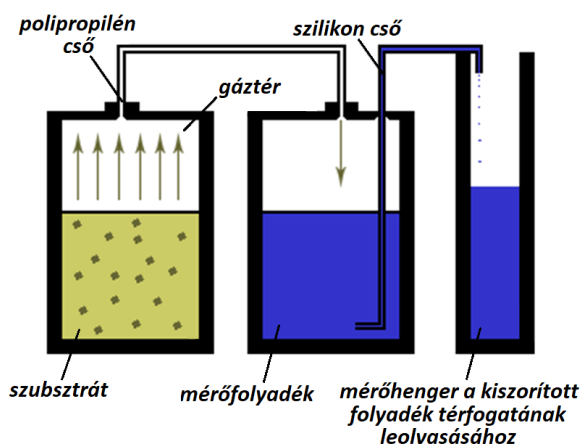
Az 5. ábrán (jobb oldal) egy ilyen vizsgálatosorozat eredménye látható. A folyadékfázis pH, összes illósav, TOC és TIC eredményei alapján a nyomásgörbe alakjának változásához biológiai folyamatokat rendeltünk. Tehát a nyomásgörbe alakja biológiai információkat takar, amelyet a kémiai analízis segítségével tudunk leolvasni. A kémiai eredményeket helyszűke miatt nem közöljük, de a következtetések logikai láncolatát röviden összefoglaljuk.

A szacharóz anaerob lebontása során (5. ábra, jobb oldal) 12 óra elteltével gyors hidrolízis zajlik és ennek következtében intenzív gázfejlődés indul. A hidrolízis az 1. és a 2. mintavételi időpont között zajlik, ugyanis az összes szerves széntartalom (TOC) lecsökken a vizes fázisban. Természetesen a hidrolízissel

együtt a savtermelés is elindul, amely a 3. mintavételi időpontig tart. Eddig az illó szerves savak koncentrációja növekszik, de a 3. mintavételi pont után nem változik. Ezek alapján a savtermelő fázisok a harmadik mintavételi időpontig lezárulnak. A savtermelő fázisokra jellemző intenzívebb CO₂ fejlődés következménye az 1. mintavételi időponttól induló intenzív gázfejlődési csúcs. Ezen a rövid szakaszon a CO₂/CH₄ arány növekszik és a biogáz CO₂-tartalma egészen 65%-ig nő. Eközben a folyadékfázis összes szerves széntartalma (TIC) csökken, jelezve, hogy a termelő CO₂ a gáztérbe távozik a folyadékfázisból. A rövid csúcs után a nyomásváltozás-görbe esik, mivel a képződött szén-dioxid visszaoldódik a folyadékfázisba. Ezt visszaigazolja az, hogy a folyadékfázisban a TIC növekszik. A metántermelő fázis kezdetét nem lehet kimutatni. Mivel a 3. és a 4. mintavételi időpont között az illó szerves savak koncentrációja csökken, feltételezhető, hogy a savtermelés már befejeződött és csak a metántermelés zajlik. A 4. mintavételi időpont után a gázfejlődés sebessége visszaesik és a biogáz metántartalma növekszik. Valószínűleg hidrogenotróf metanogenezis zajlik,



5. ábra Az ecetsav hatása a glükóz gázhozamára (balra). Jól látható, hogy a 0,01 térfogat %-os (tf%) adagolás serkentőleg hat, de a 0,08 tf%-os már gátol. A szacharóz nyomásgörbe lefutásának értékelése kiegészítő kémiai analízis segítségével (jobbra) [7].



6. ábra A Batch-rendszer áttekintő rajza (balra) a fotója (jobbra) [8]

mivel az ecetsav – az acetotróf metántermelő szubsztrátja – elfogyott. [7]

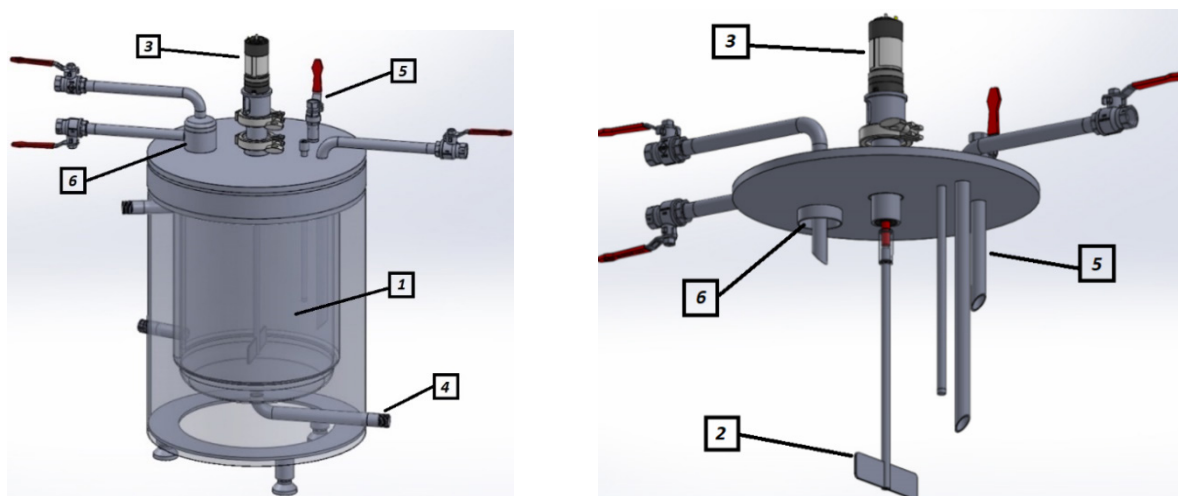
Óbudai Egyetem Biogáz Laboratóriumában Batch-rendszere (VDI 4630 német standard alapján) csak a gázhozammérés alapelvein tér el ez előbbtől, hiszen ez vízkiszorításos módszerrel határozza meg a termelő biogáz mennyiségét. Maga a „batch” kifejezés a szakaszos jellegre utal, amely az OxiTop rendszer jellemzője is. Tehát a reaktorokat a vizsgálandó keverékkel történő feltöltés után rögtön lezárjuk, és csak a kísérlet végén nyitjuk ki újra. Így valójában ragadványnévről van szó.

A reaktorok egyenként 400 ml nettó térfogatúak. A rendszerben a biogáz az első üveg gázteréből a propilén csövön keresztül a második, mérőfolyadékkal megtöltött üveg légterébe áramlik, majd a térfogat- és nyomásmennyiség növekedésének következtében a mérőfolyadék a szilikoncsövön keresztül a harmadik, gázhozammérő üvegedénybe (mérőhenger) folyik át. Kompresszáls hiányában a biogáz standardnyomáson, 101325 Pa-on keletkezik, és térfogata megegyezik a kiszorított mérőfolyadék térfogatával. A bioreaktorok állandó (37°C) hőmérsékletét MIM LP 321/3 szárítószekrény biztosítja. [8][9][10] A rendszer áttekintő rajza és fényképe a 6. ábrán látható.

A reaktorüvegek gázterét nitrogéngázzal öblítik. A negatív kontroll (vak) gázmennyiség értéke a későbbiekben levonásra került az alapanyagok fermentációja során kapott értékekből, így kapják meg a szubsztrát biogázhozamát. A kiszorított vízmennyiség – és így a képződő gázmennyiség – tömeg- és térfogattal mérésével egyaránt követhető. A gázminőséget gázkromatográfiával követik nyomon, a szilikoncsövön keresztül, Hamilton Gastight 1710 – 100 µl-es gáztűvel vett minták vizsgálatával. Kiegészítő száraz- és szervesanyag tartalom méréseket végeznek a kísérletekhez. Az adagolásokat és a vizsgálat egyéb körülményeit a VDI 4630 német standard alapján választják meg. [11][12]

FOLYAMATOS ÜZEMŰ LABORATÓRIUMI REAKTORTÍPUSOK A ROTHASZTÁS MODELLEZÉSÉRE

A folyamatos üzemű reaktorokat rendszeresen tápláljuk, nem csak a rendszer üzembe helyezésénél látjuk el tápanyaggal (ld. szakaszos üzem). A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen a potenciális ko-szubsztrátok vizsgálatára laboratóriumi méretű fermentációs reaktorrendszer áll rendelkezésre, mellyel a különféle szerves anyagok anaerob biológiai



7. ábra Laboratóriumi fermentációs reaktor felépítése. Rozsdamentes reaktor (1), keverőlepát (2), keverőmotor (3), rátápláló cső (5), elvételi cső (4), gázdóm (6).

bonthatóságát, valamint a várható biogáz hozamát határozhatjuk meg. A kialakított reaktorrendszer 6 db 14 liter hasznos térfogatú (össztérfogat 18 liter) fermentorból, 6 db gázgyűjtő tartályból, 6 db vízgyűjtő ballonból és 1 db automata szabályzású elektromos fűtőrendszerből áll. A fermentorok felépítése a 7. ábrán és a 8. ábrán követhető, a fűtőbojler a 9. ábrán látható.

A fermentorok duplafalú, palástfűtéses, rozsdamentes reaktorok (1), melyek automata szabályzású, aszinkron keverőmotorok (3) segítségével hajtott lapátos keverő rendszerrel (2) vannak ellátva. A reaktorfedél és a keverő tengely tömítése gázzáró. A reaktorban lévő

folyadék homogenizálását perdülettörő lemezek segítik, áramlástani holtterek kialakulásának, valamint üledék lerakódásának megelőzése érdekében a reaktorfenék íves kialakítású. Alapanyag betáplálására (5) a reaktorfedélen kialakított csapon keresztül van lehetőség, a fermentációs végterméket a reaktorok alján lévő elvételi csövön (4) keresztül lehet leengedni. A termelődött biogáz mennyiségét a hasonló kialakítású reaktorrendszerek esetében gyakran alkalmazott vízkiszorításos módszerrel [8][9][10] mérjük. A biogáz a gázdómon (6) keresztül távozik a reaktorból, majd vízzel feltöltött, 40 literes térfogatú rozsdamentes gázgyűjtő tartályokba kerül átvezetésre. Az átvezetett



8. ábra Laboratóriumi fermentációs reaktorrendszer

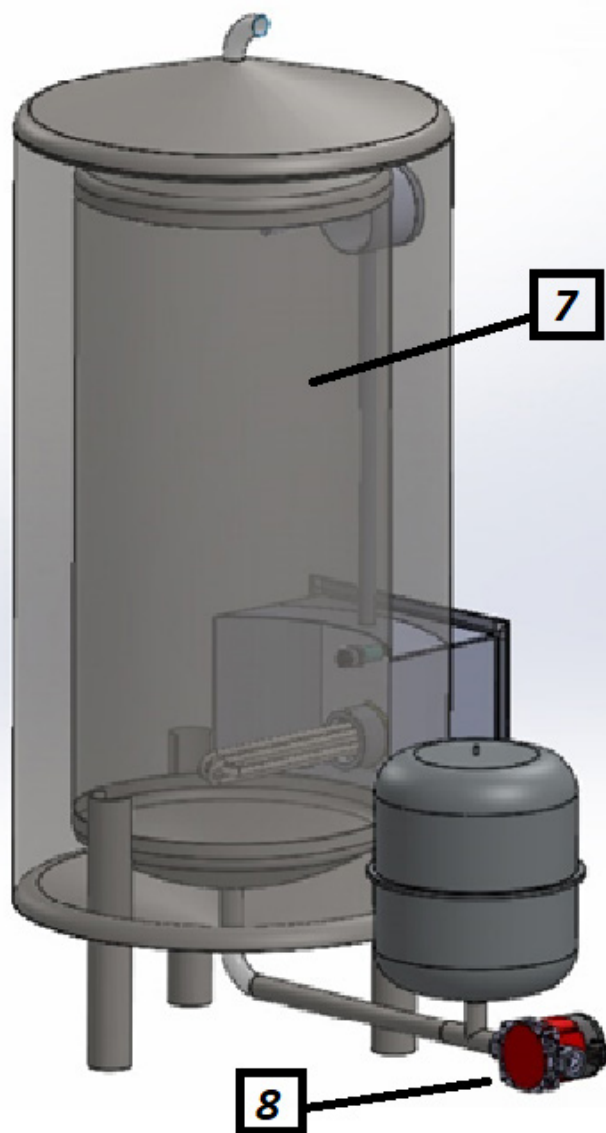
biogáz a gáztartályokból kiszorítja a térfogatával arányos mennyiségű vizet, melyet 40 literes műanyag ballonokban gyűjtünk. A biogáz összetételét (CH_4 , CO_2 , O_2 koncentrációját, % v/v) és kénhidrogén tartalmát (ppm) Goliath Esders mobil biogáz analizátorral mérjük.

A fermentorok fűtése és hőmérsékletük közel állandó értéken tartása érdekében egy külső szigeteléssel ellátott, zárt rendszerű központi fűtőrendszer került kialakításra (9. ábra) (7). A keringető szivattyú (8) biztosítja a teljes reaktorrendszer közel állandó üzemi hőmérsékletét, a fermentorok párhuzamosan vannak csatlakoztatva a központi fűtőrendszer előremenő és visszatérő vezetékére.

A vizsgálatok előkészítésekor a kísérleti fermentációs rendszer reaktorait a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep üzemi anaerob rothasztóinak recirkulációs vezetékéből elvett iszappal töltjük fel. A kísérleti reaktorokba azonos mennyiségű, homogén iszap kerül. A 6 db kísérleti reaktor segítségével 2 vagy 3 párhuzamos mérés elvégzésére van lehetőség (ezek közül 1 párhuzamos mérés mindig a vak, tehát két rothasztóba kizárólag szennyvíziszapot adagolunk), ennek megfelelően választjuk meg az adagolni kívánt alapanyag minőségét és mennyiségét.

A reaktorbeli tartózkodási idő biztosítása adott mennyiségű rothasztott iszap (fermentációs maradék) elvételével, majd azzal megegyező mennyiségű biogáz alapanyag (alap szubsztrát + ko-szubsztrát) betáplálásával történik.

A vizsgálatok során az alap szubsztrát a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen képződő kevert iszap, melyet gravitációs és gépi elősűrítést követően veszünk el a rendszerből. A kevert iszap tartalmazhat dugulást okozó szálalanyagokat, nagyobb darabos szennyeződéseket, a dugulások megelőzése érdekében 0,5



9. ábra Elektromos fűtőbojler

mm-es perforációval ellátott szűrőn engedjük át az iszapot a homogenizálás és a reaktorokba történő betáplálás előtt. Az előkészített sűrített kevert iszappal együtt kerül beadagolásra a reaktorokba a vizsgált ko-szubsztrát. A vizsgálatok során a kísérleti reaktorok táplálására napi egy alkalommal kerül sor.

Az elősűrített kevert iszap szárazanyag-tartalma a telep iszapsűrítési technológiájának aktuális beállításától nagymértékben függ, ezért a fermentorokba adagolt iszapot minden betáplálást megelőzően mintázzuk, jellemző

paramétereit nyomon követjük (4. táblázat). A kísérleti reaktorok minőségi jellemzői lassabban változnak, ezért a fermentorok iszapját ritkábban, hetente egy alkalommal vizsgáljuk.

A MÓDSZEREK ÖSSZEVETÉSE

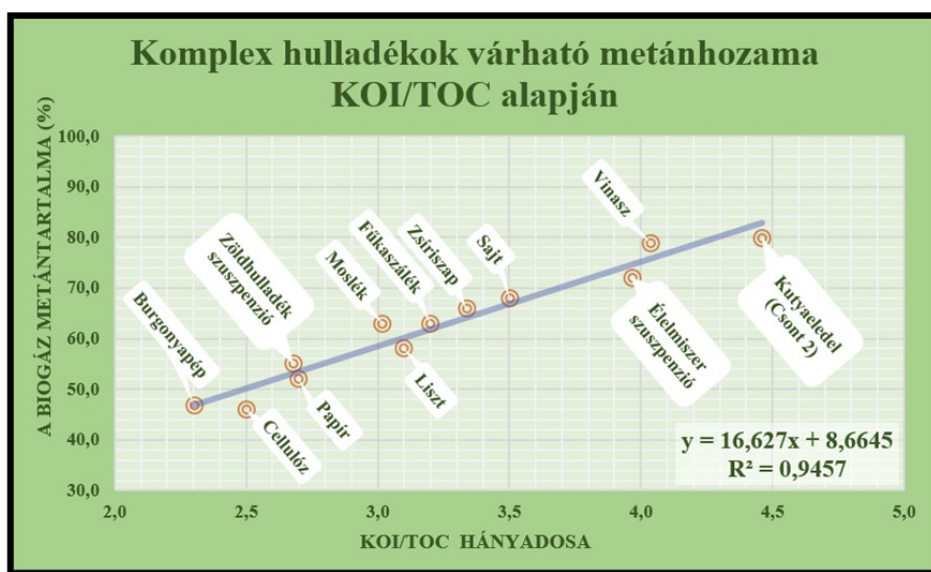
A szakaszos üzemű reaktorok esetében a szubsztrátot egyszerre adagoljuk be a vizsgálat teljes időtartamára. A gáznyomásgörbéken a gáztermelés dinamikáját is nyomon követhetjük. Ez a dinamika azonban más, mint folyamatos üzem esetében, mivel ez utóbbi esetében a gáztermelés a felfutás után folyamatossá válik. Így a szakaszos üzem ugyan a szubsztrát lebontása során zajló folyamatokról plusz információt szolgáltat a gázhozam időbeli változásán keresztül, de nem jósolja tökéletesen az üzemi rothasztók működését. Azért sem teszi ezt, mert a szakaszos rátáplálás kizárja az adaptáció hatását, amely folyamatos üzem során mindenképpen érvényesül. Így előfordul, hogy bizonyos szubsztrátok (pl. ecetsav) már kisebb koncentrációnál is toxikusnak mutatkoznak szakaszos üzemben, míg folyamatos üzemeltetésnél jóval

nagyobb koncentrációt képesek a mikroorganizmusok tolerálni, illetve hasznosítani.

További torzító hatása lehet a rendszernek, ha a biogázt nem vezetjük el a vizsgálat során, és bezárva marad a gáztérben. A biológiai lebontási folyamatok során szén-dioxid is termelődik, amely nem csak termék, hanem szubsztrátja is a további anyagcserefolyamatoknak. A szén-dioxid a hidrogénnel együtt a hidrogenotróf metántermelők szubsztrátja. Tehát a zárt reaktorbeli nyomás növekedésével a képződő szén-dioxid is fokozatosan metánná konvertálódik, ami a biogáz metántartalmát megnöveli. Az üzemi körülmények között, illetve a folyamatos üzemű vizsgálatok esetén a reaktortérből elvezetjük a termelődő biogázt, és ezzel a szén-dioxidot is eltávolítjuk a fejlődésének helyéről.

KIEGÉSZÍTŐ VIZSGÁLATOK ÉS MÓDSZEREK

Fontos kiegészítő információval szolgál a ko-szubsztrátok anaerob rothasztásához azok szén-nitrogén-foszfor aránya. A bakétrium sejtek C:N aránya 3,8 – 9,5 [13][14][15] között változik, és szaporodásuk során ugyanezt az arányt kell



10. ábra A biogáz várható metántartalmát a szubsztrát KOI/TOC hányadosának függvényében és a gyakori hulladékanyagok hányadosa. [11]

reprodukálniuk újra meg újra. Érthető tehát, hogy a tápközeg C:N aránya döntő befolyással van a baktériumok élettevékenységeire, anyagcseréjükre. A baktériumközösség csak annyi szerves szénvegyületet képes eltávolítani a szennyvízből, amelyhez megfelelő arányban áll rendelkezésre nitrogén. A foszfor ugyanilyen fontos szerepet tölt be, hiszen a sejtanyagok alap építőelemei között szerepel és a sejtek működéséhez nélkülözhetetlen a megfelelő mennyiség jelenléte. A szennyvíztisztításban ökol szabályként kezelt 100:7:1 szén-nitrogén-foszfor arány (itt: KOI:TK-N:TP) a rothasztásnál is érvényes.

Ha nincs lehetőségünk a biogáz összetételének meghatározására, akkor becsülhetjük azt a szubsztrát KOI és TOC (Összes szerves széntartalom) hányadosa alapján. Azon ko-szubsztrátokat célszerű a fermentorokban hasznosítani, amelyekre KOI/TOC >3, ilyenkor a képződő biogáz metántartalma várhatóan >60 % v/v. A biogáz várható metántartalmát a szubsztrát KOI/TOC hányadosának függvényében ábrázolja a 10. ábra. Általában az üvegreaktorokkal végzett gázhozammérések nem igényelnek sok kiegészítő vizsgálatot. A pH, a vezetőképesség, a száraz és szervesanyag tartalom meghatározása tekinthető rutineljárásnak. K+F feladatok esetében az iszap, illetve a folyadékfázis (centrifugával

elválasztva) részletesebb kémiai analízise is elvárható. Ebben az esetben a folyadékfázisból KOI, TOC/TIC (TIC = Összes szerves széntartalom), ammónia és ortofoszfát koncentráció stb. mérhető. Az iszap enzimeinek aktivitása (dehidrogenáz, proteáz, lipáz, celluláz) is meghatározható. Szakaszos üzemeltetésű rendszerekben mindig figyelembe kell venni, hogy a kémiai analízis a rendszer felnyitásával, azaz a mérés megszakításával végezhető el.

A folyamatos üzemű reaktorrendszer ellenőrzése jóval egyszerűbb a szakaszos üzeműeknél. Rendszeres kémiai mintavétel zajlik, amely akár minden rátáplálásnál elvégezhető. A kivett iszapmennyiséget általában pótolni kell, különben az iszap mennyisége fogy a reaktorban. A leggyakrabban vizsgált paramétereket a 4. táblázatban foglaltuk össze. Emellett a biogáz összetétele is rendszeresen meghatározható hordozható gázanalizátor segítségével.

ÖSSZEFOGLALÁS

A Dél-pesti és az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen a biogáztermelés intenzifikálása érdekében külső forrásból érkező szilárd és folyékony szerves hulladékokat fogadnak és szennyvíztisztításból származó iszappal együtt kezelik (ko-fermentáció). A szerves hulladékok

4. táblázat A laboratóriumi anaerob fermentációs reaktorrendszer ellenőrzésére alkalmazott paraméterek és vizsgálati szabványok. A betáplált iszapot hetente 5 alkalommal (minden rátáplálásnál), a reaktorok iszapját hetente egy alkalommal vizsgáljuk.

Betáplált iszap	Rothasztott iszap reaktoronként	Vizsgálati módszer, szabvány
száraz anyag	száraz anyag	tömegmérés (mérési bizonytalanság: 10 %) MSZ EN 12880:2000
izzítási veszteség	izzítási veszteség	tömegmérés (mérési bizonytalanság: 10 %) MSZ EN 12879:2000
pH	pH	potenciometria (mérési tartomány: 2 – 12) MSZ EN 12176:2000
	illó szerves savak	SM (Standard Methods) 5560 C - Organic and volatile acids Distillation Method
	lúgosság	SM (Standard Methods) 2320B - Alkalinity Titration Method

ártalmatlanításának ez a módja környezetkímélő és jelentős mennyiségű zöldenergia forrása, így a szennyvíztisztítás hagyományos szerepe kibővült. A beszállított hulladékok kezelését szabályozó Hulladékgazdálkodási engedélyek tartalmazzák a telepeken fogadható hulladékok fajtáját azonosítójuk szerint, valamint a fogadható mennyiséget. A hulladékot szerződött partnerek szállítják be a telephelyekre együttműködési megállapodásban rögzítettek szerint. Azonban a szennyvíztisztítás és iszapkezelés stabil üzemeltetésének érdekében elengedhetetlen a beszállított biogázalapanyagok előzetes vizsgálata, amely során a fajlagos biogázhozamot, annak dinamikáját és a toxicitást mérjük fel.

A rothasztók mikroorganizmus közössége a nagy molekulatömegű komplex szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok) több lépésben metánná és szén-dioxiddá alakítja át az ún. anaerob tápláléklánc mentén. A biológiai lebontás közösségi szinten zajlik, több mikroorganizmuscsoport együttműködését igényli. A folyamatsor a hidrolízis, az elsődleges és a másodlagos savtermelés, valamint a metántermelés fázisára bontható. A biogáz minőségét elsősorban a metán/szén-dioxid arány határozza meg, de a szén-dioxid „haszontalan” gáznak minősül, hiszen a gázmotorok a metán égetésével termelnek energiát, ezért minél nagyobb

metántartalomra szükséges törekedni. Az elérhető metántartalom 50-75% tartományban változik.

A szakaszos üzemű reaktorokba csak a kiinduláskor adagolunk tápanyagot (szubsztrát). A rothasztókban zajló biológiai lebontási folyamatok modellezésére két, különböző alapelven működő rendszert használunk: a nyomásváltozás mérésén és a vízkiszorítás elvén működőt. A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. laboratóriumában a nyomásváltozás mérésén alapuló vizsgálatokat végezzük, OxiTop® mérőrendszerrel. A kutatás-fejlesztési vizsgálatok során többször együttműködtünk az Óbudai Egyetem Biogáz Laboratóriumával, ahol vízkiszorításos elven működő Batch-rendszerrel is dolgoznak. Az OxiTop rendszer zárt, a termelődő biogázt beszorítjuk az üvegreaktorok gázterébe. Ezzel szemben a Batch-rendszer nyitott, a biogázt csöveken keresztül kivezetjük tartályokból. A folyamatos üzemű reaktorokat rendszeresen tápláljuk, nem csak a rendszer indulásánál. Ilyen reaktorok üzemelnek a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen, ahol a potenciális ko-szubsztrátok vizsgálatára építettünk ki laboratóriumi méretű fermentációs reaktorrendszert.

► 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.