

Anaerob lebontás alap-folyamata és a rothasztók ellenőrzése I.

Oláh József* – Öllös Géza** – Palkó György* – Rása Gábor* – Tarjányné Szikora Szilvia*
 (* – Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.; ** – Professor emeritus)

Bevezetés

Az anaerob lebontási folyamat a természet egyik meghatározó biológiai folyamata. A lebontási alapfolyamat ismerete egyaránt fontos a tervező, üzemeltető számára, hiszen az ismeretek birtokában az anaerob rothasztók üzemelése során nem támasztanak olyan elvárásokat, amelyet a biológiai folyamat eleve nem tesz lehetővé. Az anaerob lebontásnak a hulladékok kezelésében, a biogáz előállítás megnőtt a jelentősége, ezért szükséges, hogy a biológiai folyamatról a legpontosabb képet nyerjünk. Az alapfolyamat ismeretében a kontroll és beavatkozási lehetőségek is egyértelművé válnak.

1. A komplex anaerob lebontási folyamat

Mata-Alvarez (2003) és *Siegrist et al.* (1993) szerint az anaerob folyamat négy lépcsőre osztható. Az anaerob rendszer mikroba közössége nagyrészt baktériumok alkotják, melyek a nagy molekulájú komplex szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok) bonyolult mechanizmussal metánná alakítják át. A baktériumok között a szinergetikus kapcsolat gyakran felismerhető. A baktériumok mellett számos gomba faj és protozoa is részt vesz a lebontási folyamatban. A komplex átalakítást, melynek végső terméke a szén-dioxid és a metán az alábbi baktérium csoportok végzik:

Hidrolízist végző baktériumok a komplex nagy-molekulájú szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok, cellulóz, lignin) aminosavvá, glükózzá, zsírsavakká, glicerinné alakítják át. Ezeket a monomer hidrolízis termékeket más baktérium csoportok tovább bontják. Bizonyos esetekben, például cellulóz vagy lignin tartalmú szennyvizeknél a hidrolízis lassú folyamat, ezért a hidrolízis folyamata meghatározó lépés is lehet. Fehérjéket és zsírokat tartalmazó szennyvizeknél a hidrolízis gyors és a folyamat eredményeképpen képződő illósavak koncentrációja megnőhet, és ez akadályozza a metán termelő baktériumok elszaporodását.

Savtermelő baktériumok a szénhidrátokat és az aminosavakat szerves savakká (ecetsav, propionsav, hangyasav, tejsav, vajsav), alkoholokká és ketonokká, szén-dioxiddá és hidrogénné alakítják át. A szénhidrátok hidrolízisének az ecetsav a legfontosabb termék. A savtermelés határfoka a hőmérséklet, pH és redoxpotenciál környezeti tényezőktől függ.

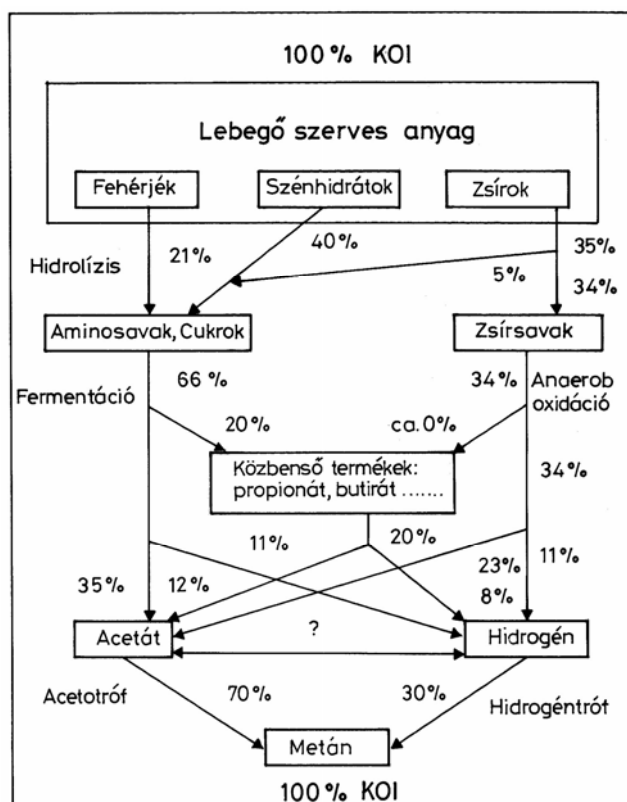
Ecetsavtermelő baktériumok a zsírsavakat (pl. propionsav, vajsav) és az alkoholokat ecetsavvá, hidrogénné és szén-dioxiddá alakítják. Ezeket a termékeket a metántermelő baktériumok hasznosítják. A zsírsav átalakításhoz a hidrogén parciális nyomás értékének kicsinynek kell lenni. Ha nagy a hidrogén parciális nyomása, akkor az ecetsav-képződés visszaszorul és a szubsztrátból etanol képződik és a metántermelés csökken.

A metántermelő baktériumok az ecetsav, formiát, szén-dioxid és hidrogén szubsztrátokból képezi a metánt. Metántermelő baktériumok a Földi-környezetben nagyon elterjedtek (tengerfenék, talaj, kérődzők gyomra) tekinthetők. A baktériumok lehetnek, mind Gram-pozitív és mind Gram-negatív festődők és az alakjuk is sokféle lehet. A metántermelők lassan szaporodnak, mert a generációs idejük nagy (35 °C-on 2 nap és 10 °C-on 50 nap).

A komplex folyamat magában foglalja a részfolyamatok kapcsolatait és azok összefüggéseit. *Siegrist et al.* (1993) a komplex anaerob lebontási folyamatot tárgyalja, jó áttekintést ad a részfolyamatok bonyolult kapcsolatáról. Lebontási folyamatot az *1.ábra* (*Siegrist et al.*, 1993) mutatja. Az anaerob lebontás az alábbi részfolyamatokból áll:

1. A szerves lebegőanyagot a hidrolizáló baktériumok nagy molekulájú fehérje, szénhidrát és lipid frakcióra bontják szét. Ezt követően a hidrolízis tovább folyik és kisebb molekulájú hidrolízis termékek (szerves savak, összetett cukrok) képződnek.
2. A nagy molekulájú oligomer és polimer anyagokat a hidrolizáló baktériumok monomer termékekké alakítják (etanol, ketonok, tejsav, illósavak, aminosavak). A 100 % KOI -ból kiindulva a hidrolízis következtében 66 % -ban aminosavak, cukrok és 34 %-ban illó zsírsavak képződnek.
3. A fermentáció hatására közbenső intermedier termékek (20%: propion- és vajsav) és ecetsav (35%) képződnek. Ezzel párhuzamosan a redukált termékek oxidációjával az obligát ecetsavtermelő baktériumok hidrogént (11%), szén-dioxidot és ecetsavat (23 %) állítanak elő.

4. A homoacetogén baktériumok a hidrogén felhasználásával a szén-dioxidot redukálják és ecetsavat termelnek.
5. Szulfát és nitrát jelenlétében a szulfátredukáló vagy a nitrát redukáló baktériumok a redukált termékeket (alkoholok, vajsav, propionsav) szén-dioxiddá és ecetsavvá oxidálják.
6. A szulfátredukáló vagy a nitrát redukáló baktériumok az ecetsavat szén-dioxiddá oxidálják.
7. A szulfátredukáló vagy a nitrátredukáló baktériumok a hidrogént vagy hangyasavat, formiátot oxidálják.
8. Ecetsavat hasznosító metántermelő baktériumok (*Methanosarcina*, *Methanothrix*) az ecetsavat metánná és szén-dioxiddá alakítják.
9. Hidrogenofil baktériumok a szén-dioxidot hidrogén felhasználása mellett metánná alakítják.

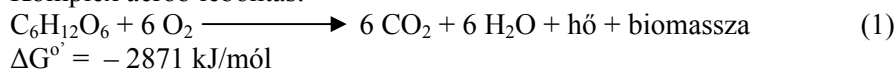


1. ábra Komplex összetételű szervesanyagok anaerob lebontási-folyamata

1.1. Szintrófizmus szerepe az anaerob lebontásban

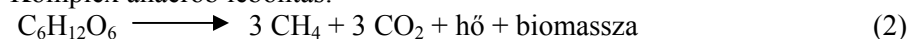
A komplex szervesanyagok anaerob lebontási folyamatának végterméke általában a metán és a szén-dioxid. A metanogenezis lényegesen kisebb szabadenergia változással járó reakció, mint az aerob körülmények között lejátszódó oxidáció. Példaként egy hexóz aerob oxidációját és anaerob lebontását hasonlítsuk össze (*Winter et. al, 1987*):

Komplex aerob lebontás:



$$\Delta G^{\circ} = -2871 \text{ kJ/mól}$$

Komplex anaerob lebontás:



$$\Delta G^{\circ} = -404 \text{ kJ/mól}$$

Metán aerob oxidációja:



$$\Delta G^{\circ} = -2467 \text{ kJ/mól}$$

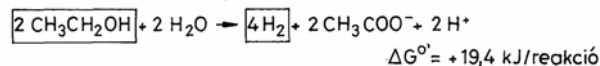
A metántermelésnél nagyon kicsiny mennyiségű energia termelődik, viszont a képződött metánnak, mint végterméknek jelentős az energia tartalma. A két részfolyamatnak az összes energia kihozatala ($404 + 2467 = 2871$ kJ/mol) azonos az aerob lebontás energia hozamával. Az anaerob lebontás kicsiny energia hozama azt jelenti, hogy a lebontás során lényegesen kevesebb biomassza képződik, mint az aerob folyamatnál. Ez a tisztítási technológiában nagyon előnyös, mert lényegesen kisebb mennyiségű iszap elhelyezéséről kell gondoskodni.

A fő metántermelők az *Archaea* baktérium fajok szigorúan anaerobok. A metanogenezis folyamatában keletkező kicsiny energia mennyiség következtében jól ismert a különböző baktériumok együttműködése. Az együttműködés legismertebb formája a szintrófizmus.

Szintrófizmus fogalma alatt olyan lebontási folyamatot értünk, amelyikben kettő vagy több mikroorganizmus a folyamat végrehajtásában együttműködik, de a lebontási folyamatot külön-külön egyik mikroorganizmus sem tudja végrehajtani. Az egyik faj rész-reakciót sem tud végrehajtani a másik faj közreműködése nélkül. Ez azt jelenti, hogy egyik baktérium faj termékeiből él egy másik faj. A szintrófikus reakciók egyik leggyakoribb formája, amikor az egyik faj H_2 -t termel, míg a megtermelt hidrogént egy vagy több faj fogyasztja. Ilyen hidrogénfogyasztó a denitrifikáló, szulfátredukáló, homoacetogén (H_2/HCO_3^- redukciós úton ecetsavat-termelő) vagy metanogén (metántermelő) baktériumok. A fajok közötti hidrogén átvitelre az anaerob etanol lebontás tipikus példáját hozhatjuk fel. Az etanol lebontás első lépése a hidrogén és ecetsav képződése. Ez a reakció energetikailag kedvezőtlen, mert a szabadentalpia változás pozitív. A második lépésben a hidrogén, mint elektron donort a metántermelő baktériumok hasznosítják. A két reakció szabadentalpia változását összegezve a folyamat exergónikus. Tehát a reakció végbemegy és ez által mindkét baktérium faj szaporodása a szintrófikus folyamatban biztosított (2. ábra, Brock et al., 2006/a).

A szintrófizmus a szimbiózis speciális esete, amikor a baktériumok különböző típusai egy bizonyos szubsztrát lebontásának metabolit termékeitől és a részfolyamatok energetikai viszonyaitól függenek. Szintrófikus hatás bemutatására példaként a zsírsavakat fermentációs úton oxidáló szervezetek és a hidrogént oxidáló metanogén baktériumok együttműködése kínálkozik. A szintrófikus folyamatban két különböző baktérium faj bont egy szubsztrátot és úgy konzerválja az energiát, hogy külön-külön az egyik faj sem tudja bontani az adott szusztrátot. Az anaerob folyamatban ez úgy jelentkezik, hogy az egyik faj hidrogént (H_2) termel és a másik faj a keletkezett hidrogént a következő reakciónál felhasználja. Ezt nevezik szintrófikus vagy fajok közötti hidrogén transzfer folyamatnak.

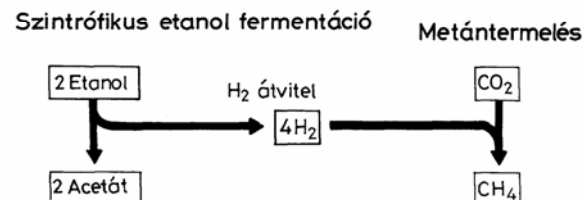
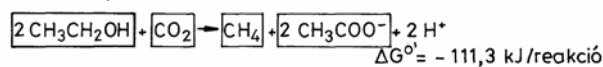
Etanol fermentációja:



Metántermelés:



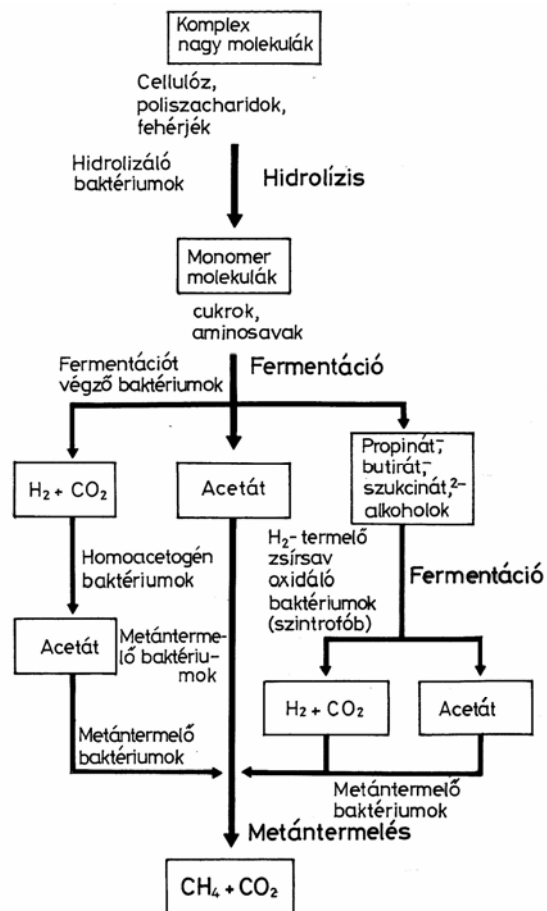
Összekapcsolt reakció:



2. ábra Az etanol lebontás szintrófikus útja

Brock et al. (2006/b) nyomán a nem-szintrófikus metántermelő és a szintrófikus baktériumok együttműködését a 3. ábra mutatja. A cellulóz metánná és szén-dioxiddá történő anaerob lebontásához négy különböző baktérium csoport – elsődleges, másodlagos fermentációt végző baktériumok és még két metanogén baktérium faj – együttműködése szükséges. A nagy molekulájú anyagok

(poliszaharidok, fehérjék, nukleinsavak, lipidek) első lépésben kisebb molekulású monomer egységekre bomlanak (cukrok, aminosavak, purinok, zsírsavak, glicerin). Ez a hidrolízis folyamat tipikusan extracelluláris enzimek segítségével megy végbe. A hidrolízist végző enzimeket az első fermentációs baktériumok termelik. Néhány fermentációs terméket, mint például ecetsavat, H_2 -t, CO_2 -ot, egy szénatomos termékeket, a metántermelők közvetlenül metánná és szén-dioxiddá tudják alakítani. Más fermentációs termékek – hosszú szénláncú zsírsavak, egy szénatomnál hosszabb alkoholok, elágazó szénláncú és aromás zsírsavak – bontását az ún. másodlagos fermentációs (szintrófikus) baktériumok végzik. A második fermentációs csoport a fentiekben említett szubsztrátokat ecetsavvá, szén-dioxiddá, hidrogénné és hangyasavvá alakítják, a metántermelők e termékeket tovább bontják. A szintrófikus baktériumok tiszta tenyészetben nem szaporodnak, mindig szükségük van a nem-szintrófikus baktériumok (metántermelő, homoacetogén, szulfátredukáló) együttműködésére. Az együttműködés azt jelenti, hogy a szintrófikus baktériumok által termelt hidrogént, szén-dioxidot és ecetsavat a nem-szintrófikus baktériumok azonnal feldolgozzák. A két baktérium csoport együttműködése eredményeképpen a lebontási reakciók (vajsav, propionsav) jelentős részénél a szabadentalpia változása kedvező (exergonikus) lesz, és így reakció a lejátszódik. A szintrófizmus jelensége nélkül gyakorlatilag csak az ecetsav közvetlen anaerob lebontása szolgáltatna metánt, vagyis a bioenergia-termelés nagyon kicsiny határfokkal játszódna le.



3.ábra Nem-szintrófikus metántermelő és a szintrófikus baktériumok együttműködése

2. Hidrolízis

Az anaerob lebontás első lépése, hogy az oldott- és lebegőanyag formában lévő komplex nagymolekulákat a savtermelő baktériumok enzimek által kisebb molekulákká átalakítják. A hidrolízis eredményeképpen a kisebb molekulák oldatba mennek és ezeket a vegyületeket a savtermelő baktériumok szubsztrátként használják fel. A hidrolízis és a savképződés folyamatát nem lehet szétválasztani, mert a hidrolízissel együtt az illó zsírsavképződés is elindul.

Az enzimek mind a szerves anyagok lebontásában (disszimiláció), mind az új sejtek anyagainak szintézisében (asszimiláció) egyaránt aktívan vesznek részt (*Hattingh et al., 1967; Thiel et al., 1968*). A hidrolitikus sejten kívüli enzimek (proteáz, cellobiáz, amiláz és foszfatáz) olyan vegyületek, amelyek a makromolekulákat hidrolízissel kisebb molekulákká alakítják. Bizonyos közbenső kulcs szerepet játszó A rothasztóba betáplált szubsztrátok lebontási folyamatairól enzimaktivitási értékek tájékoztatnak.

Gerardi (2003) szerint a szubsztrát lebontásban a baktérium sejtek által termelt enzimeknek meghatározó szerepe van. A baktérium által termelt enzimek a sejt membránon keresztül kijutnak (exoenzim) és a külső sejt falon az adszorbeálódott szubsztrát molekulákat oldatba viszi, majd az oldott molekulák a sejt falon keresztül a sejt belsejébe jutnak. A sejten belül a lebontást a sejten belül lévő enzimek (endoenzim) végzik. Minden baktérium termel endoenzimet, de exoenzimet nem. Az exoenzim termelése és a kolloid részecskének az oldatba vitele néhány órát vesz igénybe. Az *1. táblázat* néhány szubsztrát típushoz tartozó exoenzimet és a hidrolízis terméket mutat be.

1. táblázat Néhány szubsztrát típushoz tartozó exoenzim és a hidrolízis termék

A lebontandó szubsztrát	Exoenzim típus	A példában megnevezett enzim	Baktérium nemzetség	Termék
Poliszacharid	Összetett szénhidrát bontó	Celluláz	<i>Cellulomonas</i>	Egyszerű cukrok
Fehérje	Proteolitikus	Proteáz	<i>Bacillus</i>	Aminósav
Lipidek	Zsírbontó	Lipáz	<i>Mycobacterium</i>	Zsírsavak

Minden egyes szubsztrátnak meg van a speciális endo- és exoenzimje. Ez azt mutatja, hogy nagy diverzitású baktérium közösség szükséges a komplex tápanyagok lebontásához. A hidrolízis sebesség meghatározó lehet mind az egy, mind a két-lépcsős anaerob rothasztó rendszerben. A komplex szubsztrátok négy lebontási szakaszát a gyakorlatban két-lépcsőben lehet megvalósítani:

- az első lépcsőben a szubsztrát hidrolízis és savképződés (fermentáció),
- a második lépcsőben az ecetsav-képződés (acetogén) és a metánképződés (metanogén) folyamat játszódik le.

Ferreiro et al. (2003) a hidrolízis, a hőmérséklet és az iszapkoncentráció összefüggését vizsgálta. A keletkezett illósavakat elsősorban ecet- és propionsav alkotta és kisebb mértékben vajsav. A fehérje vegyületek 37 – 60 %-a ecetsavvá (HAc), 30 – 55 %-a propionsavvá (HPr) és csak 8 – 20 %-a alakult át vajsavvá (HBu). Amikor a hőmérséklet 10 °C-ról 35 °C-ra változott az ecetsav aránya nőtt a propionsav rovására, miközben a vajsav mennyisége gyakorlatilag állandó maradt.

3. A savtermelő fázis jellemzése

A nem-metántermelő lépcsőben elsősorban a makromolekulák kisebb molekulákká történő átalakítása játszódik le. A zsírok és a zsírsavak anaerob lebontásakor a fő folyamat a hosszú-láncú zsírsavak β -oxidációja. A hosszúláncú (páros szénatomszámú) zsírsavak β -oxidációjából származik az ecetsav, mint végtermék, míg a β -oxidáció a páratlan szénatomszámú zsírsavak bomlásánál az ecet- és a propionsav termelődését segíti (*Kotzé et al., 1969*).

A fehérjék és a peptidek kisebb egységekre (fragmentumok) kell, hogy lebontódjanak, mielőtt azokat a mikroorganizmusok adszorbeálják. Minden aminosavnak jellegzetes lebontási folyamata van. A savtermelő baktériumok között számos különböző baktérium csoportot mutattak ki, találtak fehérjebontó, denitrifikáló, zsírbontó és cellulózbontó baktériumokat. A régebbi elképzelés szerint a savképző baktériumokat főleg fakultatív anaerobok alkotják, de akad közöttük szigorúan anaerob is. *McKinney (1962)* véleménye szerint a fakultatív baktériumok gyors szaporodási képessége előnyt jelent a szigorúan anaerob baktériumokkal szemben. Ezt az elgondolást *Toerien (1969)* megcáfolta, véleménye szerint az aerob és fakultatív anaerob baktériumok csak kis részét képezik a rothasztók összes baktérium populációjának. Az aerob és fakultatív anaerob baktériumok a rothasztó rendszer minden fázisában jelen vannak, de számszerűsített mennyiségük kevesebb, mint 1 %-a az összes savtermelő bakteriális populációnak. Obligát anaerob savtermelő baktériumok is jelen vannak az anaerob rendszer minden fázisában, rendszerint 100 – 200-szor nagyobb mennyiségben, mint az aerob és fakultatív anaerob baktériumok. A savtermelésben, úgy tűnik, az obligát anaerob baktériumok

játsszák a legnagyobb szerepet. Miután a savtermelésben a meghatározó szerepet a szigorúan anaerob baktériumok játsszák téves az a nézet, hogy a két-lépcsős rothasztás első savtermelő-lépcsőjében az anaerobitás fenntartásának nincs jelentősége, vagyis a hidrolízis-savtermelő folyamatnál az oxigén kizárásával nem kell törődni.

A nem-metántermelő fázisban szerepet játszó baktériumok között több fiziológiailag eltérő csoport található. Nem nagy számban, de protozoákat (flagelláták, ciliáták és amőbák) is megfigyeltek anaerob rothasztókban. Feltehetően a protozoáknak nincs nagy jelentősége az anaerob rothasztásban. Előfordulási számuk nem nagy. Kb. 18 protozoa faj található a rothasztókban, durván azonos számú flagelláta, ciliáta és amőba formájában. A flagelláták a *Tregomonas*, *Tetramitus* és *Trigomonas* nemzetségbe tartoznak. Az amőbák a *Vahlkampfia* és a *Hartmanella* fajhoz, a ciliáták a *Metopus*, *Trimyena* és *Saprodinium* fajhoz tartoznak.

Számos gomba faj is található az anaerob rothasztókban például a *Phycomycetes* csoportba tartozó *Mucor*, *Rhizopus*, az *Ascomycetes* csoportba tartozó *Aspergillus*, *Sartoria* és a *Fungi Imperfecti* csoportba tartozó *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium* fajok. Ezek a gombák ugyan zömében aerobok, de a lebontás első fázisában a jó depolimerizációs aktivitásuk révén a lebontásban szerepet játszanak.

Az anaerob rothasztás savtermelő lépcsőjében az oldott és a szerves lebegőanyagot heterogén bakteriális populáció zsírsavakká és alkoholokká bontja le (*Cookson et al.*, 1965). A kérődző állatok bendőjében az anaerob rothasztók savtermeléséhez hasonló folyamat játszódik le. Mindkét rendszerben a komplex szerves vegyületek hidrolízise során zsírsavak keletkeznek, alacsony redoxpotenciál feltétel teljesülése esetében. A bendőkben a zsírsavak egy része a metántermelő baktériumok révén metánná és szén-dioxidá alakul, míg a rothasztókban minden zsírsav lebontódik. A bendőkben a fő baktérium csoport az obligát anaerobok (*Hungate*, 1966). Az obligát savtermelő baktériumok a savképző fázisban szénhidrát és fehérje tartalmú tápanyagon szaporodnak, szigorúan anaerob feltételek mellett.

Az anaerob rothasztás baktérium populációjának kutatásában, leírásában és jellemzésében *Toerien et al.*, (1969) és *Kotzé et al.*, (1969) alapvető munkásságát kell kiemelni. A megállapításaik jelentős része a géntechnikai módszerek elterjedése ellenére még ma is helytállóak. A savtermelő baktériumnál meghatározó az *Aerobacter*, *Aeromonas*, *Alkaligenes*, *Bacillus*, *Bacteroides* és *Clostridium* nemzetség. A savtermelő fázis folyamataival kapcsolatban összefoglalóan megállapítható (*Toerien et al.*, 1969), hogy

- az aerob és fakultatív anaerob baktériumok valamennyi rothasztóban, minden lépcsőben jelen vannak az üzemelés alatt,
- számszerűen az aerob és fakultatív anaerob baktériumok az obligát anaerob savtermelő bakteriális populációnak csak egy kisebb hányadát alkotják,
- az obligát anaerob savtermelő baktériumok szoros korrelációban vannak a rothasztó DNS és a szervesanyag tartalmával, azt jelezvén, hogy ez a baktériumcsoport a rothasztó összes populációjának állandó része. Ugyanez nem áll fenn az aerob és a fakultatív baktériumokra.

A savtermelő mikrobák szubsztrát lebontása

Britz et al. (1994) a savtermelő populáció faji sokféleségét négy különböző lerakóhelyről származó csurgalékvízzel, kőolajipari elfolyó vízzel és kommunális szennyvízzel táplált rothasztóban vizsgálta. A rothasztóban lévő biomassza 90 %-át a savtermelő baktériumok alkották. A savtermelő baktériumok 288 fajt izoláltak.

A kommunális szennyvízzel és csurgalék vizekkel táplált rothasztók esetében nagyobb fajgazdagságot tapasztaltak, mint a kőolajipari szennyvíznél, ami valószínűleg a szennyvíz komplex összetételének köszönhető. Itt sokkal általánosabb fajok voltak jelen, szemben a másik rothasztókkal, ahol kisebb volt a faji sokféleség.

Az eredmények azt mutatták, hogy olyan rothasztó környezetben, ahol magasabb az elfolyó szennyvíz széntartalma, mint például a kőolajipari elfolyónál, kisebb a faji sokféleség. Az ilyen populáció nehezen tud megbirkózni a környezet változásaival. A többféle komponensből álló szubsztrátok – mint a lerakóhelyek csurgalékvizei – esetében az általánosabb fajok dominálnak, amelyek széles határok között elviselik a környezet változásait. Ez nagyon fontos tényező az anaerob rothasztási folyamat hatékonyságának és stabilitásának tekintetében.

Az eredmények azt mutatták, hogyha a szubsztrát összetétel közel állandó marad, akkor savtermelő fázisban egy nagyon specializált mikrobaközösség választódik ki és működik. Olyan szubsztrátok esetében, mint a lerakóhelyek csurgalékvíze, amelyeknek sokféle összetevője van, ott a környezet faji sokfélesége is nagy lesz.

Az egy-lépcsős rendszer szubsztrát lebontása

Az anaerob rothasztók zömmel egy-lépcsős rendszerként üzemelnek, ami azt jelenti, hogy a hidrolízis-savtermelő és a metán-termelő fázis egy reaktorban játszódik le. A bonyolult egyensúlyi és különböző szubsztrát összetételek miatt az egy-lépcsős rendszer baktérium populációjának felmérése hallatlanul bonyolult feladat.

Hungate (1966) $0,8 \times 10^3$ -tól 2×10^3 -ig, illetve 16×10^3 -tól 970×10^3 -ig terjedő számú anaerob cellulóz-bontó baktériumot talált mL-enként az iszaprothasztásnál. Ezen kívül a rothasztott iszapban mL-enként 1×10^3 spirohétát (*Leptospira*) és 2×10^6 -tól 350×10^4 -ig terjedő számú aerob baktériumot is kimutatott. A zsírsavakkal, alkoholokkal és fehérjékkel táplált rothasztókban a baktériumszám 2×10^6 -tól 20×10^6 -ig terjedt mL-enként, míg a szénhidrátokkal táplált rothasztók esetében a baktériumszám 15×10^6 -tól 350×10^8 -ig változott. Hosszabb hidraulikus tartózkodási idők esetén a baktériumszám növekedett a glükózzal és kiegészítő tápanyaggal táplált rothasztók esetében. A 10 napos hidraulikus tartózkodási idő mellett az iszap mL-enként 9×10^6 baktériumot tartalmazott. A populáció 59% -a *Escherichia* volt és 22 %-a *Microkokkusz varians*. A coli formák azonban néhány havi működés után eltűntek.

Kotzé et al. (1968) aerob fehérjebontó és aerob zsír-bontó baktériumokról számol be egyes laboratóriumi és nagyüzemi rothasztókkal kapcsolatban. Az össz-baktériumszám 3×10^6 /mL-től 300×10^6 /mL-ig, míg a zsír-bontó baktériumok száma 2×10^4 /mL-től 16×10^4 /mL-ig, a fehérjebontó baktériumok száma pedig 1×10^5 -tól 90×10^5 /mL-ig váltakozott. Szerzők a rothasztók DNS tartalmát használták fel arra, hogy a térfogategységben foglalt sejtek valószínű számát jellemezzék. A vizsgálatok arra mutattak, hogy a nem-metántermelő populáció valószínűleg feltétlen anaerob szervezetekből áll. A feltétlen anaerob nem-metántermelő baktériumoknak rothasztókban való meghatározására *Toerien* (1967) kidolgozott egy módszert, amely a kérődzők bendőjének mikrobiológiai vizsgálatán alapul. Ennek alapján mL-re vonatkoztatva 39×10^7 és 15×10^9 között változott a feltétlen anaerob nem-metántermelő baktérium száma. Az aerob és fakultatív baktériumszám 8×10^5 és 1×10^8 /mL számok között váltakozott. Az anaerob baktérium száma mintegy 100-szorosa az aerob és a fakultatív baktérium számnak.

A tudomány mai állása szerint az aerob és fakultatív anaerob baktériumok lényeges szerepet nem játszanak a rothasztás folyamataiban. Úgy tűnik, hogy az anaerob rothasztást végző baktériumok egészét főleg obligát anaerobok alkotják. A mindenkor jelenlévő aerob és fakultatív anaerob baktériumok a rothasztókba jutó oxigént gyorsan felhasználják, s így a rendszerben anaerob állapot alakul ki. A szerves szennyezőanyagok lebontása során a nem-metántermelő baktérium populáció anyagcseréjének az eredményeként olyan anyagok képződnek, amelyek egyrészt alkalmasak a saját sejtanyaguk felépítésére, másrészt szubsztrátként használható a metántermelő baktériumok számára.

A zsírok anaerob rothasztókban való lebontását valószínűleg a zsíroknak lipázzal történő bontása vezeti be. A hosszú-láncú zsírsavak béta-oxidáció útján bontódnak le, amint azt C^{14} -es izotópot tartalmazó oktán és palmitinsavak lebontásánál tapasztaltak. A lipidek glicerín része valószínűleg glicerinaldehid-foszfáton és piroszölősavon keresztül bomlik tovább. A szén-dioxid redukciója metántermelő baktériumok segítségével metán képződéséhez vezethet. A metántermelő baktériumok valószínűleg csak az ecetsavat és a hangyasavat képesek hasznosítani a zsírsavak közül és ezért a zsír-bontó baktériumok nem képesek metánt termelni a béta-oxidáció során, azaz, ha a szén-dioxid szerepel terminális akceptorként, akkor olyan anyagoknak, mint az ecetsav kell előbb keletkezniük.

Anaerob rothasztás alatt a különböző szerves anyagok lebontódnak és alacsonyabb szénatomszámú zsírsavakká alakulnak. Ez a biokémiai reakció sorozat a metán prekursor vegyületek – ecetsav, hidrogén, szén-dioxid – képződésével ér véget. Végül a metántermelő mikroorganizmusok a prekursor vegyületeket metánná és szén-dioxiddá alakítják át.

A zsír lebontási folyamat egye lépcsői *Dohanyos et al.*, (1985) szerint a következők:

- a nagy molekulájú szerves vegyületek hidrolízise aminosavakká, cukrokká és zsírsavakká,
- az aminosavak és cukrok fermentációja illékony zsírsavakká (VFA),

- a nagyobb szénatomszámú zsírsavak és alkoholok anaerob oxidációja zsírsavakká (VFA),
- a közbenső termékek további anaerob oxidációja ecetsavvá és hidrogénné,
- az ecetsav átalakulása metánná és szén-dioxiddá,
- a hidrogén és szén-dioxid átalakulása metánná.

A fenti folyamat tulajdonképpen megegyezik *Siegrist et al.* (1993) által leírt folyamattal. Noha a hidrogén jelenlétét nem mutatták még ki a zsírok rothasztása során, annak felszabadulása nincs teljesen kizárva, mivel a metanogén baktériumok a hidrogént a szén-dioxiddal együtt hasznosítják.

A *fehérjék* lebontása (katabolizmusa) valószínűleg a proteinek extracelluláris hidrolízisével indul, aminek során polipeptidek és aminosavak keletkeznek. A fehérje lebontás végtermékei szerves savak. A rothasztókban kimutatták a sejten kívüli proteáz jelenlétét és aktivitását. Például a glutamát-dehidrogenáz enzim jelenléte a fehérjebontás nagy sebességére és ezzel a folyamattal járó ammónia képződésére utal.

A C^{14} izotóp segítségével kimutatták, hogy a *szénhidrátok lebontása* a glikolízis (*Embden, Meyerhof* lebontás) és a pentóz-foszfat-ciklus szerint megy végbe. A glikolízis első lépcsőjében az egyszerű cukrok glicerin aldehidde, majd piroszölősavvá alakulnak. Az anaerob szervezetekben a piroszölősav további oxidációjához szükséges oxigén hiányában a glükóz teljes oxidációja nem mehet végbe, ezek a szervezetek csupán a glikolízis során keletkezett két molekula ATP-t tudják hasznosítani. Szennyvíziszappal vagy szintetikus szubsztráttal táplált anaerob rothasztókban a glikolízisre utaló enzimeket mindig ki lehet mutatni. Ez azt jelenti, hogy a glikolízis az anaerob lebontás alapfolyamata. A lebontást jellemző fontosabb enzimek mérésével a rothasztó egyensúlyi helyzete jellemezhető.

A nem-metántermelő populáció *anyagcsere végtermékei* telített zsírsavak, szén-dioxid és az aminosavak lebontásából származó ammónia. A mai ismereteink szerint a hidrogén is az egyik fontos végterméke a nem-metántermelő baktérium populáció anyagcseréjének, vagy egy másik intermedier populációnak, amely zsírsavakat állít elő. A keletkezett illó savak főleg ecetsav, propionsav és vajsav, kisebb mértékben hangyasav, tejsav és valeriansav. A zsírsavakhoz adaptálódott metántermelő kultúra mindig hasznosítja a hangyasavat. Ez azt bizonyítja, hogy a hangyasav egy fontos közbenső terméke a metán-képződésnek.

Az ecetsav-képződés a legnagyobb mértékű, ezért ez tekinthető a legfontosabb intermedier terméknek. Ezt követi a propionsav, amely előfordul a szénhidrát-, fehérje- és zsírok lebontásakor. Legnagyobb mennyiségben ecetsav és propionsav fordul elő akkor is, ha a rothadási folyamat egyensúlya felborul.

A nem-metántermelő populációjának az anyagcseretermékei igen fontosak mivel ezek a vegyületek a metántermelő baktérium csoport energiahordozói, és ezek erősen befolyásolják a metántermelő baktérium szaporodását. A nem-metán termelő fázis anyagcsere termékeiben bekövetkező változások kihatással vannak a metántermelő fázis egyensúlyi viszonyaira.

Ecetsavképző és a metántermelő folyamat szabadenergia értékei

A savtermelésnél a hosszabb szénláncú fermentációs termékek (vajsav, propionsav, kapronsav, tejsav stb.) a jellemzők. Ezeket, a termékeket az acetogén baktériumok oxidálják. Az acetogén (ecetsavtermelő) baktériumok terméke az ecetsav, formiát, CO_2 , H_2 és a keletkezett termékeket metanogén baktériumok tovább bontják.

Az ecetsav-képző és a savtermelő reakciók között a különbség nem mindig egyértelmű. Az ecetsav és a hidrogén, mind a savtermelés, mind az ecetsavképző reakciókból származhat. Az ecetsav és a hidrogén a metántermelő baktériumok szubsztrátja. Az egymásra utalt kettősség ecetsavképző és a metántermelő baktériumok között kritikus, mivel a illósavak átalakulása ecetsavvá és hidrogénné termodinamikai kedvezőtlenebb, mint az ecetsavnak metánná való alakítása (*McCarty*, 1971).

A kettős társulás az ecetsavképzők/sav-termelő és a metántermelő között szükséges, ha az ilyen reakciók termodinamikailag kedvezőtlenek. A két baktérium csoport közötti egymásra utaltságot (szintrófikus kapcsolat) a közbenső termékeknek (ecetsav, hidrogén, hangyasav) metántermelésre történő hasznosítása jól példázza (2.táblázat; *Fox et al.*, 1994).

2. táblázat Ecetsavképző és metántermelő reakciók szabadenergia értékei

Ecetsavképző és metántermelő reakciók	$\Delta G'$, kJ/mol
---------------------------------------	----------------------

Propionsav → ecetsav $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$	+76,1
Vajsav → Ecetsav $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$	+48,1
Etanol → Ecetsav $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$	+9,6
Tejsav → Ecetsav $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	- 4,2
Ecetsav → metán $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$	- 104,6
Szén-dioxid + hidrogén → metán $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	- 135,6

3.1. A savtermelést befolyásoló fontosabb tényezők

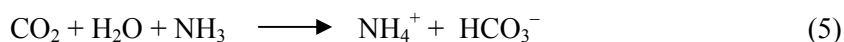
pH, lúgosság és az illó zsírsav koncentráció

Kotzé *et al.* (1969) a pH, lúgosság és az illó zsírsav koncentráció összefüggését részletesen tárgyalja. A fenti paraméterek általánosan elfogadottak a rothasztók jellemzésére, de ezek nem függetlenek egymástól. Feltételezik, hogy minden élő sejt belső közegének a pH-ja 7,0. A legtöbb baktérium viszonylag érzéketlen a hidrogén és a hidroxil ionok koncentrációjára, mert az élő sejtek sejtfala csak alig permeabilis a hidrogén és a hidroxil ionok számára. A nem disszociált molekulák még könnyebben áthatolnak a sejtfalon keresztül, mint az ionok. A gyenge savak kis pH értékeknél csak kissé disszociálnak és ilyen formában könnyen behatolnak a sejtekbe és megváltoztatják a sejten belüli pH-t. Az erős savak esetében ez a jelenség nem áll fenn. A fentiek értelemszerűen vonatkoznak a gyenge bázisokra is nagy külső pH érték esetében. A gyenge savak és bázisok az elmondottak értelmében kis vagy nagy pH értékek mellett toxikus hatást fejtenek ki, de viszonylag ártalmatlanok a semleges pH-jú környezetben.

Az anaerob rothasztó heterogén baktérium populációja számos baktérium fajt ölel fel. Minden fajnak meg van a maga optimális pH-jú közege, amelyben számukra a szaporodás és az anyagcsere folyamat a legkedvezőbb. Az egy-lépcsős rendszerekben a rothasztó optimális pH-jú közege mintegy kompromisszum útján jön létre a különböző fajoknak megfelelő optimális pH értékekből.

A metán termelés szempontjából legkedvezőbb a 6,4 és 7,2 közé eső pH tartomány. A pH 6,0 alatt illetve 8,0 feletti értéknél a metántermelés lelassul, majd megszűnik. A pH-val szorosan összefüggő tényező a lúgosság és az illó zsírsavak koncentrációja. A pH erősen változhat a rothasztóban, ha a rendszer nincsen kellően pufferolva. A lúgosság mértéke a pufferkapacitásnak. A nagy lúgosság egyúttal mintegy biztosítéka annak, hogy a rendszerben nem következik be könnyen pH ingadozás, míg kis értékű lúgosság esetében a zsírsavak koncentrációjának hirtelen növekedése a pH-t oly mértékben lecsökkenti, hogy az egész biológiai folyamat kárát látja ennek.

Ismeretes, hogy a szén-dioxid, hangyasav, ecetsav, propionsav, vajsav, tejsav, maleinsav, fumársav, borostyánkősav, citromsav, glutaminsav stb. akkor keletkezik, ha szénhidrátok és fehérjék anaerob úton bomlanak. A Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , valamint ammónia bikarbonátokkal és a szén-dioxiddal együtt kielégítő pufferkapacitást biztosít a rendszerben. A legfontosabb puffer hatású vegyület az ammóniumhidrogén karbonát $[\text{NH}_4\text{HCO}_3]$ és a jól működő rothasztóknál a pufferkapacitást az ammónium és hidrokarbonát ionok képződése biztosítja:



Az ammónium és hidrogén-karbonát ionok az oldatban maradnak és növelik a lúgosság értékét. Egy jól működő rothasztóban a kommunális szennyvíziszap rothasztásakor a CaCO_3 -ban kifejezett lúgosság kívánatos mértéke 3000 – 4500 mg/L érték között mozog. Azt tapasztalták, hogy a lúgosság párhuzamosan növekszik a terheléssel, valószínűleg a friss iszap nitrogéntartalmú vegyületei miatt. A lúgosság és az illó zsírsavak koncentrációja között egyensúly alakul ki és pH változás akkor következik be, amikor ez az egyensúly felborul. Az egyensúly felborulására utal, amikor ecetsavban kifejezett illósav koncentráció és CaCO_3 -ban kifejezett lúgosság hányadosa kisebb 0,8 értéknél. A

rothasztás folyamán, ha az illó zsírsav koncentráció (ecetsavban kifejezve) 2000 – 3000 mg/L fölé emelkedik, a rothasztó működése nem tekinthető kiegyensúlyozottnak.

Hidraulikai tartózkodási idő

A szubsztrát keverék (szénhidrát, fehérje, zsírok) lebontásánál a hidraulikai tartózkodási idő (HRT) változás hatására az egyes komponensek lebontódása változó. Kis HRT értéken fehérje lebontás gyenge, ez a keverék nagy szénhidrát tartalmának tulajdonítható ugyan is a kis HRT értéken a szénhidrát lebontás hatásfoka jó. *McInerney* (1988) megállapította, hogy a szénhidrát bontást – a fehérje hidrolízist elősegítő exopeptidáz enzimek – elnyomhatják. A zsírok lebontásakor először hosszú-láncú zsírsavak képződnek, majd a lebontás β -oxidáción keresztül folytatódik és hidrogén, mint melléktermék képződik. Ez azt jelenti, hogy a lipid lebontódást a növekvő hidrogén-nyomás visszaszorítja.

A metán képződés a HRT növelésével egy határig folyamatosan nő. A hidrogént, mint elektron donort a metántermelő baktériumok elfogyasztják. Erre utal, hogy a HRT növekedésével a hidrogén parciális nyomása csökken, miközben a metántermelés nő.

A hőmérséklet hatása

Cha et al. (1997) a gyors hőmérséklet-változás illetve a hidraulikai tartózkodási időnek (HRT) a baktérium populációra és az anaerob savtermelő folyamatra kifejtett hatását laboratóriumi méretű kísérleti reaktorban vizsgálta. A gyors hőmérséklet-változásnak különösen kicsiny tartózkodási idő és alacsony hőmérsékletek esetén volt jelentősége. A savtermelő, ecetsavtermelő és H_2 -hasznosító metántermelő baktériumok száma nem változott jelentősen a hőmérséklet csökkenés utáni első három napban. Ugyanakkor 15 °C -on ecetsav-hasznosító metántermelő baktériumok teljes kimosódását tapasztalták.

A szerves anyag anaerob rothasztásának sebessége 4 folyamattól függ: hidrolizáló, obligát H_2 termelő, homo-acetogén és a metán-termelő baktériumok aktivitásától. Azt mondhatjuk, hogy a 35 és 55 °C optimális hőmérsékleten megy végbe a két különböző rothasztási folyamat, amelyet a mezofil és termofil rothasztásnak neveznek. A legáltalánosabban alkalmazott rothasztási rendszer a mezofil rothasztó. Ezen hőmérsékleten a baktérium populáció változásai, az egyes baktériumok kölcsönhatása, és a lebontás, már széles körben ismertek, de a gyors hőmérséklet csökkenés hatását nemigen vizsgálták.

A reakció termékek gátló hatása

A fermentációs termékektől függően, a metántermelést a baktériumok egy csoportja (metántermelők: CO_2/H_2 , metanol, ecetsav-felhasználó baktériumok), vagy az életközösségben élő metántermelőkkel szintrófikus kapcsolatban lévő savtermelő baktérium csoportja végzi. Ez a társult (szintrófikus) szerep különösen komplex vegyületek, mint az etanol, propionsav, vagy vajsav lebontásánál jelentkezik. Ha a lebontási folyamatban a metán-képződés a sebesség a korlátozó lépcső, akkor a savtermelést és a metántermelést külön reaktorban célszerű megvalósítani.

A koncentrációktól függően, az illékony zsírsavak serkentő vagy gátló hatásúak lehetnek a baktérium szaporodására. Néha a serkentő (kis koncentrációnál), vagy gátló hatás (nagyobb koncentrációnál) is jelentkezik azonos baktériumoknál (*Roché et al.*, 1973). A feltételezés szerint a disszociálatlan formájú zsírsavak szabadon áthatolnak a sejt membránon. A membránon átjutott disszociálatlan zsírsavak a sejten belül disszociálnak, a sejten belüli pH-tól függően és így a sejten belüli pH süllyed. A sejten belüli kedvezőtlen fiziológiai állapotokkal szembeni védekezés céljából a fölös protonok a sejtekből kikerülnek. Valószínűleg a protonok kálium ionokra cserélődnek. Ez az ún. „proton/kálium pumpa” egy energia-fogyasztó folyamat, kevesebb energia fog rendelkezésre állni az elfogyasztott szubsztrát egységre, a biomassza szintézishez, ezért a szaporodás sebessége csökken.

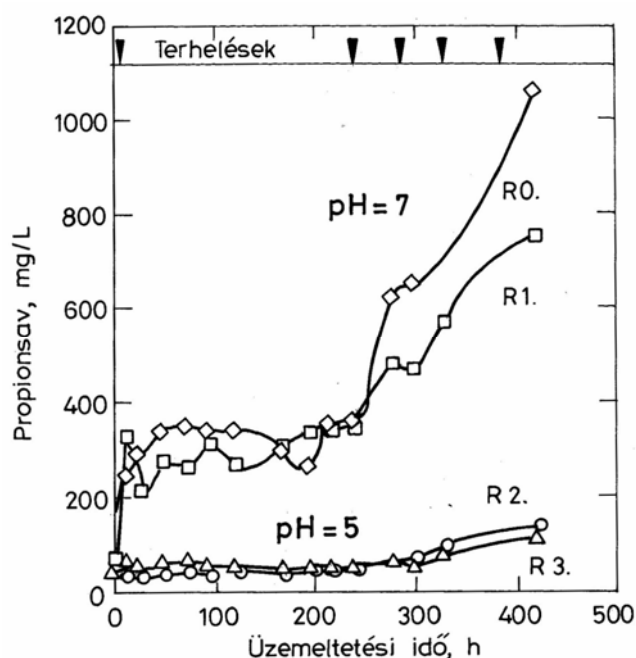
A propionsav felhalmozódás

A szervesanyag illósavakká történő átalakulásánál a propionsav intermedier termék. A rothasztók beüzemlése és a túlterhelés során a propionsav fontos szerepet játszik. Feltételezik, hogy a propionsav a legmérgezőbb illósav a metántermelő baktériumok számára. A metán-termelés 1000 mg/L propionsav koncentráció felett leáll, ugyanakkor ecetsav és vajsav esetében csak 10 000 mg/L koncentráció fejtett ki gátló hatást. A metántermelő reaktorba adagolt propionsav a komplex

szubsztrátnak a lebontását és az illósav képződését gátolta. Feltételezik, hogy a propionsav képződését a fermentációnál képződő hidrogén parciális nyomása befolyásolja (Dohanyos, 1985).

Inanc *et al.* (1996; 1999) a propionsav felhalmozódást mesterségesen csökkentett vagy megemelt hidrogén szint mellett vizsgálták. A reaktorok H_2 nyomása 0,13; 0,5; 0,75 atm volt és egy szelektív átteresztőképességű teflon membránt helyeztek a folyadékfázisba, abból a célból, hogy alacsony legyen a hidrogén koncentráció. Második alkalommal a nagyobb hidrogén koncentrációt állították be és mindegyik edényben 2 atm túlnyomást tartottak. A kísérleteknél szuszpenzió formájában lévő „lebegő” anaerob kultúrát alkalmaztak. Az eredmények azt mutatták, hogy a megemelt vagy csökkentett hidrogén szintnek nincsen gátló vagy serkentő hatása a propionsav felhalmozódásra.

A tanulmány szerint a túlterhelt anaerob reaktorokban a propionsav felhalmozódás háttérben a populációk megváltozása áll. Túlterhelés esetében az anaerob rendszer 5 pH-nál nem termel propionsavat, de 7 pH értéknél jelentős mennyiséget termelt. A 4. ábra (Inanc *et al.*, 1999) mutatja, hogy a propionsav termelő baktériumoknak kedvez a semleges pH és a magas szubsztrát koncentráció és ilyen körülmények között a propionsav termelő fajok versenyképesebbek más fajokkal szemben (R0 és R1 görbék). A kis pH gátolja a propionsav termelő baktériumok aktivitását. Ebből adódóan kétfázisú folyamatoknál, ahol a savtermelő fázist kis pH (~5) mellett működtetik, a propionsav termelés visszaszorítható (R2 és R3 görbék). Ez a megoldás különösen könnyen bontható szénhidrátokat tartalmazó szennyvizek esetében javasolható.



4. ábra Propionsav akkumuláció pH 5,0 – 7,0 értékek között (R0 és R1 pH = 7,0; R2 és R3 pH = 5,0 értékhez tartozó mérési pontok)

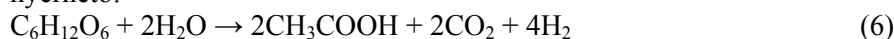
Az anaerob lebontás során keletkező illósavak közül a propionsav az átalakításnak leginkább ellenálló illósav. A propionsav felhalmozódás mechanizmusa nem teljesen ismert. A propionsavat és vajsavat eltérő mikroorganizmus csoportok termelik, amelyek egymással szoros versengésben vannak, ezért a mikroorganizmus fajok dominanciájától függően propionsav, vagy vajsavtermelés kerül előtérbe. Az egyes illósavak felhalmozódását kizárólag a savtermelő populáció domináns fajainak a változása okozza. A pH-nak a domináns savtermelő populáció kialakulásában meghatározó szerepe van. A pH 5 körüli érték a glükóz lebontásból származó propionsav termelést visszaszorítja. A propionsav akkumuláció akkor figyelhető meg, ha az anaerob folyamatot túlterhelés éri a reaktor üzembe helyezési időszakában.

A savtermelő lépcsőben a propionsav termelés visszaszorítása (gátlása) és a metántermelő lépcsőben a propionsav lebontásának elősegítése a metántermelést segíti. A szénhidrát fermentációból történő termék eloszlás bizonyos mértékig szabályozható a pH változtatásával vagy a kétfázisú anaerob rendszer savtermelő reaktorában a tartózkodási idővel (Hanaki *et al.*, 1987). A kis pH vagy

rövid tartózkodási idő esetén úgy tűnik, több vajsav és kevesebb propionsav képződik. Ha a vajsavtermelő baktériumok elszaporodnak, akkor stabil vajsavtermelés várható. De az ilyen üzemeltetési állapotok az általános savtermelés szempontjából kedvezőtlen.

Sav- és a hidrogén termelés kapcsolata

Régóta ismert, hogy a hidrogént baktériumok termelik anaerob körülmények között. Az élő szervezetekben a hidrogén képződését a hidrogenáz enzim katalizálja. A fermentatív hidrogéntermelés rendszerint a cukrok anaerob glikolitikus lebontásán, vagyis a piroszőlősav anaerob metabolizmusán keresztül játszódik le. A 1 mol glükózból fermentációval elméletileg 4 mol H₂ nyerhető:



A hidrogén-termelés optimális pH értéke 5,0 – 5,5 érték között van. Nagyobb pH értéknél a hidrogén-termelés csökken, majd leáll. Az anaerob lebontás során mindig képződik hidrogén, melynek nagy részét a metántermelő baktériumok a szén-dioxid redukciójára használják fel. Az anaerob fermentációt a jelenlegi tudományos ismeretek alapján nem lehet olyan módon vezetni, hogy a hidrogén-termelés kerüljön túlsúlyba, de a körülmények megfelelő megválasztásával elérhető, hogy a metán mellett jelentős mennyiségű hidrogén képződjék. A fentiek miatt a hidrogéntermelés körülményeinek részletes ismertetésétől eltekintünk.

Összefoglalás

A komplex anaerob lebontási folyamat magában foglalja a részfolyamatok kapcsolatait és azok összefüggéseit. *Siegrist et al.* (1993) szerint az anaerob lebontás az alábbi részfolyamatokból áll:

- A szerves lebegőanyagot a hidrolizáló baktériumok nagy molekulájú fehérje, szénhidrát és lipid frakcióra bontják szét. Ezt követően a hidrolízis tovább folyik és megjelennek kisebb molekulájú hidrolízis termékek (szerves savak, összetett cukrok) képződnek.
- A fermentáció hatására közbenső intermedier termékek (20%: propion- és vajsav) és ecetsav (35%) képződnek.
- A homoacetogén baktériumok a hidrogén felhasználásával a szén-dioxidot redukálják és ecetsavat termelnek.
- Szulfát és nitrát jelenlétében a szulfátredukáló vagy a nitrát redukáló baktériumok a redukált termékeket (alkoholok, vajsav, propionsav) szén-dioxiddá és ecetsavvá oxidálják.
- A szulfátredukáló vagy a nitrátredukáló baktériumok a hidrogént vagy hangyasavat, formiátot oxidálják.
- Ecetsavat hasznosító metántermelő baktériumok (*Methanosarcina*, *Methanothrix*) az ecetsavat metánná és szén-dioxiddá alakítják.
- Hidrogenofil baktériumok a szén-dioxidot hidrogén felhasználása mellett metánná alakítják.

Szintrofizmus fogalma alatt olyan lebontási folyamatot értünk, amelyikben kettő vagy több mikroorganizmus a folyamat végrehajtásában együttműködik, de a lebontási folyamatot külön-külön egyik mikroorganizmus sem tudja végrehajtani. Ez azt jelenti, hogy egyik baktérium faj termékeiből él egy másik faj.

Az anaerob lebontás első lépése, hogy az oldott- és lebegőanyag formában lévő komplex nagymolekulákat a savtermelő baktériumok enzimek által kisebb molekulákká átalakítják. A hidrolízis eredményeképpen a kisebb molekulák oldatba mennek és ezeket a vegyületeket a savtermelő baktériumok szubsztrátként használják fel. A hidrolízis és a savképződés folyamatát nem lehet szétválasztani, mert a hidrolízissel együtt az illó zsírsavképződés is elindul. A savtermelésben, úgy tűnik, az obligát anaerob baktériumok játsszák a legnagyobb szerepet. Az aerob és fakultatív anaerob baktériumok a rothasztó rendszer minden fázisában jelen vannak, de számszerűsített mennyiségük kevesebb, mint 1 %-a az összes savtermelő bakteriális populációnak. A tudomány mai állása szerint az aerob és fakultatív anaerob baktériumok lényeges szerepet nem játszanak a rothasztás folyamataiban. A savtermelést befolyásoló fontosabb tényezők: pH, lúgosság, illó zsírsav koncentráció, hidraulikai tartózkodási idő, hőmérséklet, reakció termékek és a propionsav felhalmozódása.

Irodalom

Britz, T.J., Spangenberg, G., Venter, C. A. (1994): Acidogenic microbial species diversity in

- anaerobic digesters treating different substrates. *Water Science and Technology* Vol.30, No.12, 55 – 61
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J.* (2006/a): *Biology of Microorganisms*. Pearson Prentice Hall Pearson Education International. Eleventh Edition, 371 – 373, 560 – 562
- Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J.* (2006/b): *Biology of Microorganisms*. Pearson Prentice Hall Pearson Education International. Eleventh Edition, 557 - 571
- Cha, G.C., and Noike, T.* (1997): Effect of Temperature Change and HRT on Anaerobic Acidogenesis. *Water Science and Technology*, Vol. 36, No. 6 – 7, 247 – 253
- Cookson J. T., Burbank N. C.* (1965): Isolation and identification of anaerobic and facultative bacteria present in the digestion process. *J. Wat. Pollut. Control Fed.* 37.
- Dohányos M., Kosova B., Zabranská J., Grau P.* (1985): Production and utilization of volatile fatty acids in various types of anaerobic reactors. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 17. Tampere.
- Ferreiro N., Soto M.* (2003): Anaerobic hydrolysis of primary sludge: influence of sludge concentration and temperature. *Water Science and Technology*. Vol. 47. No.12.
- Fox P., Pohland F.G.* (1994): Anaerobic treatment applications and fundamentals: substrate specificity during phase separation. *Water Environment Research*. Vol. 66. No.5.
- Gerardi, M. H.* (2003): *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 11 – 57
- Ghosh S.* (1990): Pilot-scale demonstration of two-phase anaerob digestion of activated sludge. *Water Sci. and Technol.*
- Hanaki K., Matsuo T., Nagase M., Tabata Y.* (1987): Evaluation of effectiveness of two-phase anaerobic digestion process degradation complex substrate. *Wat. Sci. Technol.* 19, Rio.
- Hattingh W.H.J., Kotze J.P., Thiel P.G., Thoerien D.F., Siebert M.L.* (1967): Biological changes during the adaption of an anaerobic digester to a synthetic substrate. *Wat. Res.* 1.
- Hungate R. E.* (1966): *The rumen and its Microbes*. Academic Press, New York.
- Inanc, B., Matsui, S., Ide, S.* (1996): Propionic acid accumulation and controlling factors in anaerobic treatment of carbohydrate: effects of H₂ and pH. *Water Science and Technology* Vol. 34, No. 5-6, 317-325,
- Inanc, B., Matsui, S., Ide, S.* (1999): Propionic acid accumulation in anaerobic digestion of carbohydrates: an investigation ont he role of hydrogen gas. *Water Science and Technology* Vol. 40, No. 1, 93 – 100
- Kotzé J.P., Thiel P.G., Hattingh W.H.J.:* (1969): Anaerob digestion II. The characterization and control of anaerob digestion. *Wat. Res.* 3.
- Kotzé J.P., Thiel P.G., Toerien D.F., Hattingh W.H.J., Siebert M.L.* (1968): A biological and chemical study of several anaerobic digester. *Wat. Res.* Vol. 2.
- Mata-Alvarez, J.* (2003): Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing, 69 – 83
- McCarty P.L.* (1971): *Energetics of organic matter degradation advances in chemistry series*, 105. American Chemical Society, Washington D.C. 91.
- McInerney M.J.* (1988): Anaerobic hydrolysis and fermentation of fats and protein. In: *Biology of Anaerobic Microorganisms*. A.J.B. Zender (ed.), John Wiley, New York.
- McKinney R.E.* (1962): *Microbiologic for Sanitary Engineers*. McGraw-Hill, New York.
- Roché C., Albertyn H., van Gylswyk N.O., Kistner A.* (1973): The growth response of cellulolytic acetate-utilising *Butyrivibrios* to volatile fatty acids and other nutrients. *J. Gen. Microbiol.* 78.
- Siegrist, H., Renggli, D., Gujer, W.* (1993): Mathematical modelling of anaerobic mesophilic sewage sludge treatment. *Water Science and Technology* Vol 27, No.2, 25 – 36
- Thiel P.G., Toerien D.F., Hattingh W.H.J., Kotzé J.S., Siebert M.L.* (1968): Interrelations between biological and chemical characteristics in anaerob digestion. *Wat. Res.* 2.
- Toerien, D. F., Hattingh, W. H. J.* (1969): Anaerobic Digestion. I. *Microbiology of Anaerobic Digestion*. *Water Research*, Vol. 3, 385 – 416
- Toerien, D. F., Siebert, M.L., Hattingh, W. H. J.* (1967): The bacterial nature of the acid-forming phase of anaerobic digestion. *Water Research*, Vol. 1, 497 – 507
- Winter, J., Temper, U.* (1987): *Mikrobiologie der anaeroben Abwasserreinigung*. *Abwassertechnik*, Heft1, 14 – 21