

BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM
KERTÉSZETTUDOMÁNYI KAR
Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék



Országos Tudományos Diákköri Dolgozat

Ko-fermentációs kísérletek az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen

Bus Katalin

Környezetgazdálkodási agrármérnök szak, IV. évfolyam

Konzulens: Dr. Kardos Levente, egyetemi adjunktus

Budapest, 2014

Tartalomjegyzék

1. Felhasznált rövidítések.....	4
2. Bevezetés.....	5
3. Célkitűzés	6
4. Irodalmi áttekintés	7
4.1. Anaerob iszapstabilizálás – Rothasztás	8
4.1.1. Rothasztók főbb üzemi paraméterei	9
4.1.2. Mezofil rothasztás	12
4.1.2.1. Ko-rothasztás (ko-fermentáció)	12
4.1.3. Főbb folyamatok – anaerob lebontás alapjai	12
4.1.3.1. Hidrolízis	13
4.1.3.2. Fermentatív savtermelés, acidogenezis	13
4.1.3.3. Ecetsavtermelés, acetogenezis	14
4.1.3.4. Metántermelés	14
4.1.4. Az enzimek típusai, működésük és szerepük az anaerob lebontásban ..	14
4.2. Az alapvető tápanyagtípusok	16
4.2.1. Szénhidrátok	16
4.2.2. Fehérjék	17
4.2.3. Lipidek	17
4.3. Különböző iszapstabilizálási, rothasztási eljárások	18
4.4. Észak-pesti Szennyvíztisztító Telep	19
5. Anyag és módszer	20
5.1. Betáplált anyagok	20
5.2. Kísérletek	20
5.2.1. Kísérleti összeállítás	20
5.2.2. Mérések menete	21
5.2.2.1. Biogáz mennyiségének és összetételének mérése	21
5.2.2.2. pH mérés, száraz- és szervesanyag vizsgálat	22
5.2.2.3. Összillósav és lúgosság vizsgálat	22
5.2.2.4. TC, TN, TS vizsgálat	22
5.2.2.5. Enzimaktivitás mérés	23
6. Eredmények	24

6.1. Gázmennyiségek és gázösszetétel értékelése	24
6.2. Salátahulladék kísérleteknél fizikai roncsolás (darálás) mértékének hatása .	31
6.3. C/N arány hatása	32
6.4. Enzimaktivitások mértékének összehasonlítása	32
6.5. Kísérleti rothasztók hatékonysága	34
6.5.1. Kevertetés hatékonysága	34
6.5.2. pH	34
6.5.3. Összillósav és lúgosság eredményeinek értékelése	35
6.5.4. Összes, illetve fajlagos gázhozam és gázösszetétel	35
6.5.5. Lebontás hatásfoka – szervesanyag lebontás	38
7. Következtetések, javaslatok	39
7.1. Kísérletek értékelése, észrevételek	39
7.2. Javaslat további kísérletek végzésére	39
8. Összefoglalás	40
9. Köszönetnyilvánítás	41
10. Irodalomjegyzék	42
11. Mellékletek	44

1. Felhasznált rövidítések

Ammónia	NH_3
Hidraulikus tartózkodási idő	HRT
Hidrogén	H_2
Kalcium-karbonát	CaCO_3
Kémiai oxigénigény	KOI
Kén-hidrogén	H_2S
Metán	CH_4
Nitrogén	N_2
Oxigén	O_2
Rothasztó/Kísérleti rothasztó	R
Szárazanyag-tartalom	Sz.a.
Szennyvíziszap	Sz.iszap
Szervesanyag-tartalom	Szerves.a.
Szén	C
Szén/Nitrogén arány	C/N (arány)
Szén-dioxid	CO_2

2. Bevezetés

A Föld népességének és életszínvonalának növekedésével együtt jár az egyre növekvő energiaszükséglet, amely jelentős környezetvédelmi problémákat vet fel és a fosszilis tüzelőanyagok csökkenésével jár. Bár a kőolaj fajlagos energiatartalma nagy, de rengeteg CO₂-t emittálunk általa a légkörbe. A Földünk energiakészletei végesek, épp ezért a megújuló energiaforrások használata napjainkban egyre nagyobb szerepet kap.

Korlátlan energiaforrásként, a Nap jut majd döntő szerephez. Hasznosíthatjuk ezt a sugárzási energiát kollektorokkal, fotocellákkal, illetve fotokémiailag tárolt biomasszából (mezőgazdasági hulladék) mikrobiális fermentációval gáz alakban felhasználhatóvá tehetjük.

Az emberi tevékenység által rendszeresen, nagy mennyiségű mezőgazdasági, kommunális és ipari hulladék keletkezik, ennek nagy része biológiai úton lebomló szerves anyagból áll, ami az ökoszisztémában súlyos károkat okozhat, ha nem kezeljük. A helyreállítás, rehabilitáció költségei magasabbak lehetnek, mint a kezelés költségei, amiből akár nagy mennyiségű energia is származhat, ráadásul a környezetkárosítás mértékét is csökkentjük vele.

Tehát az energianyerés mind a mezőgazdasági hulladékokból, mind a kommunális és ipari szennyvíztisztításból és egyéb gazdasági tevékenységből (élelmiszeripar) származó hulladékokból lehetséges, az anaerob fermentáció segítségével, amellyel biogáz állítható elő. A korszerű szennyvíztisztítás leglényegesebb eljárásainak egyike a szennyvíz ülepítése. Az ülepítés során az előülepítőből származó nyersiszapból és az utóülepítőből származó eleveniszapból kapunk egy kevertiszapot, ezt adjuk fel a rothasztó tornyokba szivattyúkkal iszapstabilizálás céljából. Az iszapstabilizálás lehet anaerob, vagy aerob, de az utóbbi esetében, bár költséghatékony, biogáz nem termelődik, ezért az anaerob rendszer egy nagyobb szennyvíztisztító telepen megfelelőbb. Ezen felül a szilárd hulladékok lerakására vonatkozó környezetvédelmi előírások szigorodásával az anaerob fermentorok jelentősége megnövekedett ezért, mint már fentebb is szó esett róla, ma már ezeket a mezőgazdasági és egyéb szilárd szerves hulladékokat előszeretettel szállítják szennyvíztisztítóba stabilizálás céljából.

A rothasztás (anaerob iszapstabilizálás) több pozitívummal is jár: hulladékok eltávolítása és újrafeldolgozása, környezeti ártalom csökkentése, energiaellátás, trágyaellátás és humuszképzés. Ezért tartottam fontosnak, hogy ez legyen a szakdolgozati témám alapja. Kísérleteket végezhettem az FCSM Zrt. Észak-pesti Szennyvíztisztító Telephelyén, mely három, illetve később további 2 anaerob, mezofil, ko-rothasztós kísérletsorozatból állt.

3. Célkitűzés

Az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telepen módomban állt egy napjainkban egyre elterjedtebbé vált technológiával foglalkozni, kísérleteket folytatni. A biogáz, a napenergia szekunder, illetve terciér megjelenési formája és a Nap egy korlátlan energiaforrást jelent, ha azt megfelelően hasznosítjuk. Tehát fontosnak tartom a kollektorok és fotocellák mellett, ezt az energianyerési formát is kiaknázni.

Az szennyvíziszapot magas víztartalma miatt eredeti formájában gazdaságosan szállítani, vagy elhelyezni nem lehet, ezért ezt az iszapot sűríteni, vízteleníteni szükséges. Az iszap magas szerves anyag tartalma miatt biológiailag nem stabil, bomlása során gázok keletkeznek (CH_4 , CO_2 stb.), így kezeletlen formában való elhelyezése környezeti kockázatot jelent, ráadásul a bomlása során képződő biogáz energiatermelésre használható. Nem meglepő tehát, hogy az iszapkezelési technológia részeként az anaerob iszapstabilizálást vagy más néven a rothasztást gyakrabban alkalmazzák az üzemeltetők. Továbbá szerves hulladékok adagolásával tovább emelhető a rothasztó teljesítménye, és csökkenthető a környezetkárosítás mértéke, ezen felül az iszap stabilizálásával, víztelenítésével, komposztálásával mezőgazdasági területeken, bizonyos növénykultúráknál trágyázáshoz is alkalmazható. Az iszapot rekultivációs és energetikai célokra is alkalmassá tehetjük.

A telepen három darab, tíz literes, mezofil, anaerob (levegőtől elzárt) rothasztóval dolgozhattam, ezek ko-rothasztósos kísérletek voltak, azaz az ottani szennyvíztisztítás során keletkezett szennyvíziszapot (oltóiszap) és más szerves hulladékokat "rothasztottam". A kísérletek során több paramétert is vizsgáltam, mik segítették és mik akadályozták a rothasztást, illetve mennyi biogáz termelődött az egyes rothasztókból.

A cél tehát a rothasztás hatékonyságának vizsgálata volt, mind a betáplált anyagokra, mind az üzemi körülményekre vonatkozóan, ezen kívül a biogáz termelődés mennyiségi és minőségi meghatározása, illetve a biogáz feltáródási idő összehasonlítása az egyes kísérleti rothasztókban.

4. Irodalmi áttekintés

A természetes vizeink bizonyos mértékű szennyezést még képesek tolerálni, a szennyvíztisztítás feladata tehát röviden az, hogy olyan mértékben tisztítsa meg szennyvizeinket, hogy a fennmaradó szennyezőanyagokkal a befogadó már képes legyen megbirkózni öntisztulási folyamati révén (Szilágyi és Orbán, 2007).

A szennyvíztisztítás technológiai lépcsőit három fokozatba soroljuk. Az 1. fokozat a mechanikai tisztítás melynek során a durva, oldatlan állapotban lévő szennyezőket távolítjuk el a szennyvízből (Barótfi, 2005; Kárpáti, 2007).

A 2. fokozat a biológiai tisztítás, amelynek során a lebegő szerves részecskéknél, valamint az oldott és kolloidális szerves szennyezőknél a lebontása zajlik. A mikroorganizmusok bontása (oxidáció) által a szervesanyag-tartalom lecsökken. Az eleveniszapos medencében a lebontás természetes módon zajlik le, de a biológiai tisztítás történhet mesterséges körülmények között is. A másik módszer a biofilmes rendszer, ez a két rendszer akár ötvözhető is. Az utóbbiban a szilárd hordozón (égetett agyagszemcsék, műanyag, textil, kötőrmelék stb.) kialakuló biofilmrétegben történik a biológiai tisztítás (Barótfi, 2005; Kardos, 2012).

Az eleveniszap pelyhek méretük miatt könnyen ülepezhetőek, így a tisztított szennyvíztől elválaszthatóak. Az eleveniszapot az utóülepítő medencékben ülepezik, azaz választják el a tisztított szennyvíztől. Ez egy igen lassú áramlású medence lánctalpas kotrószerkezetekkel. A szerkezet az eleveniszapot zsompba kotorja. A leülepedett iszap egy része visszakerül az eleveniszapos medencék elejére, recirkulációs iszapként (FCSM Zrt.). Az iszap azon részét, mely a mikroorganizmusok túlszaporodásához vezetne, fölősiszapként (szekunder iszap) az iszapkezelési technológia vonalára vezetik (Barótfi, 2005; Kárpáti 2007).

A 3. lépcső, a különböző fizikai, kémiai, biológiai utókezelési technológiák. A tercier fokozatban a nitrogén- és foszfor-vegyületek, valamint a mikroszennyezők (pl. peszticidek, gyógyszermaradványok) eltávolítása történik (Barótfi, 2005; Kardos, 2012). A műszaki egységei általában költségesek és nagy helyigényűek, ezért csak indokolt esetben alkalmazzák (érzékeny befogadó).

A szennyvíztisztításból keletkezett iszap, megfelelő kezelések után további célokra felhasználható, vagy lerakóhelyre szállítható. Több kezelési mód is létezik, annak megválasztása attól függ, hogy mire kívánják hasznosítani az adott iszapot és milyen az iszap összetétele. Az iszapkezelés célja a víztartalom, térfogat ez a költséghatékonyság növelése miatt fontos, ill. szervesanyag-tartalom csökkentése, fertőzőképesség megszüntetése és a

szaghatások kiküszöbölése. Az iszapkezelés egymással különféleképpen kombinálható lépései a stabilizálás, a sűrítés, a kondicionálás és a víztelenítés (Barótfi, 2005).

Stabilizálás: A stabilizálás során a szerves, ill. szagot okozó anyag szagmentes végtermékké alakul át. Ezen kívül csökkenti a patogén baktériumok számát és a gyommagvak csírázókéességét, ill. megakadályozza a rovarok elszaporodását a lerakás után (Öllös, 1995).

Sűrítés: Leginkább a hatékonyabb stabilizálás érdekében használják. A primer (előülepítőből származó iszap) és a szekunder iszap (utóülepítőből származó fölösiszap) nagy mennyiségű vizet tartalmaz (96-98%), ennek a víztömegnek egy részét az iszapkezelés során eltávolítják (Öllös, 1995).

Kondicionálás: Célja a víztelenítés hatékonyabbá, kedvezőbbé tétele, ezáltal a szárazanyag-tartalom növelése. A kezelés lehet fizikai (pl. hőkezelés), vagy kémiai (pl. polielektrolitok) (Öllös, 1995).

Iszapvíztelenítés: A kondicionált iszap víztartalmának további csökkentése, amely megvalósulhat természetes vagy mesterséges módon. A természetes módszernél történhet iszapszikkasztó ágyakon, a mesterségesnél a víztelenítést gépekkel végzik pl.: centrifugával, membrán-, ill. szalagszűrő préssel. Fő szempont az iszapelhelyezés költségeinek csökkentése (Öllös, 1995).

4.1. Anaerob iszapstabilizálás

Az anaerob iszapstabilizálás, más néven rothasztás és biogáztermelés, oxigéntől elzárt rendszerben, fermentorokban történik, megfelelő hőmérséklet, kevertetés és pH mellett. A metántermelés széles hőmérséklettartományban működhet 0°C és 60°C között, bár más-más intenzitással, ill. sebességgel. Ezen a széles hőmérséklet skálán jelölték ki a mezofil tartományt, amely 30-38 °C (optimuma 35 °C) közé helyeztek és a termofil tartományt, amit 50-60 °C (optimuma 55 °C) között van a tartománya. Ezen a hőmérséklettartományoknál a fajlagos gáztermelés csúcsot mutat. A gyakorlatban így mezofil és termofil anaerob fermentorokat üzemeltetnek (Öllös et al., 2010).

A szervesanyag lebontása több lépcsőben zajlik, a mikroorganizmus csoportok közreműködésével. A képződő biogázból elektromos és hő energiát állítanak elő, gázmotorok segítségével. A rothasztók üzemelését több tényező is befolyásolja: szubsztrátösszetétel és koncentráció, ill. a szervesanyag-terhelés, a HRT, a hőmérséklet, a pH, toxikusság, azaz az esetleges gátló anyagok, a kevertetés hatékonysága (Öllös et al., 2010).

4.1.1. Rothasztók főbb üzemi paramétere

Az anaerob rothasztók ellenőrzésére a következő paraméterek a legfontosabbak: pH, lúgosság, illósav, szervesanyag lebontás, gáztermelés, gázösszetétel és enzimaktivitás.

Illósav

Az illósavak koncentrációjának erős növekedése jelzi, hogy a sav- és a metántermelő baktériumok között az egyensúly felborult, a savtermelők számára kedvezően (Oláh et al., 2010).

A legkedvezőbb illósav koncentráció érték 300 mg/L-re tehető. Általában elfogadott, hogy ha az illósavak koncentrációja ecetsavban kifejezve 2000-3000 mg/L fölé emelkedik, akkor a rothasztó működése már nem tekinthető normálisnak (Palkó et al., 2004; Oláh, 2010).

Jó üzemi paraméter a koncentrációváltozásának sebessége is, amelyet a metanogén és egyéb mikroorganizmusok tevékenysége befolyásol. Ha koncentráció gyorsan nő az vagy a savképző baktériumok aktivitásának növekedését jelzi, vagy a metántermelő baktériumok aktivitásának csökkenését (Román, 2010).

Az illó szerves savak savassága a közeg kémhatását is megváltoztatja, de ha a pH semleges tartományban van, az illósavaknak nincs számottevő toxikus hatása a metanogén baktériumokra 10000 mg/L koncentráció alatt (Kárpáti, 2002).

Lúgosság

A rendszerben nem történhet nagyfokú pH-ingadozás, ha a lúgosság mértéke nagy, azaz ha a zsírsavak koncentrációja hirtelen megnőne, az nem savanyítaná el a rothasztót. A lúgosság általánosan elfogadott tartománya 1000-5000 mgCaCO₃/L. Tapasztalatok szerint egyensúlyban lévő iszaprothasztási folyamatban a lúgosság (CaCO₃-ban kifejezve) nem csökken 2000 mg/L érték alá.

Megfigyelések alapján elmondható, hogy ha a lúgosság 1500 mgCaCO₃/L érték alá esik és ugyanekkor az illósav koncentráció ecetsavban kifejezve 2000 mg/L fölé emelkedik a rendszer egyensúlyi viszonyának felborulása várható (Palkó et al., 2004).

Az üzemi gyakorlatban a fermentáció állapotának jellemzésére használják még az illósav (mint mg/L ecetsav) és a lúgosság (mint mg CaCO₃/L) arány számát is. Az egyensúly felborulása akkor következik be, ha a hányadosuk nagyobb, mint 0,8. Az optimális arányszám 0,1–0,2 között van (Palkó et al., 2004).

pH

A lebontási folyamat kiegyensúlyozott marad, amennyiben a pH 6,8-7,2 közötti tartományon belül marad. (Román, 2010).

A pH erősen függ a lúgosság mértékétől, az illósavak koncentrációjától, illetve a savasság és a CO₂ tartalomtól, ill. befolyásolhatja a betáplált szubsztrát minősége is. Semleges környezetben mikroorganizmusok maximális sebességgel tudnak szaporodni, hiszen az ettől eltérő pH kedvezőtlenül hat az enzimek egyensúlyára. A 6,8-nál kisebb pH azt jelzi, hogy az egyensúly a mikroorganizmusok csoportjai között felborult, és a metanogén baktériumok háttérbe szorultak, ők a legérzékenyebbek a pH változására, ha a pH 6,0 érték alá esik a metántermelő baktériumok inhibíciója figyelhető meg, mivel az illósavak felhalmozódnak (Kárpáti, 2002).

Szerves anyag lebontás hatásfoka

Az anaerob rothasztó hatásfokának a meghatározása rendkívül fontos, mivel ez kihat a végtermék minőségére és a folyamat gazdaságosságára. Az anaerob rothasztó hatásfoka mérhető a betáplált, illetve távozó anyagok KOI, szervesanyag-tartalma vagy széntartalma alapján is (Román, 2010; Kardos, 2012).

A gyakorlatban a szervesanyag lebontás hatásfokát szokták meghatározni. Ennek várható méreteke egy normál szennyvíziszap rothasztása esetén képlettel becsülhető vagy az 1. táblázat segítségével meghatározható (Metcalf és Eddy, 2003).

A szerves anyag lebontás várható hatásfokának meghatározására szolgáló képlet:

$$V_d = 13,7 \times \ln(\text{SRT}) + 18,9$$

ahol:

V_d - Szerves anyag lebontás hatásfoka

SRT - Szilárd anyagok átlagos tartózkodási ideje (d)

1. táblázat - A szerves anyag lebontás várható hatásfoka

Rothasztási idő (d)	Szerves anyag lebontás (%)
30	65,5
20	60,0
15	56,0

Gázfejlődés

Az zsírokban, olajokban gazdag anyagok esetében több biogáz képződik, illetve zsírban gazdag szubsztrátok magasabb metántartalmat eredményeznek.

A metántermelés fő forrása a szén-dioxid redukciója, az ecetsav lebontása és a metanol redukciója. A rothasztóban a metángáz mennyisége nő a tartózkodási idő során, a hidrogén csökken, a szén-dioxid pedig változik, azaz növekedés és csökkenés is elképzelhető. Elmondható, hogy a folyamatokról jó információt ad a biogáz összetétele is, a minőséget ezért rendszeresen szokták vizsgálni a gyakorlatban, legjobb információt a CH₄ változása adja (Öllös et al., 2010).

Enzimaktivitás

Enzimaktivitás mérésekkel jól jellemezhető a rothasztó savtermelő fázisában lejátszódó hidrolízis (Thiel et. al, 1967). A baktériumok által termelt enzimek a sejtmembránon keresztül (exoenzimek) kijutnak és a (amiláz, proteáz, cellobiáz, foszfatáz) a makromolekulákat (fehérjék, szénhidrátok, zsírok, cellulóz, lignin) hidrolizálják, kisebb egységre (egyszerű szénhidrátok, aminosavak, zsírsavak, glicerin) bontják, amelyek így már képesek bejutni a sejtek belsejébe (Bai, 2007). A sejten belüli bontást az endoenzimek végzik. Ezt a vizsgálatot akkor érdemes alkalmazni, ha gyakori a szubsztrát összetételének változása, ilyenkor a betáplált szubsztrátok lebontási folyamatairól ezek az enzimaktivitási értékek releváns információkat adnak. Az enzimaktivitást meghatározza a szennyvíziszap összetétele, a terhelés sebessége, a mikroorganizmusok természete, valamint a környezeti tényezők (hőmérséklet, pH, lúgosság, stb.) (Oláh et al., 2010).

Enzimaktivitás mérések:

- Proteáz (Thiel et. al, 1967)
- Lipáz (Vorderwülbecke, et. al, 1992)
- Celluláz (Hofmann, 1955)
- Dehidrogenáz (MSZ-08-1721/3-86)

Proteáz

A fehérjékben lévő polipeptidek kisebb peptidekké, majd aminosavakká való bontása, a peptidkötések hasításával valósul meg, amelyet proteáz enzimek végeznek. A proteáz aktivitásból a fehérjék hidrolízisére következtethetünk (Kardos, 2012).

Lipáz

A lipáz a növényi és állati eredetű olajokat, ill. zsírokat semleges közegben zsírsavra és glicerinre bontó enzim. A lipázaktivitásából a zsírok hidrolízisére következtethetünk (Román, 2010).

Celluláz

A cellulóz hidrolízise celluláz enzimek hatására megy végbe a rothasztás során. Az enzimaktivitás vizsgálattal a hidrolízis intenzitását határozhatjuk meg (Román, 2010).

Dehidrogenáz

A dehidrogenáz aktivitás összaktivitás jellemző paraméter, a H₂ átvitelét katalizálja a redukált hidrogén donorról az oxidált hidrogén akceptor szubsztrátra. Mesterséges hidrogén akceptor: 2,3,5-trifenil-tetrazólium-klorid (TTC) az enzim által katalizált folyamat eredményeképpen vörös színű trifetil-formazánná (TF) redukálódik és mennyisége a színreakciót követően a spektrofotométerrel mérhető (Kardos et al., 2009).

4.1.2. Mezofil rothasztás

A leggyakrabban alkalmazott technológia a mezofil tartomány, amikor a fermentorban levegő kizárásával, lassú, szakaszos vagy folyamatos keverés mellett, optimális esetben 36 - 37 C° hőmérsékleten valósul meg a szerves anyagok lebomlása (Wechs, 1985).

4.1.2.1. Ko-rothasztás (ko-fermentáció)

Az alapszubsztrát (anaerob iszapstabilizálásnál: szennyvíziszap) mellé egyéb szubsztrátok adagolásával, illetve azok homogenizálása után, végzett közös rothasztás. Ezt a közös rothasztást ko-fermentációnak, vagy ko-rothasztásnak nevezzük, a plusz szubsztrátot, pedig a ko-szubsztrátnak is nevezik. A ko-szubsztrátok magas szervesanyag-tartalmú hulladékok, általában mezőgazdasági, élelmiszeripari és vendéglátó ipari melléktermékek. A magas szervesanyag-tartalom, magas biogázhozamot eredményez, ami pedig kedvező biogáz minőség esetén, több előállítható energiát jelent. A ko-rothasztás sokkal hatékonyabb eljárásnak minősül, mint az egyszerű rothasztás, részben a jó makro- (N, P, S) és mikrotápanyag (Ca, Mg, Fe, Mn stb.) ellátás miatt, részben a magas szervesanyag-tartalmú ko-szubsztrátoknak köszönhetően (Öllös et al., 2010).

4.1.3 Főbb folyamatok – anaerob lebontás alapjai

Az mikroorganizmusok csoportjai a nagy molekulájú komplex szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok) végső soron metánná alakítják át. Több baktériumcsoport képes bontani ezeket az oldhatatlan, komplex szervesanyagokat, többféle anaerob útvonalon, ezáltal egyszerűbb szerves vegyületekhez jutva, melyeket más baktériumcsoportok szubsztrátként használnak fel. Ezáltal egy anaerob táplálkozási láncot kapunk. Az anaerob lebontási folyamat négy lépcsőre osztható, az utolsó lépcső a metántermelés. A négy lépcső

időben és térben nem különül el egymástól, de ezek egymásra épülő folyamatok, így sorrendjük meghatározott (Gerardi, 2003).

4.1.3.1. Hidrolízis

A hidrolízist végző mikroorganizmusok a nagy molekulaméretű szervesanyagokat (fehérjék, zsírok, szénhidrátok, cellulóz, lignin) egyszerű monomer molekulákká, azaz glükózzá, aminosavvá, zsírsavakká, glicerinné és purinokká alakítják át (Oláh et al., 2010). A hidrolízis során a savképző baktériumok exoenzimeinek hatására jönnek létre a monomer termékek, amelyek az enzimatikus hasításoknak köszönhetően, már oldott formában lesznek jelen a rendszerben. A baktériumok ezeket a monomereket veszik fel, ugyanis ezek megfelelő méretűek ahhoz, hogy bejussanak a sejtbe. A felvett molekulák ezek után átalakulnak, ill. hasznosulnak a baktériumok anyagcsere folyamatain keresztül, az endoenzimek segítségével. (Gerardi, 2003; Gerardi, 2006). A hidrolízissel együtt elindul az illó zsírsavképződés is. A fehérjék és a zsírok hidrolízise gyors és a folyamat alatt képződő illósavak koncentrációja megnőhet, amely akadályozhatja a metántermelő baktériumok szaporodását (Oláh et al., 2010).

4.1.3.2. Fermentatív savtermelés, acidogenezis

A savtermelő baktériumok az aminosavakat, peptideket, szénhidrátokat és a jelentős mennyiségben jelenlévő nagy szénatomszámú zsírsavakat kisebb vegyületekké alakítják. Ekkor jelennek meg a kis szénatomszámú zsírsavak, úgymint az ecetsav, a propionsav, a vajsav, valamint egyéb vegyületek (hidrogén, szén-dioxid, kénhidrogén, ammónium-vegyületek, illetve alkoholok). A savtermelés határfoka függ a hőmérséklettől, pH-tól, redoxpotenciáltól. Az ecetsavat, a hidrogént, a szén-dioxidot és az egy szénatomos molekulákat a metanogének közvetlenül CH_4 -ná és CO_2 -dá alakítják. Más fermentációs termékeket a metanogének nem képesek közvetlenül hasznosítani, pl.: a hosszú szénláncú zsírsavak, az egy szénatomnál hosszabb alkoholok, az elágazó szénláncú és aromás zsírsavak. Ezeket a termékeket a másodlagos fermentációs baktériumok ecetsavvá, széndioxiddá, hidrogénné és hangyasavvá alakítják, amelyeket már képesek közvetlenül felhasználni a metanogén baktériumok (Bitton, 2005; Oláh et al., 2010).

A lebontás folyamán keletkező illósavak közül legnagyobb arányban az ecetsav termelődik, ezt követi a propionsav és kis, de állandó mennyiségben termelődik vajsav, míg az ecetsav és propionsav aránya változhat a hőmérséklettől függően. A rothadási folyamatok egyensúlyának megbomlásakor is ecetsav és propionsav fordul elő a legnagyobb

koncentrációban. Elmondhatjuk, hogy a nem-metántermelő fázisokban bekövetkező változások kihatással vannak a metántermelő fázis egyensúlyi viszonyaira (Oláh et al., 2010; Öllös et al., 2010).

A szervesanyagok anaerob körülmények között való bontásakor mindig képződik H_2 , melynek nagy részét a metanogén baktráriumok CO_2 redukciójára használják fel (Oláh et al. 2010, Öllös et al. 2010).

Tehát a fázis anyagcseréjének végtermékei a telített zsírsavak, a CO_2 , ill. az aminosavak termékei NH_3 , valamint a H_2 . A savtermelés során kisebb mértékben hangyasav, tejsav és valeriánsav is képződik (Oláh et al., 2010).

4.1.3.3. Ecetsavtermelés, acetogenezis

Az acetogén baktériumok a savtermelési lépcső hosszabb szénláncú fermentációs termékeit, a zsírsavakat (pl. propionsav, vajsav, tejsav) és az alkoholokat ecetsavvá, hidrogénné és szén-dioxiddá alakítják, melyeket a metanogének hasznosítanak. Az előző szakaszokban keletkezett ecetsav és a hidrogén a metántermelő baktériumok szubsztrátja (Oláh et al., 2010).

4.1.3.4. Metántermelés

A metántermelési szakaszban mind morfológiailag, mind nagyságrendileg nagyon eltérő baktériumfajok tartoznak. A metanogének mezofil és termofil körülmények között szaporodnak a legjobban, de néhány faj $100\text{ }^{\circ}C$ fölött is képes erre (Gerardi, 2003).

A metanogének szubsztrátsprektuma rendkívül szűk. A metanogének szubsztrátjai elsősorban a savképződés fázisaiban képződött ecetsav, hidrogén, szén-dioxid, melyeket közvetlenül képesek metánná alakítani (Bai, 2007; Oláh et al., 2010).

A metanogének három csoportba oszthatók a hasznosított szubsztrátok szerint: hidrogén-hasznosító metántermelők (hidrogenotróf metanogének), ecetsav-hasznosítók (acetotróf metanogének) és metil csoportot tartalmazó egyszerű szerves vegyületeket hasznosítók (metilotróf metanogének) (Oláh et al., 2010).

4.1.4. Az enzimek típusai, működésük és szerepük az anaerob lebontásban

A baktériumok nem képesek nagy molekulatömegű vegyületek felvételére. A tápanyagok citoplazmába jutását a sejtfal és a sejtmembrán akadályozza. A tápanyagok citoplazmába kerülését, a baktériumok által termelt enzimek teszik lehetővé (Szabó, 1988).

A baktériumok endo- és exoenzimeket termelnek. Az endoenzimek a sejten belül fejtik ki hatásukat, az exoenzimek makromolekulákat bontják a sejten kívül. A lebontás során

vízben oldható, egyszerű szerkezetű vegyületek keletkeznek, és ezek jutnak be a sejtbe, ahol az endoenzimek befejezik a lebontásukat (Szabó, 1988; Öllös et al., 2010).

Minden baktérium termel endoenzimeket, ugyanakkor nem minden baktérium termel exoenzimeket. Egy baktérium sem termeli meg az összes szükséges exoenzimet a szennyvíziszap különféle szerves szennyezőinek lebontásához. Minden enzim specifikus és csak egy szubsztátot vagy szubsztrátcsoportot képes átalakítani ezért egy diverz baktériumközösségre van szükség a szervesanyagok lebontásához (Gerardi, 2003).

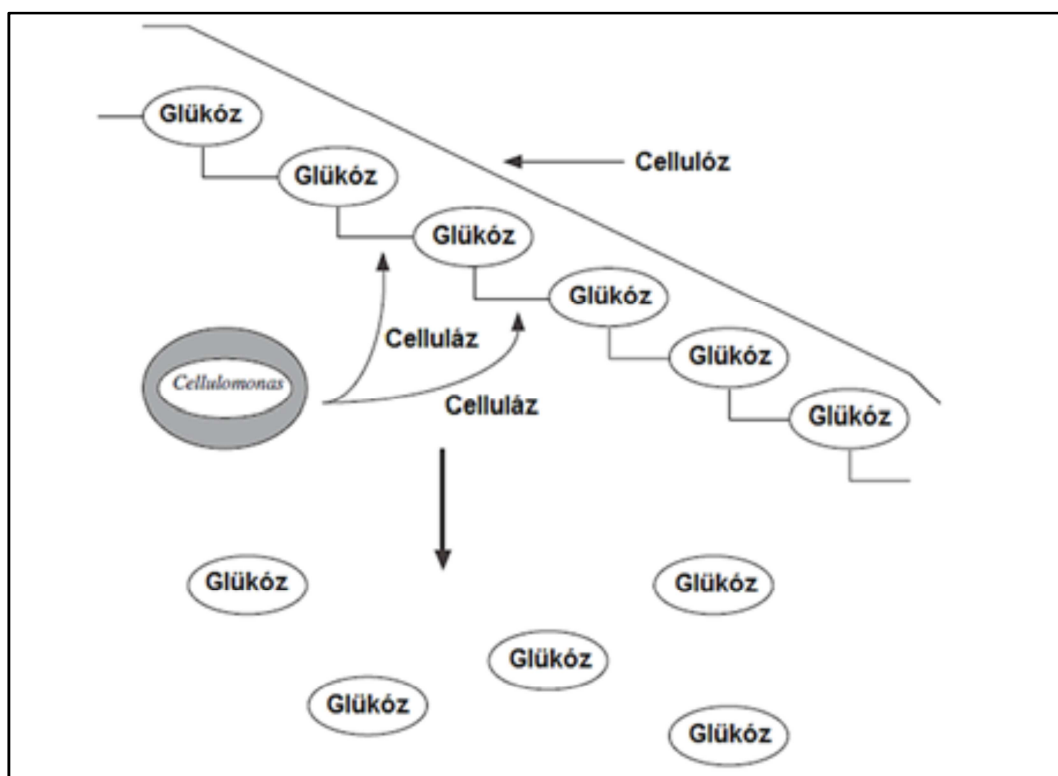
2. táblázat - Az exoenzimtípusok és szubsztrátjaik (Gerardi, 2003)

SZUBSZTRÁT	ENZIMTÍPUS	ENZIM	BAKTÉRIUM NEMZETSÉG	TERMÉK
Szénhidrátok	szacharolitikus	celluláz, amiláz	Cellulomonas	egyszerű cukrok
Fehérjék	proteolitikus	proteáz	Bacillus	aminosavak
Lipidek	lipolitikus	lipáz	Mycobacterium	zsírsavak

Az enzimek termelése a jelenlévő szubsztrátoktól függ. A szubsztráttól függ, hogy milyen enzimre van szükség annak bontásához (2. táblázat), hiszen minden enzim megtermelése energiát igényel és egyszerre többféle enzim folyamatos termelése túl sok energiát venne igénybe, ahhoz képest amennyit a szubsztrátum lebontásából nyerhet. Emiatt folyamatosan csak egy enzimet termel, ezt hívjuk konstitutív enzimnek, a többi enzimet induktív enzimnek hívjuk, ugyanis az adott szubsztrátum megjelenése indukálja a termelődését, az enzimtermelést megindító molekula származhat a környezetből, vagy a környezet hatására megváltozott anyagcsere folyamatokból (ELTE I).

A szerves molekulák hasznosításakor az időegység alatt felszabaduló energia mennyisége a meghatározó tényező. Több elérhető szénforrás esetén a mikroorganizmusok először a könnyebben bonthatót, a nagyobb felszabaduló energiával rendelkező szénforrást bontják le. Eközben a kevésbé kedvező paraméterekkel rendelkező szénforrások lebontásához szükséges enzimek szintézise gátlás alatt áll. Például glükóz és laktóz együttes jelenléte esetén, előbb mindig a glükózt hasznosítják, és csak utána kezdik meg a laktózt hidrolizálni (ELTE I).

Példa: A cellulázok



1. ábra - A cellulóz hidrolízise exoenzimekkel (Gerardi, 2003)

A cellulózbontó mikroorganizmusok celluláz enzimkomplexet (több enzimből épül fel) termelnek, így módon képes a cellulóz glukózig való bontására, több lépésben. (1. ábra) Ezek az enzimek a cellulóz teljes bontását együtt végzik (szinergisták). A bontás lassú folyamat és erősen függ a szubsztrátkoncentrációtól, a pH-tól, a hőmérséklettől és a víztartalomtól. A cellulóz bontására képes fajok között, mezofil és termofil, anaerob és aerob mikroorganizmusok egyaránt megtalálhatóak (ELTE I).

4.2. Az alapvető tápanyagtípusok

4.2.1. Szénhidrátok

A természetben leggyakrabban előforduló szerves szénvegyületek, a szénhidrátok (szacharidok). Az élő szervezetben, mint vázanyagok (cellulóz), energiaforrások (cukrok) és tápanyagraktárak (növényekben elraktározott keményítő) lehetnek jelen (Siposné et al., 2007).

A szénhidrátok C, O₂ és H₂ álló vegyületek. Szerkezetük szerint három csoportra oszthatóak: a monoszacharidok, a diszacharidok és a poliszacharidok. A monoszacharidok savas hidrolízissel tovább nem bonthatóak, ezzel szemben a diszacharidok két, a poliszacharidok pedig sok egyszerű szénhidrátra hidrolizálnak. A természetben a

poliszacharidok igen elterjedtek. A szerepük meghatározó, tartalék tápanyagokként (pl.: keményítő, glikogén) és vázanyagokként (pl.: cellulóz) is funkcionálhatnak (Furka, 1998; Siposné et al., 2007).

4.2.2. Fehérjék

A fehérjék fontos részei az élő szervezet számára, mivel részt vesznek az anyagok szállításában (pl. hemoglobin az O₂ szállításában), anyagcsere-folyamatokat katalizálnak (enzimek) és megvédenek a kórokozókkal szemben (immunfehérjék) (Siposné et al., 2007).

Nagy molekulájú szerves vegyületek, és kb. húszféle elemi építőközből, α-aminosavból áll. Az aminosavrészek peptidkötéssel kapcsolódnak egymáshoz, a fehérjék változatosságát az aminosavrészek kapcsolódási sorrendje (aminosavszekvenciája) adja. Az aminosavszekvencia a fehérjék elsődleges (primer) szerkezete. A peptidek az aminosavrészek száma szerint lehetnek dipeptidek, tripeptidek, tetrapeptidek etc. Az oligopeptidek max. 10 aminosavból, a polipeptidek több, mint 10 aminosavrésszből állnak. A fehérjék polipeptid molekulák. A fehérjék csoportosítása többféle szempont alapján történhet. Térszerkezetükön kívül, kémiai szempontok alapján is csoportosíthatjuk őket. Megkülönböztetünk egyszerű fehérjéket vagy proteineket, amelyek csak aminosavrészekből állnak, és összetett fehérjéket vagy proteideket, amelyeknél az aminosavrészekon kívül más alkotórészek is megtalálhatók (Furka, 1998).

4.2.3. Lipidek

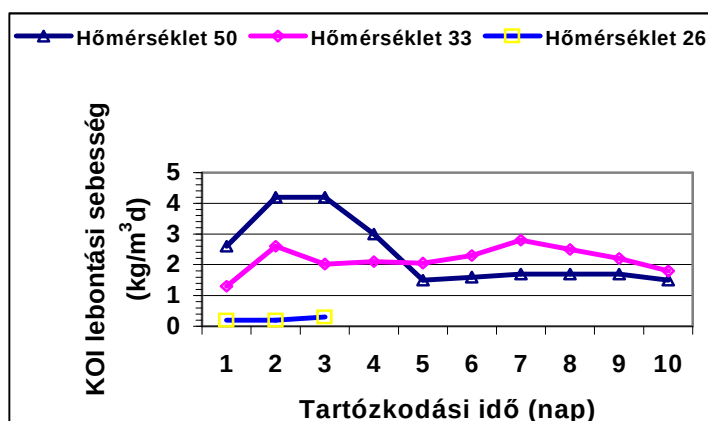
A lipidek a hosszú szénláncú zsírsavak glicerinnel alkotott észterei. A glicerin észterei a gliceridek. A zsírok és az olajok többféle triglicerid keverékei. A szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotú triglicerideket zsíroknak, míg a cseppfolyósakat olajoknak nevezzük. A trigliceridek halmazállapota a telített és telítetlen savkomponensek viszonylagos mennyiségétől függ, tehát a zsírookban a telített zsírsavak (pl.: sztearinsav), az olajokban a telítetlen zsírsavak (olajsav) dominálnak. A szilárd halmazállapotú zsírok általában állati eredetűek (pl.: disznózsír), ezzel szemben a folyékony olajok növényi eredetűek (pl.: napraforgóolaj) (Furka, 1998; Siposné et al., 2007).

A zsírok és olajok az állati és növényi szervezet tartalék tápanyagai, amelyeket szervezetük ecetsavrészletekre bont le (Siposné et al., 2007).

4.3. Különböző iszapstabilizálási, rothasztási eljárások

Hőmérséklet alapján

A szervesanyagok mezofil és termofil anaerob körülmények között egyaránt bonthatók, mely folyamat során biogáz képződik. Európában, a rothasztók jelentős része mezofil tartományban (36 – 37 °C) üzemel, azonban az elmúlt években több termofil (50 – 55 °C) rothasztó is épült. Létezik még a pszihofil hideg rothasztás is, de a hosszú HRT szükséglet és az alacsony gázkihozatal miatt nem használatos. Néhány évtizede bebizonyították, hogy a termofil rendszer szervesanyag lebontási és reakciósebessége nagyobb ezért kisebb műtárgy térfogatok szükségesek (Wechs, 1985; Hajdú, 2009). A különböző hőmérsékleti értékekhez tartozó KOI lebontási-sebesség értékek a 2. ábrán láthatóak.



2. ábra - A különböző hőmérsékleti értékekhez tartozó KOI lebontási-sebesség értékek (Palkó et. al, 2004)

A 2. ábrán nyomon követhető azonos HRT-nél, hogy termofil körülmények között a KOI lebontás gyorsabb, mint mezofil körülmények esetén, ahol egyenletes a lebontás mértéke.

Szakaszos és folyamatos üzemű készülék

Szakaszos üzemű rothasztásnál a betáplálás egyszer történik meg, esetleg szubsztrátum rátáplálás lehetséges, ennél a rothasztási módnál. A folyamatos üzemű készülék esetén ideális esetben, a szervesanyagokat folyamatosan adagolják a fermentációs térbe anaerob körülmények közt tartva a rendszert, eközben azonos mennyiségű rothadási maradék távozik a rendszerből (Bernd, 1983).

Egylépcsős és kétlépcsős anaerob rendszer

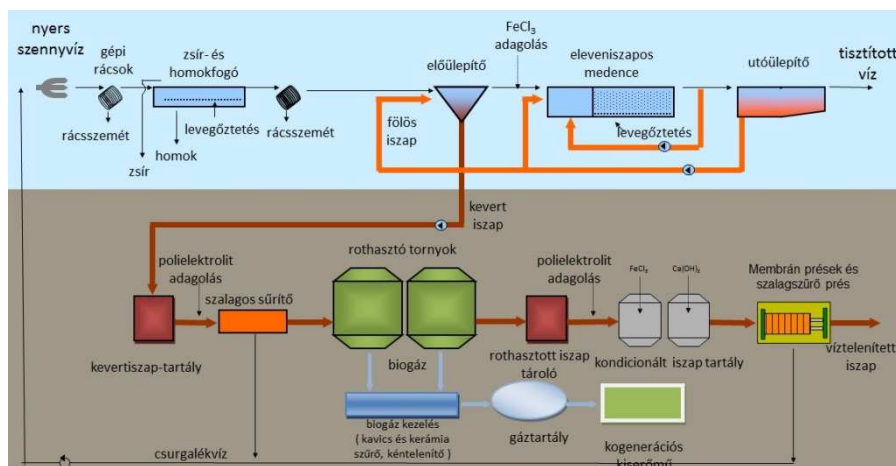
A különbség a kettő között, hogy a kétlépcsős rendszerben külön helyet kapott a savtermelő és a metántermelő lépcső, ennek célja a megfelelő kontaktus kialakítása az iszap és a biomassza között (Öllös et al., 2010).

4.4. Észak-pesti Szennyvíztisztító Telep

Az Észak-pesti Szennyvíztisztító Telep az ország második legnagyobb szennyvíztisztítója, mely 1980-ban kezdte meg működését. Eleinte az összegyűjtött szennyvizekből csak a mechanikai szennyeződések távolították el, 1986-tól azonban biológiai tisztítás is történik (FCSM Zrt.).

A telep folyamatosan üzemel és tisztítja meg a IV., XV., XVI., XVII. kerület, részben pedig, a X., XIII., és XIV. kerület, illetve az ide tartozó agglomerációs területek szennyvizeit, 2007 nyarától pedig a Duna-meder alatti átvezetés által az óbudai szennyvizek nagy részét is tisztítja. A szennyvíztisztító kapacitása napi 200 000 m³ (napi átl.: 140 000 m³) ez 600 000 lakos szennyvizének felel meg. 2010-re a tápanyag-eltávolítási fokozat kiépítése is befejeződött a telepen és a Dunába vezetett tisztított víz minősége jelentősen javult. A szennyvíztisztítás egyik mellékterméke a víztelenített szennyvíziszap, melyet komposztálásra és rekultivációra használnak fel. (A szennyvíz tisztítása során keletkezett szerves hulladék mennyisége évente 1600 m³.) (FCSM Zrt.).

2008-tól elkezdődött, a 2 nagy, egyenként 12 000 m³-es rothasztó tornyok által az iszaptól a biogáz előállítás, melyből a telep fedezni tudja elektromos energia igényének 70-90%-át, a szükséges hőmennyiségnek pedig 100%-át. A rothasztó tornyokba, további biogáz mennyiség növelés céljából, beszállított hulladékokat is fogadnak. Ezen kívül a telep fogadja és kezeli a budapesti csatornahálózatról érkező csatornaiszap egy részét és a technológiai folyamatok során képződő bűzös levegőt, biofilterek által megtisztítja (2 millió m³/nap), mely gyakorlatilag több mint amennyi szennyvizet megtisztít egy nap. Elmondhatjuk, hogy a szennyvíztisztító telepen környezetbarát, komplex tisztítási és hulladékfeldolgozási, valamint hasznosítási technológia működik. A telep technológia folyamatábrája a 3. ábrán látható (FCSM Zrt.).



3. ábra - Észak-pesti Szennyvíztisztító Telep folyamatábra

5. Anyag és módszer

5.1. Betáplált anyagok

A kísérletek folyamán a betáplált alapszubsztrátum az oltóiszap volt, melyet 3 db kísérleti rothasztóba adagoltam. A már kirothadt, metanogén mikroorganizmusokat tartalmazó oltóiszapot a 12 000 m³-es rothasztó toronyból vettük meg. Az 1. teszt kísérlethez a ko-szubsztrátumot boltban vásárolt salátamix biztosította, a következő két kísérlethez salátahulladékot használtam. A salátahulladék egyes komponensei (fejes saláta, kukorica, répa, hagyma) más arányban kerültek betáplálásra. A betáplált szubsztrátumok mennyiségét a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat – Betáplált szubsztrátumok

Kísérlet	Alapszubsztrátum	Ko-szubsztrátum
1.	2000 mL oltóiszap	250 g salátahulladék
2.	3000 mL oltóiszap	600 g salátahulladék
3.	3000 mL oltóiszap	600 g salátahulladék

A szubsztrátumok mellé kiegészítésként vizet adagoltam a hígításként a megfelelő kevertetés érdekében. Elemzés céljára a betáplálás napján, homogenizálás után 1 L el lett távolítva a rendszerből.

A mechanikai keverőlapátok túl sűrű anyagok egyenletes keverésére nem képesek, salátahulladék esetén a szálak anyagok a lapátokra tapadhatnak. A hígítás további oka az volt, hogy nagy mennyiségű biogázhozam volt várható a salátahulladékból, és maximum 10 L/nap gázmennyiséget tudtam lemérni a rendelkezésre álló eszközök segítségével (5.2.2.1.- Biogáz mennyiségének és összetételének mérése).

5.2. Kísérletek

5.2.1. Kísérleti összeállítás

A 10 L-es kísérleti rothasztókat mezofil, anaerob körülmények között tartottam, azaz 36-37°C-os hőmérséklet és oxigénmentes környezetet biztosítottam a baktériumoknak, ehhez indításkor légmentesen kellett zárni a tartályfedeleket. Ezen kívül pufferként, 50 g NaHCO₃-ot adagoltam a rendszerhez, így a pH végig az optimális 7,2-8,0 érték tartományban volt. A kísérletek közötti különbség a roncsolás mértéke volt, először a kimért salátahulladékot daráltam le (laboratóriumi turmixgéppel), hozzáadagolva egy kevés vízmennyiséget és ezeket töltöttem be a rothasztókba, majd hozzáadagoltam az oltóiszapot és a vizet. Ezeket homogenizáltam és megvettem az 1 L-es mintákat az üzemi mérések (pH, sz.a./szervesa.tartalom, illósav, lúgosság, TC, TN, enzimaktivitás) elvégzéséhez. A kísérlet

kezdetekor 2 percig argont áramoltattam a kísérleti rothasztókba az oxigén kiszorítása érdekében. Folyamatos mechanikai keverés alatt állt a rendszer, melynek feladata a lebontás sebességét befolyásoló paraméterek (mikroorganizmus koncentráció, tápanyag koncentráció, pH, hőmérséklet) kiegyenlítése volt. 20 percenként ismétlődő 2 perces kevertetési periódusokat alkalmaztam. A kísérleteket a biogázhozam nagymértékű csökkenésekor zártam le, ekkor először gyorsan mintát vettem ugyanis a celluláz enzimaktivitás esetében még aznap 24 órás inkubációs időre el kell tenni a mintát, 37°C-on.

5.2.2. Mérések menete

Az iszap vizsgálatokat a 4. táblázatban szereplő szabványok és mérőberendezések által végeztem, a kísérletek indításakor és zárásakor. Az illósav és a lúgosság mérése a Standard Methods (Organic and volatile acids 1995) alapján kidolgozott egyedi vizsgálat. A biogáz összetevőinek meghatározása az 5. táblázatban leírt készülék és detektálási mód alapján történt. A komponensek meghatározásához minimális szükséges minta 2 L volt.

4. táblázat – A szennyvíziszap vizsgálatára alkalmazott szabványok, műszerek

Szennyező anyag	Módszer	Mérőberendezés
Összes szárazanyag	MSZ EN 12880:2000	Analitikai mérleg: Sartorius BP 221 S
Izzítási maradék	MSZ EN 12879:2000	Analitikai mérleg: Sartorius BP 221 S
Izzítási veszteség	MSZ EN 12879:2000	Analitikai mérleg: Sartorius BP 221 S
TC	MSZ EN 13137:2003	vario MAX CNS Element Analyser
TN	ISO 13878:1998	vario MAX CNS Element Analyser
pH	MSZ EN 12176:2000	pH mérő: WTW inoLab
Összes illósav (titrimetria)	Standard Methods	
Lúgosság (titrimetria)	Standard Methods	

5. táblázat - Biogáz összetevőinek vizsgálatára alkalmazott műszer

Mérendő komponens	Mérési tartomány	Detektálási mód	Műszer
metán	0-100 v/v %	infravörös (NDIR)	Pronova SSM 6000
szén-dioxid	0-100 v/v %	infravörös (NDIR)	Pronova SSM 6000
oxigén	0-25 v/v %	elektrokémiai (EC)	Pronova SSM 6000
hidrogén	0-20 v/v %	elektrokémiai (EC)	Pronova SSM 6000
kén-hidrogén	0-5 000 ppm	elektrokémiai (EC)	Pronova SSM 6000

Az iszapvizsgálatok köréhez tartozott még a celluláz és a dehidrogenáz enzimaktivitás mérése. Az előbbi meghatározásakor Hofmann 1955-ben kidolgozott egyedi eljárását alkalmazzák a telepen, utóbbinál Kardos 2009-ben kidolgozott módszerét.

5.2.2.1. Biogáz mennyiségének és összetételének mérése

Mind a három kísérleti rothasztóban termelődő biogázt egy-egy vízzel feltöltött 10 L-es üvegballonba vezetik, majd a biogáz mennyiségét a víztérből való térfogat kiszorítás

alapján mL-ben, mérőhenger által határozható meg. A termelődött biogáz mennyiségének meghatározására munkanapokon, napi gyakorisággal került sor, tehát a hét első munkanapján, a munkaszüneti napokon összesen termelődött biogáz mennyiségét tudtam megmérni. A kieső napokon termelődött biogáz mennyiségét, a következő munkanap első mért értékéből számoltam ki átlagot vonva, ezáltal folyamatos adatsort kaptam. A biogáz összetevőit a Pronova SSM 6000 készülékkel határoztam meg, a minimális szükséges biogáz mennyiség 2 L volt, ekkora biogáz mennyiségből már meg tudta határozni, annak komponenseit, a fent említett detektálási módok alapján (5. táblázat).

5.2.2.2. pH mérés, száraz- és szervesanyag vizsgálat

A pH meghatározására üvegelektrodát alkalmaznak. A galvánelem elektromotoros erejéből a pH mérésére szolgáló készülékek automatikus módon számolják a pH-értéket, és a kijelzőről ez olvasható le az értéke. A telepi méréseknél Inolab Multi 9310 készüléket használtunk.

A minta bepárlásával és 105°C-on történő tömegállandóságig szárításával határozható meg a szárazanyag-tartalom. A szárítási veszteség, tehát a minta össztömege és a szárazanyagtartalma közötti különbség, a minta víztartalmát adja meg. Az előzetesen kiszáritott mintát porcelán (550°C-on kiizzított) tégelyben izzító kemencébe helyezzük és tömegállandóságig (de min. 3 óra, 550°C) izzítjuk. Az izzítási veszteséggel adjuk meg a minta szervesanyag-tartalmát.

5.2.2.3. Összillósav és lúgosság vizsgálat

Illósavak mérésekor a centrifugált iszap felülúszó részét 4,5 pH-ig savanyítjuk, majd desztilláljuk. A desztillátum első 200 mL-ét fogjuk fel, azzal folytatjuk a vizsgálatokat: fenolftalein jelenlétében lúggal (0,1 normális NaOH) titráljuk (rózsaszín). Az eredményt (ecetsavban kifejezve) mg/L értékben kell megadni.

A lúgosság a vízben lévő, savval reakcióba lépő anyagok összessége, amely a titrálás végpontjának pH értékétől függ. A metilnarancs-lúgosság (m-lúgosság) meghatározását metilnarancs indikátor alkalmazásával, vagy potenciometriás végpontjelzéssel mérik. Az eredményt (CaCO₃-ban kifejezve) mg/L értékben kell megadni.

A centrifugálás 4500-as fordulatszámon, 30 percig tart.

5.2.2.4. TC, TN vizsgálat

TC, TN meghatározás esetén, a kiszáritott iszapot magas hőmérsékleten (1140°C) elégetjük, az idegen gázokat a műszer leválasztja, a kívánt mérési komponenseket a műszer

szétválasztja és az elemek különböző hővezető képessége alapján méri meg az adott komponens mennyiségét.

C/N arány

Anaerob lebontás során fontos paraméter a C/N arány vizsgálata, melynek optimális értéke 20:1 (Santosh et al. 2004). Túl magas C/N arány esetén a metanogén baktériumok N_2 fogyasztása gyors, melynek következménye a csökkent biogáztermelés, az alacsonyabb C/N arány pedig toxikus környezetet eredményezhet (Balat et al., 2009).

5.2.2.5. Enzimaktivitás mérés

A 4.1.1. Rothasztók főbb üzemi paraméterei alfejezetben bővebb leírás található az enzimaktivitásról.

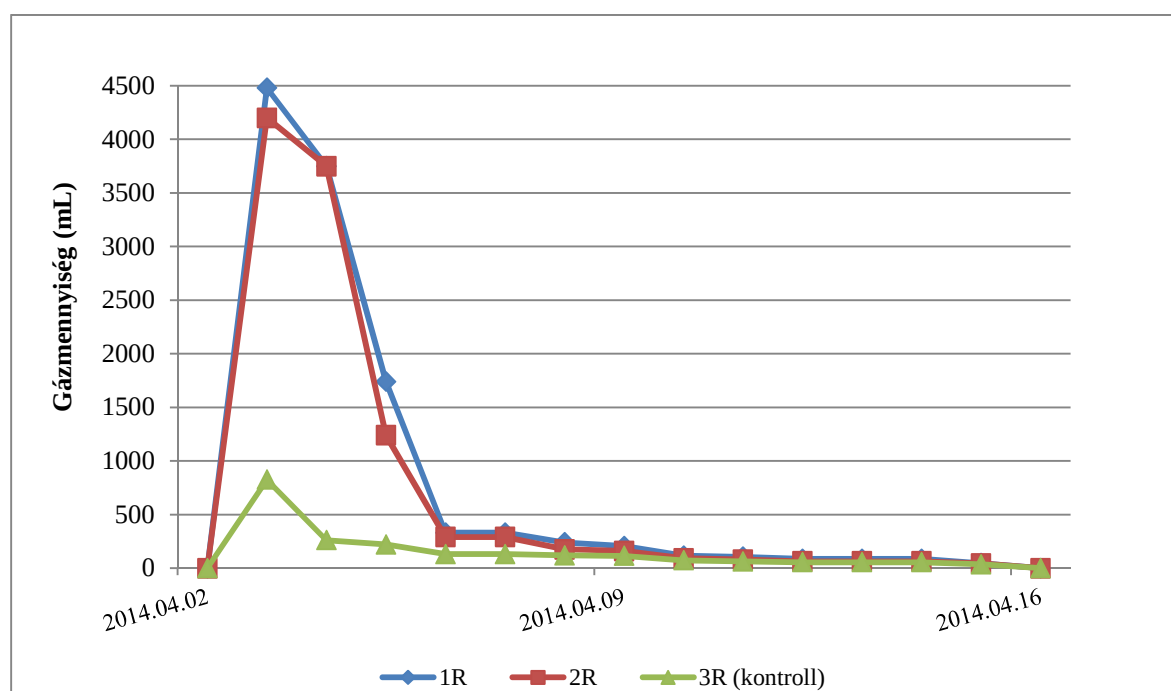
A celluláz enzimaktivitás mérés egy egyedi eljárás, a következő a mérés elve: A celluláz enzim katalizálja a cellóbióz β -glükózid, vagy a karboximetil-cellulóz (CMC) hasonló kötéseinek hasítását. A rothasztóban a celluláz enzimek a cellulózszármazékok bontását végzik. A cellobiáz enzimaktivitása a cellulózszármazékok lebontása során keletkező glükóz képződési sebességgel arányos, amelyet 3,5-dinitro-szalicilsavval tudunk meghatározni. Fontos a rendszer pH értéke az enzimek megfelelő működéséhez, így a hiteles vizsgálathoz is a pH értéket 6,5-8,5 tartományban kell tartani.

6. Eredmények

6.1. Gázmennyiségek és gázösszetétel értékelése

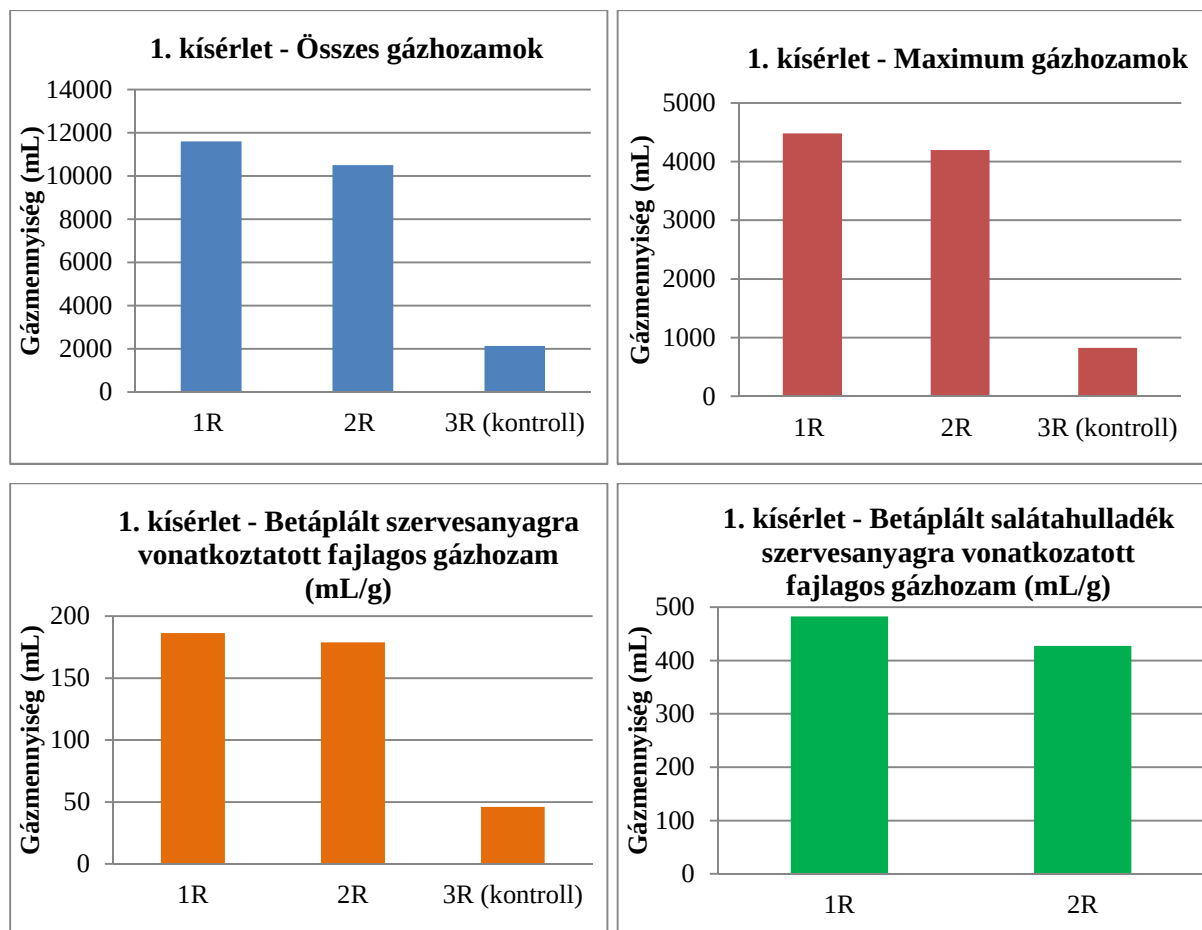
Az 1. kísérlet, egy teszt, azaz egy próbakísérletnek nevezhető. Annak megismerésére szolgált, hogy milyen paramétereket érdemes vizsgálni, és hogy a salátahulladék (salátamix) kísérleti rothasztásakor milyen folyamatok játszódnak le. Megvizsgáltam a szervesa.lebomlás mértékét, a biogázmennyiséget, ill. annak a minőségét (CH_4 , CO_2). Ezen kívül az üzemi paramétereket is meghatároztam.

Az alábbi, 1. grafikonon a napi biogáztermelődés látható, ami jó tendenciát mutat, ez várható volt a salátahulladék nagy szervesa.tartalma (78,5 g/kg) miatt. A baktériumok gyorsan adaptálódtak és az első napokban kitermelődött a biogáz nagy része.



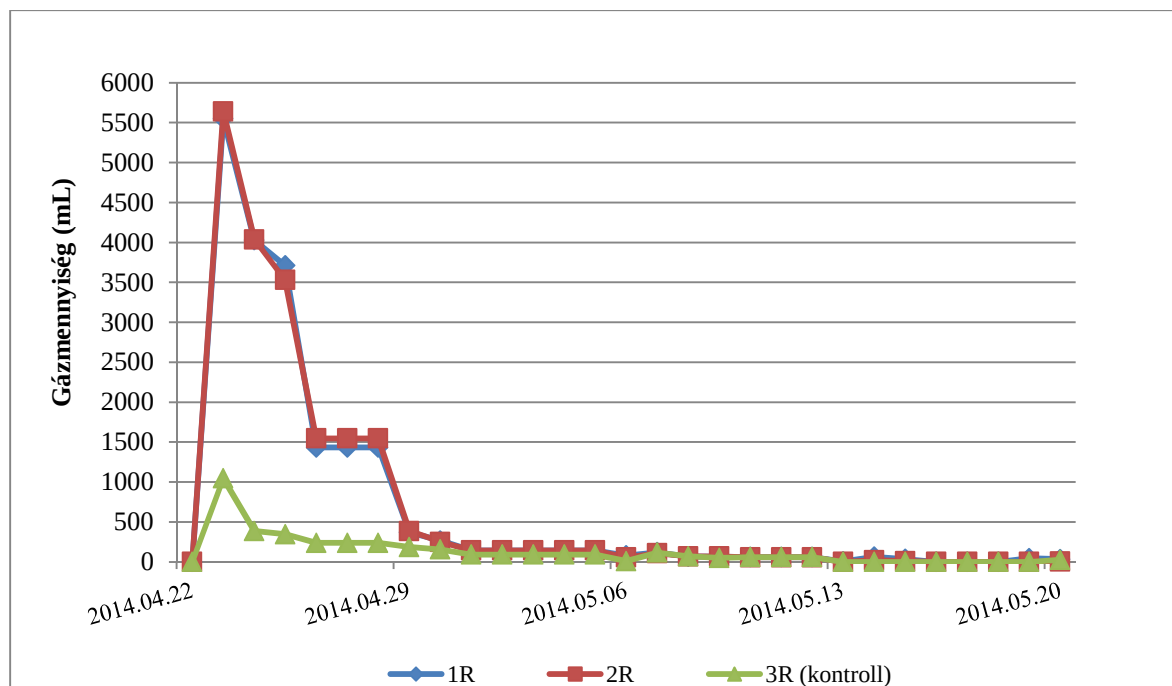
1. grafikon – 1. kísérlet napi biogáz termelődése

A kísérletek párhuzamosak voltak, azaz 2 rothasztó működött a ko-szubsztrátummal, az esetleges hibák kizárása végett. A 2. grafikonnál található maximum gázhozamok ábrán, a vizsgálat ideje alatt mért maximum gázmennyiségek láthatóak egy adott napon. Az alábbi ábrákon, az 1R és 2R rothasztó közötti különbséget a rothasztók szervesa.tartalmai különbsége adja, az 1R rothasztóban magasabb volt az érték (1R - 8,9 g/kg, 2R - 8,4 g/kg). A kontroll, amiben nem található plusz szubsztrátum az oltóiszapon kívül az értékek jóval alacsonyabbak.

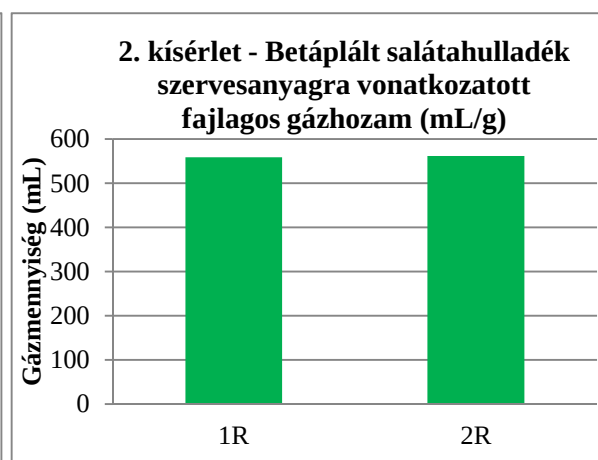
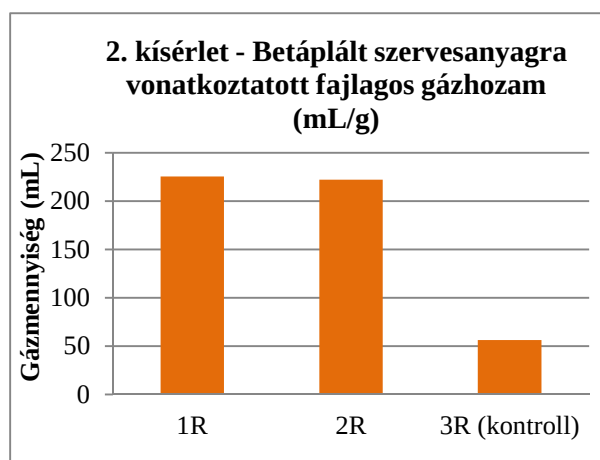
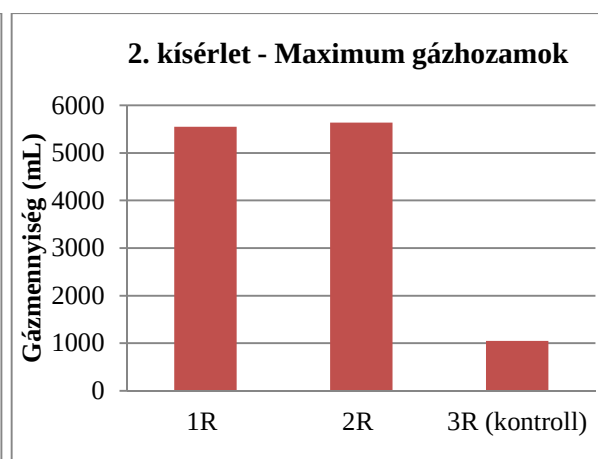
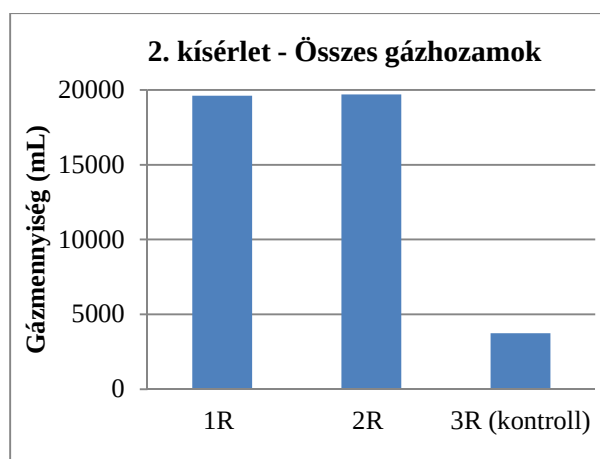


2. grafikon -1. kísérlet alatt a kísérleti rothasztók által termelt biogázhozamok összevetése különböző szempontok alapján

A következő két kísérletben a fizikai roncsolás (darálás), ezáltal a lebontási folyamatok gyorsabb végbemenetelét vizsgáltam. A 2. kísérletben kevésbé roncsoltam (daráltam) a salátahulladékot, így a biogáz feltáródásban láthatunk különbségeket (3. grafikon). A HRT 28 nap volt. A salátahulladék szervesa.tartalma kisebb volt (47 g/kg), ez annak a következménye, hogy a beszállított hulladékok minősége nem egyenletes, ill. összetételük szállítmányonként változik. Látható, hogy ebben a kísérletben a 2R rothasztó gázhozamai bizonyultak jobbnak (4. grafikon), ennek oka itt is az eltérő kezdeti szervesa.tartalom: 1R - 12,43 g/kg, 2R – 12,67 g/kg. A kontroll rothasztó értékei elmaradtak a salátahulladékkal táplált rothasztókétól, ennek szervesa.tartalma, csupán 9,46 g/kg volt. Végeredményben a betáplált anyagok jól lebomlottak mindhárom rothasztó esetében.

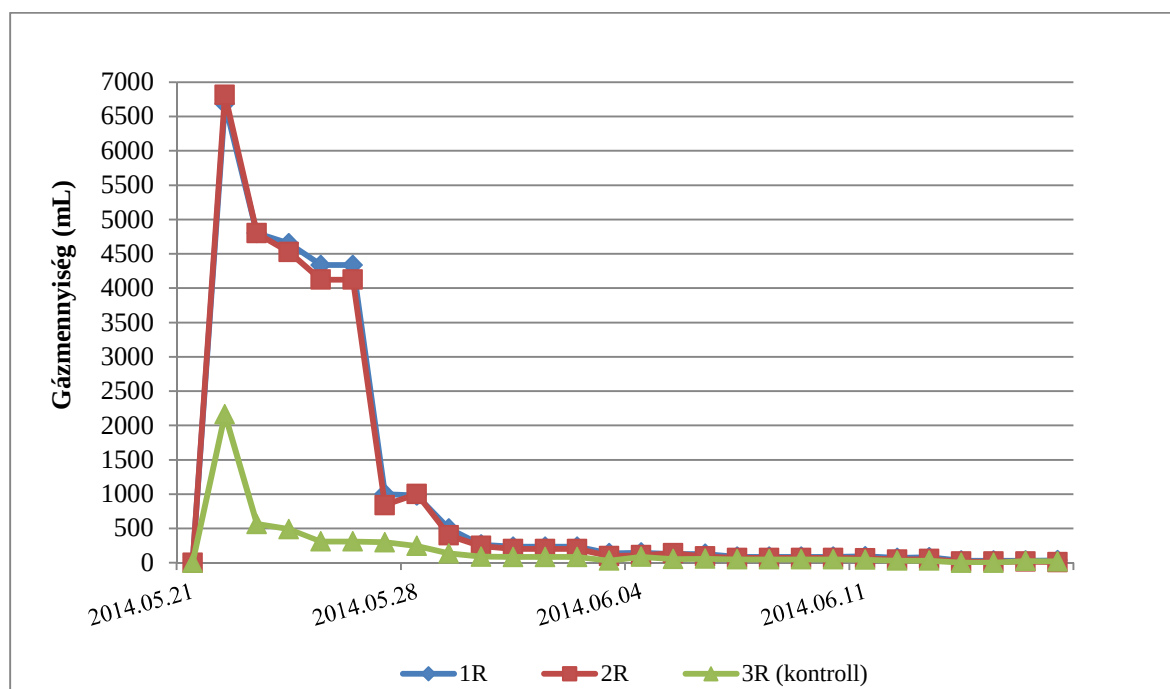


3. grafikon – 2. kísérlet napi biogáz termelődése

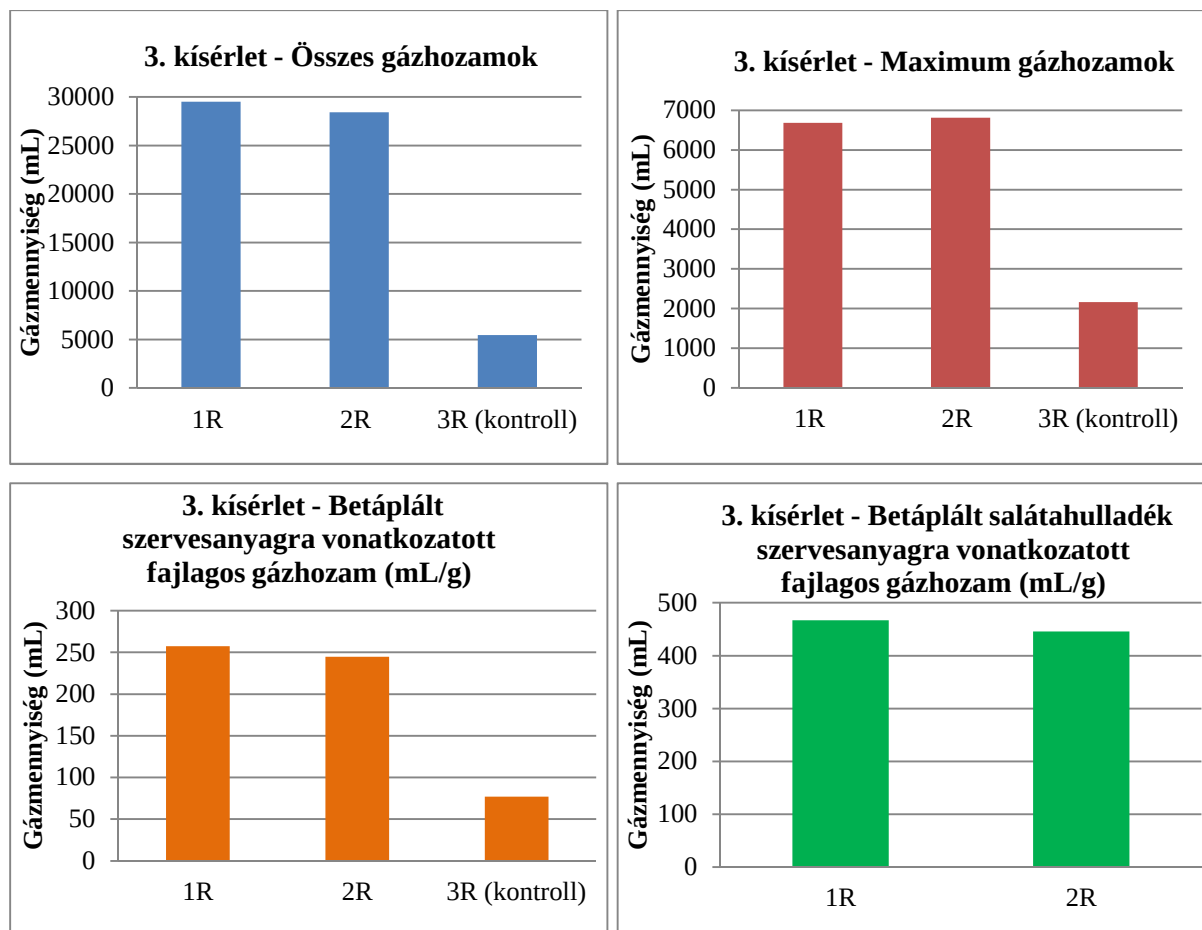


4. grafikon - 2. kísérlet alatt a kísérleti rothasztók által termelt biogázhozamok összevetése különböző szempontok alapján

Több gáz táródott fel a 3. kísérlet első 5-6 napján (5 grafikon), mint a 2. kísérletnél (3. grafikon). A HRT 27 nap volt. A salátahulladék szervesa.tartalma 86 g/kg volt, így ennek is köszönhető ez a magas biogáz produktum. Lényeges különbség nincs a rothasztók között itt sem, azok megfelelően működtek. A 2R rothasztó nagyobb produktumot ért el (6. grafikon), azok kezdeti szervesa.tartalmánál is a 2R értéke bizonyult nagyobbak: 1R – 26,5 g/kg, 2R – 26,9 g/kg. A maximum gázhozamok a 2. napon voltak mérhetőek, tehát egy ilyen cellulózos anyagnál a legnagyobb gázhozamokra a betáplálást követő első napokban kell számítani. A kontroll rothasztó alacsonyabb gázhozamot ért el, tehát a salátahulladék ko-szubsztrátumként való alkalmazása, a darálás mértékétől függetlenül növeli a biogáz produktumot.

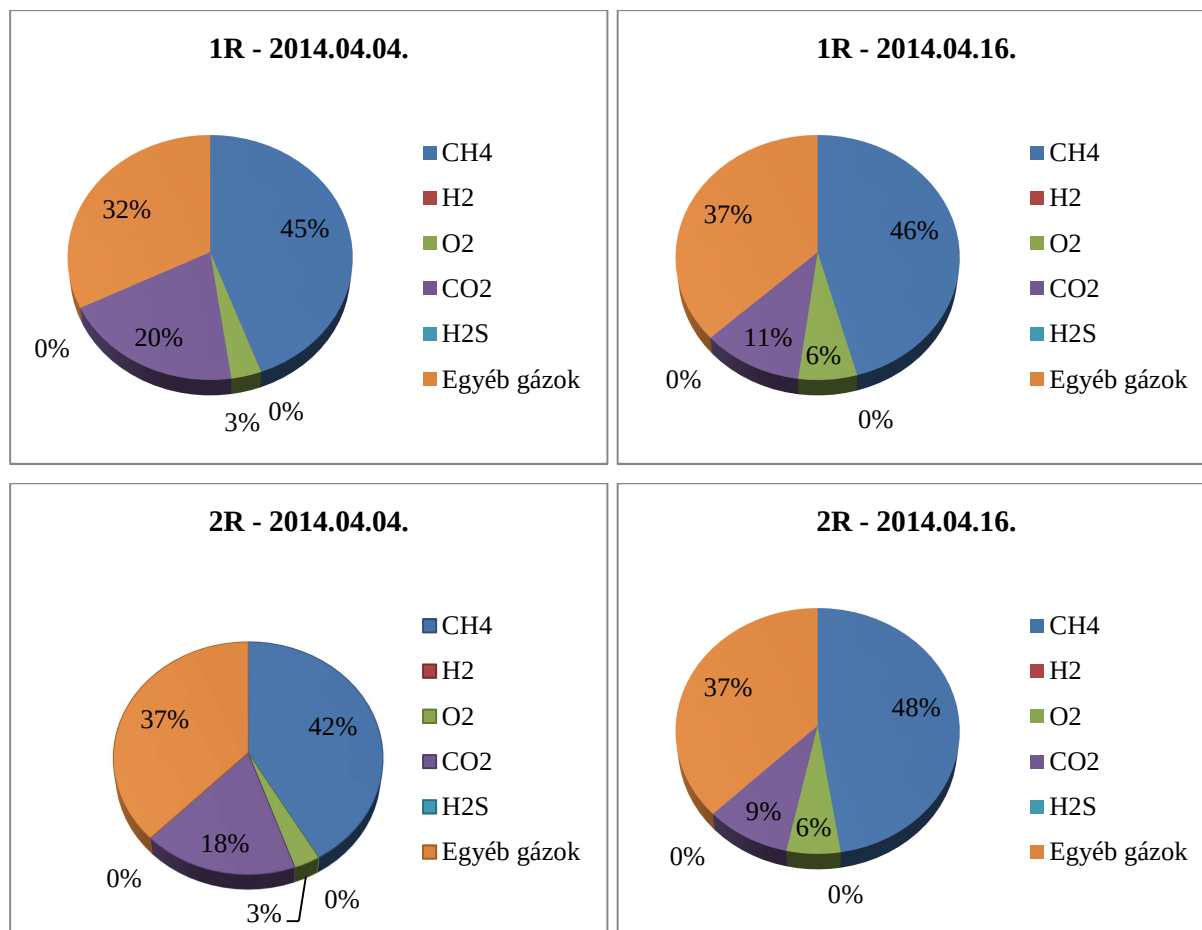


5. grafikon – 3. kísérlet napi biogáz termelődése



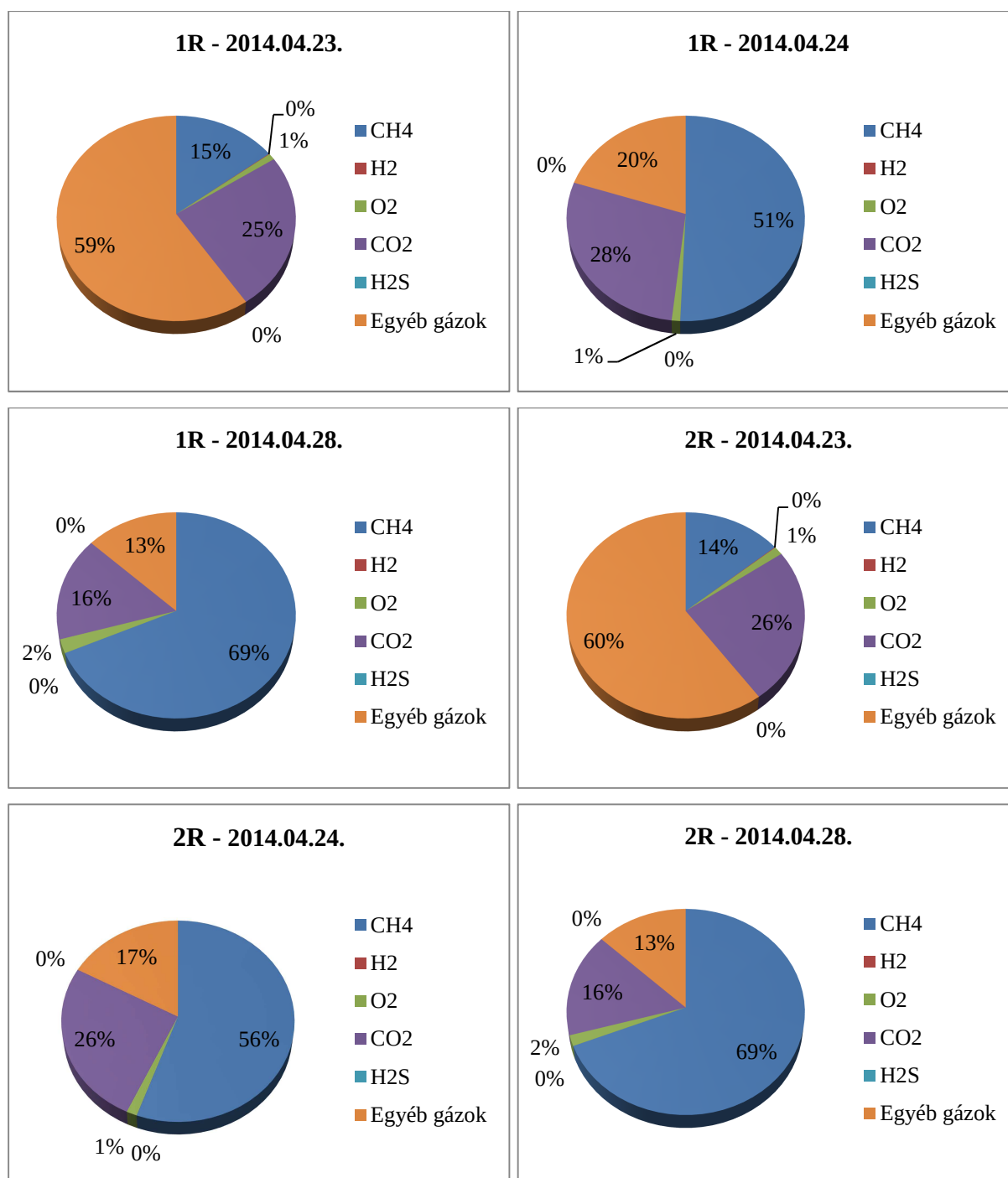
6. grafikon - 3. kísérlet alatt a kísérleti rothasztók által termelt biogázhozamok összevetése különböző szempontok alapján

Az alábbi grafikonokon (7. grafikon) a CH_4 , CO_2 és egyéb gázok megoszlása látható, ezekből a legfontosabbak a CH_4 és CO_2 . CH_4 esetén 60-70 V/V%, CO_2 esetén 20-30 V/V% az optimális érték (Kárpáti, 2002). A teszt-kísérletben kiderült, hogy növelni kell a HRT-t és a szervesanyag-tartalmat is, ugyanis jól kivehető, mind az 1R és mind a 2R reaktornál, hogy a CH_4 a kísérlet befejeztekor nem éri el a 60-70 V/V% körüli értéket. A többi eredmény jónak mondható, a H_2S (ppm) és a H_2 (V/V%) értéke 0 körül mozogtak. Az egyéb gázok (Ar , N_2) értéke nem változott, O_2 tartalma növekedett (mintavétel, gázzárósági problémák), ezért is javasolt növelni a HRT-t. Az egyéb gázok aránya, az argon miatt magas, amit az O_2 rendszerből való kiszorítása végett alkalmaznak, ezáltal anaerobbá teszik a rendszert. Ezen kívül valamennyi N_2 -t is tartalmaz, mely a levegőből származik.



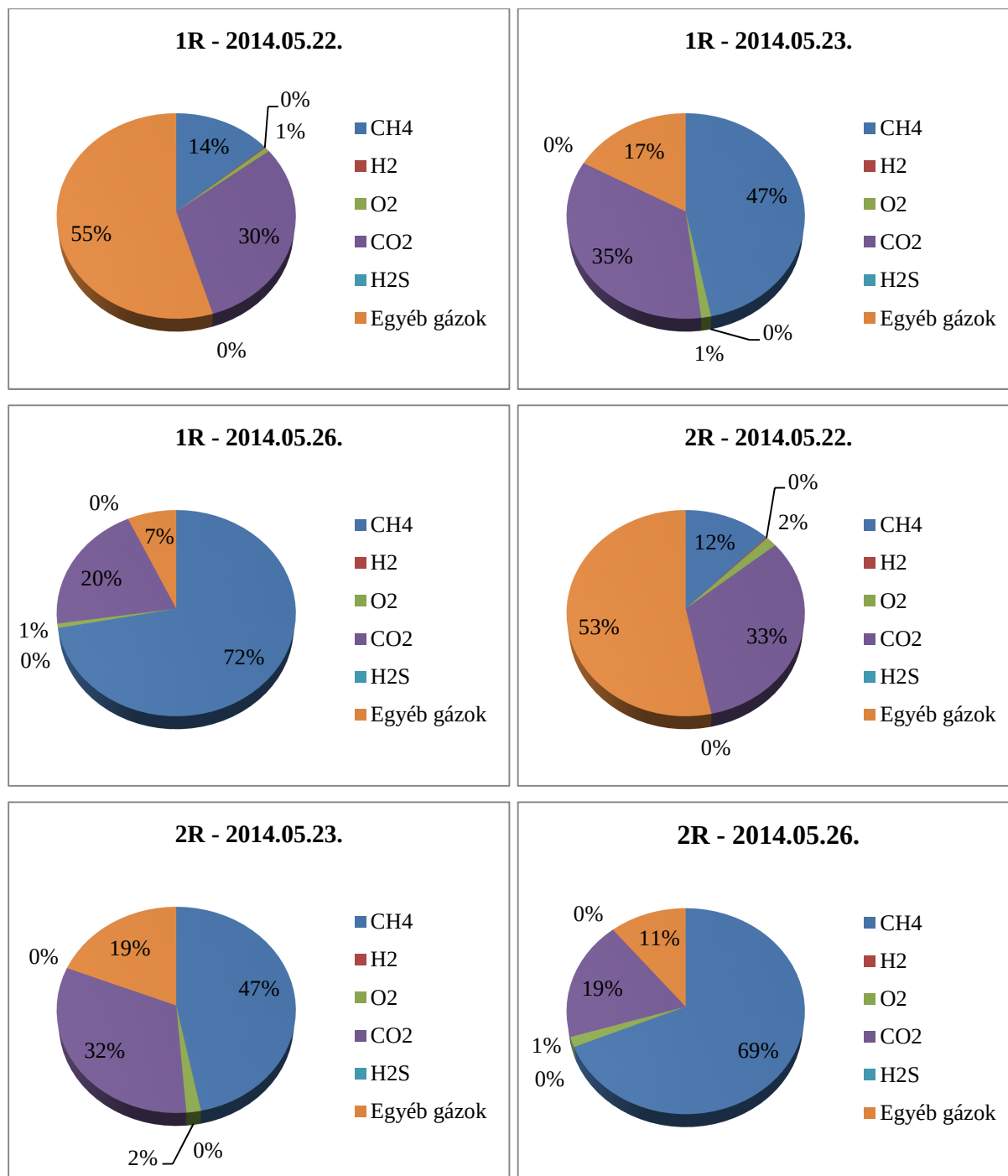
7. grafikon – 1. kísérlet gázösszetevőinek összehasonlítása, rothasztónként az idő függvényében

A 2. kísérletnél már 3 grafikon látható rothasztónként (8. grafikon), ez a megnövekedett gázmennyiségnek is köszönhető (a gázkomponenseket min. 2 L biogázból lehetett megállapítani), ill. szemléltetni kívántam, hogy a rövid adaptációs idő után mekkora különbségek vannak a mért minták között és a CH₄ tartalom igen hamar elérte az ideális 60 V/V% értéket. A rövid adaptációs idő után az egyéb gázok értéke a harmadára csökkent, a CH₄ tartalom pedig több mint a háromszorosára nőtt. Az 1R és 2R gázösszetevők végső értékei hasonlóak. Az O₂, H₂ és H₂S értéke 0 körüli.



8. grafikon – 2. kísérlet gázösszetevőinek összehasonlítása, rothasztónként az idő függvényében

A 3. kísérlet (9. grafikon) alatt a CH₄ tartalom ugrásszerűen megemelkedik a rövid adaptációs idő után. A 3. kísérletnél a CH₄ jobb gázminőségi eredményeket ér el rövidebb idő alatt, mint a 2. kísérlet rothasztóinak eredményeinél tapasztaltuk (8. grafikon).



9. grafikon – 2. kísérlet gázösszetevőinek összehasonlítása, rothasztónként az idő függvényében

6.2. Salátahulladék kísérleteknél fizikai roncsolás (darálás) mértékének hatása

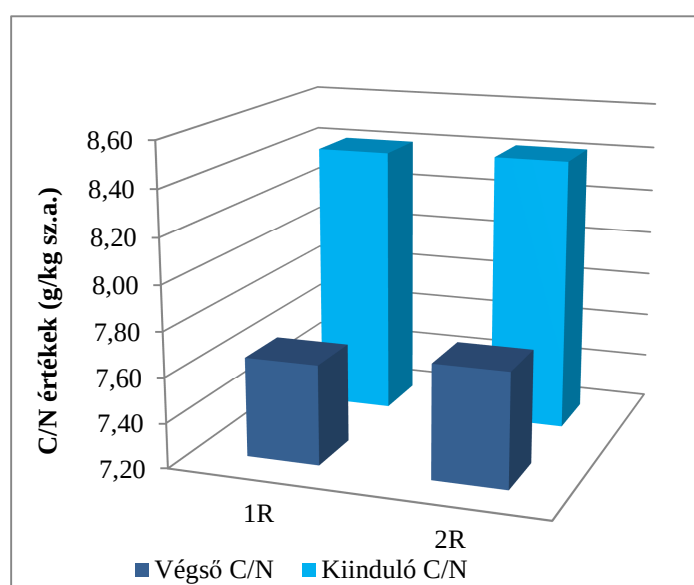
A második kísérletnél a roncsolás mértéke kisebb volt. 6.1-es alfejezet 5. grafikonján jól kivehető, hogy több gáz táródott fel a 3. kísérlet első 5-6 napján, mint a 2. kísérletnél (3. grafikon). Utána már csekélynek mondható a gázhozam az első napokhoz képest, itt termelődött ki körülbelül az összmenyiség 4/5-e. Az összes biogáz hozam is több volt a 3.

kísérlet esetén (10. táblázat), közel azonos tartózkodási idő alatt (2. kísérlet - 28 nap, 3. kísérlet - 27 nap). Nem elhanyagolható tény, hogy a salátahulladék szervesa.tartalma magasabb volt a 3. kísérletnél, így ebből is adódhat a nagyobb biogázmennyiség.

6.3. C/N arány hatása

6. táblázat - Induló és befejező C/N értékek az 1 kísérlet alatt

Rothasztó	1R	2R
Kiinduló C/N	8,40	8,42
Végső C/N	7,64	7,70



10. grafikon - Induló és befejező C/N arányának összehasonlítása grafikusán az 1. kísérlet alatt

6.4. Enzimaktivitások mértékének összehasonlítása

Az alábbi grafikonokon (11. és 12. grafikon) a szervesa.lebontás függvényében és a szervesa.tartalom függvényében vizsgálom meg az enzimaktivitás mértékét. Külön láthatóak a kísérletek és a rothasztók (a kontroll kivételével).

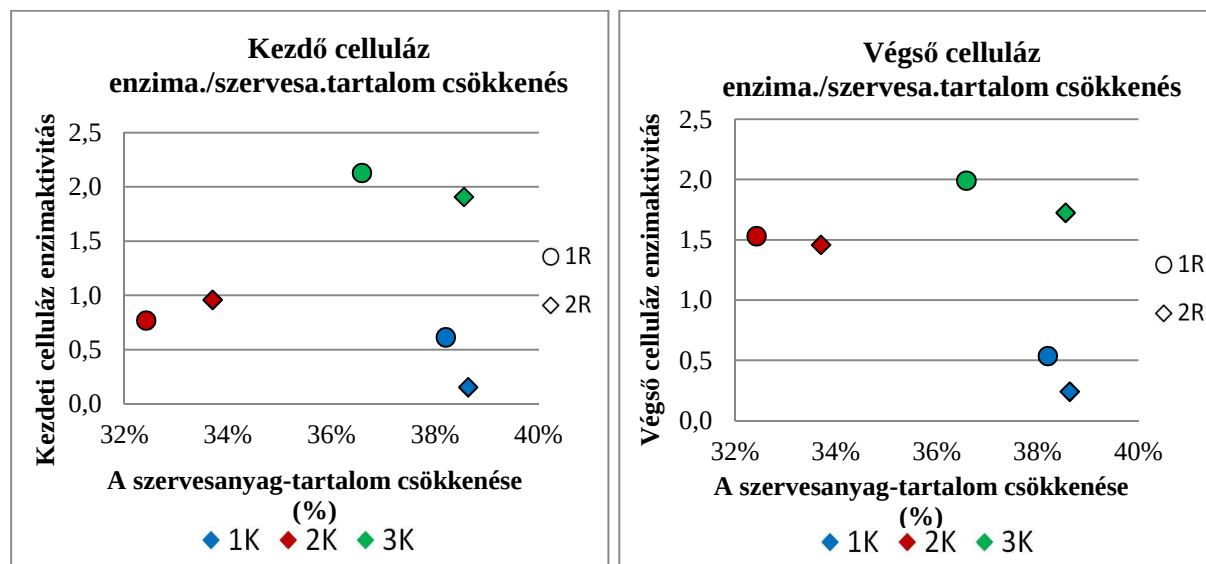
Az 1. kísérletben (kék rombusz) az alacsony enzimaktivitást a túlhígítás okozta, így méréskor hígabb anyaggal dolgoztam és bár jól bomlott az anyag az enzimaktivitás alacsonynak mutatkozott, emiatt is növeltem a szubsztrátumok koncentrációját a következő kísérletekben.

A 2. kísérlet (piros rombusz) és 3. kísérlet (zöld rombusz) esetén az enzimaktivitás mértéke, a biogáztermeléssel párhuzamba vonható. A kapott eredmények kiértékelhetőek voltak, bár még itt is kissé híg volt a pép. A kísérleti rothasztók kevertetői miatt túl sűrű

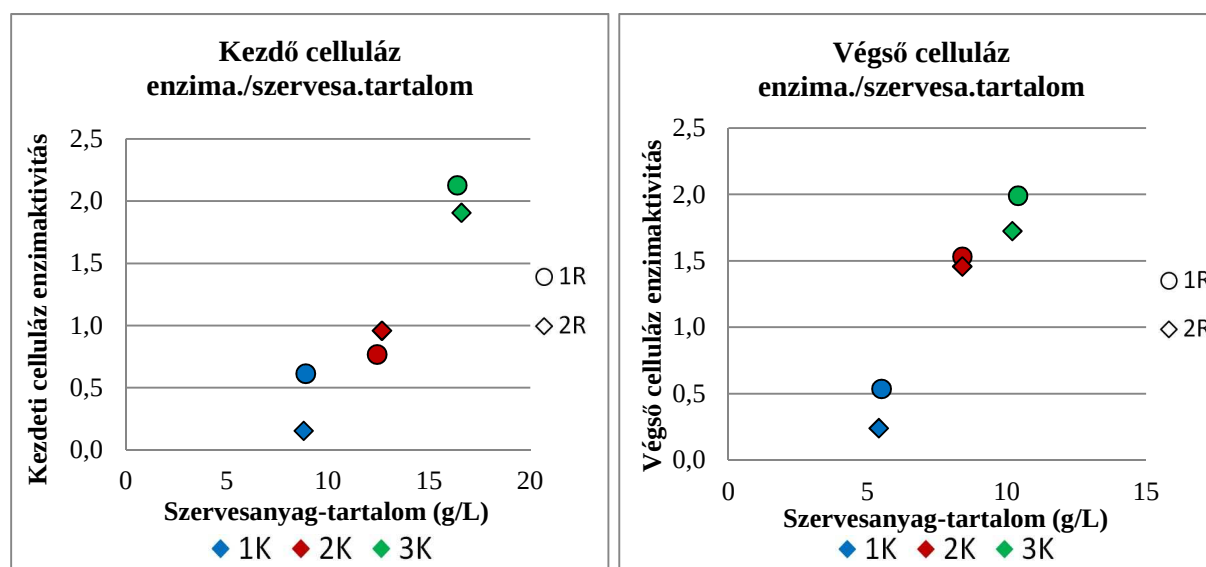
Az 1. kísérletnél végeztem C/N arány mérést (6. táblázat, 10. grafikon), ahol a cél egyrészt a lebontás mértékének vizsgálata volt, másrészt a betáplált szervesa. C/N vizsgálata. Megállapítható, hogy az anyag jól bomlott az adott körülmények között (szervesa. lebontás vizsgálatból is ezt a következtetést vontam le). A C/N arány elmaradt a kívánt, minimum a 15:1-es arány, de így is jó lett biogáz produktivás értéke. A rosszabb arányt az okozta, hogy híg vizes pépet használtunk.

anyagot nem lehetett betáplálni (telepi rothasztó gázlándzsás kevertetésű, ott feladható ilyen sűrűségű anyag). Ha összevetjük az utóbbi két kísérletet, leolvasható, hogy a szervesa.tartalom növekedésével, ill annak változásával nőtt az enzimaktivitás mértéke.

A kezdeti és végső celluláz enzimaktivitás eredményeket összehasonlítva látható, hogy mértéke csökkent az egyes és hármas kísérletnél. A kettes kísérletnél a kevésbé roncsolt szubsztrátum lassabb bontása miatt az enzimaktivitás mértéke nagyobb volt a kísérlet lezárásakor. Az enzimaktivitás csökkenést az endogén folyamatok megindulása okozhatta. Az endogén folyamatok megindulásának oka az 1. kísérletnél a kisebb mennyiségű szubsztrátum betáplálás, a 3. kísérletnél a hosszú HRT. A folyamatok nyomon követéséhez egy köztes mérést is be kellett volna iktatni. A kísérletek folyamán végzett mintavétellel megbontottuk volna az anaerob rendszert. Az endogén folyamatok elkerülését a HRT csökkentése jelentheti.



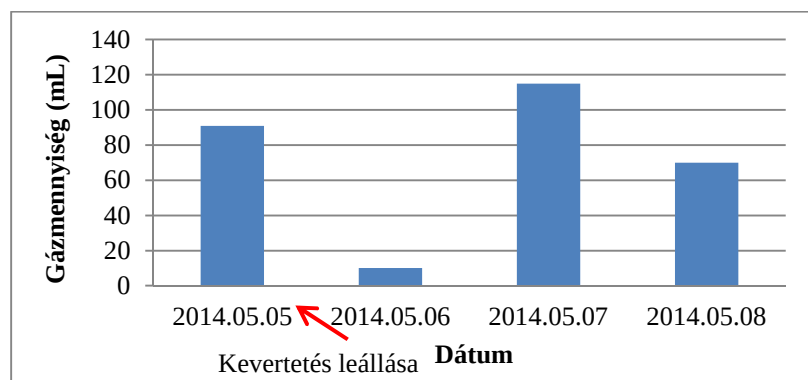
11. grafikon – Celluláz enzimaktivitás a szervesanyag lebontás (%) függvényében



12. grafikon – Celluláz enzimaktivitás a szervesanyag-tartalom (g/kg) függvényében

6.5. Kísérleti rothasztók hatékonysága

6.5.1. Kevertetés hatékonysága



7. táblázat -
Kevertetés leállításának
hatása a gázhozamra

Dátum	3R (mL)
2014.05.05	91
2014.05.06	10
2014.05.07	115
2014.05.08	70

13. grafikon – A gázhozam változásának tendenciája kevertetés megszűnésekor

A 3R kontroll reaktorban a kevertetés leállt kb. 8 órára a 2. kísérlet idején, a 14. napon. Ezáltal a lebontás hatásfoka csökkent, ami a biogáz mennyiségén is kimutatható, következő napra normalizálódott a rendszer és hirtelen gázhozam növekedés volt megfigyelhető (7. táblázat, 13. grafikon). A rendszer végül visszatért az eredeti állapotába, hiszen viszonylag tágtűrő baktériumokról van szó és a pH, illetve a hőmérséklet ezen időszak alatt nem változott, így a baktériumok tovább tudták végezni a bontási folyamatokat. (20 percenként ismétlődő 2 perces keverési ciklusokat alkalmaztunk.)

6.5.2. pH

8. táblázat – pH tartalom a három kísérlet kezdetekor és befejezésekor

Kísérlet	Dátum	pH
1.	2014.04.03	7,34
	2014.04.14	7,44
2.	2014.04.23	7,80
	2014.05.20	7,76
3.	2014.05.21	7,73
	2014.06.17	7,80

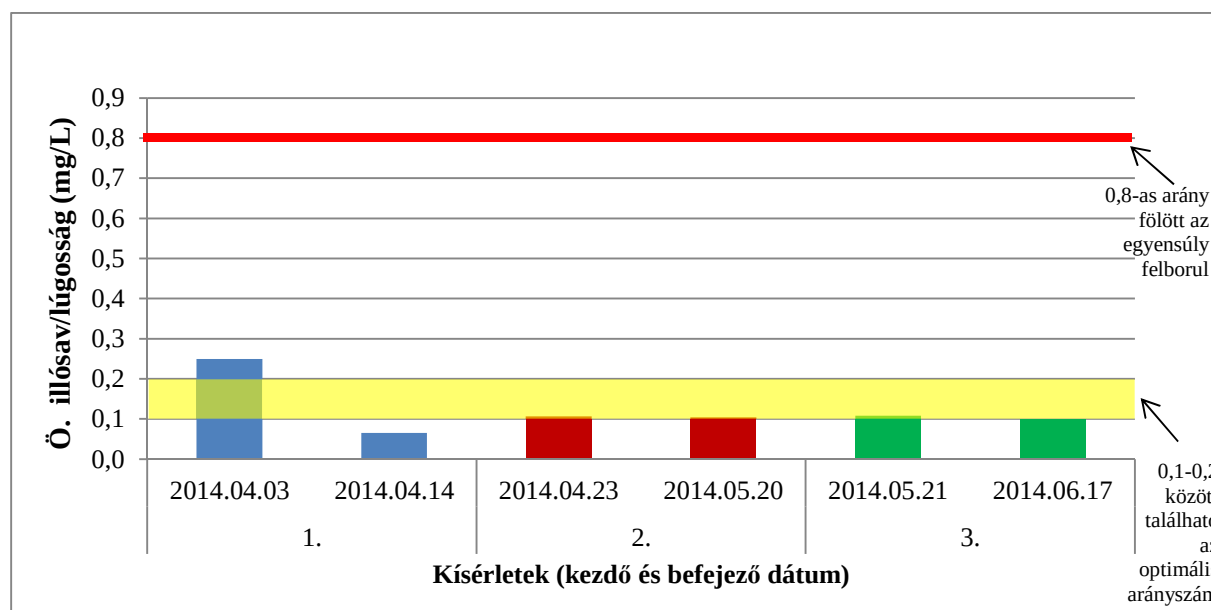
Az 1-3 kísérlet pH értékeit mutatja a 8. táblázat, a párhuzamos rothasztók adatsoraiból átlagot vonva, az optimális a 7,2-8,0 pH, tehát a rothasztás értéktartományon belül volt. Számunkra is ez az ideális pH, mert 8,0 pH fölött már lelassul metántermelés.

6.5.3. Összillósav és lúgosság eredményeinek értékelése

Az általánosan elfogadott illósav/lúgosság arány 0,1-0,2 között található (14. grafikon), a rendszer (kísérleti rothasztó) egyensúlyi viszonyai stabilnak mondhatók, mert az eltérés az optimumtól minimális és ez az eltérés is az első teszt kísérletnél jelentkezett (9. táblázat). Az egyensúly felborulása akkor következik be, ha a hányados nagyobb, mint 0,8. Ezek az értékek a párhuzamos rothasztók átlagaiból lettek számolva a kísérletek kezdetére és végére.

9. táblázat – Illósav/lúgosság (mg/L) értékek a három kísérlet folyamán (kezdés és befejezés)

Kísérlet	Dátum	Összes illósav/Lúgosság (mg/L)
1.	2014.04.03	0,25
	2014.04.14	0,07
2.	2014.04.23	0,11
	2014.05.20	0,11
3.	2014.05.21	0,11
	2014.06.17	0,10



14. grafikon – Kezdeti és végső illósav/lúgosság (mg/L) értékek a három kísérlet folyamán, az optimális tartomány kijelölésével

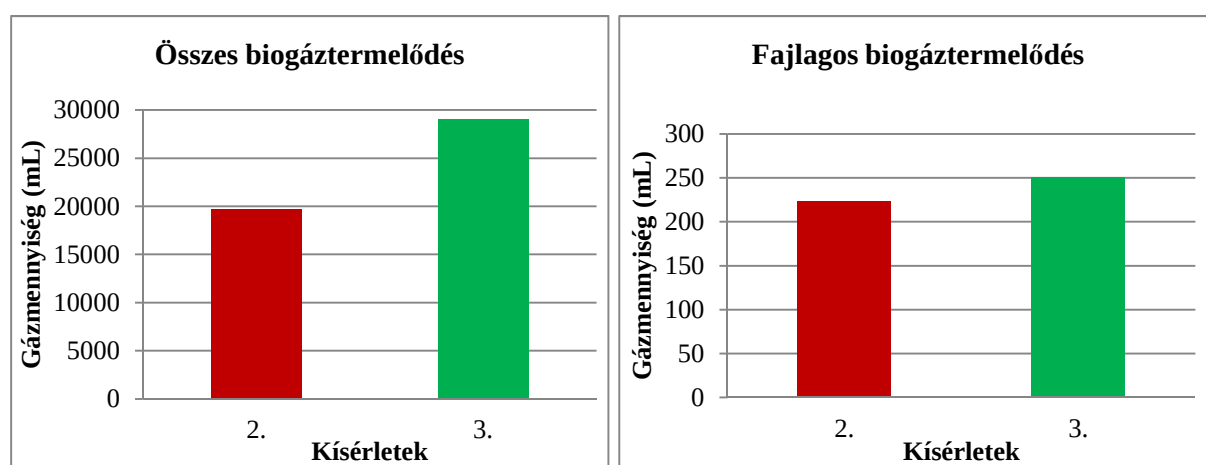
6.5.4. Összes, ill. fajlagos gázhozam és gázösszetétel

A párhuzamos rothasztókra átlagolt végeredményeket mutatom be a 10. táblázat és a 15. grafikon segítségével. Összességében elmondható, hogy a 3. kísérlet eredményei jobbak

lettek (gázhozamok, gázösszetétel), ezt a durvább fizikai roncsolás okozta, illetve nem elhanyagolható tény az ekkor használt hulladék nagyobb szervesa.tartalma.

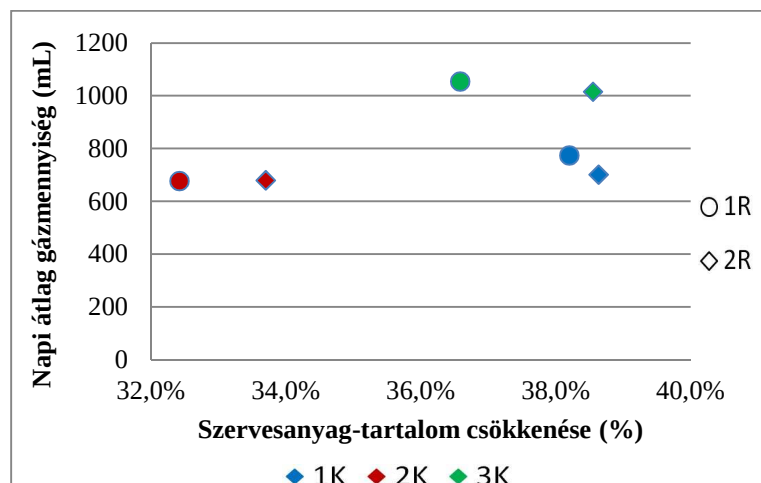
10. táblázat – A 2. és 3. kísérlet átlagolt összes és fajlagos biogázmennyisége

Kísérlet	Összes biogáztermelődés (mL)	Fajlagos biogáztermelődés mL/g betáplált szervesanyagra vonatkoztatva
2.	19667,50	223,89
3.	28995,50	251,08



15. grafikon - A 2. és 3. kísérlet átlagolt összes és fajlagos biogázmennyisége

Csakúgy, mint az enzimaktivitásnál a napi gázmennyiségen is nyomon követhető a szervesa.lebontás hatása a folyamatokra (16. grafikon): a gázhozam mennyisége arányosan nő a szervesa.lebontás mértékével. Az 1. kísérlet kivételével, ahol a rövidebb HRT és a kevesebb betáplált szubsztrátum miatt kevesebb gázmennyiség volt mérhető.

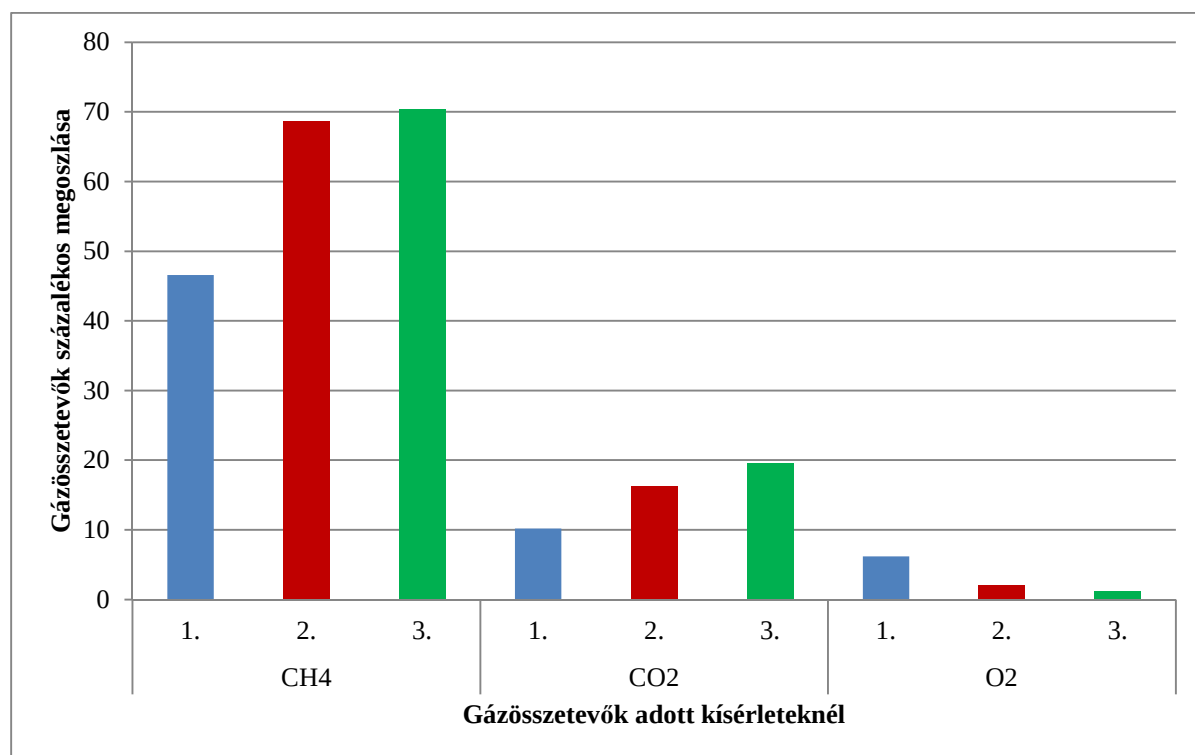


16. grafikon – Biogázhozam a szervesanyag-tartalom függvényében

Az alábbi táblázatban (11. táblázat) a kísérletek alatt mért gázösszetevők láthatóak. Mint már fentebb is említettem, a 3. kísérlet, amely durvábban roncsolt volt, jobb gázminőségi jellemzőket ért el a salátahulladék vizsgálatok közül. A tesztkísérleten kívül a rothasztás megfelelő mértékű, a CH₄ tartalom, ill. a CH₄/CO₂ az ideális értékeket érte el (17. grafikon).

12. táblázat – Gázösszetevők (V/V%) a kísérletek alatt

Kísérlet/Anyag	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂	H ₂ S
1. Salátahulladék	46,6	10,2	6,2	0,000	0
2. Salátahulladék	68,7	16,3	2,0	0,001	0
3. Salátahulladék	70,4	19,6	1,2	0,002	0



17. grafikon – A 2. és 3. kísérlet főbb gázösszetevőinek összehasonlítása

6.5.5. Lebontás hatásfoka – szervesanyag lebontás

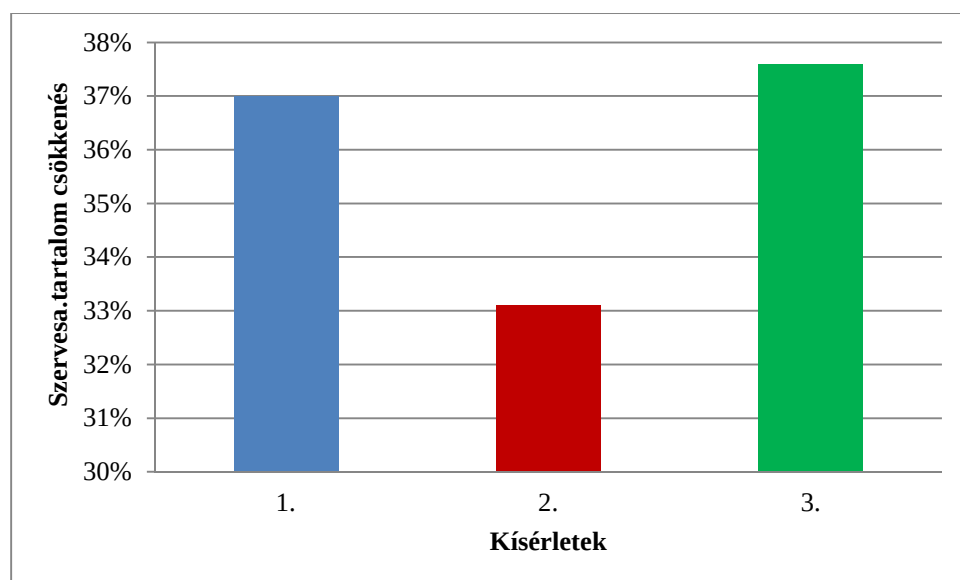
Mind a szervesanyag-tartalomban, mind annak lebontásában (12. táblázat, 13. táblázat) a 3. kísérlet eredményei lettek jobbak, a különbség 4,5%-os, ez gázmennyiségben 9 L jelentett. Az alábbi 18. grafikonon is jól kivehető a salátahulladék kísérleteknél a nagymértékű szervesanyag-tartalom csökkenés, mely a 3. kísérletnél jelentősebb. Az 1. kísérletnél hamar elbomlott a szervesa. a nagymértékű hígítás miatt. A 3. kísérletnél a jelentősebb fizikai roncsolásnak és a hosszú HRT-nek is köszönhető a nagymértékű szervesa.tartalom csökkenés.

12. táblázat – Sz.a. és a szervesa.tartalom értékek a kísérletek kezdetén és végén

Kísérlet/Anyag	1.		2.		3.	
Állapot	Kezdő	Végső	Kezdő	Végső	Kezdő	Végső
Sz.a.tartalom g/kg	13,8	11,8	22,6	17,9	26,7	20,6
Szervesa. tartalom g/kg	8,7	5,5	12,6	8,4	16,5	10,3

13. táblázat – A rothasztók által átlagolt szervesa.tartalom csökkenés a kísérletek alatt

Kísérlet/Anyag	1.	2.	3.
Szervesa.tartal om csökkenése	37,0%	33,1%	37,6%



18. grafikon –Átlagos szervesanyag-tartalom csökkenése (%)

7. Következtetések, javaslatok

7.1. Kísérletek értékelése, észrevételek

Értékelés

Összességében a kísérletek a várt eredményeket hozták, a kísérletek folyamán különösebb gond nem adódott, így megfelelően futtathatóak voltak a vizsgálatok. Az üzemi paraméterek tükrében elmondható, hogy a kísérleti rothasztók megfelelően működtek, azok között eltérés nem mutatkozott, így a kapott eredmények is kiértékelhetők.

Az 1. egy teszt kísérlet volt, melynek eredményeit felhasználva javítottam a 2. és 3. kísérlet paraméterein. A 2. és 3. kísérlet között előkezelési különbségeket alkalmaztam és a várt különbségek mutatkoztak, azaz erősebb fizikai roncsolás esetén az enzimatikus lebontás hamarabb végbemegy, ill. több biogáz tárodik fel egyező HRT alatt. A 3. kísérletnél a fizikai roncsolás mértéke nagyobb volt, és jobb gázmennyiségeket kaptam. A 3. kísérlet alatt jobb volt gázminőség összetétele is, bár az eltérés csekély volt a 2. kísérlet eredményeihez viszonyítva. A fizikai roncsoláson kívül a szervesanyag-tartalom is közrejátszott a nagyobb értékek elérésében, de ekkora különbséget nem okozott volna. A roncsolás a biogáz gyorsabb felszabadulását is lehetővé tette.

Észrevételek

Az 1. kísérletnél a kevés szubsztrátum és a túlhígítás miatt az enzimaktivitás csökkent, endogén folyamatok indultak meg. A 3. kísérletnél is csökkenést tapasztaltam, de ebben az esetben a hosszú HRT miatt, ugyanis a roncsolás mértéke nagyobb volt, így rövidebb HRT jobb lett volna. A 2. kísérletnél a roncsolás mértéke kisebb volt, a vizsgálat befejeztével még a megnövekedett enzimaktivitás volt mérhető. A hidrolízis folyamatának nyomon követéséhez több mintavételre lenne szükség. A kevertetők hatásfokának javításával növelhető lenne a betáplált szubsztrátum mennyisége. A gázzárósági problémákat is orvosolni kell, rátápláláskor, mintavételkor, O_2 kerülhet a rendszerbe, megbontva az anaerob körülményeket.

7.2. Javaslat további kísérletek végzésére

A kísérletek ideje alatt 3db kísérleti rothasztó működött megfelelően, ha mind a 8db készülék működőképes lenne, akkor a különböző vágási/roncsolási módokat egyszerre lehetne vizsgálni (párhuzamos rothasztók működtetésével a hibák kizárása végett). Ezáltal kiküszöbölhető lenne a beszállított hulladékok minőségi egyenetlensége.

További kísérleteket folytatnék jobb C/N arány (20:1), ill. jobb betáplált hulladék, sz.iszap, víz arány kidolgozásához a kevertetők és a vizsgálati paraméterek függvényében.

8. Összefoglalás

Összegezvén az anaerob, mezofil, ko-fermentációs kísérletek eredményesnek tekinthetők, a kívánt paraméterekre a vizsgálatokat elvégeztem (pH, lúgosság, illósav, sz.a./szervesa.tartalom, TC, TN, biogáz hozama és minősége, enzimaktivitás) és értékelhető eredményeket kaptam. A ko-szubsztrátum salátahulladék volt. A vizsgálatoknál alkalmaztam kontroll rothasztót, melybe nem került ko-szubsztrátum, így megfigyelhető volt az általa előidézett biogáztöbblet és a szervesanyag-lebontás növekedése. Párhuzamos reaktorok működtek, az esetleges hibák kizárása végett. Kevertetéses reaktorokat alkalmaztam, melynek feladata a lebontás sebességét befolyásoló paraméterek kiegyenlítése és a homogenizálás volt. A betáplált szubsztrátumot hígítani kellett, a kevertetés megfelelő működése érdekében, valamint túl sok ko-szubsztrátum esetén, az első napon keletkező gázhozam több lett volna, mint amit mérni lehet az adott eszközökkel.

Az 1. tesztkísérlet alapján megállapítható, hogy a kísérleti rothasztók optimálisan működtek, a lebontási folyamatok megfelelően zajlottak, ami kiderül a szervesa.lebontás hatásfokából valamint adott szervesa.tartalom mellett megfelelő mértékű volt a gázkihozatal mennyisége. A következő kísérleteknél növeltem a szubsztrátum, a HRT arányát és a fizikai roncsolás mértékében volt különbség. A jobban roncsolt salátahulladék esetén (3. kísérlet) a rothasztás hatékonysága és a biogáz mennyisége is növekedett, míg a biogáz minőségében szignifikáns különbségek nem mutatkoztak. A feltárodási idő rövidebb volt, ezáltal növelve a hatékonyságot, mivel így a HRT csökkenthető. A celluláz enzimaktivitás eredményeiből is megállapítható volt, hogy ha nagyobb mértékű a roncsolás, rövidebb HRT is elegendő, ugyanis a hosszú tartózkodás miatt csökkent az aktivitás mértéke. A nagyobb szervesanyag-tartalom is közrejátszhatott a 3. kísérletnél a nagyobb gázmennyiségek elérésében, mely a különböző napokon beszállított hulladék minőségbeli különbségéből adódhat.

Az üzemi paraméterek tekintetében a 2. és 3. kísérlet is megfelelően működött, az illósav/lúgosság arány végig optimumban volt (0,1-0,2), a pH is tartományon belül tartózkodott (7,2-8,0) és a szervesanyag-lebontás hatásfoka is megfelelő mértékű volt, bár ez javítható a C/N arány javításával. A gázösszetevők is megfelelőek voltak, a CH₄ V/V% elérte az ideális 60-70%-os tartományt, a CO₂ pedig elérte az optimális 20 V/V%-os tartományt.

Mindent összevetve a kísérletek pozitív eredményekkel zárultak. A fizikai roncsolás növelése kedvezően hat a rothasztásra, növelheti a biogáz hozamot, csökkentheti a HRT-t, így költséghatékonyabbá tehető a rothasztás. A kontrollhoz képest a ko-szubsztrátummal táplált reaktorok nagyobb biogáz produktumot értek el, a lebontás hatásfoka javult.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki a kísérleti rothasztók üzemeltetéséért az FCSM Zrt. Észak-pesti Szennyvíztisztító Telep munkatársainak, illetve a FCSM Zrt. Környezetvédelmi Osztály Központi Laboratórium munkatársainak a segítségükért.

10. Irodalomjegyzék

- Bai A. (szerk.) (2005): A biogáz előállítása – Jelen és jövő. Szaktudás Kiadó Ház. Budapest. pp. 33-44.
- Barótfi I. (szerk.) (2005): Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó. Budapest. pp. 501-552.
- Bernd J. Kaltwasser (1983): Biogáz előállítás és hasznosítás. Műszaki Könyvkiadó. Budapest pp. 11-61.
- Benedek P., Oláh J. (1973): Anaerob és aerob iszapkezelés. Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató. Budapest. 58. pp. 13-59.
- Bitton G. (2005): Wastewater Microbiology. John Wiley & Sons, Third Edition. pp. 211-395.
- ELTE I: Bevezetés a prokarióták világába (elektronikus tananyag). <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/prokariotak/index.html>
- ELTE II: Az enzimkinetika alapjai. (elektronikus tananyag). biokemia.elte.hu/oktatas/bsc/Enzimkinetika.pdf
- Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.: Enzimaktivitás vizsgálatok. Mérésleírások.
- Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.: Belső felhasználású anyagok.
- Furka Á (1998): Szerves Kémia. Nemzeti Tankönyvkiadó. Bp pp. 652-654, 806-869
- Gerardi, MH (2003): The Microbiology of Anaerobic Digesters. John Wiley & Sons, Inc Publication, Hoboken. New Jersey. pp. 1-59
- Gerardi, MH (2006): Wastewater Bacteria. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. pp. 153-164
- Hofmann, E. (1955): Die Enzyme im Boden und ihre Bedeutung für seine Biologie und Fruchtbarkeit. Z. Acker - u. Pflanzenbau. 100. 21. 5.
- Kardos, L., Palkó, G., Oláh, J., Barkács, K., Záray, Gy. (2009): Operation control of anaerobic digesters on the basis of enzyme activity tests. Water Science & Technology - WST Vol 60 No 4 pp. 957–964 © IWA Publishing
- Kardos L. (2012): A szennyvíztelepi biogáz termel fermentációs folyamatok nyomon követése kémiai és biokémiai módszerekkel. ELTE Természettudományi Kar, Környezettudományi Kooperációs Kutató Központ. Doktori Értekezés
- Kárpáti Á (2002): Szennyvíziszap rothasztás és komposztálás. Pannon Egyetem Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék. Ismeretgyűjtemény

- Kárpáti Á (szek) (2007): A szennyvíztisztítás alapjai. Digitális tananyag. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet. Veszprém.
- Lawrance, A. W., McCarty, P. L., (1969): Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment. Journal Water Pollution Control Federation, No.41, pp. 1-16
- Metcalf & Eddy (2003): Thermophilic Anaerobic Digestion. In: Wastewater Engineering. Treatment and Reuse, Fourth Edition. McGraw Hill. pp.1529 – 1533
- Oláh J, Borbélyné Jakab J, Kardos L, (2005): Az anaerob rothasztók ellenőrzése és biokémiai jellemzése. VII. Környezetvédelmi Analitikai és Technológiai Konferencia.
- Oláh J, Öllös G, Palkó Gy, Rása G, Tarjányiné Szikora Sz: Anaerob lebontás alapfolyamata és a rothasztók ellenőrzése I.. Vízmű Panoráma. 2010/8 szám.
- Öllös G (1995): Szennyvíztisztító telepek üzemeltetése I-II.. Akadémiai Kiadó. Budapest. pp. 101-431. (II.)
- Öllös G, Oláh J, Palkó Gy (2010): Rothasztás. Magyar Vízközmű Szövetség. Budapest. pp. 19-269, 665-723, 895-937, 822-823
- Öllös G, Oláh J, Palkó Gy, Rása G, Tarjányiné Szikora Sz: Anaerob lebontás alapfolyamata és a rothasztók ellenőrzése II.. Vízmű Panoráma. 2011/1 szám.
- Palkó, Gy, Oláh J, Szilágyi M, (2004): Az anaerob iszapkezelés energiatermelési és -hasznosítási lehetőségei. Hidrológiai Közlöny, 2004. évi 4. szám. pp. 33-40
- Román, P. (2010): Mezofil rothasztók szabályozása az Észak-pesti szennyvíztisztító telepen. Diplomadolgozat. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Szak. Veszprém
- Santosh, Y., Sreekrishnan, T. R., Kohli, S. and Rana, V. (2004): Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques – a review. *Bioresour Technology*. 95(1) 1-10. p.
- Schulz H. és Eder B. (2005): Biogázgyártás. Cser Kiadó
- Siposné Kedves É, Horváth B, Péntek Lné (2007): Szerves kémiai ismeretek 10. Hatodik, változatlan kiadás. Mozaik Kiadó
- Thiel P. G. and Hattingh W. H. J. (1967): Determination of hydrolytic enzyme activities in anaerobic digesting sludge. Water Research, No.1. pp. 191–196
- Vorderwülbecke, T., Kieslich, K., and Erdmann, H. (1992): Comparison of lipases by different assays. Enzyme Microbiol. Technol. 14:631-639.
- Wechs, K., (1985): Ein Beitrag zur zweistufigen anaeroben Kläschlamm-stabilisierung. Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen. No. 53, Technische Universität München

11. Mellékletek

A mellékletek megnevezése:

- 1. melléklet:** Salátahulladék előkezelése fizikai roncsolással, erősebben roncsolt koszosztrátum.
- 2. melléklet:** Salátahulladék előkezelése fizikai roncsolással, kevésbé roncsolt koszosztrátum.
- 3. melléklet:** A rothasztók és az üvegballonok kapcsolódása.
- 4. melléklet:** Homogenizált, kellőképpen lebomlott végtermék (a kísérleti rothasztótartályban).
- 5. melléklet:** Kevertetés hatékonyságának csökkenése, kiülepedett iszap.

1. melléklet: Salátahulladék előkezelése fizikai roncsolással, erősebben roncsolt ko-szubsztrátum



2. melléklet: Salátahulladék előkezelése fizikai roncsolással, kevésbé roncsolt ko-szubsztrátum



3. melléklet: A rothasztók és az üvegballonok kapcsolódása



4. melléklet: Homogenizált, kellőképpen lebomlott végtermék (a kísérleti rothasztótartályban)



5. melléklet: Kevertetés hatékonyságának csökkenése, kiüledett iszap

