

# A termofil rothasztás értékelése és a mezofil rothasztók átállítása termofil üzem-módba

Oláh József – Palkó György – Tarjányné Szikora Szilvia – Rása Gábor

## Bevezetés és célkitűzés

Az üzemi gyakorlatban számos esetben a mezofil rothasztókat termofil üzem-módra kell átállítani. Az átállítás sok időt vesz igénybe és a rothasztó berendezések lebontási hatásfoka lecsökken, ezért az átállás idejét és módját optimalizálni kell.

A közlemény célja, hogy a mezofil rendszerről termofilra történő átállítás üzemi tapasztalatait értékeljük és fél-üzemi kísérletek segítségével a folyamatot nyomon kövessük. Az átállítás folyamatának nyomon követése legegyszerűbben az egyensúlyi paraméterek (pH; illósav; lúgosság) és a gázösszetétel ( $\text{CH}_4$ ;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ ) mérésével oldható meg. A fél-üzemi rendszerben a termofil rendszerre történő átállítást követően vizsgáltuk, hogy a terhelés változás hatására az egyensúlyi paraméterek hogyan változnak.

## 1. A mezofil és termofil rothasztás kapcsolata

A tápanyagok mezofil és termofil anaerob folyamattal egyaránt lebonthatók és a hasznosítható végtermék metán és szén-dioxid tartalmú biogáz. Európában, a gyakorlatban a rothasztók nagy része mezofil tartományban (33 – 37 °C) üzemel, azonban az elmúlt 10 évben termofil (50 – 55 °C) rothasztók is épültek. A termofil rothasztó berendezésekkel szerzett üzemelési tapasztalatok (gázfejlődés, stabilitás, iszap-vízteleníthetőség, habzás, szag stb.) nagyon pozitívak. A 1.táblázat (Palkó et al., 2004; Kardos et al., 2009) a mezofil és a termofil anaerob rendszer üzemi paramétereinek összehasonlítását mutatja. Szembetűnő, hogy a tartózkodási-idő csak kb. harmada a mezofil rendszernél szükséges tartózkodási-időnek. A termofil folyamatnál a reakció sebesség nagyobb, viszont a sejthozam állandó kisebb, mint a mezofil tartományban. A látszólagos ellentmondást a magasabb hőmérsékleten végbemenő biodegradációval és ehhez a hőmérséklethez speciálisan szelektálódott metántermelő baktériumok jelenlétével lehet magyarázni.

1. táblázat. A mezofil és a termofil anaerob rendszer üzemi paramétereinek összehasonlítása

A paraméter megnevezése	Mezofil	Termofil
pH	7,2 – 8,0	7,2 – 8,5
Hőmérséklet, °C	30 – 35	50 – 57
Hőmérséklet-ingadozás, melyet a rendszer elvisel, °C	~ 3 – 5	~ 1 – 2
Sejthozam állandó, kg VSS/kg lebontott KOI	0,15 – 0,30	0,01 – 0,10
Elektród potenciál értéke, mV	– 450 és –550	–550 és –600
Optimális redox potenciál értéke, mV	– 520 és –530	Nincs adat
Terhelés szennyvíz iszapoknál:		
• Kis-terhelés, kgVSS./m <sup>3</sup> .d	0,6 – 1,6	3,0 – 8,0
• Nagy terhelés, kgVSS./m <sup>3</sup> .d	2,4 – 6,4	8,0 – 30,0
Hidraulikus tartózkodási-idő, d	15 – 25	3 – 10
Elérhető KOI csökkenés, %	65 – 85	85 – 95
Elérhető BOI <sub>5</sub> csökkenés, %	60 – 80	80 – 90
Elérhető szerves-anyag csökkenés, %	45 – 55	55 – 70
Biogáz termelés, m <sup>3</sup> /kg KOI eltáv.	0,31 – 0,38	0,62 – 0,76

Biogáz metán tartalma, %	60 – 70	80 – 90
--------------------------	---------	---------

A mezofil és a termofil rothasztás technológiai előnyeinek összehasonlítását a 2. táblázat mutatja be. A termofil rothasztás legnagyobb előnye a mezofil rendszerrel szemben az, hogy a nagyobb reakció sebesség miatt kisebb reaktorteret kell építeni és a kezelt iszapban a patogén baktériumok pusztulása lényegesen nagyobb fokú, mint a mezofil folyamatban.

**2. táblázat Mezofil és a termofil rothasztás összehasonlítása az előnyök alapján**

Mezofil (kondicionálatlan helyzethez viszonyítva)	Termofil (mezofil rendszerhez viszonyítva)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Csökken az elhelyezendő iszap mennyisége</li> <li>• Javul az iszap vízleadó képessége</li> <li>• A rothasztó berendezés a telep pufferaló egysége</li> <li>• Stabilizálódik a szerves-anyag, miközben biogáz és trágya képződik</li> <li>• Csökken az iszap fertőző képessége</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A nagyobb reakció sebesség miatt kisebb reaktor térfogat szükséges</li> <li>• Az iszap vízteleníthetősége tovább javul</li> <li>• A patogén baktériumok pusztulása nagyfokú („A” osztályú végtermék)</li> <li>• Nagyobb gázhozam és a biogáz metán tartalma nő</li> </ul>

Természetesen a két rothasztási rendszer összehasonlítása alapján hátrányok is jelentkeznek, melyeket a 3. táblázat foglalja össze. Az előnyök és a hátrányok összevetése alapján megállapíthatjuk, hogy a termofil anaerob rothasztás alkalmazása a mezofil eljáráshoz képest több előnnyel jár, mint hátránnyal.

**3. táblázat A mezofil és termofil rothasztás összehasonlítása a hátrányok alapján**

Mezofil (kondicionálatlan helyzethez viszonyítva)	Termofil (mezofil rendszerhez viszonyítva)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A nagy tartózkodási-idejű (&gt;15 nap) miatt nagy reaktor térfogat szükséges és megnő a beruházási költség.</li> <li>• A nagyfokú hidrolízis miatt romlik az iszapvíz minősége (KOI, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, foszfor)</li> <li>• Toxikus hatású szerves anyagok és nehézfémek bizonytalanná tehetik a folyamatot</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nagyobb a fűtési energia szükséglet</li> <li>• Nagyobb üzemelési hőfok miatt nagyobb fokú lesz a hidrolízis mértéke, tehát tovább romlik a dekantált iszapvíz minősége (KOI; NH<sub>4</sub>-N)</li> <li>• Hőmérséklet-változásra érzékenyebb, mint a mezofil rendszer. Nagyobb hőcserélő szükséges a pontos hőfok-tartás miatt</li> <li>• Hosszú bedolgozási idő (+1 és +2 °C/d hőfokemeléssel lehet számolni)</li> <li>• Toxikus anyagokra érzékenyebb, mint a mezofil, ezért az üzem egyensúlya könnyen felborulhat</li> </ul>

Moen et al. (2003) laboratóriumi körülmények között termofil és mezofil anaerob rothasztókat párhuzamosan 15, 10, 6 és 4 napos tartózkodási idővel (SRT) a West Point Tisztító Telepről származó kevert (nyers és fölősiszap) iszappal táplálva üzemeltettek. Minden egyes tartózkodási-idejű elegendő hosszú volt, ahhoz, hogy az egyensúlyi állapot beálljon, kivéve 4 napos tartózkodási-idejűt a mezofil rothasztás estében, ugyanis ez az idő rövidnek bizonyult az egyensúlyi állapot kialakulásához. Hosszú tartózkodási-idejű mellett (10 vagy annál több) nem volt számottevő különbség a szerves-anyagok lebontási határfokában a termofil és a mezofil rothasztás között. Az oldott szerves-anyagok

(VSS) koncentrációja kisebb volt termofil körülmények között, mutatva, hogy körülbelül 4% -al volt jobb a makromolekulák átalakítása.

A szénhidrátok, zsírok, fehérjék lebontására nézve mindkét lebontásnál ugyanaz a tendencia figyelhető meg. A zsírok lebontása nehezen indul be, a fehérjék néhány frakciója nem bontható, szénhidrátok lebontása is mérsékelt, azonban ez a tartózkodási-idő növelésével nagymértékben emelkedik.

A lúgosság és az ammónia koncentráció mind termofil, mind mezofil körülmények között emelkedett a tartózkodási idő növekedésével. Termofil rothasztás esetén nagyobb volt az ammónia és a lúgosság, amit valószínűleg az intenzívebb fehérje lebontás eredményezett, bár a fehérje lebontás alig kedvezőbb termofil körülmények között, mint mezofil rothasztás esetén.

A pH nagyobb a termofil rothasztókban, mint a mezofil rothasztókban, ugyanis a hőmérséklet növekedésével, nagyobb a szén-dioxid Henry állandója. A kisebb pH érték mindkét rothasztás típus esetében a 6, illetve annál kisebb tartózkodási idő mellett a magasabb illósav koncentrációnak köszönhető. A 10, illetve 15 napos tartózkodási-idők esetén a napi termelt gázmennyiség és a gáz metántartalma hasonló volt termofil és mezofil rothasztási körülmények mellett, azonban a kisebb tartózkodási-időknél (6 nap, vagy annál kisebb) a termofil rothasztás során több biogáz termelődött (körülbelül 15 % -al a mezofil rothasztáshoz képest) és a metántartalom nagyobb volt.

Az illósav koncentráció az ecetsav, propionsav és vajsav koncentráció nagyobb volt termofil körülmények között, mint mezofil rothasztás esetében minden tartózkodási-idő mellett. Csökkent az ecetsav koncentráció a tartózkodási-idő csökkenésével termofil rothasztás esetében, viszont a mezofil rothasztásnál az ellenkező tendencia figyelhető meg. A propionsav koncentráció a termofil rothasztóban jelentősen nagyobb a mezofil rothasztóhoz képest, a vajsav koncentráció mindkét rothasztó típusnál kicsi volt, de a termofil rothasztóban 4 napos tartózkodási-idő mellett körülbelül 10-szeres értékre emelkedett, jelezve, hogy a folyamat kevésbé stabil alacsony tartózkodási-időnél. A termofil rothasztóban 4 napos tartózkodási-idő mellett is jelentkezett a metanogén baktérium tevékenység, míg a mezofil rothasztóban nem.

A termofil és a mezofil iszap metántermelő aktivitását összehasonlítva megállapítható, hogy a termofil populáció aktivitása nagyobb, mint a mezofilé. A termofil rendszer stabilitása nagyobb terheléseknél is megfelelő. Az egyéves hosszú adaptáció során a termofil populáción belül az ecetsav és a propionsav hasznosító fajok aránya megnőtt és ezt bizonyítja az említett illósavak nagy hasznosítási sebessége. A termofil rothasztó gázfejlődési sebessége a terhelés növelésével lényegesen gyorsabban nő, mint a mezofil rendszeré. Az adaptáció befejezése után a termofil rothasztó metánhozama valamennyi szubsztrátra nézve nagyobb, mint a mezofil rothasztóé.

*Rubia et al.*, (2002) az anaerob mezofil és termofil rendszert fél-üzemi kísérletek alapján hasonította össze. A kísérleteknél kommunális eredetű iszapot használtak. A fontosabb megállapítások az alábbiakban foglalhatók össze:

- A szerves-anyag csökkenés, gáz-képződés alapján 27 nap tartózkodási-idő, vagy e fölött a

mezofil és termofil rendszer egyenrangú

- 27 nap tartózkodási-idő alatt a termofil eljárás a gázképződést illetően hatékonyabb, mint a mezofil
- A 27 nap tartózkodási-időnél a mezofil kísérletnél a szerves-anyag (VS) terhelés  $0,69 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  (KOI:  $1,37 \text{ kg/ m}^3 \cdot \text{d}$ ) és a metánfejlődés  $0,40 \text{ m}^3/\text{kg VS}$  lebontottra vonatkoztatva.
- A 27 nap tartózkodási-időnél a termofil kísérletnél a szerves-anyag terhelés  $0,80 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  (KOI:  $0,96 \text{ kg/ m}^3 \cdot \text{d}$ ) és a metánfejlődés  $0,24 \text{ m}^3/\text{kg VS}$  lebontottra vonatkoztatva.

A kísérletek azt a tapasztalati tényt igazolták, hogy a termofil rendszer üzemeltetése az iszaprohasztásban a kisebb tartózkodási-időknél (< 10 nap) igazán kifizetődő. Ebben a tartományban viszont a mezofil rohasztók a nagy terhelés miatt gyakorlatilag nem üzemeltethetők. A kisebb tartózkodási-idő mellett termofil úton kezelt iszapot mezofil módon még tovább kell kezelni.

## **2. Az anaerob rohasztók viselkedése az átmeneti állapotok esetében**

A biológiai folyamatokat az üzemeltetés során nemcsak az egyensúlyi, hanem a tranziens állapotok között is vizsgálni kell. Ilyen sajátosságos tranziens helyzet lehet (*Bolzonella et al.*,2003):

- a szervesanyag-terhelés mértékének ( $\text{kg VS/m}^3 \cdot \text{d}$ ) változása és
- a reaktor hőmérséklet változása (mezofil állapotról a termofil állapotra való áttérés).

A vizsgálatok során mezofil ( $30 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) állapotról termofil ( $50 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) állapotra térnek át. Az üzemeltetésnél számos gond merült fel, hiszen a termofil baktériumok az áttérést követő kezdeti időben a reaktorból még hiányoznak.

Ilyen esetben az illékony zsírsavak (VFA) koncentrációja 200-ról 1200 mg KOI/L koncentrációra növekedett. Ennek oka, hogy a metántermelő baktériumok a képződött illósavat nem tudták lebontani, mert a termofil metántermelő baktériumok száma még nem volt elegendő az adott illósav mennyiség lebontásához. A gázkromatográfiás vizsgálatok szerint a VFA vegyületek közül az ecetsav 80 %-ban volt jelen, míg más savak nem változtak jelentősen. A mezofil rendszernek termofilra történő átállításánál a gáztermelés csökkent,  $1,5$ -ről  $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ , ami a hőmérséklet-változás és a tápanyag betáplálás megszakítása miatt következett be. A reaktor hőmérsékletének emelésekor ( $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ) metán a biogázban 52-ről 60 %-ra növekedett.

Amikor a szennyvíztisztító telepről, a gyümölcs és zöldség piacokról származó szubsztrátokat keverve juttatták a rohasztóba, a helyzet egészen megváltozott. Amikor a mezofilről áttértek a termofil hőmérsékleti tartományba a gázfejlődés (GPR)  $1 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ -ről  $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  értékre csökkent a 187 – 191 nap tartományban, ezt követően a gáztermelés (GPR) növekedett.

A hőmérséklet-változtatás után 30 nap kellett ahhoz, hogy a reaktor stabilitás helyreálljon. Az illékony zsírsavak (VFA) változása nagyon gyors volt: 2000-ről 3000 mg KOI/L koncentrációra növekedett a hőmérséklet-változtatást követő napon és kb. 40 napra volt szükség, hogy a 2000 mg KOI/L szintre visszaálljon.

A mezofilről ( $30 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a termofil ( $50 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) állapotra történő átállításnál megállapítható, hogy

- a rendszer alap állapotának változását a VFA változás írja le, majd ezt az összes lúgosság (pH = 4 értéken meghatározva) és a gáztermelés (GPR) paraméterek követik.
- a VFA és a lúgosság paraméterek a folyamat változás és az egyensúly helyreállításának igazolásához alkalmazhatók.
- a GPR és biogáz metán tartalma, csak akkor hasznos paraméter, ha a hőmérséklet és a szerves-anyag terhelés mértéke nő.
- minél nagyobb a szubsztrát biológiai lebonthatósága, annál nagyobb a valószínűsége, hogy az egyensúlyi folyamatban zavar keletkezzék és az egyensúlyi zavart legjobban a VFA és a lúgosság jelzi.
- az egyensúlyi folyamat stabilizálódásához hosszú időre van szükség, különösen igaz ez a nagy biológiai lebonthatóságú szubsztrátok esetében.
- a folyamat stabilitásának kimutatásához a paraméterek fontossági sorrendje: VFA koncentráció > lúgosság (pH = 4 értéken) > GPR > metán tartalom > lúgosság (pH = 6 értéken) > pH.

### 3. Termofil/mezofil rothasztó rendszer üzemi tapasztalatai

*Mitsdörffer et al.* (1991) részletesen elemzi a kétfázisú termofil/mezofil rothasztás kapcsolatát. A kétfázisú termofil/mezofil rothasztás egy olyan új módszer, amely lehetővé teszi az iszap stabilizálása mellett az egyidejű fertőtlenítést is. A rendszer kiépítéséhez szükséges egy jól működő, stabil metántermeléssel rendelkező mezofil reaktor és egy igen nagy szerves- és hidraulikai terhelést (4 – 20 kg VS/m<sup>3</sup>·d) elbíró kis tartózkodási-idővel (2 – 8 nap) üzemelő termofil reaktor, és egy kiegyenlítő tartály. Az iszapot először egy hőcserélőn keresztül 35 – 40 °C-ra felmelegítik, majd azonnal betáplálják a termofil reaktorba (52 – 55°C). Ezt követően a kiegyenlítő tartályba kerül, ahonnan lehűlés után a konvencionálisan működő mezofil reaktorban folyik tovább a gáztermelő folyamat. Első, termofil lépcső tartózkodási ideje 2 – 8 nap, a mezofil rendszeré 12 – 35 nap.

Két rendszert vizsgáltak, amelyek az „Osterode” és „Altenmarkt” szennyvíztisztító telepen működnek. A szervesanyag lebontás *Osterode* szennyvíztelep rothasztójának első fokozatánál a 40 %-os, a második fokozat 70%-os hatásfokkal üzemelt. Az együttes lebontási hatásfok az *Osterode*-i telepnél nagyon jónak mondható. Az *Altenmarkt* telep kétfokozatú (termofil/mezofil) rothasztóival elért eredmények (második fokozat: ~50 %) általában az átlagosan elérhető lebontást mutattak. Biogázhozam az első fokozatban a betáplált szárazanyagra vonatkoztatva az *Osterode* telepen 260 – 420 L/kg és az *Altenmarkt*-i telepen 250 L/kg értéket érte el. A második fokozatban a betáplált szárazanyagra vonatkoztatva a biogáz hozam az *Osterode*-i telepnél 430 – 600 L/kg és az *Altenmarkt*-i telepnél 400 – 480 L/kg értékek között mozgott.

Az üzemi tapasztalatokat az alábbiakban lehet összefoglalni:

- Stabilitás a reaktortérfogat függvénye, döntően befolyásolja a keverés és a koncentráció gradiens. A termofil fázis kis térfogatából adódik, hogy sokkal érzékenyebb a mérgező

hatásokra, mint a mezofil reaktor.

- Biológiai stabilitás a szaporodás kinetikájának függvénye. Az Osterode szennyvíztelepen végzett kísérletek szerint a terhelés kis ideig ( $< 4$  nap) meghaladhatja a maximális érték 2 – 3-szorosát is, anélkül, hogy a rendszer instabillá válna.
- Kísérletek azt mutatják, hogy egy termofil rendszer indításánál a baktériumközösség ki tud alakulni, ha a nyersiszapot  $55^{\circ}\text{C}$ -on 5 nap tartózkodási-idővel, maximális szubsztrát-terhelés mellett rothasztjuk, figyelve arra, hogy a  $\text{pH} < 6$ . A mezofil rendszerrel ellentétben a termofil rendszer hőmérséklet-változásra igen érzékeny, ideális az  $53 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . A termofil kezelés felső határa  $58 - 60^{\circ}\text{C}$ ,  $60 - 62^{\circ}\text{C}$  fölött a lebontási hatások drasztikus csökkenése várható.
- A kétfázisú rendszer hőigénye 3 – 6%-kal, áramigénye 3%-kal magasabb, mint a konvencionális mezofil rendszeré. A keletkezett többletgáz mennyisége  $50 \text{ m}^3/\text{nap}$  (6%) azonban nem elhanyagolható.
- A rendszer egészét nézve a biogáz termelés 15%-kal több mint konvencionális, mezofil rendszer esetén.

*Dichtl et al.* (1986) az iszapstabilizálás kétlépcsős rendszerben vizsgálták. A termofil/mezofil rendszer esetén a metántermelés maximuma a termofil fázis első 2 – 3 napjában jelentkezik. Ennek megfelelően a termofil lépcsőt kis tartózkodási-idővel célszerű megvalósítani. A kísérletek szerint 2 napos termofil és 8 napos mezofil rendszer együttes alkalmazásával ugyanazt a KOI lebontási értéket kapták, mint a 20 nap tartózkodási-idővel, egy lépcsős, mezofil rendszerben.

A kétfázisú termofil/mezofil rothasztással elérhető előnyök:

- a folyamat hatások növekszik, vagy
- ugyanolyan hatásokot érhetünk el kisebb reaktortérfogatban
- változatlan térfogat esetén nő a gázkihozatal értéke
- az első lépcső felhasználható a koncentráció-ingadozások kiegyenlítésére
- zavaró, mérgező hatásokra kevésbé érzékeny a rendszer
- túlterhelt rendszerek bővítésénél jól alkalmazható
- egyidejű fertőtlenítés plusz költségek nélkül

A kétfázisú termofil/mezofil rothasztás hátrányai:

- a beruházási költségek megemelkednek,
- az első lépcsőben intenzív keverés szükséges

Összességében megállapítható, hogy a kétlépcsős módszerrel a szerves-anyag jól lebontható, javítható az iszap vízteleníthetősége, a kórokozók mennyisége is csökken.

*Wechs et al.* (1986) vizsgálatai alapján a termofil rendszer esetén a fajlagos gáztermelés értéke  $1500 \text{ L/m}^3 \cdot \text{d}$ , ami a mezofil rendszerhez képest 3 – 4-szeres érték. Maximálisan 50%-os KOI lebontási hatásokot lehet elérni a rövid tartózkodási-idő alatt. Az eredményekből kiderül, hogy az iszap anaerob kezelése során 2 – 5 nap tartózkodási-időt alkalmazva elfogadható lebontási hatások kaphatók.

A lebontott szerves-anyag termofil rendszer esetén 2,6 – 3,6 kg KOI/m<sup>3</sup>·d, ami 2,4 – 3,6-szor nagyobb érték, mint a referencia mezofil rendszer esetén mért értékek (0,9 – 1,1 kg KOI/m<sup>3</sup>·d). A 26°C-on mért lebontási hatások mindösszesen csak a mezofil rendszer 10%-a.

*Merz et al.* (1999) által végzett kísérletek a leonbergi szennyvíztisztító telepen folytak. Két 560 m<sup>3</sup>-es reaktor közül az egyik mezofil (37°C) hőmérsékleten a másik termofil (55°C) hőmérsékleten üzemelt. Mindkét reaktorban a tartózkodási idő 5 – 7 nap. Két kísérlet zajlott, az egyik esetében csak primer iszapot kezeltek (1996. márc.-máj.), a másikonál 30% primer és 70% fölösiszapot együttesen (1997. máj.-aug.). A fölösiszap esetén a biogáz-termelés 524 L/kgVS, a keverék iszap esetén pedig 693 L/kg VS volt. Utóbbi esetben a tartózkodási-idő 10,6 nap, a lebontási hatások 54%. A kísérlet során elért maximális, 61%-os lebontási hatások esetén az iszap szárazanyaga 33,5%-kal csökkent.

#### 4. Kísérleti- és mérési módszerek

A kísérleteket a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen végeztük el 3 db 2 m<sup>3</sup>-es fél-üzemi, anaerob fermentorban (*1. kép*), mezofil és termofil hőmérsékleten.



1. kép A fél-üzemi kísérleti reaktorok

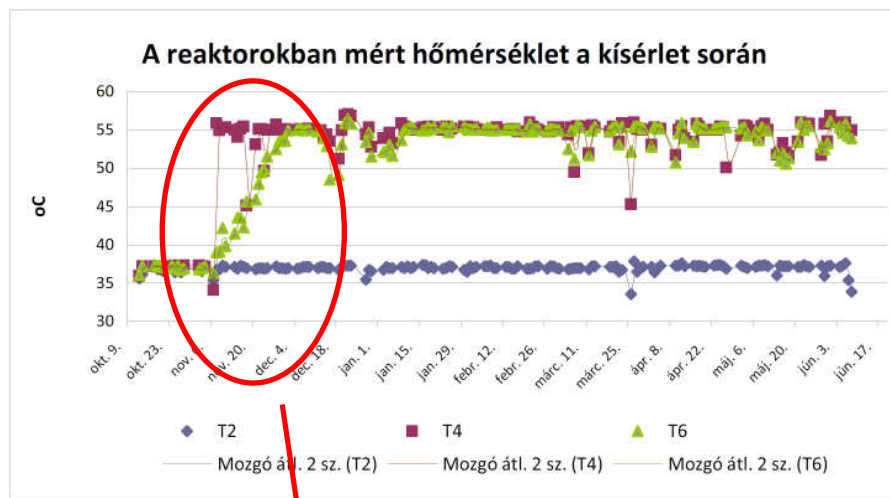
A kémiai paraméterek mérését a Magyar Szabványnak megfelelően végeztük, néhány paraméter mérésére egyedi módszert dolgoztunk ki. A mérési módszerek a gyakorlatban jól ismertek, ezért ezek ismertetésére nem térünk ki.

#### 5. A mérési eredmények értékelése

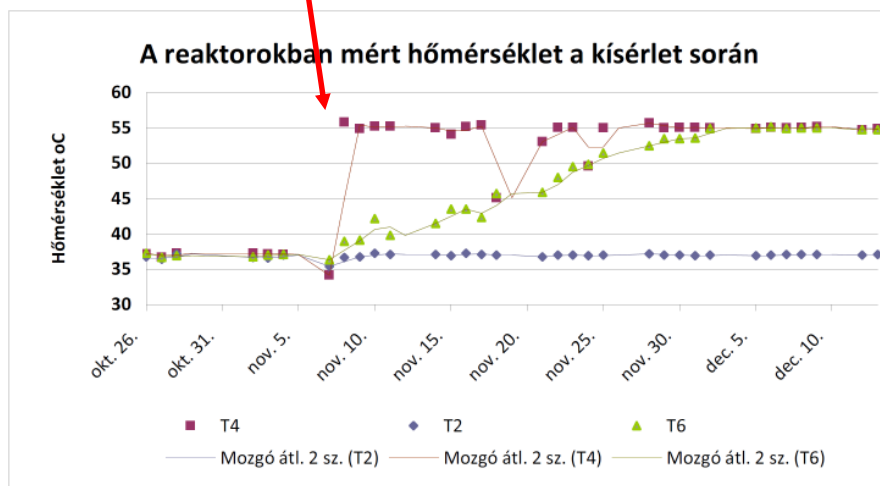
A kísérletek során a mezofil és a termofil rothasztó rendszer összehasonlítását végeztük el különböző iszap-terhelések alkalmazása mellett. Vizsgáltuk továbbá azt, hogy a termofil populáció kialakulásában milyen szerepet játszik a felfűtés sebessége. A mezofil, kontroll reaktor (T2) mellett két termofil rothasztót (T4; T6) indítottunk. Az egyik reaktor esetén a hőmérsékletet azonnal 37°C-ról 55°C-ra emeltük (T4), a másik reaktorban a hőmérsékletemelést lassú ütemben, napi 0,5 – 1,0°C lépésekben végeztük el (T6).

##### 5.1. Reaktorok hőmérsékletének beállítása

A reaktorokban mért hőmérséklet-felfutást és a kísérlet során a reaktorok hőmérsékletének alakulását az 1/a és 1/b. ábrák mutatják be.



1/a. ábra: a reaktorokban mért hőmérséklet a kísérlet során



1/b. ábra: a reaktorokban mért hőmérséklet a kísérlet során

A mezofil reaktorban (T2) hőmérsékletet a kísérlet során végig 37°C-on tartottuk. A két termofil reaktor (T4 és T6) üzemét is mezofil rendszerből kiindulva indítottuk el. A T4 reaktornál a mezofil hőmérsékletet (37°C) gyorsan (azonnal) termofil (55°C) üze-módra állítottuk. A T6 termofil reaktornál a hőmérsékletet lassan emeltük 55 °C-ra.

## 5.2. A kontroll, mezofil reaktor (T2) üzeme

A mezofil rendszert azért üzemeltettük, hogy a két termofil üzem-mód eredményeit a hagyományos rothasztással eredményeivel össze tudjuk hasonlítani. Az egyensúlyi paraméterek (pH; illósav, lúgosság) a mezofil viszonyoknak teljesen megfelelt. A kisebb terhelési értékeknél (0,14 – 0,30 kg szerves-anyag/m<sup>3</sup> nap) némi bizonytalanság mutatkozott: nagyobb értékek (5000 – 6000 mgCaCO<sub>3</sub>/L)



a terhelés növekedésével csökkentek. A nagyobb terhelésnél a lúgosság 3000 mgCaCO<sub>3</sub>/L érték körül stabilizálódott. Ez a lúgosság érték elegendő az anaerob rendszer egyensúlyban tartásához. A biogáz metán tartalma átlagosan 60 % körül mozgott. A metán tartalom nem csökkent a terhelés növekedésével sem.

### 5.3. A termofil rothasztók (T4; T6) üzemi paramétereinek összehasonlítása

*Egyensúlyi paraméterek (pH, illósav, lúgosság)*

A T4 reaktornál sokszerű hőmérséklet-emelést követően, a bedolgozás kezdetén, amikor még kisebb terheléssel (0,14 – 0,30 kg szerves-anyag/m<sup>3</sup>·nap) üzemelt a pH 6,5 – 7,4 között változott. A terhelés növekedését követően a pH 7,5 értékre állt be, de kisebb ingadozások gyakran előfordultak. A T6 reaktornál a pH értéke az üzemelés kezdetén sem esett 7,0 érték alá, majd 0,30 terhelési értéket követően a pH 7,5 érték körül stabilizálódott.

A T6 reaktorban a lúgosság, csak a 2,53 kg szerves-anyag/m<sup>3</sup>·nap terhelési-érték után kisebb 2500 mgCaCO<sub>3</sub>/L értékre állt be. A T4 reaktorban a lúgosság már kisebb 1,71-es terhelésnél 2500 mgCaCO<sub>3</sub>/L értékre állt be. Ez a T4 reaktor bizonytalanabb egyensúlyi helyzetére utal. Az összes illósav a T4 és T6 reaktorokban a bedolgozás kezdete és a nagyobb terheléseknél is zömmel 1250 mg/L érték alatt volt. Ez a reaktorok kiegyensúlyozott üzemére utal.

### 5.4. A rothasztók terhelésének változtatása

A három reaktort kezdetben ugyanazzal a terheléssel üzemeltettük, majd a kísérlet végén a termofil reaktorok terhelését 2,53 – 3,86 kg szerves-anyag/m<sup>3</sup>·nap értékre növeltük, azzal a céllal, hogy a ilyen nagy terhelés mellett a termofil egyensúly alakulását vizsgálhassuk. A kísérleti szakaszok során alkalmazott terheléseket a 4. táblázat tartalmazza. A mezofil rendszer terhelését lényegesen kisebb értéken tartottuk, mint a termofil rendszereket. Hiszen a mezofil tartományban mindig lényegesen kisebb terheléseket alkalmaznak, mint a termofil tartományban.

4. táblázat: a kísérleti szakaszok során alkalmazott terhelések

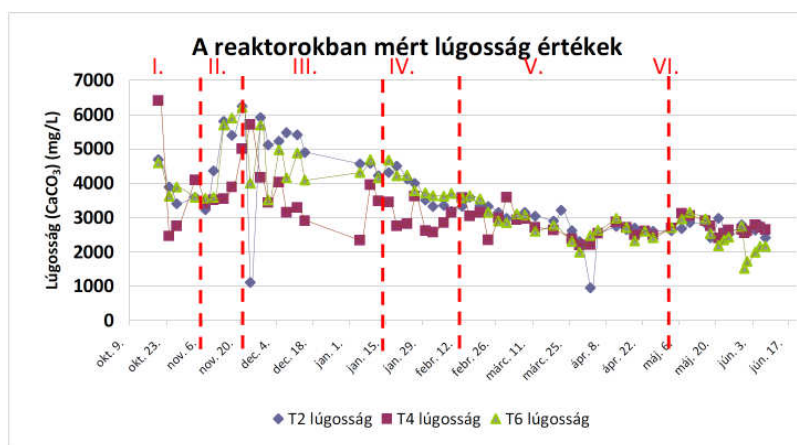
	Reaktorok terhelése (szerves-anyagra vonatk.)		
	(kg/m <sup>3</sup> <sub>reaktor</sub> ·nap)		
	T2 reaktor (mezofil)	T4 reaktor (termofil: gyors hőmérséklet-emelés)	T6 reaktor (termofil: lassú hőmérséklet-emelés)
I. szakasz	0	0	0
II. szakasz	0,14	0,14	0,14
III. szakasz	0,30	0,30	0,30
IV. szakasz	1,65	1,71	1,71
V. szakasz	2,33	2,53	2,53
VI. szakasz	2,33	3,86	3,86

Mindhárom rothasztás esetén a pH-t 6,5 – 8,0 közötti tartományban tudtuk tartani egyéb semlegesítő vegyszer adagolása nélkül. Legnagyobb változást a T4 reaktorban tapasztaltunk, amikor a

hőmérsékletet egy lépésben termofilra emeltük. Ekkor a pH 7,4-ről 6,5-re csökkent. A T4 reaktorban a kísérlet további szakaszaiban is általában alacsonyabb pH értéket mértünk, mint a T2 mezofil, illetve T6 termofil reaktorban. A T4 reaktorban a pH értékek viszonylag nagy ingadozást mutattak. A pH értékek legkevésbé a T6 termofil reaktorban változtak.

Az illósav értékek a T2 mezofil reaktorban a kísérlet egész ideje alatt, függetlenül a terheléstől nagyobbak voltak, mint a termofil reaktorokban. Ez azzal magyarázható, hogy termofil anaerob folyamat reakció sebessége nagyobb, mint a mezofil folyamat sebessége és ennek következtében az illósav hasznosítás is jobb. A T4 reaktorban, amelyikben a hőmérsékletemelést egy lépcsőben végeztük el, a hőmérsékletemelést követően megnőtt az illósavak koncentrációja, amely az egyensúly beálltát követően ismét lecsökkent.

A lúgosság értékei számottevően nem változtak a kísérlet alatt, illetve a három rothasztóban egymáshoz viszonyítva sem. A lúgosság nagyobb terhelést követően mindhárom rothasztóban közel azonos értékre ( $3000 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ) állt be (2. ábra).

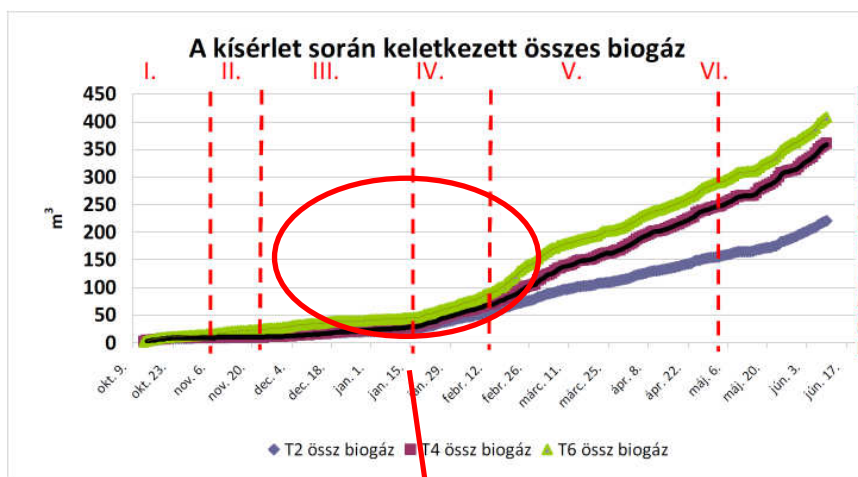


**2. ábra A reaktorokban mért lúgosság értékek változása**

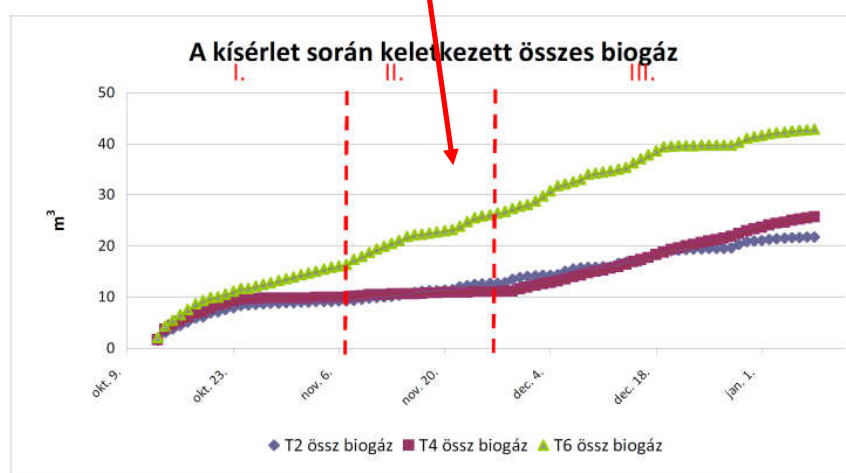
A kísérletek során nemcsak a klasszikus összes illósav-koncentrációt mértük a reaktorokban, hanem gázkromatográfiás módszerrel hét különböző illékony zsírsav egyedi koncentrációját is meghatároztuk. Ezek az ecetsav, propionsav, izovajsav, vajsav, izovalerinsav, valeriansav és a kapronsav voltak. Az adatok feldolgozása során azt tapasztaltuk, hogy az ecetsav és a propionsav koncentrációjának változása egyértelmű összefüggésbe hozható a terhelés változásával. Mindkét illékony zsírsav koncentrációja jelentősen megnőtt minden kísérleti szakaszban a terhelés megváltoztatását követően.

### 5.5. Biogáz-termelés

A kísérlet során összehasonlítottuk a mezofil és a termofil rothasztók biogáz termelését. Mint az előre várható volt, a termofil reaktorokban több biogáz képződött. Az egyes kísérleti szakaszok során keletkezett biogáz mennyiségek és a fajlagos értékeik a 5. táblázatban és a 3/a-b. ábrán láthatók.



3/a.ábra



3/b.ábra

3/a-b.ábra Kísérlet során a reaktorokban keletkezett összes biogáz

5. táblázat: a reaktorokban termelődött biogáz mennyiségek

Reaktor	Kísérleti szakasz	Összes keletkezett biogáz (m <sup>3</sup> )	Átlagos napi biogáz mennyiség (m <sup>3</sup> /nap)	Betáplált összes szerves-anyag (kg)	Betáplált szerves-anyagra vonatkoztatott biogáz-termelés (m <sup>3</sup> /kg)
T2	I.	9,25	0,36	0	-
	II.	3,02	0,20	2,1	1,15
	III.	12,40	0,23	16,5	0,75
	IV.	36,43	1,21	49,5	0,74
	V.	98,57	1,23	186,4	0,53
	VI.	60,90	1,74	81,6	0,75
T4	I.	9,91	0,38	0	-
	II.	1,08	0,07	2,1	0,52
	III.	19,26	0,35	16,5	1,17
	IV.	46,58	1,55	51,3	0,91
	V.	177,72	2,22	202,4	0,88
	VI.	105,95	3,03	135,1	0,78

<b>T6</b>	I.	16,44	0,63	0	-
	II.	8,31	1,61	2,1	1,31
	III.	21,09	0,38	16,5	1,28
	IV.	55,44	1,85	51,3	1,08
	V.	195,72	2,45	202,4	0,97
	VI.	111,18	3,18	135,1	0,82

A két termofil reaktor biogáz termelésében csak a hőmérsékletemelés szakaszában volt számottevő különbség. A nagyobb terhelési értékeknél a fokozatosan emelt hőmérséklettel beüzemelt termofil reaktorban (T6) kb. 10%-kal nagyobb gáz-fejlődést mértünk, mint az egy lépésben átállított termofil reaktorban (T4). A kísérletek során vizsgáltuk a keletkezett biogáz összetételét is vizsgáltuk. A két legfontosabb biogáz-összetevő, a metán és a szén-dioxid arányát rendszeresen mértük. A rothasztókban (T2; T4; T6) az egyensúly beállítását követően biogázban a metán és a szén-dioxid komponensek aránya nem változott. A metán tartalom 60 – 65 tf.% és a szén-dioxid pedig 25 – 30 tf.% között változott. A mérések során azt tapasztaltuk, hogy a mezofil reaktorban kevésbé ingadozott a biogáz összetétele, mint a termofil rothasztókban.

A biogáz összetevői közül a kén-hidrogén esetén tapasztaltunk jelentős eltérést a mezofil és a termofil rendszer között. A kísérlet kezdetén, az I. és II. szakaszban nem volt eltérés a három rothasztó biogázában mért kén-hidrogén tartalom között, a III. szakasztól azonban a termofil reaktorokban (T4; T6) keletkezett biogázban jelentősen megnőtt a kén-hidrogén koncentrációja. A mezofil rothasztóban (T2) a biogáz kénhidrogén koncentrációja 15 – 30 mg/L között változott. A két termofil rothasztónál (T4; T6) a kénhidrogén koncentráció 40 – 80 mg/L érték között változott. A mezofil rothasztóban mért H<sub>2</sub>S koncentrációhoz képest a termofil rothasztókban jelentős az emelkedés. Ez azzal magyarázható, hogy a termofil rothasztásnál nagy fokú a fehérjék hidrolízise és a lebomlás következtében a kén a gázban kénhidrogén formájában jelenik meg.

### **Összefoglaló értékelés**

A mezofil rothasztók termofil hőmérsékletre történő átállítási kísérletét fél-üzemi reaktorokban végeztük el. A kísérletek eredményeiből az alábbi következtetések vonhatók le:

- A termofil üzem-módra történő átállításkor a lassú, fokozatos hőmérséklet-emelés előnyösebb (1,0 °C/nap), mint az egy lépésben 55 °C-ra történő hőmérséklet-emelés. Erre utal, hogy az egyensúlyi paraméterek (pH; illósav; lúgosság) és a gázösszetétel csak kismértékben ingadozik.
- A pH érték a fokozatosan átállított termofil rendszerénél a bedolgozást követően is stabil maradt, ugyanakkor az egy lépésben 55 °C-ra átállított rothasztónál pH ingadozás jelentkezett.
- A termofil rendszernek a mezofil rendszerhez képest lényegesen nagyobb hidrolízis és szervesanyag lebontási sebessége. Erre utal a nagyobb a nagyobb fajlagos biogáz képződés és zsírlebontó képesség.

- Fokozatos hőmérséklet-emeléssel beüzemelt termofil rothasztó gáztermelése még kettő hónap idejű üzemelés után is ~10 %-kal nagyobb volt, mint az egy lépésben 55 °C-ra beállított termofil rothasztóé.
- Azonos terhelés esetében (0,3 kg szervesa./m<sup>3</sup>·nap) a termofil rendszer fajlagos gáz-fejlesztése (1,17 m<sup>3</sup>/kg betáplált szervesa.) lényegesen jobb, mint a mezofil rendszer gáz-termelése (0,75 m<sup>3</sup>/kg betáplált szervesa.). A termofil rendszer szerves-anyag terhelése 4 – 7 kg szervesa./m<sup>3</sup>·nap értékig emelhető, ugyanakkor a mezofil rendszerénél 2 kgszervesa./m<sup>3</sup>·nap terhelés felett hatásfok erőteljes csökkenésével kell számolni.
- A mezofil rothasztóban a biogáz kénhidrogén koncentrációja 15 – 30 mg/L között változott. A két termofil rothasztóban képződött biogázban a kénhidrogén koncentráció 40 – 80 mg/L érték között változott. A mezofil rothasztóban mért H<sub>2</sub>S koncentrációhoz képest a termofil rothasztókban jelentős a H<sub>2</sub>S koncentráció-emelkedés.

### **Irodalomjegyzék**

- Bolzonella, D., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J., Cecchi, F.* (2003): Anaerobic digestion of organic solid wastes: process behaviour in transient conditions. *Water Science & Technology* Vol. 48, No. 4, 1 – 8
- Dichtl N., Wechs F.* (1986): Zweistufige Verfahren der Schlammstabilisierung  
Korrespondenz Abwasser, 11/86, 33
- Kardos, L., Palkó, Gy., Oláh, J., Barkács, K., Záray, Gy.* (2009): Operation control of anaerobic digesters on basis of enzyme activity tests. In: *Water Science and Technology*, 60(4), pp. 957 – 964. IWA Publishing, London, UK. ISSN 0273-1223
- Merz H. U., Schmickl M., Trösch W., Galander C.* (1999): Zweistufiges mesophil-thermophiles Verfahren zur Schlammfaulung erstmals in grosstechnischem Masstab erprobt. *Korrespondenz Abwasser*, 1999 (46) Nr 8.
- Mitsdörffer R., Demharter W., Bishchofsberger W.* (1991): Zweistufig thermophile/mesophile Faulung, *Korrespondenz Abwasser*, 1/91 38.
- Moen, G., Stensel, H.D., Lepistö, R., Fergusson, J.F.* (2003): Effect of Solids Retention Time on the Performance of Thermophilic and Mesophilic Digestion of Combined Municipal Wastewater Sludges. *Water Environment Research*, Vol. 75, No. 6, 539 – 548
- Palkó, Gy., Oláh, J., Szilágyi, M.* (2004): Az anaerob iszapkezelés energiatermelési és -hasznosítási lehetőségei. *Hidrológiai Közlöny*. 4.évf., 4.szám, 33 – 40
- Rubia de la, M.A., Perez, M., Romero, L.I., Sales, D.* (2002): Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Sludge Digestion. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 16, (3), 119 – 124
- Wechs F.* (1986): Untersuchungen zur optimierung der zweistufigen anaeroben Klärschlammstabilisierung. *Wasser, Abwasser*, 127, 3.