

SZENT ISTVÁN EGYETEM

**ANAEROB ELŐKEZELÉS HATÁSA A
SZENNYVÍZISZAPOK KOMPOSZTÁLÁSÁRA**

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Rózsáné Szűcs Beatrix

Gödöllő
2013

A doktori iskola

- megnevezése:** **Környezettudományi Doktori Iskola**
- tudományága:** **Környezettudomány**
- vezetője:** **Dr. Heltai György DSc.**
egyetemi tanár, tanszékvezető
SZIE Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet
Kémia és Biokémia Tanszék
- témavezető:** **Dr. Füleky György CSc.**
egyetemi tanár
SZIE Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar
Környezettudományi Intézet
Talajtani és Agrokémiai Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

1. BEVEZETÉS, CÉLOK

A szennyvíziszapok stabilizálásának biológiai módszereihez tartozik a rothasztás és a komposztálás. A szennyvíziszapok anaerob eljárásokkal történő kezelésének előnye, hogy a lebontás során biogáz képződik, amely energiaforrásként hasznosítható. Így a fenntartható fejlődés irányelveinek jobban megfelel, mint a komposztálás. Az anaerob kezelést azonban telep méret függvényében alkalmazzák, csak 100 000 LE feletti telepek esetében gazdaságos a hőveszteség és a korlátozott hasznosítási feltételek miatt.

Biológiailag lebomló hulladékok anaerob kezelésére alkalmazzák a száraz, szakaszos üzemű technológiákat (Ten Brummeler, 1991, 1992). Az eljárás előnye az alacsony technológiai színvonal. A lebontási folyamat beindításához és a folyamatos egyensúlyban tartásához oltóanyagra van szükség, mely arányának meghatározása a kezelés kritikus pontja. A száraz, szakaszos üzemű anaerob kezelés technológiáját kifejezetten szennyvíziszap anaerob kezelésére nem használják, és a lebontási folyamat kinetikai paraméterei nincsenek meghatározva. Feltételezhető, hogy a szennyvíziszap is stabilizálható félszáraz, szakaszos üzemű anaerob kezeléssel. Az anaerob kezelés hátránya, hogy a stabilizált végtermék minősége kedvezőtlenebb, további kezelés nélkül csak korlátozottan hasznosítható (Juhász, 2002).

A szennyvíziszapok komposztálással történő kezelésének előnye, hogy a lebontási folyamat viszonylag egyszerű, a végtermék minősége kedvezőbb és közvetlen mezőgazdasági felhasználásra alkalmas. Hátránya, hogy magasabb technológiai színvonalú, kisebb helyigényű megoldások alkalmazása energiatermelés helyett energiafogyasztással jár (Epstein, 1997).

Az anaerob és aerob eljárások előnyeinek együttes kihasználása céljából a települési szennyvíziszapok stabilizálása során a gyakorlatban egyre szélesebb körben használnak rothasztást követően komposztálást (Juhász, 2011, Baki, 2013). Ellentmondásként jelentkezik, hogy mindkét kezelési mód esetében a könnyen degradálható szerves anyag lebontása történik. Feltételezhető, hogy a rothasztás mértéke kihat a komposztálás folyamatára és a végtermék stabilitására, valamint a szennyvíziszap anaerob előkezelése hatással van a komposztálás energia- és anyagmérlegére. A két kezelési módszer együttes optimalizálásának vizsgálatáról nem találtam információt sem a hazai, sem a külföldi szakirodalomban.

A fentiek alapján kutatásaim fő célja vizsgálni a kommunális szennyvíziszap anaerob előkezelésének hatását a komposztálásra.

Doktori értekezésemben az alábbi kérdéskörök tisztázást tűztem ki célul:

- a különböző mértékben anaerob úton kezelt iszapok előállítása érdekében vizsgálni és igazolni a szennyvíziszap kezelhetőségét félszáraz, szakaszos üzemű anaerob körülmények között, meghatározni a lebontás során alkalmazandó oltóanyag arányt, valamint a lebontás kinetikai paramétereit,
- laboratóriumi kísérletekkel meghatározni a különböző mértékben anaerob úton kezelt iszapok aerob szerves anyag degradációjának menetét és mértékét, és vizsgálni az anaerob és aerob degradáció közötti kapcsolatot,
- kísérleti eredményeim alapján szakirodalmi számítások felhasználásával meghatározni a komposztálás energia mérlegét, majd a komposztálás anyagmérlegének felállításával értékelni az anaerob előkezelés hatását a szennyvíziszapok komposztálására.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Célkitűzéseim alapján első lépésben az anaerob előkezelés laboratóriumi módszerét dolgoztam ki annak érdekében, hogy különböző mértékben anaerob úton kezelt iszapokat tudjak előállítani. A kísérlet eredményeit felhasználva ezt követően laboratóriumi körülmények között vizsgáltam a különböző mértékben rothasztott iszapok komposztálhatóságát.

2.1. Felhasznált anyagok

2.1.1. Anaerob előkezelés módszertani kísérlete során felhasznált anyagok

Oltóanyagként mindkét kísérletben az anaerob iszapstabilizálásból kikerülő rothasztott iszapot alkalmaztam. A szubsztrát minőségéből eredő hatások vizsgálata céljából az 1. kísérletben szubsztrátként kevert iszapot, a 2. kísérletben fölös iszapot használtam.

Az iszapok száraz- és szervesanyag-tartalmát, kémiai oxigénigény értékét, az oltóanyag metanogén aktivitását (továbbiakban: MA) az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: Az iszapok anyagjellemzői

Iszap fajtája	sza (%)	szea (%)	KOI (g · kg s _{za} ⁻¹)	MA (g CH ₄ -KOI · g s _{zea} ⁻¹ · d ⁻¹)
rothasztott iszap <i>RO</i> (oltóanyag 1.)	16,83	68,02	901	0,0232
kevert iszap <i>K</i> (szubsztrát)	23,86	69,91	1124	-
rothasztott iszap <i>RI</i> (oltóanyag 2.)	22,99	41,01	477	0,0284
fölös iszap <i>FI</i> (szubsztrát)	15,25	83,93	1161	-

2.1.2. Az anaerob előkezelés és a komposztálás vizsgálata során felhasznált anyagok

A komposztálás vizsgálatához első lépésben anaerob úton előállítottam a különböző mértékben rothasztott iszapokat. Ezekhez alapanyagként fölös iszapot (mint szubsztrát) és rothasztott iszapot (mint oltóanyag) alkalmaztam. Komposztálás során biztosítani kellett a megfelelő szerkezetet, melyet száraz szalma hozzákeverésével oldottam meg. Az iszapok és szalma száraz- és szervesanyag-tartalmát, kémiai oxigén igényét és metanogén aktivitását mutatja a 2. táblázat.

2. táblázat: Az iszapok és szalma anyagjellemzői

Iszap fajtája	sza (%)	szea (%)	KOI (g · kg sza ⁻¹)	MA (g CH ₄ -KOI · g szea ⁻¹ · d ⁻¹)
rothasztott iszap R2 (oltóanyag)	14,67	64,86	865	0,0229
fölös iszap F2 (szubsztrát)	11,28	80,16	972	-
szalma SZ (szerkezetjavító anyag)	82,54	94,41	614	-

2.2. Anyagvizsgálati módszerek

A minták szárazanyag- (sza) és szervesanyag-tartalmát (szea) 105°C és 650°C hőmérsékleten, tömegállandóságig történő szárítással illetve égetéssel határoztam meg. Az iszapok kémiai oxigénigény (KOI) értékének meghatározását az MSZ 21976-10:1982 számú szabvány szerint végeztem. A metántermelő aktivitást nyomásmérés elvén működő berendezéssel, a Biotechnion (1996) útmutatása szerint végeztem.

2.3. Kísérlet beállítása

2.3.1. Anaerob előkezelés módszertani kísérletének beállítása

Az anaerob előkezelés oltóanyag arányának meghatározását félszáraz, szakaszos üzemű 6 dm³ ösztérfogatú reaktorsorozattal végeztem, amelyek a pH mérés során kialakuló zavaró hatás (reaktorok megnyitása) csökkentése érdekében 4 db, egyenként 1,5 dm³ térfogatú párhuzamosan kapcsolt reaktorokból álltak.

A reaktorok gázgyűjtő zacskóhoz csatlakoztak, mely a termelődött biogázt gyűjtötte össze. Minden reaktorba azonos száraz szerves anyag mennyiségű iszapot tettem, valamint a szárazanyag-tartalmat minden reaktorban azonos értékűre állítottam be. Kísérleti változóként 7 különböző oltóanyag arányt vizsgáltam. A száraz szerves anyag mennyiségre vetített szubsztrát : oltóanyag (K:R0 és F1:R1) arányokat 1:0,5; 1:0,75; 1:1; 1:1,25; 1:1,5; 1:1,75 és 1:2 értékre állítottam be. A rothasztott iszap gáztermelésének levonása céljából „vak” reaktort is beállítottam. A reaktorokat állandó hőmérsékletű helyiségben 33°C-on tartottam.

2.3.2. Anaerob előkezelés kísérletének beállítása

Az anaerob reaktor metántermelésének elősegítése érdekében a fölös iszaphoz, mint szubsztráthoz oltóanyagként rothasztott szennyvíziszapot adtam 1:1,25 keverési arányban, amely arányt a módszertani kísérlet során határoztam meg. A fenti oltóanyag arány esetén, kísérleti eredményeim alapján, nem kell a rendszer elsavanyodásával és az anaerob lebontási folyamat fékezésével számolnom. A fölös iszap : rothasztott iszap keverékét 70 dm³ térfogatú rozsdamentes acél reaktorba tettem. A reaktor kialakítása – a külső fűtéstől eltekintve – azonos volt Brummeler és munkatársai (1991) által használt reaktoréval. A lebontási folyamat elősegítése érdekében a kezelés során keletkező csurgalékvizet a reaktor alján összegyűjtöttem, majd szivattyú segítségével visszaforgattam az iszap felületére. A reaktorból 0 – 10 – 20 – 30 – 40 napos tartózkodási idő után vettem ki mintát, melynek egy részét a komposztálás vizsgálatához használtam fel, másik részéből a sza-, szea-tartalmat, KOI-t és összes N-tartalmat határoztam meg.

2.3.3. Komposztálás kísérletének beállítása

Az aerob degradációs tesztben a lebontás feltételeit optimalizáltam, az iszapok szerkezetjavítása céljából szalmát adagoltam oly módon, hogy egységnyi szárazanyagnyi mennyiségű iszaphoz 1,5 egységnyi szárazanyag szalmát adtam.

2.4. Mérési módszer

2.4.1. Anaerob előkezelés módszertani kísérletének mérési módszere

A vizsgálat során termelődött biogáz mennyiségét Schlumberger „A1” típusú vizes gázórával mértem. A biogáz metántartalmának meghatározását Fisher & Rosemont BINOS 104 típusú precíziós gázelemző berendezéssel végeztem. A gázelemző infravörös spektroszkópia (IR) elvén határozza meg a gáz metántartalmát. A reaktorok által termelt biogáz mennyiségét és metántartalmát a vizsgálat első hetében minden nap, a következőkben két- és háromnaponta mértem.

2.4.2. Anaerob előkezelés kísérletének mérési módszere

A különböző mértékben anaerob úton előkezelt iszapok előállítása során is mértem a keletkező biogáz mennyiségét és metántartalmát a 2.4.1. pontban ismertetett módon, annak érdekében, hogy szerves anyag degradációban is meg tudjam adni az előkezelés mértékét.

2.4.3. Komposztálás kísérletének mérési módszere

A komposztálás vizsgálatát egy egyedileg fejlesztett berendezéssel végeztem. A berendezés segítségével a biológiai oxigénfogyasztás és szén-dioxid termelés pillanatnyi értékét lehet

meghatározni négy egyidejűleg párhuzamosan üzemeltetett reaktorban. A vizsgálandó mintákat egyenként 6 dm³ térfogatú rozsdamentes acél anyagú reaktorba tettem. A reaktorba kerülő anyag megtámasztását perforált lemez biztosítja. A reaktorok hőszigetelt szekrényben kerültek elhelyezésre, amelyek hőmérséklet-szabályzókkal voltak ellátva. A kísérlet során a reaktorok hőmérsékletét minimum 50°C-ra állítottam be.

A reaktorból távozó levegő mágnesszelepeken keresztül került a gázanalizáló műszerre (Fisher & Rosemont BINOS 104). Mértem a távozó gáz oxigén és szén-dioxid tartalmát, amely segítségével a levegőáram ismeretében a lebontás oxigénfogyasztását és szén-dioxid termelését meghatároztam. A kísérleti berendezést számítógép segítségével folyamatirányító és adatgyűjtő szoftver (Advantech Genie) vezérelte.

2.5. Számítási és adatértékelési módszerek

A metántermelést, a szerves anyag degradációt, a metanogén aktivitás értékét, a szerves anyag veszteséget szakirodalmi adatok és fizikai összefüggések segítségével számítottam ki (Lettinga and Hulshoff Pol, 1990; Alkoik et al., 2011). A komposztálás energia mérlegét kísérleti eredményeim felhasználásával, szakirodalmi módszerekkel határoztam meg (Haug, 1980; Finstein és Hogan, 1992). A komposztáló telep méretezését Haug (1986a,b,c) munkája alapján készítettem el. A statisztikai adatelemzéseket az SPSS 14.0 szoftver segítségével végeztem.

3. EREDMÉNYEK

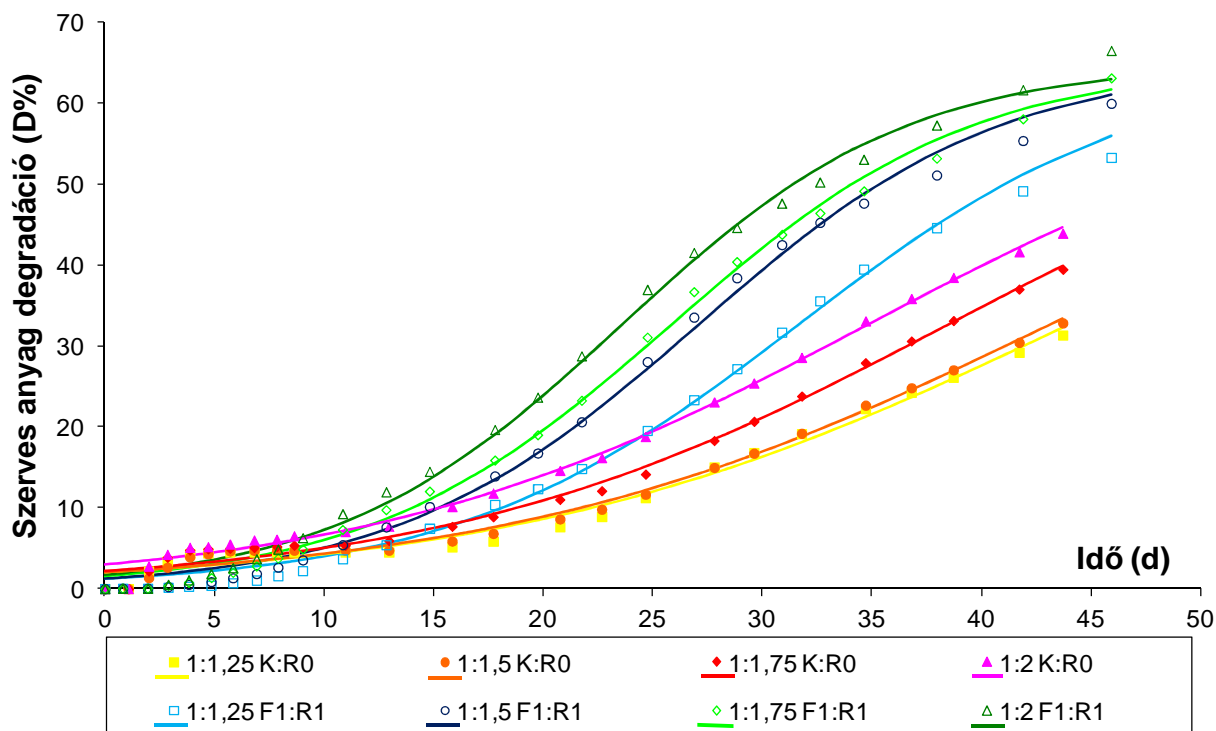
3.1. Anaerob előkezelés módszertani kísérletének eredményei

A fölősiszap (F1) és a kevert iszap (K) anaerob lebontását félszáras, szakaszos üzemű körülmények között vizsgáltam. A termelődött metán mennyiségéből és az iszapok kémhatásából megállapítottam, hogy 1:1 szubsztrát : oltóanyag arány alatt – szubsztrát minőségtől függetlenül – az anaerob lebontási folyamatok gátlásával kell számolnunk.

Az 1. ábra az F1 és K iszapok szerves anyag degradációját mutatja az idő függvényében. A lebontási folyamat sebességének jellemzésére az illesztett görbék iránytangenseként meghatároztam a kezdeti és az exponenciális szakaszt jellemző v_{5d} és v_{25d} értékeket. A reakciókinetikai paramétereket a 3. táblázatban foglaltam össze.

Az 1. ábrán láthatjuk, hogy a fölős iszap szervesanyag-tartalma a vizsgálat végéig 50-65%-ban degradálódott, míg a kevert iszap szervesanyag-tartalmának mintegy 30-40%-a bomlott le. Fölős iszap esetében majdnem kétszeres k reakciósebességi állandót mértem a kevert iszaphoz képest. A felezési időt leíró t_0 értéke az oltóanyag arány növelésével csökkent. Kevert iszap esetében 12-16

nappal is nagyobb lehet a t_0 értéke, mint ugyanolyan keverési arányú fölősiszap esetében. A pillanatnyi degradáció sebességének összehasonlítása során azt tapasztaltam, hogy az 5. és a 25. naphoz tartozó értékek kevert iszap esetében kisebbek, mint fölős iszapnál. Az oltóanyag mennyiség növelésével mindkét iszap esetében nőtt a degradáció sebessége. Kevert iszap esetében a pillanatnyi degradáció sebesség értékei folyamatos növekedést mutatnak az oltóanyag arány növelésével. F1 iszapnál az oltóanyag arány növelésével már kevésbé növekszik a v_{25d} értéke, tehát az oltóanyag arány növelés pozitív hatásának korlátai vannak.



1. ábra: Szerves anyag degradáció az idő függvényében

3. táblázat: Reakciókinetikai paraméterek különböző oltóanyag arányok esetében

Reaktorok	k ($1 \cdot d^{-1}$)	t_0 (d)	v_{5d} ($D\% \cdot d^{-1}$)	v_{25d} ($D\% \cdot d^{-1}$)	R^2
1:1,25 K:R0	0,079	43,9	0,214	0,780	0,985
1:1,5 K:R0	0,080	43,1	0,222	0,811	0,990
1:1,75 K:R0	0,087	38,4	0,273	1,033	0,992
1:2 K:R0	0,088	34,7	0,358	1,204	0,994
1:1,25 F1:R1	0,127	31,6	0,258	1,670	0,995
1:1,5 F1:R1	0,145	27,0	0,350	2,244	0,995
1:1,75 F1:R1	0,145	25,8	0,411	2,303	0,996
1:2 F1:R1	0,153	23,6	0,509	2,447	0,995

A fenti eredményekből láthatjuk, hogy azonos kezelési időtartam alatt a fölősiszap szervesanyag-tartalmát nagyobb részben tudjuk lebontani, mint a kevert iszapét. A lebontás sebessége az oltóanyag arány növelésével nő, azonban a növekedés nem egyenletes. Ez kérdésként veti fel, hogy

milyen mértékben célszerű visszaforgatni a már kirohasztott anyagot oltóanyag céljából. A magas oltóanyag arány ugyan a folyamat kiegyensúlyozottságát eredményezi, azonban a reaktor hasznos térfogatát csökkenti. A kérdés megválaszolása céljából kiszámítottam az egységnyi reaktortérfogatra eső metántermelést.

Megállapítottam, hogy különböző iszapok esetében, oltóanyag aránytól függetlenül közel azonos metántermelés érhető el egységnyi reaktortérfogatra vonatkozóan. A 45 napos kezelés végén szignifikáns különbségek nem mutathatók ki a kezelések között. A reakciókinetikai paraméterek alapján a legmagasabb CH_{4max} értéket kevertiszapnál és fölös iszapnál is az 1:1,25 K:R0 és F1:R1 szennyvíziszap keverékeknél kaptam. A reakciósebességi állandó értékeit nézve látható, hogy az oltóanyag arányok növelésével a k értéke fölös iszapnál kismértékben csökkent. A t_0 értéke a kevert iszapnál ugyancsak nagyobb, mint a fölösiszapnál. A metántermelés pillanatnyi sebességeit tekintve megállapítható, hogy sem az 5. napra, sem a 25. napra eső pillanatnyi metántermelés az oltóanyag arány növekedésével szignifikánsan nem nőtt.

Az egységnyi reaktortérfogatra vetített átlag metántermelés alapján megállapítottam, hogy kevert iszap esetében a tartózkodási idő 45 nap felett kell legyen, míg fölösiszapnál 35-40 nap közötti.

3.2. Anaerob előkezelés eredményei

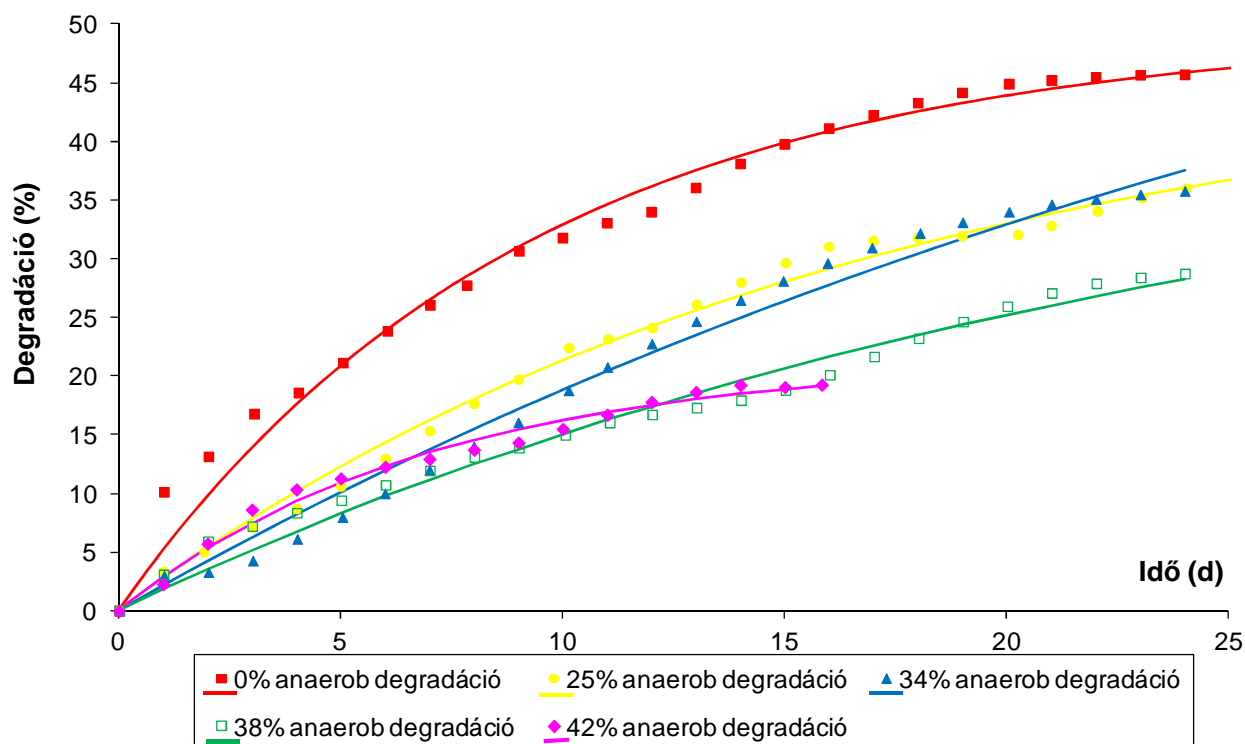
A vizsgálat során anaerob előkezeléssel különböző mértékben degradálódott szennyvíziszapokat állítottam elő az aerob degradálhatóság vizsgálatához. Az anaerob előkezelés vizsgálata során szubsztrátként az F2 jelű, oltóanyagként a R2 jelű szennyvíziszapot alkalmaztam 1:1,25 keverési arányban. A vizsgálat során mértem a termelődött biogáz mennyiségét és metán-tartalmát és az iszap kémhatását. A vizsgálat 56. napjáig a szennyvíziszap szervesanyag-tartalmának 44,5%-a bomlott le. Az első 20 nap a szerves anyag 76%-a degradálódott. A reaktorból 10 naponként vettem mintát, melyeket felhasználtam a komposztálás vizsgálatához. Az iszapmintákat nem a kezelés időtartamával, hanem az anaerob degradáció mértékével jellemeztem, melyet a 4. táblázat mutat.

4. táblázat: Anaerob degradáció mértéke az idő függvényében

Anaerob előkezelés ideje	Anaerob degradáció aránya
0 d	0%
10 d	25%
20 d	34%
30 d	38%
40 d	42%

3.3. Komposztálás kísérletének értékelése

Az anaerob előkezelés hatását a komposztálás folyamatára aerob degradációs tesztek segítségével vizsgáltam, melyet egy komposztálást modellező berendezés segítségével végeztem. Az összegzett oxigénfogyasztás értékéből határoztam meg a különböző mértékben anaerob úton kezelt iszapok aerob degradációját, melyet a 2. ábra mutat.



2. ábra: Különböző mértékben anaerob úton degradált iszapok aerob degradációjának mértéke

A 2. ábra alapján láthatjuk, hogy az anaerob előkezelés mértéke befolyásolja az aerob degradációt. Minél nagyobb az anaerob degradáció mértéke, annál nagyobb a negatív hatás az aerob degradációban. A kezeletlen szennyvíziszap aerob degradációja 46%-os volt, mely közel állt a szennyvíziszapok aerob degradálhatóságához (Haug, 1993). Összességében elmondható, hogy anaerob degradáció után még a szerves anyag lebontása aerob körülmények között tovább folytatható, és jelentős mértékű aerob degradáció érhető el. Az 5. táblázat eredményeiből láthatjuk, hogy 34%-os anaerob degradáció felett az aerob és anaerob degradáció összege nem növekszik jelentősen. Az anaerob előkezelés optimális mértékét így 34% körüli értékben határoztam meg.

5. táblázat: Anaerob előkezeléssel és komposztálással elérhető összes szerves anyag degradáció

Anaerob előkezelés mértéke	Anaerob úton előkezelt iszap aerob degradációja (T=25 d)	Anaerob és aerob degradáció összege
0%	46%	46%
25%	37%	62%
34%	32%	66%
38%	28%	66%
42%	19% (16 d)	61%

3.4. Anaerob és aerob degradáció összehasonlítása

Mérési eredményeim alapján megállapítottam, hogy minden esetben azonos tartózkodási idő esetén az aerob degradáció mértéke nagyobb, mint az anaerob degradációé. A kimutatott különbség részben azzal is magyarázható, hogy a félszáraz, szakaszos üzemű anaerob kezelés lassúbb, mint a folyékony, folyamatos üzemű kezelés.

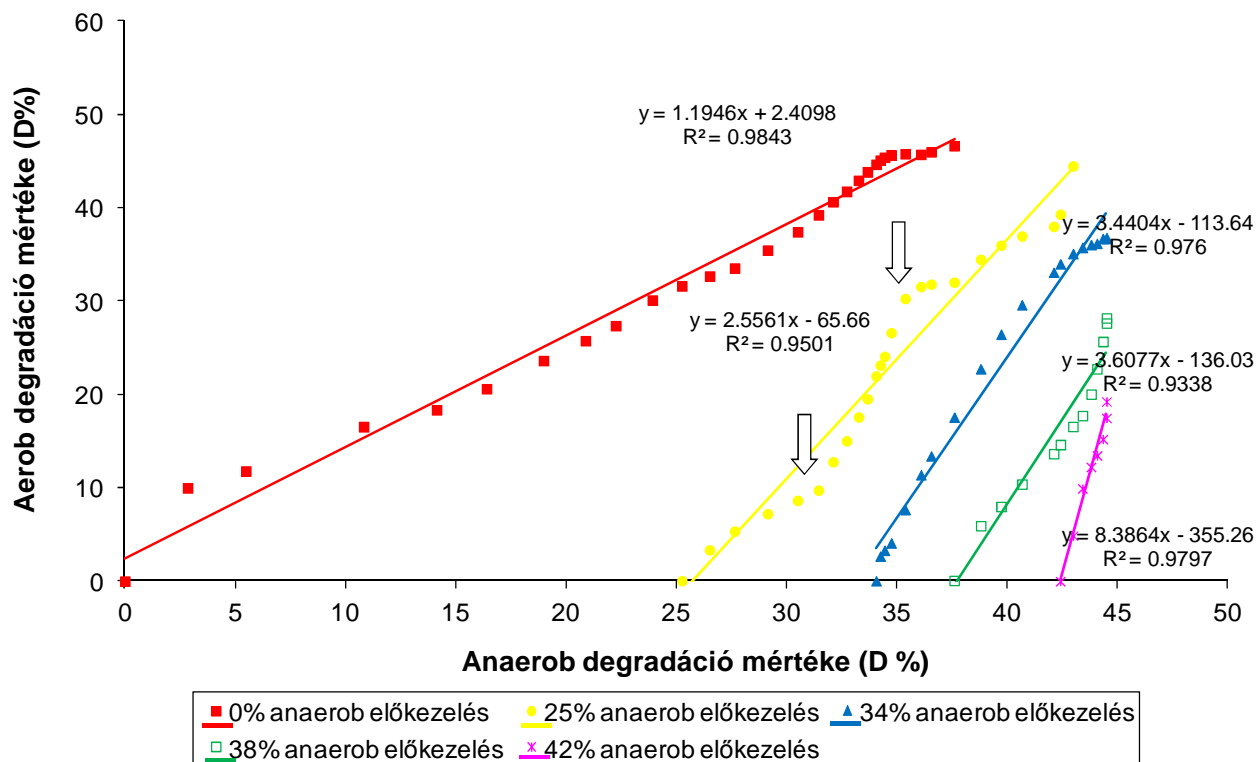
A 6. táblázat a reakciókinetikai paramétereket és a degradáció pillanatnyi sebességeit (v_{3d} , v_{20d}) mutatja.

6. táblázat: Regresszió analízis útján az elsőrendű reakciókinetikai egyenletben szereplő paraméterekre meghatározott értékek

Számított paraméterek	Aerob kezelés			Anaerob kezelés		
	0%	25%	38%	0%	25%	38%
	anaerob degradáció után			anaerob degradáció után		
D_{max}	49,41	47,57	45,27	37,92	14,60	8,618
k	0,110	0,060	0,040	0,115	0,094	0,077
v_{3d} (D%/d)	3,905	2,369	1,627	3,093	1,033	0,527
v_{20d} (D%/d)	0,608	0,864	0,812	0,440	0,211	0,143

A 6. táblázatból láthatjuk, hogy az idő függvényében a degradáció sebessége csökken, valamint az aerob degradáció sebessége a 3. és 20. napon lényegesen nagyobb, mint az anaerob degradációé. A degradáció pillanatnyi sebességeit összehasonlítva megállapítható, hogy a lebontás kezdeti szakaszában (3. nap) minél nagyobb az anaerob előkezelés mértéke annál inkább csökken az egységnyi idő alatt elérhető anaerob degradáció mértéke. Az aerob degradáció sebessége a 20. napon már jelentősen nem változik az anaerob előkezelés mértékének függvényében, azonban az anaerob degradáció sebessége tovább csökken. Ez a nehezebben bontható szerves anyagok (lignin és cellulóz) jobb aerob degradálhatóságával függ össze (Angelidaki és Ahring, 1999).

Az anaerob és aerob degradáció közötti kapcsolat értékelése érdekében vizsgáltam az anaerob degradáció függvényében az aerob degradáció értékeit ugyanazon kezelési időtartamok esetében, melyet a 3. ábra mutat. Trend egyenest illesztettem a mérési eredményekre azzal a céllal, hogy vizsgáljam az aerob és anaerob kezelés kapcsolatát és jellegét. Láthatjuk, hogy az anaerob kezelés mértékének növelésével változik a kapcsolat jellege az anaerob és aerob lebontás során. Ezt mutatja a pontokra illesztett trend egyenes is, melynek az iránytangense az előkezelés mértékével egyre nő, kezeletlen iszap esetében 1,19, míg 42%-ban anaerob úton előkezelt iszap esetében 8,39.



3. ábra: Különböző mértékben anaerob úton degradált iszapok aerob és anaerob utókezeléssel elérhető degradációjának kapcsolata

A fenti eredményekből arra következtethetünk, hogy bizonyos degradáció felett változik a kapcsolat jellege, mert az aerob degradáció hatékonyabb lesz, mint az anaerob degradáció, ezért egy bizonyos degradációs szint után célszerű a lebontást aerob úton folytatni.

3.5. Energiamérleg számítások

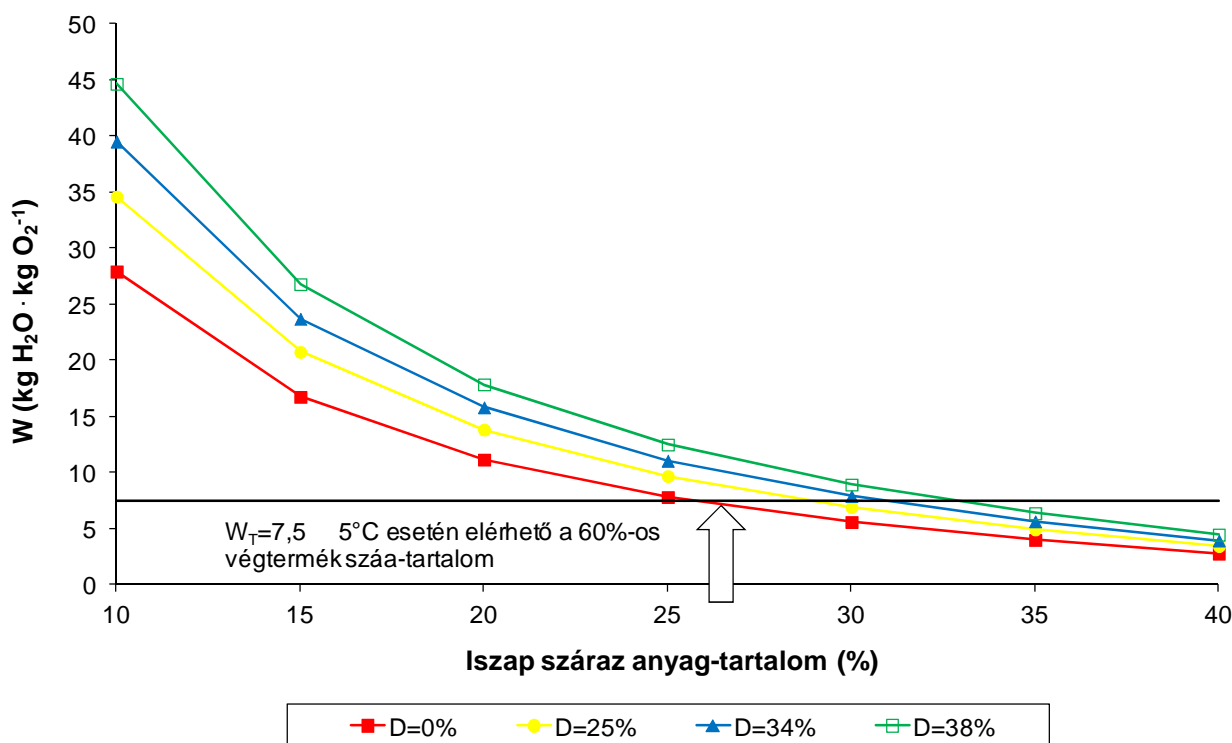
A komposztálás során felszabaduló energia mennyiségét Finstein és Hogan (1992) munkája alapján számítottam ki, melyet a 7. táblázat mutat. A táblázat eredményeiből láthatjuk, hogy az előkezelés mértékének növelésével az iszapokból felszabaduló energia mennyisége csökken.

7. táblázat: 25 napos komposztálás esetén a komposztálás során felszabaduló energia egységnyi iszap száraz anyagra vetítve különböző előkezelésű iszapok esetében

Anaerob előkezelés mértéke	Felszabaduló energia (kJ · kg szá ⁻¹) (T=25 d)
D = 0%	7 694
D = 25%	6 211
D = 34%	5 439
D = 38%	4 812

Annak érdekében, hogy választ kapjak arra, hogy szükséges-e a szerves anyag energetikai célú pótlása vagy kész komposzt visszaforgatása is elegendő a 60%-os szárazanyag-tartalmú végtermék eléréséhez, meghatároztam a W_t értéket és a komposztálás energiamérlegét.

A W_t értéke 5°C-os külső hőmérséklet esetén 7,5, míg 20°C-os külső hőmérsékletnél 7,8 lett. A különböző mértékben anaerob úton előkezelt iszapmintáknál különböző szárazanyag-tartalmak mellett meghatároztam a számított W értékét, mely az egységnyi biológiailag degradálható szerves anyag mennyiségre (BOI kg) vonatkoztatott víz mennyiségét adja meg. Az általam meghatározott W érték és a szárazanyag-tartalom kapcsolatát a 4. ábra mutatja.



4. ábra: Különböző mértékben anaerob úton előkezelt iszapok W értékei a szárazanyag-tartalom függvényében és az elméleti W_t érték

A 4. ábráról láthatjuk, hogy 25%-os szárazanyag-tartalomig egyik vizsgált iszapminta esetében sem érhető el a 60%-os végtermék szárazanyag-tartalom. Magasabb anaerob előkezelés (34% és 38%)

esetében még 30%-os szárazanyag-tartalom mellett sem áll rendelkezésre elegendő bontható szerves anyagból származó energia a megfelelő szárazanyag-tartalom eléréshez. Ugyanezen szárazanyag-tartalomnál a több bontható szerves anyagot tartalmazó, anaerob úton nem kezelt iszapnál már biztosítható a szerves anyag lebontása és a szárítás egyaránt. 35%-os szárazanyag-tartalmú iszapok esetében már minden vizsgált mintánál elérhető a szerves anyag degradáció és a 60%-os szárazanyag-tartalmú végtermék.

Meghatároztam a pillanatnyi energiamérleget, a sztöchiometriai oxigénigényből számolható energiatermelés és az energiaveszteségek különbségét. A pillanatnyi hőeltávolítás számítása során feltételezhető, hogy a hőveszteség időbeli változása arányos az oxigénfogyasztás időbeli alakulásával. A számítást különböző anaerob előkezelésű iszapok esetében végeztem el 55°C-os belső és 5°C-os és 20°C-os külső hőmérsékletekre. A számítással kapott értékeknél a pozitív energiamérleg azt jelenti, hogy biztosítható az 55°C-os hőmérséklet, míg a negatív energiamérlegnél nem. Az energiamérleg számítás alapján becsülhető pozitív energiamérlegek időtartamát jelző termofil szakasz hosszát a 8. táblázatban foglaltam össze. Az előkezelés mértékének és a külső hőmérsékletnek csak a 25% közeli szárazanyag-tartalom esetén van befolyásoló hatása. 20% induló szárazanyag-tartalomnál a szárítási cél elérése miatt jelentkező negatív energiamérleg miatt egyik esetben sem, míg 30% felett már mindegyiknél elérhető a termofil szakasz fenntartása a vizsgált időszakra.

8. táblázat: A termofil szakasz becsült hossza különböző mértékű előkezelések és külső hőmérsékletek esetén

Iszap szá- tartalma (%)	Termofil szakasz hossza napokban (55°C)							
	D=0%		D=25%		D=34%		D=38%	
	5°C	20°C	5°C	20°C	5°C	20°C	5°C	20°C
20%	0 d	0 d	0 d	0 d	0 d	0 d	0 d	0 d
25%	8 d	17 d	8 d	24 d	10 d	25 d	8 d	23 d
30%	21 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d
35%	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d	25 d

Az energiamérleg-számítást 20°C-os külső hőmérsékleten elvégezve azt tapasztaljuk, hogy a hőmérséklet növekedésével a termofil szakasz hossza is növekszik, mely a kisebb energiaveszteségekkel magyarázható. 30%-os iszap szárazanyag-tartalom felett már a különbségek nem mutathatók ki.

3.6. Komposztálás méretezése

Az anaerob előkezelés energiapótló adalékanyag-igényt befolyásoló hatásának értékeléséhez meghatároztam a különböző mértékben stabilizált iszapok energiapótlási célú adalékanyag igényét

és a keverék (iszapok + szalma) induló 40%-os szárazanyag-tartalom beállítását célzó (szerkezetjavítás) kész komposzt visszaforgatási igényét. A számításokat különböző iszap szaktartalmak (20 – 25 – 30 – 35 – 40%) és megcélzott termék (60%) szártartalom alapján végeztem.

A 9. táblázatban foglaltam össze a különböző mértékű anaerob előkezelésen átesett szennyvíziszapok komposztálása során egységnyi szá mennyiségű iszaphoz szükséges szalma és visszaforgatott komposzt mennyiségét. A szennyvíziszap és adalékanyag (Q_{m1}), a kész komposzt (Q_p), a visszaforgatott komposzt (q) hozamokat, valamint a hidraulikus tartózkodási időt (HRT) és kezelőtérfigatot (V) szintén a 9. táblázat tartalmazza. Láthatjuk, hogy minél nagyobb az anaerob degradáció mértéke, annál nagyobb mennyiségű szalma adagolása szükséges a bontható széntartalom pótlására. A visszaforgatott komposzt mennyisége az anaerob előkezelés mértékének és a szükséges szalma adalékanyag mennyiségének növekedésével csökken, mely a hidraulikus tartózkodási idő jelentős növekedését eredményezi. Ez azonban csak a komposztáló telep üzemrendjét befolyásolja. A telep térfogat és területigénye az energiapótló adalékanyag mennyiségétől függ, amely a szennyvíziszap anaerob előkezelésének mértékével növekedést mutat.

9. táblázat: Különböző mértékben előstabilizált iszapok energiapótló adalékanyag és kész komposzt visszaforgatási igénye egységnyi (sza) kezelt iszapra vetítve

Anaerob előkezelés mértéke	Iszap szártartalma (%)	Energiapótló szalmaadalék aránya (sza)	Visszaforgatott komposzt aránya (sza)	Q_{m1} ($m^3 \cdot d^{-1}$)	q ($m^3 \cdot d^{-1}$)	Q_p ($m^3 \cdot d^{-1}$)	Hidraulikus tartózkodási idő (d)	Komposztálás térfogatigénye V (m^3)
D=0%	20	0.98	1.53	6.6	5.1	4.9	42	345
	25	0.17	1.54	3.9	5.1	2.7	34	199
	30	0.00	1.00	3.3	3.3	2.3	38	168
	35	0.00	0.43	3.3	1.4	2.3	48	168
	40	0.00	0.00	3.3	0.0	2.3	60	168
D=25%	20	1.30	1.05	7.7	3.5	6.0	48	410
	25	0.49	1.06	5.0	3.5	3.8	43	265
	30	0.00	1.00	3.3	3.3	2.5	38	175
	35	0.00	0.43	3.3	1.4	2.5	48	175
	40	0.00	0.00	3.3	0.0	2.5	60	175
D=34%	20	1.47	0.80	8.2	2.7	6.6	51	444
	25	0.66	0.80	5.5	2.7	4.4	47	299
	30	0.13	0.80	3.8	2.7	3.0	43	202
	35	0.00	0.43	3.3	1.4	2.6	48	179
	40	0.00	0.00	3.3	0.0	2.6	60	179
D=38%	20	1.61	0.59	8.7	2.0	7.0	53	472
	25	0.80	0.60	6.0	2.0	4.9	51	327
	30	0.27	0.60	4.2	2.0	3.4	48	230
	35	0.00	0.43	3.3	1.4	2.7	49	181
	40	0.00	0.00	3.3	0.0	2.7	60	181

3.7. Új tudományos eredmények

A doktori munkám során elért új tudományos eredményeket 3 tézispontban fogalmaztam meg az alábbiak szerint:

- Kísérleti eredményeimmel bizonyítottam, hogy a szennyvíziszap kezelhető félszáraz, szakaszos üzemű anaerob kezeléssel. Az optimális oltóanyag arány értéke a szubsztrát minőség függvényében változik: fölös iszap esetében 1:1,25, kevert iszapnál 1:1,75 – 1:2 közötti értékre tehető a szerves anyag degradáció és az egységnyi reaktortérfogatra vetített metántermelés figyelembe vételével. A szennyvíziszap félszáraz, szakaszos üzemű kezelésének időtartama – szubsztrát minőség függvényében – 35-45 nap.
- Kísérleti eredményeim alapján igazoltam, hogy az anaerob előkezelés alapvetően meghatározza az aerob degradálhatóságot, az aerob degradáció értéke 46%-ról 26%-ra csökkent az anaerob előkezeléssel optimalizált körülmények között. Az anaerob előkezelés során elért stabilizáció mértékétől függően növekszik az aerob degradálhatóság az anaerobhoz képest. Az azonos mértékig stabilizált alapanyagra meghatározott további aerob és anaerob degradáció közötti kapcsolat változik az alapanyag degradáltságának függvényében. Az aerob/anaerob kezelés hatékonyságának viszonyszáma a kezeletlen anyagnál mért 1,19-ről az előkezelés növelésével (42,4%) 8,39-re növekedett.
- A komposztálás pillanatnyi energiamérlegének számításával megállapítottam, hogy 25%-os szárazanyag-tartalom alatt egyik iszapminta esetében sem érhető el a 60% szárazanyag-tartalmú végtermék. Számításaimmal igazoltam, hogy anaerob előkezelés nélkül csak 25% szárazanyag-tartalom felett érhetünk el a komposztprizmában tartósan 55°C-os hőmérsékletet, míg 38%-os anaerob előkezelés esetén már 30%-os szárazanyag-tartalom szükséges. Az anaerob előkezelés növelésével csökken az 55°C-ot biztosító tartózkodási idő. A hőmérséklet csökkenésének az energiamérlegre történő jelentős hatását a számításaim nem bizonyították. Az anaerob előkezelés mértéke befolyásolja az energiapótló adalékanyag mennyiségét. Az energiapótlás céljából alkalmazott szalma mennyisége 1,6-szoros növekedést eredményezhet az anaerob előkezeléssel (D=38%, 20%-os iszap szá-tartalom, 60%-os végtermék szá-tartalom esetén) az anaerob úton kezeletlen iszaphoz viszonyítva.

4. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A félszáraz, szakaszos üzemű anaerob kezelés vizsgálati eredményeit összehasonlítottam a folyékony, folyamatos üzemű iszaprohasztó adataival. Megállapítottam, hogy félszáraz, szakaszos üzemű anaerob kezelés esetén azonos idő alatt fele olyan mértékű szerves anyag degradáció érhető el, mint folyékony, folyamatos üzemű kezelés esetén. A magas szárazanyag-tartalom miatt azonban a félszáraz, szakaszos üzemű technológia gazdaságos lehet kis- és közepes kapacitású szennyvíztisztító telepek szennyvíziszapjának kezelése esetén.

Amennyiben a szennyvíziszap rothasztást komposztálás követi, úgy lemondhatunk az iszaptól nyerhető magasabb biogáz-termelésről, és azt elegendő kevésbé kirothasztani (a számításaim szerint 60% helyett 34%). A fennmaradó rothasztó kapacitás a szennyvíziszap más biológiailag lebomló hulladékokkal történő társított rothasztására fordítható, így a kieső gáztermelés kompenzálható.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Alkoiik F. N., Khalil A. I. and Alqumajan T. (2011): Performance Evaluaiton of a Static Composting System Using Date Palm Residues. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 7 (6) 972-983. p.
2. Angelidaki I. and Ahring B. K. (1999): Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. *Water Science and Technology*, 41 (3) 189-194 p.
3. Baki Cs., Horvát A., Kárpáti Á., Kosár G., Kovácsné Benkó Zs. és Mészáros I. (2013): A komposztálás kérdései gyártó és felhasználó oldaláról. *MASZESZ Hírcsatorna* 2013. január-február. 10-17. pp.
4. Biotechnion (1996): Wageningen Agricultural University, Department of Environmental Biotechnology, The Netherlands
5. Brummeler ten, E., Horbach, H. C. J. M., Koster, I. W. (1991): Dry anaerobic batch digestion of the organic fraction of municipal solid-waste, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 50 (2) 191-209. p.
6. Brummeler ten, E., Aarnink M. M. J., Koster I. W. (1992): Dry anaerobic-digestion of solid organic waste in a BIOCEL reaktor at pilot-plant scale, *Water Science and Technology*, 25 (7) 301-310. p.
7. Epstein E. (1997): The science of composting, Technomic Publishing CompanyInc., Lancaster, Pennsylvania, USA. 487. p.
8. Finstein, M. S. and Hogan, J. A. (1992): Integration of composting process microbiology, facility structure and decision making. In: Hoitlink, H. A. J. and Keener, H. M. (eds.), Science and Engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects. Ohio Agricultural Research and Development Center
9. Haug, R. T. (1980): Compost Engineering. Principles and Practice, Ann Arbor Science Publishers, Michigan, 655. p.
10. Haug R. T. (1986a): Composting process design criteria Part I. – Feed coditioning. *BioCycle Journal of Waste Recycling*, 27. 38-43. p.
11. Haug R. T. (1986b): Composting process design criteria Part II. – Detention time. *BioCycle Journal of Waste Recycling*, 28. 36-39. p.
12. Haug R. T. (1986c) Composting process design criteria Part III. – Aeration. *BioCycle Journal of Waste Recycling*, 29. 53-57. p.
13. Juhász E. (2002): Útmutató a települési szennyvíziszap telepi előkezeléséhez, Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium Környezeti Elemek Védelmének Főosztálya, Budapest
14. Juhász E. (2011): A szennyvíztisztítás története, Magyar Víziközmű Szövetség, Budapest, 184. p.
15. Lettinga G. and Hulshoff Pol L. W. (1990): Basic aspects of anaerobic wastewater treatment technology. in: Anaerobic reactor technology, International Course on Anaerobic Waste Water Treatment, Wageningen Agricultural University

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

FOLYÓIRATCIKKEK

Idegen nyelvű:

RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SZÁNTÓ G., SIMON M., FÜLEKY GY. (2012) : Process performance of dry, batch anaerobic digestion of sewage sludge: methanogenic seed mixtures, *Water Science and Technology*, 66 (2) 445-450 p. – (IF: 1,122)

KOVÁCS D., RÓZSÁNÉ SZŰCS B., FÜLEKY GY. (2008): Determination of the maturity of composts based on oxygen consumption, carbon-dioxide production and a self-heating test, editor: Dr. Mézes M., in.: *Bulletin of the Szent István University*, Gödöllő, ISSN 1586-4502, 100-113. p.

Magyar nyelvű:

KOVÁCS D., RÓZSÁNÉ SZŰCS B., FÜLEKY GY. (2007): Komposzt érettségének meghatározása oxigénfogyasztás, szén-dioxid termelés mérésével és önhevülési teszttel. *Agrokémia és Talajtan*, 56 (2) ISSN 0002-1873, 301-316. p.

RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M., FÜLEKY GY. (2007): Szennyvíziszap anaerob előkezelésének hatása az aerob degradálhatóságra. *Biohulladék*, 2 (2) 21-24. p.

KÖNYV, JEGYZET

Idegen nyelvű:

RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M., FÜLEKY GY. (2011): Effect of Anaerobic Pretreatment by Dry Batch Technology on Aerobic Degradability of Sewage Sludge, In: Daniel J. Caruana and Amanda E. Olsen (editors): *Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications*, ISBN: 978-1-61324-420-3, NOVA Science Publishers, USA, 49-75. p.
https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=20446

RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M., FÜLEKY GY. (2012): Co-Digestion of Organic Waste and Sewage Sludge by Dry Batch Anaerobic Treatment, In: Sunil Kumar and Ajay Bharti (editors): *Management of Organic Waste*, ISBN 978-953-307-925-7, InTech, 97- 112. p.
<http://www.intechopen.com/books/management-of-organic-waste>

KONFERENCIA KIADVÁNYOK

Idegen nyelvű:

SZŰCS B., SIMON M., FÜLEKY GY. (2006): Anaerobic pre-treatment effects on the aerobic degradability of waste water sludge, *Proceedings of International Conference ORBIT 2006*, Eckhard Kraft (Hrsg.), Verlag ORBIT e.V., Weimar, ISBN 3-935974-09-4, Part 2. *Proceedings* 425-434. p.

Magyar nyelvű:

SZŰCS B. (2004): Metanogén aktivitásteszt módszerének fejlesztése. *Kutatások az Eötvös József Főiskolán* 4. Baja, ISSN 1586-9873, 162-172. p.

SIMON M., SZŰCS B. (2004): Szennyvíziszap aerob és anaerob stabilizálásának optimalizálására irányuló kísérletek. *Kutatások az Eötvös József Főiskolán* 4. Baja, ISSN 1586-9873, 195-207. p.

- SZŰCS B.** (2005): Aerob és anaerob szennyvíziszap-kezelés vizsgálatának eddigi eredményei. Kutatások az Eötvös József Főiskolán 5., Baja, ISSN 1586-9873, 237-245. p.
- SZŰCS B., SIMON M.** (2006): Anaerob kezelés hatása a szennyvíziszapok komposztálására. Előadás. ÖKO-AQUA 2006. II. Nemzetközi Víziközmű Konferencia és Szakkiállítás, Debrecen, 2006. június 14-16. [CD:]
- SZŰCS B., SIMON M.** (2006): Szennyvíziszap száraz, szakaszos üzemű anaerob kezelésének vizsgálata. Előadás. Magyar Hidrológiai Társaság XXIV. Országos Vándorgyűlés, Pécs, 2006. július 5-6. ISBN 978-963-8172-23-5 [CD:]
- RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M.** (2006): Komposzt minősítése oxigénfogyasztás mérésével. Kutatások az Eötvös József Főiskolán 6., Baja, ISBN 978-963-7290-46-6, 245-254. p.
- RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M.** (2009): Települési szerves hulladék és szennyvíziszap együttes száraz anaerob kezelési lehetőségének vizsgálata, Magyar Hidrológiai Társaság XXVII. Országos Vándorgyűlése. Baja, 2009. július 1-3., ISBN:978-963-8172-23-5, [CD:]
- RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M.** (2009): Bontható szervesanyag-tartalom változásának hatása a komposztálás folyamatára. Erdei Ferenc V. Tudományos Konferencia, Kecskemét, 2009. szeptember 3-4. Konferencia kiadvány 1. kötet, ISBN 978-963-7294-74-7, 452- 456. p.
- RÓZSÁNÉ SZŰCS B., SIMON M.** (2010): Rothasztott szennyvíziszap komposztálásának méretezése kísérleti eredmények alapján, Kutatások az Eötvös József Főiskolán 9., ISSN 1586-9873, Baja, 245-253. p.