LAKOSSÁGI SZENNYVÍZISZAPOK ÉS ROTHASZTÁSUK TAPASZTALATAI I.

A ROTHASZTÁS HAZAI NAGYKÖNYVÉNEK TANULSÁGAI

DR. KÁRPÁTI ÁRPÁD PHD.
EGYETEMI DOCENS, PANNON EGYETEM

Kulcsszavak: *szennyvíziszap kezelés, anaerob rothasztás, segédanyagok, ko-rothasztás, keverés, gázkihozatal*

BEVEZETŐ

A lakossági szennyvíztisztítás a szennyvizeinkbe kerülő hulladékaink veszélytelenné tételének a várhatóan hosszú távon is leggazdaságosabb módja. A veszélytelenné tétele azt jelenti, hogy egyrészt az emberre, s a hozzá közeli magasabb rendű szervezetekre (ivóvíz, fertőzések, betegségek), másrészt a vízi világra (élővizek növény és állatvilága) kell azt veszélytelenné tenni. Szennyező anyagait ehhez bizonyos mértékig el kell távolítani (mineralizálás széndioxiddá, partikuláris foszfáttá és nitrogénné), maradékait stabilizálni, tömegében és térfogatában minimális mennyiségűre és minimális fertőző hatásúra kell csökkenteni. Ez utóbbi döntően a komposztálásnál és a talajban stabilizálódik tovább, miközben ott is részben hasznosul. Szerves anyagainak egy része gyorsabban (hidrolízis, metanizáció, biológiai hasznosítás), más része sokkal lassabban (humifikáció, majd igen lassú növényi újrafelhasználás) hasznosul. Azokból a növényi, állati termékekből, melyek tíz-száz millió évekkel ezelőtt anaerob környezetben stabilizálódtak, döntően későbbi geotermikus hatásra keletkeztek mai fosszilis energiakészleteink (metán, olaj, szén).

Manapság ilyen hosszú természetes tisztulás, átalakulás kivárására az emberiségnek nincs ideje. Ugyanakkor az általa termelt hulladékok, szennyező anyagok (szerves C, N, P), energia és növényi tápanyag tartalmának a valamilyen módon történő maximális hasznosíthatóvá tétele is elengedhetetlen feladata. Igaz ez a szennyvizekbe kerülő ilyen anyagokra is, melyek eltávolítása a vízből, majd maximális újrahasznosítása meglehetősen speciális, soklépcsős feladat. Első ebből a hagyományos aerob (eleveniszapos) szennyvíztisztítás, második a keletkező iszapmaradék bontható részének az anaerob elgázosítása (biometanizáció), harmadik pedig a rothasztott iszap komposztálása növényi tápanyaggá. Sajátos problémája ezeknek a lépcsőknek, hogy

optimális kivitelezésükhöz szerves szennyezőanyagaiknak a 4-5:1, 15-20:1, illetőleg 30-35:1 C:N aránya lenne optimális, miközben a szén mennyiségét folyamatosan csökkentjük ezekben a lépcsőkben, előrehaladva. Szerencsére az eleveniszapos tisztításnál redukált nitrogén (ammónium és szerves-N) eltávolításra is sor kerül. Ezzel a maradékának a C:N aránya úgy 10:1 körüli értékre áll be. Láthatóan ez már sem a rothasztásnak, sem a komposztálásnak nem optimális (Fazekas és társai, 2014; Kárpáti, 2016).

Az anaerob szennyvíziszap rothasztás a lassú átalakulás, s egyebek között a keletkező ammónium, pontosabban a vele egyensúlyban levő ammónia toxikus hatása miatt (a sejtmembránok a sejtbe jutva mérgező) csak kis térfogati terheléssel (keletkező sav és lúgosság folyamatos egyensúlya) vitelezhető így ki, míg a komposztálásnál részben a nagyobb hőmérséklet miatt felszabaduló ammónia ugyanilyen toxicitása, szaghatása, no és vele a komposztálás nitrogén tápanyag-vesztesége miatt van gond. Biológiailag jól bontható szerves szén bevitelére (nitrogéntartalom nélkül) tehát mindegyik lépcsőnél szükség lenne. A gyakorlatban erre csak az iszaprothasztásnál és a komposztálásnál van lehetőség. A rothasztásnál a nitrogén-vegyületek bevitele még azért megengedhetőbb, mert azok ammóniumként a vízfázisba kerülve az iszapvíz későbbi nitrogénmentesítésével eltávolíthatók. Persze ez egyidejűleg a főági szennyvíztisztítás jelentős zavarását is jelenti. Ugyanakkor a rothasztás a fehérjékből jelentős metántermelést, energiát is eredményez.

A komposztálásnál nincs ammónium visszaforgatás, ezért kell az említett nagy segédtápanyag igény, miközben energia metánként nem keletkezik (döntően aerob a komposztálás), az alapanyagok egy részének az oxikus égetése történik. Az egyetlen haszna itt a segédtápanyagnak (növényi szalma, faanyag) a szagmentesítés, fokozott szárítást biztosító energiaforrás bevitele, a redukált nitrogén humuszba építése, komposztta alakítása s a komposztnak a jelentős mértékű szárítása.

Nagyon érdekes, hogy a biológiai átalakítások időigénye a három különböző lépcsőnél közel azonos. Persze csak akkor, ha a szennyvíztisztításnál a szerves anyag immobilizálása (részleges oxidációval lebegő formává alakítása) mellett a nitrogén és foszfor kellő mértékű eltávolítását is biztosítani akarjuk. Az iszapkor igény mintegy 15-20 nap (15 °C körüli szennyvíz hőmérsékleten). Ekkor a tisztítóba érkező szerves anyagból mintegy 0,6-0,9 kg szárazanyag (sza.)/kg BOI_5 fajlagos iszaphozammal keletkezik melléktermék (fölösiszap). Ennek az 5-5-6,5 %-a nitrogén, tehát az iszap mintegy 35-40 % fehérjét tartalmaz. Pontosabban ennek ugyan döntő része tényleg fehérje (citoplazma fehérje), de kis hányadban az extracelluláris polimer anyaga (EPS - kapszula) is tartalmaz fehérjét, illetőleg nitrogént. Az anaerob rothasztásnál is közelítőleg ilyen iszapkorra van szükség a szerves anyag mintegy felének a széndioxiddá és metánná alakításához. Ez azonban megfelelően elővíztelenített (3-6 % sza. tartalmú) iszappal és 35-37 °C körüli vízhőmérsékleten kellő sebességű, és gazdaságos. A fölösiszap szerves anyagának mintegy a fele ekkor biogázzá (CH_4 és CO_2 keverékévé) alakul. Azonban míg ott a nitrifikálók lassú szaporodása, s a kellő nitrifikáció miatt van erre döntően szükség, a biogáz előállításnál az egymást követő, de egy térben lejátszódó átalakítások között a hidrolízis és a metanizáció is nagyon időigényes.

A komposztálás döntő részéhez, tehát a szerves anyagok lebomlásához is elegendő a 20 napos tartózkodási idő, melyből pár nap a felmelegedés, a többi pedig az aerob bontás, melegen tartás (fertőtlenítés) időigénye. Az utóbbi hőmérséklet tartománya 60-65 °C körüli. Ugyanakkor a humifikálódás meghatározó része ezt követően mérsékeltebb hőmérsékleten és jóval hosszabb idő alatt megy végbe. Itt a szerves anyag elbomlásának mértékéről nehéz beszélni, mert rendszerint cellulóz, faanyag hozzáadását követően történik az oxidáció. Irodalmi adatok szerint az iszaprész szerves anyagának a fele kerül itt is elbontásra (döntően széndioxiddá), míg kis része beépül a cellulóz és lignin segítségével kialakuló humuszba.

Gyakorlatilag a szennyvíz eredeti energiatartalma az eleveniszapos tisztítással a felére csökken. A maradék fél résznek azután ismét a fele nyerhető ki a rothasztás metántermékében. A komposztálásnál ezután a rothasztott iszap maradék szerves anyagának (energia) ismét fele megy veszendőbe az oxidációval (Fazekas és társai, 2014; Kárpáti, 2016). Pontosan kevesebb, mint fele, mert a hővé alakuló energia végül is a komposzt szárítása révén részben hasznosul. Hogy a fenti folyamatok

során a nyers szennyvíz egyes szerves anyag féleségei hogyan bomlanak tovább, hasznosulnak, fontos kérdés, de ehelyütt csak az anaerob iszaprothasztás kérdései a kiemeltek.

A lakossági, vagy vegyes települési szennyvizek szennyezőanyagai közül a szerves anyagok (közülük a döntő komponenseiknek, a zsíroknak, fehérjéknek, s különböző szénhidrátoknak a szilárd – partikuláris –, valamint oldott részei is) tovább hasznosítható energiát hordoznak. Ennek az energiának a lehetséges maximális kinyerése már napjainknak is, de a jövőnek feltétlenül fontos feladata lesz. Lényeg a teljes folyamat gazdaságossága, ami részben beruházási, részben üzemeltetési költség, utóbbiban az elengedhetetlenül szükséges energiaráfordítással. Nem szabad természetesen figyelmen kívül hagyni a tisztításnál keletkező iszapok további feldolgozásának, hasznosításának, vagy akár csak tartós tárolásának a költségigényét sem, ami napjainkban már közel azonos a szennyvíz megtisztításának, szennyezői kivonásának a költségével. A rothadó képes növényi termékek, maradványok szennyvíziszapoktól független biometanizálása ma már egyébként kiterjedt gyakorlat. Ez a mezőgazdasági melléktermékekre, hulladékokra épülő biogáz gyártás.

A lakossági szennyvíziszapok együtt rothasztásának a segédtápanyagai azonban szűkebb körből kerülnek csak ki. Ilyenek lehetnek a lakossági fogyasztás körében keletkező élelmiszer maradékok, a közcsatorna előtt kiépített zsírfogók szippantott uszadéka, vagy iszapja, valamint különböző lakossági vagy

állati élelmiszer termelés gyártási hulladékai, maradványai (közöttük a megromlott, lejárt szavatosságú visszáru). Az utóbbiak között legfontosabbak talán az ATEV iparág ma már újrahasznosításra elég korlátozottan engedélyezett, 140 °C hőmérsékleten fertőtlenített zsír-fehérje főzete, az élelmiszergyártás hasonló összetételű, többnyire ugyancsak főzéssel tartósított termelési hulladéka, valamint az italgyártás legkülönbözőbb növényi maradékai. A lakossági szennyvíziszap rothasztókba nyers növényi anyagot azért nem célszerű bevinni, mert a rothasztásukkor jelentős hányaduk nem bomlik le metánná, viszont részlegesen humifikálódik. Az így oldott formában az iszapvízbe kerülő stabil humin-, és fulvosavak a tisztítás főágán jelentenének azután problémát a lakossági szennyvíztisztításban.

A lakossági szennyvíziszap szeparált, vagy megfelelő szerves anyagokkal együtt történő rothasztását követően ugyanakkor az iszapvíz polielektrolitokkal jól flokkulálható, lebegőanyag, illetőleg szerves anyag mentesíthető, s a tisztítás főágára különösebb veszély nélkül visszaforgatható. Egyetlen problémája, hogy a főág nitrogénterhelését mintegy 15 %-al növeli, amely a mai szennyvíztisztításnál elég kritikus a biológiára kerülő előülepített víz egyébként is kis KOI:TKN aránya miatt.

A SZENNYVÍZTISZTÍTÁS ENERGIAIGÉNYE, ENERGIA POTENCIÁLJA

A lakossági szennyvizek tisztításának energiaigénye a levegőztetés és a többi műveletek energiaigényéből tevődik össze. Az eleveniszapos tisztításnál régen a levegőztetés akár a felét-háromnegyedét is kitehette. A többi műveletek energiaigényének növekedésével részaránya mára valamivel a fele alá csökkent. A szennyvíztisztítás fajlagos energiaigényét általánosan a tisztított szennyvíz térfogatára adják meg, ugyanakkor a levegőztetés fajlagos energiaigénye a víz szennyezettségétől függ. Ebből is adódnak az esetenként jelentős eltérések ilyen tekintetben. Egyértelmű viszont, hogy ez a fajlagos az üzemméret növekedésével jelentősen csökken.

Igen széles körű felmérés alapján talán McCarty és munkatársai (2011) átlagos adatsorai jellemzőek leginkább a lakossági szennyvíztisztítások átlagos fajlagos energiaigényére. Felmérésük alapján az ilyen szennyvíztisztítás, növényi tápanyag (N és P) eltávolítást biztosító eleveniszapos, anaerob iszaprothasztóval is rendelkező rendszernél 0,6 kWh/m^3 átlagos fajlagos energiafelhasználást jelent, aminek a fele a levegőbevitel energiaigénye. Az USA szennyvizei egyébként a hazai szennyvizeinknél hígabbak. Ezek az adatok jól egyeznek a MAVÍZ hazai felmérésének a nagyobb tisztítóknál mért adataival. Számszerűsítve a levegőztetés energiaigénye a 50-100 ezer LE-nél nagyobb kapacitású szennyvíztisztítókban mintegy 0,4 kWh/m^3 tisztított szennyvíz fajlagos körül van.

Foley és társai (2010) átlagos lakossági szennyvíz, anaerob/anoxikus/aerob kiépítéssel (elődenitrifikálással, négyszeres belső recirkulációval és 0,7-szeres iszap recirkulációval, 3,5 g/l iszapkoncentrációval és 15 napos iszapkorral történő tisztítását vizsgálták. Az előülepített és szekunder iszap is elősűrítésre került, melyet mezofil iszaprothasztás követett 22 napos HRT-vel. Vizsgálataiknál a teljes energiaigény 49 %-a a levegőztetésre, 29 %-a az iszap és iszapos víz recirkulációjára, 9 %-a a víztelenítésre került felhasználásra. A metánból előállítható villamos energia a teljes igény 21 %-át biztosította. Foley és társai (2010) mechanisztikus modellje mellett a messze összetettebb Biowin Modellel történő szimuláció is igen hasonló értékeket adott. A rothasztás iszapmaradékából csak igen kis hányadot jelentő (7 %) energia visszanyerésre adódik felmérésük szerint ilyen megoldásnál lehetőség.

A primer és szekunder iszapok anaerob rothasztásnál keletkező biogáz a tisztítás teljes energiaigényének hazánkban a negyedét-felét tudja biztosítani. Ebben az is benne van, hogy a gázmotorokkal villamos energiaként a biogáz energiájának csak a 35-45 % a nyerhető ki. A többi döntően hőenergiaként kerül valamiképpen újrafelhasználásra, vagy jut veszendőbe. Lakossági szennyvíztisztítóknál a technológia megoldásokkal, energiatermelésre történő maximálással ugyanakkor a teljes szennyvíztisztítás lehet akár energiatermelő folyamat is (Logan, 2004). Hazánkban két budapesti szennyvíztisztító gyakorlata is jó példa erre. A lakossági szennyvízből történő energianyerést napjainkban fokozott

érdeklődés, kutatások követik (Batstone et al., 2015). Ugyanez igaz a szennyvíztisztítás iszapjának a maximális hasznosítására, segédanyagokkal történő együttrothasztására is (Batstone és Virdis, 2014; Astals et al., 2014; Koch et al., 2015; Koch et al,. 2016; Kim et al., 2017; Xie et al., 2017).

Ezt az energianyerést lehet fokozni egy lakossági tisztító rothasztójánál külső energiahordozó biometanizációra történő hasznosításával. A kérdés ilyenkor a segédtápanyag tisztasága, anyagi minősége, bedolgozhatósága, no meg az, hogy a lakossági iszaprothasztó rendelkezik-e szabad kapacitással, netán a bedolgozáshoz szükséges segédberendezésekkel. A lakossági iszaprothasztók már korábban is rendszerint túlméretezettek voltak, a tisztítás bővítését célszerűen figyelembe vették. Helyenként azonban éppen terheléscsökkenés következett be. Ez fennáll számos hazai nagyobb város szennyvíztisztítójában, ahol szabad kapacitás jelentkezik. Olyan városoknál, ahol nem volt, vagy nem szűnt meg jelentős élelmiszer feldolgozó ipar, ez nem jellemző. A térségi tisztítás fokozásával (centralizált szennyvíztisztítás), meg a környező térségek kisebb szennyvíztisztítói iszapjának az anaerob rothasztásra történő fokozott beszállításával, feldolgozásával sok helyütt a lakossági terhelés csökkenését kompenzálták.

A naponta lakosonként szennyvízbe juttatott 40-80 g BOI_5, ami mintegy 60-120 g KOI 14,7 kJ/g KOI egyenértékkel számolva csak közelítőleg adja meg a szennyvíz szerves anyagaiból visszanyerhető energiát, mert a KOI egy része nem bomlik a rothasztásnál. Ezen túl a gázmotor már említett hatásfoka is nagy problémája az energiaátalakításnak. A szennyvíziszap ugyanakkor nem csak energia, de növényi tápanyagforrás is. Az iszaprothasztás 1 kg metán/4 kg KOI, illetőleg 50,4 MJ/kg metán fűtőértékkel és 35 %-os energetikai hatásfokkal 1,8 kWh/kg metanizált szerves anyag (VSS) energiatermelést tud biztosítani (Khandan et al., 2014). Összegezve a fentieket a szennyvízben az energia három formában jelenik meg (Goude, 2016):

szerves szennyezőanyagok energiája ~1,79 kWh/ m^3

növényi tápanyagok – N- és P-energiája ~ 0,7 kWh/ m^3

hőenergia ~ 7 kWh/ m^3

Napjainkban a szennyvíztisztítás főágán nem történik energia visszanyerés a szerves anyagokból, azoknak csak az immobilizálása, szilárd, szeparálható formájúvá történő alakítása történik meg. Ez igaz, az ultraszűréssel kombinált eleveniszapos és hibrid megoldásokra is. Az iszapként szeparált szerves anyagok energiahordozó metánná történő átalakítása mellékágon a rothasztással történik. Innen a szerves anyagból kiszabaduló ammónium visszakerül a tisztítás főágára, hogy ott inertizálva veszendőbe menjen. Láthatóan a kémiai energia mintegy 26 %, míg a hőenergia 74 %. A szennyvíziszap rothasztásánál ennek a kémiai energiának is csak a töredéke nyerhető vissza. Mintegy fele elveszik a szerves anyagok aerob immobilizálásánál, majd a maradék fele a rothasztásnál marad az iszapban.

Ezután a keletkező gáz energiatartalmának ismét a fele a gázmotorban veszik el, döntően hőként. Az együttrothasztás szerves segédanyagaiból ugyanakkor felszabadítható azok energiájának több mint a fele, s a gázmotorokban annak közel fele villamos energiává alakítható. Ezért lehet nyereséges a lakossági szennyvíztisztítóknál az iszapjuk gondosan megválasztott együttrothasztása más alkalmas nyersanyagokkal.

A kémiai energia láthatóan a könnyen kinyerhető energiafajtája a lakossági szennyvizeknek. A hőenergiájuk csakis hőszivattyúval hasznosítható valamilyen mértékben, éppen a szennyvíz hőmérsékletének a függvényében. A kémiai energiák visszanyerése révén azonban a szennyvíztisztítás elvileg energianyereségessé, de mindenképpen energia-függetlenné alakítható, a környezet iszaphulladékoktól egyidejűleg megvalósuló védelmével egyetemben. Együttrothasztás nélkül azonban ma még csak csupán a tisztítás teljes energiaigényének a felét, tehát a levegőztetés energiaigényét lehet az iszaprothasztással visszanyerni, megtermelni.

A SZENNYVÍZISZAPOK ÖSSZETÉTELE

A szennyvíz tisztítása általában primer és szekunder iszapot is termel. Az elsőben a szennyvíz eredeti szerves anyagai (zsír/fehérje/szénhidrát), míg az utóbbiban már döntően azok biológiailag átalakított, stabilizált, jóval kisebb energia-fajlagossal rendelkező változatai vannak jelen. A nagy energia fajlagossal rendelkező zsírok-olajok döntő része eleve a primer iszapba kerül. Ide kerülnek a lebegő, illetőleg ülepedő fehérjék és szénhidrátok (cellulóz, stb.) is. Ez a 0,45 mikronos szűrőn fennmaradó résznek mintegy a 60, a KOI-nak 30-40 %-a. A döntően oldott szennyezők (~ 20 %), s a finom kolloid zsírok, fehérjék, szénhidrátok (mintegy a KOI 30-40 %-a) biológiailag átalakított, immobilizált formái kerülnek a szekunder iszapba.

Pontos iszap összetétel behatároláshoz, vagy akár annak számításához is elég nehéz megfelelő adatokat találni, mert a tisztítók a rothasztóba kerülő iszapjuknak a minőségét, pontosabban a zsír/fehérje/szénhidrát tartalmát, nem vizsgálják kellőképpen. Elég egyszerű ugyan abból a zsír és fehérjetartalom mérése, de azok a KOI-hez hasonlóan összparamétert, tehát az összes extrahálható zsír tulajdonsággal bíró vegyületet, illetőleg nitrogén tartalmú vegyület nitrogénjét mérik és adják meg vegyületcsoportként. A nitrogéntartalom alapján egyszerűen 6,25-el szorozva fogadják el az anyagot fehérjének, holott abban a fehérjék lebomlott aminosavai, illetőleg a nem fehérje nitrogént is belemérik (lipoproteinek, exocelluláris poliszacharidok (EPS), melyek ugyancsak tartalmaznak nitrogént).

Jó lenne pontosan tudni azt is, mennyi az utóbbiak közül az egyértelmű felületi aktivitással rendelkező fehérje, amely esetlegesen a szennyvíziszapok rothasztásánál a habzással, vagy a rothasztott iszap vízteleníthetéségével az üzemvitel műszaki problémáját, illetőleg az iszapelhelyezés költségnövekedését okozhatja. Mint azonban az alábbi, kellően elfogadhatónak feltételezhető adatsor is mutatja,

a témakör kutatásai még ma sem kívánják a fenti problémák és az iszapösszetétel kapcsolatát vizsgálni, hiszen sokkal fontosabb annál az iszapból visszanyerhető energia maximálása. Mégis megbízhatónak tűnik a táblázatban feltüntetett kevert lakossági szennyvíziszap mérési adatsora további vizsgálatok céljára. Ennél a primer és szekunder iszap keverési aránya 5136:4338 volt tonnában (egy évi adat), tehát csaknem fele-fele (Koch et al. 2016):

Paraméter	Mértékegység	Mért érték	
Összes szárazanyag (sza)	(%)	5,43	+/- 0,13
Sza. szerves hányada	(%)	79,5	+/- 0,45
pH	(-)	6,33	+/- 0,24
Összes illó sav (∑VFA)	(g/kg)	2,21	+/- 1,21
∑VFA/alkalinitás	(-)	2,12	+/- 1,21
KOI	(g/kg)	72,0	+/- 2,96
TOC	(g/kg)	25,2	+/- 2,16
TKN	(g/kg)	2,87	+/- 1,98
C/N	(számított)	(-)	8,8

Az átlagos jellemzők tehát kicsit másként számolva a következők:

Kevert iszap (primer + szekunder)	5,43 % szárazanyag	54,3 g/kg nedves iszap
amiben 79,5 % a szerves anyag	4,32 %	43,2 g/kg nedves iszap
a szerves anyag KOI-je		72,0 g KOI/kg nedves iszap
a TOC (szerves anyag)		25,2 g szerves C/kg nedves iszap
összes N		2,87 g N/kg nedves iszap
szerves anyag N tartalma	6,6 %	
ami fehérjeként		17,7 g fehérje/kg nedves iszap
a szerves anyag fehérje hányada	41,5 %	
a szerves anyag fajlagos KOI-je		1,66 g KOI/g szerves anyag
a szerves anyag TOC hányada	58,8 %	
C/N arány	8,8	

A Garchingi iszaprothasztó (Koch et al. 2016) ezzel az iszappal egy kg VS/m^3.d alatti terheléssel megy és így 40 napos HTR-vel. A fajlagos metánhozama ekkor 0.317 m^3 CH_4/kgVS. Ez 66 %-os metántartalommal átszámolva a gázhozamra 475 liter/kg VS érték.

Ami nagyon meglepő a reálisnak ítélhető adatsorban, az a szerves anyag nagy fehérje hányada, bár éppen annak igen nagy a szórása. Ebből aztán adódik a nagy KOI/VS arány is, valamint

a nagy TOC/VS arány is. Egyébként a fehérjetartalom más esetekben is egyértelműen ilyen részarány, tehát 40 % körül van. Ebből adódik az általánosan elfogadott 9 körüli C/N arány. Ha az iszapkor egy tisztítóban nagy, a szekunder iszap hozama, s annak a nitrogén tartalma is kisebb lesz, de a szekunder iszap C/N aránya nem változik jelentősen. Azt csak külső, nagyobb C/N arányú tápanyag, zsír és szénhidrát bevitelével lehet növelni. Mivel a fehérjék N tartalma a tömegük 1/6,25-öd része (16 %), a TOC pedig mintegy tömegük 60-65 %-a, a C/N arányuk 4 körüli érték. Fehérjék bevitele tehát egyértelműen csökkenti a szennyvíziszap C/N arányát. A rothasztást azért vélik 6 fölötti C/N arányú iszapkeverékkel végezni, mert ennél nagyobb értékeknél keletkezik csak a rothasztóban megfelelő arányban széndioxid és ammónium, amely azután az iszapfázis ammónium koncentrációját és annak az alkalinitását meghatározóan befolyásolja.

A szennyvíziszapok keletkezését vizsgálva a szerves rész 40 %-a körüli fehérjetartalom egyébként elméletileg is könnyen számolható. A lakosegyenértéknek megfelelő átlagosan 60 g/fő.d lebegőanyagból a 60 %-a, 36 g/fő.d kerül a primer iszapba ennek mintegy 45 %-a inert (16 g/fő.d), tehát 20 g/fő.d lesz abban a szerves anyag. Ebbe kerül bele a 10-13 g TKN/fő.d átlagosan 10 %-a, ami 6,25-ös szorzóval fehérjévé átszámolva 6-8 g fehérje/fő.d. Mivel ez a 20 g primer iszapba kerülő szerves anyag 30-40 %-a, közel van a garchingi iszapkeverék fehérje tartalmához (Koch et al, 2016). A primer iszap összetételére vonatkozó számítást tovább vezetve, a zsírtartalmára is hasonló értéket kapunk. A lakossági szennyvizekben ugyanis a KOI 20-40 %-a körüli a zsírok mennyisége. Ebből annak 50-80 %-a a primer iszapba kerül. A lakos egyenértékkel számolva a szennyvízben levő zsír KOI egyenértéke 22-44 g KOI/fő.d. Ez a zsír tömegfajlagos KOI-jével visszaszámolva 6-12 g zsír/fő.d értéknek felel meg. Az előülepítésnél azonban csak a zsírtartalom 50-80 %-a kerül az iszapba, tehát 4-8 g zsír/fő.d. Ez azt is jelenti, hogy a primer iszap korábban számolt 20 g/fő.d szerves anyagából a zsírtartalom annak 20-40 %-a. Ezeket figyelembe véve ugyanakkor a szerves rész szénhidrát tartalma 20-50 % között mozoghat. Analitikai mérések egyébként ezt az összetételt könnyen ellenőrizhetnék. Természetesen a primer iszap inert tartalma, s így aránya a szerves részéhez is igen jelentősen változhat, hiszen a foszfor előkicsapatására használatos vegyszerek szilárd maradékai azt inert rész mennyiségét jelentősen megnövelhetik.

A szekunder iszapba kerülő fehérje mennyiséget, vagy részarányt nehéz számítással ellenőrizni, hiszen éppen a keletkező iszap fehérje hányadát kellene ahhoz mérésekből ismerni. Ilyen adatok vannak, de nagyon szórnak. Talán elfogadható ehhez Sedlak (1992) nomogramja. 20 napos iszapkornál 8, 40 naposnál már csak 7 % lesz a szekunder iszap szerves anyagában a nitrogéntartalom. Ez 50-43,7 % fehérjetartalomnak felel

meg. Ennek alapján a primer és szekunder iszapok súlyozottan számított nitrogéntartalmára ugyancsak 40 % adódik. Az is érzékelhető a korábbi számításból, hogy a szekunder iszapban kevesebb zsír lesz, mint a primerben. Eleve kevesebb kerül a nyersvízből abba, s ott némi lebontás is csökkenti a mennyiségét. A primer iszap szerves anyagának a 20-40 %-át kitevő zsírmennyiség viszont egyértelműen oda kerül. Ez azonban a rothasztás során nem okoz gondot, még ha elég jelentősen növelték is a zsírfogók iszapjával annak a zsírtartalmát (Mata Alvarez et al., 2014).

A lakosegyenértékből (LE) számolva tehát a kétféle iszap hozamát, megállapítható, hogy azok szerves anyag tartalma (szárazanyag illó része – VS) fajlagosan közel azonos. Energiatartalmuk is közel hasonló, a belőlük anaerob rothasztással biogázzá alakítható hányaduk ugyanakkor nagyon különböző. A primer iszapénak közelítőleg a duplája, mint a már biológiailag stabilizált (mintegy az előülepített szennyvíz fele szerves anyagában eloxidált) szekunder iszapénak. A nyers szennyvíz zsírtartalma primer iszapba kerülő mintegy 50-80 %-a s a hozzá tapadó egyéb lebegő-ülepedő fehérjék, cellulóz és keményítő részek mintegy 2/3 részükben biogázzá alakíthatók mezofil rothasztásnál. Ezeknek a szerves anyagoknak a fajlagos energiatartalma is nagyobb, mint a szekunder iszap szerves anyagáé (Grady et al., 1999).

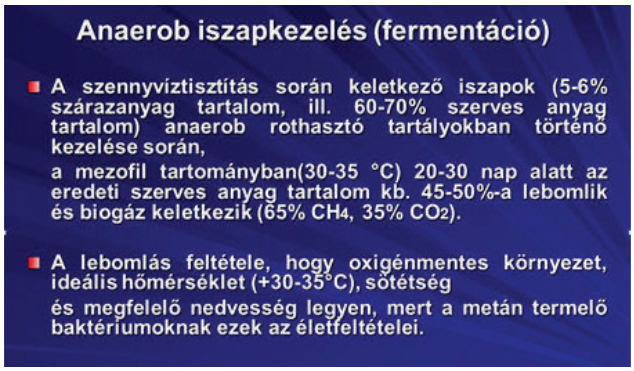
AZ ANAEROB SZENNYVÍZISZAP ROTHASZTÁS KIALAKULÁSA, FEJLŐDÉSE ÉVTIZEDEINKBEN

Az iszapok rothasztása azonban a kezdetekkor nem az energiatartalmuk, hanem egyszerűen a mennyiségük, s további fertőzésveszélyük, szaghatásuk miatt alakult ki. Az iszaprothasztásnak napjainkban ezeken túl több más oka is van. Elsődleges persze talán ma is az iszap mennyiségének csökkentése. A rothasztás biztosít némi fertőtlenítést is, illetőleg jelentősen csökkenti a maradéknak a rothadó képességét, s a rothadással együtt jelentkező szaghatását. Fontos alapszabály, hogy a rothasztásnál metánná és széndioxiddá alakuló szerves anyagok minden kg KOI-jéből 0,33 Nm^3 metán keletkezik (Kárpáti, 2016). Mivel a biogáz metán tartalma megfelelő rothasztásnál annak mintegy a 2/3-a, a fajlagos biogázhozam a metánhozam másfélszerese. Ez a fajlagos mennyiség azonban csak az elbomló szerves anyagokból, tehát a KOI csökkenésből lesz. Az iszap zsír, fehérje és szénhidrátjainak elbomlása, biogázának a metán tartalma viszont eltérő.

A szekunder iszap KOI-jének csak mintegy a 25 %-a, míg a primer iszapénak kicsit több, mint 60 %-a alakul metánná 25 napos rothasztási idő (HRT) mellett. A primer és szekunder iszapokat természetesen megfelelő elővíztelenítés után összekeverve adják fel a rothasztókba (átlagosan fele-fele az arányuk a szárazanyagban, valamint a szerves anyagban), amely esetben 20-25 napos mezofil

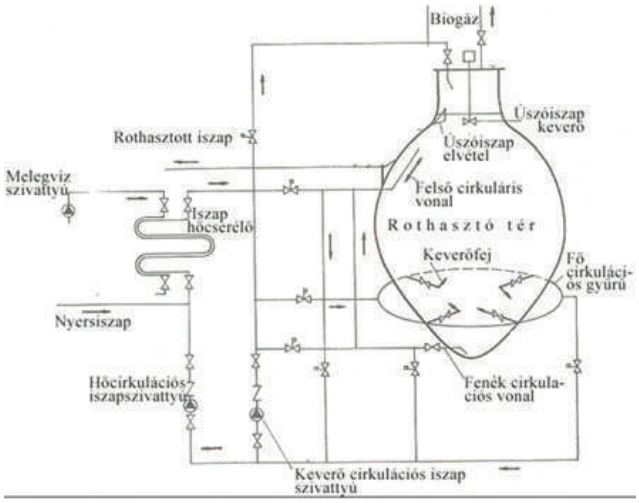
rothasztásnál (HRT) szerves anyaguknak közel 45 %-a alakul biogázzá. A térfogati szerves anyag terhelés az iszaprothasztásnál lehet 1,6 kg VS/m^3.d alatti (kis terhelésű) és azt meghaladó, de általában 7 kg VS/m^3.d alatti (nagy terhelésű). Ezekhez 40 illetőleg 20 napos HRT tartozik (Grady et al., 1999).

A fajlagos szerves anyag (KOI vagy VS) terhelés, tartózkodási-idő és a betáplált iszapkoncentráció között szoros az összefüggés. Minél nagyobb a betáplált iszap koncentrációja, annál nagyobb terhelést lehet biztosítani a rendszerben egy adott tartózkodási-idő mellett (L.Y.R.S. diagram - Oláh és Princz, 1989; Öllős et al, 1994, Öllős et al, 2010). Ennek megfelelően, ha 3 % szerves anyag tartalmú szennyvíziszapot rothasztanak 15-20 napos tartózkodási idővel, a rothasztó fajlagos szerves anyag terhelése 1,5-2 kg VS/m^3.d között lesz, s várhatóan a gázhozam 0,65-0,67 m3/kg betáplált szerves anyag körül alakulhat. Ha a gázhozamból visszaszámolunk annak a metán tartalmára úgy 65 % metán tartalommal, a fenti értékek 2/3 részét kaphatjuk, tehát 0,42 m^3 metán/kg betáplált szerves anyag fajlagost. Mivel egy kg betáplált szerves anyag KOI-ben közelítőleg 1,5 kg KOI/kg szerves anyag, a teljes elbomlásánál ennyiszer 0,33 m^3, azaz közel 0,50 m^3/kg szerves anyagnak megfelelő mennyiségű metán kellene, hogy keletkezzen. A gyakorlatban az elbomlás nem igen lesz 65 % fölött.



Természetesen az anaerob iszaprothasztás fejlesztése nem állt meg a múlt század hatvanas éveinek szintjén, amikor még belső keverést sem igen alkalmaztak az egyébként is kis számban kiépített rothasztókban. Időközben tisztázódott, hogy a rothadás folyamatainak a részleges szétválasztása (sorba kötött egységekben történő rothasztás, kigázosítás) kedvező lehet a térfogati teljesítményre, illetőleg a kirothadás mértékére is. Ezzel egyidejűleg a rothasztás hőmérséklete emelésének a még kedvezőbb hatása is bebizonyosodott, bár a termofil rothasztásnak vannak kedvezőtlen hatásai is. A legnagyobb gondja talán a jobb kirothadás miatt fokozottan keletkező illó sav és ammónium hatása, no meg a megfelelő termosztálás fokozott berendezés és energiaigénye. Óriási előnye ugyanakkor a rothasztott iszap megfelelő fertőtlenítése, s kedvezőtlen szerves szennyezőinek a nagyobb mértékű lebontása. Mindezek ellenére az így rothasztott lakossági szennyvíziszapok a tovább feldolgozás és elhelyezés/hasznosítás tekintetében

nem élveznek különösebb előnyt. Mindegyik iszapot vagy injektálni, vagy komposztálni, vagy égetni kell. Az iszap újrafelhasználását korlátozó nehézfém tartalom az iszap szerves anyaga csökkentésével növekszik, amiért is a jelenlegi előírásokat csak nagy nehézségek árán tudja biztosítani. Kedvező erre a komposztálás ilyen vonatkozású hígító hatása. Sajnos a komposzt talajtápanyag értékét a mezőgazdasági termelők nem érzékelik kellően, így az még ma is elsősorban rekultivációs céllal kerül felhasználásra. Legnagyobb kár ebben a tekintetben a Budapesten keletkező rothasztott, majd komposztált szennyvíziszapok Mátrai Erőműben történő elégetése. A hazai lakossági szennyvíziszapunknak ez a hányada így jelenleg minimálisan hasznosul.



A rothasztáshoz szükséges iszap előmelegítés, reaktor és termosztálásigény általános kialakítása

Az iszaprothasztásnál ugyanakkor egyértelműen az iszapból kinyerhető energia a meghatározó tényező. Ez az energia csak úgy növelhető, ha az iszap átalakításának a mértékét lehet valamiképpen növelni. Ez a rothasztás hőmérsékletének és időtartamának emelésével lehetséges. Alkalmasak mellettük még arra a különböző mechanikus, termikus, kémiai, biológiai előkezelések, melyek feladata minden esetben a sejtközi állomány hozzáférhetőbbé tétele, a sejtfalanyagok és extracelluláris polimerek (EPS), poliszacharidok megfelelő dezintegrálása, aprítása. Ezekkel a fajlagos gázkihozatal jelentősen növelhető, de egyáltalán nem biztos, hogy a költségük az energia kihozatal oldaláról megtérül.

Egyszerűbb lehetőség erre valamilyen könnyen fermentálható külső tápanyag (szubsztrát) bevitele a rothasztóba, úgynevezett együttrothasztás alkalmazása (Boe et al., 2010; Koch, et al., 2016; Kim et al., 2017). Ilyen anyagok lehetnek a lényegesen kevesebb inert anyaggal keletkező különböző zsír, fehérje és szénhidrát tartalmú élelmiszer-termelési, vagy felhasználási hulladékok. Közülük a zsír a legnagyobb energiatartalmú, vagy metánhozam növelő anyag, míg a másik kettő annak mintegy a fele, hiszen a zsírénak fele nagyságrendű energiatartalmú szerves anyagok. Lebonthatóságuk sebessége tekintetében kis molekulatömegű szénhidrátok, a cukrok a legkedvezőbbek. Ez azonban nincs

is a szennyvíziszapban, csakis egyéb „hulladékként" kerülhet a rothasztóba. Ilyen esetben a lökésszerű terhelésük a gyors ecetsavvá alakulás révén hirtelen lesavanyodást okozhat, ami a metanizáció befékezését vonhatja maga után a termelődő gáz széndioxid tartalmának az egyidejű emelkedésével. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy a cellulóz lebontása igen lassú, míg a lignin gyakorlatilag lebonthatatlan.

Elég jó a bonthatóság tekintetében a szennyvíztisztítás mikroorganizmusainak a szennyvíziszapba kerülő extracelluláris terméke (EPS), poliszacharidja is. Talán részben igaz ez a hasonlóan jelentkező sejtfalanyagokra is. Egyébként mindegyikük tartalmaz nitrogénvegyületeket is. A rothasztásra kerülő vegyes iszapban ugyanakkor talán mégis az élő sejtek sejtközi állományának a fehérje tartalma a legnagyobb hányadú. Ennek a hidrolízise, fermentálhatóvá válása közepes sebességű. A zsírok és nagyobb molekulatömegű, említett szénhidrátok a hidrolizáló mikroorganizmusok exoenzimjeinek hatására aprózódnak, válnak a fermentálhatók, a savképzők részére igazán hozzáférhetőkké, átalakíthatóvá. A zsírok ugyanakkor a glicerin észter megbontása után béta-oxidációval rövidülnek, s válnak hasonlóan a savtermelők alapanyagává (Öllős et al., 2010; Koch et al. 2015).

A primer és szekunder iszapok keverékében a zsírok, szénhidrátok, fehérjék arányát mint láthattuk a korábbi adatokból, igen széles tartományokkal jellemzik, ami az alapanyag és a technológia változatossága miatt érthető is. A szennyvíziszapnak valamennyi komponenséből a rothasztásnál metán keletkezik, de eltérő sebességgel és hozammal. Talán legfontosabb közülük a fehérje, hiszen a nitrogénje nélkül az anaerob mikroorganizmusok sem tudnak szaporodni. Nagy mennyisége ugyanakkor a szaporodást már zavarja, különösen, ha a pH megnövekedésekor szabad ammóniává alakul, s a sejtekbe jutva mérgez. Emellett fontos, hogy a fehérje lebomlásakor keletkező gáz metánhányada (80 %) messze nagyobb, mint a szénhidrátoknál (50 %) illetőleg a zsíroknál (70 %). A fehérjék lebomlásának további problémája azonban, hogy annak során felületaktív hatású lipoproteinek keletkeznek, amelyek túlzott koncentrációban a rothasztó habzását is eredményezhetik. A fehérjék lebomlása ugyanakkor elég lassú és eléggé korlátozott (50 % körüli).

A zsírok, olajok közepes mértékben, de lassabban bomlanak, ami azért szerencsés, mert a hosszabb szénláncú szerves savak keletkezését, felhalmozódása így nem veszélyes. A lakossági szennyvíziszapok rothasztásánál nem is szokott a zsírtartalom gondot okozni, ellenben ha külső forrásból lökésszerűen nagy mennyiségben jut az a rothasztóba, a hosszú szénláncú zsírsavak (átmeneti termék) koncentrációjának a megemelkedése befékezheti a metanizációt. Ilyenkor a legjobb a betáplálás leállítása, s a rendszer jó átkeverése (lehetőség szerinti hígítása a már kirothasztott iszappal, ha ilyen rendelkezésre áll).

A LAKOSSÁGI SZENNYVÍZISZAPOK KOMPONENSEINEK LEBOMLÁSA A ROTHASZTÁS SORÁN

A lakossági szennyvíziszapokba kerülő anyagokat a a mezőgazdasági hasznosítás oldaláról vizsgálva mindig a növényi tápanyagtartalom (N és P) behatárolása az elsődleges szempont. Így kihelyezésük korlátja sem azok fő komponenseinek (fehérje, zsír, szénhidrát) megoszlása, hanem a növények N-tápanyag ellátása és egyidejű védelme a nehézfémek túladagolásától (Kárpáti, 2017). Mellettük az iszapba kerülő, nehezen, vagy alig lebomló, káros szénhidrogének, háztartási vegyszerek, növényvédő-szerek, gyógyszerek kimutatása, mennyiségi korlátozása preferált napjainkban a lakosság tápanyag minőségének a biztosítása érdekében. Más kérdés, hogy a tápanyagaink összetételére, ilyen vonatkozású szennyezettségére ugyanakkor nem fordítunk kellő figyelmet, hasonlóan a környezet, természet védelmének a nagyobb természeti ciklusokon keresztül jelentkező károsításaihoz (oxigéntermelő képesség csökkenése a pálmaolaj fokozott termelésével).

Ha a szennyvíziszapjainkat elsődlegesen biometanizációs alapanyagnak tekintjük, a legfontosabb kérdés azok főbb lebontható szerves anyagainak, komponenseinek a behatárolása kellene, legyen. A mai gyakorlatban erre talán azért nem fordítanak különösebben figyelmet, mert a lakossági szennyvíziszapokban ezek koncentrációja kellően stabil, s kisebb mértékű változása is csak az egyes tisztítók között várható a tisztítóba településenként eltérő részarányban érkező ipari terhelés következtében. Gondot jelent persze a meghatározásuknál a fehérje, zsír és szénhidrát tartalom sokfélesége, s mennyiségük bonyolultabb mérési lehetősége is. A zsír általában hexános extrakcióval határozható meg, aminek az oldószere az egészségre káros hatású. Mérése egyébként a minták beszárítását kivéve, elég biztonságos. A fehérjék összességét folyadékból, vagy híg emulzióból lehet mérni a öN mérésével, vagy drágább berendezéssel C, H, N tartalom meghatározásával. Az utóbbit sem igen mérik a vízművek laboratóriumai a műszer és mérés költsége miatt, pedig erre már van megfelelő lehetőség (Nguyen et al., 2015).

A rothasztás folyamatos üzembiztonságát a rothasztásnál keletkező közti termékek egyenletes keletkezési, majd továbbalakulási sebessége biztosítja. Ehhez elengedhetetlen az átalakításokat végző mikroorganizmusok közel állandó környezete: a tápanyag összetétel, homogenitás, hőmérséklet), egyenletes munkájuk, s az ezekhez szükséges műszaki kialakítás, kiépítés, továbbá a folyamatos üzemvitel ellenőrzés, s szükség szerinti szabályozás (Oláh et al., 2010).

Az iszapok egyes komponenseinek arányára a korábban számítottól lényegesen eltérő adatokat adtak meg Öllős és társai (2010):

Komponens	Fehérje %	Zsír %	Szénhidrát %
Nyers iszap	21	17	57
Eleveniszap	28	28	33

Ezek az adatok korábbi külföldi vizsgálatok eredményei, melyeknél a mérések még messze nem voltak olyan pontosan, mint napjainkban. Más vizsgálatoknál a nyers iszapkeverék szerves anyagának átlagosan 13 %-a volt zsír, ami a rothasztott iszapban már 7 %-ra csökkent. Érdekes megállapítás volt, hogy az iszapok közel 25 % baktérium sejtanyagot tartalmaztak. Általánosan elfogadott, hogy ezek sejtközi állománya 80 %-ában fehérje, azonban a sejtanyag mindig csaknem azonos arányban tartalmaz exracelluláris poliszacharidot is, ami döntő hányadában szénhidrát. Speciális esetben sejten belül is történhet poli-béta-hidroxivajsav (glikogén) felhalmozódás is, ami ugyancsak módosíthatja az iszapösszetételt. Az iszapösszetételt tovább bonyolítja, hogy a baktérium sejtfala mukopeptideket, poliszacharidokat, fehérjéket és lipideket is tartalmaz. A poliszacharidok között egyszerű monoszacharidok és aminocukrok is vannak. A zsírok viszont döntően a primer iszapba kerülnek (Öllős et al., 2010).

Más vizsgálatok adatai ugyanazon forrásmunkában a friss iszapkeverékre, valamint a rothasztott maradékára kicsit eltérő adatokat mutatnak (Öllős et al., 2010). Az adatok szerint a szénhidrátok jelentős része hiányzik, ugyanakkor a zsírok és fehérjék átalakulása jellemzőnek tűnik. Ugyanez igaz a nehezen bontható szénhidrátokra, a cellulózra, hemicellulózra és a ligninre is **(1. táblázat).**

1. táblázat: *Iszapkomponensek arányai és lebomlásának mértéke*

Anyag	Friss iszap	Rothasztott iszap
	% (szárazanyagra vonatkoztatva)	
Éterextrakt	32	3,72
Hemicellulóz	3,2	1,58
Cellulóz	3,76	1,56
Lignin	4,79	8,37
Nyers fehérje	21,12	20,68
Hamu	24,13	56,00

Az adatok szerint a zsírok nagyon jól lebomlanak biogázzá, míg a fehérjéknek csak mintegy a fele bomlik el a rothasztásnál. A szénhidrátok lebomlására vonatkozóan az adatsor egyoldalúsága miatt nem jellemző a teljes szénhidrát tartalom lebomlására. Ettől függetlenül érdekes, hogy a cellulózoknak több mint a fele lebomlik, míg a lignin egyáltalán nem bomlik. Nyilvánvaló, hogy az egyszerűbb szénhidrátok, a keményítők és a sejtek exocelluláris poliszacharid termékei ugyancsak valamennyi maradékkal bomlanak csak el az anaerob iszaprothasztásnál, míg a kis molekulatömegű, egyszerű cukrok maradék nélkül. Más szerzőkre hivatkozva, a hazai, iszaprothasztásról

készített legátfogóbb könyv (Öllős et al., 2010) a lakossági szennyvíziszap rothasztásánál a

zsírok 35 %-os,
szénhidrátok 52 %-os
fehérjék 40 %-os

elbomlását véli általánosnak az átlagosan elfogadható körülmények között.

A fentiekkel együtt Öllős és társai (2010) másutt megállapították, hogy a rothasztás során a zsírtartalom 80 %-a, a fehérjéknek viszont csak 60 %-a bomlik le, alakul biogázzá. Ezzel szemben mások úgy vélik, hogy élelmiszeripari tápanyagok esetén a zsír és fehérje tartalom 70-85 %-a is bontható, kérdés azonban az ahhoz szükséges idő és környezet.

BIOGÁZ KELETKEZÉSE A KÜLÖNBÖZŐ ISZAPKOMPONENSEKBŐL – FAJLAGOS GÁZHOZAMOK

Törvényszerű, hogy az iszap mindegyik komponenséből az energiatartalmának és lebomlása mértékének megfelelően keletkezzen metán, illetőleg biogáz. Minden kg elbontott KOI-ből 0,33 Nm^3 metán keletkezik (Kárpáti, 2016). Mivel a zsírok kellően energia gazdagok (36,0 MJ/kg) s jól bonthatók, a fajlagos metán termelésük igen nagy. A fehérjék alig energiadúsabbak (18,4 MJ/kg), mint a szénhidrátok (15,1 MJ/kg), lassan is bomlanak, de sok a bontásukkor keletkező gázban a metán hányada. Az iszap egyes szennyezőanyag fajtáinak a fajlagos gázhozama ennek megfelelően alakul **(2.táblázat)** (Öllős et al., 2010).

A szénhidrátok közül az egyszerű cukrok jól bonthatók, az összetettebb szénhidrátok kevésbé. Kicsi, mintegy 50 % ezen túl esetükben a keletkező biogáz metán hányada, ami rothasztásra történő felhasználásukat eléggé kérdésessé teheti. A könnyen bontható szénhidrátokból ugyanakkor igen gyorsan keletkeznek illó savak, ecetsav, ami a rothasztó pH-ját ugrásszerűen csökkentheti, ezzel befékezheti a metanizálókat, megnövelve a gáz keletkezésének sebességét, de növelve annak a széndioxid tartalmát is. Természetesen az iszapok bontásánál az elméletileg számolható biogáz összetételtől gyengébb összetételek is előfordulnak, ami a bontás körülményeinek a következménye. Ez elsősorban a metanizálók valamilyen gátlásának lehet a következménye, ami illó savaktól és ammóniától is egyaránt előfordulhat. Ennek megfelelően a gázösszetétel, pontosabban annak a változása mindig fontos jelzője bármiféle alapanyag mellett is a rothasztás folyamatainak.

2. táblázat: *Szennyvíziszap komponensek fajlagos energiatartalma és gázhozama*

Vegyületek	Tömegfajlagos KOI kg KOI/kg anyag	Lebontott anyag gázhozama	Biogáz metán tartalma	Fajlagos CH_4 hozam
Mértékegység	kg KOI/kg anyag	Nm^3/kg	Térf %	Nm^3/kg
Zsír	3,2	1,25	68	0,86
Fehérje	1,7	0,70	71	0,50
Szénhidrát	1,1	0,79	50	0,40

Mindezek alapján összességében az állapítható meg, hogy a rothasztást energia gazdag alapanyagokkal célszerű végezni. Ilyenek a nagyobb zsír és fehérje tartalmú iszapok, valamint az ezeket nagy részarányban tartalmazó segédtápanyagok. A segédanyag nélküli iszaprothasztás gáza 60-70 % metánt és 25-30 % széndioxidot tartalmaz. Fűtőértéke 21-25 MJ/m^3. Fajlagos gázhozamait többféle formában is becsülhetjük, jellemezhetjük:

0,5-0,75 m^3/kg betáplált szerves anyag
0,75-1,12 m^3/kg lebontott szerves anyag

Az adott tartományokon belüli változás éppen az alapanyag minősége, energiatartalma miatt áll fenn. Közelítőleg mindig számolható valamely szerves anyag biogáz hozama azok tömeg-fajlagos KOI-jéből is a lebontás mértékének s a KOI-nek a fajlagos metánhozama ismeretében. Az előbbiek zsírnál az előző 2. táblázatban is megadott 2,8-3,2, fehérjénél 1,7-2,2, szénhidrátnál 1,1 kg KOI/kg anyag, míg a KOI-nek a fajlagos metánhozama 0,33 m^3/kg KOI. A fentebb részletezett lebontások mértékét természetesen figyelembe kell venni (Cook et al, 2017).

AZ ISZAP LEBONTÁSI, GÁZTERMELÉSI FOLYAMATAI ÉS SEBESSÉGEIK

A szennyvíziszap zsír, fehérje és szénhidrát tartalmának az anaerob lebontását, biogázzá alakítását többféle baktériumcsoport végzi. Szaporodásuk szempontjából a tápanyag, tehát a mindenkori iszap összetétele talán a legfontosabb tényező. Szaporodásukhoz a szénforráson (energiahordozó megfelelő átlagos oxidációs számmal) kívül nitrogén és foszfor jelenléte is elengedhetetlen. Ezek a szaporodáshoz, megfelelő enzimtermeléshez meghatározó komponensek. Optimális arányaik KOI:N:P arányban kifejezve 350:7:1. A gyakorlatban azonban az 1000:7:1 arány is megfelelő (Öllős et al., 2010). Ez hasonló az aerob szaporodás tápanyagigényéhez, de az anaerob iszaphozam lényegesen kisebb ezért kell relatíve kevesebb szerves karbon a szaporodáshoz. Kénre a foszforhoz hasonló mennyiségben van szükség, de az a fehérjék kéntartalmában a redukált nitrogénhez hasonlóan bőségesen rendelkezésre áll. Nyomelemek, Fe^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Co^{2+}, Cu^{2+}, Mo^{2+}, Mn^{2+} hiánya gátolja a fermentációt. Ezek azonban a kommunális szennyvíziszapban rendszerint kellő mennyiségben jelen vannak. Az intenzív anaerob szennyvíztisztításnál ezzel szemben esetenként kobalt adagolása kedvező lehet.

A nulla átlagos oxidációszámú szerves anyagot tartalmazó anyagokból (szénhidrátok) 50-50 % metán és széndioxid keletkezik. Minél kisebb a szerves anyag oxidációs foka, annál nagyobb az energiatartalma, s a metán tartalom a keletkező biogázban. A metánban a szén oxidációs száma -4.

McCarthy (1974) az átlagos szennyvíziszap szerves anyagának megfelelően írt fel az anaerob bomlására stöchimetrikus összefüggést, melyből a gázképződés egyenletét is pontosítja. Abból a korábban bemutatott fajlagosoknak közel megfelelő értékek vezethetők le. Számítása szerint az átlagos szennyvíziszapra ($C_{10}H_{19}O_3N$), ha a tartózkodási-időt 20 naposnak és a mikroba-pusztulás sebességét 0,03 $^{d-1}$-nak veszi, az átalakítást leíró sztöchiometriai egyenlet a következőképpen alakul:

Ha a McCarthy (1974) által javasolt egyenletet az átalakított iszap szerves anyag, s a termékként maradó szerves anyag oldaláról vizsgáljuk, megállapítható, hogy 201 g szerves anyag rothasztásának a maradéka 0,19×113=21,5 g szerves anyag. Ez mintegy 10 % maradék, s egyben 90 %-os lebontást is jelent. Ez közelítőleg a szerves széntartalomra is igaz. A gyakorlatban ezzel szemben szerves anyag lebontására ritkán feltételezhető ilyen mértékkel, illetőleg a lebontás eredményeként keletkező biomaszsza, vagy sejtanyag is nagyobbra feltételezhető

$$C_{10}H_{19}O_3N + 4{,}7\ H_2O = 5{,}78\ CH_4 + 2{,}47\ CO_2 + 0{,}19\ C_5H_7O_2N + 0{,}81\ NH_4^+ + 0{,}81\ HCO_3^-$$

Azaz egy "mólnyi" (20l g) iszapból 5,78 mól (129 dm^3) metán, 21,5 g baktérium és 40,5 g hidrogén-karbonát lúgosság ($CaCO_3$-ban kifejezve) keletkezik. A gázban a metántartalom az egyenlet alapján 70 %-os, ami jó egyezésben van a tapasztalati 65–70 % biogáz metán tartalommal. Az összefüggések természetesen csak közelítő jellegűek, hiszen a gáz metántartalma nem kizárólag a nyersanyag oxidációs fokának függvénye, hanem pl. a szén-dioxid telítési viszonyaitól és a kialakult mikrobiotától (baktérium populáció) is függ.

ennél. Legalábbis a lakossági szennyvíziszapoknál, amire McCarthy (1974) az egyenletet javasolta. A szerves anyagokban, elsősorban zsírban és fehérjében gazdag segédtápanyagok lebontására ténylegesen mérnek úgy 80-85 %-ot, de a 90 % a lakossági szennyvíziszapra semmiképpen nem fogadható el.

A gázban tehát 65-70 % metán várható. Ismét hangsúlyozni kell azonban a zsír, szénhidrát és fehérje eltérő biogáz termelését is a lebontásuk mértékén túl **(3. táblázat).**

3. táblázat: *Zsír/fehérje / szénhidrát gáztermelése az anaerob rothasztáskor*

Tápanyag	Elméleti gáztermelés m^3/kg szerves anyag		Gázösszetétel %	
	biogáz	metán	CH_4	CO_2
Zsír	1,44	1,04	72	28
Fehérje	0,58	0,44	84	16
Szénhidrát	0,75	0,37	50	50

Sajnos, nincs ismeret arról sem, hogy a primer és szekunder iszapok keverékben levő, fehérjéknek minősített komponensekből melyek bomlanak el a rothasztás során, s melyek maradnak eredeti, vagy módosított, de továbbra is szilárd, N-tartalmú vegyületként az iszapmaradékban. Nem ismeretes tehát, hogy a fehérjék erősen felületaktív komponensei, valamint a feltehetően kevésbé felületaktív nitrogén tartalmú poliszacharidok milyen mértékben bomlanak az anaerob rothasztásnál. Feltételezhetjük azonban, hogy a rothasztókba bevitt nitrogén tartalmú szerves vegyületeknek mintegy fele bomlik le, s kerül a nitrogénje ammóniumként a vízfázisba. Az átlagos lebomlás az iszap szerves anyagára viszont inkább csak 45 %. Ekkor pedig a primer és szekunder iszap keverékének a 30 % kiindulási inert tartalmával számolva a rothasztott iszapban az inert és a szerves anyag részaránya 30:38,5 lesz. Ez azt jelenti, hogy a rothasztott iszap izzítási vesztesége 56,2 % körüli kell, legyen. Ez általában inkább 60 % körül van, de a kis eltéréstől esetlegesen eltekinthetünk. Nyilván 45 %-nál is kevesebb a szerves anyag elbomló hányada, ami jól egyezik a gyakorlatban mért gázhozamokkal is.

Nagyon fontos megjegyezni, hogy bár a zsírok jól bonthatók az anaerob rothasztókban, először a hidrolizálók azokat zsírsavakká alakítják majd azokból a savtermelők a metántermelők számára hozzáférhető szubsztrátot termelnek. Ez a szerves anyagok több lépcsőben ecetsavvá történő alakítását jelenti, melynek során hosszabb szénláncú zsírsavak, végül propionsav, vajsav is termelődhet. Ez utóbbiak felhalmozódása vezethet a metanizálók már említett lemérgeződéséhez, befékezéséhez.

Az ecetsav termelése a szénhidrátokból nem okoz ilyen problémát, csak esetleges pH csökkenést a túlterhelésekor. A termelődő savakat egyébként a metanizáció felemészti. Gondot okozhat viszont a gáz túlzott széndioxid tartalmának a hatása, elnyelődése a vízfázisban. Savanyító hatását szerencsére a keletkező ammónium pufferolja. Ha azonban túlzott ammónium-termelésnél a rendszer pH-ja éppen a túlzott ammónium termelés miatt emelkedik meg, az kedvezőtlen ammónia felszabadulást, s azzal ammónia-toxicitás okozhat, melyet már korábban már említettem.

Mindezeknek a rendszerdinamikai problémáknak az oka az anaerob folyamatokban részt vevő mikroorganizmusok eltérő szaporodási sebessége, s ezzel eltérő tápanyag átalakítási sebessége okozza. Mucsy adatai alapján (1993) a savtermelő baktériumok generációs ideje 1-1,5 nap, az acetogéneké 3,5 nap, míg a metanogéneké 5-15 nap tartományba esik. A zsírbontóknál még ennél is hosszabb idő kell a megfelelő szaporodáshoz, lebontáshoz (akár 80 nap is). A fermentáló (savtermelő) baktériumok rövidebb generációs idejének megfelelően a hidrolízishez, és erjesztéshez csak 1/5–1/10-ét igénylik annak az időnek, amennyi a lassúbb szaporodású

metántermelők munkájához kell. Ennek megfelelően egy kevert anaerob rothasztóban, időben a fenti fajok közötti egyensúly a mindenkori tápanyagellátásnak megfelelően kerül dinamikus egyensúlyba. A teljes folyamat sebességét természetesen a leglassúbb részfolyamat sebessége szabja meg. Ez pedig a metanogének végezte utolsó lépés lesz.

Összefoglalóan megállapítható, hogy az anaerob iszaprothasztás hatásfokának növeléséhez, optimalizálásához, üzembiztonságának garantálásához a tápanyagbevitel optimalizálásán túl, a környezet állandóságának biztosítása (hőmérséklet, felületaktív komponensek stabilizálása, pH, lúgosság, sav és ammónium koncentráció, köztitermék homogenitásának biztosítása megfelelő keveréssel, biztonságos gázelvétel) nagyon fontos tényezők. Igen valószínűsíthető, hogy minden rothasztó jellegét meghatározza az abba betáplált tápanyag, s azzal a rajta kifejlődő mikroorganizmus együttes, valamint a T, a relatív iszapterhelés (HRT és iszapkor), a rothasztó kialakításának jellege és keverése. Ezzel együtt az is megállapítást nyert, hogy a kirothasztott iszapok még sok bontható szerves anyagot tartalmaznak. Ez lehet annak is a következménye, hogy az intenzíven kevert reaktorokban folyamatos iszapbetáplálás esetén az elvett iszap a rövidzár miatt még le nem bontott anyagokat is tartalmaz. A rothasztott lakossági szennyvíziszap szerves anyag tartalmának csökkentésére, stabilizálására alkalmas az azt követő komposztálás.

KÖZTI ÉS VÉGTERMÉKEK KELETKEZÉSÉNEK DINAMIKÁJA, IDŐSZAKOS TOXICITÁSOK

Érdekes tapasztalat, hogy a mezofil tartományban az iszaprothasztás kevésbé érzékeny a hőmérséklet ingadozására, mint a termofilben. Ez a két hőmérsékleten szaporodó metanogén mikroorganizmusok eltérő sejthozamának lehet a következménye. A gázhozam is közel hasonló, de a lebontás sebessége a nagyobb hőmérsékleten nagyobb, tehát a rothasztáshoz kevesebb idő is elégséges. A 6,8 kg szerves anyag/m^3.d terhelést szokták tekinteni a nagy terhelésű mezofil lakossági szennyvíziszap rothasztás felső terhelési határának (Öllős et al., 2010). A gondot azonban egyértelműen a nagyobb tisztítók üzemeltetésénél nyilvánvalóan a méretnövelés hatása okozza. A nagy reaktorterek megfelelő átkeverése. A később bemutatásra kerülő, ilyen terhelés közelében üzemelő hazai iszaprothasztónknál ezzel szemben talán nem is az volt gond, hanem a túlzott fehérje terhelés hatására jelentkező igen nagymértékű felhabzás. Ott a fehérje ilyen hatása annak ellenére kritikussá vált, hogy nem rendelkeztek gázzal történő átkeveréssel, csak mechanikus keveréssel és habtöréssel. Sajnos ilyen megoldásnál viszont a keverőkre felrakódó, filcelődő anyagok okozhat komoly üzemeltetési problémákat. A rothasztóba kerülő iszap előszűrése ezért egyértelműen ajánlható.

A szerves anyag lebontás első lépcsője, a hidrolízis. Mindegyik felsorolt tápanyagtípus

hidrolízise bekövetkezik hosszabb-rövidebb idő alatt a különböző környezeti viszonyok mellett is. Sebességük a tápanyag típustól és a mindenkori környezettől is függ. Az aerob szennyvíztisztításnál Henze és társai (1991) kimérték a fehérjék hidrolízisének a sebességét aerob/anoxikus/anaerob rendszerben is, de hasonló adatokat kaptak Koch és társai is jóval később (2015). Anaerob környezetben sebessége csak felének adódott, mint aerobban, 0,06 g NH_4-N/g TKN.d értéknek. Ettől függetlenül az anaerob reaktorokban a fehérjék hidrolízise elfogadható sebességű, ugyanakkor jelentősen korlátozott mértékű. Csak a fehérjék durván fele bomlik le. A keletkező ammónium hatásáról már említés történt. Kritikus a hatására a rendszer mindenkori pH-jára is, amit a lúgossággal éppen az ammónium stabilizál. Sajnos a fehérjék számos bomlásterméke, mint a kéntartalmú aminosavak, vagy aromás aminosavak is erősen mérgezők a metanizálókra. A hidrolízist ugyanakkor maximálni kell, mert a szerves anyagok teljes lebontásának a sebességét, mint a metanizálás mellett a másik leglassúbb lépcső nagymértékben meghatározzák. A zsírok hidrolízise valamivel gyorsabb, mint a fehérjéké, a keményítőké pedig még gyorsabb. Az egyszerűbb cukrok hidrolízis nélkül alakulnak az acetogének, ecetsavképzők révén ecetsavvá.

A hidrolízist egyébként a savképzés követi. Ebben a tekintetben zsírsavak és a cellulóz lebontása is vezethet nagy molekulatömegű illó savak (LCFA) keletkezéséhez, melyek ugyancsak károsak a metanogénekre. Mivel ez is említésre került már, itt nem részletezzük. Fontos ugyanakkor a szerves anyag C:N aránya, hiszen ez befolyásolja az egyes tápanyagok részarányával a rothadás ammónium és lúgosság termelését. Erre a 16:1 arányt találták a legmegfelelőbbnek, de a rothasztás ettől eltérő arányok mellett is lehet még biztonságos. A térfogati szerves anyag terhelés is szükségszerűen befolyásolja a rendszerben kialakuló ammónium koncentrációját és a lúgosság értékét. Mindegyik nő a fajlagos szerves anyag terhelés növelésével. Általános a toxicitás elkerülésére napjainkban a pH, összes illó sav, a gáztermelés sebességének és a gáz összetételének az ellenőrzése (Boe et al, 2010; Astals et al., 2014, Cook et al., 2017, Kim et al., 2017).

HOMOGENIZÁLÁS, KEVERÉS ÉS AZ ISZAPTERHELÉS HATÁSA A ROTHASZTÁSNÁL

A korábbiakból már egyértelmű, hogy a szerves anyagok anaerob lebontása, metanizálása során keletkező köztitermékek bizonyos koncentrációk felett mérgezőek a részfolyamatokat végző mikroorganizmusokra, s közülük is az arra legérzékenyebb metanogénekre. Az is kiderült már korábban, hogy míg a hidrolízis és savképzés alacsonyabb hőmérsékleten (35 °C körül) megy optimális sebességgel, a metanogének 5-7 fokkal magasabb hőmérsékletek tudnak maximális sebességű átalakítást végezni. A hőmérséklet, illetőleg annak

ingadozása ezért is zavaró a rendszer dinamikus egyensúlya tekintetében. Nyilvánvaló, hogy a keverés, homogenizálás a környezeti paraméterek változásának a minimalizálásával a folyamatok együttesének a stabilitása irányában hat, ami persze nem szükségszerűen optimum. Ez azt is érzékelteti, hogy a rothasztás elég széles hőmérséklet és szerves anyag terhelés tartományban stabilis lehet, ami persze egyáltalán nem jelent maximális szerves anyag lebontást és biogáz és metántermelést.

Fontos tehát az anaerob rothasztó adott hőmérsékleten történő minél egyenletesebb átkeverése, illetőleg a rothasztás hőmérsékletének is a lehető legjobb stabilizálása. Ezeken túl igaz ez a rothasztó szerves anyag terhelésére is, hiszen annak megfelelően növekszik a rothasztóban a lebontás végtermékeinek a koncentrációja (ammónium, lúgosság, oldott sók és fémek), valamint a részfolyamatok során keletkező átmeneti termékek esetleges felhalmozódása is. Az utóbbiak elkerülését éppen a részfolyamatok zavartalan egymás utánisága, egyenletes teljesítménye garantálhatja. Az utóbbinak, a fajlagos szerves anyag terheléssel növekedni is kell, ha az iszap, illetőleg a benne levő mikroorganizmus tömeg növelésével egyébként nem lehet azt megfelelően kompenzálni. Különösen igaz lehet ez a lakossági szennyvíziszap és nagy szerves anyag koncentrációjú, jól bontható segédanyagok együttrothasztása esetén, amikor a lebontás mértéke a segédtápanyag jó bonthatósága eredményeként jelentősen növekedhet.

A homogenizálást a rothasztókban valamilyen keveréssel kell biztosítani. Erre alkalmas lehet megfelelő cirkulációs iszapárammal történő keverés, esetleg gáz recirkulációval az iszapon keresztül, vagy beépített mechanikai keverőkkel történő keverés. A külső recirkuláltatással történő keverés egyidejűleg a rothasztóba táplálandó friss nyersanyag megfelelő előmelegítését, elkeverését is szolgálja. Ekkor nyilvánvaló, hogy az ahhoz beépítésre kerülő hőcserélőben a recirkuláltatott iszap a tartályban levőnél nagyobb hőmérsékletre melegszik. Ezt a folyadékáramot azután minél gyorsabban és egyenletesebben el kell keverni a teljes rothasztóban. Általánosan érvényes, hogy ilyen keverésnél a teljes rothasztó térfogatát naponta 3-6-szorosan át kell forgatni a recirkulációs, vagy hőcserélő ágon keresztül. Ezt minél nagyobb árammal célszerű végezni a minél kisebb iszapoldali hőmérséklet emelkedés és szükségszerű lerakódás csökkentése érdekében. Ugyanakkor a rothasztó hosszabb távú üzemállandóságának érdekében célszerű az iszap hőmérsékletét kellően stabilizálni (lehetőleg egy fokon belül).

A mezofil rothasztók esetében a lassú homogenizálás, vagy átkeverés a rothasztókban az iszap komponenseinek a sűrűség és méret szerinti szeparációját is eredményezheti. A keverésnek ezt a lehetőséget is minimalizálni kell. Az iszap szeparációja egyidejűleg a rothasztóban keletkező gázbuborékok flotáló hatása miatt is létrejöhet. Az egyes szennyező komponensek eltérő hidrofóbitása, felületaktív

anyagok hatása eredményezheti ezt. Ha egy rothasztó külső recirkulációs keverése elégtelen, könnyen kialakulhat abban több méteres vastagságú úszó iszapfázis is, melyben a keverés még kevésbé működik. Ez lokális egyensúlyi zavarokhoz vezethet. Szerencsésebbek ezért a rothasztóba benyúló, vagy abban telepített mechanikai keverők. Ezek nem csak a mélyebb rétegek megfelelő keverését, függőleges átmozgatását is biztosítják, de a rothasztó felszínén kialakuló hab letörésére, visszakeverésére is alkalmasak.

Oláh és társai (2016) szerint a Dél-pesti rothasztó-üzemeltetési tapasztalatai azt mutatják, hogy a leggyakoribb, üzemeltetési gondot a szennyvíziszapokban alapvetően jelen lévő szálas anyagok (hajszál, szőrzet, textil rostok) okozzák. A mechanikailag kevert rothasztókban történő örvénylő mozgás hatására az egyedi szálak összecsomósodnak a mikroorganizmus pelyheket és jelen lévő szemcsés anyagokat kiszűrve tömör, filcszerű, a nyíróhatásoknak rendkívül ellenálló "kóc-csomagok" képződnek, amelyek a csővezetékek kanyarulataiban, szűkületeiben, a szivattyúk járókerekein felhalmozódva komoly dugulásokat okoznak. Ezt csökkentheti a rothasztóba kerülő szennyvíziszap már említett előszűrése.

A rothasztókba történő nyers iszap betáplálás lehet folyamatos, de lehet ciklikus is. A ciklusidejét megfelelően kell megválasztani, hiszen a ciklikus betáplálása esetében a rothasztó baktérium populációját „sokk-szerű" terhelés éri és így a populáció valamelyest ciklikusan váltakozó környezetnek lesz kitéve, amihez folyamatosan ugyanígy adaptálódnia kell. Ez rontja a lebontási hatásfokot. Előzetes nyersiszap puffertárolás nélkül a rothasztóba betáplált tápanyagban esetleg jelenlévő gátló, vagy toxikus anyagok a baktérium kultúrára is nagyobb koncentrációkban hatnak, a mérgezésre a homogenizálás „tompító" hatása kevésbé érvényesül.

Hasonló gondot okozhat a mezofil rothasztóknál esetenként a fonalas baktériumok túlzott elszaporodása is. Ezek kritikus esetben az iszap habzási hajlamát növelik, párosulva a jelenlevő szintetikus detergensek, olajok, zsírok, fehérjék, polimerek, növényi gyanták erősítő hatásával. Ez a jelenség elsősorban a rothasztó gáza elvételénél jelenthet komolyabb problémát (Kárpáti, 2002). Ma már ezek elkerülésére megfelelő mechanikai habszeparátorok, vízpermetező rendszerek beépítésére is sor kerülhet a rothasztókba.

Fontos ezeken túl, hogy a rothasztás mértéke a rothasztóból elvételre kerülő iszap víztelenítheté-ségére is hatással van. Ezt azonban hasonlóan magához a rothasztáshoz zavarhatják a szennyvíziszapba kerülő segédvegyszerek is, melyeket elsődlegesen a főági tisztításnál, majd a következő lépésben a rothasztás előtt adnak az iszaphoz a rothasztásnál keletkező kénhidrogén megkötésére. A rothasztásnál a kedvezőtlen hatása ennek a vegyszeres kezelésnek, hogy az iszap kolloidális fehérje és zsírtartalmával kölcsönhatásba lépve, azok kémiai koagulációját eredményezi, rontva a lebegő formájú szubsztrát vízoldhatóságát, s így a mikroorganizmusok

hozzáférését ezekhez a komponensekhez. Ezt a hatást ugyanakkor nehéz elkerülni, viszont magánál a víztelenítésnél a Fe^{3+} iónok, és hidroxidjaik hatása már talán csak kisebb mértékben érvényesül. Pontosabban megfelelő polielektrolittal kellőképpen kompenzálható.

A lakossági szennyvíziszap rothasztásnál a térfogati szerves anyag terhelés alapján *kis- és a nagy-terhelésű* rothasztókat különböztethetnek meg. A kis-terhelésű rothasztást 0,6–1,6 kg szárazanyag/m^3.d terhelési határok között értelmezzük. A rothasztók terhelését sokszor kg szerves anyag/m^3.d-ben adják meg. Ilyen esetben a megfelelő szárazanyag terhelést át kell számolni szerves anyagra. A kis-terhelésű rothasztókban kialakuló 30–40 nap tartózkodási-időnél az iszap szerves-anyagának jó része lebomlik, s az iszapmaradék víztelenítheté sége javul. A kis-terhelésű rothasztás sokkal jobban elviseli a kezelési hibákat és az üzemelés változó körülményeit.

A rothasztók építési költségeinek csökkentésére napjainkban már döntően egylépcsős nagyterhelésű rothasztókat építenek, üzemeltetnek. A nagyterhelésű rothasztókat általában 15–20 nap tartózkodási-időre, 3–8 % befolyó szilárd anyag koncentrációra, 2,4–6,4 kg/m^3.d szerves anyag terhelésre és a már többször megemlített mezofil (35–38 °C) üzemeltetési hőmérsékletre tervezik. Ezek az adatok üzemelési tapasztalaton alapulnak. A nagy terhelésű anaerob rothasztók esetében az egyik legfontosabb tényező mindenképpen a keverés, melynek célja ismételten összefoglalva és idézve Öllős és társai (2010) munkájából:

- a rothasztó teljes térfogatának a lehető legnagyobb mértékű hasznosíthatása,
- a nyers iszap tápanyagtartalmát a gyorsan homogenizálása a teljes rothasztó térben,
- a mikroorganizmusok és tápanyagok tökéletes kapcsolatba hozása,
- a keletkező, gátló hatású melléktermékek homogenitásának biztosítása,
- stabil pH fenntartása a pufferoló lúgosság hasonlóan homogén elosztásával,
- a reaktor egyenletes időbeni és térbeni hőmérsékletének biztosítása,
- homok és egyéb inert anyagok kiülepedésének, flotálódásának minimalizálása.

A rothasztó tartályok belsejében ezért a keveréssel törekedni kell egyidejű, vagy akár ciklikus vízszintes és függőleges irányú átkeverésre is. Ennek kell biztosítani a teljes térfogat naponta 3-6-szor történő teljes átkeverését. A keverés energiaigénye ugyanakkor csökkenthető, hiszen az üzemeltetési tapasztalatok alapján elmondható, hogy nincs szükség a reaktorok folyamatos kevertetésére. A rothasztó alakjától (hengeres, alul-felül kúppal lezárt henger, tojásdad) és méretétől függően különböző keverési módokat, illetőleg azok kombinációját alkalmazzák. Általánosan elfogadott, hogy a keverés hatékonyságának növekedésével a biológiai lebontás és biogáz képződése nő. A párhuzamosan végzett vizsgálatok igazolták, hogy a betáplált szerves anyagra vonatkoztatott fajlagos gázkihozatal a keverés nélküli rothasztáséhoz képest jó keverés esetén 15-20 %-al nőhet.

ÖSSZEFOGLALÁS

A segédanyagokkal, lakossági folyékony, vagy iszapszerű hulladékokkal és egyéb élelmiszeripari hulladékokkal történő együttrothasztás jelentős energianyereséget jelenthet a lakossági szennyvíztisztítóknak, de vigyázni kell ilyenkor a rothasztó terhelésére, a rothasztásra kerülő segédanyagok minőségére, összetételére. Túlzott fehérje és zsírterhelés is káros lehet a rothasztásra. A fehérjék túladagolása a rothasztó fokozott habzását generálhatja, míg a zsíroké a hosszú szénláncú zsírsavak koncentrációjának növekedését, s azzal a metanizáció befékeződését. Mindegyik nehezen kezelhető probléma, leginkább a nyersanyag bevitel leállításával, csökkentésével orvosolható. Jól bizonyítja ezt a megfelelő keveréssel kiépített Dél-pesti rothasztóknak a jelenleg is elég nagy fajlagos terhelése, melynél azonban az ilyen hatást okozó anyagok részarányát az utóbbi években nagymértékben csökkentették.

HIVATKOZÁSOK

Astals, S., Batstone, D. J., Mata-Alvarez, J., Jensen, P. D. (2014) Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes. Bioresour Technol 169:421–7.
Batstone, D. J., Hülsen, T., Mehta, C.M., Keller, J (2015) Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. Chemosphere 140 (2015) 2–11.
Batstone, D.J., Virdis, B. (2014) The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. Curr. Opin. Biotechnol. 27, 142–149.
Boe, K., Batstone, D.J., Steyer, J.P., Angelidaki, I. (2010). State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. Water Res. 44, 5973e5980. http://dx.doi.org/ 0.1016/j.watres.2010.07.043.
Cook, S. M., Skerlos, S. J., Raskin, L., Love, N. G. (2017) A stability assessment tool for anaerobic codigestion. Water Research 112 (2017) 19-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.027
Fazekas, B., Kárpáti, Á., Kovács. Zs. 2014. Szennyvíztisztítás korszerű módszerei. Egyetemi jegyzet, Pannon University. Veszprém, Hungary
Foley, J., de Haas, D., Hartley, K., Lant, P. (2010) Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. Water Res. 44, 1654–1666.
Goude, V.G. (2015) Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. Renew. Sust. Energy Rev. 45, 52-68.
Grady, Jr.C.P.L., Daigger, G.T., Lim, H.C. (1999): Biological Wastewater Treatment, Marcel Dekker, Inc., New York Basel, 581 – 654
Henze, M., Mladenovslij, C. (1991) Hydrolysis of particulate substrate by activated sludge under aerobic, anoxic and anaerobic conditions. Wat. Res. 25 No 1.
Kárpáti, Á. (2002) Szennyvíziszap rothasztás és komposztálás. Ismeretgyűjtemény No. 6 Veszprémi Egyetem Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék 2002
Kárpáti, Á. (2016) Szennyvíztisztítás– energetika– gazdálkodás a lakosság/települések szennyvizeinek tisztításában. MaSzeSz HÍRCSATORNA (3) 6-21.
Kárpáti, Á. (2017) Szennyvíziszapok – újrahasznosítási lehetőségek – EU gyakorlat. MaSzeSz HÍRCSATORNA (1) 20-38.
Khandan, N., Selvaratnam, t., Pegallapati, A.K. (2014) Options for energy recovery from urban wastewaters. In: 9th Conference on Sustainable Development of Energy, Water, and Environmental Systems. SDEWES2014.0596-1.
Kim, M., Chowdhury, M.M.I. Nakhla, G., Keleman, M. (2017) Synergism of co-digestion of food wastes with municipal wastewater treatment biosolids. Waste Management 61 (2017) 473–483 http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.010
Koch, K., Plabst, M., Schmidt, A., Helmreich, B., Drewes, J. E. (2016) Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: comparison of batch tests and full-scale experiences. Waste Manag 47 (Part A) 28–33. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.022
Logan, B.E. (2008) Microbial Fuel Cells. John Wiley & Sons.
Mc Carthy, P. L. (1974) Anaerobic processes. Paper presented at the Birmingham short course on design aspects for biol. treatment. IAWPR.
McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J. (2011) Domestic wastewater treatment as a net energy producer - can this be achieved? Environ. Sci. Technol. 45 (17) 7100-7106.
Mucsy, Gy. A szennyvíziszap rothasztás fejlesztésének irányai. KGI. Budapest, 153-184.
Nguyen, D., Gadhamshetty,V., Nitayavardhana, S., Khanal, S. K. (2015) Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. Bioresour Technol 193:513–22.
Oláh, J., Princz, P. (1989): Iszaprothasztás és a rothasztást ellenőrző módszerek általános értékelése, UNITEL Environmental Protection Agency Hungary, 1 – 66
Oláh, J., Palkó, Gy., Szilágyi, M., Barabás, Gy., Gyarmati, I., Tuba, L. (2010) Rothasztók üzemeltetése. MaSzeSz HÍRCSATORNA 2010 (5) 3-13.
Öllős, G. (1994) Szennyvíztisztító telepek üzemeltetése II. Akadémiai Kiadó, Budapest, 106 – 164.
Öllős, G., Oláh, J., Palkó, Gy. (2010) Rothasztás, MAVÍZ. Budapest,
Xie, S., Wickham, R., Nghiem, L. D. (2017) Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes. Int Biodeterior Biodegrad 116:191–7.