

10. ISZAPKEZELÉSI ÉS HASZNOSÍTÁSI MÓDSZEREK

Beszédes Sándor, Hodúr Cecília

Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
6725 Szeged, Moszkvai krt. 9.
E-mail: beszedes@mk.u-szeged.hu

10.1. Az iszap fogalma

Az iszap összefoglaló fogalom alatt legtöbbször a szennyvíztisztító létesítményekben a tisztítási technológiában keletkező szilárd fázist tartalmazó mellékterméket, illetve hulladékot értik. Az 50/2001 (IV.3.) Kormányrendeletben megfogalmazott definíció alapján az iszap a kommunális szennyvíz tisztítási eljárásaiban képződő, valamint az ehhez hasonló összetételű szennyvizeket kezelő szennyvíztisztító létesítményekből és berendezésekből származó iszap és a településeken keletkező folyékony halmazállapotú hulladék. Ezen csoporton belül a biológiai-, kémiai-, illetve termikus módszerekkel, vagy más „megfelelő” eljárással (például komposztálás, vagy anaerob fermentáció) - továbbá a települési folyékony hulladékok tekintetében tartós tárolásával, vagy kémiai módszerekkel - kezelt iszapok nevezhetőek szennyvíziszapnak, ha a rendeletben rögzített mikrobiológiai- és szennyezőanyag tartalomra vonatkozó előírásoknak megfelelnek.

A hétköznapi, vagy a tudományos közéletben használatos definíciók ennél tágabb értelmezésűek. A szennyvíziszap a szennyvízkezelés során kiválasztott nagy víztartalmú hulladék [Fodor, 2001]. A tudományos közleményekben egy szintén az előzőektől eltérő aspektusok alapján megfogalmazott definícióval találkozunk, miszerint a szennyvíziszap a szennyvízkezelési eljárásokban keletkező minden „félig szilárd” halmazállapotú maradvány (IWA –Nemzetközi Vízügyi Szövetség- definíciója). Sok esetben a rácsszűréssel leválasztott anyagokat is iszapként tekintik.

10.2. Az iszapok összetétele

A szennyvíz típusától és az alkalmazott tisztítási és fázisszeparálási eljárásoktól függően az iszapok szárazanyag tartalma jellemzően 0,25-12% közötti

tartományban változhat. Az iszapok általános összetétele alapján megállapítható, hogy az összes víztartalom 90%-át kitevő pórusvíz és a kapilláris-víz egyszerűbb mechanikus és termikus elválasztási módszereket alkalmazva eltávolítható [Barótfi, 2000]. Az iszapokban lévő víztartalom fiziko-kémiai állapotát a többi összetevő tulajdonságai is meghatározzák, ami a további sűrítési és víztelenítési eljárások hatásfokát is befolyásolja. Európai viszonylatban a kommunális szennyvízből keletkező iszap fajlagos mennyisége, a leggyakoribb tisztítási eljárások alkalmazása esetén naponta kb. 90 g_{szá}/ fő.

Az iszapot alkotó részecskék szemcsemérete és szemcseeloszlása is függ az iszap jellegétől. Az előülepitőkből származó friss iszap szárazanyag tartalmának 9-33%-át a 10-17 mm közötti, 5-20%-át a 1-10 mm-es, és 50-88%-át az 1 mm-nél kisebb részecskék teszik ki. Az eleven iszapban ezzel szemben az 1 mm-nél kisebb méretű részecskék aránya eléri a 98%-ot is. A kirotasztott iszap esetében az 1 mm-nél kisebb részecskék aránya körülbelül 85% [Vermes, 2005].

Az iszapfázis képződhet az elsődleges, másodlagos és harmadlagos szennyvíztisztítási technológiai lépcsőben, továbbá a biogáz előállítás célzatú rothasztási technológiában is. A szennyvíz minőségi paramétereitől, a tisztítási folyamatok szennyezőanyag eltávolítási hatékonyságától és a keletkezés helyétől függően az iszapok összetétele széles határok között változhat. Az elsődleges iszapok (primer vagy nyersiszap) elsősorban ülepezhető részecskéket és komponenseket tartalmaznak. A másodlagos iszapok (szekunder vagy fölősiszap) szárazanyag tartalmának döntő többségét a biológiai eredetű szerves komponensek teszik ki, biológiailag sokszor instabil állapotban vannak. A harmadlagos iszapokban (tercier vagy „vegyszeres” iszap) pedig a biológiai lebontásnak ellenálló mikroorganizmusok, nehézfémek foszfor- és nitrogénformák vannak túlsúlyban.

10.1. táblázat: Iszapok összetétele [Metcalf, 1991]

	Elsődleges iszap (kezeletlen)	Rothasztott iszap	Másodlagos iszap
Szárazanyag [%]	2,0-8,0	6,0-12,0	0,8-1,2
Illékony komponensek*	60-80	30-60	60-90
Fehérje*	20-30	15-20	30-40
Nitrogén vegyületek*	1,5-4,0	1,5-6,0	2,4-5,0
Foszfor vegyületek*	0,8-2,8	1,5-4,0	2,8-11,0
Szerves savak [mg L⁻¹]	200-2000	100-600	1100-1700
pH	5,0-8,0	6,5-7,5	6,5-8,0
* a szárazanyag (TS) %-ában			

Az iszapban lévő mikroorganizmusok és kis molekulatömegű komponensek miatt a hidrátburok létrejöttéhez nagy fajlagos felület áll rendelkezésre, a nyers iszap vízteleníthetőségének nehézségei részben ebből adódnak. A fölősiszap esetében az abban található élő mikroorganizmusok anyagcseréje, valamint az elhalt mikroorganizmusok részben felszakadt sejtfal részleteinek jelenléte következtében az extracelluláris polimerek koncentrációja növekszik. Az iszapvíz jelentős része a hálószerű polimer struktúrában bezárva található, amely a viszkozitást növeli és a nedvességelvonás intenzitását csökkenti [Eskicioglu et al., 2008].

A fiziko-kémiai eljárásoknak a szennyvíztisztításban való alkalmazása miatt az iszapokban a nehézfémek koncentráltan vannak jelen. Ezek akkumulációja az élelmiszerláncban, továbbá egyes nehézfémek környezeti elemekben való mobilitása és ökotoxicitása sok esetben korlátozza az iszapok mezőgazdaságban való hasznosítását.

10.2. táblázat: Iszapok nehézfém tartalma
[Hsiau and Lo, 1991; Fytli and Zabaniotou, 2008]

	[mg kg _{szs} ⁻¹]
Arzén	1,1-230
Cink	100-49000
Higany	0,6-56
Kadmium	1-3,4
Kobalt	11-2500
Króm	10-990000
Nikkel	2-5300
Ólom	13-26000
Ón	2,5-330
Réz	80-17000
Vas	1000-154000

A nehézfémek közül a króm, réz és ólom jelenti a legnagyobb kockázatot a nagy átlagos koncentrációjuk és magas toxicitásuk miatt. Az anaerob fermentációs folyamatokban keletkező, kirothasztott iszapok esetében is a krómvegyületek nagy koncentrációja korlátozza leginkább a mezőgazdasági felhasználást. A biológiai szennyvíztisztítási fokozatban keletkező iszaphoz képest az elsődleges szennyvíztisztítási lépcső nyers iszapja a nehézfémeket magasabb

koncentrációban és nagyobb mobilitást biztosító formában tartalmazza, amely a biológiai folyamatokban való részvételüket is fokozza [Hsiau, Lo, 1998].

Az iszapok vízteleníthetősége, illetve a biológiai eljárásokban való hasznosíthatósága szempontjából az ionok koncentrációja is meghatározó. A kationok jelenléte a mikrobiális folyamatokban meghatározó, azonban a túl magas koncentrációjuk - a kedvezőtlen ozmotikus körülmények kialakulása miatt - már az anaerob lebontási folyamatokban zavarónak tekinthető.

A hosszú szénláncú zsírsavak az elméletileg magas metán kihozatali mutatóik ellenére az anaerob fermentációban inhibeáló hatásúak lehetnek [Chen et al., 2008]. A háztartásokban, illetve egyes ipari tevékenységekben a mosásra, illetve fertőtlenítésre használt detergensok (anionos és nem ionos, illetve kationos) a szennyvíziszapban koncentrálnak, amely az iszaprothasztókba kerülve az üzemeltetési problémákhoz vezető habképződési hajlamot növelik [Ganidi et al., 2009].

A kommunális iszapok esetében a további aerob és anaerob folyamatokban való hasznosítást (komposztálás, illetve biogáz fermentáció) az optimálisnál (20-30:1) alacsonyabb C:N arány nehezíti, ez az élelmiszeripari szennyvíziszapok, elsősorban az állati eredetű nyersanyagokat feldolgozó iparágak (hús-, baromfi- és tejipar) iszapjai esetében kevésbé okoz problémát [Kim et al., 2003].

10.3. Az iszaphasznosítás és kezelés általános céljai

Az Európai Unióban és világszerte a szennyvízből keletkező iszapok egyik leggyakrabban alkalmazott hasznosítási módja a mezőgazdasági termelési technológiákban történő felhasználás, illetve a talajjavítás. Ezen kívül jelentős iszapmennyiség kerül deponálásra és égetésre is. Az alkalmazható szennyvíziszap kezelési eljárások választását befolyásolják a helyi szokások, a jogi szabályozás, a földrajzi és földtani jellemzők, továbbá a gazdasági és műszaki háttér.

Már az 1975-ös EKG hulladék keretirányelvben megfogalmazódott a hulladékok keletkezésének mérséklése és környezetbarát ártalmatlanításának szükségessége, majd később a víz keretirányelvben már az iszap hasznosításának szükségessége is. Az 1986-os iszap mezőgazdasági hasznosításáról szóló direktíva az iszap mezőgazdasági célú felhasználását a környezet és humánegészségügyi kockázat csökkentése miatt előkezeléshez, ártalmatlanításhoz köti. 1998 óta a volument tekintve az addig leggyakrabban alkalmazott óceánokba való lerakást az EU szabályozás tiltja. A jelenlegi EU-n belüli iszaphasznosítási arányokat tekintve megállapítható, hogy a képződő iszapok kb.

10-12%-a kerül égetésre, kb. 37%-a mezőgazdasági hasznosításra, a fennmaradó rész jelentős hányada lerakásra és egyéb hasznosításra kerül [Fytli, Zabaniotou, 2008].

10.4. Víztelenítési eljárások

Általánosságban víztelenítési eljárásnak nevezik az előkezelt iszap nedvességtartalmának csökkentését, sűrítésről a nyers iszap nedvességtartalmának kisebb mértékű csökkentése esetén beszélhetünk, amely során elsősorban mechanikai módszereket alkalmaznak. Mind a természetes, mind a gépi víztelenítési módszerek esetében a távozó iszapvíz magas szervesanyag tartalma miatt további kezelésre szorul.

A vízteleníthetőség mértékét az iszap összetétele is befolyásolja. A szennyvíztisztításban a szennyezőanyagok szeparációját elősegítő flokkulálószerket alkalmaznak. A víztelenítési eljárásokat megelőző termikus kondicionálás esetében megfigyelték, hogy flokkulálószerket alkalmazó szennyvíztisztítási technológiából származó iszapoknál a kezelési időtartam első részében az iszap pelyhek szétesnek (fragmentálódtak), de a flokkulálószer jelenléte miatt „újrapelyhesedési” mechanizmusok játszódnak le, azonban az így létrejött pelyhek tömörebbek, ezáltal a kötött víztartalom aránya az eredeténél alacsonyabb [Wojciechowska, 2005]. A deflokkulációs-flokkulációs egyensúly a hőmérséklet vagy a tartózkodási idő növelésével azonban felborul, a hosszú idejű, és elsősorban a magas hőmérsékletű kezelések esetében már a deflokkulációs mechanizmusok dominálnak.

A természetes nedvességcsökkentési módszerek alkalmazásakor, például a szikkasztóágyakon való víztelenítés esetén, kb. 8-12%-os; a gépi módszerek esetében a dobszűrőkkel kb. 15-20%-os, a szalagprésekkel kb. 18-25%-os, a víztelenítő centrifugákkal kb. 25-30%-os végső szárazanyag tartalom érhető el.

Az utóbbi években jelentős erőfeszítések történtek az iszapvíztelenítési eljárások energiaszükségletének csökkentésére. Az egyik ilyen innovatív megoldás a SOLIA eljárás, amelyben a nedves iszap szoláris szárítása történik, kb. 45-85%-os szárazanyag tartalom eléréséig. Az eljárás során a nedves iszap üvegházakba kerül, ahol a részben száradt iszappal keverik, továbbá mesterséges ventillációt és folyamatos átforgatást is alkalmaznak a nedvességelvonás felgyorsítására, illetve az anyaghalmazban a nedvességtartalom inhomogenitásának mérséklésére. Az iszapban végbemenő lebomlás exoterm részfolyamatai által képződő hő (kb. 50-60°C hőmérséklet elérése) jelentős része így szintén a

nedvességeltávolításra használható, illetve a külső hőmérséklet napi és éves ingadozását is részben képes kiegyenlíteni

10.5. Iszapkondicionálási eljárások

A kommunális iszapok hőkezelése (ún. iszap „pasztörözés”) esetében legalább 70°C hőmérsékleten 20 perces hőntartást végeznek, leggyakrabban a mezofil rothasztási technológia előtti kezelésként, az iszap eredeti aerob és patogén mikroorganizmus tartalmának csökkentése céljából. A termikus iszapkondicionálási módszerek közül az utóbbi évtizedben egyre többet foglalkoznak a mikrohullámú energiaközlés alkalmazhatóságának vizsgálatával. A mikrohullámú energiaközlés gyors hőkeltési tulajdonsága révén, illetve a változó polaritású elektromágneses tér specifikus hatásai miatt, a szerves anyagok oldhatósága mind kommunális eredetű fölösiszapok esetében [Appels et al., 2013], mind például élelmiszeripari iszapok esetében [Beszédes et al., 2011] növelhető. Az iszapszerkezetre gyakorolt hatások miatt a mikrohullámú sugárzás, mint előkezelési művelet, alkalmazásával az anaerob fermentáció üteme felgyorsítható, magasabb biogáz kitermelési mutatók elérése mellett. A mikrohullámú energiaközlésen alapuló kezelésekkal az iszappelyhek gyors és nagymértékű dezintegrációja valósítható meg. A nyers, előkezelésen át nem ment iszapban hidrophil tulajdonságú, hidrátburokkal körbevett kolloid részecskék vannak, amelyeket az elektrosztatikus taszítóerők tartanak távol. A nagyfrekvenciával változó polaritású mikrohullámú térben a vízmolekulák rotációja révén a hidrátburok részlegesen felbomlik, a zeta-potenciál értéke csökken, így az iszapszerkezet destabilizálódik [Jones et al., 2002].

Az aerob stabilizálás alkalmazása esetén a szerves anyagok oxidációjához és a mikrobaszám elegendő mértékű csökkenéséhez kb. 12-20 nap szükséges a hőmérséklettől függően. Legtöbb esetben az alkalmazott hőmérséklet tartomány nem elegendő a patogén mikroorganizmusok teljes elpusztításához.

A kémiai iszapkondicionálás alkalmazásakor vas- vagy alumíniumsókat, illetve polielektrolitokat adagolnak. A meszes kondicionálószeres adagolásakor hőfejlődés lép fel, így a kémiai kondicionálás mellett a termikus hatások is hozzájárulnak az iszap szerkezeti változásaihoz, a rothaszthatóság fokozódásához, illetve a mikroorganizmusok pusztulásához. A kémiai kondicionálás leggyakrabban a víztelenítési eljárásokhoz kötődik, az iszap vízteleníthetőségének javítását célozza. Az iszapmosatást legtöbbször szintén a vízteleníthetőség javítása céljából alkalmazzák, mivel a kolloid mérettartományú kompo-

nensek távozásával a szűrés ellenállás csökken, illetve a megmaradó iszapfázishoz szükséges vegyszer adagolási koncentrációja csökkenthető.

10.6. Iszaphasznosítás során alkalmazott eljárások általános céljai

A fenntartható iszapkezelési eljárások általános célja az iszapban lévő erőforrás minél hatékonyabb hasznosítása olyan módon, hogy a környezetre, vagy az emberi egészségre káros komponensek lehetőleg ne kerüljenek a környezeti elemekbe [Lundin et al., 2004].

A leggyakrabban alkalmazott iszapkezelési technológiákban a következő eljárásokat, illetve ezek kombinációit alkalmazzák:

- Elsődleges mechanikai kezelés (szűrés, homogenizálás)
- Elsődleges sűrítés (gravitációs, flotációs, centrifugálás, szalagprés, szikkasztók)
- Iszapstabilizálás (anaerob fermentáció, aerob kezelés, kémiai eljárások)
- Előkezelt iszap másodlagos sűrítése (gravitációs, flotációs, szalagprés, centrifuga)
- Iszap kondicionálás (kémiai eljárások, termikus eljárások, derítés, mosás)
- Víztelenítés (szalagszűrők, szűrőprések, centrifuga, szikkasztó ágyak, szűrők, szárítók)
- Végső stabilizálás (komposztálás, szárítás, égetés, pirolízis, kémiai kondicionálás fertőtlenítési eljárások)
- Deponálás, átmeneti tárolás

A gyakorlatban alkalmazott iszapkezelési módszereknek több célja is van:

- Térfogat csökkenés elérése (további kezelési-, szállítási-és tárolási költségek minimalizálása)
- Biológiai stabilitás elérése (környezeti kockázat csökkentése)
- Nedvességtartalom csökkentése (mikrobiális folyamatok lassítása, térfogatcsökkentés)
- Fertőzőképesség csökkentése (humán- és környezet-egészségügyi kockázat csökkentése)
- Toxikus komponensek mobilitásának csökkentése
- Bűzterhelés csökkentése
- További hasznosítás esetén az annak megfelelő fiziko-kémiai állapot elérése

10.7. Komposztálás

Az iszap mezőgazdasági felhasználása során elsősorban a szennyvízből származó, a tisztítás során átalakuló nitrogén- és foszforvegyületek hasznosítása történik. A talaj tápanyag tartalmának pótlása mellett azonban az iszapban lévő toxikus nehézfémek korlátozhatják a felhasználható mennyiséget. A mezőgazdasági hasznosítás esetében további lényeges problémát vet fel, hogy míg a szennyvízből az iszap folyamatosan keletkezik, addig a felhasználást a jogszabályi környezetnek, a Helyes Mezőgazdasági Gyakorlatnak (GAP), illetve a növények termelési ciklusának megfelelően csak szakaszosan lehet elvégezni. A folyamatos képződés és szakaszos felhasználás miatt a mezőgazdasági célra alkalmas iszapok biztonságos átmeneti tárolását szolgáló beruházások szükségesek. A mezőgazdasági hasznosítás során továbbá figyelembe kell venni a társadalmi elvárások változását, amelyhez igazodik a jogszabályi környezet is. Ezen problémakörbe tartozik az iszap élelmiszernövények termesztése során való hasznosítása is.

A szennyvíziszapok lerakása helyett, és a mezőgazdasági felhasználás mellett, egyre inkább előtérbe kerül azok hasznosítása. Ennek oka egyrészt az értékesíthető termék előállítása révén nyerhető bevétel, másrészt a Hulladékgazdálkodási törvényben megfogalmazott bontható szervesanyag hasznosítási célérték elérése. A biológiai eljárásokkal történő értékesíthető termék előállításának egyik módja a komposztálás. Jelenleg az anaerob fermentáció mellett a komposztálással történő iszapkezelés tekinthető a legnagyobb volumenűnek, azonban a rothasztókból kikerülő iszapot is sok esetben komposztálással stabilizálják véglegesen. Az anaerob fermentációs technológiákhoz képest a komposztálás időszükséglete kb. 2-3-szoros, viszont a technológia telepítési és üzemeltetési költségei alacsonyabbak.

A komposztálási technológiákban is szükséges az iszap előzetes víztelenítése a további hatékony szárazanyag tartalom csökkenés eléréséhez. Az eljárás során a szerves anyagok aerob körülmények között lebomlanak, szén-dioxid és víz kilépésével, biológiailag stabil maradvány képződése mellett [Kocsis, 2005]. A lebomlás közben keletkező hő miatt a folyamat autotermikusnak és termofilnek tekinthető, és a keletkező hő részben a nedvességtartalom elpárologtatására fordítódik. Ha komposztálandó alapanyag vagy alapanyag keverék nem tartalmaz elegendő széntartalmú vegyületet, vagy a lebontáshoz nem áll rendelkezésre elegendő oxigén, akkor a komposzthalmaz hőmérséklete nem elegendő a patogén mikroorganizmusok elpusztítására és a nedvességtartalom csökkentésére. Az aerob és fakultatív anaerob mikroorganizmusok (baktériumok, gombák, algák stb.) számára megfelelő életkörülményeket, továbbá az

alapanyag megfelelő összetételét is biztosítani kell, ezért a komposztálás irányított biológiai lebontásnak tekinthető [Zhao et al., 2016].

A komposztálás kezdeti szakaszában az egyszerűbb vegyületek lebontása megy végbe, a hőmérséklet növekszik 50-65°C-ig, amely a termofil folyamatok megindulásához vezet. A termofil szakaszban az alapanyag makromolekuláinak (pl. nagy molekulájú szénhidrátok, fehérjék) lebomlása történik, a pH emelkedik, az alapanyag összetételétől függően ezen folyamatok kb. 3-6 hét időtartam alatt mennek végbe. A patogén mikroorganizmusok pusztulása a termofil szakaszban következik be. A következő, ún. átalakulási szakaszban a könnyen bontható komponensek mennyiségének csökkenése következtében a hőmérséklet is lecsökken kb. 38-45°C-ra. Ezután az ún. érési szakaszban huminanyagok, huminsavak képződnek [Alexa, Dér, 2001].

A biológiai lebontás megfelelő irányítása szempontjából az egyik legfontosabb tényező az alapanyag szén/nitrogén arányának 25-35/1 tartományra való beállítása [Ogunwande et al., 2008]. Az optimális tartománynál magasabb nitrogéntartalom az ammóniaképződést segíti elő, amely az optimálistól (pH=6-8) eltérő pH-t eredményezhet [Haug, 1993]. Az optimálisnál kisebb nitrogénarány a folyamat idősükségletének növekedéséhez vezet. A szennyvíziszapok önmagában való komposztálását éppen az ideálistól alacsonyabb C:N arány nehezíti meg (kb. 6-10:1), a gyakorlatban ezért válik szükségessé valamely más anyaggal – döntően növényi részekkel – való együttes kezelés [Epstein, 1997].

A víztartalom a komposztálási technológiák hatékonyságát is nagymértékben befolyásolhatja. 40%-os víztartalom alatt a mikrobiális anyagcsere tevékenység lelassul, amely alacsonyabb komposzthalmaz hőmérsékletet és elnyújtott idejű lebontást okoz. Az 55-60%-nál nagyobb víztartalom pedig a pórusterfogát csökkenése révén az oxigén diffúzió sebességét lassítja, ez már inkább az anaerob lebomlási folyamatoknak kedvez [Chen, 2012]. A komposzthalmaz porozításának növelésére struktúráló anyagokat alkalmaznak. Az aerob lebontási folyamat felgyorsítására több komposztálási eljárás esetében mesterséges átlegegőztetést is használnak.

10.8. Anaerob fermentáció

Az anaerob fermentáció az iszapkezelésben az egyik legkedvezőbb környezeti hatású, energiatermeléssel is járó biológiai eljárás. Megfelelő körülmények között, mezofil hőmérséklettartományban a fajlagos biogázkitermelés kb. 180-500 L/kg_{szsz}, a biogáz fűtőértéke kb. 20-25 MJ/Nm³.

Az anaerob lebontás esetében általában négy fázist különböztetnek meg, amelyek folyamatos üzemű, egylépcsős rothasztás esetén térben és időben nem különülnek el. A hidrolízis során a komplex szerkezetű vegyületek (zsírok, szénhidrátok fehérjék) oldható formájú vegyületekké alakulnak (zsírsavak, egyszerűbb szénhidrátok, aminosavak). Az acidogenezis során az előző szakaszban keletkezett egyszerűbb vegyületek tovább bomlanak illékony szerves vegyületekké, döntően zsírsavakká (propionsav, vajsav). Az acetogenezisben ezen vegyületek oxidációja történik acetogén mikroorganizmusok közreműködésével ecetsavvá, hidrogénné és szén-dioxiddá. A metanogenezis fázisban képződik a metán, elsősorban az ecetsavból, illetve a szén-dioxidból. A nehezen lebontható komponenseket, nagymolekulájú vegyületeket tartalmazó alapanyagok esetében a hidrolízis fázis tekinthető az anaerob folyamat teljes sebessége szempontjából limitáló tényezőnek [Appels et al., 2008]. Ebben az esetben az alapanyag előkezelése, az annak folyamán bekövetkező előzetes hidrolízis hatására, az anaerob lebontási folyamat sebességét növeli és biogáztermelési mutatókat javítja. A biológiailag könnyen lebontható szervesanyag formákat tartalmazó anyagok esetében a metanogenezis határozza meg leginkább az anaerob lebontás sebességét.

Az iszap szivattyúzhatósága, valamint a fermentorokban a teljes térfogat átkeverhetősége miatt, továbbá a biológiai lebontási folyamat hatásfoka szempontjából a legtöbb technológia esetén 4-6%-os szárazanyag tartalmú iszapot dolgoznak fel. Az iszapkezelési gyakorlatban legtöbbször a mezofil hőmérséklet tartományú (32-38°C) rothasztást alkalmaznak, azonban találhatóak példák a termofil rendszerekre is. A termofil rothasztás (50-58°C) esetében magasabb fajlagos biogáz hozamok érhetőek el, a patogénpusztulás nagyobb mértékű, és kisebb tartózkodási idő is elegendő az iszap kirothasztásához. Azonban a termofil rothasztás érzékenyebb a hőmérsékletingadozásra és nagyobb a fűtési energiaszükséglete [Ferre et al., 2010]. Továbbá a magasabb hőmérséklet rontja az egyes, biológiai lebontást gátló komponensek oldhatóságát (pl. kénhidrogén, ammónia).

A rothasztás kevésbé érzékeny a szén/nitrogén arány változásaira, azonban a szervesanyag csökkenés és a képződő biogáz minősége szempontjából az optimális C:N arány 20-30:1 tartományra tehető. A magasabb nitrogén arány az anaerob fermentáció szempontjából optimálisnak tekintett pH=6,8-7,4 tartománynál lúgosabb kémhatást eredményez, ami a lebontást lassítja [Bai, 2007]. A mezofil hőmérsékleten üzemelő rothasztók esetében az átlagos hidraulikus tartózkodási idő az alapanyagtól függően kb. 12-24 nap. Ha a fermentorokban a pH=6,0 alá csökken, a rendszer lesavanyodik, a metanogén baktériumok anyagcseréje gátoltta válik, ezért a biogáz átlagos 50-70%-os me-

tántartalma lecsökken [Kim et al., 2003]. A savanyodó kémhatás kompenzálására egyes esetekben mésztejet adagolnak a rothasztóba. Azonban a túl nagy adagolási koncentráció már a kalcium-karbonát kiváláshoz vezethet.

10.9. Termikus eljárások

A termikus eljárásokkal alkalmazásával történő iszaphasznosítási módszerek közé legtöbbször a pirolízist, nedves oxidációt és az égetést sorolják. A termikus iszaphasznosítási eljárások alatt végbemenő folyamatok során a szerves komponensek eltávolítása történik, és csak a folyamatban visszamaradó hulladékok kerülnek lerakásra. A termikus eljárások legtöbbször az iszap energiatartalmának kinyerését célozzák olyan módon, hogy a visszamaradó hulladéknak a környezetre és az emberi egészségre gyakorolt hatása minimális legyen. A termikus eljárások energiamérlegének vizsgálatánál azonban figyelembe kell venni, hogy a legtöbb eljárásban a feldolgozásra kerülő iszap nedvességtartalmát csökkenteni kell, vagyis a keletkező energia egy részét a folyamatba vissza kell forgatni. Ezen eljárásokkal szemben felmerülő leggyakoribb problémák a következőekben foglalhatóak össze:

- Külső energia közlése szükséges a víztartalom csökkentése és az eljárásokban alkalmazott magas hőmérséklet eléréséhez
- A folyamatban keletkező légszennyező anyagok hatékony leválasztására van szükség
- A magas hőmérséklet, illetve az iszapokból képződő egyes komponensek miatt a berendezések és a kapcsolódó szennyezőanyag-leválasztó egységek konstrukciós anyagainak megválasztása és utóbbiak hatékony üzemeltetése lényeges, ezért a beruházási költségek nagyok

Az iszapok fűtőértékét tekintve azonban megállapítható, hogy a nedveségelvonás energiaszükséglete szempontjából a termikus eljárások önellátóak.

10.3. táblázat: Egyes iszaptípusok fűtőértéke [Fytili and Zabaniotou, 2008]

Típus	Fűtőérték [MJ/kg _{szs}] tartomány - jellemző érték	
Nyers iszap	23-29	25,5
Fölösiszap	16-23	21
Rothasztott iszap	9-13	11
Kémiai kicsapással nyert iszap	14-18	16
Bioszűrők iszapja	16-23	19,5

10.9.1. Égetés

Az iszapok égetése, a jelenleg rendelkezésre álló műszaki-technológiai háttér, valamint az egyéb hasznosítási eljárások szigorú szabályozása miatt az egyik legkedveltebb eljárássá vált. A rostélytüzelésű és forgódobos kemencéket egyre inkább felváltó fluidizációs kemencék lehetővé tették rövid tartózkodási idő és egyenletesebb hőterhelés mellett az iszapszerű anyagok hatékony égetését is. Az égetés esetében a többi eljáráshoz képest a kórokozók pusztulása nagyobb mértékű és egyenletesebb az anyaghalmazon belül, a hulladék tömege és térfogata jelentősen csökken, a technológia és a visszamaradó hulladék bűzterhelése minimális, a toxikus szerves vegyületek lebomlanak, az égés során keletkező hő egy része visszanyerhető és hasznosítható. A mechanikai módszerekkel víztelenített iszapok térfogatának további kb. 90%-os csökkenése érhető el.

Azonban az égetés esetében is felmerülnek olyan tényezők, amelyek a módszer hátrányaként említhetők. Az égetéssel a hulladék teljes tömege nem semmisíthető meg, az iszap esetében a szárazanyag tartalom kb. 30%-a visszamarad salak, pernye formájában. Ennek biztonságos tárolása és további kezelése, elsősorban a koncentráltan visszamaradó nehézfémek jelenléte miatt problémákat vet fel [Lundin, 2004]. Másrészt az égetőkkel szemben megfogalmazott leggyakoribb kifogás a légszennyező anyagok kibocsátása. Ezek a másodlagos környezetszennyező hatások ellenére Japánban az iszap több mint 50%-a, az USA-ban és Dániában több mint 20%-a égetésre kerül. A természeti erőforrásokkal való gazdálkodás és ökológiai szempontok alapján további problémákat vet fel, hogy az iszap nagy beruházásigényű létesítményekben való égetésével az elemek egy része kikerül a természetes körfolyamatokból, és nem biztosítható a technológia hulladékmentessége sem.

Az égetéses hasznosítás során az égetésre alkalmazott kemencék típusának függvényében az iszap előzetes víztelenítése is szükséges lehet. A többszintes égetőkemencékben legtöbbször nedves iszapot dolgoznak fel, míg a fluidizációs égetőkemencékben nedves és előzetesen 40-65%-os szárazanyag tartalomra víztelenített iszapokat is [Fytili, Zabaniotou, 2008]. Az égetéses hasznosítási eljárások közül például a Pyrofluid eljárásban fluidágyas égetést alkalmaznak 850-900°C hőmérsékleten, néhány másodperces tartózkodási idővel. Ezen körülmények között az iszap szerves komponenseinek teljes mineralizációja, illetve teljes mértékű patogén pusztulás érhető el, bűzmentes körülmények között. Az égetés során az üzemeltetési paraméterek megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy az iszapok nedvességtartalma magas lehet (akár 80%), a szárazanyag tartalom belül az illékony komponensek aránya elérheti a 90%-

ot és a hamutartalom a szárazanyag kb. 50%-át is kiteheti. A folyamatban keletkező, a környezetet terhelő komponensek az alábbi csoportokba sorolhatók:

- Nehézfémek
- Szilárd maradványok (hamu, légszennyező anyagok leválasztásából származó por)
- Gázhalmazállapotú szennyezők (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, hidrogén-klorid, dioxin, furán vegyületek, szénhidrogének)

Az iszapok égetése leggyakrabban önállóan történik. Ebben az esetben az égetésre kerülő alapanyag nitrogéntartalma nagy, azonban ennek a nitrogén-oxidokká való konverziója alacsony, így környezetterhelő hatásuk összességében kisebb kockázatot jelent. Az égetési hőmérséklet növelésével a szénhidrogének oxidációjának hatásfoka is növelhető. Azonban a nehézfémek salakban maradó mennyisége az üzemeltetési paraméterekkel lényegesen nem befolyásolható.

10.9.2. Pirolízis

Az oxidációs eljárásokkal szemben, a pirolízis során oxigénszegény, illetve oxigénmentes körülmények között, magas hőmérsékleten (300-900°C) történik a szerves komponensek lebomlása, termikus krakkolás és kondenzáció lejátszódás közben [Fytili, Zabaniotou, 2008]. Az exoterm égetéses hasznosítással szemben a pirolízis endoterm folyamat, az energiaszükséglete kb. 100 kJ/kg nagyságrendre tehető. A pirolízis termékei közül három frakciót szokás megkülönböztetni:

- Pirolízis gázok: nem kondenzálódó gázok, például hidrogén, metán, szén-monoxid, kén-dioxid stb.
- Pirolízis olaj: a képződő olaj ecetsavat, acetont metanolt is tartalmaz
- Szilárd maradék: elsősorban szén, amelyben inert komponensek (például a nehézfémek) maradhatnak vissza

A pirolízisgázok, és a széntartalmú szilárd maradvány energianyerésre használható fel, míg a pirolízisolaj komponensei a vegyipar számára szolgálhatnak alapanyagként.

A pirolízisreaktorok esetében, a fűtésre a mikrohullámú energiaközlés különösen jó hatásfokkal alkalmazható. A nedves iszappal közölt mikrohullámú energia intenzív nedvességelvonást tesz lehetővé, majd a szerves komponensek elszenesedésének kezdetével, (a szén a mikrohullámú energiát nagymér-

tékben disszipálja) gyors hőmérsékletfelfutás érhető el [Menendez et al., 2002].

A pirolízis során alkalmazott hőmérséklettartomány ez egyes pirolízis termék frakciók megoszlását is befolyásolja. Az üzemi hőmérséklet kb. 520 °C értékig a pirolízisolajok termelődésének kedvez, az ennél magasabb hőmérsékleten már a pirolízisolaj komponenseinek nem kondenzálódó gázokká való alakulása megy végbe. Az iszap esetében a karboxil és fenolos vegyületekből képződik a legtöbb pirolízisolaj, mivel a kritikus hőmérséklettartományban ezen komponensek lebomlása a jellemző [Khiari et al, 2004]. Az iszapok esetében, a szennyvíztisztításban alkalmazott flokkulálószeres is befolyásolhatja a pirolízis sebességét, mivel a szennyvízbe való adagolási koncentrációjuk alacsony, viszont a fázisszeparációval nyert iszap már nagy (akár 1%-os) koncentrációban tartalmazza azokat.

10.9.3. Hidrotermikus eljárások

A hidrotermikus iszapkezelési eljárások közé sorolják a termikus hidrolízisen alapuló módszereket, valamint a nedves körülmények között végzett oxidáción alapuló módszereket. Ezen eljárások nemcsak a hulladék mennyiségének minimalizálását célozzák, hanem az iszap környezeti kockázatát is csökkentik, lehetővé teszik a biogáz fermentációjának hatékonyság-növelését, továbbá egyes értékes és értékesíthető komponensek kinyerését, és a további kezelési és hasznosítási módszerek energetikai mutatóinak javítását is. Az egyik legkedveltebb hasznosítási mód, az anaerob fermentáció mellett az alkalmazásuk létjogosultságának oka, hogy a biogáz iszaprothasztási folyamatban való előállításakor a szerves anyagok kb. 50%-a van biológiailag könnyen lebontható formában, ezért a rothaszthatóság javítása, illetve a szükséges reaktor térfogat csökkentése érdekében az rothasztásra kerülő alapanyagot előkezelní kell.

A nedves oxidációs eljárásoknál magas hőmérsékletet (150-330°C) és nagy nyomást (2-20 bar) alkalmaznak. A nagy nyomás alkalmazására a forrásponti töméséklet növelése miatt van szükség. A folyamatban az iszap szerves anyagainak lebomlása, hidrolízise, és oxidációja zajlik vizes közegben, amely ideális feltételek mellett szén-dioxid, víz és nitrogén végtermékeket eredményez. Az égetéssel összehasonlítva a nedves oxidációs eljárások egyik leglényegesebb előnye a dioxinoktól, nitrogén-oxidtól és portól mentes gázkibocsátás. Az eddigi tapasztalatok alapján a termikus hidrolízis és a nagyhatékonyságú nedves oxidáció kombinációjával, a hatékony oxidációhoz szükséges hőmérséklettartomány

tomány és nyomás csökkenthető (130°C ; 10 bar), amely a folyamat energetikai mutatóit javítja [Abelleira et al., 2012]. Oxidálószerként elméletileg alkalmazható lenne a hidrogén-peroxid, azonban üzemi körülmények között ennek a tárolása, magas bekerülési költsége és az iszaphoz való pontos adagolása és homogenizálása sok problémát vet fel.

A nedves oxidáción alapuló kezelési módszereket az üzemeltetési hőmérséklettartomány alapján alacsony ($100\text{--}200^{\circ}\text{C}$), közepes ($200\text{--}250^{\circ}\text{C}$) és magas ($250\text{--}350^{\circ}\text{C}$) hőmérsékletű eljárásokra osztják. Az iszapkezelés esetében a magas hőmérsékletű eljárásokat használják, mivel a nagy szervesanyag tartalom miatt az alacsonyabb hőmérséklet nem elegendő a hatékony szervesanyag oxidációs hatás elérésére, még katalizátor jelenlétében sem. A szubkritikus oxidációs eljárásokkal ($320\text{--}370^{\circ}\text{C}$) az iszapok esetében a gyakorlatban jelenleg nem érhető el az elvárt szervesanyag eltávolítási hatások [Genc et al., 2002]. A szuperkritikus oxidációval (375°C feletti hőmérséklet, 220 bar feletti nyomás) a szerves komponensek több mint 99%-a mineralizálható, azonban a korrozív vegyületek megjelenése, illetve a nagy energiaszükséglet a gyakorlatban, nagy kapacitásigények esetén, nehézkessé teszi annak alkalmazását [Marrone, 2013].

A termikus hidrolízis a nem oxidációs eljárások közé tartozik, elsősorban a további – például biológiai folyamatokon alapuló – eljárásokat megelőző technológiai lépésben alkalmazzák őket, mivel a szerves komponensek ebben az esetben nem vesznek el, csak a biológiai lebonthatóságuk növekszik. Az elkülönített, megelőzően alkalmazott termikus hidrolízissel az anaerob reaktorokban végbemenő hidrolitikus lebontási részfolyamat gyorsítható fel, illetve ennek mértéke növelhető. Ekkor a biogázproduktum növekedése mellett a fermentációs maradék mennyisége is csökken [Bougrier et al., 2008].

Az iszapkezelés során, a termikus hidrolízisen alapuló eljárásoknál a $130\text{--}200^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet alkalmazható, mivel ebben a hőmérséklettartományban a mikrobiális sejtek és sejtfaalak hatékonyan lebomlanak. Ennek következtében az intracelluláris komponensek az iszapvízbe kerülnek, a lipidek, szénhidrátok és fehérjék oldhatósága nő, és a biológiai lebontás szempontjából könnyebben hozzáférhető, kisebb molekulatömegű komponensek koncentrációja egyaránt növekszik. Az iszap esetében a termikus hatásokra a szerves anyagok átalakulása két lépcsőben megy vége. Az első részfolyamatban az iszaprészeszkék destabilizálódása és szétesése történik, majd az ezekből létrejött kisebb részeszkék egy része partikuláris, vagyis nehezen lebontható formában marad vissza, a másik részéből pedig oldható formájú szubsztrát képződik.

A termikus hatások azonban a már oldható formába került szerves anyagok egy részében, a biológiai lebonthatóság szempontjából kedvezőtlen változások

kat is előidézhetnek. A 150-180 °C hőmérséklettartomány alkalmazásával kondicionált iszap vízteleníthetősége és rothaszthatósága javul, azonban az ennél magasabb hőmérséklet már a szerves anyagok egy része biológiai lebonthatatlan formába alakul át [Carrere et al., 2010]. A forráspont alatti hőkezelések energetikai szempontból kedvezőbbek, ezekkel a fajlagos biogázkitermelési mutatók akár 30%-al is javíthatóak, azonban a gyakorlati alkalmazhatóságukat a hosszú hűntartási időszükséglet (és ezáltal a technológia csökkenő iszapfeldolgozási kapacitása) korlátozza.

A 150-180 °C hűntartás esetén, ha a hőkezelés célja a vízteleníthetőség javítása és az anaerob fermentáció felgyorsítása, a kommunális eredetű iszapoknál kb. 20-60 perces hűntartási időszükséglettel lehet számolni. Az energetikai célú anaerob fermentációnál a 150°C-nál nagyobb hőmérséklet a szervesanyag frakció oldhatóságát képes tovább javítani, azonban a képződő biogáz metántartalma számottevően már nem növekszik, sőt 200°C felett már a biológiai lebonthatóságban csökkenő tendenciák figyelhetők meg.

10.9.4. A gyakorlatban alkalmazott hidrotermikus eljárások áttekintése

A hidrotermikus kezelések közül a legkorábban a Zimpro és a Porteus eljárásokat alkalmazták az 1960-as években. Mindkét eljárást elsősorban az iszap vízteleníthetőségének javítására dolgozták ki, a Porteus eljárás a klasszikus termikus, a Zimpro pedig a nedves oxidációs eljárások közé sorolható [Neyens, Baeyens, 2003].

A Porteus eljárást eredetileg az égetés hatásfokának javítására használták, mivel ezzel vegyszeradagolás nélkül kb. 40-60%-os szárazanyag tartalmú víztelenített iszap volt előállítható. Az oxidáción alapuló Zimpro eljárást eredetileg a mesterséges vanília aroma előállítására dolgozták ki az 1930-as években, az iszap kezelésére csak évtizedekkel később kezdték el használni. A Zimpro eljárással a kommunális iszap kémiai oxigénigényben (KOI) mért szervesanyag tartalmának kb. 65%-a volt eltávolítható. Az eljárás során alkalmazott magas (250°C) hőmérséklet előállításának energiaszükséglete és a nedvesség-elvonási lépésben keletkező folyékony hulladékvíz magas szervesanyag tartalma korlátozta a későbbi szélesebbkörű elterjedését [Hii et al., 2013]. A módosított Zimpro eljárásban, amelyben a hűntartási hőmérsékletet 200°C-ra csökkentették, végleges iszapkezelésre a csak részlegesen végbemenő oxidáció miatt már kisebb hatékonysággal lehetett használni, azonban a talajban való elhelyezést megelőzően a nedvességtartalom eltávolítást megkönnyítette.

Az 1970-es években elterjedt Porteus eljárást az 1990-es évek közepétől a Cambi eljárás váltotta fel. A Cambi technológiában az iszapot előzetesen 15-20%-os szárazanyag tartalom elérésig víztelenítik, majd zárt rendszerben 150-180°C hőmérsékletre melegítik fel, amely a rothaszthatóságot, és az iszap vízteleníthetőségét is javítja [Takashima, Tanaka, 2014]. Ebben a hőmérséklettartományban, a kb. 20-30 perces hőntartás mellett, az előző eljárásokhoz képest kisebb a korrozív hatású- és a biológiai lebontásnak ellenálló vegyületek létrejöttének valószínűsége. Az alacsonyabb üzemeltetési hőmérséklettartomány alkalmazásával, illetve az iszap anaerob fermentációs energetikai hasznosításakor az előkezelés hatására fokozódó biogázhozam következtében, a teljes folyamatra vonatkoztatott energiamérleg pozitívvá tehető.

Az iszapkezelés gyakorlatában használatos nedves oxidációs eljárások a szerves komponensek minél tökéletesebb oxidációját célozzák, a szervesanyag eltávolítási hatásfok maximalizálásával. A 2000-es évektől alkalmazott Athos eljárással a szerves komponensek 95%-os mineralizációja is elérhető. Az Athos eljárásba sűrített, kb. 4-8%-os szárazanyag tartalmú iszapot dolgoznak fel magas, 200°C feletti, hőmérsékleten nagy nyomásnak (40-50 bar) kitéve, oxidálószerként tiszta oxigént felhasználva, réz-szulfát katalizátor jelenlétében. A nedves oxidációs eljárással a kémiai oxigénigényre vonatkoztatott szervesanyag eltávolítási hatásfok meghaladja a 80%-ot, az iszap térfogatcsökkenése a 95%-ot, a folyékony termék döntő többsége ecetsav [Jin et al., 2005].

A termikus hidrolízist természetesen végezhetik oxidációs eljárásokhoz kapcsolódva is, ekkor a nagy víztartalmú anyagok, például a szennyvíziszap esetében a magas hőmérséklet, illetve a nagy nyomás a nagymolekulájú komponensek hidrolíziséhez vezet, majd a létrejövő kismolekulájú anyagok oxidációja történik [Cano et al., 2015]. Az oxidáció a makromolekulák részleges hidrolízisét is elősegíti, így a termikus és oxidációs folyamatok együttes lejátszódása szinergista hatásokat eredményezhet. Ezen tulajdonságaik alapján a termikus hidrolízist alkalmazó eljárásokat iszap előkezelésre, az oxidációs eljárásokat pedig az iszapkezelési technológia végső lépéseként használják.

A TERAX eljárásban a nedves oxidációs lépést az anaerob fermentációhoz kapcsolják. Mezofil hőmérsékleten, anaerob körülmények között a lebontást végző mikroorganizmusok az iszap kezdeti kb. 6-8%-os szárazanyagtartalmának, kb. 30-40%-át lebontják viszonylag rövid (6-8 napos) tartózkodási idő alatt. A folyamatban visszamaradó iszapfázist a hidrotermikus oxidációs egységbe vezetik, ahol a biológiai lebontásnak ellenálló szervesanyagok további oxidációja történik meg 180-240°C hőmérsékleten, 30-60 bar nyomás és 1-2 órás tartózkodási idő mellett. A teljes technológia szervesanyag eltávolítás hatásfoka meghaladja a 95%-ot, a szilárd maradvány patogén-mentes de fosz-

forban gazdag (kb. 25-30%), így a talaj tápanyag utánpótlására is használható [Hii et al., 2014]. Az oxidációs egységhez kapcsolt nitrogén visszanyerő lépésben a nitrogén ammónium-szulfát formájában kinyerhető, ami szintén alkalmas mezőgazdasági hasznosításra.

Szintén az rothasztáshoz kapcsolódó folytonos anyagáramú termikus iszapkezelési eljárások közé tartoznak az Exelys és a Biothelys módszerek is. Az Exelys eljárásban az iszap, illetve más folyékony hulladékok, zsír és olajokat tartalmazó biomassza is feldolgozhatóvá válik. A termikus előkezeléssel a biogázhozam 20-40%-kal növelhető. A technológia révén minimális bűzterhelésű, a patogénektől mentes és az eredeténél akár 40-50%-al kisebb szárazanyag tartalmú iszap marad vissza, amely már a mezőgazdaságban is jól hasznosítható [Cano et al., 2015]. Az eljárásba előzetesen kb. 20-25%-os szárazanyag tartalomra víztelenített iszapot vezetnek be, a hidrolízis során alkalmazott 145-165°C hőmérsékletet és 9-11 bar nyomást gőzbefűvéssel érik el, a tartózkodási idő kb. 30 perc. Az iszap és a gőz érintkeztetésekor a csővezetékrendszerbe épített statikus keverőket alkalmaznak. A beérkező iszap felfűtésének energiaszükségletének jelentős részét a folyamatból elvezetett iszap hőtartalmának hasznosításával fedezik, csöves hőcserélő modulokkal. A termikus kezelés következtében széteső iszappelyhek és a felszakadó sejtfalak, illetve a makromolekulák lebomlása következtében a keletkező iszap viszkozitása a nyers iszapénál kisebb, amely a folyamatos üzemű rothasztókba való be- és kitáplálás, valamint a fermentorokban az anyag keverésének energiaszükségletét kb. 60-80%-al is csökkentheti.

A Biothelys eljárás elsősorban szakaszos (batch) iszapkezelésre alkalmas. A víztelenített iszap 150-170 °C hőmérsékleten 8-9 bar nyomás alatt kb. 30-60 percet tartózkodik a kezelőtérben. Az Exelys eljáráshoz hasonlóan az iszap felfűtését direkt gőzbefűvéssel végzik. A kezelési körülmények és technológia elsősorban másodlagos fölösiszap előkezelésére alkalmas a rothasztást megelőzően [Carrere et al., 2010]. Az Exelys illetve a Biothelys rendszerrel a rothasztási hatások szempontjából meghatározó jelentőségű illékony vegyületek oldhatósága fölösiszap esetében kb. 30-35%-al, illetve 28-30%-al növelhető, a szervesanyag szolubilizáció kb. 25-28%, illetve 25-29%-os. A Biothelys eljáráshoz képest az Exelys módszer patogén mikroorganizmus pusztító hatása nagyobb, azonban a Biothelys eljáráshoz képest nagyobb mennyiségben képződnek biológiailag nehezebben bontható komponensek, amely miatt a biogáz hozam alacsonyabb [Cano et al., 2015].

Az anaerob fermentációnak a termikus előkezelésekkel történő kombinálásának előnyei a következőkben foglalhatóak össze:

- Már a hőkezelési eljárásban megtörténik az alapanyag(ok) homogenizálása
- A hőkezelést követően az iszappelyhek mérete csökken, ezért a biológiai folyamatok sebességét befolyásoló fajlagos felület növekszik
- Az előkezeléssel a szerves komponensek vízzoldhatósága növekszik, és a biológiai lebontási folyamat hatékonysága és sebessége növekszik
- A hőkezeléssel az iszap eredeti mikroorganizmus tartalma (és benne a patogének) csökkenthető
- A hőkezelésnél a hő- és áramlástani viszonyok optimalizálásával a rothasztók fűtési energiaszükséglete csökkenthető
- A hőkezelt iszap bűzterhelése kisebb mértékű, mint a kezeletlené
- A hőkezelést követően a vizes fázisú melléktermék (iszapvíz) mennyisége kismértékben növekszik, azonban ennek jó bonthatósága a rothasztók folyamatszabályozását megkönnyíti
- Az anaerob fermentációban keletkező biogáz energiatartalma részben vagy egészben fedezi a termikus kezelések hőszükségletét

10.10. Összefoglalás

A szennyvíztisztítás terjedésével és az erre alkalmazott technológiák leválasztási hatásfokának fokozódásával az iszapproduktum is folyamatosan növekszik. A szennyvíztisztító létesítményekben az iszapkezelési és ártalmatlanítási technológiák a telepek teljes kapacitása szempontjából egyre inkább szűk keresztmetszetnek tekinthetők. Mindezek alapján a környezetvédelmi kutatás-fejlesztési tevékenységek során egyre többet foglalkoznak az iszapkezelési és hasznosítási módszerek alkalmazhatóságának komplex szemléletű vizsgálatával, illetve hatékonyságuk elemzésével. Manapság már nem az iszap lerakása, vagy égetése, hanem – a körkörös gazdaság koncepciójának megfelelően – annak, vagy egyes komponenseinek hasznosítása fogalmazódik meg célként. Ezen kontextusban tehát az iszapot elsősorban már nem hulladéknak, hanem – megfelelő kezelést követően - nyersanyagnak tekinthetjük. A fejezetben az iszap kezelésére és hasznosítására alkalmas eljárások főbb jellemzőit, illetve az azok hatékonyságát fokozó egyes előkezelések sajátosságait foglaltuk össze.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH), K115691, valamint az EFOP-3.6.2-16-2017-00010 azonosító számú „Fenntartható nyersanyag-gazdálkodás tematikus hálózat fejlesztése – RING 2017” pályázatok által nyújtott anyagi támogatásért.

Irodalomjegyzék

- Abelleira J, Perez-Elvira S, Sanchez-Oneto J, Portela J, Nebot E : Advanced thermal hydrolysis of secondary sewage sludge: A novel process combining thermal hydrolysis and hydrogen peroxide addition. *Resources, Conservation and Recycling*, 59(2012), 52-57
- Alexa L, Dér S: Szakszerű komposztálás. Elmélet és gyakorlat, Profikomp Kft., Gödöllő, 2001, 264 p.
- Appels L, Baeyens J, Degreve J, Dewil R: Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2008), 755-781
- Appels L, Houtmeyers S, Dereve J, Van Impe J, Dewil R: Influence of microwave pretreatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 128(2013), 598-603
- Bai A: A biogáz. Száz magyar falu könyvesháza Kht., Budapest, 2007, 284 p.
- Barótfi I: Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2000, 981p.
- Beszédes S, László Zs, H. Horváth Zs, Szabó G, Hodúr C: Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy and meat industry, *Bioresource Technology*, 102(2011), 814-821
- Bougrier C, Delgenes J, Carrere H: Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion, *Chemical Engineering Journal*, 139(2008), 236-244
- Cano R, Perez-Elvira SI, Fdz-Polanco F: Energy feasibility study of sludge pretreatments: A review, *Applied Energy*, 149(2015), 176-185
- Carrere H, Dumas C, Battimelli A, Batstone DJ, Delgenes JP, Steyer JP, Ferre I: Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 183(2010), 1-5
- Chen Y, Cheng J, Creamer KS: Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresource Technology*, 99(2008), 4044-4054
- Chen Y: Sewage sludge aerobic composting technology research progress. *AASRI Procedica*, 1(2012), 339-343

- Epstein E: The science of composting, Technomic Publishing Inc., Lancaster, PA, USA, 1997, 487. p.
- Eskicioglu C, Kennedy K.J, Droste R.L: Initial examination of microwave pretreatment on primary, secondary and mixed sludges before and after anaerobic digestion, *Water Science and Technology* 57(2008), 311-317.
- Ferre I, Vazquez F, Font X: Long term operation of a thermophilic anaerobic reactor: process stability and efficiency at decreasing sludge retention time, *Bioresource Technology*, 101(2010), 2972-2980
- Fodor I: A környezetvédelem és regionalitás Magyarországon, Dialóg Campus Kiadó, Budapest, 2001, 384 p.
- Fytili D, Zabaniotou A : Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods –A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2008), 116-140
- Ganidi N, Tyrrel S, Cartmell E: Anaerobic digestion foaming causes-a review, *Bioresource Technology* 100(2009), 5546-5554
- Genc N, Yonsel S, Dagasan L, Onar A : Wet oxidation: a pre-treatment procedure for sludge. *Waste Management*, 22(2002), 611-616
- Haug RT: The Practical Handbook of Compost Engineering, CRC Press, Boca Raton, FLO, USA, 1993, 752p.
- Hii K, Baroutian S, Parthasarathy R, Gapes D, Eshtiaghi N: A review of wet air oxidation and thermal hydrolysis technologies in sludge treatment, *Bioresource Technology*, 155(2014), 289-299
- Hii K, Parthasarathy R, Baroutian S, , Gapes D, Eshtiaghi N: Hydrothermal processing of sludge-A review. *Chemeca2013:Challenging tomorrow*, ACT, Australia, 2013, 1-9.
- Hsiau P, Lo S : Extractabilities of heavy metals in chemically fixed sewage sludges, *J. Hazardous Materials*, 58(1998), 73-82
- Jin F, Zhou Z, Moriya T, Kishida H, Higashimja H, Enomoto H: Controlling hydrothermal reaction pathways to improve acetic acid production from carbohydrate biomass, *Environmental Science and Technology*, 39(2005), 1893-1902
- Jones DA, Lelyveld TP, Mavrofidis SD, Kingman S, Miles NJ: Microwave heating applications in environmental engineering-a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 34(2002), 75-90
- Khiari B, Marias F, Zagrouba F, Vaxelaire J : Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. *Desalination*, 167(2004), 39-47
- Kim HW, Han SK, Shin SH: The optimisation of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management Research*, 21(2003), 515-526
- Kocsis I: Komposztálás, Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 2005, 208p.

- Lundin M, Oloffson M, Petterson G, Zetterlund H : Environmental and economic assesment of sewage sludge handling options, *Resource Conservation and Recycling*, 41(2004), 255-278
- Marrone PA: Supercritical water oxidation-Current status of full scale commercial activity for waste destruction, *The Journal of Supercritical Fluids*, 79(2013), 283-288
- Menendez JA, Inguanzo M, Pis JJ: Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge, *Water Research*, 36(2002), 3261-3264
- Metcalf E : *Wastewater Engineering* 3rd ed., McGraw Hill, New York, USA, 1991, 1408p.
- Ogunwande G, Osunade JA, Adekalu K, Ogunjimi LA: Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency. *Biore-source Technology*, 99(2008), 7495-7503
- Takashima M, Tanaka Y: Acidic thermal post-treatment for enhancing anaerobic digestion of sewage sludge, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2014), 773-779
- Vermes L: *Hulladékgazdálkodás, hulladékhasznosítás. Mezőgazda Kiadó, Budapest*, 2005, 220 p.
- Wilson CA, Tanneru CT, Banjade S, Murthy SN, Novak JT: Anaerobic digestion of raw and thermally hydrolyzed wastewater solids under various operational conditions, *Water Environmental Research*, 83(2011), 815-825
- Wojciechowska E: Application of microwaves for sewage sludge conditioning. *Water Resource* 39(2005), 4749-4754.
- Zhao X, Li B, Ni JP, Xie D: Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting, *Journal of Integrative Agriculture*, 15(2016), 232-240