

Szerves anyag, N és P visszanyerése – az újrafelhasználás helyzete, lehetőségei a lakossági szennyvizek tisztításánál

BEVEZETÉS

Az eleveniszapos szennyvíztisztítás 2014. évi kidolgozása, bevezetése óta rendkívül eredményesnek bizonyult mind a lakosság, mind környezete védelmében. A lakossági szennyvizek szervesanyag-tartalmának immobilizálásához szükséges oxigénigény minimalizálása az iszap anaerob rothasztásának a metán-, s azzal villamosenergia-termelésével napjainkra igen sikeresnek bizonyult, bár a rothasztás csak adott üzemméret alatt építhető ki gazdaságosan. Komoly hiányossága azonban a hagyományos nitrogéneltávolításnak, hogy a lakossági szennyvizek reaktív nitrogénkomponenseit (NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻) elemi nitrogénné (N₂) alakítja az oxidációs és redukációs biológiai átalakítások révén. A lakosság tápanyagellátásához viszont elengedhetetlen a mezőgazdaság termelékenységének meghatározó komponense, az ammónium. Ezt napjainkban az ipar Haber–Bosch-szintézissel állítja elő, átlagosan 12,1 kWh/kg NH₃–N fajlagos költséggel (Pikaar et al., 2017). Ugyanakkor a lakosság tápanyag-hasznosításából kikerülő ammónium döntő hányada végül a lakossági szennyvizekbe kerül, aminek mennyisége jelenleg a szintézissel előállított ammónium mintegy 19%-a (Bodirsky et al., 2014), ami a lakosság étel-miszer-fogyasztásának jövőbeni növekedésével valószínűtlen, hogy csökkenjen. Éppen ezért az ammónium nitrogénné alakítása a szennyvíztisztítás folyamatában



KÁRPÁTI ÁRPÁD

Pannon Egyetem, Veszprém

karpattia@almos.uni-pannon.hu

a távolabbi jövőben nem tekinthető változatlanul fenntartható megoldásnak, technológiának. A szennyvíz szervesanyag-, N- és P-tartalmának a körkörös újrafelhasználása a biztonságosabban fenntartható társadalom alapfeltétele lesz. Az ilyen szennyvíztisztítás kialakítását napjainkban a tudományos világ s a szennyvíztisztítás és háttérparágai is maximális erővel támogatják (Soares, 2019). Jelenleg azonban még csak a kutatások haladnak rohamtempóban, míg az ammónium és foszfát fő- vagy mellékági visszanyerése is csak gyerekipőben jár. Ennek alapvető oka, hogy a lakossági szennyvíz ammóniumkoncentrációja gazdaságos kinyeréséhez nagyon kicsi (<50–100 mg/l). Napjainkig ezért a lakossági szennyvíztisztításban csak az iszaprothasztás vagy egyéb hidrolizálás iszapvizéből történő N- és P-visszanyerésnek van realitása. A további anyag ennek a lehetőségét veszi sorra, röviden érintve az ammónium és a foszfát főági iszapba építésére fejlesztés alatt álló fototróf megoldásokat is.

AMMÓNIMUM LAKOSSÁGI SZENNYVIZEKBŐL TÖRTÉNŐ JELENLEGI BIOLÓGIAI ELTÁVOLÍTÁSA

AZ ELTÁVOLÍTÁS TECHNOLÓGIAI PROBLÉMÁI

A szennyvíztisztítás jelenleg alkalmazott technológiai főképpen az energiaigény csökkentésére törekuszenek a nitrifikáció–denitrifikáció fő- és mellékági szabályozásának optimalizációjával, valamint a fölösi-

szap mellékági anaerob rothasztással történő energetikai hasznosításával. A levegőztetés szabályozása mellett az egyik legújabb fejlesztési eredmény ebben a szerves széntartalom főágon történő, kívánt mértékű eltávolítását követő mellékági parciális nitritáció, majd anaerob ammóniumoxidáció az iszapvíznél. Az utóbbi folyamat napjainkban biztonságos, gazdaságos a mellékágon az iszaprothasztás iszapvizére. Több száz üzemben máig meg is valósult (Cruz et al., 2019). Az ilyen nitrogéneltávolítás az autotróf mikroorganizmus-kultúrák miatt a szerves anyagok döntő részének az előzetes eltávolítását igényli, ami aerob és anaerob megoldással is biztosítható. Az utóbbi a gyakorlatban intenzív anaerob szennyvíztisztítással is történhet, de anaerob membrán reaktorokkal a lakossági szennyvizekre is biztonságos. Mind az aerob, mind az anaerob szervesanyag-eltávolítás előtt elképzelhető vegyszeresen intenzifikált előülepítés vagy annak finomszűrővel kombinált változata is. Ezekkel a főági előtisztításokkal már csak maximum feleannyi oxigén kell a biológiai tisztításhoz, mint a hagyományos nitrifikáló–denitrifikáló eleveniszapos megoldásnál (A2/O), miközben jóval kevesebb a biológia fölösiszap-termelése és a nitrogéneltávolítás üzemeltetési költsége is. A hagyományos megoldásoknak kedvező esetben csak a tizede (Fazekas et al., 2015). Ugyanakkor a főági anammox a lakossági szennyvíztisztítás fejlesztésének fontos lépése lehet majd a jövőben a fenntarthatóság irányába (Pikaar et al., 2017). Az ammónium inertizálása ugyanakkor ezeknél a megoldásoknál még változatlan.

A két autotróf tenyészet stabilitásának fenntartása viszont komoly kihívás az üzemeltetésnél. A nitritoxidáló baktériumok (NOB) visszasszorítása az aerob ammóniumoxidálók (AOX) javára komoly szabályozási

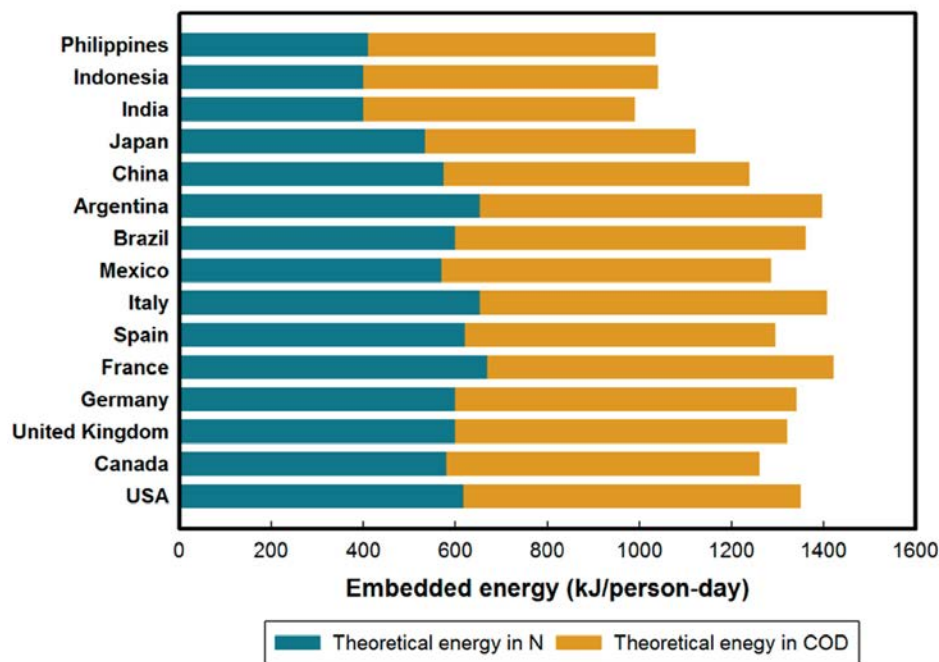
feladat. Az anammox fajok jó visszatartása, aktivitásának biztosítása hiányában az ammónium és nitrit összekapcsolása különösen kisebb vízhőmérsékleten üzemzavarokat okoz. Ez mérsékelt éghajlatú térségekben, ahol télen a vízhőmérséklet 8 fokra is hűlhet, komoly probléma. Ezért is történt legtöbb esetben a parciális nitrítáció – anammox kiépítése világszerte a koncentrált és meleg iszapvizekre (Pikaar et al., 2017). Meg kell azt is említeni, hogy a főági nitrogéneltávolítás és a mellékági nitrítáció–anammox a jelentősebb N₂O emissziója miatt egyéb kedvezőtlen hatással is jár.

AZ AMMÓNIUM ENERGIÁJA ÉS ELTÁVOLÍTÁSÁNAK ENERGIAGÉNYE

Az ammónium Haber–Bosch-szintézissel történő előállításának a költsége jelenleg 12,1 kWh (43,7 MJ)/kg NH₃–N (Pikaar et al., 2017). A felnőtt lakosság ammóniumkibocsátása a lakossági szennyvizekbe az étkezési szokások függvénye, 15 ország felmérése alapján (Trimmer et al., 2017) átlagosan 8,2–13,8 g/fő/nap között van (1. ábra). Ez azt is jelenti, hogy egy fő napi ammóniumkibocsátása (szennyezése) 0,11–0,19 kWh (400–670 kJ) egyenértékű.

Több kutató vizsgálata alapján az emberi szervezet a szerves tápanyaga széntartalmának a hasznosításában nagyon hatékony, hiszen csak 2–10%-a kerül abból kiürítésre (Trimmer et al., 2017). Közelítő számításoknál azonban inkább a 25% az elfogadott (Fazekas et al., 2014, 2015). A tápanyagokból maradó szerves karbonmennyiség 0,16–0,21 kWh (588–761 kJ) lakosonként naponta. Ez azt jelenti, hogy lakosság szennyvízbe juttatott teljes energiakibocsátásának az ammóniumkibocsátás-energiája mintegy 38–48%.

1. ábra: Egy lakos naponta a szennyvízbe juttatott ammónium- (kék sáv) és szervesanyag-szennyezésének (sárga sáv) az energia-egyenértéke 15 országban. A teljes oszlopok hossza a két energiafajta együttesét jelenti (Trimmer et al., 2017)



A szennyvíz szervesanyag-tartalma, energiájának nagyobb hányada már ma is kinyerhető biometán formájában. Ez a teljes szerves anyag energiájának akár az 59%-át is elérheti (Trimmer et al., 2017). Az ammónium energiataralma is visszanyerhető lehet, ha az gáz formájában kivonható a szennyvízből. Az ammónia ugyanis eltüzelésével megfelelő berendezésben energiát szolgáltathat 22 MJ/kg NH₃ fajlagos értékkel. Magyarországon egyetlen üzem működött ilyen megoldással, úgy 20 évvel ezelőtt, Papkeszin, a Kolorkémiában, ahol a ftalocianid gyártásánál keletkezett 3 g/l körüli ammóniumkoncentrációjú szennyvíz sztrippelésével előállított ammóniát gázkazánban hasznosították. A japán tulajdonú üzem a piaci verseny miatt mintegy 15 éve beszüntette a termelést, s vele az ilyen ammónium-visszanyerést, -égetést is.

Az ammóniumot visszanyerése hiányában a hagyományos nitrifikáció–denitrifikáció útján távolítva el a lakosság szennyvizéből, az energianyereség helyett jelentős energiaigényt jelent, 2,6–6,2 kWh/kg N (Schaubroeck et al., 2015). A denitrifikációhoz ezenkívül szerves karbon is szükséges. Ez 2,86–4,3 kg KOI/kg NO₃–N, ami a szerves anyag energiataralmában minimális esetben is 13,9 MJ/kg KOI és 39,75 MJ/kg N energiavesztés a denitrifikációnál, ami a szintetikus ammónium előál-

ítási költségének a 91%-a (43,7 MJ/kg NH₃–N). A denitrifikációra számolt ilyen mértékű energiavesztés részben elkerülhető főáramú anammox megoldás esetén, de a nitrítáció oxigénigénye ilyenkor is jelentkezik. Az ammónium és nitrit összekapcsolása, autotróf inertizálása viszont nem igényel szerves anyagot (Fazekas et al., 2014). Mindezek alapján megállapítható, hogy a szennyvíztisztításban a jövőben mihamarabb elérendő cél lesz az ammónium főágon történő energiahatékony visszanyerése.

DINITROGÉN-OKID-KELETKEZÉS VESZÉLYE AZ AMMÓNIUM BIOLÓGIAI OXIDÁCIÓJA SORÁN

Azon túl, hogy a jelenlegi szennyvíztisztításnál, amikor az ammónium nitrogénje biológiai úton elemi nitrogénné oxidálódik, jelentős az energiavesztés, további kedvezőtlen hatás a dinitrogén-oxid (N₂O) keletkezése. Az utóbbi komoly üvegházhatást eredményező gáz. Hatásában 300-szor erősebb, mint a szén-dioxid, s egyidejűleg egyike a legerősebb ózonréteg-romboló anyagoknak. Korábbi felmérés és számítások alapján a szennyvíztisztítás 1990-ben 0,22 Tg N₂O nitrogént juttatott a légkörbe. Ez a nitrifikációnál az ammóniumoxidáló baktériumok (AOB) melléktermékeként keletkezik a hidroxil-amin (NH₂OH) nem tökéletes oxidációjának melléktermékeként (Domingo-Félez et al., 2019). A hidroxil-amin és az ugyancsak keletkező nitrogén-oxid (NO) kémiai kapcsolódásának eredményeként, különösen savasabb környezetben keletkezik jelentősebb mennyiségű N₂O. Keletkezése egyébként változó mértékű a biológiai nitrogéneltávolítás (BNR) különböző megoldásainál a rendszerkialakítás és az üzemeltetési paraméterek függvényében is.

Az N₂O-emisszió az eleveniszapos szennyvíztisztító rendszerekben a vizsgálatok szerint a teljes eltávolított nitrogénmennyiségnek 0,01–6,6%-a is lehetett. Bár ez nem tűnhet jelentősnek, a lakossági szennyvíztisztítókból így a légkörbe kerülő N₂O-mennyiség a teljes szennyvíztisztítás üvegházhatást okozó tevékenységének a 14–26 százalékát is eredményezheti, ami egyidejűleg a teljes szén- és tápanyag-eltávolítással üzemelő tisztítóknál BNR-tisztítás CO₂-lábnomának a 83 százalékát is kiteheti. Csökkentése csakis gondos üzemellenőréssel, mérési protokoll betartásával lehetséges. A korszerű mérések szerint a korábbi számítás még alá is becsülhette a fenti értékeket (Delre et al., 2019). A jelenleg tervezés alatt levő karbonsemleges szennyvíztisztításnak ezért jelentős N₂O-kibocsátás-csökkentést kell elérnie. Ha a szennyvízből a nitrogéntartalom ammónium formájában kerül majd eltávolításra, visszanyerésre

a nitrogén-oxid-kibocsátás teljesen megszüntethető, jelentősen csökkentve azzal a globális felmelegedés veszélyét is.

A SZENNYVIZEKBŐL TÖRTÉNŐ AMMÓNÍUM-VISSZANYERÉS JELENLEGI LEHETŐSÉGEI

A lakossági szennyvizekből történő jelenlegi biológiai tápanyag-eltávolítás (BNR) a hagyományos, nem recirkulációs megoldással történik. Ez a szennyvíz fogadását, feldolgozását, s a keletkező termékeinek a környezetünkbe történő közvetlen elhelyezését jelenti. Ezalól a nagyobb (>40–60 ezer LEÉ) tisztítók esetében kivétel a biológiai tisztítószorokon keletkező szennyvíziszap rothasztása. Ezek biogázterméke ugyanis már általánosan gázmotoros hasznosításra, energia-visszaforgatásra kerül. Szükséges ez, mert a tisztításnál a levegőztetés jelentős energiaigény.

A főági szervesanyag-oxidációnál és a biogáz elégetésénél keletkező szén-dioxid természetesen jelentős üvegházhatást eredményez. Az ammónium inertizálásával termelődő nitrogénnek ugyan nincs ilyen hatása, ugyanakkor jelentős a növényi tápanyag vesztesége. A kevés ammónium (a teljes N-terhelésnek alig 10%-a), valamint a foszfát teljes mennyiségének a beépítése a tisztítás szilárd maradékába pedig továbbfeldolgozás vagy termőtalajban történő hasznosítása nélkül ugyanilyen veszteség. Napjaink áhított körkörös szennyvízgyártásának ezek közül leginkább az ammónium elfecsérlése a legnagyobb hiányossága. A nagyobb szennyvíztisztítóknál a szennyvíz eredeti lebegő vagy részben átalakított oldott szerves anyagaiból a keletkező főlőszapnak ma még szinte kizárólag csak anaerob rothasztása történik, ami persze a szennyvíz szerves anyaga energiájának igen hatékony visszaforgatása. A belőle előállítható villanyárammal ugyanis a levegőztetési energiának mintegy a fele megtermelhető. A gázmotor hűtővíze is hasznosítható termikusan, amire különbözőképpen is sor kerülhet. Részben visszaforgatható a lakossági szennyvíz foszfáttartalmának jó része is, ha az iszap mezőgazdasági hasznosításra alkalmasnak bizonyul, s a talajjavítást azzal el is végzik.

Az ammónium visszaforgatása elméletileg a fentiekéhez legalább hasonló határfokkal biztosítható lehet, s körkörös hasznosításával a jövő fenntartható szennyvíztisztításának, energia- és nyersanyag-újrahasznosításának is meghatározó eleme lehet. Ugyanakkor be kell látni, hogy jelenleg az ammónium visszanyerése a lakosság kicsi ammóniumkoncentrációjú szennyvizeiből (<100 mg/l) mind technológiailag, mind

gazdaságilag megoldatlan. A jelenleg arra szóba jöhető módszerek (levegővel vagy vízgőzzel történő sztrippelés, membránszeparátoros előzetes szervesanyag-eltávolítás, elektrokémiai ammóniaszeparáció, elektrodialízis, adszorpció, ioncsere, vegyszeres kicsapatás) csak a fenti-nél 20-30-szor töményebb ammóniumos vizeknél lehetnek technikailag kivitelezhetők, illetőleg költséghatékonyak. A legfőbb gond, hogy az iszaprothasztás vizes fázisának az ammóniumkoncentrációja maximális esetben is csak a fele a szükségesnek bizonyult 2-3 g/l értéknek. Persze vannak ennél nagyobb ammóniumtartalmú vizek is, mint a hulladéklerakók csurgalékvízei, nagy fehérjetartalmú szerves hulladék rothasztásának az iszapvízei, vagy akár az emberi, állati vizelet is. Hasonlóan tömény lehet az ammónium állattartó telepek hígrágyáiban, illetőleg azoknak a szűrleteiben. A levegős vagy vízgőzzel történő sztrippelés azonban az ilyen ammóniumkoncentráció esetén is csak 10 fölötti pH mellett lehetséges. Az ammónium persze részben visszanyerhető a foszfát iszapvizekből történő magnéziumos kicsapatásánál keletkező struvittal is, ami várhatóan napjaink leggyorsabban alkalmazásra kerülő megoldása. Ekkor azonban a Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} 1:1:1 mol arányával képez hat kristályvizes kristályos struvitot, amelyben a nitrogén annak csak a 7%-át teszi ki. Az iszaprothasztás csurgalékvizének az összetétele az 1:1:1 mol aránytól messze áll, így az abból történő teljes ammónium-visszanyerés struvitként nemcsak gazdaságtalan, de célszerűtlen is. Jelentős vegyszerigényt jelent (MgCl₂, pH-beállítás). A struvit kicsapatása ugyanakkor a foszfor kapcsán egyre terjedő gyakorlat. A Haber–Bosch-ammónia-szintézis földgáz vízgőzös reformálásával történik, felhasználva a világ évi földgáztermelésének a 3-5%-át, ami a világ évi energiafelhasználásának ugyanakkor az 1-2%-át jelenti. Az ammónium megfelelő visszatartása a tisztításban, majd újrafelhasználása a mezőgazdaságban ezért a tisztítás-fenntarthatóság, valamint a körkörös gyártás megvalósításához sürgető és elengedhetetlen feladat.

NAGY TERHELÉSŰ AEROB/ANAEROB SZERVESANYAG-ELTÁVOLÍTÁS – „FOLYÉKONY MŰTRÁGYA” GYÁRTÁSA

A nagy terhelésű aerob eleveniszapos szennyvíztisztítás (hagyományos két iszapkörös – A/B – megoldások első lépcsője) lehetővé teszi a szerves anyag döntő részének a szennyvíziszappá alakítását, miközben az ammónium döntő hányada az elfolyóvízben marad. Mintegy 15 évvel ezelőtt a hódmezővásárhelyi kétlépcsős lakossági szennyvíztisztító első

lépcsőjéből túlfolyó szennyvíz átlagosan 120 mg/l KOI mellett 60 mg/l ammóniumot tartalmazott. Ha az ilyen vizet napjaink ultraszűrőivel finomlebegőanyag-mentesítik, minőségében megfelel a mezőgazdaság öntözővízigényének. Ilyen esetben a biológia iszapfázisa jelentős, de lehetőség van az abba bezárt energia iszaprothasztással történő részleges visszanyerésére. Az iszap foszfortartalma döntően a rothasztás iszapmaradékába kerül, s abból a talajokban hasznosulhat. Energetikailag kedvezőtlen, hogy ilyenkor a szerves anyagok valamivel több mint a fele oxidálásra kerül (jelentős levegőztetési költség), s keletkező iszapból így már csak annak is a fele, a nyers szennyvíz energiájának mintegy 25%-a jelenhet meg a rothasztásnál keletkező biogázban. Ennek is csak mintegy a feléből lesz a gázmotorban villanyáram, míg a motorból a hő többi része egyéb úton kerülhet felhasználásra.

Az ilyen aerob szennyvíztisztítás energiahatékonyasága növelhető vegyszeresen növelt hatású előülepítéssel. Ennél a szerves anyag (KOI) akár 60%-a is eredeti formájában vihető rothasztásra, s csak a maradék 40% fele kerül a biológiai medencében aerob oxidációra. A másik fele a szekunder iszapba kerül, s a primer iszappal keverve kerül rothasztásra. Kedvező a tisztítás energiámérlegénél, hogy az ilyen előülepítés után az eleveniszapos egység villamosenergia-igénye is arányosan kisebb, s a keletkező biogázzal a tisztítás villanyáramigénye teljes mértékben is fedezhető. Mindkét esetben gond lehet ugyanakkor a biológiai lépcsőből elfolyó tisztított víz maradék lebegő szervesanyag-tartalma (KOI), amit szükség esetén ultraszűrővel lehet tovább csökkenteni. Az ilyenkor keletkező, kis ammóniumkoncentrációjú öntözővizek újrahasznosítása különösen szárazabb klímánál, tápanyaghiányos talajoknál lehet gazdaságos. Ehhez azonban biztosítani kell területet, valamint a kihelyezés lehetőségét is. Az iszaprothasztás iszapvizét ilyenkor is a tisztítás főágára célszerű visszaforgatni mindaddig, amíg ammóniumtartalma visszanyerésére biztonságos, gazdaságos megoldások nem kerülnek kidolgozásra.

A hagyományos szennyvíztisztítók technológiájának fejlesztése az elmúlt években az aerob eleveniszapos rendszerek iszapszeparációjának analógiájára elvben gyorsan eljutott az anaerob membrán bioreaktorokhoz (AnMBR). A membrán ekkor is az iszap visszatartását végzi, míg a reaktorban a folyamatok ennél is folyadékfázisban játszódnak le. Az anaerob átalakítás jó KOI- (akár 80%-os) eltávolítást biztosít, minimális iszapkeletkezéssel, s a levegőztetés hiányában kis energiaigénnyel, közvetlen, maximális biogáztermeléssel. Az ammónium döntő, a foszfát

mérsékelt hányada a lebegőanyag-mentes szűrletbe kerül. Az anaerob membrán reaktoros előkezelés gazdaságilag kedvező, gyakorlatban alkalmazható költségtakarékos mérnöki megoldás a lakossági szennyvizek tisztítására. Alkalmazásánál sikerült 90% fölötti KOI- és 100% lebegőanyag-eltávolítást elérni minimális oldottammónium- és foszfatfelvétellel az iszapba. Az AnMBR tápanyaggazdag permeátuma friss vízként közvetlen mezőgazdasági öntözésre használható, ha a termőtalajokra történő kihelyezése a gyakorlatban megfelelően szervezhető, biztonságosan megoldható.

Az AnMBR permeátuma minden további kezelés nélkül egyidejűleg növényitápanyag- és öntözővíz-ellátást is jelent. A szennyvíz nitrogéntartalmának döntő része a kis ammóniumkoncentrációjú tisztított vízbe kerül. Friss számítások alapján ezzel a megoldással a világ tisztított lakossági szennyvizeinek 70%-a gyakorlatban elöntözhető lehet (Caldera és Breyer, 2019). Ez a mennyiség a világ jelenlegi öntözővíz-felhasználásának a 16%-át helyettesítheti, növelve a mezőgazdasági termelés fenntarthatóságát. Értelemszerűen az AnMBR-technológia metántermelése annyi energiát produkál, ami a technológia üzemeltetéséhez elegendő. 400 mg KOI/l szennyezettségű lakossági szennyvízből köbméterenként 0,327 kWh villanyáram termelődik (Liu et al., 2020). A permeátum minősége városi lakóterületek öntözésére történő felhasználását is lehetővé teszi, csökkentve ott is a környezet zöldterületté tételéhez szükséges növényi tápanyag és öntözővíz igényét. Mindezek a szennyvíztisztítás körkörös gazdaságba illesztésével a teljes ammónium-visszanyerés és felhasználás irányába hatnak.

AMMÓNÍUM FOTOTRÓF BIOMASSZÁBA ÉPÍTÉSE (ZHANG ET AL., 2021)

A lakossági szennyvíz hagyományos biológiai tisztítása (BNR) során nitrogéntartalmának nagyobb része elemi nitrogénné alakul, míg kisebb része redukált nitrogénként beépül a keletkező iszapba. Az előzőnél is zártabb körkörös gazdálkodás teljesen megváltoztatná ezt a gyakorlatot. Ekkor a főágon az ammóniumot a szerves anyag felhasználásával még nagyobb mennyiségű biomasszába építenék be (Liu et al., 2018). Megoldás lehet ekkor fototrófokkal (fototróf baktériumok, mikroalgák stb.) történő tápanyagfelvétel, -beépítés. Ezek a fototrófok (foto-autotrófok, foto-heterotrófok és kemo-heterotrófok) különböző környezeti feltételek között is képesek megélni, szaporodni a lakossági szennyvizekben,

bár a 10 körüli KOI/N arányú szennyvizeknél az alkalmazhatóságuk még nincs kellően bizonyítva. Hülsen és társai már 2016-ban vizsgálták ezért az egyik szóba jöhető fajt (purple phototrophic bacteria – PPB) a lakossági szennyvíz szerves anyagának és növényi tápanyagainak az együttes eltávolítására. Úgy találták, hogy 100 g oldott KOI, 6,4–1,3 g NH₄-N és 1,2–0,2 g foszfát-P immobilizálására voltak képesek 8–24 órás hidraulikus tartózkodási idővel (HRT), miközben a vizes fázis KOI-ja 50 mg/l alá került, nitrogén- és foszfortartalma pedig 5 és 1 mg/l alá csökkent.

Más típusú bioreaktoroktól eltérően a fotobioreaktorok teljesítménye nagyban függ a reaktor mikroorganizmusokkal töltött részének a fényellátottságától. A mérések alapján a PPB-faj 16 g KOI-val 1 g nitrogént tud asszimilálni (Hülsen et al., 2016; Lu et al., 2018). Mint ismeretes, a lakossági szennyvizekben a KOI/ammónium-N arány 10 körüli, tehát a PPB-k nem tudják abból a teljes ammóniummennyiséget beépíteni. Ez segéd szerves tápanyag adagolását teszi szükségessé. Erre az etanol bizonyult alkalmasnak. Egyébként az ilyen tisztításhoz célszerű lehet egy előfermentáció is, mivel a PPB-k csak szerves savakat, alkoholokat, a cukrot tudják szerves tápanyagként hasznosítani. A gyakorlatban tehát nagyipari alkalmazásuk a feladatra nem kellően pontosított, meglehetősen kockázatos.

Ismeretes azonban, hogy a fototróf baktériumoktól eltérően a foto-autotróf mikroalgák a nitrogént és a foszfort szerves anyag nélkül is asszimilálni tudják. A mikroalga-szuszpenzió azonban rosszul ülepedik, nehezzé teszi a fázisseparatorációt, nagy üzemi térfogatokat, nagy HRT-t tesz szükségessé. Ezért a velük dolgozó technológiák ennek a problémának a csökkentésére membrán foto-bioreaktorokként, valamint immobilizált rendszerként (pl. biofilmek, alga-baktérium együttesek vagy granulált tenyészetként) kerültek kiépítésre. Az alga-baktérium kevert kultúrák esetén a rendszer önellátó az oxigénigényében (alga oxigéntermelése), míg a baktériumok által termelt szén-dioxidot is felhasználja tápanyagként.

Napjainkban jelentős érdeklődés tapasztalható a kombinált tenyészetek granulált vagy biofilmes kialakítása iránt. Ezeknél a jó iszapülepedés miatt egy kisebb iszapülelepítő is beépíthető a rendszerbe. Ilyen biofilmes vegyes tenyészetnél a reaktorba víz alatti LED-fényforrást beépítve 24 óra alatt 90%-os KOI- és ammóniumbeépítést, vízfázisból történő eltávolítást tudtak elérni (Gou et al., 2020). Más hasonló rendszernél ezt a tisztítóhatást hat óra alatt is produkálták hasonló hatásokkal, sőt még

a foszfor eltávolítása is megtörtént (Ji et al., 2020). Az ilyen rendszerek mindezek mellett minimális üvegházhatásúgáz-kibocsátással is rendelkeznek. A fenti teljesítménynöveléssel a mikroalga-baktérium granulált iszapos megoldás területigénye is a hagyományos eleveniszapos megoldásokénak a 77,5%-ára volt csökkenthető (Zhang et al., 2021). Következésképpen ezek a megoldások a jövőben gyakorlati jelentőségűek lehetnek a lakossági szennyvíztisztítás, egyidejű tápanyag-visszanyerés és szén-dioxid-kibocsátás-csökkentés érdekében.

FÖLÖS ELEVENISZAP MINT NYERSANYAG ÉS ENERGIAFORRÁS

A szennyvíztisztítás az elmúlt évtizedek fejlesztései révén napjainkban világszerte megfelelően tudja biztosítani a környezet védelmében előírt befogadói határértékeket. A biológiai tisztításnál keletkező iszap mennyisége ugyanakkor jelentős, s elhelyezésének, újrahasznosításának a korlátai miatt egyre nagyobb probléma. Megfelelő feldolgozása, csökkentése ezért a kutatásoknak továbbra is fontos feladata. Erre napjainkban a hagyományos mezofil vagy termofil anaerob iszaprothasztás mellett az ugyancsak termofil autoterm aerob rothasztás és a környezeti hőmérsékleten is kivitelezhető lúgos iszaphidrolízis is megoldást biztosíthat. Az anaerob iszaprothasztásnál a szervesanyag-tartalom mintegy fele biogázzá alakul, s mellette jelentéktelen a főágra történő szervesanyag-visszaforgatás.

A másik két megoldásnál a szervesanyag-tartalom kisebb része bomlik kisebb oxidált molekulákká, illósavakká, s azok nem alakulnak tovább metánná. A keletkező, vízfázisba kerülő oldott komponenseket ezeknél is vissza kell forgatni a tisztítás főágra. Ott szerencsére előnyös is lehet a visszavételük a nitrifikáció/denitrifikáció tekintetében, elsősorban a denitrifikáció KOI-igénye, sebességének gyorsítása biztosítására. Lehet azonban visszaforgatásuknak további, ma még alig pontosított előnye is. Éppen hazai vizsgálatok bizonyították, hogy mint koszubsztrát jelentősen növelhetik a hagyományos eleveniszapos tisztítás mikrotapanyag-, gyógyszermaradvány-eltávolítását (Bezsenyi et al., 2021a; 2021b). Természetesen ezzel a hatásukkal nemcsak a tisztított víz ilyen szennyezettségét csökkentik jelentősen, hanem az iszapét is. Tehát mind a tisztított víznél, mind a maradékiszapnál az anyag-visszaforgatás, körkörös gazdálkodás lehetőségét segítik elő.

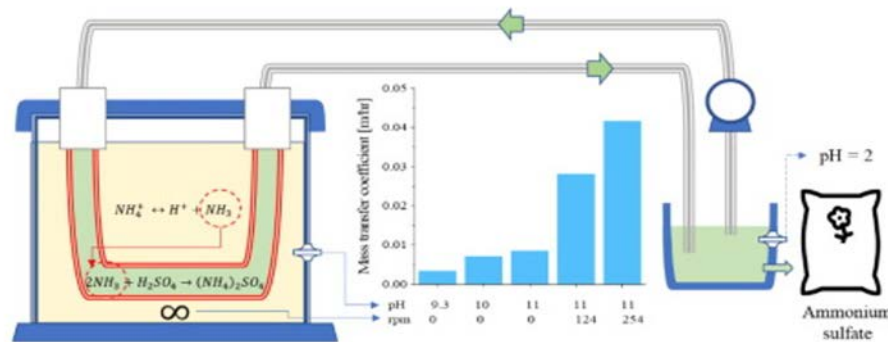
ANAEROB ISZAPROTHASZTÁS ÉS AMMÓNIA-VISSZANYERÉS A ROTHASZTÁS ISZAPVIZÉBŐL

A hagyományos eleveniszapos szennyvíztisztítás fölösiszap (WAS) termelésével jár. A szennyvíz nitrogén- és foszfortartalmának egy része beépül az iszapba a mikrobiológiai szintézissel. Ez azt is jelenti, hogy a szennyvíz ammónium-nitrogénjének csak 10–15%-a (átlagosan 12,5%) vonható ki abból, s használható fel a fölösiszappal (Fazekas et al., 2014). Ez az iszapba zárt, koncentrált ammónium hasznosítható a mezőgazdaságban a szintetikus műtrágya helyettesítésére. A világ különböző országaiban a szennyvíziszap ilyen felhasználásának mértéke igen változó az elhelyezés egyre fokozódó szigorításai, valamint az iszap égetésének szükség-szerű fokozása eredményeként. Az iszap szennyezéseinek következtében (patogének, nehézfémek, gyógyszermaradványok, antibiotikumok) gyakran szükség van az iszap kihelyezés előtti előkezelésre (stabilizálás, inaktíválás, rothasztás, komposztálás).

A szennyvíztisztítás gyakorlatában az iszap anaerob rothasztása a nagyobb szennyvíztisztítóknál napjainkban általános. A belőle keletkező biogáz (~65-70% metán és mellette döntően szén-dioxid) gázmotorokban villanyárammá alakítva az aerob tisztítás levegőztetési költségét közelítőleg fedezi. Ez az energia-visszaforgatás a gyakorlatban évtizedek óta biztonsággal működik. A rothasztás iszapvize mintegy 500-1500 mg/l ammóniumot, 50-100 mg/l körüli foszfátot és pár száz mg/l KOI-t tartalmaz. N és P koncentrációja nagyon kicsi a visszanyeréshez, ennek ellenére a foszfát struvitos kicsapatása alkalmazott gyakorlat. Részben oka ennek, hogy a struvit jelentősebb Mg-tartalmú szennyvizeknél az iszapvízből ki is válhat, eltömődéseket okozhat, ami komoly műszaki problémákat eredményezhet a rothasztóknál.

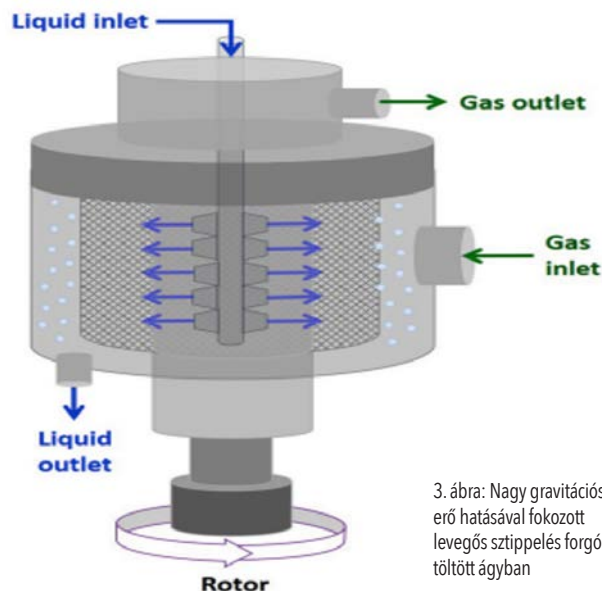
Legnagyobb probléma az iszapvíz még viszonylag így is kicsi ammóniumkoncentrációja, bár a melegebb vízhőmérséklet a sztrippelés tekintetében kedvező. A mai gyakorlatban az iszapvizet a tisztítósor elejére vezetik vissza, s így a főágon ammóniumtartalmának a biológiai eltávolítása a

2. ábra: A gázmembrános ammóniumeltávolítás elvi kialakítása és a pH, és keverés hatása az ammónia anyagáramára (Munasinghe-Arachchige et al., 2021)



korábban már említett problémákat okozza (energiaigény, N₂O-emisszió stb.). Elvileg fennáll a lehetősége, hogy ebből a vízből az ammóniumot gázmembrán segítségével részlegesen eltávolítsák. Ez a lehetőség a második ábrán látható (Munasinghe-Arachchige et al., 2021). Az iszapvíz pH-jának emelése is szükséges azonban a jó NH₃-átvitel biztosításához. Az iszapvíz mezofil hőmérséklete ehhez kedvező.

A gázmembrán rendszerint appoláros anyagból finomcsöves kialakítással készül, aminél a gyakorlatban sokféle rendszer is kiépíthető (Munasinghe-Arachchige és Nirmalakhandan 2020; Liu et al., 2020). Az

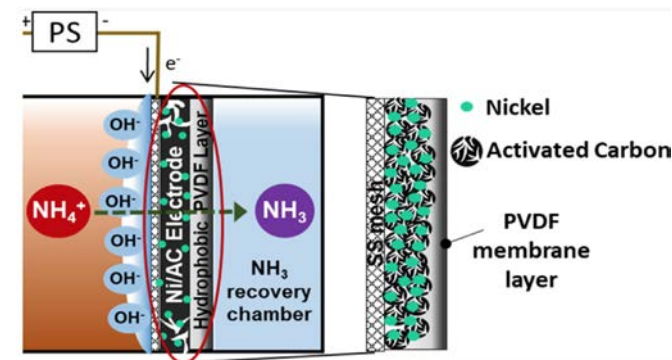


3. ábra: Nagy gravitációs erő hatásával fokozott levegős sztrippelés forgó töltött ágyban

ammónium iszapvízből levegős vagy vízgőzös sztrippeléssel történő eltávolítása esetén is az elnyeletése célszerűen híg kénsavas oldatban történik. Ugyanígy kerül sor az ammónia koncentrálására az iszapok szárítása során légtérbe kerülő ammónia esetében is megfelelően kialakított sztrabberekben, mosótornyokban. Az elnyelető egység, majd azt követő biofilteres gáz továbbtisztítása a veszprémi szennyvíztisztító szolár szárítójának a gáztisztítójában is látható. Az ammónia sztrippelése megfelelően lúgos pH mellett levegővel és vízgőzzel is biztosítható. A levegő ammóniakihordását, -transzportját egy forgó töltött szeparátoroszlopban növelni tudták a centrifugális erő hatásával. Ezt elvében mutatja a 3. ábra (Chen et al., 2021).

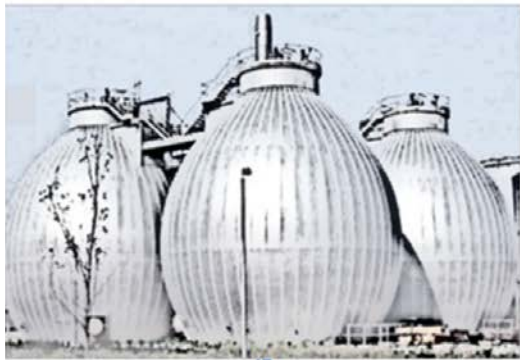
A membránon történő ammóniaátvitel napjainkban a membránrendszer speciálisabb kialakításán túl elektrokémiai hatással is fokozzák. Ennek az elvi kialakítása a 4. ábrán látható (Kim et al., 2021). Ebben az esetben több különleges megoldást is sikeresen alkalmaztak egyidejűleg a membrán kialakításánál. A katód előtt mechanikus szűrőréteg biztosítja a kombinált katód felületi tisztaságát, tartós üzemeltethetőségét. A nikkellel telített aktív-szén-elektrod jó áramvezetést és gyors elektronleadást tesz lehetővé, míg a mögötte kialakított speciális anyagú gázmembrán megfelelő hidrofóbítást és gázáteresztést biztosít. A membránon elterülő ammóniát a folyadékfázisban többnyire kénsavban nyeletik el. Az utóbbi is fontos az ammónium transzportját segítő hajtóerő tekintetében. Ezek mellett fontos a katód ellenkező oldalán kialakuló tér hidroxidtelítettsége, amely az ammóniumionok ammóniává alakításának az egyensúlyi viszonyait befolyásolja.

4. ábra: Elektrokémiai rásegítéssel működő gázmembrán és finomszerkezetének kialakítása

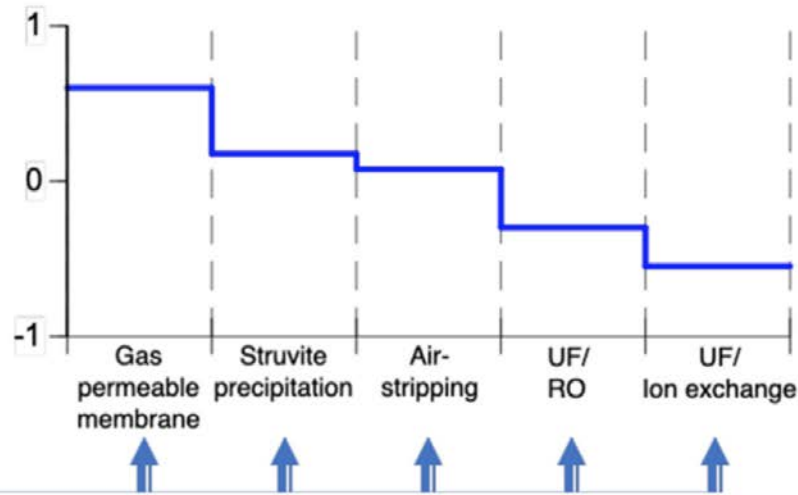


Munasinghe-Arachchige és Nirmalakhandan (2020) az anaerob iszaprothasztás iszapvizéből történő ammónium-visszanyerésről publikált igen nagyszámú közlemény-összehasonlító vizsgálata alapján megállapították, hogy a legnagyobb realitása a gyakorlati megvalósításra a gázmembrános szeparációnak van, melyet a sztrippelés nagyon elmaradva követ. A struvitos kicsapatás az utóbbinál is kisebb célszerűséggel javallott (5. ábra). Az ultraszűréssel kombinált fordított ozmózis és ioncsere pedig ma még nem tűnnek gazdaságosnak.

5. ábra: A szennyvíziszap-rothasztás iszapvizéből történő ammónia-visszanyerés jelenlegi célszerűségének értékelése



Multi-criteria ranking



AUTOTERM AEROB SZENNYVÍZISZAP-ROTHASZTÁS

A főlösizap feldolgozása s azzal mennyiségének csökkentése érdekében napjainkra kidolgozták a magas hőmérsékleten történő aerob iszaprothasztást is. Az ATAD az anaerob rothasztástól eltérően magas hőmérsékletű, levegővel történő oxidációt végez (Pembroke et al, 2019). Történhet ez egy vagy két lépcsőben is. Az utóbbinál az első lépcső lehet mezofil is. Az anaerob rothasztáshoz hasonlóan az ATAD-nál az iszap szerves anyagának mintegy fele kerül átalakításra, oxidációra, csökkentve a maradék iszap mennyiségét (Liu et al, 2019). A szerves anyag egy részének oxidációjánál keletkező hő biztosítja az iszap fel-fűtését. A gyakorlatban inkább annak a hűtését, termosztálását kell megoldani. Az oxigénbevitel határfoka persze a hőmérséklet növekedésével nagymértékben romlik (speciális levegőztetés, ami egyidejű-

leg habtörést is végez). Az iszap átlagos tartózkodási ideje az oxidáló reaktorban 7-8 nap, tehát kevesebb mint fele az anaerob rothasztásának. A reakciótermékek a rendszerből a szén-dioxid-tartalmú forró gázzal, valamint az ugyancsak forró iszapvízzel távoznak.

A gázt/gőzt rendszerint az ATAD-egységet megelőző eleveniszapos medencékbe fúvatják vissza, ahol a bontható komponenseit az eleveniszap eltávolítja a vízfázisból, szén-dioxiddá és szennyvíziszappá alakítja. Az ATAD gáztermékének a kondenzációja után abból akár gázmembrá-

nos ammónium-visszanyerésre is lehetőség nyílhat, bár ezzel ma még nem foglalkoznak. Az iszapvíz-centrifugálás után szintén visszaforgatható az eleveniszapos biológiai tisztításra, de lehetőség van annál struvitos foszforkicsapatásra, valamint az ugyancsak gázmembrános ammónium-visszatartásra is. A gázmembránok jelenlegi elterjedtsége hiányában azonban az utóbbira sem igen került eddig sor. Persze gondot jelenthet az iszapvíznél annak jelentős lebegőanyag-tartalma, amit általában semmilyen membrán nem igazán szorít. Gyakorlat viszont az iszapvíz alacsonyabb hőmérsékleten magnézium-kloriddal történő foszformentesítése, valamint abból az ammónium hagyományos biológiai eltávolítása (mezofil ciklikus nitrifikáció/denitrifikáció). Az utóbbihoz kedvező ilyenkor a mezofil vízhőmérséklet és az egyidejű kedvező illósav-ellátottság is.

További lehetőség lehet az ATAD-nál a forró iszapvíz desztillációja. Megfelelő folyamatvezetés esetén az iszapvízbe kerül a gyors bomlásnál keletkező illósavak jelentős része, amely tovább feldolgozással háztartásban használható mosó-, tisztítószerekként hasznosítható. Ilyen megoldás kivitelezésére ma már hazánkban is van példa az észak-pesti lakossági szennyvíztisztítóban, s az így gyártott ecetsavas tisztítószert kereskedelmi forgalmazása is megoldott. Az ATAD estében a nagy hőmérséklet ugyanakkor kedvező a szennyvíziszap termikus stabilizálásának, további kezelésének, hasznosításának. A nagy hőmérsékletű oxidáció jól fertőtlenített iszapot termel, mely a centrifugáról szárítóba juttatva a saját hője, valamint a termosztálásnál elvont reakcióhő segítségével is szárítható. Ha a szárítást szolár szárítóban végzik, a kiépítés a szárításnak tovább kedvez, így a nap energiáját is valamelyest hasznosítani lehet. Az így előállítható stabilizált, fertőtlenített termék a mezőgazdaságban jól hasznosítható (Csornai Szennyvíztisztító Telep – Magyarország). Az ATAD hátránya, hogy elég költséges a berendezés kiépítése, továbbá hasonló az oxigénbevitel is, mert a nagy hőmérsékleten az oxigén rosszul oldódik az iszapvizbe. A termofil oxidációhoz megfelelő lebegőanyag-koncentrációjú iszapot kell bevinni az ATAD-reaktorba (kellő hőtermelés biztosítása), ami elővíztelenítést igényel. Az oxidált iszap meg talán még nehezebben vízteleníthető, mint az anaerob rothasztás iszapja. Ez jelentős segédvegyyszer-felhasználást (koaguláns és polielektrolitot) igényel. Talán ezért is abban az üzemméret-tartományba ajánlják, ahol a termelt iszap még kevés az anaerob rothasztás, villanyáram-termelés kiépítéséhez. Megoldás lehet ugyanakkor kisebb régióban keletkező iszapok gyűjtése, majd abból az ATAD-dal közvetlenül hasznosítható sterilizált szilárd termék mezőgazdasági hasznosításra történő előállítására. Természetesen ezt is főági szennyvíztisztításhoz kell kötni a lefűjt gáz és az iszapvíz feldolgozása érdekében. Ott az elmúlt időszak laboratóriumi mérései alapján koszubsztrátként nehezen bontható szennyezők lebontását hasznosan segítheti (Bezsenyi et al., 2021a; 2021b).

Jelenleg a nitrogénmentes segédanyaggal történő szennyvíziszap-komposztálás, valamint a komposztálás és bioszártás kombinációja tűnik célszerű iszapkezelésnek. A komposztáláshoz szükséges C:N arány beállítása természetesen az utóbbinál is fontos, mert a többletanyag egyrészt emeli a halom hőmérsékletét, másrészt csökkenti annak

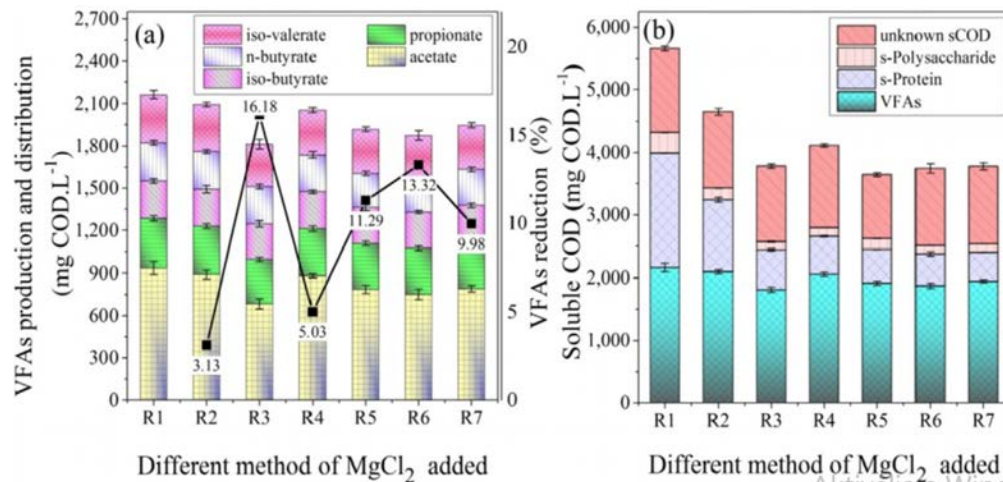
az ammóniumkibocsátását (Fazekas et al., 2014). A gyorskomposztálás elszívott meleg gázából az ammónia 80%-a hideg vízzel is elnyelhető, híg savas mosásával teljesen visszanyerhető, mezőgazdaságban hasznosítható. A komposztálás és a bioszárítás kellően költséghatékony lévén a világ számos országában alkalmazásra került. Az iszapnak persze jelentős nehézfémzennyezése lehet (például Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb és Zn), különösen jelentősebb ipari szennyvíz-terhelések esetén. Ahol azonban az aktuális szabályozók lehetővé teszik (kevésbé iparosított térségek) az előkezelt szennyvíziszap biztonságos hasznosítását, az eléggé elterjedt gyakorlat. Az ellenőrzésére azonban mindig szükség van a talajok, talajvizek és a növényi termékek minőségének a biztonságos védelme érdekében.

SZENNYVÍZISZAP LÚGOS HIDROLÍZISE, FERMENTÁLÁSA

Az iszaphidrolízis célja kezdetben talán csak a szilárd iszap egy részének illósavakká alakítása volt, hogy azokkal a tisztítás főágának tápanyagellátását javítsák, iszaphozamát a ciklikus lúgos fermentációval csökkentsék (Lin et al., 2018). Az ilyen hidrolízisnek azonban hátránya a keletkező fermentum rossz ülephetősége, valamint folyadékfázisának nagy ammónium- és foszfáttartalma, amely a főágra visszaforgatva annak a tápanyagterhelését jelentősen növeli. Kétértékű Mg adagolása nagyban javít a fázisszeparáción (Ruhyadi et al., 2019; Yuan et al., 2019). Részben a negatívan töltött részecskék destabilizálásával, részben a keletkező struvit nehezítő és szűrő hatásával. Wang és társai (2018) szerint a magnézium adagolására célszerű a fermentáció végén sort keríteni. Korábban adagolva inhibitorhatást gyakorol a fermentációra, kisebb illósavhozamot eredményezve (Ruhyadi et al., 2019). A Mg²⁺ az anaerob mikroorganizmus fajok makrotápanyaga, viszont túlzott koncentrációja azok aktivitását jelentősen csökkentheti (Hendriks et al., 2018). Chen és társai (2020) ezért a MgCl₂ időben elnyújtott adagolását vizsgálták laboratóriumban, s nagyon kedvező hatásáról számoltak be (Chen et al., 2020).

Mintegy 1,27% szervesanyag-tartalmú főlisziszap lúgos hidrolízisét vizsgálták, amely szilárd részének 23 g/l volt a KOI-ja 0,7 g oldott KOI mellett. Az ammónium koncentrációja (oldott fázis) 21 mg/l volt, de

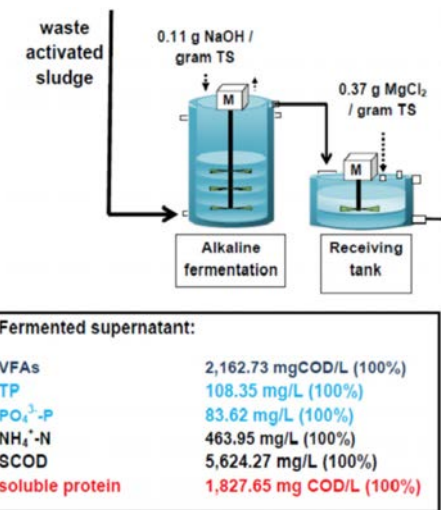
tartalmazott 35 mg/l oldott fehérjét és 43 mg/l oldott poliszacharidot is. Oldott foszfáttartalma 10 mg/l volt. A fermentáció különböző fázisaiban adagolva összesen 0,11 g NaOH/összes szilárd anyag adagolására került sor. A vizsgálat közben és végén is ellenőrizték a keletkezett illósavak koncentrációit a folyadékfázisban, valamint az abban mérhető



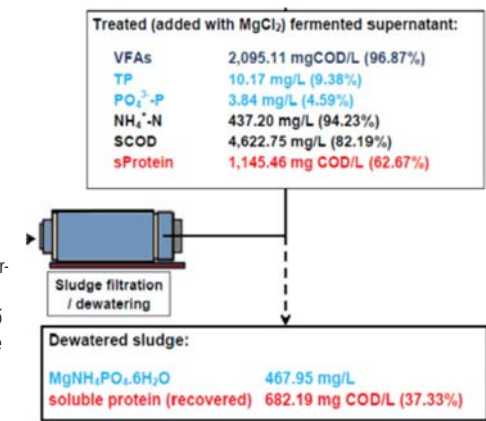
6. ábra: Illósav termelése, azok megoszlása: a – a vízfázis illósavmennyiségeinek KOI-ja, b – a kilencnapos fermentáció végén ért értékek (Chen et al., 2020)

KOI-t. Ezek mellett részletesen vizsgálták a folyadékfázisok egyéb oldott komponenseinek a minőségét és mennyiségeit. A mért adatokat a 6. ábra mutatja.

Az adatokból megállapítható, hogy az eredeti szilárd szervesanyag-tartalomnak (23 g/l KOI) mintegy a negyede került oldott fázisba, s annak is mintegy fele lett az illósavak összes mennyisége. Viszonylag nagyobb mennyiségben került oldott állapotba az iszap szilárd része a hidrolízis során. Viszonylag sok fehérje is beoldott a szilárd fázisból, míg sokkal kevesebb lett abban az oldott poliszacharid. A vizsgálatnál nem pontosították az ugyancsak jelentős mennyiségben keletkezett ismeretlen egyéb oldott szennyezőket. A fermentáció során az oldatba kerülő ammónium és foszfát mennyisége az oldatokban folyamatosan növekedett, s a fermentáció 7-9. napja körül vált beoldódásuk maximálissá.



7. ábra: A lúgos iszaphidrolízis iszapvizének az összetétele



8. ábra: Magnézium-kloridos kicsapás és a centrifugálás után keletkező centrifugavíz összetétele és a víztelenített iszapba kerülő nitrogéntartalmú termékek mennyiségei

Az ábrán látható koncentrációk a fermentációhoz felhasznált főlisziszap 25 mg/l oldott ammónium és 10 mg/l oldott foszfor tartalmából növekedtek sokszoros értékeikre a fermentáció során. Láthatóan az egyes komponenseket ezután 100%-nak véve vizsgálták a magnéziumos kicsapás és azt követő centrifugálás hatását a csurgalékvíz szervesanyag-, illósav- és növényitápanyag-tartalmára. Mint említésre került, a főlisziszap lebegő szerves anyagának mintegy a negyede került csak oldott állapotba a fermentációnál (6–7. ábra). A többi a centrifugálás szilárd termékébe került, de a 8. ábra azt nem mutatja,

csak a megelőző ábrán látható komponensek további sorsát. A $MgCl_2$ hatására kicsapódott lebegőanyagok az ábra csak a struvittartalmát mutatja, aminek mintegy a 7%-a nitrogén és 14%-a foszfor. Az oldott fehérjének ezek mellett az 1/6,24-edé a nitrogén. Megállapítható, hogy ezzel a megoldással a foszfor mintegy 90%-a szilárd fázisba vihető és a mezőgazdaságban hasznosítható. A fermentált iszap maradéka ugyanis megfelelően sterilizálásra kerül a lúgos hidrolízis révén. Nem mondható el ugyanez a nitrogénről, melynek 94%-a a centrifugavízben marad. Abban a koncentrációja ugyan legalább 5–10-szerese a lakossági szennyvizének, de a gazdaságos nitrogén-visszanyeréshez még mindig kevés. Zavaró hatása ugyanakkor a mellette tízszer nagyobb koncentrációban jelen levő illósavak, oldott fehérjék, poliszacharidok és egyéb ismeretlen szerves anyagok mennyisége. Ennek a folyékony mellékterméknek a felhasználása a szennyvíztisztító főágán képzelhető el, illetőleg javasolt, bár a KOI/TKN aránya 12–13 körüli, de azzal már megfelelő tisztítás biztosítható napjainkban. Mint korábban említésre került, koszuabsztrátként jelentős mikrotápanyag-, gyógyszermaradvány-csökkentést eredményezhet (Bezsenyi et al., 2021a; 2021b). Az illósavak termelésének és újrafelhasználásának egyébként több évtizedes gyakorlata van a szennyvíztisztításban, de eddig csak a denitrifikáció támogatására került elsősorban alkalmazásra. A környezetünk szennyezésének az utóbbi időszakban mikroszennyezőkkel, gyógyszermaradványokkal történő fokozódása azonban Európa fejlettebb országaiban már szükségessé tette a lakossági szennyvíztisztítás negyedik fokozatának a bevezetését is. Ebben az aktív szén adszorpció és az ózonos kezelés vezet napjainkban (Pesqueira et al., 2020; Gutierrez et al., 2021; de Boer et al., 2022). Ezek semmiképpen nem az anyag-visszaforogatás irányában jelentenek előrelépést, csupán ezeknek a kritikus anyagoknak és részlegesen lebontott származékainak az eltávolítását, adszorbensen történő rögzítését jelentik. A negyedik lépcső szükségessége, költségeinek alakulása fogja a jövőben eldönteni, hogy a hivatkozott koszuabsztrátos szennyezőanyag-lebontás, illetőleg az ahhoz történő koszuabsztrát termelésnek mennyiben lesz realitása a távolabbi jövőben.

FŐÁGI N- ÉS P-VISSZANYERÉS LEHETŐSÉGEI A SZENNYVÍZTISZTÍTÁSNÁL

Az eddigiekből egyértelmű, hogy a foszfát visszanyerése (eltávolítása) kémiai és biológiai úton is lehetséges, de az a szennyvíziszapba kerül. Abból az eddig bemutatott módszerekkel nyerhető vissza. Komolyabb gond az ammónium főági visszanyerése, ami ott a közeljövőben még megoldhatatlannak tűnik. Távolabbi lehetősége természetesen fennáll, de ahhoz még az ioncsere, az adszorpció és a bio-elektrokémiai módszerek jelentősebb fejlődésére van szükség. Az ioncserét illetően egyre kecsegtetőbb a helyzet, mert a klasszikus zeolitos ioncserélők módosításaival is nagy fejlődés jelentkezett, de talán annál is ígéretesebb az ioncserélő polimerek fejlesztése (Cruz et al., 2019, 2021, Zhou et al., 2021). Napjainkban már gyártanak olyan gélszerű polimer ioncserélőket, melyek ioncserélő kapacitásukban jóval meghaladják a természetes alapúakat. Elvükben a polielektrolitokhoz hasonló megoldással állítják elő azokat. Anionos vagy kationos funkciós csoportokat építenek be a monomerek egy hányadába, s ezt követően polimerizálják a keveréket a kellően nagy molekulaméretig. A gond az ioncserélőkkel az, hogy érzékenyek a tisztítandó folyadék lebegő és oldott szerves szennyezőire is. Ezért célszerű az ioncserélők előtt megfelelő membránszűrést kiépíteni. Ez a beruházási és üzemeltetési költséget is jelentősen növeli. A szűrőmembrán maga is érzékeny az eltömődésre, ami ugyancsak gond az üzemeltetésnél, ciklikus tisztításánál. Az ioncserét mind ammóniumra, mind foszfátra is ki lehet építeni (anion- és kationcserélők). A ciklikus regenerálások megfelelő regeneráló vegyszerigényt jelentenek. Törekcsenek ezért a regeneráló oldatok minél többszöri felhasználására, amivel a vegyszerigény, illetőleg költsége jelentősen csökkenthető.

Az ioncsere mellett favorizálják az adszorpciót is. Erre olyan természetes anyagokból, növényi maradványokból előállítható félkokszot próbálnak felhasználni, amelyet azok telítődése után közvetlenül fel lehet használni a mezőgazdaságban (Zhang és Liu 2021). Ilyenkor is elengedhetetlen azonban az adszorbenssel szűrt víz megfelelő utótisztítása, amely membránszűrés is lehet az előbb már említett problémáival. Az így tisztított vizeket azután ózonizálhatják vagy elektrokémiai tisztításoknak is alávetetik. Az RO, valamint a teljes sómentesítés is elképzelhető befejező finomításokként ilyen esetekben. Ezeknek a beruházási és üzemeltetési költsége a bonyolult berendezéskialakítás

miatt ma még a gyakorlatban megfizethetetlen, pontosabban messze meghaladja a hagyományos eleveniszapos szennyvíztisztítás költségeit. Ezek fejlesztése, gyakorlati üzemeltetésre alkalmazásra alkalmas tétele a szennyvíztisztításban ezért napjainkban inkább csak álom, ott is elsősorban a kutatások szintjén.

KONKLÚZIÓ

Az elmúlt században, az eleveniszapos szennyvíztisztítás felfedezése, elterjedése óta a nitrogéntartalma eltávolításának az egyedüli módja az ammónium biológiai úton, nitrifikáció, majd denitrifikáció révén nitrogéngázzá történő alakítása volt. Ezen az elmúlt századfordulót követően kidolgozott rövidebb úton nitritáció, majd anaerob ammóniumoxidáció összekapcsolásával, energiatakarékosabban történő nitrogéneltválítás sem változtatott lényegében. Sikertült ugyan ezekkel az élővizekbe kerülő reaktív nitrogénformákat egészségünk és a környezet védelméhez megfelelő alacsony koncentrációkra csökkenteni, de az emberiség jövőjét meghatározó körkörös gazdálkodása, a szennyvíztisztítás fenntarthatóságával semmiképpen nem egyeztethető. Hasonlóan fontos, hogy az eleveniszapos és más biotechnológiai szennyvíztisztítások számos környezeti és technológiai korlátokkal is rendelkeznek. Alapproblémájuk a nitrogénvegyületek inertizálásával az, hogy azzal a szennyvíz teljes kémiai energiataralmának a 38–48%-a gyakorlatilag veszendőbe megy. Sajnos az átalakítás során valamilyen N_2O is termelődik, amely igen erős üvegházhatású gáz, s ennek az emissziójával a szennyvíztisztító üzem karbonlábnyomának a 14–26%-át is kiteheti. Ez nagyságában megegyezhet a tisztítás villamosáram-fogyasztásához elhasznált energia, illetőleg annak során keletkező CO_2 -karbonlábnyom egyenértékével. A biológiai szennyvíztisztításnak ezek a hátrányai új, ammónium visszanyerésére alkalmas alternatív megoldások fejlesztésére sarkallták az elmúlt évtizedekben a kutatást, melyhez a későbbiekben nyilvánvalóan a visszanyert ammónium, s vele kombináltan ugyancsak eltávolítható, visszanyerhető foszfát mezőgazdasági újrahasznosításának a lehetősége is pontosításra kell kerüljön. Sajnálatos, hogy a napjainkig kidolgozott ammónium-visszanyerési megoldások csak a lakossági szennyvíznél egy nagyságrenddel nagyobb ammóniumkoncentrációjú vizek esetében alkalmazhatók. Ezért egyre sürgetőbb új fizikai-kémiai megoldások kidolgozása, melyek ugyanakkor gazdaságosak is a jelenlegi eleveniszapos megoldá-

sokkal összehasonlítva. Az ammónium sztrippelés, gázmembrános szeparációja nem tűnik a tisztítás főágán gazdaságosnak, viszont az utóbbit elektrokémiai megoldásokkal kombinálva javulhat annak a felhasználhatósága. Ugyanez igaz az ioncserélők, adszorbensek felgyorsult fejlesztése révén kialakítható mellék- és főági megoldásokra is, bár ma ezeknél a vegyszerköltség még elég jelentős, s a regenerátumok felhasználhatósága sem kellően megoldott. Az energiaárak és vele a nitrogénműtrágya árának az ugrásszerű növekedésével azonban a helyzet a jövőben gyorsan változhat. A világ foszfátforrásainak a mintegy egy évszázadon belül várható kimerülése ugyancsak az ionszere és adszorpció fejlesztésének az irányába hat. A szerves anyag valamilyen kinyerése, újrahasznosítása az iszapformát kivéve ma még gyermekcipőben jár. Annak a fejlesztését jelenleg elsősorban az szorgalmazza, hogy kevesebb legyen a mezőgazdaságban vagy egyebütt elhelyezendő iszapmaradék mennyisége. Ez az anyag döntően csak a mellékágon (koncentráltabb ammóniumtartalmú iszapvizekből) történő ammónium- és foszfátvisszanyerést vizsgálta, de röviden megemlítette, hogy mellettük a jövőben az iszapvizek oldott szervesanyag-tartalma is komolyan szóba jöhető kosubsztrát a napjaink szennyvizeiben egyre növekvő mennyiségű mikroszennyezők és gyógyszermaradványok eltávolításban.

HIVATKOZÁSOK

Bezsenyi A., Gyarmati I., Makó M., Takács E. (2021) Gyógyszermaradványok a szennyvízben – Csak a holnap kihívása? *Vízmű Panoráma* (6) 4

Bezsenyi A., Makó M., Takács E. (2021b) Mit tegyünk, ha nincs pénzünk negyedik tisztítási fokozat kialakítására. *Maszesz Hírcsatorna* (4) 5

Bodirsky, B. L., Popp, A., Campen, H., Dietrich, J. P., Rolinski, S., Weindl, I., Schmitz, C., Muller, C., Bensch, M., Caldera, U., Breyer, C. (2019) Assessing the potential for renewable energy powered desalination for the global irrigation sector. *Sci. Total Environ.* 694, 133598.

de Boer S., Gonzalez-Rodríguez J., Conde J. J., Moreira M. T. (2022) Benchmarking tertiary water treatments for the removal of micropollutants and pathogens based on operational and sustainability criteria. *Journal of Water Process Engineering* 46 (2022) 102587. doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102587

Chen T. L., Chen L. H., Lin Y. J., Yu C. P., Ma H. W., Chiang P. C. (2021) Advanced ammonia nitrogen removal and recovery technology using electrokine-

tic and stripping process towards a sustainable nitrogen cycle: A review. *Journal of Cleaner Production* 2021, 309, 127369. doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127369

Chen Y., Ruhyadi R., Shen N., Wu Y., Yan W., Liang Z., Huang J., Wang G. (2020) Three birds with one stone: Lower volatile fatty acids (VFAs) reduction, higher phosphorus (P) removal, and lower alkali consumption via magnesium dosing after waste activated sludge (WAS) alkaline fermentation. *Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120687. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120687

Cruz H., Gabon M. Y., Salehin S., Seviour T., Laycock B., Pikaar I. (2021) Magnetic poly(acrylic acid)-based hydrogels for rapid ammonium sorption and efficient sorbent separation from sewage. *Environmental Science and Eco-technology* 2021, 6, 100097. doi.org/10.1016/j.ese.2021.100097

Cruz H., Laycock B., Strounina E., Seviour T., Oehmen A., Pikaar I. (2020) Modified Poly(acrylic acid)-Based Hydrogels for Enhanced Mainstream Removal of Ammonium from Domestic Wastewater. *Environmental Science & Technology* 2020, 54 (15), 9573–9583. doi.org/10.1021/acs.est.9b07032

Cruz H., Law, Y.Y., Guest, J.S., Rabaey, K., Batstone, D., Laycock, B., Verstraete, W., Pikaar, I. (2019) Mainstream ammonium recovery to advance sustainable urban wastewater management. *Environ. Sci. Technol.* 53 (19), 11066–11079 doi:10.1021/acs.est.9b00603

Delre, A., ten Hoeve, M., Scheutz, C. (2019) Site-specific carbon footprints of Scandinavian wastewater treatment plants, using the life cycle assessment approach. *J. Cleaner Prod.* 2019, 211, 1001–1014.

Domingo-Félez, C., Smets, B. F. (2019) Regulation of key N2O production mechanisms during biological water treatment. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2019, 57, 119–126.

Fazekas B., Kovács Z., Kárpáti Á. (2014) Szennyvíztisztítás korszerű módszerei. *PE – Környezetmérnöki Tudástár XXXII. kötet*

Fazekas B., Kovács Z., Kárpáti Á. (2015) Biofilmes és hibrid módszerek a szennyvíztisztításban. *ibid.* XXXVI. kötet

Gou, Y., Yang, J., Fang, F., Guo, J., Ma, H., (2020) Feasibility of using a novel algal- bacterial biofilm reactor for efficient domestic wastewater treatment. *Environ. Technol.* 41 (4), 400–410.

Gutiérrez M., Grillini V., Mutavdžić Pavlović D., Paola Verlicchi P. (2022) Activated carbon coupled with advanced biological wastewater treatment: A review of the enhancement in micropollutant removal. *Science of the Total Environment* 790 (2021) 148050. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148050

Hendriks, A.T.W.M., van Lier, J.B., de Kreuk, M.K. (2018) Growth media in anaerobic fermentative processes: the underestimated potential of thermophilic fermentation and anaerobic digestion. *Biotechnol. Adv.* 36 (1), 1–13.

Hülsen, T., Barry, E.M., Lu, Y., Puyol, D., Keller, J., Batstone, D.J. (2016) Domestic wastewater treatment with purple phototrophic bacteria using a novel continuous photo anaerobic membrane bioreactor. *Water Res.* 100, 486–495.

Ji, B., Zhang, M., Gu, J., Ma, Y., Liu, Y. (2020) A self-sustaining synergetic microalgal- bacterial granular sludge process towards energy-efficient and environmentally sustainable municipal wastewater treatment. *Water Res.* 179, 115884.

Kim K. Y., Moreno-Jimenez D. A., Efstathiadis H. (2021) Electrochemical Ammonia Recovery from Anaerobic Centrate Using a Nickel-Functionalized Activated Carbon Membrane Electrode. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55, 7674–7680.

Lin, L., Li, R.-h., Li, X., (2018) Recovery of organic resources from sewage sludge of Al-enhanced primary sedimentation by alkali pretreatment and acidogenic fermentation. *J. Clean. Prod.* 172, 3334–3341.

Liu, M.J., Neo, B.S., Tarpeh, W.A. (2020) Building an operational framework for selective nitrogen recovery via electrochemical stripping. *Water Res.* 169, 115226. doi.org/10.1016/j.watres.2019.115226

Liu, S., Yang, X., Yao, X. (2019) Effects of pH on the biodegradation characteristics of thermophilic micro-aerobic digestion for sludge stabilization. *RSC Adv.* 2019, 9, 8379–8388.

Liu, Y.J., Gu, J., Liu, Y. (2018) Energy self-sufficient biological municipal wastewater reclamation: Present status, challenges and solutions forward. *Bioresource Technol.* 269, 513–519.

Munasinghe-Arachchige, S. P., Nirmalakhanda N. (2020) Nitrogen-Fertilizer Recovery from the Centrate of Anaerobically Digested Sludge. *Environmental Science & Technology Letters* 2020, 7 (7), 450–459.

Munasinghe-Arachchige, S.P., Abeyasiriwardana-Arachchige, I.S.A.; Delanka-Pedige, H.M.K.; Cooke, P.; Nirmalakhanda N. (2021) Nitrogen-fertilizer recovery from urban sewage via gas permeable membrane: Process analysis, modeling, and intensification. *Chemical Engineering Journal* 2021, 411, 128443

Pembroke J. T., Michael P., Ryan, M. P. (2019) Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion (ATAD) for Heat, Gas, and Production of a Class A Biosolids with Fertilizer Potential – Review. *Microorganisms* 2019, 7, 0215;

Pikaar, I., Matassa, S., Rabaey, K., Bodirsky, B. L., Popp, A., Herrero, M., Verstraete, W. (2017) Microbes and the Next Nitrogen Revolution. *Environ. Sci.*

Technol. 2017, 51 (13), 7297–7303.

Pesqueira J. R., Pereira F. R., Silva A. M. T. (2020) Environmental impact assessment of advanced urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: A review, *Journal of Cleaner Production* 261 (2020) 121078 doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121078

Ruhyadi, R., Chen, Y., Shen, N., Yan, W., Liang, Z., Wang, H., Wang, G., (2019) Multiple uses of magnesium chloride during waste activated sludge alkaline fermentation. *Bioresour. Technol.* 290, 121792.

Schaubroeck, T., De Clippeleir, H., Weissenbacher, N., Dewulf, J., Boeckx, P., Vlaeminck, S. E., Wett, B. (2015) Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion. *Water Res.* 2015, 74, 166–179.

Soares, A. (2020) Wastewater treatment in 2050: Challenges ahead and future vision in a European context. *Environmental Science and Ecotechnology* 2020, 2, 100030. doi.org/10.1016/j.ese.2020.100030

Trimmer, J. T., Cusick, R. D., Guest, J. S. (2017) Amplifying Progress toward Multiple Development Goals through Resource Recovery from Sanitation. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51 (18), 10765–10776.

Wang, Q., Zhang, W., Yang, Z., Xu, Q., Yang, P., Wang, D. (2018) Enhancement of anaerobic digestion sludge dewatering performance using in-situ crystallization in combination with cationic organic polymers flocculation. *Water Res.* 146, 19–29.

Yuan, T., Cheng, Y., Wang, X., Yu, Y., Zhang, Z., Lei, Z., Shimizu, K., Utsumi, M., Adachi, Y., Lee, D.-J., (2019) A novel anaerobic digestion system coupling biogas recirculation with MgCl₂ addition for multipurpose sewage sludge treatment. *J. Clean. Prod.* 230, 499–507.

Zhang X., Liu Y. (2021) Circular economy-driven ammonium recovery from municipal wastewater: State of the art, challenges and solutions forward. *Bioresource Technology* 2021, 334, 125231. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125231

Zhang, M., Ji, B., Liu, Y., (2021) Microalgal-bacterial granular sludge process: A game changer of future municipal wastewater treatment? *Sci. Total Environ.* 752, 141957.

Zhou Z., Wang K., Qiang J., Pang H., Yuan Y., An Y., Zhou C., Ye J., Wu Z. (2021). Mainstream nitrogen separation and side-stream removal to reduce discharge and footprint of wastewater treatment plants. *Water Research* 2021, 188, 116527. doi.org/10.1016/j.watres.2020.116527



**DR. OLÁH
JÓZSEF**
nyugdíjas

**JUHÁSZ
JÁNOS**
JURA-Mérnökiroda

olah39@t-online.hu
janos.juhasz@gmail.com

KIVONAT Az EU új hulladék kezelési koncepciójának alapja a körforgás megvalósítása, ez a hulladékok újrahaznosítását jelenti. Az EU-ban kommunális hulladékból 225 millió tonna hulladék keletkezett 2019-ben. Magyarország a hatodik legkevesebb hulladékot termelő uniós ország és 2016-ban átlagosan 379 kg/fő·év hulladéktermelés jutott egy magyar állampolgárra. Az összegyűjtött kommunális hulladéknak még mindig, mintegy 57%-át hulladéklerakókban helyezik el. Hazánkban 2020-ban az ország összes kommunális hulladékának 17 %-át szelektív módon gyűjtötték. A hazai biogáz-termelés becsült potenciálja (állati trágyák 3,4 Mrd m³, az élelmiszer-ipari hulladékok 0,7 Mrd m³, és a települési szilárd hulladékok 0,4 Mrd m³) mintegy 4,5 Mrd m³ biogáz-termelést tesz lehetővé. Ezek együtt 3,15 Mrd m³ földgázt helyettesítenek. A társított vagy ko-szubsztrát rothasztás kettő vagy több szubsztrátból készült homogén keverék közös rothasztását jelenti: az alap-szubsztráthoz (pl. állati trágya, szennyvíziszap) egyéb kiegészítő anyagokat (pl. kommunális hulladék, ligno-cellulóz hulladékok stb.) adagolnak és közösen rothasztják. A biogáz termelésre leginkább a könnyebben bontható, magas szénhidrát tartalmú, kisebb ligno-cellulóz tartalmú növények (cukorcirok, siló kukorica, csicsóka) alkalmasak. A települési hulladékok szelektív módon gyűjtött szerves frakciójának rothasztásánál a C:N arány, puffer kapacitás és biológiai bonthatóság beállítása szempontjából az állati eredetű-hulladékok (sertés, marha trágya) és a szennyvíziszap kedvezően befolyásolják a rothasztási folyamatot.

KULCSSZAVAK EU hulladék-kezelési koncepció; körforgásos hulladék-kezelés; kommunális vagy települési hulladék; hulladéklerakás; biogáz-termelési potenciál; szerves trágyák; ligno-cellulóz tartalmú hulladékok; ko-szubsztrát rothasztás;

VÍZ ÉS TUDOMÁNY

Kommunális, mezőgazdasági és ipari eredetű hulladékok felhasználása biogáz előállítására

BEVEZETÉS

Tanulmányunkban a hazai energiatermelésre alkalmas kommunális hulladék, szennyvíziszap és mezőgazdasági eredetű hulladékok felhasználásának kérdéseivel foglalkozunk. Értékeljük az EU ide vonatkozó elképzelését, a hazai felhasználás hiányosságait, tendenciáját és a jövőben a felhasználás felfutásának lehetőségeit. Nem foglalkozunk a biogáz-technológia elméleti alapjaival, és a lehetséges technológiai megoldásokkal is csak érintőlegesen foglalkozunk. Az elméleti alapokat az interneten megjelent, angol és német nyelven közzétett tanulmányok, PhD-dolgozatok és magyar nyelvű közlemények részletesen tárgyalják. A hulladékkezelés és a biogázüzemek üzemeltetési kérdései a hazai szakemberek előtt jól ismertek (Oláh és Tarjányné Szikora Sz., 2010; Oláh et al., 2012), ezért nem tárgyaljuk részletesen. Röviden ismertetjük az Európai Unióban a hulladékkezelés és a hulladék biogáz formájában történő hasznosításának kérdését. Kitérünk a hazai kommunális hulladék gyűjtésére és kezelésére. Értékeljük a hulladékok közös anaerob kezelésének összefüggéseit. A legtöbb adat interneten érhető el, és az elérhető adatok között sokszor nagy az ellentmondás. Az egyes sajtóorgániumok, újságok interneten közzétett adatai megbízhatatlanok és használhatatlanok.

2. HULLADÉKKEZELÉS AZ EU-BAN

A hulladék újrahaznosítása komoly kihívást jelent, mivel nagyon vegyes összetételű, sok különböző forrásból származó hulladékról van szó. Emiatt több uniós országban a kommunális hulladék jelentős részét