

A szennyvíz és szennyvíziszap energiatartalma, hasznosításának lehetőségei és korlátjai

Dr. Kárpáti Árpád

Pannon Egyetem, *egyetemi docens*

Miért készült ez a rendezvény, előadás?

MASZESZ elnökségi ötletelésekor Boda úrral bedobtuk az energetikát.

Főtitkár egy hónapja rámkérdezett – mi lesz az előadásom címe.

(Innen kezdve mi választottuk ki az előadókat, döntően János)

Hírcsatorna tavalyi 3. számában előadásom anyagminőségi, energia és technológiai oldalát már részleteztem, valami más kellett bevezetőnek.

Nagyon szeretném, ha az előadások írott változata is a fizető résztvevő rendelkezésére állna! Ekkor még több érdeklődő akadna egy érdekes témára – láthatóan így is elég sok összejött.

Én elkészítettem az előadást írásban is. Most a lényegét kivetítem mintegy paródiaként, s hogy beleférjek az előadásidőbe.

A teljes írott változat majd valahol meg fog jelenni – vagy nem!

Tartalomjegyzék

Bevezetés

Energiafelhasználás/termelés a jelenlegi szvtisztításnál

Újszerű főági szennyvíztisztítások és fejlesztésük hajtóerőiről

Kis energiaigényű főági tisztítás – LEM

Teljes kémiai energia és tápanyag hasznosítás

Következtetés

Hivatkozások

Köszönet a meghallgatásért

Bevezetés

Szennyvizeink a felszínen és talajban lévő ivóvíz tartalékaink legveszélyesebb szennyezői szerves anyag és növényi tápanyag tartalmukkal.

Jelenlegi szennyvíztisztítási technológiáink egyre kevésbé fenntarthatók

elsősorban a nagy energia és költségigényük, gyors ipari növekedés és lakossági agglomerizálódás, valamint a fokozódó minőségi követelmények miatt.

Ez mind a fejlettebb, mind a fejlődő országok közegészség védelméért, ivóvízkészleteinek tartós biztosításáért a jelenleginél olcsóbb, sőt akár energiatermelő szennyvíztisztítás kidolgozását igényli.

Helyzetelemzés – tisztítási költség

Az USA-ba a teljes elektromos energia felhasználásának 3-4 %-át fordítják a szennyvíztisztításra.

Fajlagosan ez 0,5-2 kWh/m³ között mozog a szennyvíz összetételétől, koncentrációjától, s a tisztítás módjától, mértékétől függően.

A szennyvíz ugyanakkor a tisztításhoz szükséges energia három - tízszeresét tartalmazza. Más országoknál az utóbbi arány lényegesen eltérhet, elsősorban az ivóvíz melegítésére fordított energia kisebb aránya miatt (US-40 oC – Hollandia-27 oC házi kifolyó átlag).

Energiatartalom

Szennyvízben az energia három formában van (McCarty et al.,2011):

a szerves szennyezőanyagok energiája	-	~1,79 kWh/m ³
növényi tápanyagok (N és P) energiája	-	~ 0,7 kWh/m ³
hőenergia	-	~ 7 kWh/m ³

Láthatóan a kémiai energia mintegy 26 %, míg a hőenergia 74 %.

Energiakinyerés

A kémiai energia könnyen kinyerhető.

A hőenergia csakis hőszivattyúval hasznosítható
valamilyen mértékben,
éppen a szennyvíz hőmérsékletének a függvényében.

Csak a kémiai energia visszanyerése révén a
szennyvíztisztítás elvileg energianyereséges,
vagy legalább is energia-független lehet
a környezet megfelelő védelmével egyidejűleg.

Jelenleg az erősen energia, vegyszer és beruházás igényes.

Jelenlegi helyzet

Kedvező esetben a tisztítás teljes energiaigényének a felét, tehát a levegőztetés energia igényét lehet visszanyerni, megtermelni az iszap rothasztásával.

Külső tápanyagok együttes rothasztása esetén ez a hányad jelentősen növekedhet, mint azt az ismertetésre kerülő hazai megoldások is igazolni fogják.

Nem fognak ugyanakkor beszélni az aerob tisztítás igen jelentős szén-dioxid és dinitrogén-oxid, valamint egyéb illógáz kibocsátásáról (üvegházhatású gázok).

Minden kWh oxigénbevételre fordított elektromos energia 0,9 kg szén-dioxid emissziót eredményez.

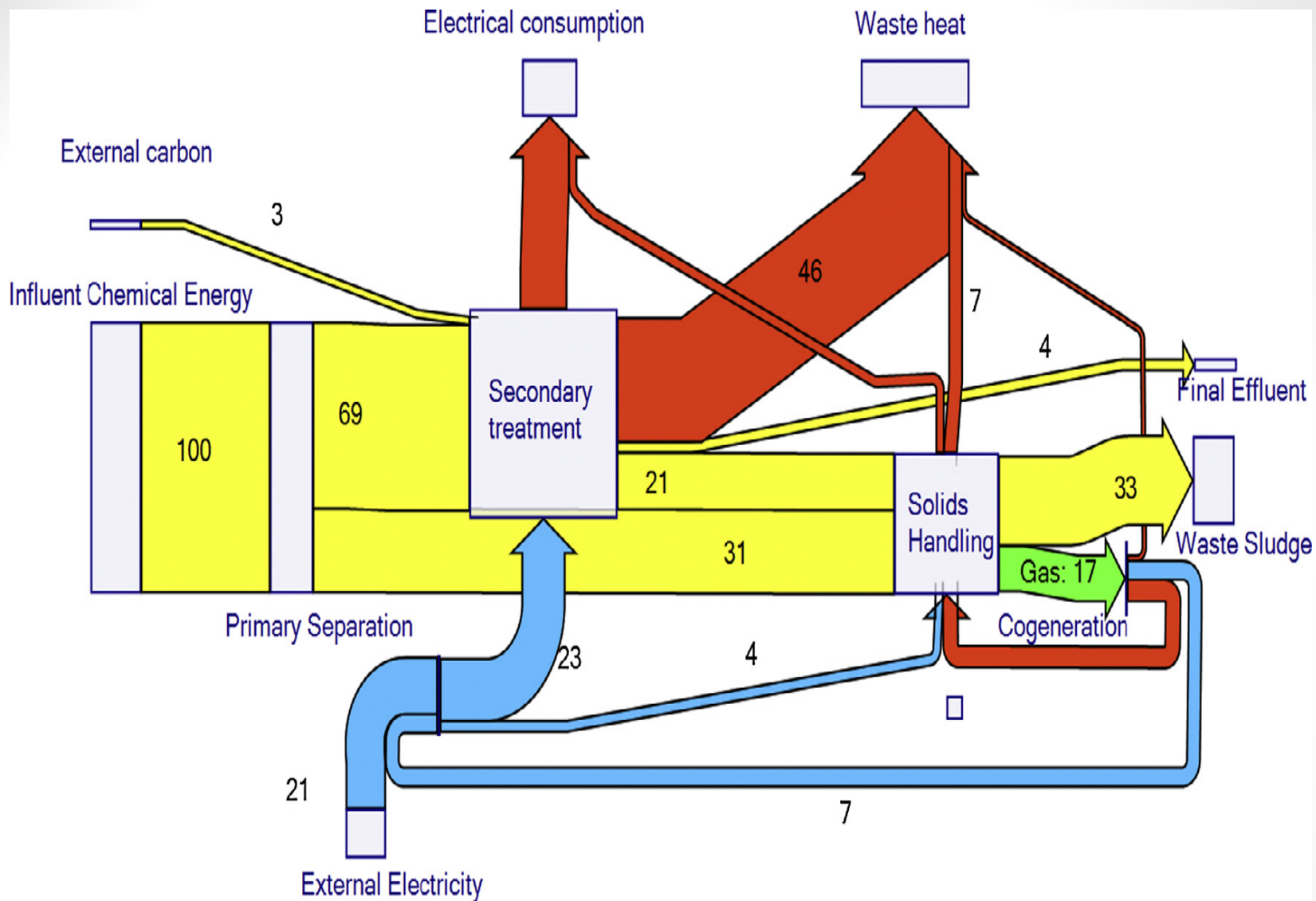
Jelenleg a világnak a döntő részén, ahol egyáltalán szennyvíztisztítás van, a lakossági szennyvizek tisztítása a kellően kiforrott eleveniszapos (AS) módszerrel történik.

Ez időben kellően gyors, de jelentős beruházási, üzemeltetési, valamint energia- és vegyszerigényt jelent.

Maga a levegőztetés a tisztítás energiaigényének a felét – háromnegyedét is kiteheti.

Az iszapkezelés és elhelyezés költsége a teljes tisztítási költségnek akár 60 %-áig is elmehet.

Az iszap biometanizálása révén nyerhető vissza a levegőztetés energiaigénye (1. ábra).



1. ábra: Arányos energiaáramok (Shankey diagram) a biológiai tápanyag eltávolítással és iszaprohasztással üzemelő eleveniszapos szennyvíztisztításra (500 mg/l bemeneti KOI és 5 mg TN/l elfolyó határérték esetére). A Kémiai energia áramok sárga, a villamos energia kék, a biogáz zöld, a hőenergia pedig piros. A számértékek az energiák %-os mennyiségét jelölik a beérkező energia hányadában.

Korai fejlesztés

Az energia jobb hasznosításának igénye folyamatos fejlesztést eredményezett az utóbbi évtizedek szennyvíztisztításban.

Folyamatosan kérdés volt az oldott és lebegő szerves anyagok aerob biológiát megelőző szeparációja intenzifikálásának kérdése.

Régebben az előülepítés CEPT megoldássá alakításával, később a LEAP megoldású szűréssel, ma a membránszűrés valamilyen alkalmazásával próbálnak itt előrelépni.

Az ülepített és a szűrt részek (membránnal koncentrált frakciók) anaerob rothasztása nagyobb energia visszanyerést biztosíthat.

A membránszűrés korlátja, hogy a főágban történő alkalmazása mintegy 3 kWh/m³ villamosenergia-igényt jelent (1000 mg KOI/l nyersvíz szennyezettség esetén).

Egyéb problémák - lehetőségek

Sajnos a gázmotorok a metán energiájának kisebb részéből tudnak csak villanyáramot termelni. A keletkező hőre viszont nyáron alig van igény (hőntartás, iszapszárítás).

Ezek megkérdőjelezzik az iszaprohasztás esetleges hidrogénon keresztül történő vezetését, majd a hidrogén üzemanyagcellával történő hasznosítását.

Azzal együtt, hogy az utóbbi technológiák

még messze nem kifarrottak,

nagyüzemben nem kellően bizonyítottak,

a kutatást irányukban mindenképpen célszerű folytatni.

Új főági szennyvíztisztítások / fejlesztés hajtóerői.

Fejlesztésük fő hajtóereje a tisztítás energia-függetlensége mellett a tápanyagok minél hatékonyabb visszanyerése, újrahasznosítása. Megvalósítása két változattal lehetséges:

a - kis energiaigényű főági tisztítást követő ugyancsak főági autotrof nitrogén és kémiai, adszorpciós P-eltávolítás,

b – a szerves anyag és növényi tápanyag több lépcsős eltávolítása, mellékági biomassa hasznosítással.

Utóbbinál az első lépcső a (C, N, P) teljes beépítése fölösizapba heterotrof és fototrof mikroorganizmusokkal, melyet követően a rothasztás maradékából történhet a tápanyagok (N és P), esetleg további energia eltávolítása.

Energiaigényeik

A hagyományos lakossági szennyvíztisztításhoz képest (500 mg KOI/m³ befolyó szennyezettség), melynek átlagosan 0,5 kWh/m³ az energiaigénye,

Az **a** változat anaerob nyersvíz tisztításánál 0,1 kWh/m³ energiahozamot jelenthet, de nem biztosítja a növényi tápanyagok, elsősorban a nitrogén visszanyerését.

A **b** változat csak 0,05 kWh/m³ energiát igényel.

Ezzel szemben a **b** változat biztosítja azt, viszont nagyon nagy a külső fajlagos energia igénye (5 kWh/kg N), ami jelenleg azonos az ammóniának a szénforrás alapon történő előállításának a költségével.

Gazdasági környezet

A jelenlegi alacsony energiaárak, valamint az **a** változat közeli üzemi megvalósíthatóságának a lehetősége annak rövid távú hasznosulását ígéri.

A **b** változat ezzel szemben hosszabb távon, az energia és műtrágya árak növekedése esetén lehet csak szükségszerű követelmény.

Bár az utóbbi évtizedben az energiaárak nem változtak jelentősen, az előrejelzések bizonytalanok, ami erős késztetést jelent a fenti megoldások fejlesztésére, üzemi megvalósításaik vizsgálatára.

A földgáz ára, amely elsősorban az ammónia előállításának, és árának a mozgatója, megduplázódott az utóbbi tíz évben.

Az ammónia árában a földgáz ára annak a 60 %-a, s a N-műtrágya előállítása ezzel a világ energia felhasználásának az 1-2 %-át jelenti.

A nitrogén-műtrágya ára egyébként az utóbbi két évtizedben a négyszeresére nőtt. Ez majd a szennyvíz N tartalmának a távolabbi jövőben történő kinyerését igényelheti.

A nitrogénnel szemben a P műtrágya ára az utóbbi évtizedben csak kétszeresére nőtt, de kimerülése fél évszázadon belülre becsült.

A foszfor eltávolítása az *a* megoldás főágán a második, vagy azt követő lépcsőben vegyszeres, vagy adszorpciós lehet, bár az utóbbi realitását nagyüzemi kísérletek még nem bizonyították.

A vegyszeres iszap jelentősen szennyezett lesz a szennyvíz nehézfém tartalmával,
s abból a foszfor közvetlen újrahasznosíthatósága is kérdéses.

Jelen és jövő

Napjainkban a szennyvíztisztítás főágán nem történik energia visszanyerés a szerves anyagokból, csak azok szilárd, szeparálható formájúvá történő alakítása, még ultraszűréssel kombinált AS és hibrid megoldásoknál is.

A szeparált, eredeti és biológiai oxidációval immobilizált szerves anyagok energiahordozó metánná történő átalakítása mellékágon biztosítható. Innen a szerves anyagból kiszabaduló ammónium visszakerül a tisztítás főágára, hogy ott inertizálva veszendőbe menjen.

Ezt a messze nem energiatakarékos megoldást csakis az *a* megoldás főágába épített anaerob előtisztításával lehet megkerülni.

Ezért javasolták új alternatívaként McCarty et al. (2011) az úgynevezett kis energiaigényű főági változatot - LEM (Low Energy Mainline – LEM).

Előülepités, majd a folyadék rész kisterhelésű anaerob előtisztítása.

Utóbbi anaerob membrán bioreaktorban (AnMBR), vagy anaerob szűrő membrán reaktorban lehetséges.

Az elfolyó víz ilyen tisztítás után akár közvetlen öntözésre is javasolható, természetesen megfelelő óvatossággal.

A tápanyag visszanyerésének az igénye hosszabb távon azonban fokozottan jelentkezhet.

Kis energiaigényű főági tisztítás – LEM

A főági anaerob előtisztítás (szerves anyagok döntő részének metánná és CO₂-vé alakítása) az előzetesen ülepitett lebegőanyagok szeparált iszaprohasztóban történő kezelését is igényli.

Ez utóbbi a hagyományos iszaprohasztással történhet, míg a főágon az anaerob folyamatokat megfelelő iszapkoncentrációval, majd membrán iszapszűréssel spec. kialakításban kell építeni.

Az alacsony hőmérsékletű metanizáció fajlagos energiaigénye minimális (<0.002 kWh/m³).

Az előülepités is elhagyható, hiszen a membránszűrés (MBR) megfelelő iszapvisszatartást biztosíthat.

A legnagyobb gondja a tisztításnak a nem elégséges patogénmentesítés, ami további utókezelést, fertőtlenítést igényel.

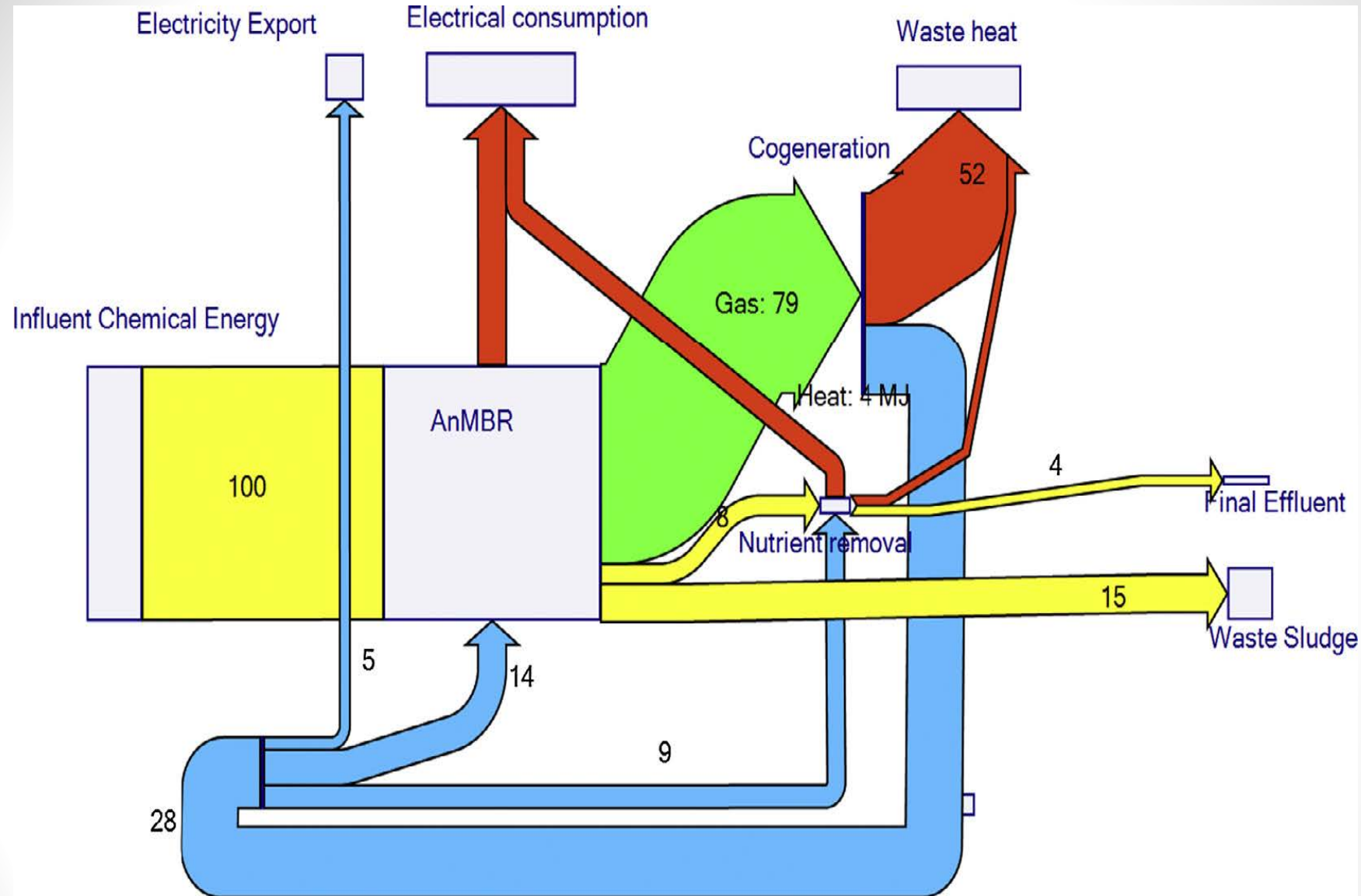
Ahol nem lehetséges az anaerob tisztításon átesett szennyvíz előntözése, a vízből a tápanyagokat azt követően még el kell távolítani.

Főágon az anaerob ammónium oxidáció (anammox) adhat erre megoldást:

- energiaigényét üzemi megvalósítások alapján 1,2 kWh/kg N értékűnek találták.

A főági adszorpciós P eltávolítás ugyan energiatakarékos és jó hatékonyságot ígér ilyen előtisztításoknál (0.1 mgP/l), de még nem kellően kidolgozott az üzemi realizáláshoz.

Energiamérlegét a 2. ábra mutatja



2. ábra: A főági bevezető anaerob rothasztással működő szennyvíztisztítás (LEM) és második lépcsős főági anammox és P eltávolítás Shankey diagrammja (500 mg/l bemeneti KOI és 5 mg TN/l elfolyó határérték esetére). A Kémiai energia áramok sárga, a villamos energia kék, a biogáz zöld, a hőenergia pedig piros. A számértékek az energiák %-os mennyiségét jelölik a beérkező energia hányadában.

Teljes energia és N, P hasznosítás

Első lépcsőben valamilyen módon a szerves anyagot és a növényi tápanyagokat egyaránt immobilizálják. Ezután további lépésekben nyerik vissza a termelt biomasszából az energiát és tápanyagokat a mindenkori igényeknek megfelelően. Az immobilizálás megoldható aerob úton is. Asszimilációval, valamint PHA és polifoszfát akkumulációval is lehetséges.

Utóbbi azonban komplikáltabb reaktorkialakítást és nagyon rövid iszapkor tartását igényli a PHA, glikogén és polifoszfát rögzítéséhez (Yuan et al., 2012).

Ge és társai mérései alapján 2 napos iszapkornál a keletkező biomassza anaerob lebonthatósága 90 % körül marad, míg a gyors, és részleges oxidáció az eredeti energiatartalmat csak 20 %-al csökkenti. Természetesen ekkor a N-tartalomnak csak kis része rögzül a rothasztott iszap minimális maradékába (3. ábra).

Ha azonban jó lebegőanyag szeparáció követi az első lépést, az ammónium tartalma egy azt követő anammox átalakítással eltávolítható. Természetesen akkor a N-tartalom veszendőbe megy, de a megoldás költségtakarékos (3. ábra).

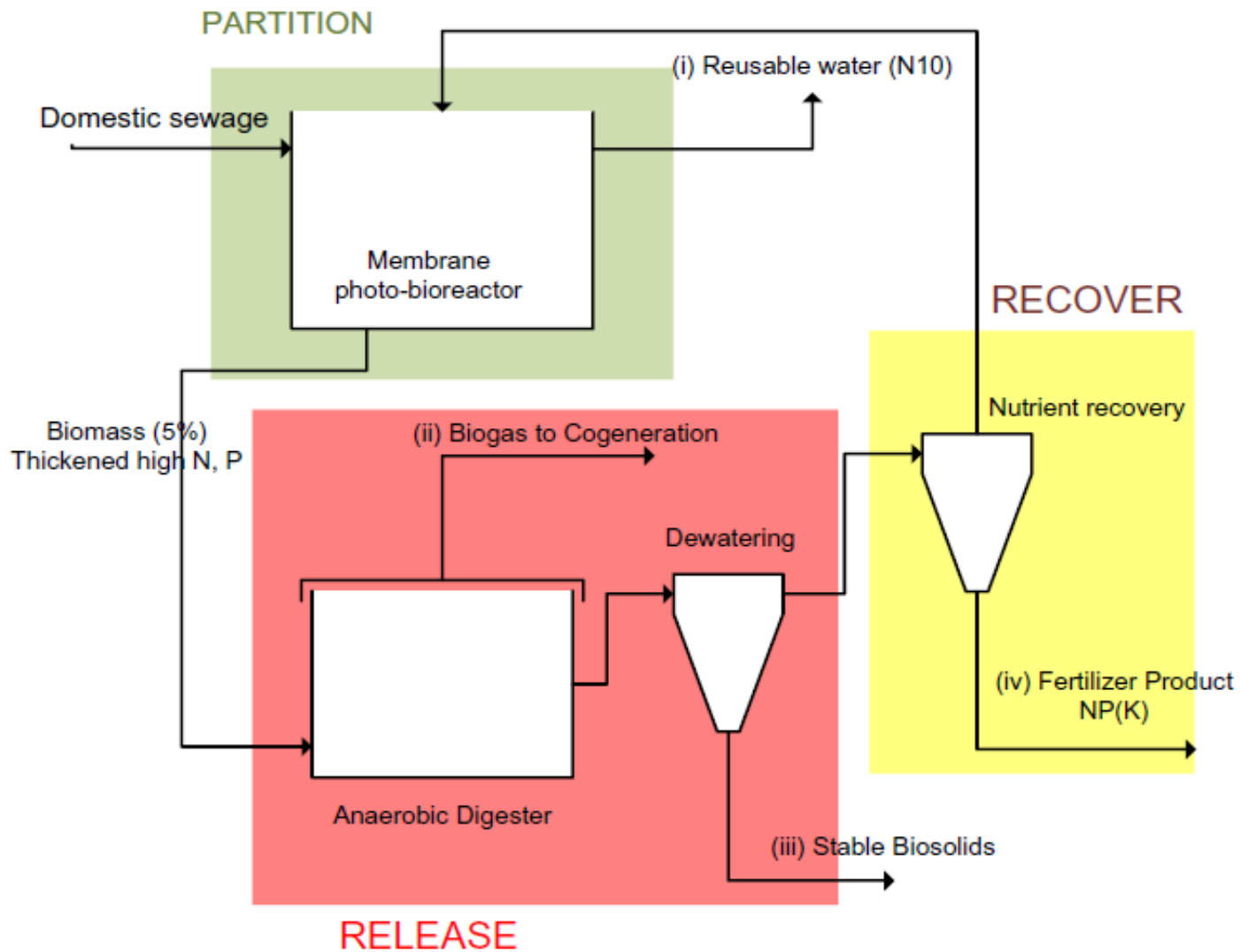


Fig. 1. Partition–release–recover for complete wastewater treatment.

3. ábra: Teljes szerves anyag és tápanyag eltávolítás elvi kiépítése.

Ha a nitrogéntápanyag visszanyerése is feladat, a redukált N teljes mennyiségét először is asszimilációval biomasszába kell építeni, hogy abból koncentráltan -iszapvízzel- visszanyerhető legyen.

A heterotrófokkal történő teljes nitrogénfelvételhez a lakossági szennyvíz átlagos összetétele azonban nem kedvező. Külső szerves anyag bevitel drágítja a költségeket, ezért nem ajánlott. Megoldás lehet ugyanakkor a fototrof mikroorganizmusokkal történő nitrogénfelvétel.

A fényellátást azonban gondosan szabályozni kell, mert szerves anyag katabolikus fogyasztása jelentős energiaveszteséget is eredményezhet.

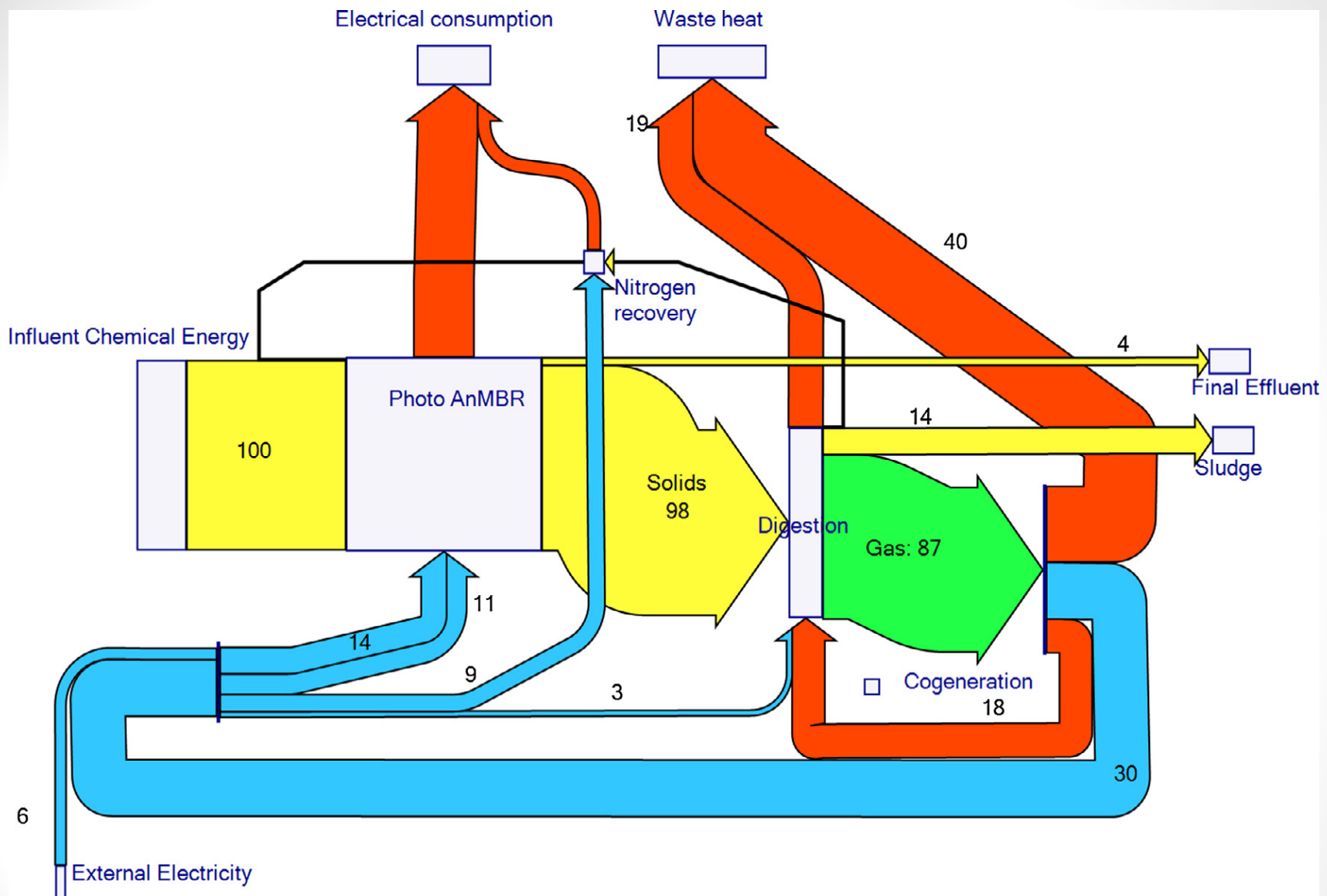
Cyanobactériumok és a lila fototrof baktériumok különösen fontosak e tekintetben, mert mind a PHA, mind a poly-P akkumulációjára is képesek.

Hülßen és társai (2014) bizonyították, hogy 100:9:2 arányú (K:O:N:P) szennyvíz összetétel esetén fototrof tisztítással 10 mg/l alatti elfolyóvíz nitrogén koncentráció is elérhető mintegy 0,2 kWh/m³ fényenergia bevitelével.

A fotoszintézissel termelt biomassa szeparációja az azt követő anaerob fermentációhoz, természetesen további költséget jelent.

Az ilyen fototrofokkal termelt iszap rothasztására sokkal kisebb iszapkor (<2nap) is elegendő, mivel szerves anyagának ~ 80 %-a gyorsan hidrolizál és metanizálódik.

A bomlást termofil előkezelés még tovább gyorsítja, a hidrolízist akár ötszörösére is (Ge et al., 2011).
Teljes energiamérleg a 4. ábrán látható.



4. ábra: teljes szerves anyag és tápanyageltávolítás energiamérlege Shankey diagramon ábrázolva (500 mg/l bemeneti KOI és 5 mg TN/l elfolyó határérték esetére). A Kémiai energia áramok sárga, a villamos energia kék, a biogáz zöld, a hőenergia pedig piros. A számértékek az energiák %-os mennyiségét jelölik a beérkező energia hányadában.

A rothasztásnál az iszap foszfor tartalmának egy része az iszapvízbe kerül (mintegy 10 %), míg a nagyobb része Ca és Mg ionokkal szilárd foszfátként a szilárd maradékba kerül.

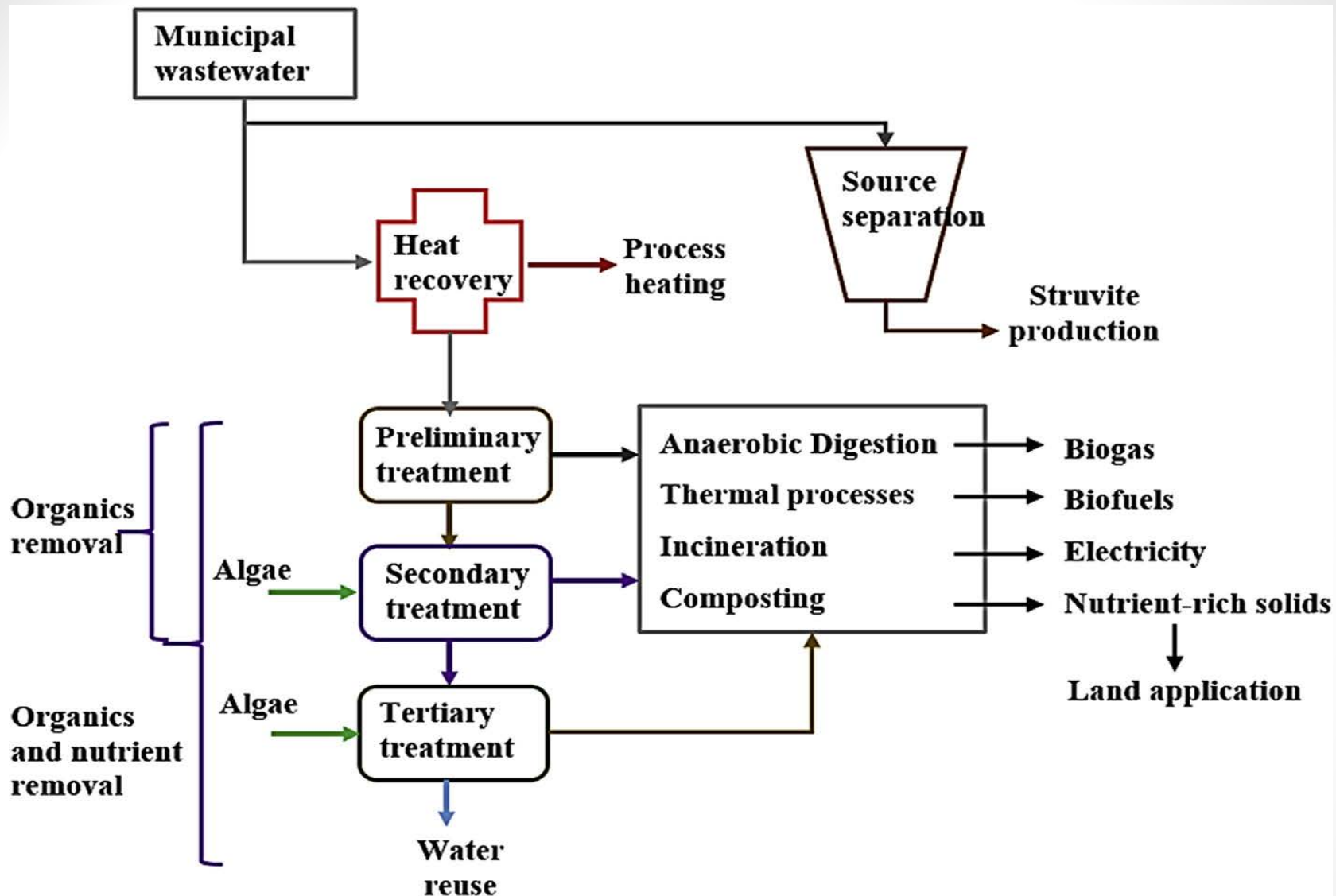
A szilárd részből savas feltárás - nagyobb P visszanyerés lehetséges.

A nitrogén visszanyerése iszapvízből a foszforénál nehezebb.

Az ammónium elősűrítése, strippelése, pervaporációja, abszorpciója, ioncseréje, elektrodialízise túlzottan költséges. Túl nagyobb pH-t igényelnek, s minimálisan 2000 mg/l ammónium koncentrációt. A végtermék ammónium, ammónium-szulfát, vagy ammónium-klorid.

Általában azonban, nem lesz szükség az iszapvízből teljes nitrogén eltávolításra, a tisztított folyadék recirkulációjával valamennyi ilyen megoldásnál is visszajuttatható a tisztítás főágára.

Az energiahasznosítás további növelése 5. ábra lehetőségeivel!



5. ábra : Szennyvízből történő hőszivattyús , és iszapmaradékból történő egyéb energiakinyerések beépítése a jövő szennyvíztisztításába.

Következtetés

A fentiekben áttekintett, hosszabb távon fenntartható szennyvíztisztítási megoldásoknak kivétel nélkül energia-takarékosnak kell lenniük. Nyilvánvalóan elmondható ugyanez a szennyvíz döntő energiataartalmát hasznosító hőszivattyús megoldásokról is.

A biológiai módszerekkel a kémiai energia egy része (szerves anyag) viszonylag egyszerűen kivehető a lakossági szennyvizekből, míg a N és P visszanyerése, hasznosítása jóval bonyolultabb. Hogy azok nagyobb része az élelmiszer termelés részére hasznosítható legyen jelentős energia és üzemeltetési költségre lenne szükség, amely ma meghaladja az NH₃ földgáz alapon történő előállításának költségét.

A biotechnológiai és szeparációs eljárások gyors fejlődése hamar változást hozhat, hiszen új, olcsó energiaforrások megjelenése a közeli, s távolabbi jövőben sem tűnik várhatónak.

using microbial electrochemical technologies. *Science* 337 (6055), 680-686.

McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J. (2011) Domestic wastewater treatment as a net energy producer - can this be achieved? *Environ. Sci. Technol.* 45 (17) 7100-7106.

Mehta, C.M., Batstone, D.J. (2013) Nucleation and growth kinetics of struvite crystallization. *Water Res.* 47, 2890–2900.

Pearce, G.K. (2008) UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs. *Desalination* 222, 66–73.

Sengupta, S., Pandit, A. (2011) Selective removal of phosphorus from wastewater combined with its recovery as a solid-phase fertilizer. *Water Res.* 45, 3318–3330.

Smil, V. (2001) *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press.

Stillwell, A.S., Hoppock, D.C., Webber, M.E. (2010) Energy recovery from wastewater treatment plants in the US: A case study of the energy-water nexus - *Sustainability* 2 (4) 945-962.

Verstraete, W., Van de Caveye, P., Diamantis, V. (2009) Maximum use of resources present in domestic “used water”. *Bioresour. Technol.* 100, 5537–5545.

Wett, B., Omari, A., Podmirseg, S.M., Han, M., Akintayo, O., Gómez Brandon, M., Murthy, S., Bott, C., Hell, M., Takács, I., Nyhuis, G., O’Shaughnessy, M. (2013) Going for mainstream ammonification from bench to full scale for maximized resource efficiency. *Water Sci. Technol.* 68, 283–289.

Winkler, M.K.H., Kleerebezem, R., van Loosdrecht, M.C.M. (2012) Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures. *Water Res.* 46, 136–144.

Yuan, Z., Pratt, S., Batstone, D.J. (2012) Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Curr. Opin. Biotechnol.* 23, 878–883.

Végső megállapítás:

Fejleszteni való a jövőre
még szakterületünkön is
elegendő maradt!

Köszönöm megtisztelő figyelmüket!

A következő rendezvény: 2017. nov. 9. – tehát idő addig 4 hónap!
Membrántechnológiák és tapasztalataik a szennyvíztisztításban
Előadók jelentkezését várom! karpatia@almos.uni-pannon.hu