

# RÖVIDEN A RÉGMÚLT ÉS NAPJAINK SZENNYVÍZ-TISZTÍTÁSÁRÓL, KÖRKÖRÖS GAZDÁLKODÁSÁRÓL, KÖLTSÉGEIRŐL

**DR. KÁRPÁTI ÁRPÁD**

PANNON EGYETEM, SOÓS ERNŐ KUTATÓ-FEJLESZTŐ KÖZPONT, NAGYKANIZSA

**DR. GALAMBOS ILDIKÓ**

PANNON EGYETEM, SOÓS ERNŐ KUTATÓ-FEJLESZTŐ KÖZPONT, NAGYKANIZSA

*A körkörös gazdálkodás napjaink sláger-jelszava. Az ugyanakkor a Föld nevű bolygónkon többféle tekintetben, valamilyen mértékben, vagy időtávlatban hatásosan működött. Ez élőbolygólétünk folyamatos és meghatározó gazdálkodása, ami szükségszerűen legkorábban az anyag és vízgazdálkodásában jelentkezett. Más kérdés, hogy folyamatai, s változásuk ciklusideje annyira eltérő, s az ember földi létéhez képest annyira hosszúak voltak, hogy észre sem vehettük azoknak az adott rendszerben történő körkörös alakulását, eltolódását. Ezek a folyamatok távlataikban nem jelentették az ugyanazon pontra történő mindenkori visszatérést, hanem a körkörös ciklusok lassú módosulásával meghatározó változást is eredményeztek Földünk évmilliárdjai során annak a létezésében, a rajta kialakuló környezet változásában, s legvégül az emberiség életének, életvitelének alakulásában. E terjedelmes bevezető után napjaink vízzel történő gazdálkodásával, majd az is tovább szűkítve, szennyvízgazdálkodásával, a körkörösség kiemelésével kíván az anyag foglalkozni.*

## 3. RÉGMÚLTUN K FOLYAMATAI, BIOLÓGIAI ÁTALAKÍTÁSAI

Történetileg a ciklikusság a Föld (forró bolygó) vízgőze egy részének lehűlésével, lecsapódásával, majd a kialakuló vízfázis folyamatos párolgásával, s ismétlődő, ciklikus lecsapódásával kezdődött (Fazekas et al., 2015). A forró tengerek kialakulását (vígőz döntő részének a kondenzációja) a bolygó 5,6 milliárdos életéből igen rövid, csupán mintegy száz millió évre (a Föld órájának első

percére) becsülik. Előtte a gőz nyomása úgy 180 atmoszféra körül lehetett. A kondenzáció után a víz körforgása (folyékony és gőzfázis között) sokáig még lényegesen gyorsabb volta jelenleginél. Ennek a szakasznak a végére a vízborítottság a Földön kiemelkedő kontinensek nélkül teljes lett, közel a jelenlegi átlagos 2700 méter körüli átlagos tengeri vízmélység 2/3 -ával (180 m).

A légkörben a vízgőz, valamint a szén oxidált formái mellett csak redukált gázkomponensek voltak jelen (ammónium, kénhidrogén, metán). A nap sugárzási energiája persze a folyamatos víz körforgáshoz elegendő volt. A nap sugárzása ugyanakkor a légkör magasabb rétegeiben közvetlen reakciókat tudott gerjeszteni a víz és többi gázmolekulák között. Ugyanilyen eredménnyel járhattak a légköri folyamatok során mainál gyakrabban kialakuló villámlások energiái is. Ez volt az úgynevezett abiotikus időszak, amely a vízben oldott sók kicsapódását, s a levegőben szerves anyagok keletkezését, majd a vízfázisban (szerves leves) történő reakcióit, átalakulásait produkálta. A keletkezett „szennyvíznek” is meg kellett ezt követően annyira tisztulnia, hogy abban magasabb rendű élet fejlődhesen ki. Ezekben egyaránt szerepük lehetett a vízhőmérséklet függvényében alakuló kémiai és biológiai folyamatoknak.

Valószínűsíthetően külső, intergalaktikus hatásra (beoltásra) indulhatott be a szerves anyagok átalakítására képes legegyszerűbb szervezetek szaporodása, fejlődése a Föld lassan a jelenlegi hőmérsékletre hűlő vízburokában. Feltehetően az anaerob környezetben életképes mikroorganizmusok lehettek közülük a legkorábbiak. Ezek a szerves anyagot metánná, széndioxiddá, hidrogénné és vízzé alakították. Speciális csoportjaik (fakultatívheterotrofok) viszont az oxigén megjelenésével képesek lettek szerves anyagot oxigénnel is széndioxiddá és vízzé alakítani, ráadásul az anaerobokénál sokkal nagyobb energianyereséggel. Ez nagy szaporodási sebességet, versenyelőnyt biztosított számukra.

A vizekben az algák kialakulásának, elszaporodásának eredménye lett a szabad oxigén megjelenése. Ezek a vízből és széndioxidból annak ammóniumja és foszfátja segítségével,

a napfény energiájával szerves anyagot és oxigént tudtak termelni. A szerves anyag az algák elhalása után a korábban említett szerves anyag oxidálók (heterotrofok) tápanyaga lett. Természetesen valamennyi eddig említett mikroorganizmus csoport tevékenységének elengedhetetlenül van rövid távon lebontási, lebomlási maradéka. Ezek a rendkívül nehezen bontható fehérjék, sejtfal anyagok, extracelluláris polimerek iszapfázisként a vizek fenekére kerültek, majd idővel lassan elbomlottak, oxidálódtak. Utóbbi az algák oxigéntermelésével vált lehetségessé. Az algák ugyanakkor a sekély vizekben vízinövényekké fejlődve a tengerfenék emelkedésével, felszínre bukkanásával, tovább módosuló formában szárazföldek, kontinensek meghódítására indultak. Erre egy milliárd évvel ezelőtt kerülhetett sor, amikor a kontinensek kezdtek kialakulni, a légkör pedig megfelelően megszűrte a Nap ultraibolya sugarait. Az ugyanekkor kialakuló egysejtűekből pedig a tengerek élővilága fejlődött ki.

A tenger élővilága fejlődésének azonban előfeltétele volt a vízből az ammónium nagy részének eltávolítása. Ezt két speciális prokariota (sejtmag nélküli) mikroorganizmus faj biztosította. Egyikük az ammónium iont nitritté oxidálta (Nitrozomonas), míg a másik a keletkezett nitritet egy újabb ammónium molekulával elemi nitrogénné és vízzé alakította (Anammox). Mindez az átalakítás csak kis oxigénkoncentráció mellett ment, de úgy 2,5-2 milliárd évvel ezelőtt, amikor éppen ennek megfelelően alakult a tengeri környezet. Az oxigénkoncentráció csak mintegy 2-1,5 milliárd évvel ezelőtt nőtt meg jelentősen a tengerekben, és a légkörben is. Egyidejűleg a tengerek korábbi 4,5 g/l körüli ammónium koncentrációja minimálisra csökkent, míg a keletkezett elemi nitrogén

döntő része a légkörbe került. Az elemi nitrogén részaránya ezzel a széndioxid mellett jelentősen megnőtt. Ezután az oxigén mennyisége is lassan a jelenlegire nőtt a légkörben, míg a széndioxidé a mindenkori vulkáni tevékenységnek megfelelően ingadozott.

Persze a tengerfenék emelkedése is igen lassú volt. Csak mintegy 1 milliárd évvel ezelőtt jelentek meg az első szárazulatok, abban az időben, amikor a korábban említett egysejtűek is kifejlődtek. Belőlük alakultak ki azután a vizek soksejtű szervezetei, később a halak, majd a szárazföldi állatok. Azok továbbfejlődése talán valamivel elmaradt a szárazföldekre települő algákétól. Ezért is feltételezzük, hogy a mintegy 300-350 millió évvel ezelőtt uralkodó karbonkor őserdei csendesek, állatok zajától mentesek voltak. Ekkor alakulhattak ki a Föld időszakosan elárasztott faanyag üledékei, majd azokból napjainkra a foszilis energiahordozó készleteink. A növényzet ciklikusan elhaló részeit ugyanakkor a nedves, időszakosan oxigénjárta erdőtalajban élő mikroorganizmusok és fejlettebb talajlakók munkájának eredményeként eltérő vastagságú talajt, talajborítottságot is kialakítottak. Ez a talaj egyben az esővizek folyamatos biológiai tisztítását is ellátta. A környezet ugyanakkor a karbonkor végére kedvezett a tengerekből szárazföldekre vándorló növényevő, nagytestű állatok kialakulásának, fejlődésének, elszaporodásának is, hiszen mindenkor a rendelkezésre álló tápanyag mennyisége és minősége határozza meg az élővilág szaporodását, alakulását. Mindezek a körkörös folyamatok a vizek, szárazföldek, s élőviláguk folyamatos fejlődését szolgálták. Az állatvilág fejlődésének ugrásszerű változásait, szakaszosságát ugyanakkor a Föld nála is kisebb, kisbolygókkal történt szerencsétlen ütközései eredményezték (Fazekas et al., 2015).

Utolsó ugrásszerű változás (kihalás, majd újra népesülés) mintegy 65 millió éve történt. Ez hatalmas felmelegedéssel járt, de annak a sebessége (mintegy 20 ezer év alatt) messze lassúbb lehetett napjaink (utolsó 50 év) felmelegedésénél. Ezt ma már egyértelműen érezzük, s ezért aggasztja az napjainkban a tudósok, klímakutatók, politikusok köreit. 30 millió éve a Föld vizei, levegője jelentősen hűlt, s úgy 5 millió éve a jelenlegi 100 éves ciklusai átlagára csökkent. Ekkortájt hazánk területe a 200-300 millió éve tengerfenék térségeiből Alpokkal, Kárpátokkal, Dinári-hegységgel körbevett beltenger lett. Mintegy 3-4 millió évvel ezelőttre már döntően feltöltődött, de mélyebb része védve a hegykioszorútól csak mérsékelten hűlt le, s ciklikusan vízjárta terület maradt. Ekkor azonban még nem volt emberiség a Földön, illetőleg a Kárpát-medencében. Csupán a mintegy 100 ezer éves ciklussal ismétlődő eljegesedések a növényzet és állatvilág hasonlóan ciklikus fejlődése, elszaporodása, majd visszaszorulása dominált. Az első, mai emberhez fizikális adottságaiban talán már közel álló élőlény (Neander-völgy) csak 2-3 százezer évvel ezelőtt jelentkezhetett Európában.

Ezek az időtávlatok is túl nagyok azonban az utolsó jégkorszak mintegy 14-18 ezer évvel ezelőtti befejeződéséhez, amely ugrásszerű felmelegedéssel járt. Az ezt követő rohamos felmelegedés eredményeként Közép és Dél-Európában, és Kis-Ázsiában a mintegy 50 ezer évvel ezelőtt Dél-Afrikából északra, Európába vándorolt embercsoportokból a korábbinál lényegesen szellemesebb, alkotóképesebb, társadalmakba rendeződött emberiség fejlődött ki, szaporodott el. Fontos szerepe volt ebben a gabonatermelés felfedezésének, elterjedésének, ami úgy 10 ezer évvel ezelőttre tehető.

Ez óriási változást hozott a Föld lakosságának számban és annak koncentrációjában is. Az igazán ugrásszerű változást azonban az ipari forradalom eredményezte. Az akkor még csak a Föld természeti kincseinek, elsősorban energia (szén) és ásványianyag (vasérc és építőanyag) készleteinek kezdődő kirablása, nagyipari hasznosítása volt.

### A LAKOSSÁG KONCENTRÁLÓDÁSA ÉS KÖVETKEZMÉNYEI VÍZELLÁTÁSBAN, SZENNYVÍZTISZTÍTÁSBAN

Évezredekkel ezelőtt az emberek döntően vízforrások, folyóvizek mellé települtek. A vizet edényekben szállították lakóhelyükre, majd tárolták ott folyamatos ivóvízigényük kielégítésére. Később a vízvezetékek kiépítésével, az ivóvizet a forrásoktól nagyobb távolságra is eljuttatták. Még később vízemelők készítésével, majd csövek kialakításával a magasabb helyeken levő fogyasztókhoz is el tudták már juttatni a vizet. Mintegy száz-kétszáz éve a vezetékes vízellátás a városi térségekben rohamosan terjedt, majd ezt hamarosan követte a falvak, vidéki térségek vízellátása is. A vízellátás és a szennyvízgyűjtés/tisztítás kiépítése közötti elmaradást a múlt században jól jellemezte a közműolló. Mára ez már jelentősen beszűkült az előző csaknem teljes, s az utóbbinak is igen nagymértékű kiépítésével. Az anyag további része csak a szennyvíztisztítás ezt követő alakulását vizsgálja, kihangsúlyozva az anyag és energia-gazdálkodás körkörös folyamatait.

A városiasodást megelőzően a lakosság személyes élelmiszer hasznosítási maradványaitól (székletétől, vizeletétől) a biztonságos megszabadulás a nagy műveletlen területek talajaiba történő elhelyezéssel megoldottnak tűnt. Ennek megoldhatatlansága

először Mezopotámiában, majd később Rómában derült ki. Legegyszerűbb megoldás bizonyára a folyókba, tengerekbe történő bevezetés volt. Elképzelhető, hogy történetelt megfelelő gödörökbe, zárt befogadóba történő elhelyezés, s azokból megfelelő idő elmúltával mezőgazdasági talajokon történő újrahasznosítás is. Rómánál a fejlett vízellátás eredményeként a szennyvíz Tiberiszbe vezetése is kiépült. A népvándorlások ezt a gyakorlatot jócskán visszaszorították, ami komoly járványok időnkénti jelentkezését eredményezte. Az igazi robbanást a lakosságszámban, vízellátásban, majd később a szennyvíztisztításban is az ipari forradalom kényszerítette ki.

Londonban a lakókörnyezet megóvására 1848-ban rendelettel tették kötelezővé a szennyvíz Temzébe vezetését. Ettől a folyó hamarosan rothadó csatornává vált. A helyzet szükségessé tette a folyóba juttatott bomtható szerves anyagnak a bevezetését megelőző széndioxiddá és szennyvíziszappá történő alakítását, s azzal a rothadás (a folyóvíz oxigén hiányának) megszüntetését. A 19. század végén már az Egyesült Államok nagyvárosai is küszködtek ezzel a problémával. A szennyvíz tisztítására irányult, talán közöskutatók végül Manchesterben vezettek el 1914-ben az iszaprecirkulációjával működő eleveniszapos rendszerek kifejlesztéséhez. Ez a megoldás néhány évtized alatt elterjedt a fejlettebb térségek nagyvárosaiban (Fazekas et al., 2014).

Természetesen nem szabad itt említés nélkül hagyni a vízöblítés révén a szennyvízbe kerülő ipari feldolgozási maradványokat, valamint a szűrés révén abból eltávolított, melléktermékként is hasznosított anyagrészeket sem. Ezek egy része évtizedekig hasznosult tápanyagként az állattenyésztésben (ATEV), vagy a fás anyagok energetikai célra. Napjainkban a szilárd hulladékok

kezelésével, elhelyezésével, azok ciklikus újra hasznosításával kapcsolatos problémák és feladatok a vízgazdálkodáshoz hasonlóan rendkívül fontossá váltak. Ezeket nem részletezve azonban megállapítható, hogy áttételesen komolyan jelentkezhetnek, jelentkeznek vízkészleteink minőségvédelménél.

## MI IS A SZENNYVÍZ?

Az eleveniszapos rendszer jelentőségének a megértéséhez ismerni kell a napjainkban lakosonként abba bejuttatott, biológiailag oxidálható szennyezőanyag mennyiségét. Eznapjainkban átlagosan 70-80 grammnyi sokféle szerves anyag (cukrok, keményítők fehérjék, zsírok) keveréke. Azok fajlagos kémiai oxigénigénye eltérő lévén (szénhidrát, keményítők és cellulóz 1,1, fehérjék 2,2, zsírok 3,2 g KOI/g anyag), az összetételtől függően jelentősen változhat. Átlagosan ugyanakkor a szennyvízből történő eltávolításukhoz szükséges 60 g biológiai oxigénigénnyel ( $\text{BOI}_5$ ) szokás azt jellemezni. A biológiai oxidáció a szerves anyagok széntartalma felének  $\text{CO}_2$ -vé, másik felének „szilárd halmazállapotú” iszappá alakítását jelenti. Teljes kémiai oxidációjuk ezzel szemben 110 g oxigénigényt (KOI) jelentene. A fenti szennyvíz mintegy napi 120 liter vízzel érkezik a közcsatornán tisztításra. A lakosonként naponta a szennyvízbe kerülő szerves anyag 400 kcal körüli energiamennyiség, ami az egyénenként általuk átlagosan felhasznált mintegy 1500 kcal/nap értéknek közel negyede. Ez azt mutatja, hogy a lakosság biológiai energia hasznosítása egészen jó hatásfokú.

Tápanyagaink fehérje tartalmának nitrogénje (fehérje tömegének az 1/6,24-ed része) a fehérjék átalakításai során mindvégig redukált formában marad a szervezetben, illetőleg ugyanígy távozik

is abból (szerves-N és ammónium). Naponta átlagosan mintegy 13 g redukált-nitrogén kerül székletünkkel és vizeletünkkel a szennyvizünkbe. Ugyanez igaz a tápanyagok foszfát tartalmára is, amely napi 2 g/fő foszforterhelést eredményez. Ez utóbbi foszfát formájában kerül a szervezetbe, majd ugyanígy távozik abból, sőt ugyanúgy foszfátként a szennyvíztisztításból is. Mindez azzal együtt igaz, hogy a foszfátok szervezetünk anyagcsere átalakításaiban meghatározó energiaátalakító, hasznosító szerepet töltenek be (ADP/ATP), sőt csontjainknak is jelentős hányada. Bár a szennyvíz mikroorganizmusai is van hasonló funkciójuk, mindvégig foszfátként lévén jelen, nem képviselnek a szennyvízben energetikailag hasznosítható alapanyagot. Ezzel szemben az ammónium oxidációjakor a mikroorganizmusok a benne levő energiát hasznosítják, de a szerves anyag oxidálókhoz képest sokkal kisebb energia nyereséggel, s lényegesen kisebb biomassza (iszap) termeléssel is. Mivel az utóbbi a heterotrófok iszaphozamának csak a harmada, s a szennyvíz nitrogénterhelése is a  $\text{BOI}$ -nek csak az ötöde, a teljes iszaptermelésnek csak kevesebb mint tizedét eredményezi biológiai átalakításuk. Ezzel a nitrogént oxidáló autotrófok az eleveniszapnak csak a 6-7 %-át alkotják. Az ammónium energiája, s eltávolításának energiavesztése is a szerves anyagé mellett közelítő számításoknál elhanyagolható.

## A SZERVES SZENNYEZETTSÉG ELTÁVOLÍTÁSA

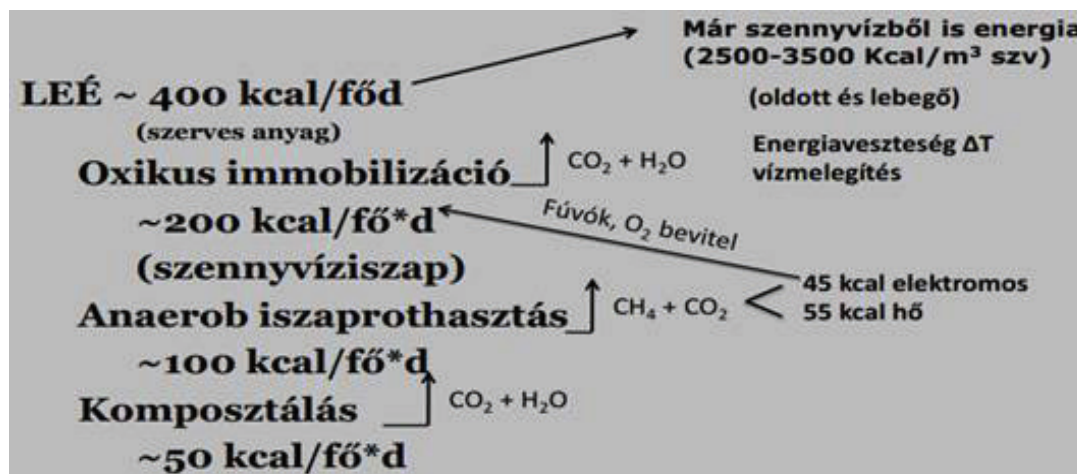
A fentiek alapján az egy köbméter lakossági szennyvízben levő szerves anyag 3200 kcal egyenérték. Ez  $3200/860 = 3,72$  kWh. A biológiai tisztításnál a  $\text{BOI}$  felhasználásával a szerves anyagok feléből kiülepszethető szennyvíziszap és minimális szerves anyag tartalmú tisztított víz keletkezik. A szennyvíz szerves anyag energiájának fele széndioxidként

veszendőbe megy, míg a többi, 1,86 kWh az iszapba kerül. A keletkező iszapmaradék nehezen vízteleníthető, stabilizálatlan, nyers, fertőzőképes, ami a mezőgazdasági talajokban történő hasznosítás tekintetében nem előny. Rendszerint szivattyúzható koncentrációval (7-8 % szárazanyag) injektálják a talaj 40-50 centiméteres mélységébe, ami helyettesíti a beszántását, s egyben biztosítja a vegetációs időszakon túli időszak alatt annak a részleges stabilizálódását. Már ez a megoldás is hasznos szerves anyag (energia) és talajtápanyag visszaforgatást, körkörös gazdálkodást jelent.

Elengedhetetlen pontosítani, hogy a 60 g/l lakosonkénti BOI 72 g/főnap oxigén felhasználását is igényli (ATV 131A). Ez egy köbméter szennyvízre átszámolva közel 580 g/m<sup>3</sup> oxigénigénynek felel meg. Ezt régebben a gyengébb hatásfokú levegőztetéssel nagyobb villamosenergia igénnyel lehetett csak biztosítani. Napjainkra a levegőztetés fejlesztésével azonban 2-2,5 kg O<sub>2</sub>/kWh bevitel is biztosítható az eleveniszapos tisztításnál, finom buborékos diffuzorokkal. Durva buborékos diffuzorokkal azonban csak 1 O<sub>2</sub>/kWh körül van a hatékonyság, sőt a kisebb, kevésbé korszerű levegőztetésű telepeken az utóbbi fele is lehet. Ez azt jelenti, hogy egy köbméter szennyvíz tisztításához, levegőztetéséhez 0,18-0,8kWh szükséges a nagyobb, illetőleg kisebb szennyvíztisztítóknál (Guetal., 2017; Longoetal., 2019). Ugyanakkor az így hasznosítható levegőztetési energia a nagy tisztítók teljes oxigénigényének a 40, míg a kicsikének a 75 %-a (Mamaisetal., 2015) Ez a mennyiség azonban csak a szerves anyagok immobilizálásának, iszappá alakításának a fajlagos oxigénigénye. A köbméterenként eredetileg 3,72 kWh energiatartalmú nyers szennyvíz (szerves anyag tartalma) levegőztetésének, biológiai átalakításának az energiaigénye.

Ezzel párhuzamosan hamarosan a fentiek során keletkező szennyvíziszap anaerob rothasztását is sikerült megoldani, s gazdaságosan kiépíteni a nagyobb, 40-50 ezer lakosegyenérték terhelésűnél nagyobb szennyvíztelepeken. A rothasztás lényegesen jobban vízteleníthető és stabilizáltabb, jobban fertőtlenített iszapot eredményez. Szerves anyagának (s vele energiájának) fele metánná és széndioxiddá alakult. A biogáz 0,93 kWh energiája fűtésre alkalmas. Ezzel a tisztításban közvetlenül megvalósult egy újabb körkörös megoldás. Megfelelő gázmotorok kiépítésével a biogáz villanyáram termelésre is megfelelő lett. Az iszaprothasztás mezofil környezetben (35-37°C) majd termofil (55°C körüli) környezetben is kiépítésre került, s az utóbbinál az iszap fertőtlenítése még fokozottabb mértékben megvalósult.

Az iszaprothasztás során az iszap energiájának fele, a közel 0,9 kWh energiatartalmú biogázba kerül, de ugyanilyen energiatartalmú iszapmaradék is keletkezik. A gáz fűtésre történő hasznosításakor az a berendezés hatékonyságának megfelelően hasznosul. Napjainkban a biogázt célszerűen villamos energiává alakítani gázmotorok segítségével. Ezek átalakítási hatásfoka valamivel nagyobb mint 40-42%. Az így termelhető villamos energia tehát 0,36-0,38 kWh/m<sup>3</sup> tisztított szennyvíz. Ezt a levegőztetés energiaigényére lehet hasznosítani, miközben persze a szükséges kiegészítő berendezések (fúvók, levegőbeviteli eszközök) energiahasznosítási hatásfoka miatt az valamelyest tovább csökken.



1. ábra. A szennyvíz szerves anyagának lehetséges átalakítása, energiamegtakarítása a tisztítása során

Megjegyzendő, hogy a technológiák fejlesztése során megpróbálkoztak a nyers szennyvíziszap levegővel történő hideg oxidációjával is, ami viszont energianyereséggel nem járt, csak fogyasztással, s nem igazán vált be a kis reakciósebesség és haszontalan gáztermék keletkezése miatt sem.

Azt, hogy az eleven iszap szerves anyagainak levegő oxigénjével történő oxidációjánál (iszap részleges stabilizációjakor) az eleveniszapos tisztításhoz hasonlóan nagyon sok széndioxid (üvegház hatású gáz) kerül a levegőbe, akkor sem, sőt még ma sem tekintik elviselhetetlen problémának. A kritikus technológiai feladat az oxidáció levegőbeviteli költségének a csökkentése volt, s az ma is. Korábban a levegőbeviteli berendezések már említett javításával, napjainkban a levegőztetés iszapos medencékben történő gondos szabályozásával.

## A SZENNYVÍZ ÉRTÉKES NÖVÉNYI TÁPANYAGAINAK ELTÁVOLÍTÁSA, ÚJRAHASZNOSÍTÁSA

### REDUKÁLT ÉS OXIDÁLT NITRÓGÉNFORMÁK

Az ismeretek fejlődésével hamarosan felismerték a szennyvízben levő ammónium eltávolításának

a szükségét is. Az élővíz befogadóiban ugyanis a halak nagy ammónium koncentrációktól már elpusztulnak. A kritikus határérték 10 mg ammónium literenként. A szennyvíztisztítás ennek biztosítására képes, de ahhoz többletköltséget igényel. Részben nagyobb tisztítótérfogatok kiépítésével (iszapkor növelése), részben a levegőztetés energiájának megnövekedésével. Az ammónium oxidációja napjainkban a több millió évvel korábbitól eltérően történik. Nem is két, hanem három mikroorganizmus csoport segítségével. Napjainkban a nitríté alakítást (Nitrozomonas) a nitráttá oxidálás (Nitrobakter) követi. Mindkét mikroorganizmus csoport autotrof, tehát nem szerves szénből, hanem széndioxidból, hidrogén-karbonátból építi ki sejtanyagát. A nitrát nitrogénné redukálását viszont oxigénhiányos környezetben a szerves anyagot oxidáló heterotrofok végzik.

Nitrifikálás környezetérzékenysége a megfelelő hőmérséklet és pH tartomány tartásán túl az iszapos vízben lévő oxigénkoncentráció szabályozását is igényli, mert a nitrifikálók feltöltési állandója (maximális szaporodási sebességének a fele) 1 mg/l oxigénkoncentráció körül van. Értékének a növekedése viszont az oxigén vízbe történő bejutását fékezi, tehát energiaigény

növekedést jelent. Ezért a szabályozás elengedhetetlen. A keletkező nitrit és nitrát redukciója előtt nem kerül a légkörbe redukálódó nitrogén (elemi nitrogén) mivel az az anoxikus medencében keletkezik, s onnan is távozik a légtérbe. Ugyaninnen természetesen a nitrát oxigénjéből keletkező széndioxid is a légtérbe kerül.

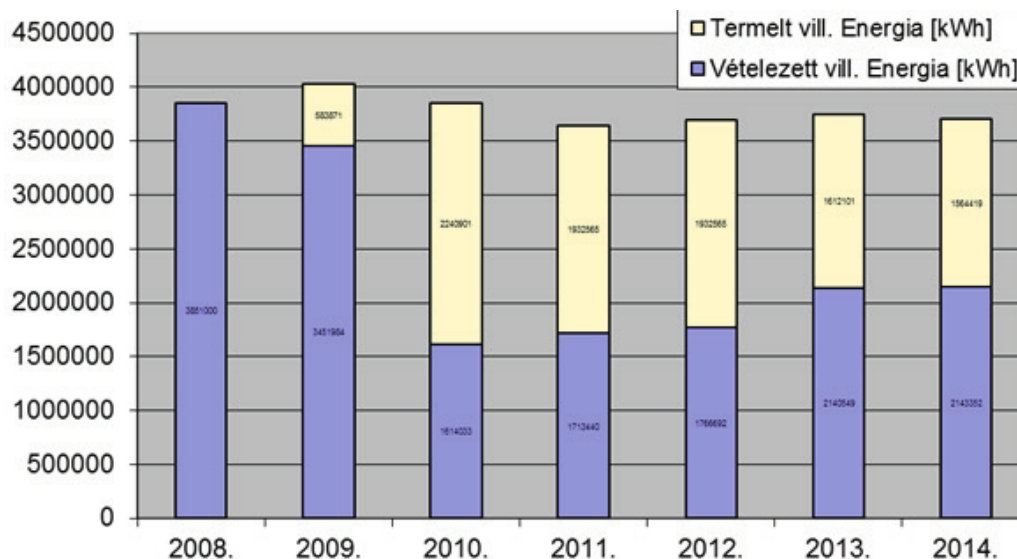
A teljes denitrifikálás az oxigén nitrátredukációt zavaró hatása, hiányos szerves tápanyag ellátottság, valamint megfelelő nitrát visszaforgatás hiánya miatt is nehézkes. Ez a vele szemben támasztott határérték biztosítása miatt esetenként tisztítási hiányosságot is eredményez. Pedig a megfelelő nitráteltávolítás a csecsemők nitrátérzékenysége (Methemoglobinémia) miatt kritikus. A nitrát jelentősebb eltávolításának igénye a múlt század 50-60-as éveiben vált elengedhetetlenné. Megoldásához egy nem levegőztetett többlet medencére van szükség a levegőztető medence előtt, oda történő nitrátos iszap recirkuláltatással, levegőztetés nélkül, viszont megfelelő keveréssel. Természetesen ebben a medencerészben elhagyható a keverés a levegőztetés szabályozott ciklizálásával. A denitrifikáció ugyanis már 0,5 mg/l oxigénkoncentráció körül is beindul az iszappelyhek oxigénhiányos belső tereiben, no és persze a mindenkori szerves tápanyag ellátottságtól függő sebességgel. Ennél a folyamatnál viszont  $N_2O$  is keletkezhet, amit mérgező és erős üveg-ház hatása miatt kell elsősorban minimalizálni.

A nitrogéneltávolítás a szennyvíztisztításnak láthatóan nagyon kellemetlen feladata. Azzal ugyanis növényi tápanyagot veszítünk el ráadásul jelentős költséggel. Elvileg energiaelfecsérlését is jelenti, bár az a szerves vegyületek energiatartalmához viszonyítva jelentéktlenebb. Jelentős viszont eltávolításának az energiaigénye. A lakossági szennyvizekkel

a fejenként napi 60 g BOI mellett napi 13 g redukált nitrogén érkezik a tisztítótelepekre. A szerves anyag iszappá alakításakor a 13 g redukált nitrogénből közelítőleg 2 g épül be a keletkező 42 g szennyvíziszapba. A többi 11 g/főnap nitrogén nitráttá alakításához  $4,3 \text{ g O}_2/\text{g NH}_4^+$  oxigénmennyiség szükséges. A szerves anyag átalakításának a 72 g/főnap oxigénigénye mellett egy ilyen oxidáció 47 g/főnap oxigénmennyiséget igényelne. Ezért is a nitrát oxigéntartalmának a döntő részét az anoxikus térrészben a szerves anyagok (BOI) oxidációjára kell újrahasznosítani. Ez a tisztításon belül egy körkörös oxigén hasznosítás.

Ezzel az oxigén visszaforgatással a nitrogénátalakítás oxigénigénye lényegesen csökken. A 11 g/főnap redukált nitrogénmennyiségből csak alig több mint 1,5 g/főnap maradhat átlagosan a tisztított elfolyóvízben nitrát formájában. Ennek a keletkezéséhez  $1,5 \times 4,3 = 6,5 \text{ g/főnap oxigén}$  kell. A többi 9,5 g/főnap ammónium-N  $1,7 \text{ g O}_2/\text{g NH}_4\text{-N}$  fajlagos oxigénigénnyel csak közel 16 g további oxigénmennyiséget igényel a tisztításhoz. Ha ehhez rothasztás iszapvizével visszaforgatásra kerülő ammóniumot is figyelembe vesszük (ha van iszaprothasztás), további 1,7 g/főnap oxigénigényre van szükség. A teljes oxigénigény tehát a levegőztetésnél  $72 + 24 = 96 \text{ g/főnap}$ . Ez a korábban csak a BOI-re számolthoz hasonlóan átszámolva, egy köbméter szennyvíz tisztítására fajlagosan  $8 \times 96 = 772 \text{ g O}_2/\text{m}^3\text{nap} = 0,39 \text{ kWh/m}^3$ , gyakorlatilag annyi, mint a biogázból villamos energiává alakítható mennyiség. Ez azt bizonyítja, hogy a nagyobb tisztítótelepeken a levegőbevitel energiaigénye a biogázból fedezhető. Jól mutatja ezt a szombathelyi szennyvíztisztító 2. ábrán látható 2008-2014 évi adatsora (Kiss 2015).

Megjegyezhető az ábrához, hogy az üzem a levegőztetés korszerű szabályozásával

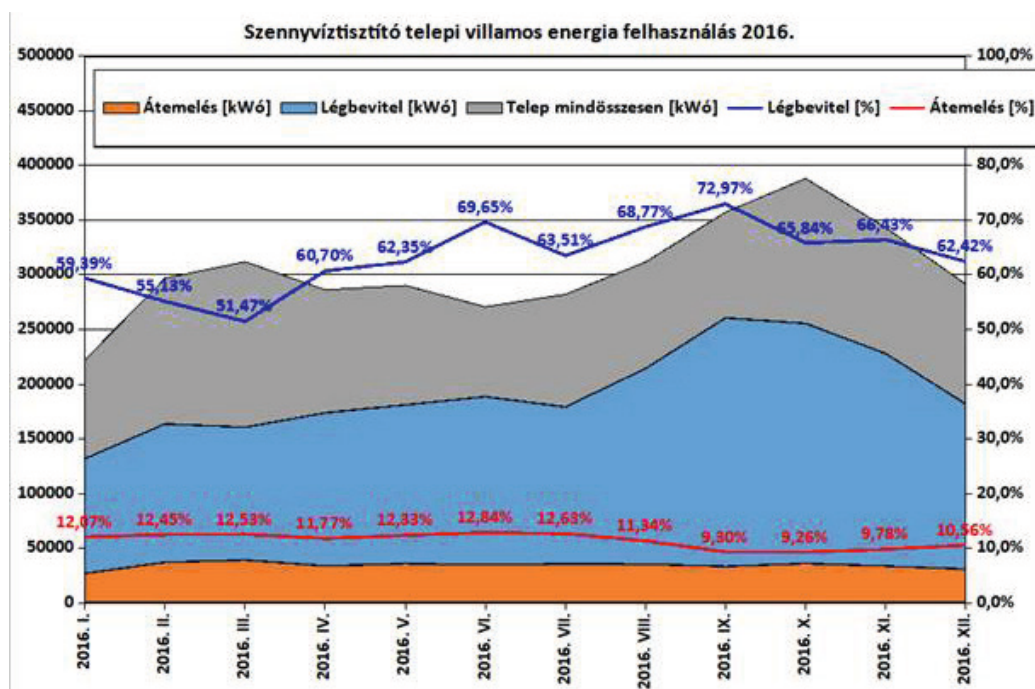


**2. ábra.** A szombathelyi szennyvíztisztító biogázból termelt és vételezett villamosenergia fogyasztása a rothasztók beüzemelése előtt és az azt követő években (Kiss G. 2015).

az oxigénigényt, illetőleg a levegőztetés villamos energia igényét azóta további 20-30 %-kal tudta csökkenteni. Ezt külföldi közlemények alapján rothasztók nélkül is érvényesíteni lehet a levegőztetés energiaigénye tekintetben (Gueta., 2017; Morenoetal., 2017). A kisebb telepeknél az iszaprothasztás kiépítése nem gazdaságos. De előfordul olyan szennyvíztisztító

is hazánkban, ahol a tisztítás kapacitása messze megfelelt az iszaprothasztó kiépítésének, mégis a gázából villamos áram termelés, mert a mai napig nem sikerült pályázatot nyerni, anyagiakat teremteni a gázmotorok vásárlására, beépítésére (3. ábra). Ez nyilvánvalóan az államgazdálkodás és pályázati rendszerének a hiányosságaival magyarázható.





**3. ábra.** A székesfehérvári szennyvíztisztító 2016 évi villamos energia felhasználása (Gilián Z., 2017).

A korábban említett ammónium jobb hatásfokkal történő eltávolítása (Anammox) a rothasztás meleg iszapvizéből mára energiatakarékosan is történhet. Erre viszont megint csak a nagy szennyvíztisztítók esetében adódik lehetőség. Ennél a nitrogéneltávolítás csak autotrof mikroorganizmusokkal történik, melyekhez nem kell szerves anyag sem, viszont valamiből szükségük van az autotrófoknak hidrogénkarbonátra. Két ammónium ion nitrogénje inertizálható másfél molekula oxigénnel, ami ugyancsak fajlagosan 1,7 g O<sub>2</sub>/gNH<sub>4</sub>-Noxigénigény. Az Anammox fajok elszaporítása ugyanakkor nagyon lassú, rendkívül szabályozásigényes. A megoldás jelentőségét az is csökkenti, hogy a szennyvíztisztítóba kerülő ammóniumnak csak alig valamivel több, mint 10%-a kerül rögzítésre a szennyvíziszapba. A felének az elrothasztása eredményeként csak mintegy 5%-a kerül be az iszapvízbe, hogy abból az említett, tengereinkben évmilliárdokkal ezelőtt bőségesen jelen volt mikroorganizmusokkal inertizálódjon elemi nitrogénné.

Ennek az eredménye, hogy hazánkban csak két szennyvíztisztítóban került eddig kiépítésre, s közülük is ma már csak az egyiknél működik. Legnagyobb probléma azonban az, hogy az Anammox megoldás sem biztosít semmilyen nitrogénvisszatartást, újrahasznosítási lehetőséget. A tisztítók nitrogén terheléséből annak jelenleg az iszappal a mezőgazdaságba csupán a 5-10%-a kerül vissza növényi tápanyagként a talajba.

## FOSZFÁTOK

Az eddig bemutatott hagyományos tisztításnál keletkező eleveniszap sajnos az átlagos lakossági szennyvíz foszfortartalmának csak mintegy a negyedét-harmadát képes magába építeni. A többit a szükséges határértékig kicsapószerekkel, háromértékű fémsókkal kell abba beépíteni (vízfázisból eltávolítani). Van ugyan egy ettől eltérő, 1972-ben szabadalmaztatott technológia a biológiai foszforeltávolítás megnövelésére,

de az a denitrifikációhoz hasonlóan még egy medence beiktatását igényli. Ennek célszerűen a denitrifikáló előtt kell lenni, mert abban a foszforcseré tápanyaga a nyers szennyvíz acetát tartalma, amelyre persze mindegyik heterotrof mikroorganizmus csoport egyaránt áhítozik, azaz nagy sebességgel kivonna a vízből. A tápanyagérzékenység miatt így a folyamat elég kényes, s célszerű az ilyen rendszereknél is megfelelő vegyszeres kiegészítést kiépíteni. Igyekezni kell ugyanakkor a biológiai többletfoszfor eltávolítás maximálására, mert esetében csaknem a teljes foszformennyiség az iszapsejtekben marad, s azokból a talajban gyorsan és jól hasznosul.

A vegszerrel történő foszfor eltávolítás vas-, vagy alumínium-foszfátot termel, amelyek az iszaptól a talajban felvehetetlen, vagy rendkívül lassan hasznosuló termékek. Napjainkban a Föld foszforkészleteinek csökkenésével egyre sürgősebbnek vélik az iszap foszfortartalmának az újra hasznosítását, mert az fontos tápanyaga a növénytermesztésnek. Erre a már említett biológiai többletfoszfor felvétellel nyílik legjobb lehetőség. Ezzel szemben az iszap energetikai hasznosítása iszapégetéssel csak a maradék tovább feldolgozásának a kellő technológiai fejlesztése után biztosíthat foszfor visszaforgatást. Jelenleg Németországban még csak az iszap égetési maradékának közel a harmada hasznosul építőanyag komponensként. Ennek ellenére ezek a megoldások is körkörös anyaggazdálkodást fontos elemei napjainkban.

A foszforeltávolítás hatásfoka valamelyest javítható olyan módon is, hogy az anaerob iszaprotthasztás után egy kiegészítő lépésként az meleg vizes iszaptól az oldott foszfátot struvitként ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ ) kicsapatják. Ez a megoldás azért nem túlzottan jó foszfor kihozatalú, mert

a rothasztóban a bekerülő szerves anyagnak (primer és szekunder iszapkeverék) csak mintegy a fele alakul metánná és széndioxiddá. Ráadásul a primer iszapnak mintegy a kétharmada, míg a szekundernek csak az egyharmada. Pedig a foszfát döntő mennyisége a szekunder iszapban van a korábban már említettek miatt. Ráadásul az iszapban levő fém-hidroxid csapadék is megköti a rothasztásnál a sejtekből kiszabaduló foszfát egy részét. Ezzel szemben a sejtekben levő fehérjékből sokkal nagyobb mennyiségben szabadul fel ammónium, aminek a kinyerése, vagy immobilizálása az adott reakcióval csak olyan mértékben lehetséges, ahogyan az oldott foszfát ahhoz rendelkezésre áll. A sejtek savas, vagy lúgos feltárásával a foszfát sokkal nagyobb mértékben kiszabadítható az iszaptól, de ez a lehetőség bonyolultabb, vegyszerigényesebb, költségesebb technológiát igényel, s a gyakorlatban eddig még nem is vált be.

## RÉGÓTA ISMERT LEHETŐSÉG ÚJSZERŰ KIÉPÍTÉSE

Érdekes lehetőség került kidolgozásra az utóbbi évtizedekben a szennyvíziszap autotermotofil aerob oxidációjával (ATAD). Ez a megoldás az anaerob rothasztástól eltérően a magas hőmérsékletű, levegővel történő oxidációt végez (Pembrokeetal, 2019). Történhet ez egy vagy két lépcsőben is. Az utóbbinál az első lépcső lehet mezofil is. Az anaerob rothasztáshoz hasonlóan ennél is az iszap szerves anyagának a fele kerül átalakításra, oxidációra, csökkentve a maradék iszap mennyiségét. A keletkező hő biztosítja az iszap felfűtését. A gyakorlatban inkább annak a hűtését, termosztálását kell megoldani. Az oxigénbevitel hatásfoka persze a hőmérséklet növekedésével nagymértékben

romlik (speciális levegőztetés, ami egyidejűleg 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 széndioxid tartalmú forró gázzal, valamint az ugyanilyen iszapvízzel távoznak (Horváth T. 2021).

A gázt/gőzt rendszerint az ATAD egységet megelőző eleveniszapos medencékbe fuvatják, ahol a bontható komponenseit az eleveniszap eltávolítja a vízfázisból, széndioxiddá és szennyvíziszappá alakítja. Az iszapvíz centrifugálás után szintén visszaforgatható az eleveniszapos biológiai tisztításra, de lehetőség van ebben az esetben is az abból történő, fentebb bemutatott struvitos foszfor kicsapatásra, valamint alacsonyabb hőmérsékleten egy ciklikus nitrifikációra, denitrifikációra. Az utóbbihoz tápanyag az iszapvízben bőségesen rendelkezésre áll.

További lehetőség ebben az esetben a forró iszapvíz desztillációja is, mert megfelelő folyamat vezetés esetén az iszapvízbe kerül a gyors bomlásnál keletkező illó savak jelentős része, amely tovább feldolgozással háztartásban használható mosó, tisztítószerként felhasználható. A nagy hőmérséklet ugyanakkor kedvező a termikusan stabilizált iszap további kezelésének, hasznosításának is. A nagy hőmérsékletű oxidáció jól fertőtlenített iszapot termel, melyet a centrifugáról szárítóba lehet vinni, ahol a saját hője, valamint a termosztálásnál elvont reakcióhő segítségével előnyösen szárítható. Ha a szárítást szolár szárítóban végzik, a kiépítés a szárításnak kedvező, sőt abban a nap energiáját is valamelyest hasznosítani lehet a szárításhoz. Az így előállítható stabilizált, fertőtlenített termék a mezőgazdaságban komposzttal egyenértékűen jól felhasználható (legalább is az Egyesült Államokban).

Az ATAD hátránya, hogy elég költséges a berendezés kiépítése, továbbá hasonló az oxigénbevitel is, mert a nagy hőmérsékleten az oxigén rosszul oldódik be az iszapos vízbe. A termofil oxidációhoz megfelelő lebegőanyag koncentrációjú iszapot is kell bevinni az ATAD reaktorba, ami elővíztelenítést igényel. Az oxidált iszap meg talán még nehezebben vízteleníthető, mint az anaerob rothasztás iszapja. Ez jelentős segédanyag (koaguláns és polielektrolit) felhasználást igényel. Talán ezért is, abban az üzeméret tartományba ajánlják, ahol a termelt iszap viszonylag kevés az anaerob rothasztás, villanyáram termelés kiépítéséhez, viszont kisebb régióban keletkező iszapok gyűjtése, majd a közvetlenül hasznosítható sterilizált szilárd termék mezőgazdasági felhasználása célszerűen megoldható.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A nitrogéneltávolítás oxigénigénye tehát mintegy harmadával növeli a szennyvíztisztításnál a szerves anyag immobilizációét, tisztított vízből történő visszatartását gyenge hatásfokú denitrifikálás azonban könnyen másfélszeresére is növelheti azt. A körkörös levegő gazdálkodás (denitrifikálás) tehát a szennyvíztisztítás, nitrogéneltávolítás tekintetében rendkívüli fontosságú. Javíthat a hatásfokon a napjainkra egyre általánosabb, levegőztető medencékben történő levegőztetés szabályozás. Ehhez a DO mérésén túl továbbanalitikai eszközök beépítése kell. Ezzel kiépülhet az ammónium mérés alapján történő DO setpoint szabályozás, valamint a folyamatos nitrátmérés alapján a levegőztetés időszakos szüneteltetése, illetőleg a belső recirkuláció szabályozása is.

A hazai tisztított szennyvíz határértékek ugyanakkor a kisebb tisztítók, illetőleg kevésbé érzékeny

befogadók esetén nagyobb nitrát határértékeket is engedélyeznek, ami az igénytelenebb szabályozást is megengedi. Ez viszont az oxigénigény, s vele az energiaigény növekedését eredményezi. Ezen túl éppen a kisebb tisztítóknál rendszerint gyengébb hatásfokú a levegőbevitel is, ami a fajlagos oxigénigényt tovább növeli. Adott üzemméret alatt anaerob iszaprothasztás nem is gazdaságos, ami a szennyvíziszap potenciális energiája felének a hasznosítását is kizárja.

Összességében így megállapítható, hogy az iszaprothasztást és biogázzal történő villanyáram termelést végző szennyvíztisztítók iszapjukból szinte teljes mértékben meg tudják termelni a levegőztetés áramigényét. Ha a rothasztáshoz együtt rothasztható külső segédanyag is rendelkezésre áll, mint Észak- és Dél-Pesten, vagy Debrecenben, a biogázból nyerhető energia a teljes tisztítási költséget is fedezni tudja. A Debreceni Vízmű Zrt. például a termelt biogázból képes a tisztítótelep átlagos villamos energia igényének közel a 120%-át, hőenergia igényének pedig akár a 150%-át is biztosítani

(Fülöp, 2021). Tudni kell azonban, hogy egy szennyvíztisztítóban nem csak a levegőbevitel igényel elektromos energiát. A telep világításához, szennyvíz-emeléséhez, recirkulációjához, keveréséhez, az iszap víztelenítéséhez, majd a rothasztó keveréséhez, az iszapok víztelenítéséhez, centrifugálásához, szárításához, s az azt követő iszapelhelyezéshez további energiára van szükség. Ezek mennyisége napjainkban közel megegyezik a levegőztetéshez szükségével.

Az anyag nem foglalkozott a tisztításhoz szüksége vegyszerekkel sem, pedig azok is jelentős költségei a tisztításnak, bár nem villamosenergia költségek. Ugyanez igaz a tisztítás költségében jelentős tételt jelentő karbantartásra, munkabérre is. Az egész tisztítás megindulásához azonban megelőzően igen szerteágazó beruházás kell, ami a szennyvízgyűjtés kiépítését, közcsonarendszert, utakat, no és a szennyvíztisztító kiépítését is jelenti. Ezekkel a tisztítás fajlagos költsége szükségszerűen az energiafajlagosainak a sokszorosára rúg.

## ► IRODALOMJEGYZÉK



## SZERZŐK:



**Dr. Kárpáti Árpád:** 1969-ben a Veszprémi Vegyipari Egyetem folyamatszabályozás és automatika ágazatán szerzett vegyészmérnöki diplomát. Az egyetem Széntechnológia és Ásványolaj Tanszékén 1978-ban védte meg a gépészgyártásból készített műszaki doktori dolgozatát, de két év múlva ugyanitt már környezetvédelmi szakmérnöki diplomát szerzett. Közben az olajos, zsíros szennyvizek tisztítására, a fizikai-kémiai módszerek fejlesztésére, gyakorlati alkalmazására (húsipar, tejipar) állt rá. 1984/85 folyamán egy éven át Balatonfűzfőn a Nitrokémiai biológiai szennyvíztisztítójában volt, s megismerhette az iparág mindennapi nehézségeit is. 1987-ben arany jelvényes feltaláló címet nyert el.

1990/91-ben a Hollandiai Delft-ben szerzett környezetmérnöki diplomát. Hollandiai tapasztalatai, kialakított személyes kapcsolatai nagyban segítettek szakismeretei bővítésében. 1998-ban készítette és védte meg Ph. D dolgozatát. Azóta eredményeit számos publikáció, írott egyetemi oktatási segédanyag, 3 szabadon használható e-learning jegyzet elkészítése és több szennyvíztisztító technológia tervezése dokumentálja. 2005-ben volt hallgatóival megalapították a PureAqua Kft-t, amely azóta a hazai vízipar jelentős tényezőjévé nőtte ki magát. Egyetemi oktatásban ma már csak a valamikori szakmérnök csoporttársáról elnevezett, Pannon Egyetemhez tartozó nagykanizsai Soós Ernő Kutatóintézet szakmérnökképzésében vesz részt. 2021-ben a Veszprém megyei Mérnöki Kamarától az év mérnöke címet nyerte el. A Magyar Víz és Szennyvíztechnikai Szövetség vezetőségének megalakulásától napjainkig tagja.



**Dr. Galambos Ildikó:** 2002-ben végzett az akkori Szent István Egyetem Élelmiszertudományi Karán, akkor, ill. azt követően PhD munkájában is felszínalatti vizek kezelésével foglalkozott membrántechnikai eljárások alkalmazásával. 2014 óta vezeti a Pannon Egyetem Körforgásos Gazdaság Egyetemi Központ-hoz tartozó Soós Ernő Kutató-Fejlesztő Központ munkáját. Magyar, ill. nemzetközi pályázatok szakmai vezetője, tagja, szakértőként víztechnológiai területen NKFIH pályázatok értékelését segíti. A Pannon Egyetemen a Vízügyi üzemeltetési mérnök BSc, továbbá a Víz- és szennyvízkezelő rendszerüzemeltető szakmérnök képzés szakfelelőse. Szakmai munkájában különböző hulladékvizek, szennyvizek

visszaforgathatóságát vizsgálja és értékeli elsősorban membrántechnológián alapuló komplex eljárásokkal.