

Györki Gábor¹ 

Utókezelési technológiák és lehetséges alkalmazhatóságuk egyedi szennyvíztisztító kisberendezésekben²

Post-Treatment Technologies and Possible Implementations in Onsite Wastewater Treatment Systems

Napjainkban évente több száz milliárd köbméter szennyvíz keletkezik világszerte. Az emberiség évezredek óta kezeli a szennyvizet különböző módszerekkel, viszont a rohamos ipari fejlődéssel, új anyagok kifejlesztésével és széles körű felhasználásukkal olyan szennyező anyagok is megjelentek a szennyvizekben, amelyek eltávolítására a jelenleg elterjedten alkalmazott technológiák nem képesek. Ezeknek a gyakran nem biodegradálható, toxikus, környezetre és emberi egészségre káros anyagoknak a kezelésére ipari szennyvizek esetén már használnak új technológiákat, főleg oxidáción alapuló utókezeléseket és fertőtlenítést. E problémát jelentő anyagok viszont nem csak az iparban fordulnak elő, így a lakossági szennyvizek kezelésére is ki kell terjeszteni a megfelelő technológiákat egyszerű, biztonságos és költséghatékony formában. Kiemelt prioritású az ilyen irányú technológiai fejlesztés, mivel az újrafelhasznált, valamint környezetbe engedett szennyvíz mennyisége egyre nő, ezzel együtt pedig folyamatosan halmozódnak fel a szennyezők a természetes és épített környezetben.

Kulcsszavak: szennyvíztisztítás, utókezelés, oxidáció, új szennyezők, egyedi szennyvíztisztító kisberendezések

Billions of cubic meters of wastewater are generated worldwide every year. Some methods of wastewater management have been in use for millennia. However, the rapid industrial development,

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar Vízi Környezettudományi Tanszék; Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar Víz tudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, e-mail: gyorki.gabor@uni-nke.hu

² A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

the invention of new substances, and their extensive use have introduced pollutants into wastewater that cannot be removed by the currently used technologies. In the case of industrial wastewaters, new technologies, primarily based on oxidation and disinfection, are used to remove toxic, often non-biodegradable substances that are harmful to the environment and human health. However, these problematic substances are not limited to industrial settings, such technologies need to be extended to treat domestic wastewater in a simple, safe, and cost-effective manner. Developing these technologies must also be prioritised, given the increasing volume of wastewater recycled and released into the environment, continuously accumulating pollutants in the natural and built environment.

Keywords: wastewater treatment, post-treatment, oxidation, contaminants of emerging concern, onsite wastewater treatment systems

A szennyvíztisztítás fejlődése

A szennyvízkezelés korai története

A szennyvízkezelés évezredes múltra tekint vissza, értelemszerűen kezdetben az emberi egészség védelme érdekében kezdtek el foglalkozni a szennyvízzel. A letelepedett közösségek felgyülemlett hulladéka problémává vált, a legegyszerűbb mód ennek megoldására a szennyvíz elvezetése volt. Közel 5500 évvel ezelőtt Mezopotámia néhány lakóházának már volt lefolyója és szennyvíztározója, az Indus-völgyi civilizációban pedig szűrést és ülepitést alkalmaztak a szennyvíz közvetlen környezetbe engedése előtt. Az ókori Görögországban az összegyűjtött szennyvizet elvezették, és a termőföldeken öntözésre használták fel.³

Bár a veszélyes, betegségeket okozó anyagok így az emberi élőhelyektől távolra kerülnek, a természetes környezetre jelentett kockázatok ezzel nem szűnnek meg. A múltban a kisebb népsűrűség miatt ez nem jelentett nagy problémát, a természetes lebontó és átalakító folyamatok megbirkóztak a szennyezéssel, és a ma ismert, kockázatot jelentő, gyakran szintetikus szennyező anyagok nagy része még nem létezett.⁴ A szennyvízzel járó környezetszennyezés és egészségügyi problémák akkor kezdődtek, amikor ugrásszerűen megnőtt a keletkezett szennyvíz mennyisége. Ezzel nagyjából egy időben megjelentek olyan szennyezők, amelyeket a természetes folyamatok már nem voltak képesek eltávolítani, legalábbis olyan magas koncentrációban nem, amelyben ezek a környezetbe kerültek.⁵ Ez az iparosodás és városiasodás korára tehető, a szivattyú és a gőzgép feltalálása után korlátlan mennyiségű víz állt például a fellendülő vegyipar és a lakosság rendelkezésére.⁶ A 20. században nagy fokú fellendülés indult a szennyvíz elvezetését és kezelését célzó projektekben és törvényalkotásban, definiálták a fő szennyvízparamétereket, és felgyorsultak a tisztítást célzó kutatások.⁷

³ LOFRANO–BROWN 2010.

⁴ SARMA 2018.

⁵ LOFRANO–BROWN 2010.

⁶ JUHÁSZ 2011.

⁷ GENE 2009.

A szennyvíztisztítás jelentősége napjainkban

Napjainkban a világon körülbelül 380 milliárd köbméter lakossági szennyvíz keletkezik évente, ami várhatóan 24%-kal fog emelkedni ebben az évtizedben, és 51%-kal 2050-ig. Ez csak a háztartásokban keletkező szennyvizet foglalja magába, az iparban keletkezett szennyvizet, technológiai vizeket nem.⁸ Ez olyan mennyiségű szennyeződést jelent, amelyet a természet nem képes kezelni, így elengedhetetlen a lehető legjobb hatásfokú szennyvíztisztítás. A szennyvízikibocsátás veszélyezteti a felszíni és felszín alatti vízbázisokat, a vízi és szárazföldi élőhelyeket, valamint termőföldeket. Bár a szennyvízzel való öntözés gyakori, az ezredforduló óta kezdenek előtérbe kerülni a kezelt szennyvíz további felhasználási formái. A mezőgazdaságon kívül széleskörűen alkalmazható az iparban is, felhasználható az építőiparban, papír-, műanyag- és fémgyártásnál, valamint üzemekben hűtővízként. A háztartásokban használható többek között toalettblítésre, tisztításra, autómosásra és kerti öntözésre. A vízkészletek újratöltése és kezelés után a közvetlen ivóvízként való hasznosítása is egyre elterjedtebb.⁹ Ilyen esetekben különösen fontos a megfelelő tisztítás biztosítása, mivel az újrafelhasznált szennyvíz minden esetben közvetlenül vagy közvetetten érintkezésbe kerül az emberrel.¹⁰ Az utóbbi időkben az ipari tevékenységek és termékek által számos olyan új szennyező kerül a szennyvizekbe, amelyeket a szokványos szennyvíztisztítási technológiák nem képesek eltávolítani. E hiányosságok pótlására egyre gyakrabban alkalmaznak úgynevezett utókezeléseket vagy utótisztításokat, amelyek célja a fő tisztítási lépések után esetlegesen visszamaradt szennyezők és a másodlagos szennyezők eltávolítása, a fertőtlenítés, vagy a határértékek eléréséhez szükséges, általánosan jobb minőségű elfolyó előállítás. A szakirodalom használja a *post-treatment* (utókezelés) és *tertiary treatment* (harmadlagos tisztítás, amely a magyar szakirodalomban negyedleges tisztításként jelenik meg) fogalmat is, viszont ezek jelentése megegyezik, a biológiai lebontás után alkalmazott változatos, gyakran új fejlesztésű technológiákat foglalják magukban.¹¹ A centralizált szennyvíztisztító telepek mellett ezenkívül egyre népszerűbbé válnak az úgynevezett egyedi szennyvíztisztító kisberendezések (ESZKB) is. Ezek olyan decentralizált, többnyire kis méretű szennyvíztisztító rendszerek, amelyek egy-egy háztartás, épület vagy létesítmény szennyvizét kezelik a keletkezés helyén, általában kis léptékben. Leggyakrabban biológiai tisztítást (például eleveniszapos technológiákat) alkalmaznak, ezt követően a fázisszeparáció után elfolyó vizet elszikkasztják, esetenként öntözésre használják. Hazánkban is egyre elterjedtebb az ilyen berendezések telepítése főleg olyan településeken és területeken, ahol nem áll rendelkezésre csatornahálózat vagy központi szennyvíztisztító létesítmény.¹² Mivel e berendezések tisztított vize is a környezetbe kerül vagy emberrel érintkezhet, célszerű megvizsgálni, mely utótisztítási technológiák alkalmazhatók sikeresen ezen a területen. Jelen tanulmány célja, hogy áttekintse a gyakorlatban alkalmazott főbb utókezelési lehetőségeket, és megvizsgálja ezek alkalmazhatóságát az ESZKB-k esetén.

⁸ Environment and Natural Resources Department 2022.

⁹ CHFADI–GHEBLAWI–THAHA 2021; DUONG–SAPHORES 2015.

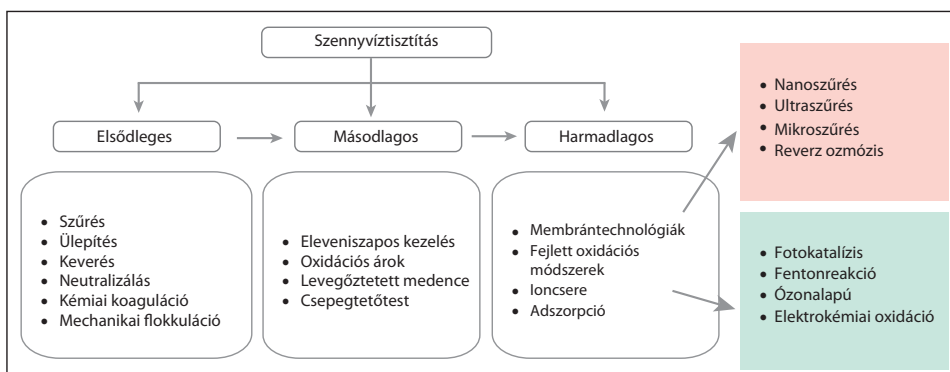
¹⁰ CERNICHARO 2006.

¹¹ SAFARI et al. 2013.

¹² GYÖRKI – PÁLNÉ SZÉN – KNISZ 2023.

Szennyvíztisztítási technológiák

A szennyvizek tisztításához az évek során számos különböző technológia jött létre. A leg-egyszerűbb csoportosítás alapján megkülönböztetünk fizikai, kémiai, biológiai, valamint kombinált módszereket. A fizikai módszerek közé tartozik többek között az ülepités, flotálás, rács- és membránszűrés, ultraszűrés és reverz ozmózis, valamint az adszorpció. Ritkábban alkalmazott technológiák a szárítás, égetés, kifagyasztás és a dialízis. A kémiai módszerek közé tartozik az egyszerű pH-kontroll, a koaguláció, vízlágyítás, ioncsere, a vegyszeres redukció és az oxidáció, valamint a kémiai fertőtlenítés. A biológiai módszerek technológiájukat tekintve összetettebbek az előzőknél, mivel élő szervezeteket vagy ezek termékeit használja a tisztításhoz. A legelterjedtebb biológiai módszerek a különböző eleveniszapos technológiák, amelyek változatos, jó lebontási képességű baktériumok közösségét alkalmazzák.¹³ Mivel a szennyvizek eredetüket tekintve rendkívül összetettek lehetnek, az ezek tisztítására kifejlesztett modern technológiai sorok általában tartalmaznak fizikai, biológiai és kémiai lépéseket is. A technológiai sor lépései logikus módon úgy vannak összeállítva, hogy az egyik lépés elfolyó vize az azt követő lépés befolyó vize lehessen. A durva fizikai szűrések a sor elején biztosítják, hogy a következő lépésekben a kezelendő szennyvíz homogén legyen, illetve szilárd részecskék kevésbé zavarják a berendezést vagy berendezéseket. Hasonlóképpen, az esetleges vegyszeres kezelésnek (például utólagos klórozás) ajánlott a legvégső lépésnek lenni, hogy a vegyszerek ne akadályozzák a biológiai tisztítás hatékonyságát. A kombinált technológiákat gyakran tárgyalják tisztítási fokozatokra osztva, ahol az elsődleges tisztítás fizikai, a másodlagos biológiai, a harmadlagos pedig főleg kémiai kezelést jelent (1. ábra).



1. ábra: Szennyvíztisztítási lépések felosztása

Forrás: a szerző szerkesztése SHINDHAL et al. 2021 alapján

¹³ KARCHES 2020; PATWARDHAN 2017.

Az utóbbi években, évtizedekben megjelent negyedleges tisztítás vagy „utókezelés” egyre nagyobb jelentőséget kap. Ez főleg az újonnan megjelent, első három lépésben nem, vagy csak nehezen kezelhető antropogén szennyezők eltávolítását szolgálja, mint az úgynevezett új szennyezők (*contaminants of emerging concern*, CEC), mikroműanyagok, szerves és szervetlen mikroszennyezők, gyógyszermaradványok, nehézfémek, radioaktív szennyezők, antibiotikum-rezisztencia-gének (ARG) és az ezekhez kapcsolódó antibiotikumrezisztens baktériumok (ARB). Erre alkalmazható többek között aktív szén adszorpció, membránszűrés, kémiai kicsapás, fejlett oxidációs módszerek (*advanced oxidation processes*, AOP) és a biológiai nehézfémmegkötés, valamint ezek kombinációja is.¹⁴

Utókezelések jelentősége

A kezelt, elfolyó szennyvíz minősége az alkalmazott technológiáktól és a szennyvíz kezdeti minőségétől függ, de minden szennyező, főleg az új szennyezők tökéletes eltávolítása nem elvárható a jelenlegi módszerektől. Az ipari szennyvizek olyan szintetikus, szerves anyagokat tartalmazhatnak, amelyek nem biodegradálhatók, vagy egyenesen toxikusak az élő rendszerek számára. A háztartási szennyvizek is gyakran tartalmaznak ilyen anyagokat, fertőtlenítőszer, tisztítószer, kozmetikai készítmények, gyógyszerek formájában.¹⁵ Az antibiotikum rezisztenciára egyre nagyobb figyelem fordul, a szennyvizekben ARG-k és ARB-k is megtalálhatók, amelyek globális szinten jelentenek kockázatot.

A környezetbe engedhető és újrafelhasznált szennyvizekre vonatkozó jogszabályi előírások jelenleg nem állnak összhangban a szennyvizek nagy fokú összetettségével és változatosságával. Ebből adódóan számos olyan szennyező (legyen az kémiai vagy biológiai eredetű) monitorozása nem kötelező, amely megtalálható a szennyvizekben. Az előírások hiánya miatt ezek nagy eséllyel el is jutnak a természetbe vagy a felhasználási helyre, hatásuk egyelőre kevésbé ismert, előre nem látható károkat okozhatnak. Az 50/2001. Korm. rendelet rendelkezik a szennyvíz és szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználásáról, meghatároz kötelezően monitorozandó paramétereket, és maximális határértékeket is megszab.¹⁶ A 27/2005. KvVM rendelet a használt vizek és szennyvizek kibocsátásáról rendelkezik, az előző renDELETEH hasonlóan leírja a kötelezően vizsgált paramétereket, és maximális határértékeket határoz meg.¹⁷ A mérendő paraméterek listájából látható, hogy a két rendelet tartalmazza a nehézfémeket, az összes ásványi szénhidrogént (TPH), policiklusos aromás szénhidrogéneket (PAH) és poliklórozott bifenilek (PCB) és bakteriális paramétereket, a 27/2005. rendelet pedig néhány peszticidet is. Egyik sem írja elő azonban a gyógyszermaradványok, mikroműanyagok, ARG-k és ARB-k és számos további új szennyező mérését. A kibocsátásra vonatkozó rendelet előírja

¹⁴ Environment and Natural Resources Department 2022; KNISZ 2020; UMAR 2022.

¹⁵ EGBUIKWEM–MIERZWA–SAROJ 2020; UMAR 2022.

¹⁶ 50/2001. (IV. 3.) Korm. rendelet.

¹⁷ 27/2005. (XII. 6.) KvVM rendelet.

ökotoxikológiai tesztek elvégzését, azonban ez nem elégséges minden, a listából hiányzó, de aggodalomra okot adó anyag monitorozásának kiváltására. A két rendeletet összehasonlítva továbbá észrevehető, hogy a mezőgazdasági felhasználásra szánt szennyvíznek és szennyvíziszapnak kevesebb paraméternek kell megfelelni, mint a kibocsátott szennyvíznek. Ez a kevésbé szigorú előírás nem megalapozott, egyrészt a mezőgazdasági területekről a nehezen bomló vagy nem bontható szennyezők könnyen bekerülnek a talajba és a felszíni, illetve felszín alatti vizekbe, másrészt ezeket felvehetik a növények, vagy megtapadhatnak rajtuk, így bejutnak az élelmiszerláncba.¹⁸ Az utókezelések egy lehetséges megoldást kínálnak az ilyen, jelenleg nem monitorozott paraméterek eltávolítására.

Az utókezelés lehetőségei

Ha a konvencionális tisztítási lépésekkel nem távolítható el minden típusú szennyező, vagy nem érhető el megfelelő hatékonyságú tisztítás, be kell iktatni valamilyen utókezelési technológiát. Ennek típusa és léptéke a tovább tisztítandó szennyvíz pontos összetételétől és mennyiségétől függ, továbbá meghatározza az, hogy befogadóba kerül vagy felhasználják-e. Többnyire fizikai-kémiai technológiák terjedtek el, de biológiai és kombinált módszerek is ismertek (2. ábra). A fejezetben a szakirodalomban leggyakrabban előforduló típusokat mutatjuk be.

Fizikai

- Szűrési technológiák
- Adsorpció eljárások
- UV-besugárzás

Kémiai

- Kémiai kicsapás
- Egyszerű vegyszeres oxidáció
 - Klórozás
 - Hidrogén-peroxidos kezelés
 - Ózonozás

Biológiai

- Biológiai nehézfém-megkötés

Kombinált

- Fejlett oxidációs módszerek
- Természetközeli megoldások
- Tározás

2. ábra: A főbb utókezelési technológiák csoportosítása

Forrás: a szerző szerkesztése

¹⁸ GUPTA–KHAN–SANTRA 2010.

UV-besugárzás

Az UV-besugárzás alapvetően jó módszer a fertőtlenítésre és az utólagos oxidációra, mivel nem igényel vegyszereket, így ezek tárolását, szállítását, manuális vagy automata adagolását sem, ezáltal relatíve biztonságos. A tanulmányok túlnyomó többsége szerint legnagyobb előnye, hogy nem képez fertőtlenítési melléktermékeket,¹⁹ így általában nem szükséges további lépéseket beiktatni. Ezzel szemben, mivel más oxidációs módszerekhez hasonlóan az UV-besugárzás is létrehoz szabad hidroxilgyököket, a szennyvíz összetételétől függően ez esetben is fennáll a melléktermékek képződésének lehetősége.²⁰ Ezenkívül egy kutatás rávilágított, hogy a szerves anyagok UV-fény hatására olyan szerkezetváltozáson mehetnek keresztül, amely során megnő a szabad klórral való reaktivitásuk, így elősegítve a klórozási melléktermékek képződését.²¹ Fertőtlenítés szempontjából előnyös, hogy az UV-fény a klórnak ellenálló baktériumok ellen is hatásos,²² de a besugárzás után fotoreaktiváció léphet fel, és a baktériumok fotolízis enzime megjavítja az UV hatására létrejött DNS-hibákat.²³ DNS-károsító hatása miatt antibiotikum-rezisztencia-gének inaktiválására is alkalmas.²⁴ Hátránya viszont, hogy a víz UV-elnyelése magas, így egy átlagos teljesítményű UV-lámpával csak néhány centiméter vastagságú vízréteget lehet kezelni. Hasonlóképp, minden szilárd szennyeződés elnyeli az UV-sugárzást, így csak megfelelően szűrt, homogén szennyvíz kezelésére alkalmas.²⁵ Fontos megemlíteni, hogy az irodalmi adatok között jelentős a szórás, a hatékony teljesítményre vonatkozó eredmények gyakran egymásnak ellentmondók, és jelentősen függenek attól, pontosan milyen szennyező eltávolítását célozza az UV-kezelés.

Egy szürkevíz-újrahasznosítást vizsgáló tanulmányban azt találták, hogy egy 2,8 mW/cm² teljesítményű lámpával végzett 69 mJ/cm² dózisú UV-besugárzás a baktériumok 100%-át elpusztította egy megfelelően előkezelt szennyvízben, így mikrobiológiailag biztonságos vizet előállítva toalettlőtítéshez.²⁶ Egy DNS-fragmenseket célzó kutatásban 18 mJ/cm², illetve 27 mJ/cm² dózis nem volt hatásos a vizsgált DNS-fragmensek elroncsolásához, de a 600, 1248, 3743, illetve a jelentősen magasabb 12 477 mJ/cm² dózis már jó eltávolítási hatékonyságot ért el a legtöbb gén esetén. Vannak azonban olyan rezisztenciát kódoló gének, amelyek sokkal ellenállóbbak az UV-besugárzással szemben. Ilyen a tetraciklin antibiotikum elleni rezisztenciagén, amelynek elroncsolásához a 30 100 mJ/cm² dózisú UV-sugárzás sem volt elegendő.²⁷

¹⁹ FRIEDLER–GILBOA 2010; ZHANG et al. 2023.

²⁰ WERT et al. 2007.

²¹ METCH et al. 2015.

²² FRIEDLER–GILBOA 2010.

²³ ZHANG et al. 2023.

²⁴ UMAR 2022.

²⁵ FRIEDLER–GILBOA 2010.

²⁶ FRIEDLER–GILBOA 2010.

²⁷ UMAR 2022.

Egyszerű vegyszeres oxidáció

Az egyszerű vegyszeres oxidációhoz különböző ágensek használhatók. Ilyenek többek között a klór, a kálium-permanganát, az ózon, valamint a hidrogén-peroxid. Többnyire a reaktív gyökök azok, amelyek a szerves anyagokat kisebb, általában veszélytelenebb molekulákra bontják.²⁸ A nagy mennyiségben keletkező reaktív gyökök miatt itt jelentősen nagyobb figyelmet kapnak a korábban említett fertőtlenítési melléktermékek, mint a trihalometánok, haloecetsavak, szerves halogének,²⁹ valamint aldehidek, ketonok és a bromát.³⁰ Egyszerre vagy egymás után alkalmazott fertőtlenítő módszerek egymásra kifejtett hatását is egyre több tanulmány vizsgálja.³¹

A klóros kezelés széles körben elterjedt, fertőtlenítési célokra és ARG-k, ARB-k eltávolításához hatásos, a magasabb koncentráció nagyobb hatékonyságot eredményez. Kutatások alapján nem célszerű átlépni az 5 mg/l-es koncentrációt, e felett a hatékonyság egyre kisebb lesz, és másodlagos szennyezők megjelenésével is számolni kell.³²

Az ózon direkt módon képes reagálni szerves anyagokkal, emellett reaktív gyököket is képez. Leggyakrabban ózongenerátor által, a kezelés helyszínén előállított ózont buborékoltatnak át a kezelt szennyvízen, átfolyó üzemű rendszert alkalmazva. Biológiai rendszerek hatékonyságának növelésére alkalmazható előkezelésként és utókezelésként is. Előkezelés esetén célja a perzisztens anyagok biodegradálható formákra való bontása, utókezelés esetén a cél a teljes mineralizáció elősegítése, hosszú láncú molekulák elroncsolása. Magas költségek és nagy energiaigény jellemzi, általában előkezelésként való alkalmazását preferálják. Egy kutatásban a biodegradációt követő ózonozás hatékonyságát vizsgálták ipari és háztartási szennyvíz kezelésére. A 45–60 perces behatási idejű, 13 mg/l/perces ózonozással a költségek alacsonyan tartása mellett még elérhető a jogszabályoknak megfelelő szervesanyag-lebontás.³³

Fejlett oxidációs módszerek alkalmazása

Az AOP-k alatt olyan kezelési technológiák kombinációját értjük, amelyek szabad gyökök, főleg hidroxilgyökök képzésén alapulnak. Valós körülmények közötti magas hatékonyságot általában a különböző oxidációs módszerek együttesével érik el, például UV-fotolízissel kombinált klóros vagy hidrogén-peroxidos kezeléssel. A fertőtlenítési melléktermékek keletkezésével számolni kell,³⁴ továbbá az UV-besugárzás és a klór korábban említett egyedi együttes hatásával.³⁵ Nagy léptékben az egyik legjobb módszer a szerves anyagok és DNS-ek lebontására, mikroorganizmusok inaktiválására. ARG-k eltávolítására az UV-besugárzással kombinált klóros kezelés hatékonyabb az egyszerű klóros kezelésnél. A hidrogén-peroxiddal együtt

²⁸ EGBUIKWEM–MIERZWA–SAROJ 2020.

²⁹ YE DU et al. 2017.

³⁰ WERT et al. 2007.

³¹ METCH et al. 2015; WERT et al. 2007.

³² UMAR 2022.

³³ EGBUIKWEM–MIERZWA–SAROJ 2020.

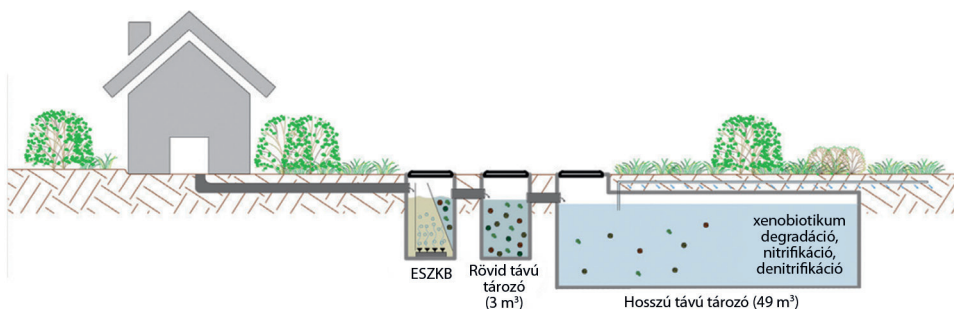
³⁴ WERT et al. 2007.

³⁵ METCH et al. 2015.

alkalmazott UV-besugárzás a leghatékonyabb kombináció, a nagyszámú szabad hidroxilgyök keletkezéséből adódóan.³⁶

Szennyvíz tározása

Az utókezelés egy lehetséges módja lehet a kezelt szennyvíz eltárolása a befogadóba engedés vagy újrafelhasználás előtt. A tározás során végbemenő pontos folyamatokról kevés információ áll rendelkezésre, biológiai átalakítás és feltehetőleg további ülepedés is történik. Néhány kutatás eredményei alapján különböző szennyvízminőségi paraméterek esetében jelentős javulásokat lehet elérni. Egy 2021-es kutatás megvizsgálta egy rövid távú és hosszú távú tározót alkalmazó ESZKB hatékonyságát (3. ábra).



3. ábra: Rövid és hosszú távú tározóval kiegészített ESZKB vázlata

Forrás: a szerző szerkesztése KNISZ et al. 2021 alapján

Az eredmények alapján a rövid távú tározás szignifikánsan javította, a hosszú távú tározás pedig ennél is jelentősebb mértékben javította a hagyományosan vizsgált szennyvízparamétereket (kémiai oxigénigény: KOI, biokémiai oxigénigény: BOI, összes lebegőanyag: TSS, növényi tápanyagok). A berendezés utóülepítőjéhez képest a hosszú távú tározó elfolyó vizében a KOI csökkenése 84%-ról közel 100%-ra változott, a BOI csökkenése pedig 90%-ról 99%-ra. Hasonlók az eredmények többek között a TSS, növényi tápanyagokra és detergenszerekre nézve is.³⁷ Egy ugyanilyen rendszerben azt találták, hogy a rövid távú tározás jelentősen csökkentette a TPH, PAH komponensek, valamint néhány peszticid koncentrációját, az összes PAH esetén 30%-os csökkenést eredményezve a berendezés utóülepítőjéhez képest. A gyakran vizsgált szennyvízparaméterek az előző kutatáshoz hasonlóan csökkenést mutattak a tározás során. Ez a kutatás továbbá felhívja a figyelmet az ESZKB-k karbantartásának fontosságára, egy rosszul karbantartott rendszer elfolyó vizében tízszer, de akár több nagyságrenddel is magasabb koncentrációban voltak jelen a vizsgált TPH és PAH komponensek. Bár a bakteriális összetétel esetén nem történt összehasonlítás az adott rendszer utóülepítője és tározója között, a tároláson átesett szennyvízben jelentősen alacsonyabb számú baktérium volt jelen. Fontos

³⁶ UMAR 2022.

³⁷ KNISZ et al. 2021.

megemlíteni, hogy a humán patogén *Salmonella* nemzetség még a tárolás után is jelen volt az elfolyó vízben, ezek alapján fertőtlenítésre önmagában nem alkalmas.³⁸

Természetközeli megoldások

A tavas, növényágyas és gyökérszívós tisztítók természetközeli megoldásnak számítanak, amelyek természetes lebontó folyamatokat használnak a szennyvíz tisztításához. Relatív alacsony költségük és kis energiaigényük miatt jó utókezelési alternatívák lehetnek, amelyben egy fejlett biológiai rendszerrel kombinálják. Kutatások alapján mind a szennyvíztavak, mind a gyökérszívós tisztítók hatékonyan csökkentették az előkezelt szennyvizek KOI és BOI értékeit, valamint a patogének számát is.³⁹

Szűrési technológiák

Különböző pórusméretű felületi és mélységi szűrők is alkalmazhatók utókezelésre, az így nyert víz minősége a pórusméret függvényében változik. Kisebb pórusméret esetén több szennyező akad fenn a membránokon, szilárd részecskék mellett többek között a baktériumok, mikroműanyagok és makromolekulák is. A membránok különböző polimerekből készülhetnek, például polipropilénből vagy cellulóz-acetátból. A reverz ozmózis féligáteresztő membránokat alkalmaz, ami csak a vízmolekulákat engedi át, az oldott anyagokat, sókat, lebegőanyagokat, sejteket nem. A kisebb pórusméret általában gyorsabb eltömődést eredményez, így a membránokat gyakrabban kell cserélni vagy tisztítani, ami jelentős költségekkel járhat.⁴⁰ Ezek minimalizálására megfelelő előkezelés szükséges, például előszűrés vagy előülepités.

Megvalósítási lehetőségek ESZKB-k esetén

Az egyedi kisberendezések kiegészítése utókezeléssel több problémát is felvet az üzemeltetés kapcsán. A legnagyobb különbség a szennyvíztisztító telepekhez képest, hogy a kisberendezések tulajdonosai és egyben üzemeltetői általában laikusnak számítanak a szennyvíztisztítás terén, nem várható el tőlük az üzemeltetéshez szükséges szaktudás. A kereskedelmi forgalomban kapható kompakt berendezések kialakításából adódik, hogy a tulajdonosnak nem kell potenciálisan veszélyes karbantartást végezni, viszont, ha vegyszeres kezelést kell a technológiába integrálni, a tulajdonosnak ismernie kell a biztonságos munkavégzés menetét. Egy másik, el nem hanyagolható szempont a költségek alacsonyan tartása. Joggal feltételezhető, hogy míg egy ipari létesítménynek van pénzügyi forrása az esetlegesen költséges technológiák üzemeltetésére, egy háztartásnak nincs, vagy nem kíván nagyobb összegeket ilyen célra fordítani. Egyszerű lehet a kis pórusméretű membránokkal történő utólagos szűrés vagy

³⁸ GYÖRKI et al. 2023.

³⁹ ENGIDA et al. 2020.

⁴⁰ YANG et al. 2021.

adszorpció használata, viszont a szűrők, töltetek cseréjére gyakran szükség lehet. UV-besugárzás alkalmazása esetén az alkalmazott lámpa teljesítményétől függően jelentős plusz energiaigény keletkezhet.⁴¹ Ezeket figyelembe véve, a biztonság és költséghatékonyság szempontjából a legmegfelelőbb választás az egyedi kisberendezésekhez a tározás (tározóban vagy tóban), esetleg a szakaszos UV-besugárzás lehet. Az utókezeléseket célszerű különválasztani a kisberendezésektől, így biztosítható a legnagyobb kompatibilitás különböző típusú, méretű és működési elvű berendezésekkel. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy az utókezelésnek egy különálló rendszerben kell történnie, amelynek befolyó vize a kisberendezés utolsó lépéséből érkező elfolyó, előkezelt szennyvíz.

A rövid és hosszú távú tározás hatását is vizsgáló tanulmányok által bemutatott technológiai felépítés kimondottan egyszerű, elégséges egy, kettő, speciális esetben akár több, néhány köbméteres tartályt elhelyezni a földfelszín alá.⁴² Ez a technológiai lépés bármilyen kisberendezés után beiktatható, ha a berendezés elfolyó vizét el lehet juttatni a tartályokba. Ez történhet egyszerűen egy átbukásos rendszerrel, ami energiaigény nélkül a beérkező vízzel egyenlő térfogatú elfolyó vizet mozgat át az első tartályba. A tartályok közötti áramlást ugyanilyen módon meg lehet oldani. Amennyiben gravitációs módon ez nem elérhető, egy kis teljesítményű szivattyúval folyamatosan vagy szakaszos módon a berendezésből a tartályokba lehet mozgatni a vizet, akár a földfelszín felett lévő tartályokba is.

Az UV-besugárzás technológiai szempontból egyszerűen megoldható, mivel az előkezelés és a szilárd szemcsék kiszűrése, ülepítése megtörténik a kisberendezésekben. A megfelelő hatékonysághoz az UV-fény dózist kell beállítani, amelyet az UV-lámpa teljesítménye, a behatási idő, valamint a kezelt vízréteg vastagsága határoz meg. Az UV-lámpa teljesítményét irodalmi adatok alapján vagy előzetes tesztekkel kell meghatározni, a megfelelő működés biztosítása érdekében pedig érdemes felültervezni. A teljesítmény függvényében a vízréteg vastagsága is változtatható, alacsonyabb teljesítményű UV-lámpa esetén vékonyabb vízréteget kell biztosítani. A kezelést átfolyásos vagy szakaszos rendszerrel is el lehet végezni. Átfolyásos rendszer esetén az állandó hatékonysághoz érdemes egy szivattyút alkalmazni állandó térfogatárammal, amely folyamatosan áramoltatja át a vizet a rendszeren, bekapcsolt UV-lámpa mellett. Felépítését tekintve lehet egy cső a csőben rendszer, amelynek közepén hosszában fut az UV-lámpa, vagy egy tetszőleges méretű csatorna, amelybe UV-lámpák merülnek. Alternatív megoldás lehet egyenletlen vízterhelés esetén egy puffertartály vagy reaktortér, amely szakaszosan működtethető. A tartály telítődése esetén bekapcsolnak a vízbe merülő UV-lámpák, a behatási idő végével pedig kikapcsolnak, a vizet egy szivattyú távolítja el a rendszerből. Az UV-besugárzás gyengeségét tekintve meg kell oldani az UV-lámpák felszínének tisztán tartását, ha a szennyvízzel való érintkezés miatt azon lerakódás, vízkő vagy biofilm képződik.

A háztartási szennyvizekben található veszélyes anyagok nem olyan változatosak és magas koncentrációjúak, mint egyes ipari szennyvizekben, ennek ellenére gyakran előnyös lenne

⁴¹ UMAR 2022.

⁴² GYÖRKI et al. 2023; KNISZ et al. 2021.

ózonos kezelés beiktatása. Bár technológiai akadálya nincs az ózongenerátor és a buborékolgató rendszer kis léptékű használatának, a magas költségek miatt jelenleg nem célszerű kisberendezések vízének kezelésére.

Természetközeli megoldásoknál (természetes vagy mesterséges tavas, növényágyas, gyökérszűrő tisztítás) figyelembe kell venni, hogy a kompakt rendszerekhez képest nagyobb területet igényelnek, a föld alá rejtés ez esetben nem lehetséges. A növények továbbá ki vannak téve az időjárás változásainak és eltérő hatékonyságot mutatnak évszaktól függően. Felépítését tekintve az előkezelt szennyvizet egyszerűen a területre kell engedni, változó terhelés esetén érdemes lehet egy puffertartály beiktatása.

A membránszűrés és a reverz ozmózis biztonságos és könnyen alkalmazható technológiák, amelyek a kisberendezések esetén a kis térfogatáram miatt jól használhatók. A megfelelő működéshez a kisberendezésből érkező vizet egy pumpa kell hogy magas nyomással átnyomja a membránra, amelynek viszont magas lehet az energiaigénye. Lakossági felhasználás esetén további probléma, hogy az eltömődött membránokat rendszeres időközönként regenerálni vagy cserélni kell. A regenerálás olyan szaktudást és odafigyelést igényelne a tulajdonostól, amely rendszerint nem elvárható, az egyszerű csere pedig jelentősen megemelné az üzemeltetési költségeket. Folyamatos ellenőrzés nélkül továbbá fennáll a veszélye, hogy a membrán telítődik, a rendszer működése pedig leáll.

Összegzés

A népességnövekedéssel és az ipari fejlődéssel a keletkező háztartási és ipari szennyvizek mennyisége is egyre növekszik. A jelenlegi trendek alapján összetételüket tekintve a szennyező anyagok változatossága és feltehetőleg mennyisége is folyamatosan emelkedni fog. Ezekkel párhuzamosan a környezetbe engedett szennyvízre vonatkozó határértékek szigorúbbak lesznek, és nagyobb jelentőséget kap majd a szennyvíz újrafelhasználása. Ahhoz, hogy a határértékeknek megfeleljen a kezelt szennyvíz, elengedhetetlen lesz nemcsak az iparban, de az egyedi szennyvíztisztító kisberendezéseknél is bevezetni az új szennyezőkre nézve is hatáson, nagy hatékonyságú utókezelési lépéseket. Ehhez már számos technológia rendelkezésre áll, azonban a kisebb léptékben való alkalmazhatóságukat, illetve költséghatékony működtetésüket még kell oldani. Sokat segíthetnek ebben a korábbi évek kutatásai, esettanulmányai, továbbá a sikeres projektek eredményei is.

Felhasznált irodalom

- CHERNICHARO, C. A. L. (2006): Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5, 73–92. Online: <https://doi.org/10.1007/s11157-005-5683-5>
- CHFADI, Tarik – GHEBLAWI, Mohamed – THAHA, Renna (2021): Public Acceptance of Wastewater Reuse: New Evidence from Factor and Regression Analyses. *Water*, 13(10), 1391. Online: <https://doi.org/10.3390/w13101391>

- DUONG, Kimberly – SAPHORES, Jean-Daniel (2015): Obstacles to Wastewater Reuse: An Overview. *WIREs Water*, 2(3), 199–214. Online: <https://doi.org/10.1002/wat2.1074>
- EGBUIKWEM, Precious Nneka – MIERZWA, Jose Carlos – SAROJ, Devendra Prakash (2020): Evaluation of Aerobic Biological Process With Post-ozonation for Treatment of Mixed Industrial and Domestic Wastewater for Potential Reuse in Agriculture. *Bioresource Technology*, 318, 124200. Online: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124200>
- ENGIDA, T. M. et al. (2020): Review Paper on Treatment of Industrial and Domestic Wastewaters Using UASB Reactors Integrated into Constructed Wetlands for Sustainable Reuse. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18, 3101–3129. Online: https://doi.org/10.15666/aeer%2F1802_31013129
- Environment and Natural Resources Department (2022): *Wastewater as a Resource*. European Investment Bank. Online: <https://doi.org/10.2867/31206>
- FRIEDLER, Eran – GILBOA, Yael (2010): Performance of UV Disinfection and the Microbial Quality of Greywater Effluent Along a Reuse System for Toilet Flushing. *Science of The Total Environment*, 408(9), 2109–2117. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.051>
- GENE, E. Likens (2009): *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00001-6>
- GUPTA, Nandini – KHAN, D. K. – SANTRA, S. C. (2010): Determination of Public Health Hazard Potential of Wastewater Reuse in Crop Production. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 7(4), 328–340. Online: <https://doi.org/10.1504/WRSTSD.2010.032741>
- GYÖRKI, Gábor – PÁLNÉ SZÉN, Orsolya – KNISZ, Judit (2023): Impact of Maintenance on Domestic Wastewater Treatment Systems. *Pollack Periodica*, 18, 60–65. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2023.00778>
- JUHÁSZ Endre (2011): *A szennyvíztisztítás története*. Budapest: Magyar Víziközmű Szövetség.
- KARCHES Tamás (2020): *Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények*. Budapest: Ludovika.
- KNISZ Judit (2020): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest: Ludovika.
- KNISZ, Judit et al. (2021): Genome-Level Insights Into the Operation of an On-Site Biological Wastewater Treatment Unit Reveal the Importance of Storage Time. *Science of The Total Environment*, 766, 144425. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144425>
- LOFRANO, Giusy – BROWN, Jeanette (2010): Wastewater Management through the Ages: A History of Mankind. *Science of The Total Environment*, 408, 5254–5264. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>
- METCH, Jacob et al. (2015): Enhanced Disinfection By-Product Formation Due to Nanoparticles in Wastewater Treatment Plant Effluents. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 823–831. Online: <https://doi.org/10.1039/C5EW00114E>
- PATWARDHAN, A. D. (2017): *Industrial Wastewater Treatment*. PHI Learning.
- SAFARI, Golam Hossein et al. (2013): Post-Treatment of Secondary Wastewater Treatment Plant Effluent Using a Two-Stage Fluidized Bed Bioreactor System. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(10). Online: <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-10>
- SARMA, Bornali (2018): Plasma Technology & Its Impact on Next Generation Smart Textile. *Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering*, 3(5), 555621. Online: <https://doi.org/10.19080/CTFTE.2018.03.555621>
- SHINDHAL, Toral et al. (2021): A Critical Review on Advances in the Practices and Perspectives for the Treatment of Dye Industry Wastewater. *Bioengineered*, 12(1), 70–87. Online: <https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1863034>
- UMAR, Muhammad (2022): From Conventional Disinfection to Antibiotic Resistance Control-Status of the Use of Chlorine and UV Irradiation during Wastewater Treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1636. Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph19031636>
- WERT, Eric C. et al. (2007): Formation of Oxidation Byproducts from Ozonation of Wastewater. *Water Research*, 41(7), 1481–1490. Online: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.020>

- YANG, J. et al. (2021): Ultrafiltration as Tertiary Treatment for Municipal Wastewater Reuse. *Separation and Purification Technology*, 272, 118921. Online: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118921>
- YE DU, Xiao-Tong et al. (2017): Formation and Control of Disinfection Byproducts and Toxicity During Reclaimed Water Chlorination: A Review. *Journal of Environmental Science*, 58, 51–63. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.013>
- ZHANG, Yi-Xuan et al. (2023): Ultraviolet-Based Synergistic Processes for Wastewater Disinfection: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 131393. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131393>

Jogi források

- 27/2005. (XII. 6.) KvVM rendelet a használt és szennyvizek kibocsátásának ellenőrzésére vonatkozó részletes szabályokról
- 50/2001. (IV. 3.) Korm. rendelet a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól