

Az emberi vizeletből történő tápanyag kinyerési módszerek bemutatása és összehasonlítása a körforgásos gazdaság jegyében

Nagy Judit¹, Tóth András József^{2,*}

¹BME-VBK Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék, 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3.

²BME-GPK Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3.

*ajtoth@envproceng.eu, +36 1 463 1494

Beérkezett: 2018. december 16.

Közlésre elfogadva: 2018. december 20.

KIVONAT

Az emberi vizelet tápanyagainak kinyerésére több módszer is alkalmas. Ezek közül bemutatjuk a főbb, eddig ismert és sikeresen végzett módszereket, mint a sztruvit kicsapást, az abszorpciót és sztrippelést, és a membrános műveleteket. Jelen tanulmányban összehasonlítjuk a módszereket, azok előnyeit és hátrányait. A tápanyag kinyerések legfőbb célja az újrahasznosítás természetes trágyaként, biztosítva ezzel a műtrágya alapanyagainak utánpótlását, melyek kimerülése az elkövetkezendő évtizedek egyik jelentős problémája.

Kulcsszavak: emberi vizelet, sztruvit kicsapás, abszorpció, sztrippelés, membrán műveletek

ABSTRACT

Nagy, J. and Toth, A.J.: Comparison of nutrient recovery methods from human urine in the spirit of circular economy

There are several methods for removal nutrients from human urine. Among them, the main and successfully applied methods are presented, such as struvite precipitation, absorption and stripping, and membrane operations. In this paper the advantages and disadvantages of these methods are compared. The main purpose of nutrient removal is to recycle as a natural fertilizer to ensure the supply of raw materials for fertilizer, which will be a major problem in the coming decades.

Keywords: human urine, struvite precipitation, absorption, stripping, membrane processes

BEVEZETÉS

2015. év végén az Európai Bizottság elfogadta a körforgásos gazdasággá alakulást elősegíteni hivatott csomagot, ami arra ösztönzi a vállalatokat és a fogyasztókat, hogy az erőforrások felhasználása gazdaságosabban történjék. A körkörös, vagy körforgásos gazdaság felismeri, hogy a környezetterhelés számos esetben nem csökkenthető csupán egyetlen termelési folyamaton belül, mert

elkerülhetetlenül keletkezik hulladék. Ezért a termelési, fogyasztási és hulladékkezelési folyamatokat össze kell kapcsolni, és a természetben eleve meglévő körforgást kell a termelésben, illetve az iparban is megvalósítani. Az ipari szimbiózist kell előmozdítani, vagyis amikor az egyik ágazat hulladékát egy másik ágazat nyersanyagként hasznosítja (IETC (2015); Európai Bizottság (2014)). Az 1. ábra szemlélteti a körforgásos gazdaságot (Vadász, N.Zs. (2016)).



1. ábra. Körforgásos gazdaság (Vadász, N.Zs. (2016))

Az Európai Bizottság programja ösztönzi a visszaforgatást különböző ágazatokban, célként meghatározva azt, hogy 2030-ra a lerakóban elhelyezett hulladék arányát 10% alá csökkentsük (Haáz, E. et al., (2016)). A lineárisról a körforgásos koncepcióra történő átálláskor az optimalizáció fő szabálya a következő: 'minél szűkebb a visszairányuló körforgás, annál kisebb, termékben megtestesült energia és munka vész el és annál több anyagot sikerül megőrizni'. A ma használatos újrahasznosítási folyamatok jellemzően 'lazák' vagy hosszú körfolyamatok, melyek a legalacsonyabb 'tápanyag-szintre' csökkentik le az anyagok

használatosságát (Circularfoundation.org (2018)). Ezt a koncepciót követve kell célul kitűznünk az emberi vizelet kapcsán az értékes tápanyagok kinyerését és újrahasznosítását.

Az emberi vizeletből történő tápanyagok kinyerésére a legfőbb módszerek, illetve kémiai reakciók a sztruvit kicsapódás, a sztrippelés és abszorpció együttese, vagy külön-külön való alkalmazása, illetve a membrános eljárások. Végző cél a visszanyert tápanyagok trágyaként való alkalmazása a mezőgazdaságban, valamint a szennyvíztisztítás energiaigényének, költségeinek csökkentése, illetve a vízöblítéses toalettek káros hatásainak kiküszöbölése. A tápanyag visszanyerésre

alkalmazott módszerek a trágyaként alkalmazott emberi vizelet közvetlen alkalmazásából származó hátrányok kiküszöbölésére is alkalmasak.

A TÁPANYAGKINYERÉSRE ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIÁK LEÍRÁSA

Sztruvit kicsapatás

A sztruvit jellemzői

A sztruvit kristályos anyag, fehér, szagtalan por, mely a szennyvízben vagy vizeletben természetes körülmények között is kicsapódik (l. 2. ábra).

A sztruvit hat vízmolekulás magnézium-ammónium-foszfát hidrát, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$. Moláris tömege 245,43

$g \text{ mol}^{-1}$, 15,4% magnéziumot, 4,3% ammóniumot, és 35,6% ortofoszfátot tartalmaz (Chirmuley, D.G. (1994); El Ralfie, Sh., Hawash, S. and Shalaby, M.S. (2013)). A sztruvit kicsapatás egyidejűleg alkalmas a foszfor és nitrogén visszanyerésére (Rahman, M.M. et al. (2011)), továbbá sztruvit kicsapatás közben a hormonok és gyógyszerek több mint 98%-a az oldatban marad, és a vizeletből kikristályosított sztruvitban nehézfémeket sem mutattak ki (Ronteltap, M., Maurer, M. and Gujer, W. (2007). A sztruvit könnyen tárolható, szállítható és alkalmazható, különösen granulált formában (Miso, A. and Spuhler, D. (2009)), habár a sztruvit termeléshez szükségünk van a vizelet szállítására is.



2. ábra. Sztruvit (Etter, B. et al. (2011); Westerman, P.W., Zering, K.D. and Rashash, D., (2009))

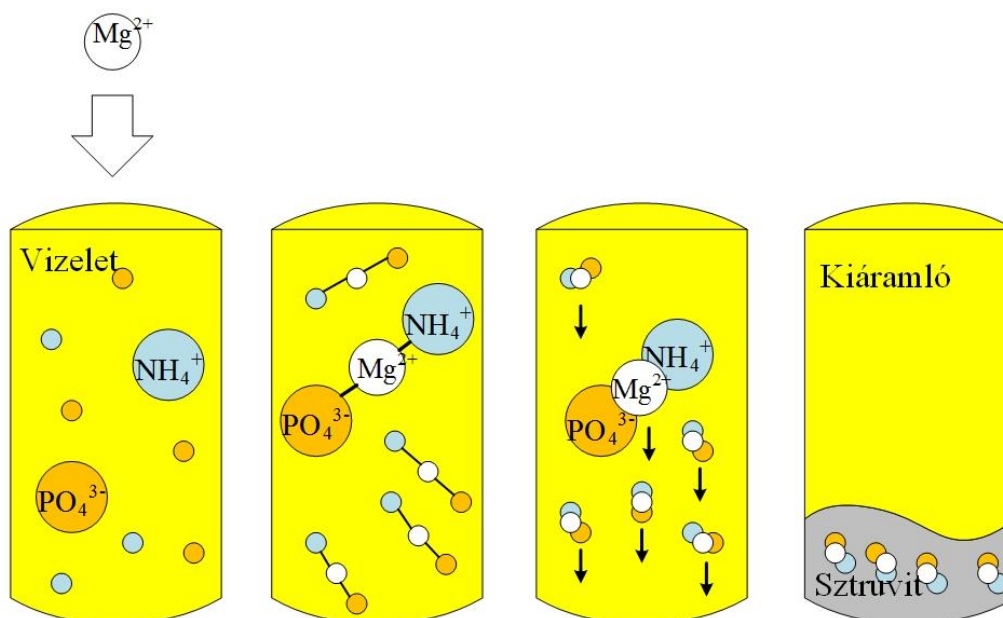
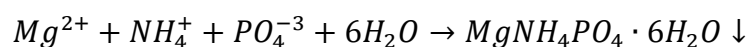
A sztruvit előállítása

Szennyvízből vagy emberi vizeletből történő irányított sztruvit kicsapatás elektrolízissel (Cusick, R.D. and Logan, B.E. (2012)), vagy kémiai reakcióval érhető el. Amikor a magnézium-ion, ammónium-ion és foszfát-ion koncentrációja eléri az oldhatósági határt,

akkor történik meg a kristályok kicsapódása. A vizelethez, ami ortofoszfátot (PO_4^{3-}) és ammónium-iont (NH_4^+) tartalmaz, magnéziumot hozzáadva a foszfát, ammónium és magnézium reagál egymással, így sztruvit kristályosodik ki. Ez a kristályos anyag szűrhető, gyűjthető

és finom porrá alakítható (Etter, B. et al. (2011)). A sztruvit keletkezése a 3. ábrán látható.

A sztruvit kristályok lúgos környezetben keletkeznek, az alábbi reakció szerint (Zhang, T., Ding, L. and H. Ren, (2009)):



3. ábra. A sztruvit keletkezése kémiai reakcióval, kicsapatással (szerkesztve Etter, B. et al. (2011) alapján)

A sztruvit termelésnek köszönhetően a foszfor 90%-a visszanyerhető a vizeletből. A folyamatot Etter, B. és munkatársai (2011) munkáján keresztül mutatjuk be (4. ábra).

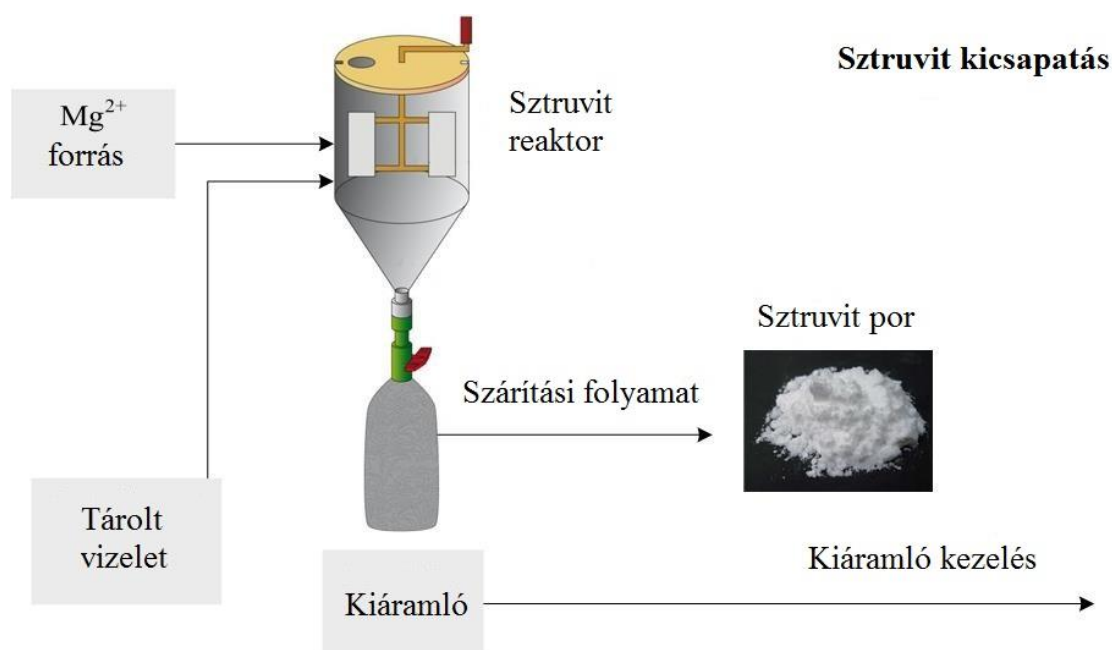
Emberi vizelettel teli keverő reaktorba magnéziumot adagolnak, majd 10 perc keverést követően a reaktor alján lévő szelep megnyitásával a keletkezett szuszpenziót a reaktor alatt elhelyezkedő szűrőzsákba engedik (Etter, B. et al. (2011)). A szűrőzsák visszatartja a sztruvitot, míg a kiáramló ág átfolyik rajta. Ezt követően a szűrőzsák egy-két napos szárítása következik. Szárítás után a sztruvit készen alkalmazható (4. ábra). A kísérletek alapján ez az egyszerű reaktor

képes volt a vizeletből a teljes foszfát 90%-ának visszanyerésére (Etter, B. et al. (2011)). Mivel a sztruvit természetes körülmények között is kicsapódik a vizeletből, minden, a rendszerben lévő csapadékot elegyítik a végső termékkel, maximalizálva ezzel a tápanyag visszanyerést. Fontos, hogy a magnézium oldható formában, elegendő mennyiségben, és elérhető áron rendelkezésre álljon a nyereséges sztruvit termelő üzem üzemeltetése érdekében (Etter, B. et al. (2011)).

A sztruvit kicsapás hatékonyságát számos tényező befolyásolja. Ilyen tényezők a pH, a magnézium-, ammónium- és foszfát-ion koncentrációja és moláris

aránya, a hőmérséklet, a levegőztetés aránya és a kalcium jelenléte a reagáló

közegben (Stratful, I., Scrimshaw, M.D.



4. ábra. Sztruvit termelése kémiai reakcióval (szerkesztve Udert, K.M. et al. (2015) alapján)

and Lester, J.N. (2001); Le Corre, K.S. et al. (2005); Hao, X.D. et al. (2008); Yetilmezsoy, K. and Sapci-Zengin, Z. (2009)). A sztruvit 7 és 11.5 pH között csapatható ki, de a legmegfelelőbb pH 7.5 és 9 között van (Hao, X.D. et al. (2008)). A pH-nak hatása van a kristályok növekedésének sebességére, csak úgy, mint a kicsapódott kristályok minőségére is (Bouropoulos, N.C. and Koutsoukos, P.G. (2000); Kabdaşlı, N.I., Parsons, S.A. and Tünaya, O. (2006)).

A sztruvit alkalmazása a mezőgazdaságban

A sztruvit hasonló módon hat, mint a diammonium-foszfát műtrágya (DAP) (Etter, B. et al. (2011)), azaz lassan szívódik fel, lassan oldja ki a tápanyagokat, ezért használata kedvező lehet a mezőgazdaságban. Mivel a sztruvit oldhatósága alacsony (0,033 g 100 ml gyengén savas közegben) (Le Corre, K.S.

et al. 2005), kilúgzása a talajból korlátolt. Az emberi vizelet mezőgazdaságban való közvetlen alkalmazásának szembe kell nézni az alacsony társadalmi elfogadottsággal, míg a szagtalan vizeletből készült sztruvit termék sokkal elfogadottabb a gazdálkodók között (Etter, B. et al. (2011)). A sztruvitot nagy sikerrel alkalmazták kerti pázsitnál, facsemetéknél, dísznövényeknél és zöldségek esetében (Münch, E.V. and Barr, K. (2001); Nelson, N.O., Mikkelsen, R.L. and Hesterberg, D.L. (2003); Gonzalez-Ponce, R. and Garcia-Lopez-De-Sa, M.E. (2007); Yetilmezsoy, K. and Sapci-Zengin, Z. (2009)). Továbbá, a sztruvit talán a leghatékonyabb trágya olyan termények számára, melyeknek magnéziumra van szükségük, ilyen például a cukorrépa (Gaterell, M.R. et al. (2000)). Nagyon hatékony lehet azon növények számára is, melyek lassan oldódó trágyát igényelnek; a

lassú felszívódás más növények számára viszont probléma lehet (de-Bashan, L.E. and Bashan, Y. (2004)).

Az emberi vizeletből kicsapatott sztruvit mezőgazdasági alkalmazásának számos előnyös tulajdonsága ismert. A sztruvit szagtalan, majdnem teljesen mentes hormon- és gyógyszer-maradványoktól, és a kicsapódási folyamatnak köszönhetően nincs nehézfém tartalma. A termelés technológiája nagyon egyszerű és szinte bárhol megvalósítható. A csökkentett tömeg és térfogat (a vizelet térfogatához képest), valamint a granulált formátum miatt lényegesen könnyebb a szállítása, tárolása és alkalmazása a vizelethez viszonyítva. Nagyon hatékony, lassan felszívódó trágya. Alkalmazásának hátrányai a következők lehetnek: a vizeletgyűjtő rendszer és a reaktor telepítésének költsége jelentős, továbbá oldható magnézium-forrás szükséges a termeléshez. A tápanyagfelvétel a lassan felszívódó sztruvit miatt túl lassú számos növény számára, ugyanakkor stabil tápanyagforrást biztosít. Az 1. táblázat foglalja össze a sztruvit kicsapítás előnyeit és hátrányait.

Nitrogén visszanyerés sztrippelés és abszorpció együttes alkalmazásával

A vizeletből való tápanyagok visszanyerésének másik nagy csoportja a sztrippelés és abszorpció együttes, vagy külön-külön való alkalmazása. Tanulmányunkban kizárólag az együttes alkalmazás leírásával foglalkozunk. Ezen technológiák alkalmazására a következő szakirodalmakban olvashatók példák: Başakçıldan-Kabakci, S., İpekoğlu, A.N.

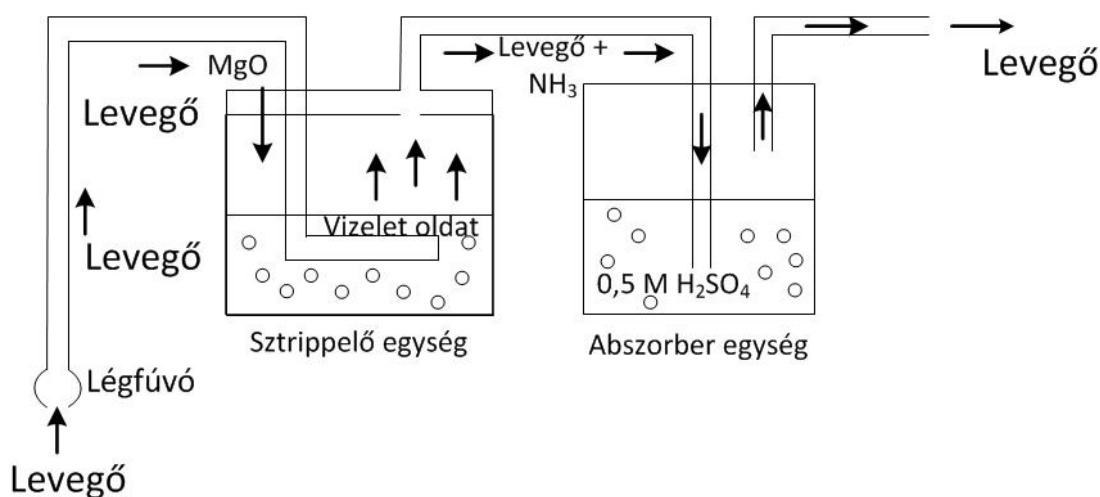
and Talinli, I. (2007) és Antonini, S. et al. (2011).

Az eljárást bemutató kísérlet vázlatrajza az 5. ábrán látható. Ez két lépésből álló, sztrippelő és abszorber oszlopokban megvalósított fizikai-kémiai folyamat. A folyamatban magnézium-ammónium-foszfát (azaz sztruvit, szilárd halmazállapotú anyag) és ammónium-szulfát (folyékony halmazállapotú anyag) keletkezik. Az első, sztrippelő egységbe MgO-ot adagolnak vizelethez, a sztruvit kicsapítás kezdeményezéséhez. Az elegy keverése után a sztruvit részecskék leülepednek, majd a keletkezett üledéket egy szűrőzsákba gyűjtik, melyet kiszáritanak. A sztrippelő folyamat optimális lejátszódáshoz megnövelik a rendszer a hőmérsékletét és pH-ját 10-es értékre nátrium-hidroxid oldat hozzáadásával. Az ammónia bekerül a gázfázisba a folyadékból, ami átkerül az abszorpciós kolonnába. A második oszlopban kénsav oldattal kerül érintkezésbe a levegő, ami abszorbeálja az ammóniát a gázfázisból, melynek hatására folyékony trágya, ammónium-szulfát ((NH₄)₂SO₄) keletkezik.

Mind a sztrippelő, mind az abszorpciós oszlop rendezetlen töltettel, Raschig-gyűrűvel van feltöltve. Az ammónia visszanyerés maximalizálása érdekében, a teljes rendszeren keresztül áramoltatjuk a levegőt (Başakçıldan-Kabakci, S., İpekoğlu, A.N. and Talinli, I. (2007); Antonini, S. et al. (2011)).

	Előnyök	Hátrányok
Sztruvit kicsapítás	A foszfor és nitrogén egyidejűleg visszanyerhető.	A magnézium oldott formában, megfelelő minőségben és megfizethető áron kell, hogy rendelkezésre álljon a sztruvit termelő üzem nyereségességének biztosításához.
	A sztruvit természetes körülmények között is kicsapódik a vizeletből. Ezt a részt is elegyítik a végső termékkel, maximalizálva ezzel a tápanyag visszanyerést.	A sztruvit oldhatósága alacsony gyengén savas közegben, a talajból való kilúgzása korlátolt.
	A sztruvit elfogadottsága magas a gazdálkodók körében, szemben az emberi vizelet közvetlen alkalmazásával.	A lassú felszívódás hátrányos egyes növényeknél.

1. táblázat. A sztruvit kicsapítás előnyei és hátrányai (Huang, H. et al. (2016); Etter, B. et al. (2011); Le Corre, K.S. et al. (2005))



5. ábra. Sematikus ábra a nitrogén visszanyerésről levegő sztrippelés és abszorpció együttes alkalmazásával (szerkesztve Başakçılardan-Kabakci, S., İpekođlu, A.N. and Talinli, I. (2007) alapján)

	Előnyök	Hátrányok
Sztrippelés és abszorpció	Két terméket eredményez, magnézium-ammónium-foszfátot (azaz sztruvitot, szilárd halmazállapot) és ammónium-szulfátot (folyékony halmazállapot).	A reakcióhoz erős sav, kénsav szükséges.
	Abszorpció esetén az ammónia oldhatósága csak akkor előnyös, ha a pH elég alacsony.	Az alkalmazáshoz nagy légáram kell.
	Az ammónia sztrippelés és az abszorpció folyamatának elméleti leírása jól ismert.	Járulékos környezeti problémák merülhetnek fel a savhasználat miatt.
	1 m átmérőjű és 0,25 m töltött magasságú ellenáramú oszlopban 97% ammónia sztrippelhető.	Az abszorpciós folyamat hatásfoka kevésbé jó, mert korlátozott az ammóniagáz savban történő oldódása.

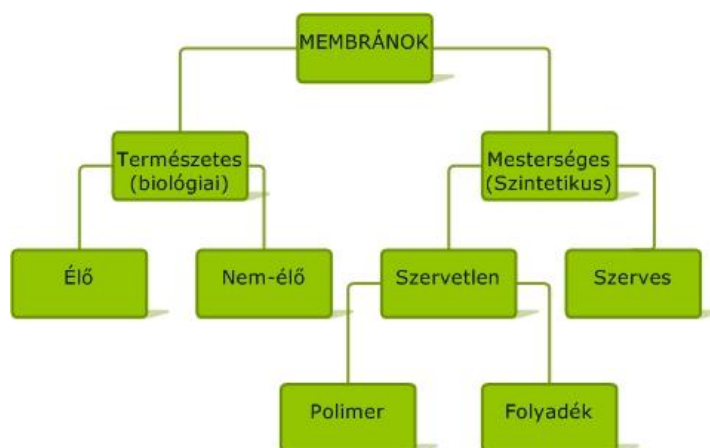
2. táblázat. A sztrippelés és abszorpció előnyei és hátrányai (Başakçıldan-Kabakci, S., İpekoğlu, A.N. and Talinli, I. (2007); Minocha, V.K. and Prabhakar Rao, A.V.S. (1988); Perry, R.H., Green, D.W. and Maloney, O.J. (1997))

A 2. táblázat foglalja össze a sztrippelés és az abszorpció előnyeit és hátrányait.

Membrános eljárások

Az emberi vizeletből történő tápanyag visszanyerésre alkalmasak a membrános eljárások is, amelyek az utóbbi időben

rohamos fejlődésen mentek keresztül. A membránok elsősorban szilárd halmazállapotúak. Eredetük alapján csoportosíthatók, mint természetes és mesterséges membránok (csoportosításukat l. a 6. ábrán).



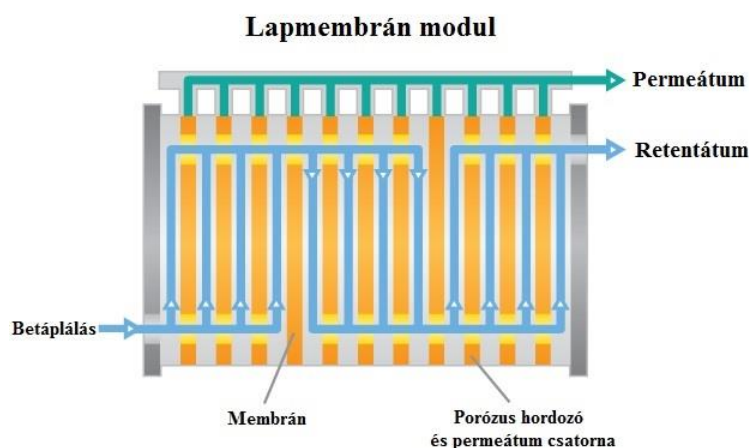
6. ábra. A membránok csoportosítása (Simándi, B. (szerk.) (2011))

A membrános elválasztási folyamatok dead-end (hagyományos) és cross-flow (keresztáramú) elrendezésben kivitelezhetők.

A membránmoduloknak több típusa ismeretes, úgy, mint a síkmembrán tartalmazó lapmembrán és spiráltekercses modul, továbbá a cső alakú membránokból álló cső-, kapilláris- és üregesszál-modul.

Az első, a *lapmembrán modul* (plate-and frame system) felépítése a lemezes

hőcserélőhöz, illetve a szűrőpréshez hasonlít (l. 7. ábra). A síkmembrán lapjait porózus hordozók (support plate) és távolságtartók (spacer) választják el egymástól. A betáplált oldat és a permeátum csatornában áramlik. A síkmembránok viszonylag drágák, üzemeltetésük jelentős szivattyúzási energiát igényel. Hátrányuk a kicsi térfogategységre eső membránfelület nagysága (Simándi, B. (szerk.) (2011)).

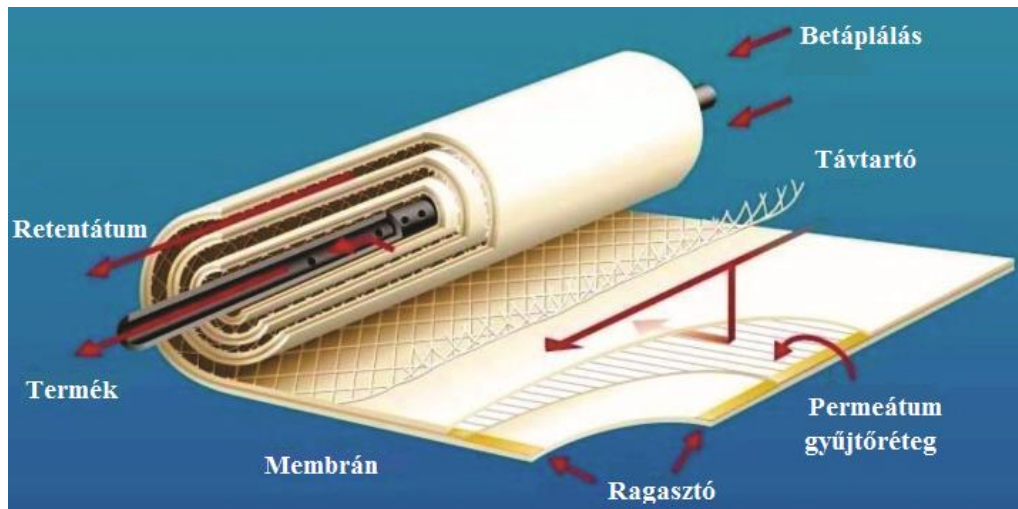


7. ábra. Lapmembrán modul (szerkesztve a Synder filtration termék katalógus, www.synderfiltration.com alapján, 2018)

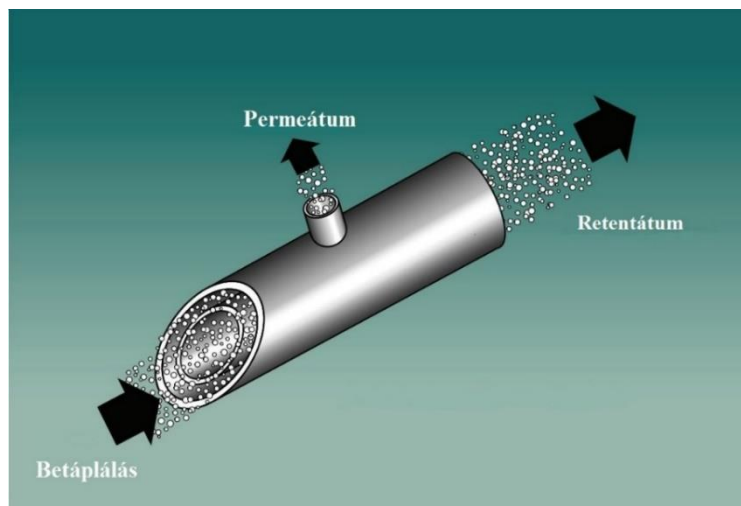
A *spiráltekercses (spiral wound) modul* (l. 8. ábra) többnyire kompozit membránból készítik. Ennél a típusnál a szendvicsszerűen összerakott lapokat (membrán, távtartó, szűrlet gyűjtőréteg) egy perforált cső köré tekercselik.

Csőmembrán modulnál (tubular system) (l. 9. ábra) az áramlás a csőben turbulens. Használata csak szuszpenziók koncentrációja esetén gazdaságos a viszonylag kis térfogategységre eső membránfelület miatt.

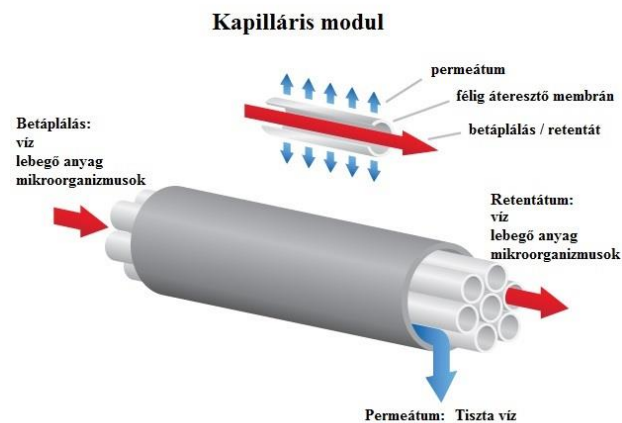
A *kapilláris modul* (l. 10. ábra) felépítése a csőköteges hőcserélőhöz hasonlít. Ennél a membrántípusnál nincs tartó vagy hordozó réteg, mint a sík- és csőmembránoknál; maga a csőfal biztosítja a szükséges mechanikai szilárdságot. A kapilláris membránoknál az üzemeltetési nyomás kisebb, mint pl. az azonos célra használt spiráltekercses modulnál, mivel mechanikai stabilitása kisebb. Az alacsonyabb üzemeltetési nyomás sok esetben gazdaságosabb is, mivel kisebb a szivattyúzási munka (Simándi, B. (szerk.) (2011)).



8. ábra. Spiráltekereses modul (szerkesztve Kim, J. et al. (2013) és a Hydranautics' corporate, www.membranes.com alapján)



9. ábra. Csőmembrán modul (szerkesztve a Sprintek Tubular Membranes katalógus alapján, www.spintek.com, 2018)



10. ábra. Kapillaris modul (szerkesztve a Synder filtration termék katalógus, www.synderfiltration.com, 2018 alapján)

Membránszeparáció (MD)

A közvetlen érintkezéses membránszeparáció (direct contact membrane distillation– DCMD) a legegyszerűbb elrendezés, melyet nagy fluxus jellemez. Ez a legtöbbet kutatott membrán konfiguráció.

A membránszeparáció kombinálja az elpárologtatást és a membrántechnológiát (l. 11. ábra), azaz a membrán elválasztja a meleg és a hideg oldalakat, és a permeáció gőzként / páráként a membrán pórusain át történik. Fontos, hogy a hideg oldalon gondoskodni kell a pára kondenzációjáról. A hőmérsékletkülönbség miatt nemcsak komponenstranszport, hanem hőtranszport is lesz, és ha a membrán két oldalán nincs hőmérsékletkülönbség, akkor nincs komponenstranszport sem. A membránszeparáció mechanizmusa a következő három fő lépésből áll:

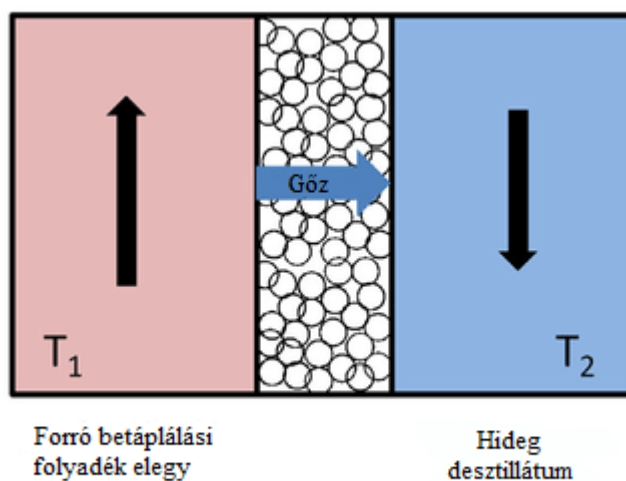
- párolgás a magasabb hőmérsékletű oldalon

- permeáció a membránon át, és

- kondenzáció az alacsonyabb hőmérsékletű oldalon.

A membránszeparációban a membrán csupán elválasztja a két különböző hőmérsékletű oldalt, és nem vesz részt aktívan a műveletben.

A membránszeparáció korábban komoly alternatívának kínálkozott a víz sómentesítésére azzal a reménnyel, hogy kiválthatja a bepárlást és a fordított ozmózist, melyek energiaigényesebb folyamatok. Az ipar viszont vonakodott a membránszeparáció ilyen területen történő alkalmazástól, mert a fluxus viszonylag alacsony, a membránok hamar nedvesednek, eltömődnek, és nem jó hőszigetelők. A membránszeparációt viszont sikeresen alkalmazzák a biotechnológiában, illékony biotermékek fermentációjából történő kinyerésénél.



Közvetlen érintkezéses membrán szeparáció (DCMD) ($T_1 > T_2$)

11. ábra. Membrán desztilláció (Simándi, B. (szerk.) (2011) alapján szerkesztve)

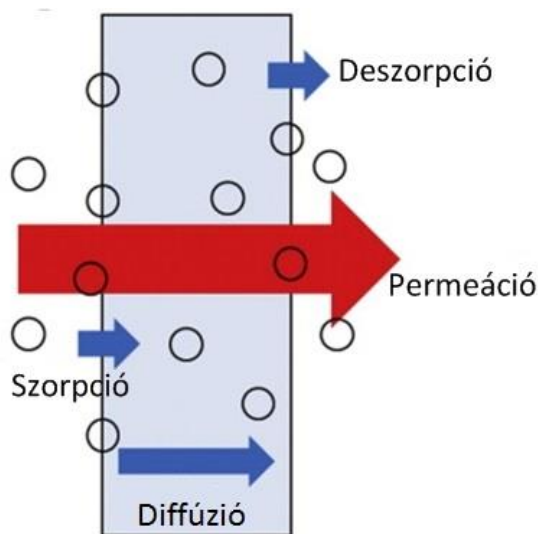
A magas ammónia koncentráció és az emberi vizelet lúgos közegben való

elválasztása nagy szabad-ammónia párolgáshoz vezet, és jelentős ammónia

átvitelt eredményez a permeátumba az MD membrán hidrofób pórusain keresztül. Ennek eredményeként az ammónia kinyerése a nagy ammónia koncentrációjú szennyvízből nehezen kivitelezhető elválasztási feladat (Alkudhiri, A., Darwish, N. and Hilal, N. (2012); Derese, S. and Verliefde, A. (2016); Tun, L.L. et al. (2016)).

Gázszeperáció

A membránműveletek kutatása és alkalmazása dinamikusan fejlődik, és egyre nagyobb teret kap. A gázszeperációt egyre szélesebb körben, akár kisebb volumenű gyártások esetén is alkalmazzák. A gázpermeáció mechanizmusát a 12. ábra mutatja. Az elválasztás mechanizmusa membrántípusonként eltérő lehet.



12. ábra. Gázszeperációs elválasztás (szerkesztve Yeo, I., Jung, H., and Song, T.-H. (2014) alapján)

A gázszeperációnál alkalmazott membránok anyaguk szerint lehetnek polimer- és kerámiamembránok. Pórusos, nem-pórusos, tömörnek tekinthető polimer membránok egyaránt használhatók gázszeperációra.

Pórusos membránok esetében a gázelegy összetevői a membrán két oldalán lévő koncentráció-különbség, mint hajtóerő hatására haladnak át a membránon. A membránon történő áthaladás függ a molekula és a pórusméret viszonyától, valamint történhet egyszerű konventív áramlással, Knudsen-diffúzióval és molekulaszita elven. Utóbbinál a felületi diffúzióval halad át a permeálódó molekula

a membránon. Nagyon kicsiny pórusméret esetén nehéz az áthaladás, molekulaszita elven és / vagy a pórus falán történő diffúzióval lehetséges.

Nem-pórusos, tömör membránok általában a polimer membránok. Ilyenek például a szilikon-karbonátok és a cellulóz-acetát, melyek esetében a gázszeperáció mechanizmusa megegyezik az oldódás-diffúziós mechanizmussal. A gázszeperációra is igaz az a jelenség, ami pervaporációra, vagyis a szelektivitás és a fluxus egymással fordítottan arányos: jó szelektivitású membrán áteresztőképessége nem túl jó és ez fordítva is igaz.

A gázszeparációt, más néven gázpermeációt az 1940-s évektől kezdve alkalmazzák az iparban. Komoly ipari felhasználásnak tekinthető a 60-as évektől alkalmazott hidrogéngáz kinyerés az ammónia-szintéziskörből. A 80-as években nitrogén levegőből történő kinyerésére fejlesztettek ki gázszeparációs membránt; ezt ipari méretekben is alkalmazták.

A gázszeparáció alkalmazható a levegő dehidrálására, szénhidrogén gázok elválasztására, illékony szerves vegyületek (volatile organic compounds – VOC) levegőből történő kinyerésére, továbbá uránizotópok ($U^{235}F_6$ és $U^{238}F_6$) elválasztására. Fentiekből is látható, hogy a gázszeparáció számos iparágban talált és talál alkalmazásokat, mint pl. petrolkémia,

ammóniagyártás, környezetvédelem, vagy levegőkondicionálás. Külön említhető a hidrogén fémmembránokkal történő elválasztása; ilyen fémmembránok pl. a palládium és ötvözetei. A hidrogén a fémmembránon más gázokra nem jellemző, speciális mechanizmussal halad át. Az emberi vizelet ammónia-tartalmának csökkentésére jelenleg több kutatás is zajlik. Mikola, A. és munkatársai (Mikola, A. et al. (2017)) megállapították, hogy az elfolyó szennyvíznél alkalmazott hidrofób gázszeparációs membránok alkalmasak emberi vizelet ammónia tartalmának kinyerésére is.

A 3. táblázat foglalja össze a membrános eljárások előnyeit és hátrányait.

	Előnyök	Hátrányok
Membrános eljárások	Csak ritkán szükséges hozzáadott vegyszer az elválasztáshoz.	Jelentős ammónia veszteség léphet fel a membránesztillációnál.
	Tiszta terméket lehet előállítani.	Nagyok a beruházási költségek.
	Működik enyhe hőmérsékleti körülmények között is.	A membránon keresztül áthatoló üledékek és részecskék eltömítik a membrán felszínét.

3. táblázat. A membrános eljárások előnyei és hátrányai (Pangarkar, B.L. et al. (2016); Schofield, R.W., Fane, A.G. and Fell, C.J.D. (1987); Tun, L.L. et al. (2016))

ÖSSZEFOGLALÁS

Az emberi vizeletből történő sztruvit-kinyerésre alkalmazott módszerek közül a *sztruvit kicsapatással* szilárd, fehér, és szagtalan kristályos anyag hozható létre, mellyel a foszfor és a nitrogén egyidejűleg való visszanyerése következik be. A *sztrippelés és abszorpció* alkalmazásával elsőként a sztrippeléssel szintén

magnézium-ammónium-foszfát, azaz sztruvit nyerhető ki, majd abszorpcióval folyékony halmazállapotú ammónium-szulfát is. A *membránesztillációval*, gázpermeábilis hidrofób membrán alkalmazásával ugyancsak ammónium-szulfát is keletkezik. Mindenezen termékeket értékes anyagként fel lehet használni, ezért a bemutatott technológiák

a körforgásos gazdaság koncepcióba illeszkednek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4-BME-209 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának, a Nemzeti Tehetség Program NFTÖ-18-B-0154 pályázatának, a Bolyai János Kutatási Ösztöndíjnak, az 112699-es és az 128543-as számú OTKA pályázatok támogatásával készült. A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Alkhudhiri, A., Darwish, N. and Hilal, N. (2012), Membrane distillation: A comprehensive review, *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18.

Antonini, S., Paris, S., Eichert, T., Clemens, J. (2011), Nitrogen and Phosphorus Recovery from Human Urine by Struvite Precipitation and Air Stripping in Vietnam, *Clean Soil Air Water*, vol. 39, issue 12, pp. 1099–1104.

Başakçılardan-Kabakçı, S., İpekoğlu, A.N. and Talinli, I. (2007), Recovery of Ammonia from Human Urine by Stripping and Absorption, *Environmental Engineering Science*, vol. 24, issue 5, pp. 615–624.

Bouropoulos, N.C. and Koutsoukos, P.G. (2000), Spontaneous precipitation of

struvite from aqueous solutions, *Journal of Crystal Growth*, vol. 213, issue 3, pp. 381–388.

Circularfoundation.org (2018), *A körforgásos gazdaság irányába, Vezetői összefoglaló* [online] http://www.circularfoundation.org/sites/default/files/ce_international_execsum_hun.pdf [megtekintve 2018. dec. 14].

Chirmuley, D.G. (1994), Struvite precipitation in WWTPs: causes and solutions. *Water (J. Aust. Water Assoc.)*, December, pp. 21–23.

Cusick, R.D. and Logan, B.E. (2012), Phosphate recovery as struvite within a single chamber microbial electrolysis cell, *Bioresource Technology*, vol. 107, pp. 110–115.

de-Bashan, L.E. and Bashan, Y. (2004), Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003), *Water Research*, vol. 38, issue 19, pp. 4222–4246.

Dereese, S. and Verliefde, A. (2016), Full nitrogen recovery and potable water production from human urine by membrane distillation, *AMTA/AWWA Membrane Technology Conference*, San Antonio, Texas, USA.

El Ralfie, Sh., Hawash, S. and Shalaby, M.S. (2013), Evaluation of struvite precipitated from chemical fertilizer industrial effluents, *Advances in Applied Science Research*, vol. 4, issue 1, pp. 113–123. [online] <http://www.imedpub.com/articles/evaluation-of-struvite-precipitated-from-chemical-fertilizer-industrial-fluents.pdf> [megtekintve 2018. okt. 10].

- Európai Bizottság (2014), *COM(2014) 398 final Úton a körkörös gazdaság felé: "zéró hulladék" program Európa számára*, Brüsszel, [online] [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/documents/com/com_com\(2014\)0398_/com_com\(2014\)0398_hu.pdf](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/documents/com/com_com(2014)0398_/com_com(2014)0398_hu.pdf)2014.9.24 [megtekintve 2018. okt. 14].
- Etter, B., Tilley, E., Khadka, R., Udert, K.M. (2011), Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal, *Water Research*, vol. 45, pp. 852–862.
- Gaterell, M.R., Gay, R., Wilson, R., Gochin, R.J. and Lester, J.N. (2000), An Economic and Environmental Evaluation of the Opportunities for Substituting Phosphorus Recovered from Wastewater Treatment Works in Existing UK Fertiliser Markets, *Environmental Technology*, vol. 21, issue 9, pp. 1067–1084.
- Gonzalez-Ponce, R. and Garcia-Lopez-De-Sa, M.E. (2007), Evaluation of struvite as a fertilizer: A comparison with traditional P sources, *Agrochimica*, vol. 51, pp. 301–308.
- Haáz, E., Tóth, A.J., Nagy, T., André, A., Tarjáni, A.J., Fózer, D., Angyalné-Koczka, K., Valentínyi, N., Manczinger, J., Rácz, L., Tölgyesi, L., Réti, G. és Mizsey, P. (2016), A körforgásos gazdaság vegyiparba épülésének példája: Újszerű, gazdaságos eljárás és berendezés technológiai hulladékvizek újrahasznosítására, *Ipari Ökológia*, 4. évf., 1. szám, pp. 23–30.
- Hao, X.D., Wang, C.C., Lan, L. and Loosdrecht, M.C. (2008), Struvite formation, analytical methods and effects of pH and Ca²⁺, *Water Sci Technol*, vol. 58, issue 8, pp. 1687–1692.
- Huang, H., Zhang, P., Zhang, Z., Liu, J., Xiao, J., and Gao, F. (2016), Simultaneous removal of ammonia nitrogen and recovery of phosphate from swine wastewater by struvite electrochemical precipitation and recycling technology, *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 302–310.
- International Environmental Technology Centre (IETC) (2015), *Global Waste Management Outlook (GWMO)*, International Solid Waste Association, Bécs, Ausztria, [online] <http://unep.org/ietc/ourwork/wastemanagement/GWMO> [megtekintve 2018. okt. 10].
- Kabdaşlı, N.I., Parsons, S.A. and Tünaya, O. (2006), *Effect of Major Ions on Induction Time of Struvite Precipitation*, [online] https://www.researchgate.net/publication/27189901_Effect_of_Major_Ions_on_Induction_Time_of_Struvite_Precipitation [megtekintve 2018. okt. 10].
- Kim, J., Hamza, K., El Morsi, M., Saitou, K., Metwalli, S., Nassef, A.O. (2013), Design Optimization of a Solar-Powered Reverse Osmosis Desalination System for Small Communities, ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, *Volume 3A: 39th Design Automation Conference*.

- Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, Ph. and Parsonset S.A. (2005) Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity, *Journal of Crystal Growth*, vol. 283, issues 3-4, pp. 514–522.
- Mikola, A., Kaljunen, J., Pradhan, S.K., Aurola, A.-M. and Vahala, R. (2017), Nitrogen recovery from digester reject water using selective gas-permeable membrane, in: *IWA Specialist Conference on Sustainable Wastewater Treatment and Resource Recovery*, IWA, Chongqing, China, 2017.
- Minocha, V.K. and Prabhakar Rao, A.V.S. (1988), Ammonia removal and recovery from urea fertilizer plant waste, *Environmental Technology Letters*, vol. 9, issue 7, pp. 655–664.
- Miso, A. and Spuhler, D. (2009), *Fertilizer from urine (struvite)*, [online] <http://archive.sswm.info/category/implementation-tools/reuse-and-recharge/hardware/reuse-urine-and-faeces-agriculture/fertili> [megtekintve 2018. okt. 10].
- Münch, E.V. and Barr, K. (2001), Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams, *Water Research*, vol. 35, issue 1, pp. 151–159.
- Nelson, N.O., Mikkelsen, R.L. and Hesterberg, D.L. (2003), Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant, *Bioresour Technol*, vol. 89, issue 3, pp. 229–236.
- Pangarkar, B.L., Deshmukh, S.K., Sapkal, V.S. and Sapkal, R.S. (2016), Review of membrane distillation process for water purification, *Desalination and Water Treatment*, vol.57, issue 7, pp. 2959–2981.
- Perry, R.H., Green, D.W. and Maloney, O.J. (1997), 'Perry's chemical engineers' handbook', McGraw-Hill, New York.
- Rahman, M.M., Liu, Y., Kwag, J.H., and Ra, C. (2011), Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 186, issues 2-3, pp. 2026–2030.
- Ronteltap, M., Maurer, M. and Gujer, W. (2007), The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine, *Water Research*, vol. 41, issue 9, pp. 1859–1868.
- Schofield, R.W., Fane, A.G. and Fell, C.J.D. (1987), The efficient use of energy in membrane distillation, *Desalination*, vol. 64, pp. 231–243.
- Simándi, B. (szerk.) (2011), 'Vegyipari műveletek II. Anyagátadó műveletek és kémiai reaktorok, egyetemi tananyag', Typotex Kiadó, Budapest.
- Stratful, I., Scrimshaw, M.D. and Lester, J.N. (2001), Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate, *Water Research*, vol. 35, issue 17, pp. 4191–4199.
- Tun, L.L., Jeong, D., Jeong, S., Cho, K., Lee, S. and Bae, H. (2016), Dewatering of source-separated human urine for nitrogen recovery by membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, vol. 512, pp. 13–20.
- Udert, K.M., Buckley, C.A., Wächter, M., Mc Ardell, Ch.S., Kohn, T., Strande, L.,

- Zöllig, H., Fumasoli, A., Oberson, A., Etter, B. (2015), Technologies for the treatment of source-separated urine in the eThekweni Municipality, *Water SA*, vol. 41, issue 2, pp. 212–221. [online] <https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/138059/127629> [megtekintve 2018. okt. 15].
- Vadász, N.Zs. (szerk.) (2016), Lassan belépünk a körbe, *Zöld Ipar Magazin*, 6. szám, pp. 20–21.
- Westerman, P.W., Zering, K.D. and Rashash, D., (2009), 'Struvite Crystallizer for Recovering Phosphorus from Lagoon and Digester Liquid', North Carolina State University Extension Publication AG724W. North Carolina State University.
- Yeo, I., Jung, H., and Song, T.-H. (2014), Gas permeation characteristics through heat-sealed flanges of vacuum insulation panels, *Vacuum*, vol. 104, pp. 70–76.
- Yetilmezsoy, K. and Sapci-Zengin, Z. (2009), Recovery of ammonium nitrogen from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as a slow release fertilizer, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 166, issue 1, pp. 260–269.
- Zhang, T., Ding, L. and Ren, H. (2009), Pretreatment of ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 2-3, pp. 911–915.