
Sairaalajäteveden erilliskäsittely lääkeainepäästöjen hallinnassa

Perttu Salmi
DI, projektitutkija
LUT-yliopisto

Mikko-Jussi Laine
Kemiantekniikan kandidaatti,
tutkimusapulainen
LUT-yliopisto

Mika Mänttari
TkT, professori
LUT-yliopisto

Mari Kallioinen-Mänttari*
TkT, professori
LUT-yliopisto
mari.kallioinen-manttari@lut.fi

*Kirjeenvaihto

Salmi P, Laine M-J, Mänttari M, Kallioinen-Mänttari M: Sairaalajäteveden erilliskäsittely lääkeainepäästöjen hallinnassa. Dosis 39: 108–123, 2023

Tiivistelmä

Yhdyskuntajätevedet sisältävät merkittäviä määriä lääkeaineita, joista kaikkia ei pystytä poistamaan jätevedestä tehokkaasti nykyään käytössä olevilla biologiseen puhdistukseen perustuvilla käsittelylaitoksilla. Näin ollen huomattavia määriä lääkeaineita päätyy vesistöihin ja ympäristöön. Sairaalat ovat kirjallisuuden perusteella merkittäviä lääkeaineiden päästölähteitä, sillä kirjallisuuden mukaan niiden aiheuttama kuorma jätevedenpuhdistamoille voi olla jopa 20 % kokonaislääkeainekuormasta. Sairaalajätevedet sisältävät merkittäviä määriä myös sellaisia lääkeaineita, jotka eivät poistu tehokkaasti kunnallisilla käsittelylaitoksilla. Esimerkkeinä tällaisista lääkeaineista voidaan mainita varjoaineet ja jotkut antibiootit.

Kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että tehokas lääkeaineet poistava vedenpuhdistusprosessi on mahdollista rakentaa yksikköoperaatioista, joiden toteuttamiseen laitteet ovat jo tällä hetkellä markkinoilla ostettavissa. Eniten on esitetty pilotointituloksia prosesseista, joissa yhdistetään biologinen puhdistus joko aktiivihiiliadsorption tai hapetuksen kanssa. Myös membraanisuodatusta on tutkittu tertiäärikäsittelyvaihtoehtona. Kirjallisuudessa on näyttöä myös siitä, että sairaalajäteveden puhdistaminen lääkeaineista on mahdollista myös suoraan adsorptiolla, hapettamalla tai membraanisuodattamalla ilman biologista käsittelyä. Prosessin kustannukset ja tarvittavat vaiheet määrittyvät puhdistustarpeen mukaan. Jos halutaan, voidaan sairaalajäteveden erilliskäsittelyllä tuottaa vettä, joka on mahdollista päästää takaisin vesistöön tai kierrättää käyttöön sairaalaan esimerkiksi huuhteluvetenä. Toisaalta erilliskäsittelyllä voidaan myös vain helpottaa kunnallisen puhdistamon puhdistusprosessin toimintaa muokkaamalla lääkeaineet esimerkiksi hapetuksella helpommin biohajoavaan muotoon. Osa lääkeaineista on kuitenkin erittäin haastavia hapetettavia ja poistettavia, ja siksi tarvitaankin puhdistusmenetelmien kehityksen lisäksi myös lääkeainekehitystä, joka toisi tulevaisuudessa käyttöömme entistäkin enemmän helposti jätevesistä poistettavia tai biohajoavia lääkeaineita.

Avainsanat: jätevesi, lääkeainejäämät, erilliskäsittely, sairaalat

Johdanto

Sairaaloiden aiheuttama kuorma jätevedenpuhdistamoille

Monet ympäristön kannalta erityisen haitalliset lääkeaineet päätyvät jätevedenpuhdistukseen sairaaloista. Suomessa yhdyskuntajätevedet, joihin sairaaloistakin peräisin olevat lääkeaineet useimmilla paikkakunnilla päätyvät, puhdistetaan edelleen valtaosin kunnallisilla jäteveden puhdistamoilla, joiden toiminta on suunniteltu tehokkaaseen orgaanisten yhdisteiden ja ravinteiden poistamiseen. Jätevedenpuhdistamoiden toiminta perustuu yleensä biologiseen puhdistukseen, joka toteutetaan usein aktiivilietemenetelmällä. Biologisessa jätevedenpuhdistuksessa osa lääkeaineista poistuu tehokkaasti, mutta biologinen jätevedenpuhdistus ei ole riittävä vähentämään lääkeainekuormaa tarpeeksi. Näin jätevedenpuhdistamoiden poistovedessä voi olla suuriakin pitoisuuksia eri lääkeaineita ja lääkkeiden kulutuksen kasvaessa huoli lääkeaineiden määrän suurenemisesta myös puhdistetuissa jätevesissä on aiheellinen. Jo tällä hetkellä monien lääkeaineiden pitoisuudet ylittävät PNEC-arvot (predicted no effect concentration) eli haitattomaksi arvioidut pitoisuudet puhdistamoiden poistovesissä, mikä voi aiheuttaa monenlaisia ongelmia vesistöihin ja ympäristöön (Vieno ym. 2007, Äystö ym. 2020).

Sairaalan vaikutus kunnallisen puhdistamon lääkeainekuormaan määräytyy sairaalan koon ja jätevedenpuhdistamoille tulevan kunnallisen jäteveden alueella olevien ihmisten lukumäärän perusteella. Myös sairaalassa olevat osastot, lääkkeidenmääräyskäytännöt ja mahdolliset laimennusvedet vaikuttavat sairaalan aiheuttamaan lääkeainekuormitukseen (Niemi ym. 2020). Sairaaloiden aiheuttama kokonaiskuormitus yhdyskuntajätevetteen on suhteellisen suuri. Vuonna 2012 julkaistun raportin mukaan sairaalat aiheuttavat noin 20 % yhdyskuntajätevesien lääkeainekuormituksesta (PILLS 2012). Esimerkiksi Ruotsissa on raportoitu, että kaikista lääkeaineista, jotka kunnallisille puhdistamoille päätyvät, 16 %:a tulee sairaaloista. Eniten tämän selvityksen mukaan sairaaloista tulee jätevetteen antibiootteihin kuuluvia lääkeaineita (58 %) ja vähiten hormoneja (5 %) (Sörengård ym. 2019). Sai-

raaloista päätyy jätevetteen merkittäviä määriä myös parasetamolia, kofeiinia ja ibuprofeiinia, jotka ovat erittäin yleisiä lääkeaineita myös kodeissa muodostuvassa jätevedessä. Tässä yhteydessä on kuitenkin huomautettava, että sekä sairaaloissa että kodeissa kofeiinin lähteenä toimii kahvi. Äystö ym. (2020) ja Ajo ym. (2018) ovat todenneet, että nämä kolme lääkeainetta muodostavat yli 90 % lääkeaineiden määrästä puhdistamoille tulevissa jätevesissä. Kun tarkastellaan lääkeaineita, jotka ovat peräisin erityisesti sairaaloista, Äystön ym. (2018) mukaan suhteessa eniten suomalaisille kunnallisille puhdistamoille sairaaloista päätyy iopamidolia (varjoaine, osuus likimäärin 100 %), syklofosamidia (solunsalpaaja, osuus noin 40 %) ja metronidatsolia (mikrobilääke, osuus 5–40 %). Sairaaloista tuleva osuus jää muiden lääkeaineiden osalta yleensä alle 10 %:iin.

Lääkeaineiden pitoisuudet ovat sairaaloiden jätevesissä tyypillisesti paljon korkeampia kuin kunnallisessa jätevedessä, johon sekoituu sairaalan lääkeainepäästöt laimevat. Sairaalaan tulevat jätevedet saattavat olla lääkeainemääriltään jopa yli 10-kertaisia verrattuna kunnallisen jäteveden lääkeainemääriin. Jäteveden kokonaistilavuus on kuitenkin huomattavasti kunnallisen puhdistamon käsittelemää vesimäärää pienempi. (Taulukko 1) Esimerkiksi ranskalaisessa jätevedenpuhdistamossa, jossa on erilliset aktiivilietevaltaat kunnalliselle (asukasvastineluku 26 600) ja sairaalan jätevesille (asukasvastineluku 5 400), tutkittiin jätevesien lääkeainepitoisuuksia kahden vuoden ajan. Kunnallisessa jätevedessä lääkkeitä (analysoitu 13 kpl) oli yhteensä keskimäärin 202 µg/L ja sairaalan jätevedessä 884 µg/L. Suurin ero jätevesien lääkeainepitoisuuksissa oli parasetamolin (161 vs. 813 µg/L) ja siprofloksasiinin (0,12 vs. 22 µg/L) pitoisuuksissa. Sairaalan jätevedessä kokonaislääkeainemäärät olivat kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin kunnallisessa jätevedessä, sillä kunnallista jätevettä tuli puhdistamolle noin 37 kertaa sairaalan jätevettä enemmän. (Wiest ym. 2018)

Sairaalan yhteydessä tapahtuvan erilliskäsittelyn merkityksestä kunnallisen jätevedenkäsittelyprosessin tehostamiseksi on saatavilla vain rajoitetusti tietoa. Arviointi on haastavaa

Taulukko 1. Lääkeaineiden pitoisuuksia sairaala- ja yhdyskuntajätevesissä sekä sairaaloista tulevien pitoisuuksien osuus kunnallisista jätevesistä. Taulukkon tietojen alkuperät on merkitty numerokoodilla: [1] PILLS 2012, [2] Ort ym. 2010, [3] Thomas ym. 2007, [4] Verlicchi ym. 2012b, [5] Daouk ym. 2016, [6] Äystö ym. 2018, [7] Ajo ym. 2018, [8] DHI 2016, [9] Lindholm-Lehto 2016, [10] Vieno ym. 2007, [11] Bendz ym. 2005, [12] Göbel ym. 2007, [13] Kasprzyk-Hordern ym. 2009, [14] Falås ym. 2012, [15] Lindberg ym. 2004.

Lääkeaine	Pitoisuus sairaaloiden jätevedessä, µg/L	Pitoisuus puhdistamoiden jätevedessä, µg/L	Osuus kunnallisista jätevesistä, %
Diklofenaakki	0,24–15 ^{[4],[7],[8]}	0,16–0,75 ^{[9],[11],[13]}	0,7–10 ^{[1],[2],[4],[5],[6]}
Furosemiidi	5,8–21 ^{[4],[7]}	0,8–5,1 ^{[13],[14]}	5,8–21 ^{[2],[4],[6]}
Metoprololi	0,42–25 ^{[4],[7],[8]}	0,04–1,46 ^{[10],[11],[13]}	0,7–5,7 ^{[2],[3],[4],[6]}
Metronidatsoli	0,1–90 ^{[4],[7],[15]}	0,3–0,9 ^[13]	5–45 ^{[4],[5],[6]}
Sitalopraami	0,12–0,62 ^{[7],[8]}	0,1–0,5 ^[14]	1–4 ^{[2],[6]}
Trimetopriimi	0,01–15 ^{[4],[7]}	0,08–6,8 ^{[11],[12],[13]}	3,7–18,3 ^{[2],[3],[4],[6]}

jo siksi, että edustavien näytteiden saaminen kohteen aiheuttaman kuorman arvioimiseksi on vaikeaa viemäröinti- ja putkistoratkaisujen vuoksi. Euroopassa on kuitenkin joitakin raportoituja esimerkkejä lääkeaineiden tehokkaaseen poistamiseen suunnitelluista laitoksista tai pilot-kokeista. Tämän katsauksen tavoitteena on näiden esimerkitapausten ja eri puhdistusmenetelmien toiminnan ymmärtämisen kautta arvioida sairaalajäteveden erilliskäsittelyn vaikutusta kunnalliselle jätevedenpuhdistukselle.

Sairaalaperäisten lääkeaineiden poistuminen aktiivilieteprosessissa

Lääkeaineiden poistuminen kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla vaihtelee, sillä eri lääkeaineet poikkeavat fysiokemiallisesti huomattavasti toisistaan ja tämä vaikuttaa niiden käyttäytymiseen jätevedenpuhdistamolla. Lääkeaineet voivat poistua lähes täydellisesti tai niiden pitoisuudet voivat jopa kasvaa puhdistusprosessissa. Pitoisuuksien kasvuun voi vaikuttaa lääkeaineiden metaboliatuotteiden hajoaminen biologisen puhdistuksen aikana takaisin alkuperäisiksi yhdisteiksi. Kaikissa aktiivilietteen perustuvissa puhdistusprosesseissa osa lääkeaineista jää lietteeseen. Näin ollen perinteisessä aktiivilieteprosessiin perustuvassa puhdistamossa lääkeaineiden poistuminen ei perustu vain biologiseen hajoamiseen. Lääkeainemäärien poistuminen näiltä jätevedenpuhdistamoilta on yleensä 50–80 %. Prosentuaalisesti eniten biologisessa puhdistusprosessissa

saadaan poistettua kipu- ja tulehduslääkkeitä. Heikoiten lääkeaineryhmistä poistuvat biologisessa prosessissa beetasalpaajat ja mielialälääkkeet. Jokaisessa lääkeaineryhmässä on kuitenkin sekä hyvin poistuvia että huonosti poistuvia lääkeaineita (Vieno ym. 2007, Jelic ym. 2011, Sörengård ym. 2019).

Yleisesti parasetamoli, kofeiini ja ibuprofeini muodostavat suurimmat lääkeainekuormat suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Nämä yhdisteet pystytään yleensä poistamaan biologisessa prosessissa jopa 99 %:sti, mutta niiden suuresta puhdistamolle tulevasta määrästä johtuen niitä on vielä jäljellä puhdistamon purkuvedessä (DHI 2016). Mikäli sairaalassa toteutettu puhdistus siis vähentäisi merkittävästi näiden yhdisteiden aiheuttamaa kuormaa kunnallisella puhdistamolla, tällä saattaisi olla merkitystä myös näiden varsin yleisten lääkeaineiden päätymisessä ympäristöön.

Aktiivilieteprosessi ei poista tehokkaasti esimerkiksi diklofenaakkia ja karbamatsepiinia, vaan niiden pitoisuudet voivat jopa kasvaa puhdistuksen aikana (Falås ym. 2012, Kruglova ym. 2016, UNESCO & HELCOM 2017). Kuten **Taulukosta 2** huomataan, myöskään metronidatsolin, jota Äystön ym. (2018) mukaan sairaaloista päätyy jätevetteen huomattavia määriä, poistuminen ei ole aina biologisessa prosessissa tehokasta. **Taulukon 2** esimerkkiluvut osoittavat myös, että lääkeaineiden poistuminen biologisessa puhdistusprosessissa vaihtelee merkittävästi esimerkiksi jäteveden sisältämien muiden yhdisteiden ja prosessin ajo-

Taulukko 2. Lääkeaineiden poistuminen ilmoitettuna prosentuaalisena osuutena puhdistamolle tulevasta kyseisien aineiden kokonaismäärästä kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla, joissa käytetään aktiivilietemenetelmää.

Lääkeaine	Poistuminen, %	Lähde
Diklofenaakki	22 -30 5 5 1	Bendz ym. 2005 Kasprzyk-Hordern ym. 2009 Falås ym. 2012 Mänttari ym. 2018 UNESCO & HELCOM 2017
Furosemiidi	0-62 10 7 57	Castiglioni ym., 2006 Falås ym. 2012 Mänttari ym. 2018 UNESCO & HELCOM 2017
Metoprololi	34 -19 50 10 30 26	Vieno ym. 2007 Bendz ym. 2005 Kasprzyk-Hordern ym. 2009 Falås ym. 2012 Mänttari ym. 2018 UNESCO & HELCOM 2017
Metronidatsoli	<30 25 50 93	Jelic ym. 2011 Kasprzyk-Hordern ym. 2009 Verlicchi ym. 2014 UNESCO & HELCOM 2017
Sitalopraami	-25 35 78	Falås ym. 2012 Mänttari ym. 2018 UNESCO & HELCOM 2017
Trimetopriimi	<30 -60-31 -10 45	Jelic ym. 2011 Göbel ym. 2007 Mänttari ym. 2018 UNESCO & HELCOM 2017

parametrien, kuten lämpötilan, lietteen retentioajan ja ilmastuksen erilaisuudesta johtuen.

Perinteisen aktiivilietemenetelmän korvauksiksi on kunnallisille jätevedenpuhdistamoille rakennettu viime vuosina membraanibioreaktoreita (MBR). MBR:ssa yhdistyvät biologinen puhdistus aktiivilieteprosessilla ja membraanisuo-datus. MBR parantaa puhdistamon puhdistustehokkuutta varsinkin biohajoamattomien yhdisteiden osalta. Tavallisessa biologisessa jätevedenpuhdistamossa on monta prosessivaihetta, kuten ilmastus, selkeytys, suodatus ja jälkikäsittely. Membraanibioreaktorit vähentävät tarvittavia prosessivaiheita ja säästävät samalla prosessipinta-alaa. Lääkeaineiden poistuminen on keskimäärin 13 %-yksikköä suurempi MBR:lla kuin aktiivilietteellä.

Membranibioreaktoreiden kustannukset ovat kuitenkin vielä useimmiten suuremmat kuin perinteisten aktiivilietemenetelmien (Verlicchi ym. 2012a, Bertanza ym. 2017). Aktiivilieteprosessin korvaaminen MBR:lla voi olla kuitenkin kustannustehokasta, mikäli puhdistettavalla jätevedellä on korkeat puhtausvaatimukset (Gao ym. 2022). MBR-laitoksessa käytetään mikro- tai ultrasuodatusmembraaneja, joten membraanisuo-datuksen ei sinänsä voida katsoa lisäävän lääkeaineiden poistotehokkuutta merkittävästi aktiivilieteprosessiin verrattuna.

Eurooppalaisia esimerkkejä sairaalajäteveden erilliskäsittelyistä

Jäteveden puhdistamiselle sairaaloissa voi olla erilaisia tarpeita. Joissakin tapauksissa erilli-

Taulukko 3. Sveitsiläisen sairaalan jätevedessä mitattujen lääkeaineiden pitoisuudet ja niiden keskimääräinen poistuminen eri puhdistusmenetelmillä (Kovalova ym. 2012 (MBR-tulokset), Kovalova ym. 2013 (prosessiyhdistelmät)). MBR = membraanibioreaktorikäsittely, O3 = otsonointi ja PAC = aktiivihiihikäsittely. Käsittelyssä käytetyt annokset: PAC 23 mg/L, O3 1,09 g(O3)/g(DOC), UV 2400 J/m².

Lääkeaine	Pitoisuuden keskiarvo syötössä, µg/L	MBR, %	MBR + PAC, %	MBR + O3, %	MBR + UV, %
Diklofenaakki	0,8	-5	98	100	88
Furosemiidi	2,0	-21	>97	>98	13
Metoprololi	1,3	55	>99	>97	0
Metronidatsoli	3,4	45	67	49	-2
Trimetopriimi	0,9	96	>83	-	-12

sellä puhdistuksella halutaan vähentää kunnallisen jätevedenpuhdistamon lääkeainekuormaa ja kohteessa tehdyn esipuhdistuksen kautta parantaa veden puhdistustulosta kyseisellä alueella. Joissakin tapauksissa taas tavoitteena on puhdistaa sairaalan jätevesi tehokkaasti siten, että vesi voidaan puhdistettuna johtaa joko suoraan vesistöön tai uudelleen käytettäväksi sairaalassa. Puhdistamisen tavoite vaikuttaa merkittävästi käytettävään prosessiin, sillä veden laatuvaatimukset ovat näissä mainituissa tapauksissa merkittävästi erilaiset. Joissakin Euroopan maissa sairaala joutuu maksamaan jätevetensä käsittelystä kunnallisella puhdistamolla. Tällöin motivaatio omalle erilliselle puhdistamolle voi syntyä myös kustannussäästöistä.

Tyypillisesti sairaaloiden jäteveden puhdistuksessa käytettävät prosessit sisältävät kiintoaineen poiston, biologisen puhdistusvaiheen sekä tertiääripuhdistuksen. Sairaalan jätevesien biologisen käsittelyn osalta on viime aikoina tutkittu erityisesti membraanibioreaktoreita (MBR), joissa yhdistetään aktiivilietteen perustuva puhdistus ja membraanisuo-datus. MBR:t tarvitsevat vähemmän tilaa kuin perinteiset aktiivilieteprosessit, ja niiden puhdistusteho orgaanisten yhdisteiden osalta on varsin hyvä. Lääkeaineiden poistoteho määräytyy kuitenkin biologisen aktiivilietepuhdistuksen perusteella ja jää useiden yhdisteiden osalta heikoksi. Tästä syystä sairaaloiden jätevesien puhdistuksessa tarvitaan myös lääkeaineita paremmin poistavia menetelmiä. Tähän voidaan käyttää menetelmiä, joissa lääkeaine

sidotaan kiinteään aineeseen (adsorptio), lääkeaine pilkotaan pienemmiksi molekyyleiksi ja lopulta suoloiksi, vedeksi ja hiilidioksidiksi (hapetus) tai lääkeaineet väkevöidään omaan jakeeseen samalla kuin vesi puhdistuu (membraanisuo-datus) (Verlicchi ym. 2015).

Aktiivihiihi, jauheena (PAC) tai rakeina (GAC), on yleisimmin tutkittu ja käytetty adsorbentti lääkeaineiden poistoon vesistä. Käytetyssä aktiivihiihessä adsorboituneet lääkeaineet voivat olla edelleen aktiivisessa muodossa, joten aktiivihiihen hävittäminen pitää usein tehdä polttamalla. Polttaminen, kuten kemiallinenkin käsittely, regeneroi kuitenkin aktiivihiihen uudelleen käyttöä varten (Kovalova ym. 2013, Verlicchi ym. 2015). Kuten **Taulukosta 3** havaitaan aktiivihiihikäsittely (PAC) poisti membraanibioreaktorilla käsitellystä sairaalan jätevedestä suurimman osan lääkeaineista. Nielsen ym. (2013) raportoivat myös yli 90 % lääkeaineiden poistotehon aktiivihiihikäsittelylle MBR:lla puhdistetulle vedelle.

Hapetuksella saadaan myös hyvin hajotettua lähes kaikkia tunnettuja lääkeaineita, mutta lääkeaineryhmistä heikoimmin se tehoaa juuri sairaaloista peräisin oleviin solunsalpaajiin ja varjoaineisiin. Hapetus pilkkoo lääkeainemolekyylejä jätevedestä, jolloin niiden rakenne muuttuu ja aktiivisuus poistuu. Hapetuksessa voi kuitenkin syntyä myös aktiivisia muuntumistuotteita, jotka voivat olla ympäristölle jopa alkuperäistä lääkeainetta haitallisempia. Hapetuksessa voi myös syntyä esimerkiksi bromaattia bromia sisältävistä vesistä, mikä on itsessään haitallinen aine (Verlicchi ym. 2015). Ylei-

Taulukko 4. Eri tertiääripuhdistusmenetelmien kustannukset biologisesti käsitellyllä jätevedellä (PCD = hapetuskäsitely pulssitetulla koronapurkausmenetelmällä, UF = ultrasuodatus, GAC = käsittely granuloidulla aktiivihieillä, PAC = käsittely jauhemaisella aktiivihieillä, NF = nanosuodatus, RO = käänteisosmoosi, O3 = otsonointikäsitely, UV = käsittely UV-valolla, H₂O₂ = hapetuskäsitely vetyperoksidilla).

Menetelmä	Kustannus, €/m ³	Lähde
PCD	0,12–0,14	Laitinen ym. 2020
PCD + UF	0,16–0,18	Laitinen ym. 2020
GAC	0,27	Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016
PAC	0,24	Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016
UF	0,08	Hämäläinen ym. 2018
NF	0,35	Hämäläinen ym. 2018
RO	0,72	Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016
O3	0,18	Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016
UV + H ₂ O ₂	0,45	Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016

sin käytetty ja tutkittu hapetusmenetelmä lääkeaineiden poistoon on otsonointi.

Vaikka hapetus on jossain määrin selektiivinen lääkeaineissa usein esiintyville sidoksille, on orgaanisten yhdisteiden kokonaisuudessaan vedessä suuri merkitys hapetusprosessien tehokkuuteen. Tästä syystä hapetusta on usein tutkittu biologisen käsittelyn jälkeen. Serna-Galvis ym. (2019) puhdistivat sairaalan jätevettä prosessissa, jossa oli ensin biologinen puhdistus ja sen jälkeen sonokemiallinen- ja Foto-Fenton-hapetusprosessit. Pelkällä sonokemiallisella prosessilla saavutettiin 59 %:n poistotehokkuus lääkkeille. Lisäämällä Foto-Fenton-prosessi puhdistukseen poistotehokkuus nousi 83 %:iin. Pelkkä UV-käsittely poisti vain 27 % lääkeaineista. Kun käsiteltiin biologisella menetelmällä puhdistettua jätevettä, poistotehokkuudet nousivat sonokemiallisessa prosessissa 84 %:iin ja Sono-foto-Fenton-prosessissa 91 %:iin. Käsiteltävän veden puhtaudesta on siis hapetusmenetelmiä käytettäessä merkittävä vaikutus lääkeaineiden hajoamiseen.

Kuten **Taulukosta 3** nähdään, MBR-prosessilla puhdistetun jäteveden otsonointi poisti erittäin tehokkaasti lääkeaineita sveitsiläisessä sairaalassa tehdyissä kokeissa. **Taulukon 3** perusteella sekä hapetukselle että aktiivihieiladsorptiolle hieman haastava yhdiste on metronidatsoli, jota päättyy merkittävästi sairaaloista puhdistamolalle (Äystö ym.

2018). Sekä hapetuksen että adsorption osalta tulosten arvioinnissa tulee kuitenkin huomioida adsorbenttien ja hapettimien käytetyt määrät sekä käsittelyaika. Myös pH:lla on vaikutusta hapetuksen tulokseen (Hansen ym. 2016, Mänttari ym. 2020).

Membranisuodatus poistaa lääkeaineyhdisteet vedestä ja väkevöi ne pienempään tilavuuteen. Tämä konsentraatti tulee sitten käsitellä erikseen. Membranisuodatus on kokonaisvaltainen veden puhdistusmenetelmä eikä varsinaisen lääkeaineiden tuhoamismenetelmä. Lääkeaineen poistamiseen vedestä käytetään joko nanosuodatusta (NF) tai käänteisosmoosia (RO). Näistä käänteisosmoosilla saadaan erittäin hyvä poistoteho. Tämä todettiin Eurooppalaisessa Pharmaceutical Input and Elimination from Local Sources – PILLS-projektissa, jossa tutkittiin membraanibioreaktorilla puhdistettujen sairaaloiden (neljä sairaalaa) jätevesien erillistä puhdistamista hapetuksella, aktiivihieillä ja käänteisosmoosilla. Sekä aktiivihieilikäsittelyllä että käänteisosmoosilla päästiin kaikilla lääkeaineilla yli 95 % poistumaan. Sveitsiläisessä 346 potilaspaikan sairaalassa 56 analysoidusta lääkeaineesta määrällisesti 82 % oli jodipohjaisia röntgenvarjoaineita kuten iopamidolia, jota oli jätevedessä jopa 2 600 µg/L. Varjoaineista vain 2 % poistui MBR:ssa. Koska varjoaineiden määrä suhteessa mitattuun kokonaislääkeainemäärään oli suuri, MBR poisti vain noin 22 % koko-

naislääkeainekuormasta. Mikäli varjoaineita ei huomioitu, mitatuista lääkeaineista saatiin poistettua 90 %. Tutkimuksissa ei kuitenkaan analysoitu kofeiinia tai ibuprofeinia. Hapetus otsonoinnilla MBR:n jälkeen nosti varjoaineiden poistuman 51 %:iin, aktiivihieiladsorptio 62 %:iin ja ultravioletivalolla (UV) hapetus 66 %:iin (Kovalova ym. 2012, Kovalova ym. 2013). Vaikka tutkimuksessa ei tutkittu membraanisuodatusta, iopamidolin moolimassan (777 g/mol) perusteella se on poistettavissa erittäin tehokkaasti sekä nanosuodatuksella että käänteisosmoosilla.

Muissa PILLS -projektin pilotointikohteissa todettiin, että käyttämällä membraanibioreaktorin jälkeen tertiäärinen puhdistusvaiheena joko otsonointia (O3) tai adsorptiota aktiivihieleen (PAC) yli 80 % koko lääkeainekuormasta saatiin poistettua. Aktiivihielesuodatin tertiäärivaiheena poisti yli 95 % kaikista analysoiduista lääkkeistä, samaan tehokkuuteen päästiin myös käyttämällä käänteisosmoosisuodatusta tertiäärivaiheena. (PILLS 2012)

Hollantilaisessa sairaalassa on pilotoitu kokonaisvaltaista jäteveden puhdistusta, jossa jäteveden sisältämää energiaa otettiin ensin talteen biokaasuprosessilla ja tämän jälkeen vesi puhdistettiin MBR-prosessilla ja otsonilla sekä aktiivihieillä (Batelaan ym. 2013). Sairaalan jätevedessä oli ennen käsittelyä 4 µg/L diklofenaakkia, 15 µg/L furosemidia, 5 µg/L metoprololia ja 5 µg/L trimetopriimia. Jätevedenpuhdistamo poisti yli 99 % kaikista mitatuista lääkeaineista mukaan lukien varjoaineet. Myöskään mitään ihmiselle haitallisia taudinaiheuttajia ei löytynyt puhdistetusta jätevedestä. Tuloksista raportoineiden tutkijoiden mukaan puhdistettua jätevettä olisi mahdollista käyttää uudelleen sairaalassa esimerkiksi jäädytykseen tai laitteiden pesuun (Batelaan ym. 2013).

Herlevin sairaalassa Tanskassa on tutkittu otsonoinnin ja hapetuksen järjestyksen vaikutusta MBR-prosessilla puhdistetun jäteveden puhdistukseen. Sairaalan jätevesi sisälsi yhteensä noin 5,2 mg/L lääkeaineita, jodipohjaiset varjoaineet muodostivat tästä pitoisuudesta noin 90 %. Näytteistä ei mitattu kofeiinia. Raportissa esitetyistä lääkeaineista jätevedessä oli 0,6 µg/L diklofenaakkia, 11 µg/L furosemidia, 2,5 µg/L metoprololia, 8,5 µg/L

metronidatsolia, 0,3 µg/L sitalopraamia ja 2,1 µg/L trimetopriimia (DHI 2016). Suurin osa lääkeainekuormasta poistui MBR:llä tehdyssä vedenpuhdistuksessa, mikä tarkoitti noin 75 % varjoaineista ja 95 % muista lääkeaineista. Kahdentoista lääkeaineen pitoisuudet kuitenkin ylittivät MBR:n permeaatissa niiden PNEC-arvot. Tertiääripuhdistuksen käyttö MBR:n jälkeen nosti lähes kaikkien tutkimuksessa seurattujen lääkeaineiden poistumisen yli 99 %:iin. Otsonointi ennen aktiivihielesuodatusta oli tehokkaampi vaihtoehto kuin aktiivihielesorption toteuttaminen ennen otsonointia. Näin oli varsinkin varjoaineiden poistamisen kannalta. UV-käsittely puhdistamon poistoilmalle poisti mahdolliset bakteerit ja taudinaiheuttajat ilmasta. Sairaalan jätevedenpuhdistamon tuottamat lietteet ja käytetty aktiivihiehi hävitettiin polttamalla (DHI 2016).

Suomessa lääkeaineiden poistamista sairaaloiden jätevesistä on tutkittu Epic-hankkeessa. Yhtenä osana hankkeessa tutkittiin membraanisuodatuksen ja pulssitetun koronapurkauksen (PCD) soveltumista lääkeaineiden poistoon. Tässä menetelmässä lääkeaineita hapettavat yhdisteet tuotetaan sähkövirralla jäteveden virratessa reaktorin läpi. Sairaalan jätevedestä analysoitiin 1148 µg/L lääkeaineita, joista parasetamoli ja kofeiini muodostivat 93 %. Jätevedessä oli myös 0,6 µg/L diklofenaakkia, 11 µg/L furosemidia, 0,37 µg/L metoprololia, 8,9 µg/L metronidatsolia, 0,23 µg/L sitalopraamia ja 1,2 µg/L trimetopriimia (Ajo ym. 2018, Mänttari ym. 2018).

1 kWh/m³ ja 30 W PCD-hapetus poisti keskimäärin 87 % lääkeaineista, kun kofeiinia ei huomioida. Ultrasuodatuksen lisääminen ennen PCD:tä nosti poiston 91 %:iin. Pelkkä ultrasuodatus (UF) poisti vain noin 5 % lääkeaineista. PCD-hapetus yksin ei poista kaikkia lääkeaineita, esimerkiksi metronidatsolin poistuma oli vain 18 % (Ajo ym. 2018). Ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin yhdistelmä poisti kaikkia lääkeaineita yli 90 %. Käänteisosmoosin etu hapetukseen verrattuna on siinä, että se poistaa vedestä myös ravinteita, bakteereja ja viruksia. Näin ollen suodatuksen permeaatille ei tarvita lisäkäsittelyä desinfiointiseksi ja tuotettu vesi voi olla jopa puhtaampaa kuin perinteisellä aktiivihielemenetelmällä tuotettu. Membraanisuodatukselta tulee kuitenkin aina

myös konsentraattivirta, joka pitää käsitellä erikseen, sillä se sisältää kaikki ne yhdisteet, jotka eivät läpäise membraania. Käänteisosmoosisuodatus toimii tehokkaasti myös pelkistään selkeytetyllä ja ultrasuodatetulla sairaalan jätevedellä, mikä tarkoittaa, että biologista käsittelyä ei välttämättä tarvittaisi sairaalan jäteveden erilliskäsittelyssä lainkaan (Mänttari ym. 2018, Mänttari ym. 2020).

Samoja puhdistusmenetelmiä, membraanisuo datusta ja PCD-hapetusta, testattiin myös hoitokodin jäteveden käsittelyssä. Hoitokodilla on oma jätevedenpuhdistamo, jossa noin 1 000 asukkaan jätevedet puhdistetaan aktiivilietemenetelmällä. Jätevedessä oli 354 µg/L lääkkeitä, joista parasetamoli ja kofeiini muodostivat 93 %. Jätevedessä oli myös 0,33 µg/L diklofenaakkia, 0,29 µg/L furosemidia, 0,44 µg/L metoprololia, 0,06 µg/L metronidatsolia, 0,26 µg/L sitalopraamia ja 0,04 µg/L trimetopriimia. (Ajo ym. 2018, Mänttari ym. 2018) PCD-hapetuksella päästiin jo 0,5 kWh/energialla yli 99 % lääkkeitä poistumaan. Pienemmällä 0,1 kWh/m³ energiamäärällä ja ultrasuodatuskäsittelyllä lääkkeitä poistumaan oli 97 %, metronidatsolin poistuma oli pieni, 53 % (Ajo ym. 2018). Nano suodatuksella osa lääkkeitä, esimerkiksi hydroklooritiatsidi, läpäisi membraanin. Käänteisosmoosilla lääkkeitä retentoituivat yli 95 %, ja käsitelty vesi oli muilta ominaisuuksiltaan parempaa kuin biologisesti puhdistettu vesi (Mänttari 2020).

Alvarino ym. (2020) paransivat perinteisen membraanibioreaktorin toimintaa lisäämällä reaktoriin aktiivihiihiä. Heidän tutkimuksessaan pilot-laitteistoa käytettiin suoraan sairaalan jäteveden puhdistukseen, johon lisättiin ibuprofeenia, diklofenaakkia, karbamatsepiinia, trimetopriimia ja 17 α -etinyyliestradiolia. 17 α -etinyyliestradiolia lisättiin 1 µg/L ja muita lääkkeitä 10 µg/L. Ennen aktiivihiihiin lisäystä reaktoriin vain ibuprofeeni ja 17 α -etinyyliestradioli poistuivat prosessissa yli 95 % ja trimetopriimi ja karbatsemiini eivät poistuneet ollenkaan. Aktiivihiihiin lisäystä nosti kaikkien lääkkeitä poistumisen yli 90 %:iin. Tulos oli odotettavissa, sillä MBR ei poista lääkkeitä kokoon tai varausvaikutuksiin perustuen vaan lääkkeitä poistuminen MBR:ssä perustuu biologiseen proses-

siin. Aktiivihiihi taas tunnetaan hyvänä adsorbenttina lääkkeitä. Aktiivihiihilisäystä tulisi kuitenkin tehdä MBR:n toiminnan tehostamiseksi säännöllisin väliajoin, sillä aktiivihiihi adsorptiopaikkojen täyttyessä prosessin puhdistusteho heikkenee. Tämä nähtiin myös Alvarino ym. (2020) kokeissa: karbamatsepiinin poistuma oli vain 24 % 28 päivän jälkeen. Yli 50 %:n poistuman varmistamiseksi kalliilla lääkkeitä aktiivihiihiä pitäisi Alvarino ym. (2020) mukaan lisätä prosessiin 20 päivän välein.

Kustannukset ja motivaatio sairaalajäteveden erilliskäsittelylle

Jäteveden puhdistamiseen sairaalassa voidaan päätyä erilaisista syistä. Joissakin tapauksissa puhdistuksella halutaan vähentää kunnallisen jätevedenpuhdistamon lääkkeitä ja kohteessa tehdyn esipuhdistuksen kautta parantaa veden puhdistustulosta kyseisellä alueella. Joissakin tapauksissa taas tavoitteena on puhdistaa sairaalan jätevesi tehokkaasti siten, että vesi voidaan puhdistettuna johtaa joko suoraan vesistöön tai uudelleen käytettäväksi sairaalassa. Näin veden siirtämisestä suuremmalle yhdyskuntajäteveden puhdistuslaitokselle ei synny kustannuksia. Erillisen puhdistamon voidaan myös ajatella olevan helpommin hallittavissa riskien kannalta, sillä esimerkiksi kevättulvat eivät todennäköisesti aiheuta yhtä suurta ylivuotovaaraa sairaalan puhdistamolla verrattuna yhdyskuntajäteveden puhdistamoon, jonne vettä kerätään useista eri lähteistä. Tällöin riski, että sairaalajäteveden sisältämät monille lääkkeitä resistentit bakteerit päätyisivät ylivuototilanteessa ympäristöön, on erillisessä puhdistuksessa pienempi (PILLS 2012).

Puhdistamisen tavoite vaikuttaa merkittävästi käytettävään puhdistusprosessiin ja myös sen kustannuksiin, sillä veden laatuvaatimukset ovat näissä edellä mainituissa tapauksissa merkittävästi erilaiset. Joissakin Euroopan maissa sairaala joutuu jo maksamaan jätevedensä käsittelystä kunnallisella puhdistamolla. Tällöin motivaatio omalle puhdistamolle voi syntyä myös kustannussäästöistä. Esimerkiksi Herlevin sairaala maksoi 3,41 €/m³ jäteveden päästämisestä kunnalliseen viemäriverkostoon. Herlevin sairaalassa toteutetun puh-

distuksen investointikustannukset ovat noin 3,3–4,7 milj. €, käyttö- ja huoltokustannusten ollessa noin 1,45 €/m³. Tällöin jätevedenpuhdistus suoraan sairaalassa tulisi huomattavasti halvemmaksi kuin kunnallisen puhdistuksen ostaminen, mutta tämä laskelma ei huomioi mahdollista erillisen viemäroinnin rakentamista, mikä tulee ottaa kustannusten tarkastelussa myös huomioon. Käsitelty vesi on myös mahdollista uudelleen käyttää sairaalassa esimerkiksi viilennykseen. (DHI 2016)

Mitä useampi prosessivaihe tarvitaan puhdistustuloksen saavuttamiseksi, sitä kalliimpi prosessi on toteuttaa ja käyttää. Tietystä kokonaisharukassa puhdistusprosessien investointikustannukset pienenevät käsiteltävän jätevesimäärän kasvaessa. Sairaaloitten jätevesivirrat ovat tilavuudeltaan pieniä verrattuna jätevesimääriin, joita yhdyskuntajätevedenpuhdistamot käsittelevät, joten niiden kustannukset €/m³ ovat yleensä korkeammat kuin kunnallisten jätevesipuhdistamoiden. PILLS-projektissa laskettiin alustavat vuosittaiset käyttökustannukset 1076 potilaspaikkaisen sairaalan jätevedenpuhdistamolle. Pelkän MBR:n vuosittaiset operointi- ja huoltokustannukset ovat 1,45 €/m³, MBR+GAC:n 1,65 €/m³ ja MBR+O₃+GAC:n 1,75 €/m³. Vuosittaiset investointikustannukset näille variaatioille ovat 3,25–3,5 €/m³ (PILLS 2012). Suurimmat operointi- ja huoltokustannukset siis tulivat tässä tapauksessa membraanibioreaktorista eivätkä tertiäripuhdistukset lisänneet käyttökustannusta merkittävästi.

Laitinen ym. (2020) ovat arvioineet eri tertiäripuhdistusmenetelmien kustannuksia vedenpuhdistuksessa Suomessa (**Taulukko 4**). Kustannustehokkaimmat vaihtoehdot tertiäripuhdistukselle ovat otsonointi ja PCD-hapetus. Membraanisuo datuksista ultrasuodatus on halvin, mutta sillä ei päästä hyvään lääkkeitä poistotehokkuuteen. Käänteisosmoosilla päästään lähes täydelliseen jätevedenpuhdistukseen, mutta sen kustannukset ovat samalla korkeammat kuin muilla menetelmillä. Käytämällä edistyneitä hapetusmenetelmiä saadaan hyvä puhdistustehokkuus, mutta samalla käsittelyn kustannukset nousevat. Hapetusmenetelmissä täytyy ottaa huomioon mahdolliset lääkkeitä ja muiden yhdisteiden muuntumistuotteet, jotka voivat syntyä käsittelyn

aikana. Usein on suositeltavaa käyttää vielä esimerkiksi aktiivihiihisuo datusta hapetuksen jälkeen sen varmistamiseksi, ettei hapetuksen tuotteina syntyneistä yhdisteistä aiheudu ympäristölle lisähaittaa.

Vaihtoehto sairaalajäteveden erilliselle puhdistukselle on tertiäripuhdistusvaiheiden lisääminen kunnallisiin jätevedenpuhdistamoihin. Otsonoinnin tai aktiivihiihiin lisääminen kunnallisiin jätevedenpuhdistamoihin lääkkeitä poiston parantamiseksi lisäisi puhdistamon energiankulutusta 30–50 %. Jos otsonoinnin ja aktiivihiihiä käsittelyn yhdistää lääkkeitä lähes täydellisen poiston saavuttamiseksi kasvaa energiankulutus noin 80 %. (Suomen Vesilaitosyhdistys ry 2016)

Suomessa kunnalliset jätevedenpuhdistamot käyttävät yleensä 0,41–1,55 kWh/m³ sähköä riippuen puhdistamon jätevesimäärästä (Laitinen ym. 2014). Herlevin sairaalan jätevedenpuhdistamon laskettu energiankulutus on noin 2,3 kWh/m³ ja energiankulutuksen osuus käyttökustannuksista on noin 50 % (DHI 2016).

Suomen jätevedenpuhdistamoiden käyttökustannuksista energiaan kuluu 20 % (Laitinen ym. 2014). Sairaaloitten jätevedenpuhdistamoiden korkea energiankulutus johtuu käytettävistä puhdistusmenetelmistä, kuten hapetusmenetelmistä. PILLS-projektin arvioiman laitoksen, jossa on MBR + O₃ + GAC + UV, energiankulutus on 2,7–3,7 kWh/m³ riippuen otsonoinnin ja UV:n tuottamisesta (PILLS 2012).

Johtopäätökset

Suomalaisia kunnallisia jätevedenpuhdistamoita ei ole toistaiseksi suunniteltu poistamaan lääkkeitä. Nykyiset jätevedenpuhdistamot perustuvat usein biologiseen puhdistukseen, aktiivilietemenetelmään, joka poistaa jätevesistä tehokkaasti orgaanista ainesta ja esimerkiksi ravinteita. Biologisessa puhdistuksessa lääkkeitä eivät kuitenkaan poistu tehokkaasti ja esimerkiksi joidenkin hyvin poistuvien yhdisteiden kuten ibuprofeenin ja parasetamolin pitoisuudet ovat niin korkeat jätevedenpuhdistamoiden syötössä, että puhdistetussakin vedessä niiden pitoisuudet ovat korkeita. Näin ollen näitä ja huonosti poistuvia lääkkeitä, esimerkiksi karbamatsepi-

nia ja diklofenaakkia ja erityisesti sairaaloista peräisin olevia varjoaineita kulkeutuu jätevedenpuhdistamoilta vesistöihin ja ympäristöön. Lääkeaineiden päästökohteessa tehty poistaminen on tehokas keino vähentää ympäristölle aiheutuvaa lääkeainekuormitusta. Sairaaloiden lääkeainepitoisuudet ovat korkeat ja jätevesivirrat pienet verrattuna yhdyskuntajätevesiin. Erityisesti sairaalajäteveden erilliskäsittely on tehokasta esimerkiksi varjoaineiden osalta. Varjoaineista suurin osa tulee jätevedenpuhdistamoille sairaaloista, eivätkä ne yleensä poistu nykyisillä puhdistamoilla tehokkaasti.

Jo täydessä käytössä olevat sairaaloiden puhdistamot esimerkiksi Hollannissa ja Tanskassa ovat kustannustehokkaita ja tuovat säästöä verrattuna puhdistamattoman jäteveden pumppaamiseen kunnallisille jätevedenpuhdistamoille. Puhdistetun jäteveden kierrätys esimerkiksi piha-alueiden kasteluun tai sairaalan jäädytykseen pienentää edelleen puhdistamon käyttökustannuksia. Suurimmat kustannukset puhdistamoissa tulevat membraanibioreaktoreista, tertiääripuhdistukset lisäävät käyttökustannuksia muutamia kymmeniä prosentteja.

Jos sairaalan jätevedelle suunnitellaan erillistä puhdistusta, täytyy ottaa huomioon, halutaanko poistaa vain lääkeaineita vai halutaanko jätevesi puhdistaa kokonaan. Tähän päätökseen liittyy myös se, aiotaanko puhdistettu vesi johtaa kunnallisiin viemäreihin kuten aieminkin vai tähdätäänkö veden uudelleen käyttöön sairaalassa tai sen laskemiseen suoraan ympäristöön. Jos vain lääkeaineiden poisto otetaan huomioon, kustannustehokkaimmat menetelmät ovat biologisen käsittelyn, esimerkiksi membraanibioreaktorin, jälkeiset otsonointi ja PCD-hapetus. PCD-hapetus toimii myös varsin tehokkaasti käsittelemättömälle jätevedelle, mutta samalla sen energiantarve on suurempi. Näillä hapetusmenetelmillä saadaan suurin osa lääkeaineista poistettua ennen jätevedenpuhdistamoja ja mahdolliset muuntuotteet hapetuksen seurauksesta päätyvät uudelleen käsittelyyn puhdistamolla. Huomiointavaa on, että koska jätevesi ei ole kokonaan puhdistettua, on jätevesi ohjattava jätevedenpuhdistamolle sairaalan oman puhdistuksen jälkeen. Jos halutaan lähes täydellisesti puhdistettua sairaalan jätevettä, on vaihtoehtoina

yhdistelmäpuhdistus, jossa on MBR+O₃+AC, tai biologinen puhdistus ja käänteisosmoosi. Näissä tapauksissa on mahdollista kierrättää sairaalan jätevesi uusiokäyttöön tai päästää se suoraan ympäristöön. Osa lääkeaineista on kuitenkin erittäin haastavia hapetettavia ja poistettavia, ja siksi tarvitaan puhdistusmenetelmien kehityksen lisäksi myös lääkeainekemistystä, joka toisi tulevaisuudessa käyttöömme entistäkin enemmän helposti poistettavia tai biohajoavia lääkeaineita.

Summary

On-site treatment of hospital wastewater to control discharges of pharmaceuticals

Perttu Salmi

MSc., project researcher
LUT university

Mikko-Jussi Laine

BSc., research assistant
LUT university

Mika Mänttari

Dr. (Tech.), professor
LUT university
Mari Kallioinen-Mänttari*
Dr. (Tech.), professor
LUT university
mari.kallioinen-manttari@lut.fi

*Correspondence

Municipal wastewater contains high amounts of pharmaceuticals. Current wastewater treatment plants which are based on biological treatment cannot efficiently remove all of these pharmaceuticals from the wastewater. This means that large amounts of pharmaceuticals end up in the environment and bodies of water. Based on literature hospitals are meaningful point sources for pharmaceuticals, their pharmaceutical load to municipal wastewater treatment plant can be up to 20% of the whole pharmaceutical load. Hospital wastewater contains also high amounts of pharmaceuticals which are not efficiently removed in wastewater treatment plants, for example contrast agents and antibiotics.

Based on literature wastewater treatment process for efficient pharmaceuticals removal can be built from currently available unit operations. Most common results from pilot processes are from combining biological treatment with active carbon adsorption or oxidation. Membrane filtration has also been studied as a tertiary treatment option. Research has also shown that removal of pharmaceuticals from

hospital wastewater is possible also with direct adsorption, oxidation, or membrane filtration without biological treatment. Costs and operations of the treatment process are depending on the required level of treatment. It is possible to produce water in the treatment which can be released back to the environment or recycled back to be used in the hospital. It is also possible to only ease the operation of municipal wastewater plant treatment process by modifying the pharmaceuticals with for example oxidation to more easily biodegrading structures. Some pharmaceuticals are however highly challenging to oxidate and remove and therefore it is necessary to develop not only treatment processes but also pharmaceuticals. In the future, this could lead to more easily removed and biodegraded pharmaceuticals being available.

Keywords: wastewater, pharmaceutical residues, on-site treatment, hospitals

Sidonnaisuudet

Kirjoittajilla ei ole lääke- ja terveysalan sidonnaisuuksia.

Kiitokset

Tämä kirjallisuuskatsaus toteutettiin projektissa ”VEMO – Kaupunkien jätevesien haitallisten aineiden vähentäminen monitorointia tehostamalla”, joka on rahoitettu Ympäristöministeriön vesiensuojeluohjelmasta.

Kirjallisuus

Ajo P, Preis S, Vornamo T ym.: Hospital wastewater treatment with pilot-scale pulsed corona discharge for removal of pharmaceutical residues. *J Environ Chem Eng* 6: 1569–1577, 2018

Alvarino T, García-Sandá E, Gutiérrez-Prada I ym.: A new decentralized biological treatment process based on activated carbon targeting organic micropollutant removal from hospital wastewaters. *Environ Sci Pollut Res* 27: 1214–1223, 2020

Batelaan M V, van den Berg E A, Koetse E ym.: Evaluation report Pharmafilter Full scale demonstration in the Reinier de Graaf Gasthuis (Hospital) Delft. Stowa rapport 16, 2013

Bendz D, Paxéus N A, Ginn T R ym.: Occurrence and fate of pharmaceutically active compounds in the environment, a case study: Höje river in Sweden. *J Hazard Mater* 122: 195–204, 2005

Bertanza G, Canato M, Laera G ym.: A comparison between two full-scale MBR and CAS municipal wastewater treatment plants: techno-economic-environmental assessment. *Environ Sci Pollut Res* 24: 17383–17393, 2017

Castiglioni S, Bagnati R, Fanelli R ym.: Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy. *Environ Sci Technol* 40: 357–363, 2006

Daouk S, Chèvre N, Vernaz N ym.: Dynamics of active pharmaceutical ingredients loads in a Swiss university hospital wastewaters and prediction of the related environmental risk for the aquatic ecosystems. *Sci Total Environ* 547: 244–253, 2016

DHI: Full scale advanced wastewater treatment at Herlev Hospital, treatment performance and evaluation. Grundfos BioBooster A/S, report, 2016

Falås P, Andersen H R, Ledin A ym.: Occurrence and reduction of pharmaceuticals in the water phase at Swedish wastewater treatment plants. *Water Sci Technol* 66: 783–791, 2012

Gao T, Xiao K, Zhang J ym.: Techno-economic characteristics of wastewater treatment plants retrofitted from the conventional activated sludge process to the membrane bioreactor process. *Front. Environ. Sci. Eng.* 16: 1, 2022.

Göbel A, McArdeell C S, Joss A ym.: Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. *Sci Total Environ* 372: 361–371, 2007

Hansen K M S, Spiliotopoulou A, Chhetri R K ym.: Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater – ozone lifetime and required ozone dose. *Chem Eng J* 290: 507–514, 2016

Hämäläinen A, Moilanen M, Hokajäri A-M: Juomavesien epäpuhtauksien poistotekniikat talous- ja jätevesilaitoksilla. *Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, Työpaperi* 43/2018, 2018

Jelic A, Gros M, Ginebreda A ym.: Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Water Res* 45: 1165–1176, 2011

Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M & Guwy A J: The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. *Water Res.* 43: 363–380, 2009

Kovalova L, Siegrist H, Singer H ym.: Hospital wastewater treatment by membrane bioreactor: Performance and efficiency for organic micropollutant elimination. *Environ Sci Technol* 46: 1536–1545, 2012

Kovalova L, Siegrist H, von Gunten U ym.: Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environ Sci Technol* 47: 7899–7908, 2013

Kruglova A, Kråkström M, Riska M ym.: Comparative study of emerging micropollutants removal by aerobic activated sludge of large laboratory-scale membrane bioreactors and sequencing batch reactors under low-temperature conditions. *Bioresour Technol* 214: 81–88, 2016

Laitinen J, Nieminen J, Saarinen R ym.: Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) – Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. *Suomen ympäristö* 3/2014 ISSN 1238–7312, 2014

Laitinen J, Vieno N & Kandelberg K: Jätevesien lääkejäämien käsittelyn kustannustehokkuus. *Vesitalous* 1: 17–19, 2020

Lindberg R, Jarnheimer P, Olsen B ym.: Determination of antibiotic substances in hospital sewage water using solid phase extraction and liquid chromatography/mass spectrometry and group analogue internal standards. *Chemosphere* 57: 1479–1488, 2004

Lindholm-Lehto P: Occurrence of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment plants and receiving surface waters in Central and Southern Finland. University of Jyväskylä, 2016

Mänttari M, Vornamo T, Kallioinen M: Millä eron jäteveden lääkeainejäämistä. Efficient treatment of pharmaceutical residue at source – epic, Final seminar, 2018

Mänttari M, Arola K, Vornamo T, Ajo P, Kallioinen M: Lääkeaineiden poiston yhdyskuntajätevesistä mahdollistavat tekniikat. Dosis 36: 300–312, 2020

Nielsen U, Hastrup C, Klausen M M ym.: Removal of APIs and bacteria from hospital wastewater by MBR plus O₃, O₃ + H₂O₂, PAC or ClO₂. Water Sci Technol 67: 854–862, 2013

Niemi L, Taggart M, Boyd K ym.: Assessing hospital impact on pharmaceutical levels in a rural 'source-to-sink' water system. Sci Total Environ 737: 139618 2020

Ort C, Lawrence M G, Reungoat J ym.: Determining the fraction of pharmaceutical residues in wastewater originating from a hospital. Water Res 44: 605–615, 2010

PILLS: Pharmaceutical input and elimination from local sources: Final report of the European co-operation project PILLS. Emschergerossenschaft, Essen, 2012

Serna-Galvis E A, Silva-Agredo J, Botero-Coy A M ym.: Effective elimination of fifteen relevant pharmaceuticals in hospital wastewater from Colombia by combination of a biological system with a sonochemical process. Sci Total Environ 670: 623–632, 2019

Suomen Vesilaitosyhdistys ry: Teknis-taloudellinen tarkastelu jätevesien käsittelyn tehostamisesta Suomessa. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja 42, 2016

Söregård M, Campos-Pereira H, Ullberg M ym.: Mass loads, source apportionment, and risk estimation of organic micropollutants from hospital and municipal wastewater in recipient catchments. Chemosphere 234: 931–941, 2019

Thomas K V, Dye C, Schlabach M ym.: Source to sink tracking of selected human pharmaceuticals from two Oslo city hospitals and a wastewater treatment works. J Environ Monit 9: 1410–1418, 2007

UNESCO & HELCOM: Pharmaceuticals in the aquatic environment of the Baltic Sea region – A status report. UNESCO Emerging Pollutants in Water Series – No. 1, UNESCO Publishing, Paris, 2017

Verlicchi P, Al Aukidy M & Zambello E: Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—A review. Sci Total Environ 429: 123–155, 2012a

Verlicchi P, Al Aukidy M, Galletti A ym.: Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment. Sci Total Environ 430: 109–118, 2012b

Verlicchi P, Al Aukidy M, Jelic A ym.: Comparison of measured and predicted concentrations of selected pharmaceuticals in wastewater and surface water: A case study of a catchment area in the Po valley (Italy). Sci Total Environ 470–471: 844–854, 2014

Verlicchi P, Al Aukidy M & Zambello E: What have we learned from worldwide experiences on the management and treatment of hospital effluent? — an overview and a discussion on perspectives. Sci Total Environ 514: 467–491, 2015

Vieno N, Tuhkanen T & Kronberg L: Elimination of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Finland. Water Res. 41: 1001–1012, 2007

Wiest L, Chonova T, Bergé A ym.: Two-year survey of specific hospital wastewater treatment and its impact on pharmaceutical discharges. Environ Sci Pollut Res 25: 9207–9218, 2018

Äystö L, Fjäder P & Nystén T: Pharmaceutical load to municipal wastewater treatment plants and their primary emission sources. Poster, presented at the Water JPI Conference in Helsinki, 6.–7.6.2018, 2018

Äystö L, Vieno N, Fjäder P ym.: Lääkeaineiden kuorma jätevedenpuhdistamoille ja niiden primääripäästölähteet. Vesitalous 1: 5–8, 2020

Salmi P, Laine M-J, Mänttari M, Kallioinen-Mänttari M: Sairaalajäteveden erilliskäsittely lääkeainepäästöjen hallinnassa. Dosis 39: 108–123, 2023