

Eriikka Nenonen

# LÄMMÖNTALTEENOTTO HARMAISTA VESISTÄ

Syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien vertailu  
kotitalouksien jätevesiin

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Marika Kokko  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Eriikka Nenonen: Lämmöntalteenotto harmaista vesistä  
Heat recovery from greywater  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Huhtikuu 2023

---

Rakennusten lämmitys vie lähes kolmasosan Suomen energiankulutuksesta, ja myös käyttöveden lämmitykseen kuluu huomattavasti energiaa. Lämmityksen energiankulutuksen vähentämiseksi jätevesien sisältämää lämpöenergiaa voidaan hyödyntää kotitalouksissa käyttöveden tai rakennuksen lämmittämiseksi. Tässä työssä käsitellään lämmöntalteenottoa syntypaikkaerotelluista harmaista vesistä. Harmailla vesillä tarkoitetaan kotitalouksien jätevesiä, jotka ovat peräisin esimerkiksi keittiöstä ja hygieniakäytöstä. WC:stä peräisin olevat mustat vedet eivät kuulu harmaisiin vesiin. Tavoitteena on selvittää, soveltuvatko harmaat vedet kotitalouksien jätevesiä paremmin lämmöntalteenottoon. Lisäksi tavoitteena on selvittää, miten harmaista vesistä otetaan lämpöä talteen ja miten lämmöntalteenotto vaikuttaa harmaiden vesien käsittelyyn. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Lisäksi tavoitteena on havainnollistaa harmaiden vesien lämmöntalteenottopotentiaalia laskennallisesti käsittelemällä osaa Tampereen Hiedanrannan tulevasta asuinalueesta.

Kotitalouksien jätevesistä suurin osa, noin 85 %, on harmaita vesiä. Harmaiden vesien syntypaikkaerotellussa ravinnerikkaat mustat jätevedet johdetaan erilleen puhtaammista harmaista vesistä. Seurauksena harmaiden vesien kiintoaine- ja ravinnepitoisuus on huomattavasti pienempi kuin sekaisin johdetuissa kotitalouksien jätevesissä. Harmaat vedet sisältävät noin 60 % kotitalouksien jätevesien orgaanisesta aineesta, 7 % kokonaistypestä ja 19 % kokonaisfosforista. Harmaiden vesien laadussa ja määrässä esiintyy kuitenkin huomattavaa ajallista ja paikallista vaihtelua, sillä esimerkiksi keittiöstä peräisin olevat jätevedet voivat sisältää paljon orgaanista ainesta. Harmaiden vesien suhteellisen matalan kiintoaine- ja ravinnepitoisuuden seurauksena vesien käsittelyprosesseilta vaadittu teho ei ole niin suuri kuin kotitalouksien jätevesillä.

Kotitalouksista lähtevien jätevesien lämpötila on noin 20 °C. Harmaiden vesien lämpötila on keskimäärin korkeampi. Lämmöntalteenotolla voidaan laskea jätevesien lämpötilaa 2–20 °C. Jätevedenkäsittelyssä vesien lämpötilalla on merkittävä vaikutus biologisten prosessien, kuten typenpoiston, toimintaan. Kotitalouksien jätevesien lämmöntalteenottopotentiaali on harmaita vesiä rajoitetumpi, jotta aktiivilieteprosessin toiminta ei häiriinny ja saavutetaan Valtioneuvoston yhdyskuntajätevesiasetuksen mukainen typenpoiston tehokkuus. Typenpoiston tehokkuus on määritetty sille ajalle, kun jätevesien lämpötila on yli 12 °C. Harmaiden vesien pienemmän ravinnepitoisuuden takia käsittelyn laatutavoitteet on mahdollista saavuttaa matalammassakin lämpötiloissa keinotekoisien kosteikkojen tai kalvobioreaktoreiden avulla. Keinotekoisien kosteikkojen ja kalvobioreaktoreiden käyttö harmaiden vesien puhdistuksessa Suomen ilmastossa vaatii kuitenkin lisää tutkimusta.

Harmaista vesistä voidaan ottaa lämpöä talteen passiivisesti lämmönvaihtimilla tai hyödyntämällä lämpöpumppua. Tampereen Hiedanrannan tulevalla asuinalueella kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto harmaista vesistä lämmönvaihtimia hyödyntäen voisi potentiaalisesti kattaa noin 13 % kiinteistöjen lämmitystarpeesta. Vastaavasti noin 6 % kiinteistöjen lämmöntarpeesta voidaan kattaa, jos lämmönlähteenä käytetään kotitalouksien jätevesiä. Harmaiden vesien aiheuttama lämmönvaihdinten likaantuminen ja sen vaikutus lämmönsiirron tehokkuuteen vaatii lisää tutkimusta. Oletettavasti harmaat vedet kuitenkin aiheuttavat vähemmän likaantumista kuin kotitalouksien jätevedet niiden pienemmän kiintoaine- ja ravinnepitoisuuden takia.

Avainsanat: lämmöntalteenotto, harmaat vedet, jätevesien syntypaikkaerottelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HARMAAT VEDET .....	3
2.1 Harmaiden vesien ominaisuudet .....	3
2.2 Syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien erot kotitalouksien jätevesiin5	
2.3 Kotitalouksien jätevesien ja harmaiden vesien käsittely .....	8
2.3.1 Käsittely jätevedenpuhdistamoilla .....	8
2.3.2 Keinotekoiset kosteikot ja kalvobioreaktorit .....	9
3. LÄMMÖNTALTEENOTTO HARMAISTA VESISTÄ .....	11
3.1 Lämmöntalteenotto .....	11
3.1.1 Lämmönvaihtimet .....	11
3.1.2 Lämpöpumput .....	13
3.2 Lämmönvaihtimien likaantuminen .....	14
3.3 Lämmöntalteenoton vaikutus vesien käsittelyyn .....	15
4. LÄMMÖNTALTEENOTON POTENTIAALI .....	17
4.1 Aineisto ja menetelmät .....	17
4.2 Tulokset ja tulosten tulkinta .....	18
5. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	20
LÄHTEET .....	22

# 1. JOHDANTO

Suomen energiankulutuksesta 27 % kuluu rakennusten lämmitykseen (Tilastokeskus, 2021) ja asumisen energiankulutuksesta huomattava osa, noin 17 %, kuluu käyttöveden lämmitykseen (Motiva, 2020a). Asumisen energiatehokkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä jätevesien mukana viemäriin päätyvää lämpöä. Suurin osa kotitalouksien jätevesien lämmöstä on sitoutunut harmaisiin vesiin. Harmailla vesillä tarkoitetaan kotitalouksien jätevesiä, jotka ovat peräisin esimerkiksi suihkuista, pesualtaista, pesukoneista ja keittiöstä. Harmaisiin jätevesiin ei kuulu WC:stä peräisin olevat jätevedet, joita kutsutaan mustiksi vesiksi. (Ghaitidak & Yadav, 2013)

Suomessa kotitalouksien jätevedet johdetaan pääosin sekaviemäröitynä jätevedenpuhdistamoille käsiteltäväksi. Ravinnerikkaiden mustien vesien sekoittaminen harmaisiin vesiin laimentaa mustia vesiä ja täten vaikeuttaa niiden sisältämien ravinteiden talteenottoa (Lehtoranta et al., 2022). Tässä työssä käsitellään tilannetta, jossa harmaat ja mustat jätevedet syntyipaikkaerotellaan. Jätevesien syntyipaikkaerottelulla tarkoitetaan eri jätevesijakeiden johtamista erilleen, erillisiin käsittelyihin. Vastaavan tilanteen potentiaalia on käsitelty esimerkiksi Tampereen Hiedanrannan tulevan asuinalueen näkökulmasta, jolloin harmaat vedet johdettaisiin käsittelyyn keskusjätevedenpuhdistamolle ja mustat vedet anaerobiseen käsittelyyn erilliselle laitokselle (Lehtoranta et al., 2022). Tutkimuksen mukaan syntyipaikkaerottelu mahdollistaa jäteveden sisältämän typen ja fosforin nykyistä järjestelmää tehokkaamman talteenoton ja hyödyntämisen.

Harmaiden vesien lämpöä voidaan ottaa talteen aktiivisilla tai passiivisilla teknologioilla. Passiiviset teknologiat perustuvat lämmönvaihtimiin ja aktiivisissa hyödynnetään lämpöpumppua. (Hadengue et al., 2022) Talteen otettua lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kiinteistöjen käyttövesien esilämmityksessä tai rakennusten lämmityksessä (Kordana-Obuch et al., 2023).

Tämän työn tavoite on selvittää, soveltuvatko syntyipaikkaerotellut harmaat vedet kotitalouksien jätevesiä paremmin lämmöntalteenottoon. Lisäksi tavoite on selvittää, miten harmaista vesistä voidaan ottaa lämpöä talteen ja miten lämmöntalteenotto vaikuttaa harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien käsittelyyn. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Luvussa 2 käsitellään harmaiden vesien ominaisuuksia ja käsittelytarvetta verrattuna yleisesti kotitalouksien jätevesiin. Lisäksi tarkastellaan harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien käsittelytekniikoita. Seuraavaksi luvussa 3 käsitellään harmaiden vesien lämmöntalteenottoa lämmönvaihtimilla ja lämpöpumpuilla. Lisäksi tutkitaan lämmönvaihtimien likaantumista sekä lämmöntalteenoton vaikutusta vesien käsittelyyn. Luvussa 4 harmaiden vesien kotitalouksien jätevesiä parempaa lämmöntalteenottopotentiaalia havainnollistetaan laskennallisesti. Viimeisessä luvussa esitetään työn tärkeimmät johtopäätökset.

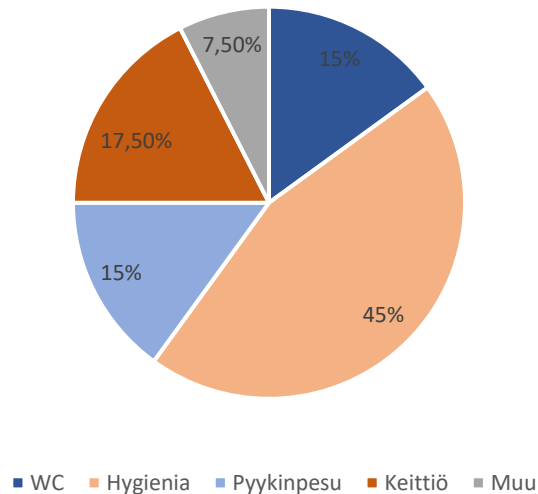
## 2. HARMAAT VEDET

Tässä luvussa käsitellään syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien ominaisuuksia sekä verrataan niitä kotitalouksien jätevesien ominaisuuksiin. Luvussa tutkitaan, miten harmaat vedet eroavat kotitalouksien jätevesistä lämmöntalteenottopotentialtaan ja miten näitä jätevesiä käsitellään jätevedenpuhdistamoilla, keinotekoisilla kosteikoilla ja kalvobioreaktoreilla.

### 2.1 Harmaiden vesien ominaisuudet

Harmaiden vesien laatu ja määrä vaihtelevat suuresti. Niihin vaikuttavat muun muassa käsiteltävän alueen tai kiinteistön asukkaiden määrä, ikäjakauma ja elintavat. Lisäksi vedenjakeluverkoston sekä käyttöveden laadulla on vaikutusta harmaiden vesien laatuun. Laadussa esiintyy sekä ajallista että paikallista vaihtelua. (Eriksson et al., 2002) Harmaita vesiä voidaan edelleen jaotella kylpyhuoneiden ja suihkujen jätevesistä koostuviksi vaaleiksi harmaiksi vesiksi (light greywater) sekä keittiöstä peräisin oleviksi tummiksi harmaiksi vesiksi (dark greywater). Tyypillisesti vaaleat harmaat vedet ovat tummia vähemmän kontaminoituneita. (Khajvand et al., 2022)

Kotitalouksien jätevesistä 75–90 % on harmaita jätevesiä (Hernández Leal et al., 2011). Vuorokaudessa syntyvien harmaiden vesien määrä vaihtelee 90 litrasta 120 litraan henkilöä kohden, riippuen muun muassa elintavoista, elintasosta ja saatavilla olevan veden määrästä. Alhaisen tulotason maissa määrä voi olla noin 20–30 litraa henkilöä kohden. (Li et al., 2009) Syntyvien harmaiden vesien määriä voidaan myös arvioida yleisen vedenkulutuksen perusteella. Motiva on tutkinut suomalaisten vedenkäyttöä projektissaan Kestävä veden käyttö (Motiva, 2020b). Projektin kyselytutkimukseen vastanneiden keskimääräinen vedenkulutus on 110 litraa vuorokaudessa. Vedenkäytön jakautumista on havainnollistettu kuvassa 1. Keskimäärin 15 % käytetystä vedestä kuluu WC:ssä, jolloin syntyy mustia jätevesiä. Tällöin harmaiksi vesiksi päätyy noin 85 % vedenkulutuksesta eli keskimäärin 93,5 litraa vuorokaudessa asukasta kohden. Tutkimukseen vastanneiden vedenkulutus kuitenkin vaihteli alle 50 litrasta yli 300 litraan vuorokaudessa, joten kotitalouskohtaiset erot ovat suuria (Motiva, 2020b).



**Kuva 1:** Vedenkäytön jakauma (Motiva, 2020b)

Harmaat vedet sisältävät muun muassa kiintoainesta, ravinteita ja kemikaaleja. Harmaiden vesien sisältämää kiintoainesta ovat esimerkiksi keittiöstä peräisin olevat ruoanjänteet sekä hiukset ja vaatekuidut pyykinpesusta. Näistä lähteistä harmaisiin vesiin päätyy myös esimerkiksi hiekkaa ja savea. Keittiöstä peräisin olevat jätevedet sisältävät lisäksi esimerkiksi jäämiä lipideistä, maitotuotteista, glukoosista, tärkkelyksestä, kahvista ja teestä. Pyykinpesusta peräisin olevat harmaat vedet taas sisältävät erilaisia pesu- ja valkaisuaineita sekä hajusteita. (Eriksson et al., 2002) Harmaiden vesien ominaisuudet voivat muuttua, mikäli niiden sisältämät kemialliset yhdisteet hajoavat varastoinnin tai käsittelyyn johtamisen aikana (Li et al., 2009).

Harmaat jätevedet sisältävät ksenobioottisia orgaanisia yhdisteitä. Näillä tarkoitetaan sellaisia syntetisoituja yhdisteitä, joiden rakenteita ei luonnossa esiinny (Tieteen termipankki, 2023). Ksenobioottiset orgaaniset yhdisteet ovat peräisin kotitalouksissa käytettävistä kemikaaleista, kuten pesuaineista, saippuoista, shampoista, hajusteista, väriaineista ja puhdistusaineista. Harmaisiin jätevesiin voi päätyä myös patogeenisiä viruksia, bakteereja ja alkueläimiä muun muassa WC-käynnin tai vaipanvaihdon jälkeisen käsienpesun jälkeen. Myös keittämättömät kasvikset ja raaka liha voivat olla haitallisten mikrobien lähteitä. (Eriksson et al., 2002)

Harmaiden vesien lämpötila vaihtelee välillä 18–38 °C. Suhteellisen korkea lämpötila on seurausta veden hygieniakäytöstä. (Eriksson et al., 2002) Korkea lämpötila edistää mikrobien kasvua viemäriverkostossa ja lisää kalsiumkarbonaatin saostumista (Srirangarayan et al., 2020). Harmaiden vesien korkeaa lämpötilaa voidaan hyödyntää ottamalla vesistä lämpöä talteen. Tätä lämpöenergiaa voidaan käyttää esimerkiksi kiinteistöjen käyttöveden esilämmityksessä. (Kordana-Obuch et al., 2023)

## 2.2 Syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien erot kotitalouksien jätevesiin

Jätevedenkäsittelyssä keskitytään tiettyihin jäteveden ominaisuuksiin. Valtioneuvoston asetuksessa yhdyskuntajätevesistä (888/2006) määritellään enimmäispitoisuudet ja vähimmäispoistotehokkuudet biologiselle (BOD, biological oxygen demand) ja kemialliselle hapenkulutukselle (COD, chemical oxygen demand), kiintoaineelle sekä kokonaistypelle ja -fosforille. Täten jätevesien sisältämistä komponenteista merkittävimpinä voidaan pitää typpeä, fosforia ja orgaanista ainesta. Taulukossa 1 on kuvattu yhden ihmisen vuodessa tuottamia ravinnemääriä jätevesiin sekä niiden alkuperiä.

**Taulukko 1:** Yhden henkilön vuosittain tuottamat ravinnemäärät jätevesiin (Viskari et al., 2017)

Alkuperä	BOD [kg/hlö/a]	N [kg/hlö/a]	P [kg/hlö/a]
Uloste	5,48	0,52	0,21
Virtsa	1,83	4,13	0,40
Muu	10,95	0,37	0,15

Huomataan, että noin 40 % jätevesien sisältämästä orgaanisesta aineesta, 93 % kokonaistypestä ja 81 % kokonaisfosforista on peräisin ulosteesta ja virtsasta. Kun nämä jakeet erotellaan mustiin vesiin, syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien ravinne- ja kiintoainepitoisuus on huomattavasti pienempi kuin kotitalouksien jätevesien, joissa on sekaosin sekä mustat että harmaat jätevedet.

Harmaiden vesien typpipitoisuus on 8-30 mg/L, kun taas kotitalouksien jätevesissä se on 20-80 mg/L (Henze & Ledin, 2001). Huomattavan eron pitoisuuksissa aiheuttaa se, että kotitalouksien pääasiallinen typenlähde jätevesiin on virtsa, joka ei kuulu harmaisiin vesiin. Harmaiden vesien typpipitoisuutta kasvattavat keittiöstä peräisin olevat jätevedet, joissa typpipitoisuus on 40–74 mg/L. (Eriksson et al., 2002) Myös suihkun ja pyykinpesun kautta harmaisiin vesiin päätyy jonkin verran typpeä (Ghaitidak & Yadav, 2013).

Fosforia harmaissa vesissä on 2-7 mg/L ja kotitalouksien jätevesissä 6-23 mg/L (Henze & Ledin, 2001). Jätevesiin päätynyt fosfori on pääosin peräisin virtsasta ja pesuaineista (Berninger et al., 2017). Kun virtsa johdetaan erilleen harmaista vesistä, harmaiden vesien fosforipitoisuuteen vaikuttaa lähinnä käytettyjen pesuaineiden fosforipitoisuus. Fosfaatteja on aiemmin käytetty pesuaineissa vähentämään veden kovuutta, mutta nykyään fosfaattien käyttö pesuaineissa on kielletty muun muassa EU:n alueella (Yle.fi, 2011). Tämä vähentää myös harmaisiin vesiin päätyvän fosforin määrää.



Biologisella hapenkulutuksella voidaan kuvata jätevesien sisältämän orgaanisen aineksen määrää. Kemialliseen hapenkulutukseen sisältyy biologisen hapenkulutuksen lisäksi vaikeammin hajoavan aineksen aiheuttama hapenkulutus. (Laitinen et al., 2014) Harmaiden vesien biologinen hapenkulutus vaihtelee välillä 90-360 mg/L, kun taas kotitalouksien jätevesillä vaihteluväli on 150-530 mg/L (Eriksson et al., 2002). Suurin orgaanisen aineen lähde harmaisiin vesiin ovat keittiöstä peräisin olevat jätevedet, jotka sisältävät ruoanjäämiä. Myös muista lähteistä päätyy jonkin verran orgaanista ainetta harmaisiin vesiin. Kemiallisen ja biologisen hapenkulutuksen suhteellisen suuret vaihteluvälien maksimiarvot johtuvat ajoittain harmaisiin vesiin päätyvien keittiöjätevesien ruoanjäämistä sekä pyykinpesusta peräisin olevista pesuaineista. (Ghaitidak & Yadav, 2013) Taulukossa 2 on vertailtu aiemmin mainittuja parametreja syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien ja sekaisin johdettujen kotitalouksien jätevesien osalta.

**Taulukko 2:** Harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien ominaisuuksien vertailua

Parametri	Harmaat vedet [mg/L]	Kotitalouksien jätevedet [mg/L]
<b>Kiintoaine</b>	17–330 <sup>1</sup> , 25–183 <sup>4</sup>	120–450 <sup>2</sup>
<b>COD</b>	13–8000 <sup>1</sup> , 55–2000 <sup>3</sup> , 100–700 <sup>4</sup>	210–740 <sup>2</sup>
<b>BOD</b>	90–360 <sup>1</sup> , 47–466 <sup>4</sup>	150–530 <sup>2</sup>
<b>Kokonaistyyppi</b>	0,6–74 <sup>1</sup> , 8–30 <sup>2</sup> , 1,7–34,3 <sup>4</sup>	20–80 <sup>2</sup>
<b>Kokonaisfosfori</b>	2–7 <sup>2</sup> , 0,11–22,8 <sup>4</sup>	6–23 <sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Eriksson et al., 2002) <sup>2</sup>(Henze & Ledin, 2001) <sup>3</sup>(Ghaitidak & Yadav, 2013) <sup>4</sup>(Li et al., 2009)

Harmaiden vesien käsittelytarve on pienempi kuin kotitalouksien jätevesillä. Huomattava ero on harmaiden vesien ravinnepitoisuudessa, joka on kotitalouksien jätevesiä pienempi. Tämän seurauksena typen ja fosforin poiston harmaista vesistä ei tarvitse olla yhtä tehokas kuin jätevedenpuhdistusprosessissa yleensä. Taulukossa 3 on listattu harmaiden vesien keskimääräisiä ominaisuuksia tärkeimpien käsittelyparametrien osalta ja verrattu niitä yhdyskuntajätevesiasetuksen määrittelemiін tavoitearvoihin. Näiden perusteella on laskettu vaadittu poistotehokkuus. Keskimääräiset arvot parametreille on määritetty parametrien vaihteluvälien (Taulukko 2) keskiarvojen perusteella. On kuitenkin

huomioitava, että harmaiden vesien ominaisuuksissa esiintyy huomattavaa ajallista ja paikallista vaihtelua, joka on otettava huomioon myös käsittelyprosessien suunnittelussa.

**Taulukko 3: Harmaiden vesien käsittelytarve**

<b>Parametri</b>	<b>Harmaissa vesissä keskimäärin [mg/L]</b>	<b>Käsittelytavoite [mg/L] (Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006)</b>	<b>Vaadittava poistotehokkuus [%]</b>
<b>Kiintoaine</b>	139	35	75
<b>COD</b>	1811	125	93
<b>BOD</b>	241	30	88
<b>Typpi</b>	25	15	39
<b>Fosfori</b>	8	2	75

Myös harmaiden vesien keskimääräinen lämpötila eroaa kotitalouksien jätevesien lämpötilasta. Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Wärff et al., 2020) määritettiin eri lähteistä peräisin olevien jätevesien lämpötiloja. Määritetyt lämpötilat ja jätevesien lähteet on listattu taulukossa 4. VTT:n tutkimusraportissa (Laitinen & Wallin, 2022) taulukon 4 lämpötilojen sekä kunkin vesikalusteen vuorokautisen todennäköisen käytön avulla on määritetty jäteveden sekoituslämpötila. Sekoituslämpötilalla tarkoitetaan laskennan lähtöarvoa, jonka perusteella voidaan laskea arvio rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötilalle lämpöhäviöiden jälkeen. Sekoituslämpötilaksi on tutkimusraportissa saatu 27 °C ja rakennuksesta poistuvan jäteveden lämpötilaksi 20 °C. Kylmän käyttöveden lämpötila vaihtelee muun muassa vuodenajan mukaan välillä 10–20 °C.

**Taulukko 4:** Jätevesien lämpötilat lähteittäin (Wärff et al., 2020)

Jäteveden lähde	Jäteveden lämpötila [°C]
Suihku/kylpyamme	37
WC	Kylmä käyttövesi
Pyykinpesukone	45
Astianpesukone	40
Hanat	20

Koska harmaat vedet eivät sisällä WC:stä peräisin olevia jätevesiä, niiden keskimääräinen lämpötila on kotitalouksien jätevesien lämpötilaa suurempi. Tämän seurauksena harmaiden vesien lämmöntalteenottopotentialiaali on suurempi kuin kotitalouksien jätevesissä.

## 2.3 Kotitalouksien jätevesien ja harmaiden vesien käsittely

Kotitalouksien jätevesien käsittely toteutetaan pääosin jätevedenpuhdistamoilla. Harmaita vesiä voidaan käsitellä monilla eri tavoilla. Tässä työssä keskitytään harmaiden vesien käsittelyyn keinotekoisien kosteikkojen (constructed wetlands) ja kalvobioreaktoreiden (MBR, membrane bioreactor) avulla. Keinotekoiset kosteikot hyödyntävät vedenkäsittelyssä kosteikon kasvillisuutta ja mikro-organismeja sekä ekologisia prosesseja (Ghaidak & Yadav, 2013), kun taas kalvobioreaktorit yhdistävät biologisia prosesseja ja erilaisia suodatusjärjestelmiä (Santamasas et al., 2013).

### 2.3.1 Käsittely jätevedenpuhdistamoilla

Suomessa jätevedenkäsittely koostuu jätevedenpuhdistamoilla yleensä esikäsittelystä, esiselkeytyksestä ja aktiivilieteprosessista. Lisäksi syntynyt liete käsitellään erikseen. (Laitinen et al., 2014) Laitosten keskimääräinen poistotehokkuus on orgaaniselle aineelle 98 %, typelle 64 % ja fosforille 96 % (Malila et al., 2019).

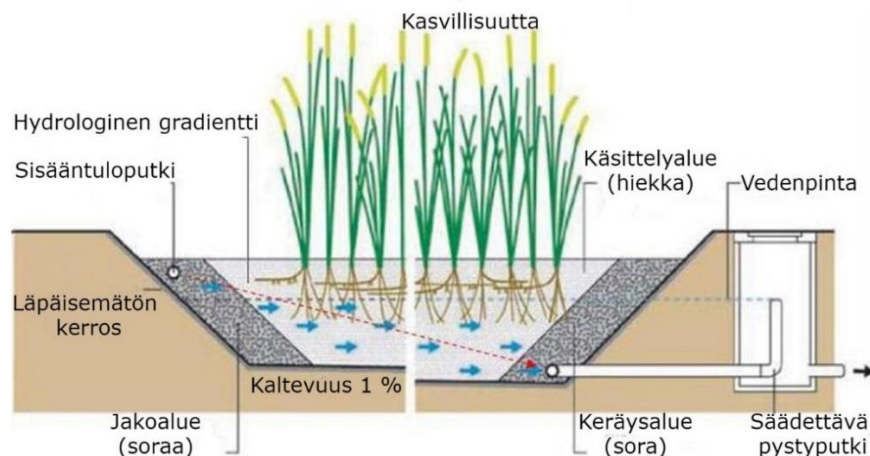
Jätevesien sisältämää kiintoainetta pyritään poistamaan esikäsittelyn ja esiselkeytyksen avulla. Käsittelyprosessin esikäsittelyyn kuuluvat välppäys ja hiekanerotus. (Laitinen et al., 2014) Välppäyksen avulla jätevesistä erotellaan kaikkein suurimmat jakeet, kuten ruoantähteet ja oksat. Hiekanerotuksen tarkoituksena taas on hiekan ja muun raskaan materiaalin erottaminen jätevesistä. Esiselkeytyksessä raskaat kiintoainehiukkaset erotetaan jätevesistä laskeuttamalla. (Davis, 2020)

Aktiivilieteprosessissa poistetaan jätevesistä fosforia, typpeä ja orgaanista ainesta. Prosessi koostuu ilmastuksesta, jälkiselkeytyksestä ja fosforin rinnakkaissaostuksesta. (Laitinen et al., 2014) Ilmastusaltaassa typpeä poistetaan biologisesti nitrifikaatio- ja denitrifikaatioreaktioiden avulla. Fosforin poisto prosessissa voidaan toteuttaa kemiallisesti saostamalla tai biologisesti. Orgaanisen aineksen poisto jätevesistä perustuu luonnollisiin hajotusprosesseihin, joissa mikrobit käyttävät ravintonaan orgaanisia hiiliyhdisteitä jätevedestä. Jälkiselkeytyksessä hyödynnetään laskeutusta mikrobien poistamiseen käsiteltyistä jätevesistä. (Davis, 2020)

### 2.3.2 Keinotekoiset kosteikot ja kalvobioreaktorit

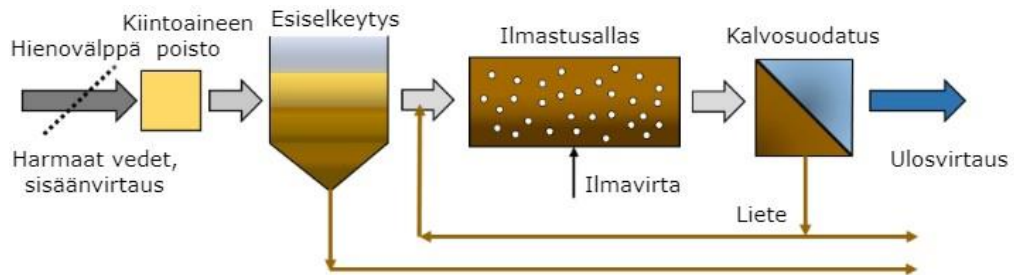
Kun harmaita vesiä puhdistetaan keinotekoisien kosteikkojen avulla, johdetaan käsiteltävät vedet ensin saostuskaivoon, jossa veden sisältämää kiintoainetta laskeutuu säiliön pohjalle. Saostuskaivon pinnalta vettä johdetaan sisääntuloputken kautta kosteikon käsittelyalueelle. Käsittelyalue on täytetty hiekalla ja soralla sekä peitetty kasvillisuudella. Vesi siirtyy käsittelyn jälkeen keräysalueelle, josta se poistetaan poistoputken kautta. Kosteikko on eristetty ympäristöstään läpäisemättömällä pohjalla ja sivuilla. (Sijimol & Joseph, 2021) Saostuskaivot voidaan sijoittaa maan alle suojaan roudalta ja haketta voidaan hyödyntää kosteikon lämpöeristämiseen (Kobayashi et al., 2020).

Vedenpuhdistus keinotekoisien kosteikkojen avulla hyödyntää erilaisia fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia prosesseja, kuten suodatusta, laskeutumista, saostumista, nitrifikaatiota ja denitrifikaatiota (Sijimol & Joseph, 2021). Käsittelyprosessin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 2. Kosteikkokäsittelyä edeltävä saostuskaivo poistaa käsiteltävän veden kiintoaineesta 50-65 % ja biologisesta hapenkulutuksesta 25-40 % (TUHH, 2023). Keinotekoisien kosteikon tyypistä riippuen poistotehokkuudet vaihtelevat biologiselle hapenkulutukselle välillä 63-98 %, kiintoaineelle välillä 25-98 %, typelle välillä 44-59 % ja fosforille välillä 24-74 % (Arden & Ma, 2018).



**Kuva 2:** Keinotekoinen kosteikko, muokattu lähteestä (Wang et al., 2017)

Kalvobioreaktoreiden käyttö harmaiden vesien puhdistuksessa perustuu veden suodattamiseen ja biologiseen käsittelyyn (Ghaitidak & Yadav, 2013). Esikäsittelynä prosessille toteutetaan suurikokoisemman kiintoaineen erotus, jotta prosessissa käytettävät kalvot eivät tukkeudu. Suodatettu vesi johdetaan bioreaktoriin, jossa orgaanista ainesta hajotetaan mikrobin toimesta kuten aktiivilieteprosessissa. Seuraavaksi vesi suodatetaan hyödyntäen puolilämpäisevää kalvoa. Suodatuskalvon eri puolten välinen paine-ero aiheuttaa veden virtaamisen suodatuskalvon läpi, kun kiinteä aine ja bakteerit jäävät kalvon toiselle puolelle. (Santamasas et al., 2013) Käsittelyprosessin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3.



**Kuva 3:** Kalvobioreaktorin käsittelyprosessi, muokattu lähteestä (Lenntech, 2023)

Kalvobioreaktorit käsittelevät harmaita vesiä tehokkaasti. Keskimääräinen poistoteho kemialliselle hapenkulutukselle on noin 88 %, biologiselle hapenkulutukselle 96 % ja kiintoaineelle 98 % (Ceconet et al., 2019). Kalvobioreaktorit poistavat myös typpeä ja fosforia hyvin. Kokonaistypen poistotehokkuus vaihtelee välillä 52–63 % ja kokonaisfosforin poistotehokkuus on noin 19 % (Ghaitidak & Yadav, 2013).

## 3. LÄMMÖNTALTEENOTTO HARMAISTA VESISTÄ

Tässä luvussa käsitellään lämmöntalteenottoa harmaista vesistä. Tarkasteltavia lämmöntalteenottoteknologioita ovat lämmönvaihtimet ja lämpöpumppujärjestelmät kiinteistötasolla. Lisäksi tutkitaan harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien aiheuttamaa lämmönsiirtopintojen likaantumista ja sen vaikutusta lämmönsiirron tehokkuuteen. Luvussa käsitellään myös lämmöntalteenoton vaikutusta harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien käsittelyyn edellisessä luvussa esitellyillä tekniikoilla.

### 3.1 Lämmöntalteenotto

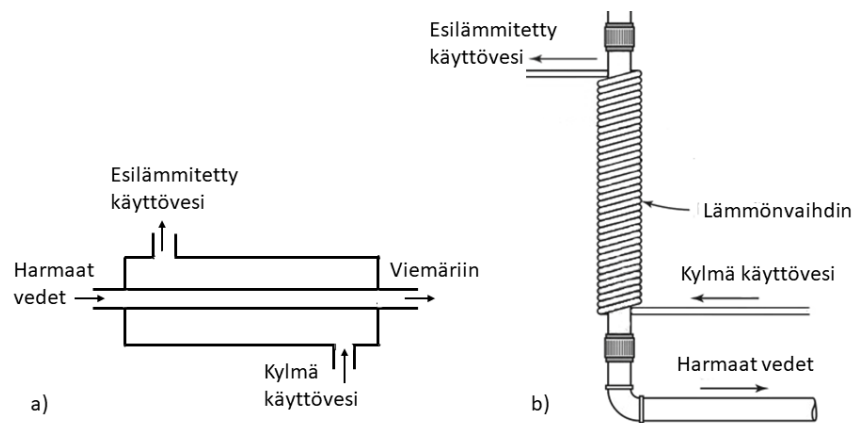
Harmaista vesistä voidaan ottaa lämpöä talteen yksittäisten harmaita vesiä tuottavien kalusteiden, yksittäisten rakennusten tai jätevesiviemäreiden tasoilla. Lämmöntalteenottoa voidaan toteuttaa myös harmaiden vesien käsittelyn yhteydessä. Rakennusten tasolla lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että kiinteistön kaikki harmaat vedet kerätään säiliöön. Säiliön vedestä lämpöä otetaan talteen lämmönvaihtimen tai lämpöpumpun avulla. Vaihtoehtoisesti lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa passiivisesti suoraan viemäristä lämmönvaihtimilla. (Nagpal et al., 2021) Kiinteistökohtaisella lämmöntalteenotolla etuna on veden korkeampi lämpötila ja lyhyet välimatkat. Toisaalta virtaama jätevesiviemäreissä on huomattavasti suurempi kuin yksittäisissä kiinteistöissä ja etenkin lämpöpumpputeknologiat voivat olla kalliita yksittäisille kiinteistöille. (Culha et al., 2015)

#### 3.1.1 Lämmönvaihtimet

Harmaiden vesien passiivisessa lämmöntalteenotossa käytetään vastavirtalämmönvaihtimia. Lämmönvaihtimissa harmaiden vesien sisältämää lämpöä siirtyy kylmään käyttöveteen, mikä esilämmittää käyttövettä ja täten vähentää käyttöveden lämmitykseen tarvittavaa energiaa (Leidl & Lubitz, 2009). Lämmönvaihdinten tehokkuuteen vaikuttavat lämmönvaihtimeen tulevan veden lämpötila ja määrä, kylmän veden lämpötila, lämmönvaihtimen ominaisuudet, lämmönvaihtimen likaantuminen, veden virtaustapa putkistoissa sekä lämpöhäviöt ennen lämmönvaihdinta (Wehbi et al., 2022). Lämmönvaihtimien avulla on mahdollista saavuttaa 2-13 °C:n lasku hyödynnettävien jätevesien lämpötilassa (Golzar & Silveira, 2021).

Lämmöntalteenotossa käytettävät viemäriin sijoitettavat lämmönvaihtimet voivat olla vaakaa- tai pystysuoria (Kuva 4). Vaakasuorien lämmönvaihdinten etuna on se, että ne

vievät pystysuoria vähemmän tilaa. Vaakasuorat lämmönvaihtimet sijoitetaankin usein viemäriin suihkun alle, jolloin hyödynnetään suihkusta peräisin olevien vesien lämpöenergiaa. Koska pystysuorat lämmönvaihtimet vaativat enemmän tilaa, niiden asentaminen on hankalampaa ja asennuskustannukset suuremmat. Pystysuorat lämmönvaihtimet ovat kuitenkin vaakasuoria tehokkaampia, sillä vaakasuorissa lämmin vesi virtaa lämmönvaihtimen pohjaa pitkin, kun taas pystysuorissa kalvona koko putken pinnalla. Tällöin saavutetaan suurempi lämmönsiirtopinta-ala ja tehokkaampi lämmönsiirto. (Piotrowska & Słyś, 2023) Yleisesti pystysuorien lämmönvaihtimien lämmönsiirtotehokkuus on vaihtelee välillä 30-75 % (Hewitt & Henderson, 2001; Piotrowska & Słyś, 2023). Vaakasuorien lämmönvaihtimien lämmönsiirtotehokkuus on keskimäärin huomattavasti matalampi, noin 4-15 % (Piotrowska & Słyś, 2023). Myös noin 50 % lämmönsiirtotehokkuus on kuitenkin mahdollista saavuttaa (McNabola & Shields, 2013).



**Kuva 4:** a) Vaakasuora lämmönvaihdin, perustuu lähteeseen (Wong et al., 2010) b) Pystysuora spiraalilämmönvaihdin, perustuu lähteeseen (Baczek, 2016)

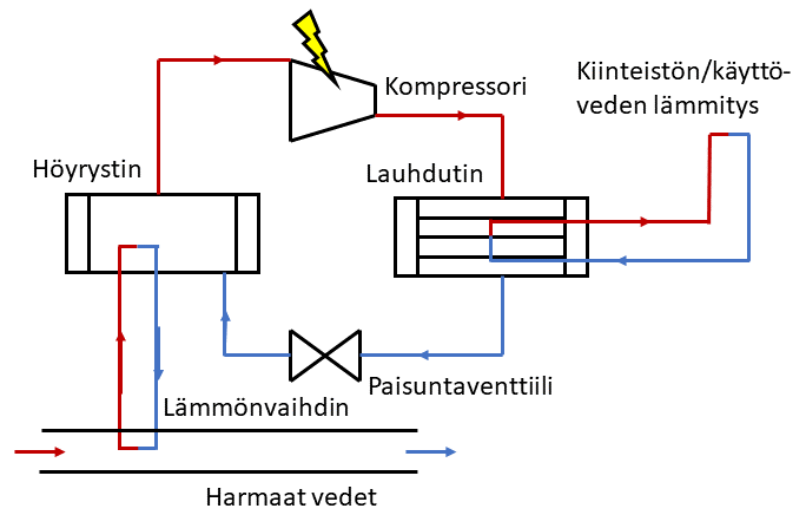
Vaakasuorat lämmönvaihtimet perustuvat kahteen vaakasuoraan putkeen, joista toinen poistaa kiinteistön jätevedet viemärijärjestelmään ja toinen kuljettaa kylmää vettä kiinteistön kuumavesijärjestelmään (Kuva 4a). Putket voivat olla muodoltaan pyöreitä tai kulmikkaita ja ne voidaan sijoittaa vierekkäin tai sisäkkäin. (Piotrowska & Słyś, 2023) Koska vaakasuorien lämmönvaihtimien tehokkuus on huomattavasti pystysuoria pienempi, niitä käytetään kotitalouksissa huomattavasti vähemmän (Wehbi et al., 2022).

Pystysuorat lämmönvaihtimet ovat yleisesti kotitalouksissa käytettyjä. Pystysuoriin lämmönjohtimiin johdetut jätevedet eivät täytä koko putkea, vaan valuvat sen seinämää pitkin muodostaen kalvon. Lämmönvaihdin voidaan toteuttaa niin, että vastavirtaan lämmintä ja kylmää vettä kuljettavat putket ovat sisäkkäin (tube-in-tube). (Piotrowska & Słyś, 2023) Lisäksi on spiraalilämmönvaihtimia, joissa kylmää vettä kuljettava putki kietoutuu

harmaata vettä sisältävän putken ympärille (Kuva 4b). Spiraalilämmönvaihtimissa saavutetaan suurempi lämmönsiirtopinta-ala kuin suorissa putkissa. (Wehbi et al., 2022)

### 3.1.2 Lämpöpumput

Lämpöpumppujärjestelmillä harmaiden vesien sisältämää lämpöenergiaa saadaan tehokkaammin talteen kuin pelkällä lämmönvaihtimella, sillä järjestelmä soveltuu myös kylmemmille vesille ja myös järjestelmästä poistuvan veden loppulämpötila on kylmempi (Culha et al., 2015). Lämpöpumppujärjestelmällä voidaan saavuttaa 5-20 °C lämpötilan lasku hyödynnettävien jätevesien lämpötilassa (Golzar & Silveira, 2021). Lämpöpumppujärjestelmä koostuu kompressorista, paisuntaventtiilistä ja kahdesta lämmönvaihtimesta (lauhdutin ja höyrystin). Prosessissa kiertää kylmäaine, joka höyrystyy harmaiden vesien lämpöenergian ansiosta höyrystimessä. Höyrystynyttä kylmäainetta puristetaan kompressorissa, jolloin sen lämpötila nousee entisestään. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämpöenergiaansa esimerkiksi sisäilmaan tai kiinteistön käyttöveteen. (Culha et al., 2015) Lämpöpumppujärjestelmän toimintaa on havainnollistettu kuvassa 5.



**Kuva 5:** Harmaiden vesien lämpöä hyödyntävä lämpöpumppujärjestelmä, perustuu lähteeseen (Culha et al., 2015)

Lämpöpumppujärjestelmän tehokkuutta voidaan arvioida sen lämpökertoimen (COP, coefficient of performance) avulla. Lämpökertoimella tarkoitetaan siirretyn lämpömäärän suhdetta käytettyyn kompressorityöhön. Jätevesien lämpöä hyödyntävien lämpöpumpusysteemien lämpökerroin lämmityskäytössä vaihtelee välillä 1,77 ja 10,63 (Hepbasli et al., 2014). Esimerkiksi hotellin harmaiden vesien lämpöä hyödyntävän lämpöpumpun lämpökertoimeksi saatiin 4,5 – 5 (Baek et al., 2005). Lämpökerointa suurentaa järjestelmään johdettujen harmaiden vesien korkeampi lämpötila (Velasco et al., 2022). Harmaiden vesien lämpöä hyödyntävän lämpöpumppujärjestelmän lämpökerointa voidaan



kasvattaa myös keräämällä harmaat vedet lämmönvaihtimena toimivaan säiliöön. Kun lämmöntalteenotossa hyödynnettävät harmaat vedet kerättiin oikein mitoitettuun säiliöön, joka toimii lämpövarastona, voitiin saavuttaa 12 % nousu lämpökertoimen arvossa (Postrioti et al., 2016). Optimaalisen lämmöntalteenoton saavuttamista kuitenkin edellytti harmaiden vesien syntyprofiilin määrittäminen sekä ohjausjärjestelmän hyödyntäminen. Ohjausjärjestelmä maksimoi lämpövarastona toimivaan säiliöön kertyneen lämmön hyödyntämisen.

Lämpöpumppujärjestelmän avulla voidaan lämmittää kiinteistön käyttövettä. Erään harmaita vesiä lämmönlähteenään käyttävän vettä lämmittävän lämpöpumppujärjestelmän (Hervás-Blasco et al., 2019) lämpökertoimeksi saatiin 5,5 ja pumpun tehoksi noin 50 kW. Tutkimuksessa vettä lämmitettiin 10 °C:sta 60 °C:n lämpötilaan. Vastaavasti höyrystimeen tulevan harmaan veden lämpötila laski 20 °C:sta 15 °C:n lämpötilaan.

### **3.2 Lämmönvaihtimien likaantuminen**

Sekä passiivisten lämmöntalteenottojärjestelmien että lämpöpumppujen lämmönvaihtimien tehoon vaikuttaa lämmönvaihtimien likaantuminen. Likaantumisella tarkoitetaan aineiden ei-toivottua kerääntymistä lämmönvaihtimen pinnalle. Likaantumisen voi aiheuttaa biologinen materiaali, kemiallisten reaktioiden tuotteet ja kiintoaine. Syntyvä likakerros toimii lämpövastuksena, jolloin lämmönvaihtimen lämmönsiirtokyky heikkenee. Tämän aiheuttaa se, että kertyneen lian lämmönjohtavuus on metallisia putkia pienempi. (Bott, 1995) Lähes kaikki jätevedet sisältävät mikro-organismeja, jotka saattavat kasvaa lämmönvaihtimen pinnoilla (Wehbi et al., 2022). Tällöin syntyy biofilmi, joka häiritsee lämmönsiirtoa.

Lämmönvaihtimien likaantumista voidaan vähentää käyttämällä lämmönvaihtimien materiaalina kuparia, joka on antimikrobista. Lisäksi kuparilla on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. (Pomianowski et al., 2020) Lämmönvaihtimen likaantumista voidaan ennaltaehkäistä myös käyttämällä rasvanerotinta, joka erottelee vedestä kiintoainetta ennen vesien johtamista lämmönvaihtimeen. Lisäksi lämmönvaihdintyyppin valinnalla voidaan vaikuttaa likaantumiseen, sillä vaakasuorat lämmönvaihtimet likaantuvat pystysuoria helpommin. (Nagpal et al., 2021) Lämmönsiirtoa häiritsevän biofilmin muodostumiseen ja sen paksuuteen vaikuttavat lämmönvaihtimeen tulevien vesien määrä ja sisältö (Culha et al., 2015). Koska kotitalouksien jätevedet sisältävät harmaita vesiä enemmän ravinteita ja kiintoainetta, ne todennäköisesti aiheuttavat lämmönvaihtimiin nopeammin ja enemmän likaantumista.

Likaantumisen aiheuttaman lämmönsiirron heikentymisen ehkäisemiseksi lämmönvaihdinjärjestelmät vaativat säännöllistä huoltoa. Osa uusista spiraalilämmönvaihtimista on suunniteltu itsepuhdistuviksi sekä estämään likaantumista, mikä vähentää niiden huoltotarvetta. Esimerkiksi sisäkkäisistä putkista muodostuva lämmönvaihdin taas vaatii enemmän puhdistusta. (Guo & Hendel, 2018) Vedet voidaan myös johtaa lämmönvaihtimeen suodattimen kautta, jolloin vesien sisältämät likaantumista aiheuttavat epäpuhtaudet vähenevät (Hepbasli et al., 2014).

### 3.3 Lämmöntalteenoton vaikutus vesien käsittelyyn

Lämmöntalteenotto laskee käsittelyyn tulevien jätevesien lämpötilaa, joka vaikuttaa jätevedenkäsittelyn prosessien tehokkuuteen. Veden lämpötilalla on vaikutusta etenkin biologisten prosessien, kuten typenpoiston, toimivuuteen. Liika lämmöntalteenotto jätevesistä haittaa täten niiden käsittelyä. Valtioneuvoston asetuksessa yhdyskuntajätevesistä typenpoiston tehokkuus on määritetty sille ajalle, kun vesien lämpötila laitoksen biologisessa prosessissa on vähintään 12 °C (Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006). Syntypaikkaerotellut harmaat vedet soveltuvat kotitalouksien jätevesiä paremmin lämmöntalteenottoon, sillä niiden alhaisemman ravinne- ja kiintoainepitoisuuksien takia puhdistusprosesseilta ei vaadita yhtä suuria tehokkuuksia. Kun käsittely toteutetaan keinotekoisien kosteikon tai kalvobioreaktorin avulla, haluttu veden laatu on mahdollista saavuttaa myös matalammissa lämpötiloissa.

Kotitalouksien jätevesien käsittelyssä jätevedenpuhdistamoilla matalampi lämpötila vaikuttaa eniten aktiivilieteprosessin toimintaan. Veden lämpötilan laskiessa myös mikroorganismien aktiivisuus, ja tätä kautta prosessin typenpoistotehokkuus, laskee. Lämpötilan vaikutusta typenpoiston tehokkuuteen tutkittiin simuloimalla jätevedenpuhdistusprosessia eri jätevesien lämpötiloilla (Ahonen, 2021). Kun puhdistettavien jätevesien lämpötila laski 17 °C:sta 5 °C:een, tippui typenpoiston tehokkuus 85 %:sta 75 %:iin. Typenpoistotehokkuuden laskua voidaan kompensoida pidentämällä prosessin lieteikää sekä lisäämällä ilmastusta, mutta nämä aiheuttavat suuria kustannuksia. (Ahonen, 2021) Kotitalouksien jätevesien lämmöntalteenotossa on siis huomioitava veden riittävä lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila, jotta typenpoiston tehokkuus varmistetaan ja ylimääräinen vesistöjen ravinnekuormitus vältetään. Lisäksi lämpötilan laskun seurauksena laskeutus hidastuu. 13 °C:n lämpötilassa laskeutus kestää 1,38 kertaa kauemmin kuin 20 °C:n lämpötilassa (Tchobanoglous et al., 2003).

Lämpötilalla on vaikutusta biologisten prosessien toimintaan myös keinotekoisissa kosteikoissa. Kun tutkittiin Suomessa sijaitsevien kosteikkojen toimintaa turvetuotannon jätevesien puhdistuksessa (Postila et al., 2015), huomattiin joidenkin parametrien osalta

vuodenaikojen mukaista vaihtelua. Esimerkiksi ammoniumtyypen ja COD:n poistotehokkuus vaihteli vuodenaikojen mukaan. Ammoniumtyyppi poistui tehokkaimmin kesällä ja huonoiten talvella, kun taas COD:n poistotehokkuus oli matalin kesällä ja talvella. Kokonaistypen ja -fosforin sekä fosfaatin ja kiintoaineen poistoon vuodenaajoilla ei ollut vaikutusta. Vedenkäsittelyn talvella mahdollisti se, että pakkaslämpötiloista huolimatta kosteikon alimmat turvekerrokset pysyivät sulana. (Postila et al., 2015) Keinotekkoisten kosteikkojen toimintaa kylmässä ilmastossa on tutkittu Norjassa (Jenssen et al., 2005). Kun vedet johdettiin kosteikkokäsittelyyn fosforia poistavien biosuodattimen kautta, vedestä saatiin poistettua 90 % fosforista ja 40–60 % tpeestä. Vuodenajalla ei ollut juurikaan vaikutusta käsittelyn tehokkuuteen. Kylminä vuodenaikoina käsittelyn tehokkuuden varmistamiseksi vedet on hyvä johtaa kosteikkokäsittelyyn biologista hapenkulutusta vähentävän ja nitrifioivan biosuodattimen kautta. (Jenssen et al., 2005)

Matalampi lämpötila vaikuttaa samoin myös kalvobioreaktoreiden biologisten prosessien toimintaan. Jabornig & Favero (2013) tutkivat kalvobioreaktorin toimintaa harmaiden vesien puhdistuksessa ulkolämpötilojen vaihdellessa välillä  $-10\text{ °C} - 35\text{ °C}$ . Veden viipymän reaktorissa ollessa 24 tuntia ulkolämpötilalla ei ollut kovin suurta vaikutusta prosessin lämpötilaan. Prosessin tehokkuutta tutkittiin matalassa ( $< 10\text{ °C}$ ) sekä korkeammassa ( $10\text{ °C} - 20\text{ °C}$ ) lämpötilassa. Matalan lämpötilan todettiin vähentävän COD:n ja ammoniumtyypen poiston tehokkuutta, kun taas kiintoaine ja fosfaattifosfori poistuvat tehokkaammin matalammissa lämpötiloissa. Huomattavampi matalan lämpötilan aiheuttama vaikutus kalvobioreaktorin toimintaan on veden viskositeetin väheneminen, joka puolestaan vähentää veden virtausta kalvon läpi (Arévalo et al., 2014; Jabornig & Favero, 2013).

## 4. LÄMMÖNTALTEENOTON POTENTIAALI

Tässä luvussa havainnollistetaan harmaiden vesien lämmöntalteenottopotentiaalia verrattuna kotitalouksien jätevesiin käsittelemällä lämmöntalteenottoa kahdessa vaihtoehdoisessa tilanteessa. Käsiteltävät tilanteet ovat kotitalouksien jätevesien sekaviemäröinti ja harmaiden vesien syntypaikkaerottelu.

### 4.1 Aineisto ja menetelmät

Tarkastellaan Tampereen Hiedanrannan tulevan asuinalueen pohjoispuolista aluetta, jonne on suunnitelmassa rakentaa asuntoja kolmeen kortteliin noin 1200 asukkaalle (Hyry, 2022). Oletetaan kunkin alueen asukkaan tuottavan 110 litraa jätevesiä päivittäin (Motiva, 2020b). Vaihtoehdoisessa tilanteessa harmaita vesiä tuotetaan 93,5 litraa vuorokaudessa. Tarkastellaan lämmöntalteenottoa alueella kiinteistökohtaisesti ennen harmaiden vesien tai kotitalouksien jätevesien johtamista käsittelyyn.

Viemäriin johdettujen kotitalouksien jätevesien lämpötilaksi oletetaan 20 °C (Laitinen & Wallin, 2022) kun taas harmaille vesille käytetään tarkastelussa korkeampaa lämpötilaa 30 °C. Lämmönvaihtimeen tulevan kylmän vesivirran lämpötilaksi oletetaan kylmän käyttöveden lämpötila 10 °C. Tässä tarkastelussa ei oteta huomioon vuodenaikojen vaikutusta jätevesien tai kylmän käyttöveden lämpötiloihin. Ulkolämpötilalla on vaikutusta kylmän käyttöveden lämpötilaan sekä viemäriputkistoissa aiheutuviin lämpötilan muutoksiin (Laitinen & Wallin, 2022). Talvella kylmän ulkolämpötilan seurauksena kotitalouksien kylmän käyttöveden lämpötila on alhaisempi ja viemäriputkissa aiheutuu enemmän lämpöpöhiöitä kuin lämpimämpinä vuodenaikoina. Vastaavasti kesällä korkeammat ulkolämpötilat voivat nostaa jäteveden lämpötilaa putkistossa. Vuodenajoista aiheutuva lämpötilavaihtelu vaikuttaa etenkin kotitalouksien jätevesiin ja niiden käsittelyyn (Laitinen & Wallin, 2022).

Hyödynnettävän lämmön määrä riippuu lämmöntalteenottojärjestelmän hyötysuhteesta, joka taas vaihtelee eri teknologioilla. Esimerkiksi eräässä tutkimuksessa (McNabola & Shields, 2013) vaakasuoran lämmönvaihtimen avulla suihkusta peräisin olevien vesien lämmöntalteenoton hyötysuhteeksi saatiin 0,5. Ruotsissa tutkittiin lämmöntalteenottojärjestelmää, jossa asuinrakennuksen jätevesien lämpöä hyödynnetään käyttöveden esilämmityksessä. Lämmönvaihtimella lämmönsiirron hyötysuhteeksi saatiin 0,17 ja lämpöpumppujärjestelmällä 0,32. (Golzar & Silveira, 2021) Luvussa 3.1.1 todettiin lämmön-

vaihtimien hyötysuhteen vaihtelevan välillä 0,04-0,75. Lämmönsiirron hyötysuhteen laskentatapa eroaa kuitenkin eri lähteissä, minkä takia mainitut arvot eivät ole suoraan sovellettavissa käsiteltävään tilanteeseen. Tässä tarkastelussa käytetään hyötysuhteelle arvoa 0,5.

Arvioidaan jätevesistä lämmönvaihtimella potentiaalisesti talteen otettavan lämmön määrää. Jätevesiin sitoutunut lämpöenergia riippuu jätevesien määrästä ja lämpötilasta. Talteen otettavan lämmön määrää voidaan arvioida kaavalla (Nagpal et al., 2021)

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{m} c_p \Delta T, \quad (1)$$

jossa  $\dot{Q}$  kuvaa talteen otettua lämpöä aikayksikköä kohden,  $\varepsilon$  on lämmönvaihtimen hyötysuhde,  $\dot{m}$  veden massavirta,  $c_p$  veden ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  keskimääräinen lämpötilaero kylmän ja lämpimän vesivirtauksen välillä. Käytetään sekä kotitalouksien jätevesille että harmaille vesille veden ominaislämpökapasiteettia  $4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ . Jätevesien lämmöntalteenoton jälkeinen lämpötila saadaan kaavalla (Wärff et al., 2020)

$$T_{out} = T_{in} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} c_p}, \quad (2)$$

jossa  $T_{out}$  on jätevesien lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen ja  $T_{in}$  jätevesien lämpötila ennen lämmöntalteenottoa.

## 4.2 Tulokset ja tulosten tulkinta

Kaavan (1) ja lähtötietojen avulla saadaan kotitalouksien jätevesien lämmöntalteenotto-potentiaaliksi 31,9 kW ja vastaavasti harmaille vesille 54,1 kW, kun lämmöntalteenottojärjestelmän hyötysuhteelle käytetään arvoa 0,5. Kaavasta (2) saadaan lämmöntalteenoton jälkeiseksi lämpötilaksi kotitalouksien jätevesille 15 °C ja harmaille vesille 20 °C. Jätevedenpuhdistamolla tapahtuvan typenpoiston tehokkuuden varmistamiseksi kotitalouksien jätevesien lämpötila ei saa laskea liikaa. Käytetään kotitalouksien jätevesille lämmöntalteenotosta aiheutuvaa suurinta lämpötilanalenemaa 4 °C (Laitinen & Wallin, 2022; Wärff et al., 2020), jolloin jätevesien lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen on 16 °C. Tämä lämpötila saavutetaan, kun lämmöntalteenoton hyötysuhde on 0,4, jolloin kotitalouksien jätevesistä talteen otettavan lämmön määrä on 25,5 kW. Tällöin käyttämällä lämmönvaihdinta käsiteltävässä kohteessa on mahdollista ottaa talteen vuosittain 223,7 MWh lämpöenergiaa kotitalouksien jätevesistä tai 474,1 MWh lämpöenergiaa harmaista vesistä.

Hiedanrannan alueen energiasuunnittelussa tyyppikorttelin vuotuiseksi lämmönkulutukseksi on arvioitu 1202 MWh (Kuivala et al., 2020). Tarkasteltavan alueen vuotuiseksi

lämmönkulutukseksi voidaan siis olettaa 3606 MWh. Tämän perusteella kotitalouksien jätevesistä talteen otetulla lämmöllä voitaisiin kattaa noin 6 % käsiteltävän alueen vuosittaisesta lämmönkulutuksesta. Vastaavasti harmaista vesistä talteen otetulla lämmöllä voitaisiin kattaa noin 13 % alueen vuosittaisesta lämmönkulutuksesta. Lämmönvaihtimella talteen otettavaa lämpöä voidaan hyödyntää kiinteistöjen käyttöveden esilämmityksessä. Mikäli lämmöntalteenotossa käytettäisiin lämpöpumpputeknologiaa, harmaiden vesien lämpöenergiaa voitaisiin hyödyntää tehokkaammin sekä esimerkiksi rakennusten lämmitykseen. Harmaiden vesien lämpötilaksi lämmöntalteenoton jälkeen saatiin 20 °C, joten niissä on vielä lämpöenergiaa hyödynnettäväksi. Niewitecka (2018) on käsitellyt lämmöntalteenottojärjestelmää, jossa lämmönvaihtimen jälkeen harmaiden vesien lämpöenergiaa hyödynnettiin vielä lämpöpumpun avulla. Lämmöntalteenoton jälkeen harmaiden vesien lämpötila oli 5 °C ja kylmän käyttöveden lämpötilaa nostettiin järjestelmällä 5 °C:sta 29,1 °C:een.

Kiinteistökohtaista harmaiden vesien lämmöntalteenoton mahdollisuutta on tutkittu Tukholmassa (Nilsson et al., 2022). Mikäli lämmöntalteenottoa toteutettaisiin suurimmassa osassa tutkittavan alueen rakennuksia, noin 15 % alueen rakennusten lämmitystarpeesta voitaisiin kattaa. Belgiassa tehdyn tutkimuksen perusteella taas talteenoton avulla viemäriverkoston lämpöenergialla voitaisiin kattaa 7–18 % tutkittavan alueen vuotuisesta lämmitystarpeesta, vuodenajasta riippuen (Abdel-Aal et al., 2018). Tutkimuksessa oletettiin täydellinen lämmönsiirto ja huomioitiin jätevedenkäsittelyyn saapuvan veden minimilämpötila 9 °C. Kiinteistökohtaista kotitalouksien jätevesien lämmöntalteenottopotentiaalia lämmönvaihtimilla on tutkittu myös Ruotsin Linköpingissä (Wärff et al., 2020). Jätevesien lämpötila laski lämmöntalteenoton seurauksena korkeintaan 4,2 °C ja talteen otetun lämmön määrä oli 11,3–18,0 % kiinteistöjen lämpimän veden tarpeesta.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli arvioida syntypaikkaeroteltujen harmaiden vesien soveltuvuutta lämmöntalteenottoon verrattuna kotitalouksien jätevesiin. Lisäksi tutkittiin harmaille vesille soveltuvia lämmöntalteenottoteknologioita, harmaiden vesien käsittelytekniikoita sekä lämmöntalteenoton vaikutusta vesien käsittelyyn.

Harmaat vedet soveltuvat kotitalouksien jätevesiä paremmin lämmöntalteenottoon niiden pienemmän kiintoaine- ja ravinnepitoisuuden seurauksena. Lämmöntalteenotto pienentää käsittelyyn tulevien jätevesien lämpötilaa. Jätevesien lämpötilalla on vaikutusta jätevedenkäsittelyssä hyödynnettäviin biologisiin prosesseihin, kuten typenpoistoon. Käsittelyprosessien tehon varmistamiseksi käsiteltävien vesien lämpötila ei saa olla liian matala, mikä rajoittaa lämmöntalteenoton potentiaalia etenkin kotitalouksien jätevesistä. Harmaiden vesien vähäisemmän ravinne- ja kiintoainepitoisuuden seurauksena niiden käsittelyprosesseilta ei vaadita yhtä suurta tehoa, jolloin haluttu veden laatu voidaan saavuttaa matalimmissakin lämpötiloissa. Harmaita vesiä voidaan käsitellä esimerkiksi kei-notekoisten kosteikkojen ja kalvobioreaktoreiden avulla. Molemmat käsittelyt hyödyntävät biologisia prosesseja, joiden toimintaan lämpötilalla on vaikutusta. Harmaiden vesien käsittely voidaan potentiaalisesti toteuttaa riittävän tehokkaasti matalissakin lämpötiloissa, mutta kei-notekoisten kosteikkojen ja kalvobioreaktoreiden käyttö harmaiden vesien puhdistuksessa Suomen ilmastossa vaatii lisää tutkimusta. Kotitalouksien jätevesien lämpötila käsittelyssä on yleensä yli 12 °C. Harmaiden vesien vaadittava lämpötila käsittelyssä halutun laadun saavuttamiseksi on mahdollisesti pienempi, mutta ei tiedossa.

Tarkasteltavia lämmöntalteenottoteknologioita olivat lämmönvaihtimet ja lämpöpumppujärjestelmät. Kiinteistökohtainen lämmöntalteenotto harmaista vesistä lämmönvaihtimia hyödyntäen voisi Tampereen Hiedanrannan tulevan asuinalueen pohjoisosassa potentiaalisesti kattaa noin 13 % kiinteistöjen vuosittaisesta lämmitystarpeesta. Vastaavasti kotitalouksien jätevesiä hyödyntämällä noin 6 % vuosittaisesta lämmitystarpeesta voitaisiin kattaa. Hyödyntämällä lämpöpumppujärjestelmää olisi mahdollista saada enemmän lämpöä talteen. Muissa harmaiden vesien ja kotitalouksien jätevesien lämmöntalteenottoa käsittelevissä tutkimuksissa on päädytty saman suuruusluokan tuloksiin. Tarkastelu on kuitenkin lähinnä suuntaa antava, sillä esimerkiksi vuodenaikojen vaikutus jätevesien ja kylmän käyttöveden lämpötilaan jätettiin huomiotta. Myöskään jätevesien aiheuttamaa lämmönvaihdinten likaantumista ja sen vaikutusta lämmönsiirtoon ei huomioitu. Harmaiden vesien aiheuttama lämmönsiirtopintojen likaantuminen vaatii lisää tutkimusta, mutta

oletettavasti harmaat vedet aiheuttavat vähemmän likaantumista kuin kotitalouksien jätevedet niiden matalamman kiintoaine- ja ravinnepitoisuuden seurauksena.

Harmaiden vesien syntypaikkaerottelu on Suomessa harvinaista. Jätevesien sisältämien ravinteiden paremman hyödyntämisen lisäksi se kuitenkin mahdollistaisi jätevesien sisältämän lämpöenergian tehokkaamman talteenoton, joka parantaisi asumisen energia-  
tehokkuutta.



# LÄHTEET

- Abdel-Aal, M., Schellart, A., Kroll, S., Mohamed, M., Tait, S., 2018. Modelling the potential for multi-location in-sewer heat recovery at a city scale under different seasonal scenarios. *Water Res.* 145, s. 618–630. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.073>
- Ahonen, M., 2021. Effects of wastewater heat recovery on nitrogen removal in Finnish wastewater treatment plants. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennetun ympäristön laitos. Espoo. 68 s.
- Arden, S., Ma, X., 2018. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. *Sci. Total Environ.* 630, s. 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>
- Arévalo, J., Ruiz, L.M., Pérez, J., Gómez, M.A., 2014. Effect of temperature on membrane bioreactor performance working with high hydraulic and sludge retention time. *Biochem. Eng. J.* 88, s. 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.03.006>
- Baczek, S., 2016. Wastewater Heat Recovery Systems. JLC Online. URL [https://www.jlconline.com/how-to/plumbing/wastewater-heat-recovery-systems\\_o](https://www.jlconline.com/how-to/plumbing/wastewater-heat-recovery-systems_o) (viitattu 18.3.23).
- Baek, N.C., Shin, U.C., Yoon, J.H., 2005. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source. *Sol. Energy* 78, s. 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.07.009>
- Berninger, K., Pihl, T., Kasanen, P., Mikola, A., Tynkkynen, O., Vahala, R., 2017. Jätevesien fosfori hyötykäyttöön – teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017. Valtioneuvoston kanslia. 70 s.
- Bott, T.R., 1995. Chapter 1 - Introduction, Fouling of heat exchangers, *Chemical Engineering Monographs*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, s. 1–6. <https://doi.org/10.1016/B978-044482186-7/50003-8>
- Cecconet, D., Callegari, A., Hlavínek, P., Capodaglio, A.G., 2019. Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review. *Clean Technol. Environ. Policy* 21, s. 745–762. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01679-z>
- Culha, O., Gunerhan, H., Biyik, E., Ekren, O., Hepbasli, A., 2015. Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review. *Energy Build.* 104, s. 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.013>
- Davis, M.L., 2020. *Water and wastewater engineering: design principles and practice*. Second Edition. McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto. 1467 s. ISBN 978-1-260-13227-4
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin, A., 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water* 4, s. 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Ghaitidak, D.M., Yadav, K.D., 2013. Characteristics and treatment of greywater: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20, s. 2795–2809. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1533-0>
- Golzar, F., Silveira, S., 2021. Impact of wastewater heat recovery in buildings on the performance of centralized energy recovery – A case study of Stockholm. *Appl. Energy* 297, s. 117–141. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117141>
- Guo, X., Hendel, M., 2018. Urban water networks as an alternative source for district heating and emergency heat-wave cooling. *Energy* 145, s. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.108>
- Hadengue, B., Morgenroth, E., Larsen, T.A., Baldini, L., 2022. Performance and dynamics of active greywater heat recovery in buildings. *Appl. Energy* 305. 117677. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117677>
- Henze, M., Ledin, A., 2001. Types, characteristics and quantities of classic, combined domestic wastewaters. IWA Publishing. Chapter 4. s. 59–72.
- Hepbasli, A., Biyik, E., Ekren, O., Gunerhan, H., Araz, M., 2014. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. *Energy Convers. Manag.* 88, s. 700–722. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.065>
- Hernández Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G., Buisman, C.J.N., 2011. Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination* 270, s. 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.029>

- Hervás-Blasco, E., Navarro-Peris, E., Barceló-Ruescas, F., Corberán, J.M., 2019. Improved water to water heat pump design for low-temperature waste heat recovery based on sub-cooling control. *Int. J. Refrig.* 106, s. 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.030>
- Hewitt, N.J., Henderson, P., 2001. Drainwater heat recovery system - an energy conservation project. University of Ulster. Coleraine, Pohjois-Irlanti, Yhdistynyt kuningaskunta.
- Hyry, A.-L., 2022. Hiedanrannan uuden kaupunginosan ensimmäinen asuinalueen asemakaava tuomassa kodin 1200 asukkaalle [Tampereen kaupunki - Ajankohtaista]. URL <https://www.tampere.fi/ajankohtaista/2022/05/19/hiedanrannan-uuden-kaupunginosan-ensimmainen-asuinalueen-asemakaava> (viitattu 12.3.23).
- Jabornig, S., Favero, E., 2013. Single household greywater treatment with a moving bed biofilm membrane reactor (MBBMR). *J. Membr. Sci.* 446, s. 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.049>
- Jenssen, P.D., Mæhlum, T., Krogstad, T., Vråle, L., 2005. High performance constructed wetlands for cold climates. *J. Environ. Sci. Health Part A* 40, s. 1343–1353. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055846>
- Khajvand, M., Mostafazadeh, A.K., Drogui, P., Tyagi, R.D., Brien, E., 2022. Greywater characteristics, impacts, treatment, and reclamation using adsorption processes towards the circular economy. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, s. 10966–11003. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16480-z>
- Kobayashi, Y., Ashbolt, N.J., Davies, E.G.R., Liu, Y., 2020. Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions. *Environ. Int.* 134, 105215. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105215>
- Kordana-Obuch, S., Starzec, M., Wojtoń, M., Słyś, D., 2023. Greywater as a future sustainable energy and water source: bibliometric mapping of current knowledge and strategies. *Energies* 16, 934 s. <https://doi.org/10.3390/en16020934>
- Kuivala, J.-P., Fagerström, O., Sihvonen, S., 2020. Hiedanrannan alueen energiasuunnittelu. Loppuraportti. Granlund Consulting Oy.
- Laitinen, A., Wallin, A., 2022. Jäteveden lämmöntalteenoton energiatase kaupungissa. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Espoo. 82 s. VTT-R-00582-22
- Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R., Toivikko, S., 2014. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT). Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Suomen Ympäristö 3/2014. Ympäristöministeriö. Helsinki. 81 s. ISBN 978-952-11-4286-4
- Lehtoranta, S., Malila, R., Särkilahti, M., Viskari, E.-L., 2022. To separate or not? A comparison of wastewater management systems for the new city district of Hiedanranta, Finland. *Environ. Res.* 208, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112764>
- Leidl, C.M., Lubitz, D.W., 2009. Comparing domestic water heating technologies. *Technol. Soc.* 31, s. 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2009.06.005>
- Lenntech, 2023. Grey water recycling and MBR URL <https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/grey-water.htm> (viitattu 18.2.23).
- Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R., 2009. Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Sci. Total Environ.* 407, s. 3439–3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Malila, R., Lehtoranta, S., Viskari, E.-L., 2019. The role of source separation in nutrient recovery – Comparison of alternative wastewater treatment systems. *J. Clean. Prod.* 219, s. 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.024>
- McNabola, A., Shields, K., 2013. Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower drains. *Energy Build.* 59, s. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.026>
- Motiva, 2020a. Kotitaloudet. Motiva. URL [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/energian\\_loppukaytto/kotitaloudet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/energian_loppukaytto/kotitaloudet) (viitattu 9.3.23).
- Motiva, 2020b. Vedenkulutus. Motiva. URL [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/hyva\\_arki\\_kotona/vedenkulutus](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/hyva_arki_kotona/vedenkulutus) (viitattu 6.2.23).
- Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M.K., McNabola, A., 2021. Heat recovery from wastewater—a review of available resource. *Water* 13, 1274. <https://doi.org/10.3390/w13091274>
- Niewitecka, K., 2018. Possibilities of heat energy recovery from greywater systems. *E3S Web Conf.* 30, 03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183003003>
- Nilsson, D., Karpouzoglou, T., Wallin, J., Blomkvist, P., Golzar, F., Martin, V., 2022. Is on-property heat and greywater recovery a sustainable option? A quantitative and qualitative assessment up to 2050. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4264186>

- Piotrowska, B., Słyś, D., 2023. Comprehensive analysis of the state of technology in the field of waste heat recovery from grey water. *Energies* 16, 137 s. <https://doi.org/10.3390/en16010137>
- Pomianowski, M.Z., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A., Zhang, C., 2020. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 128, 109900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
- Postila, H., Ronkanen, A.-K., Kløve, B., 2015. Wintertime purification efficiency of constructed wetlands treating runoff from peat extraction in a cold climate. *Ecol. Eng.* 85, s. 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.066>
- Postrioti, L., Baldinelli, G., Bianchi, F., Buitoni, G., Maria, F.D., Asdrubali, F., 2016. An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings. *Appl. Therm. Eng.* 102, s. 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016>
- Santamasas, C., Rovira, M., Clarens, F., Valderrama, C., 2013. Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resour. Conserv. Recycl.* 72, s. 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.004>
- Sijimol, M.R., Joseph, S., 2021. Constructed wetland systems for greywater treatment and reuse: a review. *Int. J. Energy Water Resour.* 5, s. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00129-1>
- Srirangarayan, R., Ramesh, P.T., Ramasamy, M., Subramanian, A., Karthikeyan, S., 2020. Characterization and treatment of grey water: A review. *Int. J. Chem. Stud.* 8, s. 34–40. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1a.8316>
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 2003. *Wastewater engineering: treatment and reuse*, Fourth Edition. McGraw-Hill Education, New York. 1846 s. ISBN 7-302-05857-1
- Tieteen termipankki, 2023. Nimitys:ksenobiotti. URL <https://tieteen termipankki.fi/wiki/Nimitys:ksenobiotti> (viitattu 4.2.23).
- Tilastokeskus, 2021. Energian loppukulutus sektoreittain. URL [https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ehk/statfin\\_\\_ehk\\_pxt\\_12vk.px/table/table-ViewLayout1/](https://statfin.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin__ehk_pxt_12vk.px/table/table-ViewLayout1/) (viitattu 9.3.23).
- Technische Universität Hamburg (TUHH), 2023. Sedimentation. URL [https://cgi.tu-hamburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/lessons/lesson\\_c1/lm\\_pg\\_1460.html](https://cgi.tu-hamburg.de/~awwwweb/wbt/emwater/lessons/lesson_c1/lm_pg_1460.html) (viitattu 17.2.23).
- Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006. Annettu Helsingissä 12.10.2006.
- Velasco, F.J.S., Haddouche, M.R., Illán-Gómez, F., García-Cascales, J.R., 2022. Experimental characterization of the coupling and heating performance of a CO<sub>2</sub> water-to-water heat pump and a water storage tank for domestic hot water production system. *Energy Build.* 265, 112085. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112085>
- Viskari, E.-L., Vilpas, R., Lehtoranta, S., Pakula, S., Tuukkanen, K., 2017. BIOUREA Erilliskerätyn virtsan lannoitepotentiaali, kokeelliset tutkimukset ja elinkaaritarkastelu. Loppuraportti. Tampereen ammattikorkeakoulu, Käymäläseura Huussi ry, Suomen ympäristökeskus. Helsinki & Tampere. 64 s. ISBN 978-952-68658-2-9
- Wang, M., Zhang, D.Q., Dong, J.W., Tan, S.K., 2017. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. *J. Environ. Sci.* 57, s. 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>
- Wärff, C., Arnell, M., Sehlen, R., Jeppsson, U., 2020. Modelling heat recovery potential from household wastewater. *Water Sci. Technol.* 81. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.103>
- Wehbi, Z., Taher, R., Faraj, J., Ramadan, M., Castelain, C., Khaled, M., 2022. A short review of recent studies on wastewater heat recovery systems: Types and applications. *Energy Rep., Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability* 8, s. 896–907. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.104>
- Wong, L.T., Mui, K.W., Guan, Y., 2010. Shower water heat recovery in high-rise residential buildings of Hong Kong. *Appl. Energy* 87, s. 703–709. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.008>
- Yle.fi, 2011. EU kielsi fosfaatit pesuaineissa. Yle Uutiset. URL <https://yle.fi/a/3-5467842> (viitattu 17.2.23).