



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**JOONAS HEIMOLA**  
**YHDYSKUNTAJÄTEVEDEN AKTIIVILIETEPROSESSIIN**  
**PERUSTUVIEN PUHDISTAMOIDEN ENERGIAEHOOKKUUS JA**  
**SEN KEHITTÄMINEN**

Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laitos

Tarkastajat: Seppo Syrjälä ja Jukka Rintala

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**HEIMOLA, JOONAS:** Yhdyskuntajäteveden aktiivilieteprosessiin perustuvien puhdistamoiden energiatehokkuus ja sen parantaminen

Kandidaatintyö, 15 sivua

Toukokuu 2018

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastajat: Seppo Syrjälä ja Jukka Rintala

Avainsanat: jätevedenkäsittely, veden pumppaus, ilmastus, energiatehokkuus

Jätevedenkäsittely on tärkeää ympäristön hyvinvoinnin kannalta, mutta kuluttaa myös paljon energiaa. Aktiivilieteprosessiin perustuvissa jätevedenpuhdistamoissa voidaan tehdä huomattavia säästöjä energiankulutuksessa. Energiaa kuluu eniten jäteveden ilmastukseen ja pumppaukseen.

Tässä työssä tutkittiin jäteveden pumppauksen ja ilmastuksen eri toteutuksien energiatehokkuuksia sekä jäteveden energian talteenoton mahdollisuuksia. Työssä käsitellään pumppauksen ja ilmastuksen energiatehokkuuksiin vaikuttavia tekijöitä sekä pumppauksen ja ilmastuksen energiatehokkaita toteutuksia. Jäteveden energian talteenotossa käsitellään merkittävimpiä energian talteenoton mahdollisuuksia, hydraulista energiaa ja lämpöenergiaa. Työssä esitettyjen asioiden avulla voidaan parantaa jätevedenpuhdistamoiden energiatehokkuutta.

# SISÄLLYS

1. Johdanto .....	1
2. Jäteveden pumppaus.....	3
2.1. Hydromekaniikka.....	3
2.2. Pumpun ominaiskäyrä ja toimintapiste .....	5
2.3. Jätevedenkäsittelyn yleisimmät pumppaussysteemit.....	6
3. Jäteveden ilmastus.....	8
3.1. Ilmastuksessa vaikuttavat tekijät.....	8
3.2. Eri ilmastussysteemit .....	9
4. Energian talteenotto jätevedestä.....	12
4.1. Jäteveden hydraulinen energia .....	12
4.2. Jäteveden lämpöenergia .....	13
5. Yhteenveto ja johtopäätökset .....	15
Lähteet.....	16

# 1. JOHDANTO

Jätevedenkäsittely käsittää kotitalouksissa ja teollisuudessa syntyneen jäteveden sekä esimerkiksi sateista syntyneen huleveden käsittelyn. Jätevettä käsitellään, jotta siitä ei aiheutuisi haittoja ympäristölle. Jätevedenkäsittely on siis tärkeä osa ympäristön hyvinvointia ja vedenlaadun ylläpitoa. Jätevedenkäsittely onkin useissa maissa laissa säädetty pakolliseksi. Jätevedenpuhdistamoissa suunnittelussa on keskitytty usein siihen, että vedestä tulisi mahdollisimman puhdasta, eikä huoltamoiden päästöjä tai energiakustannuksia ole juurikaan otettu huomioon [1]. Jätevedenpuhdistamoiden energiankulutuksen määrät ovat merkittäviä, esimerkiksi Yhdysvalloissa veden- ja jätevedenkäsittelylaitokset kuluttavat sähköä 3–4 % maan sähkönkulutuksesta. Laitosten energiankulutus on muissa kehittyneissä maissa vastaavalla tasolla. [2]

Uusien ilmasto- ja energiastrategioiden myötä on alettu kiinnittämään huomiota myös jätevedenkäsittelyn energiankulutukseen. Koska jätevedenpuhdistamoiden suunnittelussa ei aiemmin juurikaan ole kiinnitetty huomiota energiakustannuksiin, voidaan huoltamoissa saavuttaa huomattavia säästöjä. Jätevedenkäsittelyn energiatehokkuuksista on viime vuosina tehty paljon tutkimusta. Jätevedenkäsittelyssä energiankulutus muodostuu pääasiassa kolmesta eri prosessista: jäteveden siirtämisestä pumppujen avulla, ilman syöttämisestä jäteveteen eli ilmastuksesta ja lietteen käsittelystä. Normaalisti ilmastus kuluttaa 55–70 % koko energiankulutuksesta ja jätevedenpumppaus jätevedenhuoltamon sisällä kuluttaa 15,6 % [1]. Lisäksi energiaa kuluu puhdistamon perustarpeisiin, kuten valaistukseen ja lämmitykseen. Tässä työssä perehdytään jäteveden siirron ja ilmastuksen energiatehokkaisiin toteutuksiin sekä jäteveden energian talteenoton mahdollisuuksiin. Jäteveden siirrosta rajataan viemäroinnin toteutus pois, koska se on hyvin laaja alue, joka on helppo mieltää omaksi erilliseksi kokonaisuudekseen.

Työn tavoite on selvittää, miten voidaan saavuttaa energiansäästöjä jätevedenkäsittelyssä. Tavoitteeseen pyritään tutkimalla veden pumppauksen ja ilmastuksen energiatehokkuuksiin vaikuttavia tekijöitä sekä energian talteenoton mahdollisuuksia hydraulisen energian ja lämpöenergian muodoissa. Prosessien toteutuksissa otetaan huomioon jäteveden virtausmäärän ja lämpötilan vaihtelu.

Aluksi käsitellään jäteveden pumppaamista jätevedenpuhdistamoon. Jäteveden pumppauksessa tarkastellaan ensin hydromekaniikkaa ja vedensiirtoon vaikuttavia tekijöitä. Näiden jälkeen tarkastellaan eri vesihuollossa yleensä käytettyjä pumppuja. Jäteveden pumppauksen käsittelyn jälkeen tarkastellaan jäteveden ilmastusta, jossa

perehdytään ensin ilmastuksessa vaikuttaviin tekijöihin. Sen jälkeen tarkastellaan eri ilmastussysteemejä ja niiden energiatehokkuuksia. Seuraavaksi perehdytään jäteveden hydraulisen energian ja lämpöenergian talteenottoihin ja kannattavuuksiin. Lopuksi kerätään havainnoista yhteenveto ja tehdään johtopäätökset jätevedenkäsittelyn energiasäästöjen saavuttamiseksi.

## 2. JÄTEVEDEN PUMPPAUS

Jätevesi voi siirtyä luonnollisesti virtaamalla korkeammalta tasolta alemmalle, mutta jätevedenpuhdistamon sijoittaminen siten, että vesi virtaisi sen läpi pelkästään painovoiman avulla, on usein erittäin hankalaa. Jätevesi on siis useimmiten nostettava korkeammalle tasolle pumpaamalla, minkä jälkeen se voi virrata luonnollisesti alaspäin puhdistusprosessista toiseen. Nesteiden virtausta tutkii hydromekaniikka, joka on oleellinen osa vedenhuollon suunnittelua.

### 2.1. Hydromekaniikka

Veden käyttäytymiseen vaikuttaa eniten kolme tärkeää fysikaalista ominaisuutta. Veden kokoonpuristuvuus on erittäin pieni, joten käytännössä sen oletetaan usein olevan kokoonpuristumatonta. Veden sisäinen kitka eli viskositeetti aiheuttaa virtaushäviöitä veden virratessa putkessa tai kanavassa. Veden pintajännitys näkyy selvästi havaittavassa rajassa vesimassan ja ilman välillä eli vedenpinnassa. Lämpötila vaikuttaa veden sisäiseen kitkaan ja siten sen virtaushäviöön, mutta tavallisesti lämpötila oletetaan vakioksi. [3]

Putkivirtauksessa vedellä on kineettistä energiaa, potentiaalienergiaa ja paine-energiaa. Kokonaisenergia pysyy kahden eri tarkastelupisteen välillä samana, jos virtaushäviöitä ei ole ja massavirta pysyy vakiona. Tällöin kahden pisteen välille saadaan Bernoullin yhtälö

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{p_2}{\rho g}, \quad (1)$$

jossa  $v$  on veden keskinopeus,  $g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys,  $h$  on vedenkorkeus,  $p$  on veden paine ja  $\rho$  on veden tiheys. Kun putkessa tapahtuva virtaushäviö otetaan myös huomioon, saadaan

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + h_f, \quad (2)$$

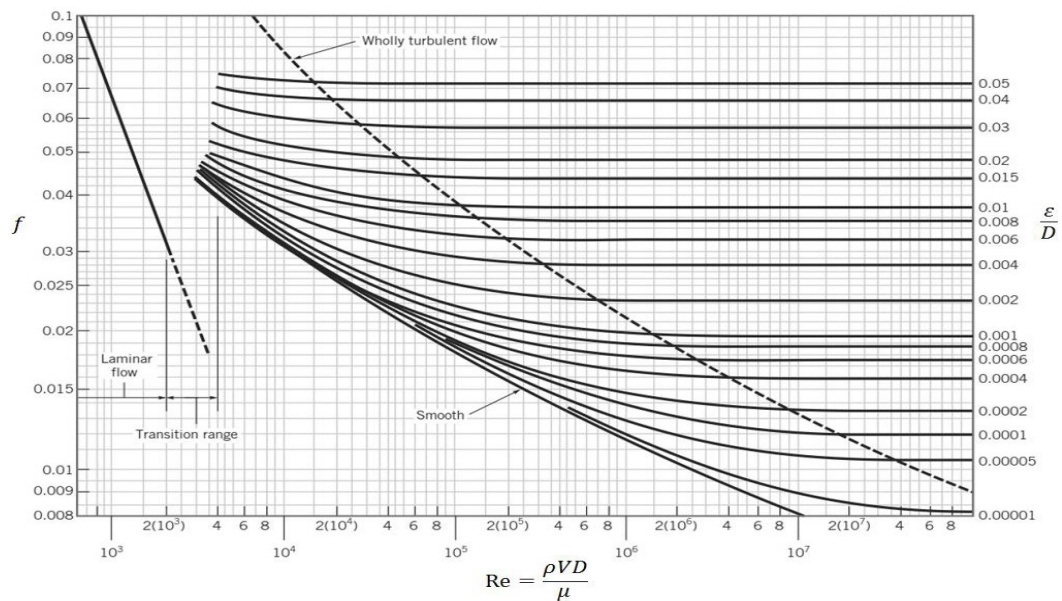
jossa  $h_f$  on virtaushäviö tarkastelupisteiden välillä. Virtaushäviö voidaan laskea Darcy–Weisbachin yhtälöllä

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (3)$$

jossa  $L$  on putken pituus,  $d$  on putken halkaisija ja  $f$  on kitkakerroin. Kitkakerroin on riippuvainen nopeudesta, ja sen laskennassa on käytettävä eri kaavoja eri nopeuksilla. Laminaarisessa virtauksessa kaava on yksinkertaisesti

$$f = \frac{64}{Re}, \quad (4)$$

jossa  $Re$  on Reynoldsin luku. Kuvassa 1 on esitetty Moodyn käyrästä, jonka avulla voidaan selvittää kitkakerroin virtauksen ollessa turbulენტista hydraulisesti sileällä, hydraulisesti karkealla tai niiden välisellä siirtymäalueella.



**Kuva 1.** Moodyn käyrästä [4].

Virtaushäviön laskentakaavan mukaan virtaushäviö suurenee putken pituuden ja veden keskinopeuden, tai virtausmäärän, lisääntyessä ja vähenee putken halkaisijan kasvaessa. Putken karheus lisää virtaushäviötä, jos virtaus on turbulენტista. Lisäksi muutokset putken muodoissa tai dimensioissa, kuten mutkat ja putken supistuminen, aiheuttavat paikallishäviöitä, joten putkiston suunnittelussa kannattaa välttää tarpeettomien osien lisäämistä. [3]

Bernoullin yhtälön mukaan virtaushäviöiden takia veden siirtäminen alemmalta tasolta korkeammalle vaatisi suuren nopeuden tai paine-eron. Pumppujen avulla voidaan lisätä veden nopeus- ja paine-energiaa. Kun otetaan huomioon pumpun lisäämä energia, saadaan Bernoullin yhtälö muotoon

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + h_p = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_f, \quad (5)$$

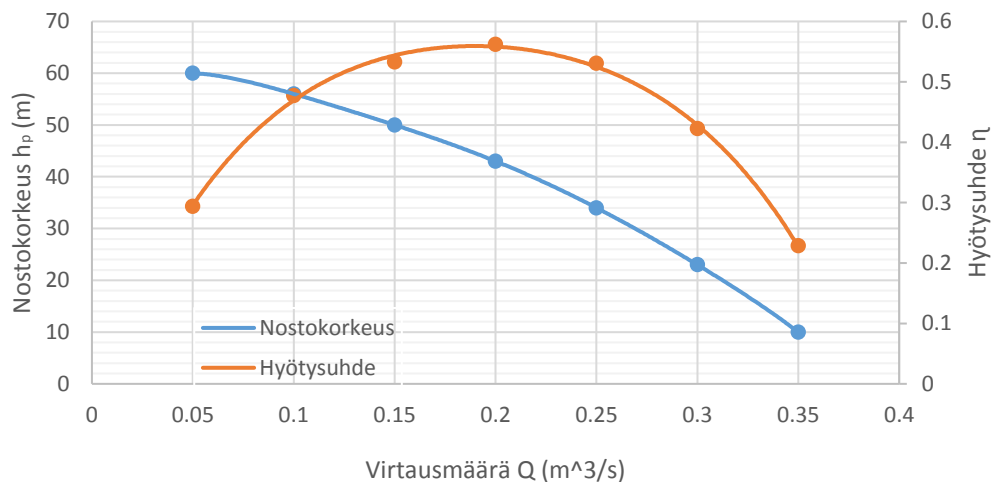
jossa  $h_p$  on veden pumppauksen lisäämä energia, nostokorkeus.

## 2.2. Pumpun ominaiskäyrä ja toimintapiste

Pumppauksen tehtävä on siis antaa jätevedelle energiaa virtaushäviöiden voittamiseksi. Virtaushäviöiden suuruuteen vaikuttaa muun muassa virtausmäärä  $Q$ . Pumpun veteen lisäämä energia virtaushäviöiden voittamiseksi voidaan esittää kaavalla

$$P = \gamma Q h_p, \quad (6)$$

eli lisättävän energian määrä on myös riippuvainen virtausmäärästä [5]. Pumppujen valmistajat usein antavat pumpuille niin sanotut pumpun ominaiskäyrät, joista voidaan nähdä pumpun nostokorkeus, tehontarve ja hyötysuhde eri virtausmäärillä. Kuvassa 2 on esimerkki pumpun ominaiskäyrästä, josta voidaan lukea pumpun nostokorkeus ja hyötysuhde eri virtausmäärillä. Kyseisen pumpun paras hyötysuhde saavutetaan, kun virtausmäärä on noin  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Kuva 2.** Esimerkki pumpun ominaiskäyrästä.

Koska virtaushäviöt ovat myös riippuvaisia virtausmäärästä, voidaan samaan kuvaajaan piirtää niin sanottu systeemikäyrä, jossa nostokorkeus on virtausmäärän funktio. Bernoullin yhtälöstä kahden tarkastelupisteen välille saadaan vaaditulle nostokorkeudelle kaava

$$h_p = \Delta h + \frac{Q^2}{2gA^2} \left( \frac{fL}{D} + \sum K \right), \quad (7)$$

jossa  $\Delta h$  on tarkastelupisteiden välinen korkeusero ja  $\sum K$  kertavastusten summa. Virtaushäviöiden voittamiseksi vaaditun nostokorkeuden ja pumpun nostokorkeuden käyrien leikkauspisteessä on toimintapiste, eli virtausmäärä jolla pumppu toimii kahden tarkastelupisteen välillä. Jos virtausmäärä on vakio, kannattaa siis valita pumppu, jolla on mahdollisimman hyvä hyötysuhde toimintapisteessä.



Jätevedenpuhdistamoilla virtausmäärä vaihtelee huomattavasti vuodenajasta riippuen hulevesien määrän muuttuessa. Energiatehokasta pumppausta toteuttaessa tarvitsee siis ottaa huomioon virtausmäärän vaihtelu, koska virtausmäärän muutos voi siirtää toimintapisteen alueelle, jossa pumpun hyötysuhde on hyvin alhainen, vaikka se normaalisti olisi mahdollisimman korkealla.

Vaihteleviin virtausmääriin voidaan varautua asentamalla pumppuja sarjaan, jolloin pumppujen yhteinen nostokorkeus kasvaa virtausmäärän muuttumatta. Rinnakkain kytkettynä niiden läpi kulkevaa virtausmäärää saadaan tasattua nostokorkeuden pysyessä samana. Pumppujen hyötysuhteet pysyvät lähes muuttumattomina sekä sarjaan kytkettyinä että rinnan kytkettyinä. [3]

Affiniteettisääntöjen perusteella pumpun pyörimisnopeutta tai juoksupyörän kokoa muuttamalla voidaan muuttaa pumpun nostokorkeutta tai virtausmäärää. Pumpun pyörimisnopeuden tai juoksupyörän koon muuttuessa saadaan

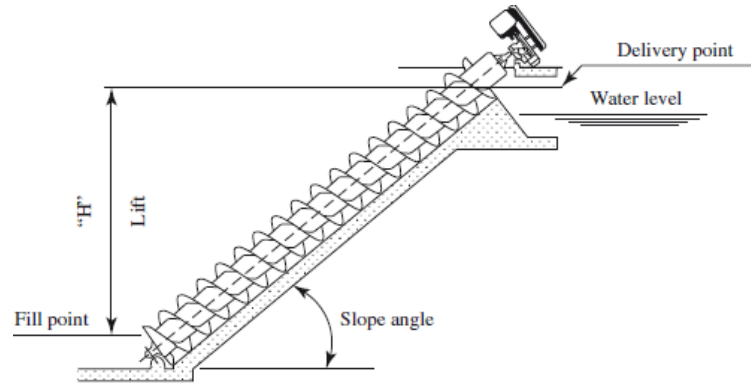
$$\frac{Q_1}{\omega_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{\omega_2 D_2^3}, \quad (8)$$

jossa  $\omega$  on pyörimisnopeus ja  $D$  on juoksupyörän halkaisija. Juoksupyörän vaihto vaatisi pumpun pysäyttämistä, joten pyörimisnopeuden muuttaminen on kätevämpi tapa vastata virtausmäärän vaihteluihin. Virtausmäärän kasvaessa voidaan siis nostaa pumpun pyörimisnopeutta, jolloin toimintapiste pysyy pisteessä, jolla pumpun hyötysuhde on parhaimmillaan. [6]

### 2.3. Jätevedenkäsittelyn yleisimmät pumppaussysteemit

Jätevedenkäsittelyssä käytetään pääasiassa jatkuvatoimisia syrjäytuspumppuja. Näistä tärkein vedenhuoltotekniikassa käytetty pumpputyyppe on keskipakopumppu. [7, s. 27] Keskipakopumppu toimii siten, että pumpun mekaaninen energia muuttuu virtauksen nopeus- ja paine-energiaksi, joilla virtaus voittaa putkiston virtausvastukset ja korkeuseron [3]. Keskipakopumppujen hyötysuhde on noin 50–90 %, joka on melko korkea, etenkin verrattuna muihin vedenhuollossa tyypillisesti käytettyihin pumppuihin. Esimerkiksi vesirengaspumppujen ja mammutpumppujen hyötysuhteet ovat 20–50 %. [7, s. 28–33]

Keskipakopumput voivat tukkeutua kiinteän aineksen takia, joten kiintoaine on erotettava jätevedestä esimerkiksi välppäämällä tai siivilöimällä keskipakopumppuja käytettäessä. Jätevettä voidaan sen sijaan pumpata ruuvipumppuilla, jotka ovat melko yleisiä jätevedenpuhdistamoilla. Ruuvipumppujen etu jätevedenkäsittelyssä on se, että ne eivät tukkeudu. Kuvassa 3 on havainnollistus ruuvipumpusta.



**Kuva 3.** Ruuvipumppu [8].

Ruuvipumpun hyötysuhde on 60–80 %, virtausmäärästä riippuen. [8] Rakenteellisista systä ruuvipumppujen nostokorkeus on korkeintaan 8 metriä [7, s. 34]. Ruuvipumput ovat suosittuja jätevedenpuhdistamoilla ja niiden energiatehokkuus on hyvä, jos ne ovat mitoitettu virtausmäärän keskiarvolle.

Jäteveden pumppaus huoltamolle on siis energiatehokkaimmillaan, kun pumpun hyötysuhde pysyy parhaimman hyötysuhteen alueella suurimman osan ajasta [7, s. 258]. Mitä vähemmän putkistossa syntyy virtaushäviöitä, sitä vähemmän pumppujen tarvitsee syöttää energiaa jäteveeseen. Putkiston suunnittelussa kannattaa siis pyrkiä mahdollisimman pieneen virtaushäviöön. Pumpun valinnassa on tunnettava sekä putkiston että pumpun ominaiskäyrät. Jäteveden pumppaukseen kannattaa valita pumppu, jonka hyötysuhde on korkealla jäteveden virtausmäärän ollessa keskimääräisellä tasollaan. Virtausmäärän vaihteluun pitää vastata esimerkiksi pumpun pyörimisnopeutta muuttamalla, jotta pumppujen energiatehokkuus pysyisi mahdollisimman korkeana.

### 3. JÄTEVEDEN ILMASTUS

Ilmastus on olennainen osa aktiivilieteprosessia. Aktiivilietteen biomassassa elävät mikrobit käyttävät puhdistettavasta vedestä orgaanisen aineksen ravinteita. Ilmastuksella varmistetaan, että mikrobin elintoimintaan on tarpeeksi happea sekä pidetään liete jatkuvassa liikkeessä. Ilmastuksen jälkeen aktiiviliete erotetaan vedestä ja jätevesi siirtyy seuraavaan prosessiin. [7, s. 523]

#### 3.1. Ilmastuksessa vaikuttavat tekijät

Ilmastuksen suunnittelussa lähtökohdaksi kannattaa ottaa jäteveden hapentarve. Hapentarpeeseen vaikuttavat pääasiassa uuden biomassan kasvu, biomassan hajotusprosessi ja typpiyhdisteiden hapettuminen sekä pelkistyminen. Hapentarpeeseen vastataan ilmastusjärjestelmän hapetuskapasiteetilla. Hapetuskapasiteetilla tarkoitetaan sitä hapen määrää, mikä voidaan aikayksikköä kohden liuottaa veteen. Hapetuskapasiteetin laskennassa voidaan käyttää kaavaa

$$O_c = L_{BOD_7} O_r k_1 k_2 k_3 \frac{1}{\alpha}, \quad (9)$$

jossa  $O_c$  on hapetuskapasiteetti standardiolosuhteissa,  $L_{BOD_7}$  on keskimääräinen hapenkulutus,  $k_1$  on tuntihiippukerroin,  $k_2$  on hapen kyllästysvajausten suhde standardi- ja käyttöolosuhteissa,  $k_3$  diffuusiokorjauskero käyttöolosuhteissa ja  $\alpha$  on suhteellinen hapensiirtokerroin, joka on ilmastimille ominainen vakio. Eri  $k$ :n arvot saadaan esimerkiksi taulukoista 1, 2 ja 3. [7, s. 524]

**Taulukko 1.** Tuntihiippukerroin  $k_1$  [7, s. 525].

Viipymä ilmastusaltaassa (h)	24	12	8	4	2
$k_1$	1,10	1,25	1,35	1,4	1,5

**Taulukko 2.** Hapen kyllästysvajaussuhde  $k_2$  [7, s. 525].

Lämpötila käyttöolosuhteissa (°C)	5	10	15	20
$k_2$ ; upotussyvyys 0 m	1,05	1,22	1,40	1,60
$k_2$ ; upotussyvyys 5 m	1,00	1,16	1,32	1,50

**Taulukko 3.** Diffuusiokorjauskerroin  $k_3$  [7, s. 525].

$T$ (°C)	$k_3$	$T$ (°C)	$k_3$	$T$ (°C)	$k_3$
5	1,098	12	0,964	19	0,845
6	1,077	13	0,946	20	0,830
7	1,058	14	0,928	21	0,815
8	1,038	15	0,911	22	0,799
9	1,019	16	0,895	23	0,784
10	1,000	17	0,878	24	0,770
11	0,982	18	0,861	25	0,756

Aktiivilieteprosessissa hapentarve on 1,5–2,5 mg/L. Hapen siirtyminen veteen onnistuu parhaiten happimäärän ollessa alhainen, ja sitä huonommin mitä enemmän vedessä on jo happea. Jäteveden yli-ilmastus kuluttaakin paljon energiaa. Happimäärän ollessa 5,0 mg/L ilmansyöttö kuluttaa kaksinkertaisen määrän energiaa verrattuna 2,0 mg/L happimäärään. Ilmastuksessa voidaan siis saavuttaa huomattavia säästöjä happimäärän seurannan ja hapen syötön aktiivisella muuttamisella. Hapen syöttöä ei tosin saa laskea liikaa, koska ilmastimien tukkeutumisen riski kasvaa. [6]

### 3.2. Eri ilmastussysteemit

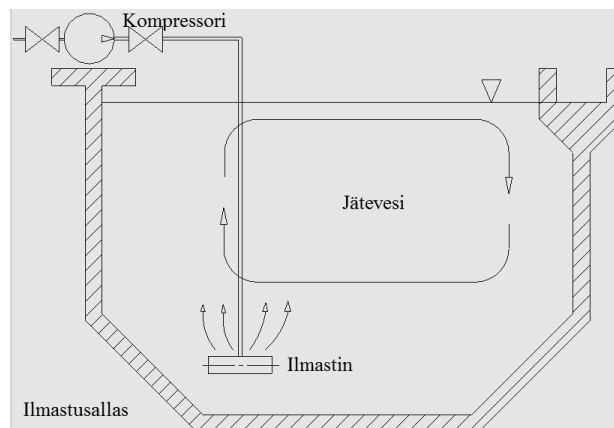
Jäteveden puhdistuksessa ilmastimet jaetaan yleensä kolmeen pääryhmään: pohjailmastimiin, pintailmastimiin sekä näiden yhdisteisiin. Pohja- eli diffuusioilmastimet johtavat paineilmaa veteen pieninä kuplina. Pintailmastimet roiskuttavat ympärilleen pieniä pisaroita, jotka ottavat ilmasta happea, ja putoavat takaisin muun jäteveden sekaan. Yhdistelmäilmastimissa syötetään ilmaa veteen pintailmastimien läheisyydessä. [7, s. 526]

Jätevedenkäsittelyssä käytetään pääasiassa pohjailmastimia, jotka syöttävät ilmaa veteen kuplina. Mitä pienempiä kuplia syötetään, sitä paremmin happea siirtyy. Kuplien pienentäminen tosin nostaa ilmastimen energian tarvetta, joten energiatehokkain ratkaisu on löytää piste, jossa kuplat ovat sopivan kokoisia. [6] Ilmastimet voidaan jakaa kuplakoon mukaan hienokuplailmastimiin, joiden kuplakoko on 2–3 mm, keskikarkeakuplailmastimiin, joiden kuplakoko on 3–5 mm ja karkeakuplailmastimiin, joiden kuplakoko on suurempi kuin 5 mm [7, s. 526].

Hienokuplailmastimia käytetään syvissä altaissa, joihin ilma johdetaan hienojakoisina kuplina. Ilmastimet sijoitetaan yleensä epäsymmetrisesti, jotta jätevesi joutuisi kiertoliikkeeseen. Pienien kuplien ansiosta ilman ja jäteveden välinen pinta on suurempi kuin karkeammilla ilmastimilla. Hienokuplailmastimilla siis saadaan sama ilmastusteho pienemmällä ilmamäärällä, mutta ilmastimissa syntyvä painehäviö on suurempi ja ne ovat herkempiä tukkeutumaan. Mitä suurempi painehäviö on, sitä enemmän kuluu energiaa

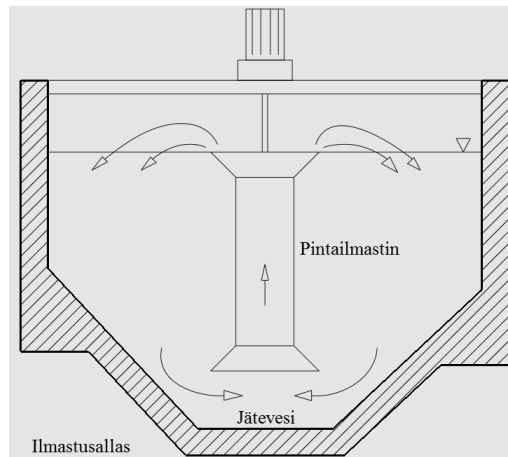
paineistetun ilman tuottamiseen kompressoreiden avulla. Hienokuplailmastimien hapetusteho on 1,7–3,0 kilogrammaa happea kilowattitunnissa. Keskikarkeakuplailmastimet ovat suosittuja pienissä jätevedenpuhdistamoissa, koska ne eivät tukkeudu yhtä helposti kuin hienokuplailmastimet. Niiden hapetusteho on tosin pienempi, 1,2–2,3 kg O<sub>2</sub>/kWh. Karkeakuplailmastimet vaativat enemmän ilmaa, mutta toisaalta vähemmän painetta, joten kompressorit vaativat vähemmän energiaa. [7, s. 528]

Ilmaa pitää myös syöttää sopivalla nopeudella, jotta ilmastimet eivät tukkeudu. Toisaalta liian suuri nopeus huonontaa hapen siirtymistä jäteveeteen, koska kuplat nousevat nopeammin pintaan. Yleensä pohjailmastien asettaminen tiheästi ja runsaslukuisesti parantaa ilman syöttämisen tehokkuutta. [6] Kuvassa 4 on esimerkki pohjailmastimen toiminnasta.



**Kuva 4.** Hienokuplailmastin, joka syöttää happea paineilman avulla. (Muokattu viitteestä [7, s. 528]).

Pintailmastimet syöttävät happea jäteveeteen roiskuttamalla pisaroita jäteveden pinnalta. Pisarat ottavat ilmasta happea ja putoavat takaisin veteen. Pintailmastuksessa ei tarvita ilmastusputkia tai kompressoreita, joten niiden hapetusteho on yleensä parempi kuin pohjailmastimilla. Pintailmastuksessa tosin syntyy aerosoleja, joten altaan on oltava ulkotiloissa terveydellisten riskien välttämiseksi. Jätevedenkäsittelyn tapahtuessa ulkotiloissa on mahdollista, että jätevesi jäätyy todella ankarassa pakkasessa. Esimerkiksi Suomessa pintailmastimien käyttö on vähentynyt tämän takia. Pintailmastimien hapetusteho on 1,3–2,2 kg O<sub>2</sub>/kWh. Harjailmastimilla, joita käytetään matalissa kanavissa veden kiertäessä jatkuvasti, hapetusteho on 1,5–2,0 kg O<sub>2</sub>/kWh. [7, s. 529–530] Kuvassa 5 on esimerkki pintailmastimen toiminnasta.



**Kuva 5.** Pintailmastin. (Muokattu viitteestä [7, s. 530]).

Yhdistelmäilmastimissa yhdistetään karkea ja hienokuplailmastimien toimintaa. Pyörivän roottorin siipien väliin syötetään paineilmaa karkeakuplailmastimesta, jonka jälkeen siivekkeet rikkovat karkeat kuplat pienemmiksi, parantaen hapetustehoa. [7, s. 530] Ilman syöttö on jatkuvaa suurissa jätevedenpuhdistamoissa, mutta pienemmissä toteutuksissa voidaan syöttää ilmaa erissä, joka on energiatehokkaampaa kuin jatkuva syöttö [9].

Ilmastuksen energiatehokkaassa toteutuksessa kannattaa siis käyttää pintailmastusta mahdollisuuksien mukaan. Pohjailmastuksessa pitää ottaa huomioon kompressoreiden lisäämä energiankulutus. Ilmastustavasta huolimatta sopiva happimäärä jätevedessä tärkeä, joten jäteveden happimäärää kannattaa tarkkailla ja hapen syöttöä muuttaa vastaavasti.

## 4. Energian talteenotto jätevedestä

Jätevedenpuhdistamoiden energiatehokkuutta voidaan siis parantaa merkittävästi optimoimalla jäteveden pumppauksen ja ilmastuksen toteutusta. Energiasäästöjen lisäksi jätevedenpuhdistamoilla on potentiaalia tuottaa energiaa jätevedestä energiatehokkuuden parantamiseksi. Jätevedenpuhdistamo voi olla energian tuotannon suhteen jopa omavarainen, kuten Yhdysvalloissa sijaitsevat Greshamin ja Sheboygan Regionalin jätevedenpuhdistamot [10]. Kuvassa 6 on ilmakehu Sheboygan Regionalin jätevedenpuhdistamosta.



*Kuva 6. Sheboygan Regional, Wisconsinin osavaltio, Yhdysvallat [11].*

Jätevedestä voidaan hyödyntää muun muassa hydraulista energiaa ja lämpöenergiaa. Seuraavassa luvussa käsitellään jäteveden hydraulisen energian talteenottoa ja sen taloudellista kannattavuutta.

### 4.1. Jäteveden hydraulinen energia

Jäteveden hydraulista energiaa voidaan hyödyntää yksinkertaisesti turbiinien avulla, aivan kuten vesivoimalaitoksissa. Turbiinien käyttömahdollisuus tosin riippuu jätevedenpuhdistamon sijainnista ja koosta. Ilman tarpeeksi suurta korkeuseroa tai virtausmäärää turbiinien käyttö ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa. Tarpeeksi suuri korkeusero jätevedenpuhdistamolla on harvinaista, joten turbiineja käytetään pääasiassa vain suurilla jätevedenpuhdistamoilla, joiden läpi virtaa paljon jätevettä. [12] Esimerkiksi Irlannissa sijaitsevassa Roscrean jätevedenpuhdistamossa korkeusero on 16 m, joka on suuri verrattuna muiden Irlantilaisten jätevedenpuhdistamoiden korkeuseroihin. Roscrean läpi kulkee keskimäärin vain 0,04 m<sup>3</sup>/s jätevettä, joten huoltamon hydroturbiinin potentiaali on vain 4,6 kW. Hydraulisen energian määrä riippuu siis enemmän virtausmääristä kuin korkeuseroista jätevedenpuhdistamoilla. [13]

Aivan kuten jäteveden pumppauksessa, sopivan turbiinin valinta on erittäin merkittävää energiatehokkuuden kannalta. Turbiinien hyötysuhde vaihtelee virtausmäärän mukaan, joten kannattaa valita turbiineja, joiden hyötysuhde on korkeimmillaan virtausmäärän keskimääräisellä arvolla. [13] Taulukossa 4 on esitetty eräiden Irlannissa ja Englannissa sijaitsevien jätevedenpuhdistamoiden hydraulisen energian potentiaaleja ja taloudellista kannattavuutta.

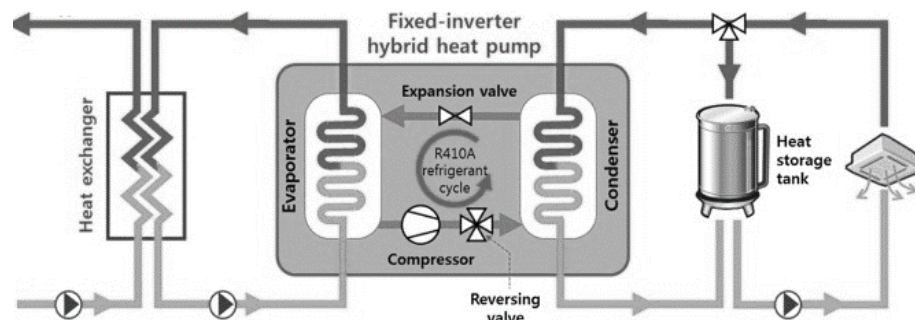
**Taulukko 4.** *Energian talteenoton potentiaali ja taloudellinen kannattavuus [13].*

Puhdistamo	Virtaus- määrä (m <sup>3</sup> /s)	Korkeus- ero (m)	Teho (kW)	Vuosittai- nen säästö (€/y)	Turbiinien kustannus (€)	Takaisin- maksuaika (v)
Beckton	14,12	2,6	234,09	202 910	816 241	4
Ringsend	4,37	3,7	103,1	86 887	442 128	5,1
Long Reach	3,00	1,7	32,49	28 162	249 078	8,8
Waterford City	0,37	3,5	8,1	6866	86 016	12,5
Little Marlow	0,29	1,6	2,92	2531	52 746	20,8
Tramore	0,05	9,3	3,1	2607	50 000	19,2

Taulukon mukaan ilman huomattavaa korkeuseroa tai tarpeeksi suurta virtausmäärää hydroturbiinien teho on alle 10 kW, jolloin niiden takaisinmaksuaika on yli kymmenen vuotta. Myös hydroturbiinien huono optimointi ja suuret virtausmäärien muutokset alentavat kerätyn energian määrää.

## 4.2. Jäteveden lämpöenergia

Yhdysvaltojen energianosaston arvion mukaan 235 biljoonaa kWh lämpöenergiaa vuosittain menee hukkaan lämpimien jätevesien myötä Yhdysvalloissa [2]. Lisäksi lämpimät jätevedet voivat lämmittää vesistöjä, mistä aiheutuu myös ympäristökuormitusta. Jäteveden lämpöenergiassa on paljon potentiaalista energiaa. Jäteveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää sekä lämmityksessä että viilennyksessä vuodenajasta riippuen lämpöpumppujen avulla. Kuvassa 7 on esimerkki jäteveden lämpöenergiaa hyödyntävän lämpöpumppusysteemin toiminnasta.



**Kuva 7.** *Lämpöpumppusysteemi, jossa vasemmassa reunassa kulkeva käsitelty jätevesi luovuttaa tai vastaanottaa lämpöä lämpövarastosta [14].*



Esimerkiksi Koreassa sijaitsevan Kiheung Respian jätevedenpuhdistamon virtaama on 30 000 m<sup>3</sup> jätevettä päivässä. Huoltamon ulkoilman lämpötila on -12–30 °C ja ulosvirtaavan jäteveden lämpötila on 12–28 °C. Jätevedenpuhdistamolle tehdyn tutkimuksen mukaan lämpöenergiaa voitaisiin tuottaa 276 MWh vuodessa lämpöpumppujen toimiessa puolet ajasta. Asennus- ja käyttökustannukset huomioon ottaen lämpöenergian hyödyntämiseen vaaditun laitteiston takaisinmaksuaika olisi 6,8 vuotta. [15]

Lämpöenergian hyödynnyksessä on tärkeää, että lämpöenergia otetaan jätevedestä vasta ilmastuksen jälkeen. Tämä johtuu siitä, että alempi lämpötila vaikeuttaa hapen syöttöä jäteveeseen, joka kasvattaisi ilmastuksen energiankulutusta. Ilmastuksessa käsitelty jätevesi on myös parempi lämpöenergian lähde, koska se on stabiilimpaa ja sen lämpötila on usein korkeampi kuin käsittelemättömän jäteveden. [14] Jätevedenpuhdistamon sijainti vaikuttaa myös lämpöenergian talteenoton kannattavuuteen. Mikäli huoltamo sijaitsee kaukana lämmitettävästä tai viilennettävästä kohteesta, saattaa siirrossa syntyvä lämpöhäviö olla liian suuri, eikä lämpöenergian hyödyntäminen olekaan taloudellisesti kannattavaa. Myös jäteveden lämpötila pitää ottaa huomioon lämpöenergian hyödynnystä suunniteltaessa.

## 5. Yhteenveto ja johtopäätökset

Jätevedenpuhdistamoiden toiminta on tärkeää, mutta nykyisin myös paljon energiaa kuluttavaa. Jätevedenpuhdistamoiden aikaisemmassa suunnittelussa ei ole juurikaan kiinnitetty huomiota energiatehokkuuteen, joten huomattavien energiasäästöjen saavuttaminen on mahdollista. Oikeanlaisella suunnittelulla jätevedenpuhdistamo voi olla energian suhteen lähes omavarainen.

Pumppaussysteemien suunnittelussa on tärkeää tietää, kuinka paljon jätevettä tulee keskimäärin kulkemaan puhdistamon läpi ja suunnitella pumppaamo toimimaan mahdollisimman tehokkaasti mahdollisimman suuren osan ajasta. Pumppausputkiston suunnittelussa kannattaa kiinnittää huomiota siihen, että putkistossa syntyisi mahdollisimman vähän kitkahäviöitä. Energiatehokkuutta kannattaa ylläpitää virtausmäärien vaihdellessa sopivalla säätövaralla, kuten pumppujen pyörimisnopeuden muuttamisella tai ylimääräisten pumppujen asennuksella.

Ilmastuksen tehokkaassa toteutuksessa on tärkeää seurata jäteveden happimäärää. Jotta ilmastimet eivät tukkeudu, on happea syötettävä jatkuvasti, mutta liiallinen hapensyöttö huonontaa energiatehokkuutta. Pintailmastus on yleensä energiatehokkain ilmastusvaihtoehto, mutta on käyttökelpoinen vain ulkoilmassa. Pintailmastus ei ole toteutuskelpoinen kaikkialla jäteveden jäätyminen vaaran vuoksi. Pohjailmastuksessa kannattaa kiinnittää huomiota sopivaan kuplakokoon ja kompressoreiden tehokkuuteen.

Energian talteenottoa kannattaa harkita tarpeeksi suurilla jätevedenpuhdistamoilla. Pienissä puhdistamoissa ei välttämättä synny tarpeeksi hydraulista energiaa tai lämpöenergiaa, joten niiden talteenotto voi olla taloudellisesti kannattamatonta. Lämpöenergian talteenotossa kuluu energiaa, joten sen talteenotto pienillä puhdistamoilla voi jopa vähentää kokonaisenergiatehokkuutta. Jäteveden energian talteenotto suurilla jätevedenpuhdistamoilla on melko riskitöntä, sillä se ei alenna puhdistuksen tasoa oikein toteutettuna.

Jätevedenkäsittely on ympäristöterveyden kannalta yksi tärkeimmistä tekijöistä ja siitä saavutettavat energiasäästöt ovat merkittäviä, joten säästömahdollisuuksista kannattaa tehdä yhä enemmän tutkimusta. Tässä työssä käsiteltiin vain aktiivilietteeseen perustuvaa puhdistustapaa, joka ei välttämättä ole energiatehokkain tapa yleisyydestään huolimatta. Tulevaisuudessa eri puhdistusmenetelmien vertailu energiatehokkuuden suhteen voisi olla hyödyllistä.

## LÄHTEET

- [1] G. Tchobanoglous, F. Burton, H.D. Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, American Water Works Association Journal, vol. 95, 2003, p. 201.
- [2] V.G. Gude, Energy and Water Autarky of Wastewater Treatment and Power Generation Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, May 2015, pp. 52–68.
- [3] E. Karttunen, T. Tuhkanen, Vesihuolto 1, 2. painos, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki, 2009, 314 sivua.
- [4] W.W. Huebsch, B.R. Munson, T.H. Okiishi, A.P. Rothmayer, Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th edition, John Wiley & Sons, 2013, 792 pages.
- [5] J.C. Reichenberger, K. Bangs, J. Gallovich, D. Terrill, Environment Federation Water, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, Fifth Edition, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2010.
- [6] R.E. Mau, S.S. Jeyanayagam, Environment Federation Water, Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants: MoP No. 11, Sixth Edition, McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2008.
- [7] E. Karttunen, T. Tuhkanen, H. Kiuru, Vesihuolto 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki, 2004, 684 sivua.
- [8] M.L. Davis, Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, International ed., McGraw-Hill, New York, 2011, 853 p.
- [9] B. Kumar, A.R. Rao, Performance Comparison of Batch and Continuous Flow Surface Aeration Systems, Korean Journal of Chemical Engineering, vol. 27, 2010, pp. 1796–1800.
- [10] Y. Shen, J.L. Linville, M. Urgun-Demirtas, M.M. Mintz, S.W. Snyder, An Overview of Biogas Production and Utilization at Full-scale Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the United States: Challenges and Opportunities Towards Energy-neutral WWTPs, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, pp. 346–362.
- [11] Sheboygan Regional, Saatavilla (viitattu 18.4.2018): <http://www.sheboyganwwtp.com/>.
- [12] P. Christine, C. Paul, M. Aonghus, Microhydropower Energy Recovery at Wastewater-Treatment Plants: Turbine Selection and Optimization, Journal of Energy Engineering, vol. 143, 2017.

- [13] C. Power, A. McNabola, P. Coughlan, Development of an Evaluation Method for Hydropower Energy Recovery in Wastewater Treatment Plants: Case Studies in Ireland and the UK, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, pp. 166–177.
- [14] K. Chae, X. Ren, Flexible and Stable Heat Energy Recovery from Municipal Wastewater Treatment Plants Using a Fixed-inverter Hybrid Heat Pump System, *Applied Energy*, 2016, pp. 565–574.
- [15] K. Chae, J. Kang, Estimating the Energy Independence of a Municipal Wastewater Treatment Plant Incorporating Green Energy Resources, *Energy Conversion and Management*, 2013, pp. 664–672.