

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

JÄTEVEDEN ILMASTUKSEN VAIKUTUS PUHDISTAMON TOIMINTAAN

The effects of sewage aeration on the purification plant

Työn tarkastaja: Professori Timo Hyppänen

Työn ohjaaja: TkL Simo Hammo

Lappeenrannassa 18.12.2017

Juho Hiltunen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Juho Hiltunen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Simo Hammo

Kandidaatintyö 2017

43 sivua, 11 kuvaa, 6 taulukkoa ja 5 liitettä

Hakusanat: ilmastus, pintailmastin, pohjailmastin, hapenkulutus, hapensiirtonopeus ja ilmastusteho

Biologinen lammikko on jäteveden puhdistuksen prosessi, jossa bakteerit puhdistavat käsiteltävää jätevettä. Toimiakseen kunnolla, bakteerit tarvitsevat ravinteita, neutraalin elinympäristön ja happea. Bakteerien tarvitsema happi tuotetaan ilmastimien avulla. Ilmastusteknologia kehittyy koko ajan, minkä takia ilmastusjärjestelmiä kannattaa päivittää käyttötarkoituksen mukaan. Lisäksi ilmastusjärjestelmät vastaavat suurinta osaa puhdistamon vuotuisesta energiankulutuksesta, jolloin investoinneilla voidaan vähentää puhdistamon vuotuisia kustannuksia.

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin pohjailmastimen etuja verrattuna pintailmastimeen niiden toiminnan, energiankulutuksen, hapensiirtonopeuden ja ilmastustehon kannalta. Työssä myös selvitettiin Varkauden puhdistamon lammikon hapenkulutus, jota verrattiin ilmastimien hapensiirtonopeuteen. Lammikon hapenkulutus selvitettiin kokeellisesti OUR (oxygen uptake rate) menetelmällä ja ilmastimien hapensiirtonopeus kirjallisuuden lähteillä sekä laitevalmistajan ilmoittamilla arvoilla.

Mittaustuloksista selvisi, että lammikon hapenkulutus on noin $184 \text{ kg}_{O_2}/\text{h}$. Laskuista osoittautui, että pohjailmastimella on yli kaksinkertainen ilmastusteho kuin pintailmastimella. Laskuista selvisi myös, että pohjailmastimen energiankulutus on pienempi kuin pintailmastimella, jolloin vuotuinen energiankulutus laskisi tehtaalla noin 6.6 %. Pohjailmastin osoittautui siis ominaisuuksiltaan paremmaksi ilmastintyyppiä.

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Stora Enson Varkauden tehtaiden kanssa. Tehtaalla työn ohjaajana toimi Tenho Pakarinen, jota haluan kiittää mielenkiintoisesta työn aiheesta ja opastavista neuvoista. Erityiskiitokset myös Susanna Kiiskiselle, joka auttoi minua suorittamaan työn vaatimat mittaukset, ja Harri Markkulalle, joka neuvoi minua takuuarvojen todentamisessa. Yliopistolla työni ohjaajana toimi laboratorioinsinööri Simo Hammo ja tarkastajana professori Timo Hyppänen, joita haluan kiittää neuvoista ja työni edistämisestä.

Juho Hiltunen

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	6
1 Johdanto	8
1.1 Työn taustaa	8
1.2 Työn tavoite.....	8
2 Yleistä jäteveden puhdistusmenetelmistä	10
2.1 Jäteveden esikäsittely	10
2.2 Selkeytys	11
2.3 Ilmastus	12
2.3.1 Diffuusioilmastimien hapen siirto.....	14
2.3.2 Mekaanisten ilmastimien hapen siirto.....	16
3 Varkauden jätevedenpuhdistamo	17
3.1 Merkitys paperitehtaan toiminnassa.....	17
3.2 Puhdistusprosessin vaiheet	18
3.2.1 Neutralointi	19
3.2.2 Esiselkeytin	19
3.2.3 Lammikko	20
3.2.4 Jälkiselkeytin.....	20
3.2.5 Flotaatio	21
3.2.6 Lietteenkäsittely	21
4 Lammikon happimäärä ja hapen kulutus	23
4.1 Mittausjärjestelyt	23
4.2 Tulokset	24
5 Lammikon pintailmastus	27
5.1 Ilmastimen toiminta.....	27
5.2 Energiankulutus	28
5.3 Ilmastustehokkuus ja hapensiirtonopeus	30

6 Lammikon pohjailmastuksen investointi	32
6.1 Rakennemuutokset	32
6.2 Ilmastimen toiminta.....	33
6.3 Energiankulutus.....	34
6.4 Ilmastustehokkuus ja hapensiirtonopeus	36
7 Johtopäätökset	39
8 Yhteenveto	41
Lähdeluettelo	42
Liitteet	

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

R_O	teoreettinen hapentarve	[g/d]
Q	virtaus lammikossa	[m ³ /d]
$P_{X,bio}$	biolietteen tuotanto	[kg/m ³]
F	likaantumisen korjauskerroin	[-]
c	konsentraatio	[mg/l]
$K_L a$	veden hapensiirtokerroin	[1/h]
N	ilmastimen ilmastustehokkuus	[kg _{O₂} /Wh]
P	teho	[W]
T	lämpötila	[°C]
H	ilmastimen upotussyvyys	[m]

Kreikkalaiset aakkoset

α	jäteveden koostumuksen korjauskerroin	[-]
β	jäteveden partikkeleista johtuva korjauskerroin	[-]
θ	lämpötilan korjauskerroin	[-]
η	hyötysuhde	[-]

Alaindeksit

kesk	keskimääräinen
L	operatiivinen

s kylläinen tila

w vesi

e sähkö

aks akseli

Lyhenteet

AOTR (actual oxygen transfer rate) todellinen hapensiirtonopeus

BOD (biological oxygen demand) biologinen hapenkulutus

COD (chemical oxygen demand) kemiallinen hapenkulutus

OUR (oxygen uptake rate) hapen ottamisnopeus

PAC (polyaluminium chloride) polyalumiinikloridi

SOTR (standard oxygen transfer rate) teoreettinen hapensiirtonopeus

SOTE (standard oxygen transfer efficiency) liuenneen hapen siirtotehokkuus
puhtaassa vedessä

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustaa

Ihmiset ovat kautta aikojen käsitelleet omia jätevesiään. Luultavasti kuuluisimpia ovat antiikin roomalaisten suuret viemäriverkot. Roomalaisten viemäreiden tarkoitus ei tosin ollut puhdistaa jätevettä, vaan siirtää sitä ja sadevettä pois kaupungeista (Tilley 2011, s. 3–4). Euroopan teollistumisen aikaan noin 1850-luvulla tehtaita rakennettiin vesien ääreen energian, prosessiveden ja kuljetusreittien takia. Samalla vesistöön pääsi yhä enemmän päästöjä, mikä alkoi näkymään vesistöjen saastumisena. Ensimmäinen vesistön pilaantumista ehkäisevä laillinen päätös oli vuonna 1876 asetettu ``The River Pollution Prevention Act'', jonka tarkoituksena oli sallia tehtaiden päästöt osaksi julkisia viemäreitä sen sijaan, että jätteet olisi suoraan laskettu vesistöihin (Tilley 2011, s. 67). Vuonna 1897 Dr Fowler sai kokeiluissaan ilmastuksen avulla erotettua erilleen jätevesistä ns. puhtaan veden ja lietteen, mutta vasta vuonna 1913 E. Ardern ja W.T. Lockett julkaisivat löydöksensä aktiivilietemenetelmästä (Tilley 2011, s. 45–46).

Nykyään jäteveden puhdistuksesta on määritelty monessa laissa ja asetuksessa, esimerkiksi Suomen ympäristönsuojelulaissa 527/2014, jossa 7 § kerrotaan toiminnanharjoittajan velvollisuuksista ehkäistä ja rajoittaa ympäristön pilaantumista (Ympäristönsuojelulaki 2014). Puhdistusmenetelmät ovat kehittyneet ajan saatossa ja ne voidaan tätä nykyään jakaa kolmeen osaan; mekaaniseen, biologiseen ja kemialliseen puhdistukseen. Jäteveden puhdistuksen teknologia ja ympäristörajoitteet kehittyvät kuitenkin koko ajan, minkä takia on tärkeää päivittää myös jo olemassa olevia puhdistamoita.

1.2 Työn tavoite

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Varkauden Stora Enson kanssa lammikon pohjailmastuksen etuja verrattuna pintailmastukseen. Tehtaalla ilmastuksen päivittäminen koettiin tarpeelliseksi, koska nykyiset pintailmastimet vaativat jatkuvaa huoltoa ja niiden erikoismootoreihin on vaikea löytää varaosia, mikä lisää vuotuisia kustannuksia. Lisäksi investoinnin tarkoituksena on tehostaa orgaanisen aineen

sekoittumista lammikon alkupäässä ja vähentää hajukaasupäästöjä. Työssä verrataan ilmastusmuotojen hapentuottavuutta, energiankulutusta sekä toimintaa ja selvitetään lammikon hapenkulutus. Kandidaatintyön suppeuden vuoksi työssä ei tarkastella kemikaalien vaikutuksia tai kulutusta ilmastusmenetelmissä.

Työn alussa pohjustetaan jäteveden puhdistuksen yleisiä menetelmiä, minkä jälkeen selvennetään jäteveden puhdistamon merkitystä Varkauden paperitehtaan toiminnassa ja kerrotaan alustavasti puhdistusprosessin päävaiheet. Työn varsinainen tarkoitus ilmenee kolmessa seuraavassa kappaleessa, joissa selvitetään lammikon hapenkulutus, pinta- ja pohjailmastuksen ilmastusteho, energiankulutus sekä toimintaperiaate. Hapenkulutuksen kohdalla tutkinta perustuu pääsääntöisesti mittaustuloksiin, kun taas pinta- ja pohjailmastuksessa puhtaasti lähteisiin ja laskentaan. Lopuksi tuloksia verrataan toisiinsa ja arvioidaan ilmastusmuotojen etuja toisiinsa.

2 YLEISTÄ JÄTEVEDEN PUHDISTUSMENETELMISTÄ

Jäteveden puhdistuksen tarkoituksena on varmistaa, että puhdistamolta lähtevä vesi on kiintoaineeltaan ja ravinteiltaan luvanvarainen ja elinympäristölle sopiva. Jäteveden puhdistus koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka ovat esikäsittely, selkeyttimet eli kiintoaineen laskeutus ja biologinen lammikko. Tässä kappaleessa selvitetään menetelmien yleisiä periaatteita sekä yhtälöitä ilmiöiden ja laitteiden toiminnan kuvaamiseksi.

2.1 Jäteveden esikäsittely

Jäteveden esikäsittely koostuu virtausmittauksesta, mekaanisesta erotuksesta, kiintoaineen keräämisestä ja neutraloinnista. Esikäsittelyn tarkoituksena on suojata puhdistamon laitteita kulumiselta ja tukkeutumiselta sekä varmistaa puhdistamon prosessien hyvä käytettävyys ja jäteveden sopivuus muihin puhdistamon prosesseihin. (Mark J. Hammel & Jr. 2004, s. 362) Mekaanisen erotuksen tarkoituksena on johdattaa jätevesi ahtaiden aukkojen läpi, jolloin karheimmat epäpuhtaudet, kuten lehdet, jäisivät erottimiin kiinni. Mekaanisen erotuksen voidaan jakaa siivilöintiin ja välppäykseen. Välppäyksessä tarvittava läpivirtausaukko on yhdensuuntaisten välppäsauvojen välinen rako, kun taas siivilöinnissä läpivirtausaukko on esimerkiksi metallilevyyn lävistetty reikä. Myös silppureita voidaan asettaa välppien jälkeen leikkaamaan kiintoainesta pois jätevedestä. (Karttunen 1998, s. 50)

Jätevedestä saadaan erotettua kiintoaineet, kuten hiekka ja painavat hiukkaset, joilla on merkittävästi suurempi nopeus tai tiheys kuin veden orgaanisella aineella. Kyseiset hiukkaset saadaan kerättyä talteen erillisissä kammioissa, joissa esimerkiksi pyörteen avulla nostetaan hiukkasten nopeutta, jolloin hiukkaset lopulta laskeutuvat kammion keskellä pohjalle ja päästävät orgaanisen aineen jatkamaan matkaansa. Kammion pohjalta hiukkaset voidaan pumpata pois hävitystä varten. Isojen hiukkasten poisto on tärkeää jäteveden esikäsittelyssä, koska isot hiukkaset voivat kuluttaa lietepumppuja, tukkia putkia laskeumalla ja kerääntyä lietesäiliöihin. (Mark J. Hammel & Jr. 2004, s. 363–364)

Neutraloinnin tarkoituksena on varmistaa, että käsiteltävän jäteveden pH on halutun suuruinen jatkoprosessia varten, yleensä 6–8 pH. Veden pH:n on kuitenkin oltava lähellä neutraalia vettä johdattaessa vesistöön. Jäteveden laadun mukaan veteen lisätään joko rikkihappoa, jos puhdistamolle saapuva vesi on emäksistä, tai kalkkia, jos vesi on hapanta. Neutralointi ehkäisee myös korroosiota luomalla korroosiota ehkäisevän suojakerroksen, kun vesi on kalkki-hiilidioksiditasapainossa (Karttunen 1998, s. 62).

2.2 Selkeytys

Selkeytyksessä käsiteltävästä vedestä poistetaan kiintoaines tai nestemäiset partikkelit painovoiman tai keskipakovoiman avulla. Painovoiman avulla tapahtuvaa puhdistusta kutsutaan laskeutukseksi, joka on yleisin muoto selkeytykselle. Laskeutusta pystytään käyttämään hiekanerotuksessa, esilaskeutuksessa sekä kemiallisten flokkien poistamisessa. (Karttunen 1998, s. 55–56) Selkeyttimissä kiintoaines ohjataan altaitten pohjalta altaan keskelle pohjakaapaimien avulla, josta liete pumpataan lietteenkäsittelyyn. Lisäksi altaitten pinnalta voidaan pintalaahaimilla kerätä pinnalle noussut liete talteen.

Selkeyttimet voidaan jakaa käyttötarkoituksensa mukaan esi- ja jälkiselkeyttimiin, jotka ovat toiminnaltaan lähes identtiset. Esiselkeyttimissä saadaan kiintoaineesta poistettua 50–70 % ja BOD:ia eli biologista hapenkulutusta alennettua 25–40 %. (Tchobanoglous ym. 2003, s. 396) Jälkiselkeyttimet ovat biologisen puhdistuksen jälkeen ja siitä saadaan näin ollen kerättyä talteen biologinen liete. Joissakin jälkiselkeyttimissä osa biologisesta lietteestä pumpataan takaisin lammikkoon bakteerien käyttöön. Jälkiselkeyttimissä on yleensä huomattavasti pienemmät kuormitukset kuin esiselkeyttimissä, koska lammikoista syntyy suhteellisen vähän biologista lietettä. (Mark J. Hammel & Jr. 2004, s. 375)

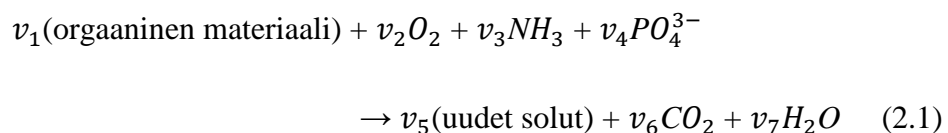
Teknisten rakenteiden mukaan selkeytysratkaisut voidaan jakaa vaaka- ja pystyselkeytykseen sekä flotaatioon. Vaakaselkeyttimessä tuleva virtaus on horisontaalista, minkä takia tulevat hiukkaset laskeutuvat altaan pohjalle virtausta vastaan kohtisuorasti. Altaat ovat joko yksipohjaisia tai niissä on useita välipohjia, johon liete laskeutuu, ja altaat ovat suhteellisen pieniä, halkaisijaltaan yleensä 3–6 m.

Vaakaselkeyttimissä vesi tulee yleensä altaaseen maksimissaan virtausnopeudella 45 cm/s. Lietteenpoisto suoritetaan joko imukaapimilla varustetulla vaunukaapimella jatkuvasti tai tyhjentämällä allas lietteenpoistoa varten. (Vedenpuhdistamoiden suunnitteluohjeet 1978, s. 61–63)

Pystyselkeytyksessä tuleva vesi virtaa alhaalta ylös ja hiutaleet laskeutuvat virtaussuuntaa vastaan alaspäin. Altaat ovat yleensä kartion muotoisia, ja niiden syvyys vaihtelee 3:sta 6 metriin. Lietteenpoisto hoidetaan juoksuttamalla tai pumppaamalla liete pohjakartiosta lietteenkäsittelyä varten. Flotaatio ei edellisten menetelmien tavoin perustu laskeutukseen, vaan hiutaleiden nostattamiseen pintaan. Hiutaleet saadaan nostettua pintaa ilmakuplilla, jotka saadaan aikaiseksi syöttämällä dispersioivettä selkeytettävään veteen. Flotaatiossa liete poistetaan lietekouruihin joko pintalaahaimilla tai altaan ylivuotona, mutta pohjaan painautuvan lietteen voidaan poistaa myös pohjakaapimilla. Flotaatio altaat ovat muihin selkeytys altaisiin verrattuna pieniä, syvyydeltään 2–3 m. (Vedenpuhdistamoiden suunnitteluohjeet 1978, s. 66–68)

2.3 Ilmastus

Ilmastuksessa tapahtuu jäteveden biologinen puhdistus bakteerien toimesta. Ilmastuksen tarkoituksena on muuttaa biologisesti hajoavat aineet hyväksyttävään muotoon, sisällyttää pienhiukkaisia kiintoaineita osaksi biologisia hiutaleita, poistaa ravinteita vedestä ja vähentää orgaanisten sekä epäorgaanisten yhdisteiden pitoisuuksia vedessä. (Tchobanoglous ym. 2003, s. 548) Ilmastuslammikon bakteerit sitovat orgaanista materiaalia, eli puhdistavat jätevettä, seuraavan reaktion mukaisesti



missä

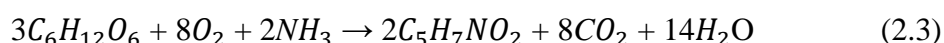
v_i on stoikiometrinen kerroin

Puhdistusprosessin yhteydessä bakteerit myös sitovat fosforia sekä typpeä. Reakti-
on uudet solut kuvastavat sitä uutta biomassaa, mikä syntyy lietteen hapetuksen seurauksena.
(Tchobanoglous ym. 2003, s. 548)

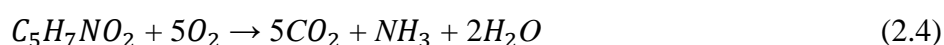
Lammikon tarvitsemaa happimäärää voidaan kuvata BOD:in ja COD:in avulla. BOD
kuvastaa sitä happimäärää, jonka bakteerit sitovat hajottaessaan orgaanisia yhdisteitä.
COD taas tarkoittaa sitä happimäärää, joka tarvitaan hitaasti tapahtuviin kemiallisiin
reaktioihin. Lammikon kemiallinen hapenkulutus COD voidaan ratkaista reaktion 2.1
stoikiometrisistä kertoimista. Reaktiossa on tarkasteltu pelkästään orgaanisen aineen
reaktiota hapen kanssa. Havainnollistaakseen tilannetta, oletetaan jäteveden orgaanisen
aineen olevan glukoosia $C_6H_{12}O_6$, jolloin saadaan seuraavan reaktion mukaiset kertoimet



Reaktion 2.2 hapen sekä glukoosin kertoimien ja moolimassojen avulla hapentarpeeksi
saadaan noin $1.07 \text{ g}_{O_2}/\text{g}_{orgaaninen}$. Toisaalta reaktion 2.1 mukaan bakteerien
puhdistusprosessissa syntyy uutta biomassaa, joka glukoosille olisi seuraavan reaktion
mukaan $C_5H_7NO_2$



Syntynyt biomassa voi edelleen reagoida hapen kanssa seuraavasti



jolloin kemialliseksi hapenkulutukseksi saadaan biomassan sekä hapen stoikiometristen
kertoimien ja moolimassojen avulla noin $1.42 \text{ g}_{O_2}/\text{g}_{biomassa}$. (Tchobanoglous ym. 2003,
s. 568–569)

Bakteerien biologisesta hapenkulutuksesta aiheutuva hapentarve voidaan ratkaista
yhtälöllä

$$R_O = Q(S_O - S) - 1.42P_{X, bio} + 4.33Q(NO_x) \quad (2.5)$$

missä

R_O	teoreettinen hapentarve	[g/d]
Q	virtaus lammikossa	[m ³ /d]
S_O	ilmastusaltaaseen tulevan veden BOD	[kg/m ³]
S	ilmastusaltaasta lähtevän veden BOD	[kg/m ³]
$P_{X,bio}$	biolietteen tuotanto	[kg/m ³]

BOD:iin pohjautuva teoreettinen hapentarve vaihtelee 0.9 – 1.3 kg_{O_2}/kg_{BOD} välillä, kun tarkastelujaksona on 5–20 päivää. (Tchobanoglous ym. 2003, s. 683)

Ilmastuksen vaatima happimäärä pystytään tuottamaan ilmastimien avulla. Ilmastimien tarkoituksena on muuttaa veteen liuenneiden kaasujen määrää, mm. lisäämällä hapen määrää vedessä. Yleensä ilmastuksen yhteydessä voi tapahtua myös kemiallisia reaktioita, jotka voivat vähentää toisen kaasun, kuten hiilidioksidin, määrää vedessä. Ilmastuksessa on yleisesti käytössä kolme menetelmää, jolla ilma saadaan kosketuksiin käsiteltävän veden kanssa; suihkutus- ja valutusmenetelmät, mekaaniset- sekä diffuusioilmastimet. Menetelmän valintaa rajoittaa ilmastuksen tarkoitus ja veden laatu. Mekaanisissa ilmastimissa veden pinta rikotaan mekaanisesti, kuten pintailmastimissa, kun taas diffuusioilmastimissa käsiteltävään veteen johdetaan pieniä ilmakuplia. (Karttunen 1998, s. 53)

2.3.1 Diffuusioilmastimien hapen siirto

Diffuusioilmastimille voidaan soveltaa aktiivilieteprosessin ilmastimien yleistä hapensiirtonopeuden yhtälöä (Tchobanoglous ym. 2003, s. 429–430)

$$AOTR = SOTR \cdot \left(\frac{\beta \cdot c_{kesk} - c_L}{C_{s,20}} \right) \cdot (\theta^{T-20}) \cdot \alpha \cdot F \quad (2.6)$$

missä

$AOTR$	todellinen hapensiirtonopeus	[kg_{O_2}/h]
$SOTR$	teoreettinen hapensiirtonopeus	[kg_{O_2}/h]
β	jäteveden partikkeleista johtuva korjauskerroin	[-]

θ	lämpötilan korjauskerroin	[-]
α	jäteveden koostumuksen korjauskerroin	[-]
F	likaantumisen korjauskerroin	[-]
c_{kesk}	keskimääräinen puhtaan veden hapen konsentraatio lämpötilassa T ja syvyydellä H	[mg/l]
c_L	operatiivinen hapen konsentraatio	[mg/l]
c_S	kylläisen tilan konsentraatio	[mg/l]

Ilmastimen hapensiirtonopeudesta saadaan ratkaistua ilmastustehokkuus jakamalla hapensiirtonopeus ilmastimen teholla. Melkein mille tahansa ilmastimelle pystytään suhteuttamaan hapensiirtonopeus kaavalla 2.6 korjauskertoimien α , β , θ , ja F avulla. Korjauskerroin α huomioi jäteveden laadun lisäksi ilmastusaltaan geometrian ja sekoittamisen kulman. Korjauskerroin voitaisiin laskea yhtälöllä

$$\alpha = \frac{K_L a_{\text{jätevesi}}}{K_L a_{\text{puhdasvesi}}} \quad (2.7)$$

missä

$K_L a$ veden hapensiirtokerroin [1/h]

Jätevedessä on erilaisia partikkeleita, kuten suoloja ja hiukkasia, minkä takia ilmastusteholle tarvitaan korjauskerroin β . Korjauskerroin laskettaisiin yhtälöllä

$$\beta = \frac{c_{s,\text{jätevesi}}}{c_{s,\text{puhdasvesi}}} \quad (2.8)$$

Korjauskertoimet yleensä heikentävät todellista hapensiirtonopeutta ideaalisesta, koska kertoimet ovat usein alle yhden. Jäteveden koostumuksesta johtuva korjauskerroin on yleensä 0.3–1.2, jäteveden partikkeleista johtuva korjauskerroin 0.7–0.98, lämpötilan korjauskerroin on yleensä 1.024 ja likaantumisen korjauskerroin 0.65–0.9. (Tchobanoglous ym. 2003, s. 429)

2.3.2 Mekaanisten ilmastimien hapen siirto

Mekaanisille ilmastimille voitaisiin soveltaa yhtälöä 2.6 hapensiirtonopeutta laskiessa. Tällöin esimerkiksi pintailmastimille keskimääräisen hapen konsentraatio pitää laskea veden pinnalla. Ilmastustehokkuus saadaan kuitenkin helpommin ratkaistua käyttämällä yhtälöä (Tchobanoglous ym. 2003, s. 447)

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{\beta \cdot c_{w,alt} - c_L}{9.17} \right) \cdot (\theta^{T-20}) \cdot \alpha \quad (2.9)$$

missä

N	todellinen ilmastustehokkuus	$[kg_{O_2}/kWh]$
N_0	teoreettinen ilmastustehokkuus	$[kg_{O_2}/kWh]$
$c_{w,alt}$	talousveden konsentraatio käyttölämpötilassa T	$[mg/l]$

Mekaanisten ilmastimien ilmastustehokkuutta laskettaessa täytyy huomioida, että tehokkuus on yksikössä kg_{O_2}/kWh . Jos tehokkuutta halutaan verrata esimerkiksi yhtälöllä 2.6 laskettuun diffuusioilmastimien hapensiirtonopeuteen, niin mekaanisten ilmastimien tehokkuus pitää ensiksi kertoa ilmastimen teholla.

3 VARKAUDEN JÄTEVEDENPUHDISTAMO

Varkauden tehtaiden mekaanis-biologinen jäteveden puhdistamo on rakennettu vuonna 1977, lainsäädännön muutoksista ja lupaehtojen kiristymisestä johtuen. Puhdistamo koostu esiselkeytyksestä, biologisesta lammikosta, jälkiselkeytyksestä ja vuonna 2002 rakennetusta tertiäärivaiheesta. Puhdistamon tehtävä on käsitellä tehtaan jätevedet mahdollisimman tehokkaasti kiintoaineen, orgaanisen aineen ja ravinteiden osalta, niin että ympäristöluvan raja arvot toteutuvat. (Jätevesien puhdistamo, s. 1)

3.1 Merkitys paperitehtaan toiminnassa

Puhdistamalla kiintoainekset erotetaan jätevesistä selkeytyksen avulla ja kuivataan ruuvi- ja suotonauhapuristimilla noin 30–40 % kuiva-aineeksi. Kuivattu liete ohjataan materiaalihyötykäyttöön mm. maanrakentamiseen tai polttoon kuorikattilassa. Lietteenkäsittelyn rakennuksessa on myös puhdistamon valvomo, josta käsin ohjataan jäteveden puhdistusprosesseja. Puhdistamon hoitajan vastuulla on huolehtia prosessin kulusta ja kemikaalien riittävydestä, ennakkohuoltaa laitteistoa sekä suorittaa näytemittauksia. (Jätevesien puhdistamo, s. 3)

Varkauden tehtaan jätevedet johdetaan puhdistamon kautta viereiseen järveen, mutta ongelmatilanteen sattuessa voidaan puhdistamolle tulevia ja haitallisia aineita sisältäviä jätevesiä ohjata ns. varoaltaaseen. Varoaltaasta jätevedet pumpataan puhdistamon esiselkeyttimeen jälleen osaksi prosessia lyhyissä jaksoissa. Kiintoainekset poistetaan varoaltaasta ajoittaisella ruoppauksella. Puhdistamolle haitta-aineita sekä niiden lähteitä on esitettyinä taulukossa 1.

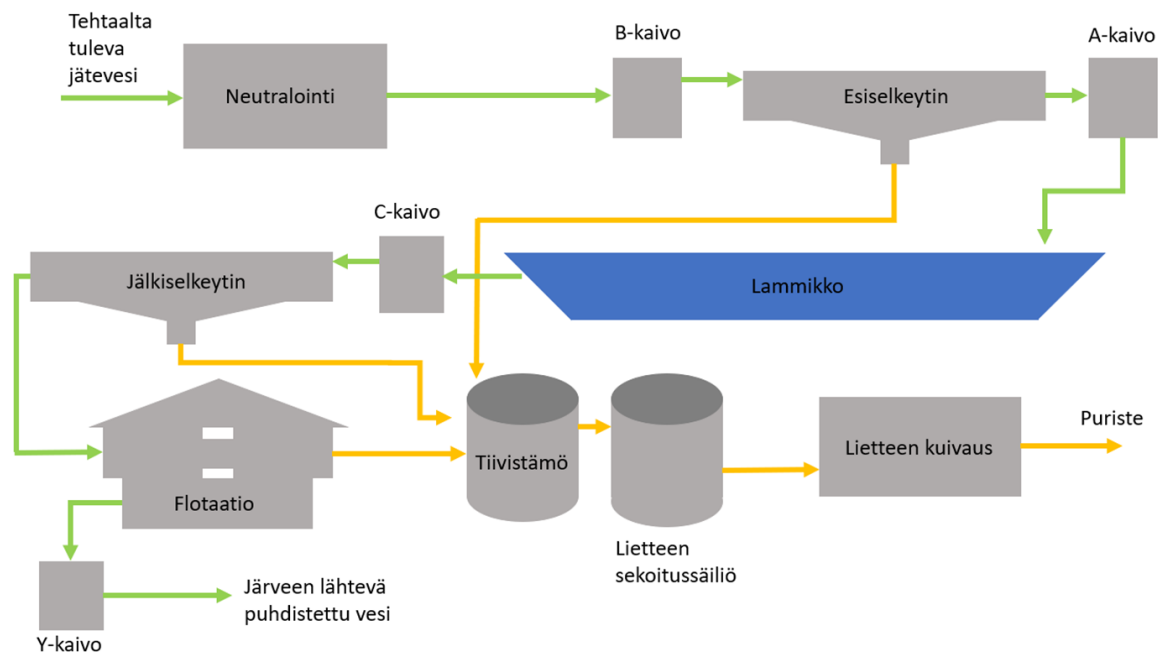
Taulukko 1. Puhdistamon haitta-aineet ja niiden lähteitä (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 14).

Lähde	Haitta-aine
Soodakattila/ Haihduttamo	emäsvesi likaislauhteet suopa mustalipeä
Kaustistamo/ Meesauuni	meesa soodasakka valkolipeä viherlipeä NaOH
Kuituinja	klooriyhdisteet kuitu (massa) NaOH rikkihappo
Puunkäsittely	kuoriliete
Kartongin valmistus (PK3) ja uusiomassan valmistus (RCF)	kuitu (massa) täyteaineet muovirejetti (häiriötilanteissa)

Puhdistamon toimintaan vaikuttaa tehtaan prosessien häiriöttömyys. Taulukon 1 haitta-aineita saatetaan joutua ajamaan puhdistamolle häiriötilanteissa, jolloin puhdistamon kuormitus voi kasvaa.

3.2 Puhdistusprosessin vaiheet

Jätevedenpuhdistamon päävaiheet ovat neutralointi, esiselkeytin, ilmastettu lammikko, jälkiselkeytin, flotaatio ja lietteenkäsittely. Puhdistamolla kiertää jätevesi, josta kerätään liete talteen. Puhdistamon puhdistusprosessin vaiheet ovat esitetty kuvassa 1, jossa veden kierto on merkattu vihreällä ja lietteen keräyksen sekä käsittelyn reitit oranssilla.



Kuva 1. Jäteveden puhdistamon eri vaiheet (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 2).

3.2.1 Neutralointi

Neutraloinnin tarkoituksena on säätää tehtaalta tulevien jätevesien pH neutraaliksi. Veden pH tulisi olla ennen lammikkoa 6.5–7.5. Neutraloinnissa pystytään tarpeen mukaan lisäämään rikkihappoa (H_2SO_4), jos vesi on emäksistä, tai kalkkia (CaO), jos jätevesi on hapanta. Yleensä tehtaalta tuleva vesi on emäksistä, $pH > 8$, minkä takia rikkihappoa annostellaan automaattisesti neutralointialtaaseen ja tarpeen mukaan puhdistamon muihin vaiheisiin. Kalkkia tarvitaan kuitenkin erittäin harvoin.

3.2.2 Esiselkeytin

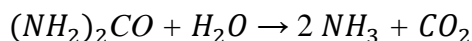
Esiselkeytin on ensimmäinen puhdistamon vaihe, jossa kiintoaine laskeutetaan eroon jätevedestä. Tätä lietettä kutsutaan primäärlietteeksi. Esiselkeytin on halkaisijaltaan 55 m ja reunasyvyydeltään 4 m. Jäteveden viipymäaika on siinä noin 5–6 tuntia. (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 4) Esiselkeyttimessä jäteveden sisältämä kiintoaine laskeutuu pohjalle, josta liete ohjataan laahalla altaan keskellä olevaan keräilymonttuun. Esiselkeytyksestä liete pumpataan tiivistämöön sakeuden parantamiseksi. Tällä tavoin veden sisältämästä kiintoaineesta saadaan kerättyä talteen 80 %, joka on pääsääntöisesti

puukuitua. Esiselkeyttimen pinnalla on pintalaahain, joka kerää esiselkeyttimen pinnalle nousevan lietteen sekä mm. pieniä määriä muovia ja kuitua. (Jätevesien puhdistamo, s. 2)

3.2.3 Lammikko

Lammikossa on bakteereja ja alkueläimiä, joiden tehtävä on puhdistaa jätevettä. Tätä vaihetta kutsutaan puhdistamon biologiseksi vaiheeksi. Lammikko on tilavuudeltaan 300 000 m³ ja jäteveden viipymä lammikossa on noin 4–5 päivää. (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 4) Lammikon prosessikuva on liitteessä 1.

Bakteerien ja alkueläinten tehokas toiminta ja samalla orgaanisen aineksen poisto edellyttää riittävän määrän ravinteita sekä happea. Lisäksi veden lämpötila pitäisi olla noin 30–35 °C. Neutraloinnin tehtävänä on varmistaa sopiva pH alue, noin 6.5–7.5. Ravinteita bakteerit saavat käsiteltävästä jätevedestä mm. typpinä, fosforina ja hivenaineina. Typpiä lisätään ureana lammikkoon menevään jätevetteen, noin 100–150 kg päivässä. Reaktion 2.1 tarvitsevan ammoniakkin NH₃ bakteerit saavat ureasta, kun se reagoi veden kanssa seuraavan reaktion tavalla



Bakteerit selviävät muutaman päivän ilman ureaa, ennen kuin ne alkavat syömään toisiaan. Happea tarjotaan bakteereilla ilmastimien avulla, joita on tällä hetkellä 35 pintailmastinta. (Jätevesien puhdistamo, s. 2) Bakteerien vaatimusten takia ne ovat myös alttiita tehtaan pitkille häiriötilanteille. Taulukon 1 haitta-aineet heikentävät mikrobien tehokkuutta lammikon alkuosassa, mikä heikentää lammikon luontaista puhdistustehoa. Vuodenajasta ja häiriötilanteen kestosta riippuen bakteerikannan täydellinen elpyminen voi kestää useita viikkoja (Jätevesien puhdistamo, s. 4).

3.2.4 Jälkiselkeytin

Jälkiselkeytin on seuraava lietteen laskeutuksen vaihe, jonka lietettä kutsutaan biologiseksi lietteeksi. Esiselkeyttimeen verrattuna jälkiselkeytin on hieman suurempi, halkaisijaltaan 70 m ja syvyydeltään 4 m. Jäteveden viipymäaika on jälkiselkeyttimessä noin 6 h. (Puhdistamon esittelyaineisto s.4) Selkeyttimen pohjakaavain on hidas, joten

jäteveden kiintoaineella on hyvin aikaa laskeutua jälkiselkeyttimen pohjaan, josta kaavain siirtää lietteen selkeyttimen keskelle pumppausta varten. Jälkiselkeyttimessä ei ole erillistä pintalietekaavainta.

Jälkiselkeyttimen kuormitus eli momentti on yleensä häviävän pieni verrattuna esiselkeyttimen momenttiin, koska lammikosta syntyy biolietettä suhteellisen vähän. Tästä syystä jälkiselkeyttimestä tulee myös vähemmän lietettä lietteenkäsittelyyn kuin esiselkeyttimestä. (Jätevesien puhdistamo, s. 2)

3.2.5 Flotaatio

Jäteveden puhdistuksen viimeinen vaihe on flotaatio eli tertiäärivaihe. Flotaatio koostuu kahdesta flotaatioaltaasta, joiden halkaisijat ovat 15 m ja syvyydet 1.7 m (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 5). Tertiäärivaiheessa jäteveden liuennutta orgaanista ainesta ja fosforia saostetaan PAC:lla eli polyalumiinikloridilla. Saostettu liete nostetaan altaan pinnalle flotaation avulla. Altaan syöttölinjaan johdetaan vettä, johon on liuotettu paineistamalla ilmaa. Paineesta vapautuvat ilmakuplat nostavat saostuneen lietteen altaan pinnalle. Polymeeriä käytetään apuaineena "lietekakun" muodostamisessa altaan pinnalle. (Jätevesien puhdistamo, s. 4)

Kemiallinen liete siirretään pintakaapimilla lietesäiliöön, josta se pumpataan lietteenkäsittelyn sekoitusäiliöön. Puhdistettu vesi johdetaan purkuputken kautta vesistöön. (Jätevesien puhdistamo, s. 4)

3.2.6 Lietteenkäsittely

Puhdistusprosessin primääri- ja biologinen liete kerätään tiivistämöön, jossa liete laskeutuu tiivistämön pohjalle, jolloin päälle jäävä veden massa tiivistää alle jäävää lietettä. Tiivistämön liete sekä kemiallinen liete pumpataan lietteiden sekoitussäiliöön lietteenkäsittelyä varten. Sekoitussäiliöön lisätään ferriä, joka sitoo lietteenkäsittelyssä syntyvää rikkivetyä. Sekoitussäiliöstä lähtevään lietteeseen lisätään polymeeria, joka muodostaa flokkia ja parantaa samalla veden erottumista. Lietteenkäsittelyn tarkoituksena on kuivata liete jatkohyötykäyttöä varten, mm. materiaali- tai energiahyötykäyttöön. Lietteenkuivauslaitteistona toimii joko ruuvipuristin tai

suotonauhapuristimet. (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 6) Ruuvipuristinta käytetään suurimman osasta ajasta lietteen kuivauksessa, koska sillä pystytään ajamaan tasaisemmin prosessia kuin suotonauhapuristimilla. Suotonauhapuristimia otetaan kuitenkin käyttöön ruuvipuristimen rinnalle esiselkeyttimen momentin kasvaessa.

Ruuvipuristin koostuu veden esierottimesta, eli gravitaatiopöydästä, ja itse ruuvipuristimesta. Gravitaatiopöydässä liete ajetaan vaakasuoralla hihnalla pöydän päästä päähän, jolloin ylimääräinen vesi poistuu vapaasti lietteestä. Tämän jälkeen liete siirtyy ruuvipuristimelle, jossa on loppua kohden laajeneva kartioruuvi. Liette viipymä ruuvipuristimessa on noin yksi tunti, jona aikana ruuvi erottaa lietteestä vettä. Paikallaan pyörivä ruuvi ottaa matkaansa lietettä, jättäen lietteen sisältämän veden valumaan ruuvin seinämistä pois. Ruuvipuristimella ajettaessa pyritään, että puristeen kuiva-ainetaso olisi 35–40 %. (Puhdistamon esittelyaineisto, s. 6)

Puhdistamolla on lisäksi lietteenkäsittelyssä kaksi suotonauhapuristinta. Molemmat toimivat kuitenkin samalla periaatteella. Suotonauhapuristimessa on kaksi viiraa, joiden välistä käsiteltävä liete kulkeutuu. Viirujen molemmin puolin on puristinteloja, joiden asentoa säätämällä voidaan vaikuttaa syntyvän puristeen kuiva-aineeseen. Suotonauhapuristimen lopuksi syntyvä puriste kuljetetaan puristekuljettimilla jatkokäsittelyyn. Suotonauhapuristimien puristeen kuiva-aine on yleensä alhaisempi kuin ruuvipuristimen, noin 30–35 %. (Jätevesien puhdistamo, s. 3)

4 LAMMIKON HAPPIMÄÄRÄ JA HAPEN KULUTUS

Tässä kappaleessa määritellään biologisen lammikon happimäärä ja hapen kulutus. Tulokset perustuvat mittaustuloksiin, joiden todenperäisyyttä tulee työssä arvioida. Kappaleessa kerrotaan aluksi mittausten järjestelyt, minkä jälkeen esitetään mittauksista saadut tulokset taulukoiden ja kuvaajien avulla.

4.1 Mittausjärjestelyt

Mittaukset suoritettiin Varkauden puhdistamolla 16.11.2017. Mittausten tarkoituksena oli mitata jäteveden happimäärä ja hapen kulutus yhdeksästä pisteestä lammikon alusta. Mittauksissa otettiin myös kuusi COD näytettä, jotka analysoitiin laboratoriossa. Mittauspisteiden paikat löytyvät liitteestä 2. Hapen määrä ja kulutus mitattiin HQ40D happimittarilla, joka on esitelty kuvassa 2.



Kuva 2. HQ40D happimittari ja sen anturi.

Mittaukset aloitettiin noin klo 9.30 ja lammikon alussa olevat ilmastimet oltiin sammutettu jo klo 9.00. Kolme ensimmäistä näytestä suoritettiin klo 9.30–10.30 välisenä aikana ja loput kuusi klo 11.00–12.00. Mittausten aikana ulkolämpötila oli noin 1 °C ja keli hieman tuulinen, mutta muuten selkeä. Mittauksia edeltävänä yövuorossa tehtaan kartonkikone PK3 oli mennyt alas, mikä saattaa vaikuttaa mittaustulosten arvoihin.

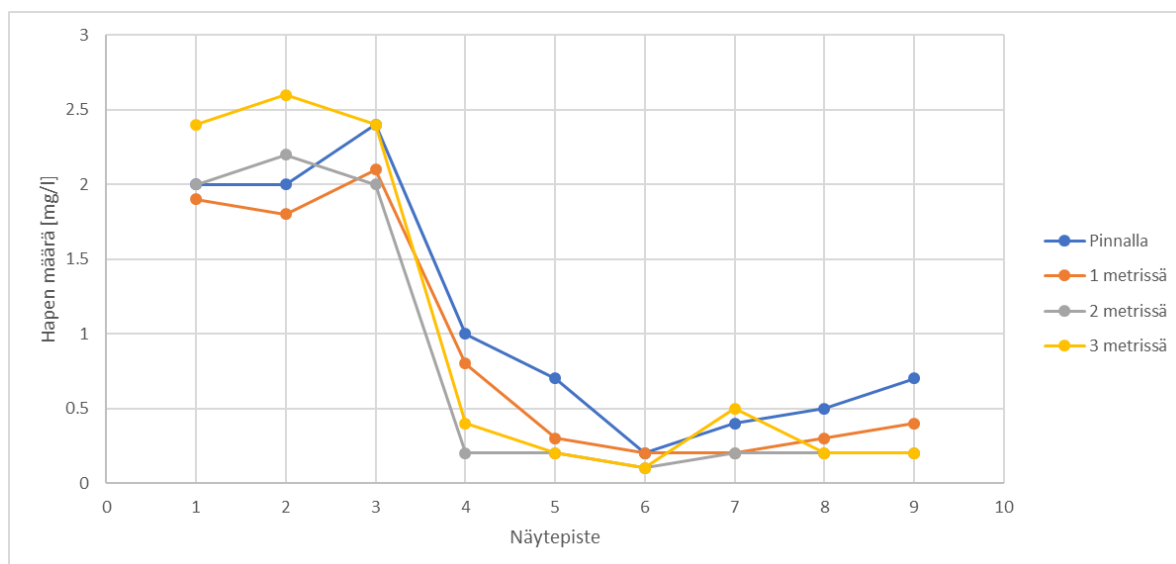
4.2 Tulokset

Mittauksissa kuljettiin soutuveneellä mittauspisteiden välillä. Kolme ensimmäistä pistettä olivat rivissä suunnitellun pohjaimastinjärjestelmän alussa lammikon alkupäässä, seuraavat kolme järjestelmän keskellä noin 30 m päässä ensimmäisestä rivistä ja viimeiset kolme järjestelmän lopussa. Mittauspisteen kohdalla otettiin tarvittaessa yhden metrin syvyydeltä COD -näyte pieneen pulloon, minkä jälkeen hapen määrä mitattiin lammikon pinnalta kolmen metrin syvyyteen asti aina yhden metrin välein happimittarilla. Jäteveden happimäärä on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Jäteveden hapen määrä eri syvyyksillä.

	Piste1	Piste2	Piste3	Piste4	Piste5	Piste6	Piste7	Piste8	Piste9
O_2 pinnalla [mg/l]	2	2	2.4	1	0.7	0.2	0.4	0.5	0.7
O_2 1 m [mg/l]	1.9	1.8	2.1	0.8	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4
O_2 2m [mg/l]	2	2.2	2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
O_2 3m [mg/l]	2.4	2.6	2.4	0.4	0.2	0.1	0.5	0.2	0.2

Taulukon 2 arvoja on havainnollistettu kuvassa 3



Kuva 3. Jäteveden happimäärä eri syvyyksillä ja näytepisteissä.

Kuvasta 3 huomataan, että jäteveden happimäärä puolittuu ensimmäisen kolmen näytepisteen muodostaman rivin jälkeen. Kyseisestä kuvasta voidaan siis päätellä, että ilmastuksen tarve on suuri juuri lammikon alussa. Lisäksi happea on eniten suurimman osan ajasta veden pinnalla ja vähiten kahden metrin syvyydessä.

Kemiallisen hapenkulutuksen näytteet kuudessa eri pisteessä vietiin mittausten päätyttyä laboratorioon analysoitavaksi. Näytteet otettiin yhden metrin syvyydeltä. Laboratorion tulokset ovat esitettynä taulukossa 3.

Taulukko 3. Jäteveden kemiallinen hapenkulutus kuudessa eri pisteessä.

	Piste1	Piste2	Piste3	Piste7	Piste8	Piste9
COD [mg/l]	237	240	227	270	276	254
Keskiarvo [mg/l]	235			267		

Takuuarvojen mukaan COD reduktio on pohjailmastimien yli enintään 25 % (Jäteveden takuuarvot 2017, s. 3). Taulukon 3 tuloksista huomataan kuitenkin, että COD:n keskiarvo kasvaa noin 14 % ensimmäisen ja viimeisen näyterivin välillä. Ennen investointia COD tulisi laskea pintailmastimillakin eikä kasvaa pidemmälle lammikkoon mentäessä.

Hapen kulutusta mitattaessa otettiin yhden metrin syvyydeltä 500 ml näytettä, jota sekoitettiin litran pullossa noin 60 sekuntia. Tämän jälkeen hapen määrä mitattiin happimittarilla aina 10 sekunnin välein ja tulos kirjattiin ylös. Tulokset löytyvät liitteen 3 sivulta 1. Tuloksista nähdään, että suurin osa mittaustuloksista eivät ole lineaarisia. Näyte on yleensä aluksi yliaktiivinen, minkä takia tuloksista pitää ottaa alusta muutama arvo pois. Tällä tavalla mittauksista saadaan selville lineaarinen osuus. Mittaustulosten lineaarinen osuus löytyy liitteen 3 sivulta 2. Mittaustulosten lineaarisesta osuudesta saadaan tehtyä näytteille lineaariset sovitteet hapen määrästä ajan suhteen. Lineaariset sovitteet löytyvät liitteestä 4. Sovitteista saadaan katsottua hapen kulutus yksikössä mg/l/s sovitteiden kulmakertoimista, jotka on myös hyvä esittää yksikössä mg/l/h.

Lammikon hapen kulutus kannattaa muuttaa yksikköön kg_{O_2}/h , jotta se olisi vertailukelpoisempi ilmastimien hapensiirtonopeuden kanssa. Tätä varten täytyy selvittää pintailmastimien vaikutustilavuudet eli aerated volumes. Vaikutustilavuudet saadaan arvioitua lammikon karttakuvasta (Liite 5) merkkamalla karttaan pintailmastimien

vaikutusalueet pinnalla ja kertomalla pinta-alat lammikon syvyydellä. Tämän jälkeen yhdeksän näytettä jaetaan yhtä suuriin neliön muotoisiin alueisiin, joiden perusteella voidaan arvioida kunkin ilmastimen vaikutustilavuus kussakin näytepisteessä. Lammikon hapen kulutus saadaan yksikköön kg_{O_2}/h , kun hapen kulutus yksikössä $g/m^3/h$ kerrotaan näytepisteessä kaikkien vaikuttavien ilmastimien vaikutustilavuudella. Lineaaristen sovitteiden kulmakertoimien hapenkulutukset, näytepisteiden ilmastimien vaikutustilavuudet ja lammikon hapenkulutukset ovat esitettynä taulukossa 4.

Taulukko 4. Lineaaristen sovitteiden kulmakertoimet, ilmastimien vaikutustilavuudet ja hapen kulutus lammikon eri näytepisteissä.

	Näyte1	Näyte2	Näyte3	Näyte4	Näyte5	Näyte6	Näyte7	Näyte8	Näyte9
Kulmakerroin [$mg/l/s$]	0.0036	0.0046	0.0058	0.0026	0.0037	0.0046	0.0049	0.0027	0.0063
Kulmakerroin [$g/m^3/h$]	13.0	16.6	20.9	9.4	13.3	16.6	17.6	9.7	22.7
Vaikutustilavuus [m^3]	551	2668	633	363	3436	1857	1420	1501	0
Hapen kulutus [kg_{O_2}/h]	7.1	44.2	13.2	3.4	45.8	30.8	25.0	14.6	0

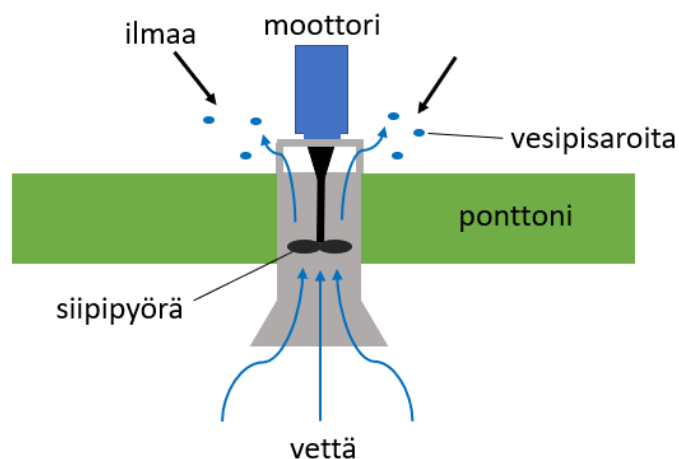
Taulukon 4 tuloksista nähdään, että näytepisteiden yhteenlaskettu hapenkulutus on noin $184 kg_{O_2}/h$. Tämä tarkoittaa, että liitteen 2 osoittamalla alueella ilmastimien yhteenlaskettu hapensiirtonopeus pitää vähintään olla $184 kg_{O_2}/h$, jotta lammikon bakteerit voisivat toimia optimaalisesti.

5 LAMMIKON PINTAILMASTUS

Pintailmastimet ovat mekaanisia ilmastimia, jotka kelluvat veden päällä. Varkauden puhdistamon tämänhetkiset pintailmastimet ovat high-speed -tyyppisiä ja niitä on lammikolla 35 kappaletta. Kappaleessa selvitetään pintailmastimen toiminta sekä lasketaan pintailmastimille vuotuinen energiankulutus, hapensiirtonopeus ja ilmastusteho.

5.1 Ilmastimen toiminta

Puhdistamon tämänhetkiset pintailmastimet ovat mekaanisia ilmastimia, jotka kelluvat veden päällä ponttonien avulla. Ilmastimeen kuluu lisäksi moottori ja siipipyörä. Pintailmastimen rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Mekaanisen pintailmastimen rakenne ja toiminta (Tchobanoglous ym. 2003, s. 444).

Kuvasta 4 huomataan, että ilmastimen siipipyörä imee vettä pystysuorasti ylöspäin. Siipipyörä sekoittaa vettä tehokkaasti ja hajottaa siitä pieniä vesipisaroita, joihin sitten liukenee ilmakehän happea. Hapettuneet vesipisarot tippuvat lopuksi takaisin lammikkoon. (Tchobanoglous ym. 2003, s. 443)

5.2 Energiankulutus

Energiankulutuksen tarkastelun kohteena ovat kaikki pintailmastimet, jotka ovat lammikolla suurimman osan vuodesta päällä. Vuotuinen energiankulutus saadaan selville, kun tiedetään ilmastimien tehot ja vuotuiset käyttöajat. Viiden pintailmastimen, jotka korvataan pohjailmastimilla, tehot ja sähkövirrat ovat esitettynä taulukossa 5.

Taulukko 5. Korvattavien pintailmastimien tehot ja sähkövirrat (Roudasoja 2017).

Ilmastin	Teho [kW]	Virta [A]
No. 1	75	75
No. 4	45	54
No. 5	45	54
No. 24	45	47
No. 26	75	70
Yhteensä	285	300

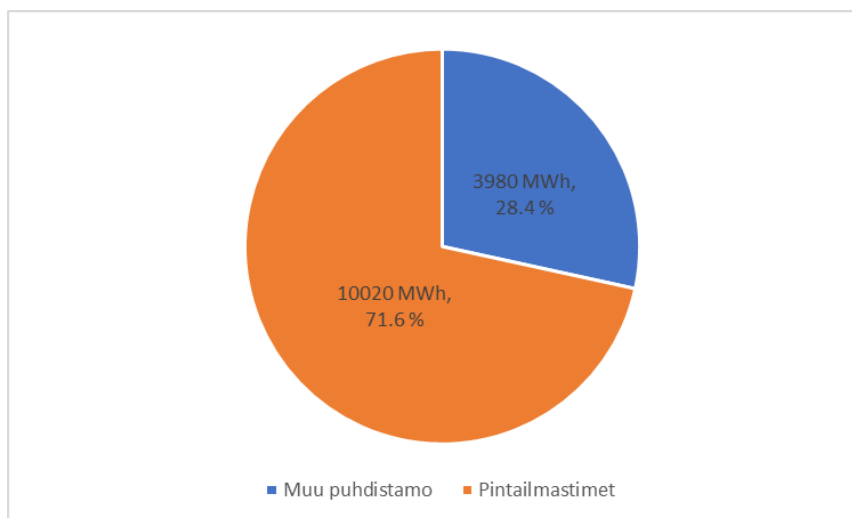
Lammikossa on 35 pintailmastinta, joista 29 toimivat jatkuvatoimisesti ympäri vuoden. Kyseisten ilmastimien tehontarve on 1144 kW. (Liite I) Voidaan olettaa, että ilmastimet ovat päällä koko ajan, minkä takia niiden käyttöaika on 8760 h/a. Nyt ilmastimien energiankulutukseksi saadaan vuodessa

$$E_{ilmastimet} = 1144 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/a} \approx 10021.4 \text{ MWh/a}$$

Puhdistamon vuotuinen energiankulutus on noin 14000 MWh (Pakarinen 2017). Näin ollen ilmastuksen lisäksi puhdistamon muut prosessit kuluttavat energiaa vuodessa

$$E_{muut} = 14000 \text{ MWh} - 10021.4 \text{ MWh} = 3978.6 \text{ MWh}$$

Edellisistä tuloksista nähdään, että pintailmastimet vastaavat peräti 71.6 % puhdistamon vuotuisesta energiankulutuksesta. Tulokset ovat esitettynä kuvassa 5

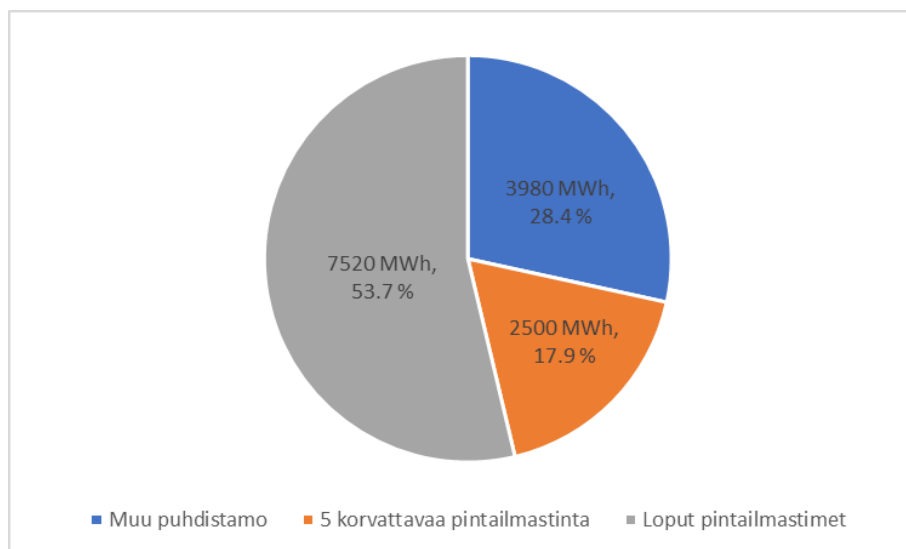


Kuva 5. Puhdistamon energiankulutus pintailmastuksella.

Puhdistamon muita suuria energiankuluttajia ilmastuksen lisäksi ovat pumppaamot, selkeytykset, flotaatio ja lietteenkäsittely. Taulukon 5 perusteella voidaan laskea korvattaville pintailmastimille oma energiankulutus

$$E_{korv} = 285 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/a} = 2496.6 \text{ MWh}$$

Kyseiset ilmastimet vastaavat siis 17.9 % puhdistamon vuotuisesta energiankulutuksesta. Korvattavien pintailmastimien energiankulutus ja osuus puhdistamon muusta energiankulutuksesta ovat esitettyinä kuvassa 6.



Kuva 6. Korvattavien pintailmastimien osuus puhdistamon energiankulutuksesta.

5.3 Ilmastustehokkuus ja hapensiirtonopeus

Pintailmastimet ovat mekaanisia ilmastimia, joten niiden ilmastustehokkuus voidaan ratkaista yhtälöllä 2.9. Seuraavassa taulukossa 6 on esitettyä laiteoimittaja Flootechin ilmoittamat suureet yhtälön ratkaisemiseksi.

Taulukko 6. Alkuarvot pintailmastimien ja pohjailmastuksen ilmastustehokkuuden laskemiseksi (Jätevedenkäsittelyn takuuarvot 2017, s. 1–3).

tunnus	lukuarvo	yksikkö
α	0.55	-
β	0.97	-
θ	1.024	-
c_L	>1	mg/l
$SOTE$	17.66	$g_{O_2}/m^3/m$
q_m	8663	m^3/h
T	37	$^{\circ}C$
H	3.2	m

Kelluille high-speed -tyyppisille ilmastimille teoreettinen ilmastustehokkuus N_0 on 1.1–1.4 kg_{O_2}/kWh (Tchobanoglous ym. 2003, s.446). Laskennoissa voidaan siis käyttää lukuarvojen keskiarvoa 1.25 kg_{O_2}/kWh . Yhtälön 2.9 talousveden konsentraatio $c_{w,alt}$ voidaan ratkaista yhtälöllä (Tchobanoglous ym. 2003, s.447)

$$c_{w,alt} = c_{s,merenpinnasta} \cdot F_a \quad (5.1)$$

missä

$c_{s,merenpinnalla}$ veden konsentraatio merenpinnalla [mg/l]

F_a hapen liukoisuuden korjauskerroin [-]

Veden konsentraatio merenpinnalla voidaan katsoa taulukosta D-1 (Tchobanoglous ym. 2003, s. 1746), kun suolapitoisuus on alle 100 ppm (talousvesi) ja ilmakehän paine 1 atm. Konsentraatioksi veden lämpötilassa 37 $^{\circ}C$ saadaan

$$c_{s,merenpinnalla} = 6.72 \text{ mg/l}$$

Hapen liukoisuuden korjauskerroin F_a on lähellä yhtä, koska Varkauden puhdistamo ei ole kovin korkealla merenpinnasta (Tchobanoglous ym. 2003, s. 447). Näin ollen talousveden konsentraatioksi saadaan yhtälöllä 5.1

$$c_{w,alt} = 6.72 \text{ mg/l} \cdot 1 = 6.72 \text{ mg/l}$$

Nyt yhtälön 2.9 ja taulukon 6 korjauskertoimien avulla voidaan ratkaista pintailmastimien ilmastusteho

$$N = 1.25 \text{ kg}_{O_2} / \text{kWh} \cdot \left(\frac{0.97 \cdot 6.72 \text{ mg/l} - 1 \text{ mg/l}}{9.17} \right) \cdot (1.024^{37-20}) \cdot 0.55$$

$$N = 0.6192 \text{ kg}_{O_2} / \text{kWh}$$

$$N \approx \mathbf{0.62 \text{ kg}_{O_2} / \text{kWh}}$$

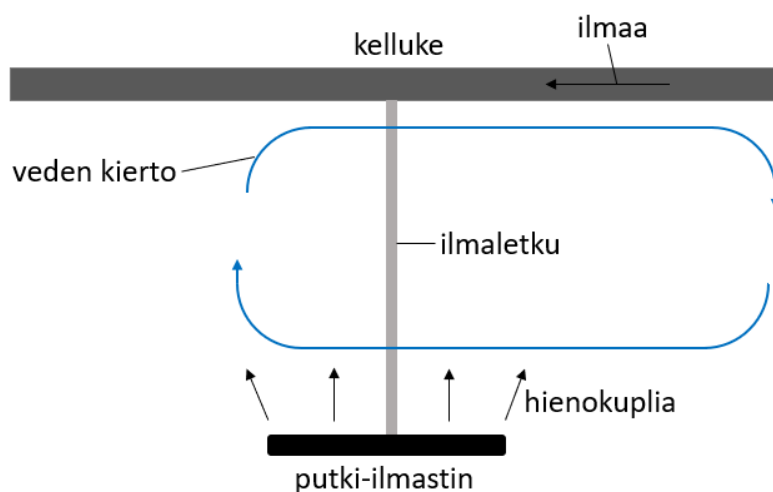
Pintailmastimien todellinen ilmastustehokkuus vastaa siis noin 50 % teoreettisesta. Pintailmastimien yhteenlaskettu teho on taulukon 5 mukaan 285 kW, joten hapensiirtonopeudeksi yksikössä $\text{kg}_{O_2} / \text{h}$ saadaan

$$AOTR = 0.6192 \text{ kg}_{O_2} / \text{kWh} \cdot 285 \text{ kW}$$

$$AOTR \approx \mathbf{176 \text{ kg}_{O_2} / \text{h}}$$

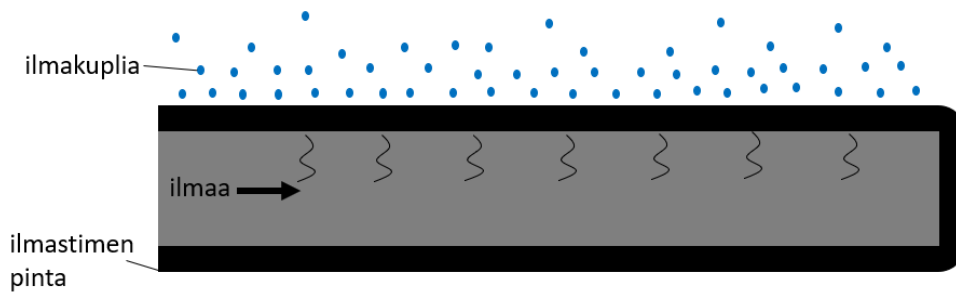
6.2 Ilmastimen toiminta

Uudet ilmastimet ovat kelluvia hienokupla pohjailmastimia. Kyseisissä ilmastimissa kompressorien tuottama ilma siirretään veteen FlexAir Streamline -ilmastusyksikön avulla. Ilma kulkeutuu aluksi kellukkeiden sisäisissä ilmakanavissa, jonka jälkeen ilma siirtyy erillisissä ilmaletkuissa kohti varsinaista putkimaista ilmastinta, joka on noin 3,2 metrin syvyydessä. (Tekninen erittely 2017, s. 2) Ilmastimen hienokuplat nostattavat pohjalla olevaa vettä ylöspäin aiheuttaen kuvan 8 mukaisen veden kierron.



Kuva 8. Hienokuplailmastimen rakenne ja toiminta (Karttunen 1998, s. 56).

Putkimaisen ilmastimen pinta on polymeroitua EPDM muovia, josta tuotettu ilma pääsee huokosista läpi. Kun ilmaa aletaan tuottamaan puhaltimella, niin ilmastimen pinta laajenee, jolloin huokokset suurenevat ja ilma pääsee niistä läpi. Mitä suurempi ilman virtausnopeus on ilmastimessa, sitä suuremmat ovat aukot ilmastimen pinnassa. Tuotettujen hienokuplien kokoon vaikuttaa myös huokosten koko ja ilmastimen pintajännitys. (Tchobanoglous ym. 2003, s.432–433) Hienokuplien muodostuminen on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Ilmakuplien muodostuminen hienokuplailmastimessa (Mark J. Hammel & Jr. 2004, s. 399).

6.3 Energiankulutus

Uuden puhaltimen akseliteho on 170 kW ja puhaltimen moottorin teho 200 kW. Moottori on tyypiltään IE2, jonka hyötysuhde on 95 %, kun moottorin teho on 200 kW. Puhaltimen kuormitusvirta osakuormalla, eli laskennallisen tehontarpeen mukaan, on noin 197 A. (Roudasoja 2017) Moottorin sähköteho voidaan laskea yhtälöllä

$$P_e = \frac{P_{aks}}{\eta} \quad (6.1)$$

missä

P_e	sähköteho	[W]
P_{aks}	akseliteho	[W]
η	hyötysuhde	[-]

Moottorin sähkötehoksi saadaan yhtälöllä 6.1

$$P_e = \frac{170 \text{ kW}}{0.95} = 178.947 \text{ kW} \approx 180 \text{ kW}$$

Pohjailmastimen käyttöajaksi voidaan olettaa 8760 h/a, jolloin ilmastimien kuluttamaksi energiaksi saadaan

$$E_{pohja} = 178.947 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/a} \approx 1567.6 \text{ MWh}$$

Pohjailmastimen energiankulutus on siis pienempi kuin lammikon alkupään viidellä pintailmastimella. Puhdistamon energiankulutus siis kokonaisuudessaan pienenee.

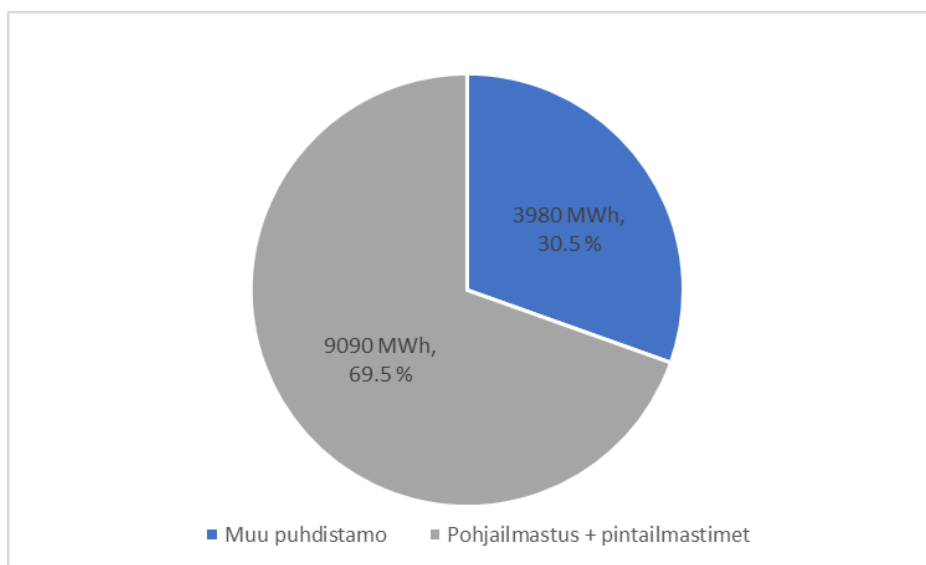
Luvussa 5.2 laskettiin korvattavien pintailmastimien energiakulutukseksi 2496.6 MWh, jolloin uudeksi puhdistamon energiankulutukseksi saadaan

$$E_{kok} = 14000\text{MWh} - 2496.6\text{ MWh} + 1567.6\text{ MWh} = 13071\text{ MWh}$$

Puhdistamon muut prosessit kuluttavat yhtä paljon energiaa, eli 3978.6 MWh, kuin luvussa 5.2. Näin ollen ilmastukseen kuluu energiaa yhteensä vuodessa

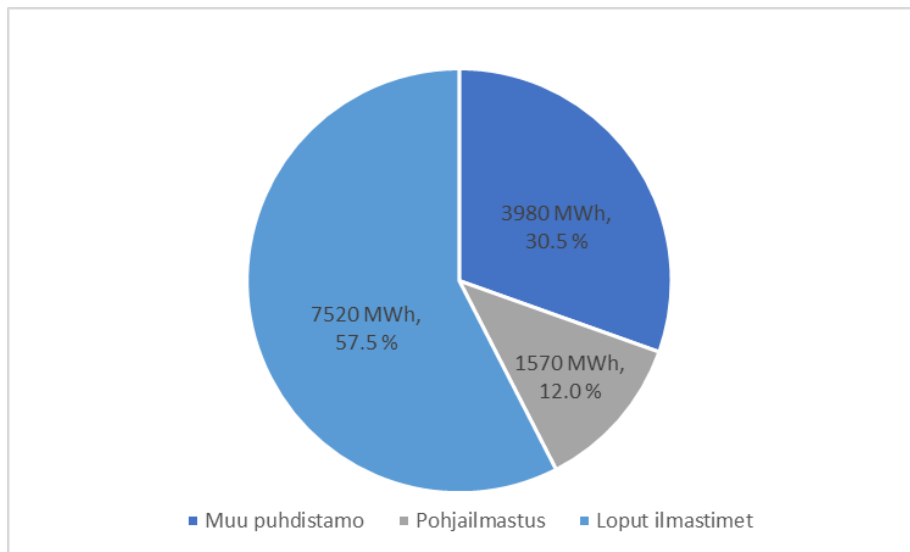
$$E_{ilmastimet2} = 13071\text{ MWh} - 3978.6\text{ MWh} = 9092.4\text{ MWh}$$

Edellisistä tuloksista nähdään, että pohjailmastimilla ilmastuksen energiakulutus on vuodessa 69.5 % koko puhdistamon energiankulutuksesta. Kuva 10 havainnollistaa edellisiä tuloksia



Kuva 10. Puhdistamon energiankulutus pohjailmastimien lisäyksen jälkeen.

Pohjailmastimien energiakulutus, 1567.6 MWh, vastaa noin 12 % puhdistamon koko energiakulutuksesta. Jäljelle jäävien pintailmastimien energiakulutus vastaa taas noin 57.5 %. Pohjailmastimien energiakulutus ja osuus puhdistamon muusta energiakulutuksesta ovat esitettyinä kuvassa 11.



Kuva 11. Pohjailmastuksen energiankulutuksen osuus puhdistamon muista energiankulutuksista.

6.4 Ilmastustehokkuus ja hapensiirtonopeus

Pohjailmastimen hapensiirtonopeus voitaisiin laskea aikaisemmalla yhtälöllä 2.6, mutta kyseinen yhtälö ei ota huomioon ilmastimien erilaista toimintarakennetta. Tämän takia käytetään seuraavaa yhtälöä (Diffused Aeration, s. 3) hapensiirtonopeuden laskemiseen

$$AOTR = SOTR \frac{(\beta \cdot (\frac{p_f}{p_{MSL}}) \cdot c_{sat,T} - c_L)}{c_{sat,20}} \cdot \theta^{T-20} \cdot F \cdot \alpha \quad (6.2)$$

missä

p_f kohteen ilmanpaine [inHg]

P_{MSL} merenpinnan tason ilmanpaine [inHg]

$c_{sat,T}$ veden pinnan konsentraatio käyttölämpötilassa T [mg/l]

$c_{sat,20}$ veden pinnan konsentraatio lämpötilassa 20 °C [mg/l]

Yhtälön 6.2 tarvitsema teoreettinen hapensiirtonopeus SOTR saadaan ratkaistua yhtälöllä

$$SOTR = SOTE \cdot q_m \quad (6.3)$$

missä

$SOTE$	liuenneen hapen siirtotehokkuus puhtaassa vedessä	[mg/l]
q_m	mitoitusilmamäärä kompressorille	[m ³ /h]

Taulukon 6 arvoilla teoreettiseksi hapensiirtonopeudeksi saadaan yhtälöllä 6.3

$$SOTR = 17.66 \frac{g_{O_2}/m^3}{m} \cdot 3.2m \cdot 8663m^3/h \approx 489.6 kg_{O_2}/h$$

Yhtälö 6.2 on siis samantapainen kuin 2.6, mutta siinä käsitellään konsentraatiota $c_{sat,T}$ eri tavalla. Yhtälön 6.2 paineiden suhde P_f/P_{MSL} on lähellä yhtä, koska Varkauden puhdistamon pitäisi olla yli kolmen kilometrin korkeudella merenpinnasta, ennen kuin suhde muuttuisi radikaalisti. Veden pinnan konsentraatio 20 °C hienokupla ilmastimelle on noin 10.1 mg/l, kun ilmastin on 3.2 metrin syvyydellä veden pinnasta (Diffused Aeration, s. 5). Veden pinnan konsentraatio käyttölämpötilassa saadaan 20 °C konsentraation avulla yhtälöllä (Diffused Aeration, s. 5)

$$c_{sat,T} = c_{sat,20} \frac{c_{sat,T}(\text{merenpinnalla})}{c_{sat,20}(\text{merenpinnalla})} \quad (6.4)$$

missä

$c_{sat,T}(\text{merenpinnalla})$ veden konsentraatio merenpinnan tasolla käyttölämpötilassa [mg/l]

$c_{sat,20}(\text{merenpinnalla})$ veden konsentraatio merenpinnalla 20 °C [mg/l]

Yhtälön 6.4 merenpinnan konsentraatiot voidaan katsoa taulukosta D-2 (Tchobanoglous ym. 2003, s. 1747), kun ilmanpaine on 1 atm. Tällä tavoin konsentraatioiksi saadaan $c_{sat,20} = 9.08$ mg/l ja $c_{sat,37} = 6.72$ mg/l, kun puhdistamon lammikon jäteveden lämpötila on 37 °C. Veden pinnan konsentraatioksi käyttölämpötilassa saadaan siis yhtälöllä 6.4

$$c_{sat,37} = 10.1 \text{ mg/l} \cdot \frac{6.72 \text{ mg/l}}{9.08 \text{ mg/l}} = 7.475 \text{ mg/l}$$

Oletetaan likaantumisen korjauskertoimen F olevan noin yksi, jolloin pohjailmastimen hapensiirtonopeudeksi saadaan kaavalla 6.2 ja taulukon 6 korjauskertoimilla

$$AOTR = 489.6 \text{ kg}_{O_2}/h \cdot \frac{(0.97 \cdot 1 \cdot 7.475 \text{ mg/l} - 1 \text{ mg/l})}{10.1 \text{ mg/l}} \cdot 1.024^{37-20} \cdot 0.55 \cdot 1$$

$$AOTR = 249.387 \text{ kg}_{O_2}/h$$

$$AOTR \approx 250 \text{ kg}_{O_2}/h$$

Saadusta hapensiirtonopeudesta voidaan laskea, että pohjailmastuksen siirtonopeus on noin 50 % ideaalisesta hapensiirtonopeudesta. Pohjailmastimien ilmastustehokkuus yksikössä $\text{kg}_{O_2}/\text{kWh}$ on

$$N = \frac{249.387 \text{ kg}_{O_2}/h}{178.947 \text{ kW}}$$

$$N \approx 1.39 \text{ kg}_{O_2}/\text{kWh}$$

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittausten perusteella lammikon alkupään hapen määrä vedessä laskee suuresti ilmastuksen ollessa vain reilun tunnin pois päältä, mikä kuvastaa suurta ilmastustarvetta juuri lammikon alkupäässä. Lammikon hapen kulutukseksi arvioitiin mittausten jälkeen noin $184 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h}$ investoinnin alueella. Saatu tulos on todennäköisesti liian suuri, koska tehtaan kartonkikoneen tuotanto pysähtyi edeltävän yövuoron aikana. Poikkeustilanne näkyy myös hapen kulutuksen arvioinnissa OUR menetelmässä. Esimerkiksi näytepisteessä 2 hapen määrä vaihtelee $9.24\text{--}9.78 \text{ mg/l}$ (Liite 3, sivu 1) veden lämpötilassa $23 \text{ }^\circ\text{C}$, vaikka maksimi hapen määrä pitäisi olla kylläiselle vedelle kyseisessä lämpötilassa 8.56 mg/l . Tämä viittaa siihen, että näytteet olisivat yliaktiivisia, mikä lisää hapenkulutusta. Hapen kulutuksen arvioinnissa tarvittiin ilmastimien vaikutustilavuuksia, jotka jouduttiin arvioimaan puoli vuotta vanhan ilmakuvan perusteella. Mittaushetkellä pintailmastimet eivät silminnähtävästi olleet samoissa kohdissa kuin ilmakuvassa, mikä vaikuttaa lopullisiin tuloksiin. Mittausten alussa uuden happimittarin asetusten kanssa oli myös hieman ongelmia, mikä saattaa aiheuttaa lisää virheitä mittaustuloksiin.

Ilmastimista pohjailmastimella oli suurempi hapensiirtonopeus ja yli kaksinkertaisesti suurempi ilmastustehokkuus kuin pintailmastimella. Pohjailmastimen hapensiirtonopeus ylitti helposti lammikon hapen kulutuksen, mutta pintailmastimien hapensiirtonopeus jäi noin $10 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h}$ alle lammikon hapen kulutuksen. Tämä selittyy osittain liian suureksi lasketulla hapen kulutuksella, mutta todellisuudessa molempien ilmastimien hapensiirtonopeus ja ilmastustehokkuus pitäisi olla hieman suurempia lasketuista arvoista. Korjauskertoimeksi α oltiin arvioitu laskelmissa 0.55 sen arvon vaihdeltaessa $0.3\text{--}1.2$, vaikka se olisi ollut lähempänä 0.65 (Markkula 2017). Kyseinen korjauskerroin ohjaa yhtälön 2.6 mukaan hapensiirtonopeuden suuruutta vahvasti, minkä takia saadut tulokset olisivat todellisuudessa hieman suurempia. Pintailmastimen teoreettinen ilmastustehokkuus N_0 voi olla myös todellisuudessa kirjallisuuden perusteella arvioitua arvoa suurempi, mikä kasvattaisi pintailmastimen hapensiirtonopeutta.

Ilmastimia vertailtaessa on hyvä huomioida niiden toimintaperiaate. Pohjailmastimet aiheuttavat veden kiertoa lammikossa hapen siirron lisäksi, mikä vähentää jäteveden

kiintoaineen kerääntymistä lammikon pohjaan. Pintailmastimien toiminnassa orgaaninen aines ei sekoitu yhtä tehokkaasti kuin pohjailmastimilla, minkä takia kiintoainesta joudutaan ruoppaamaan muutaman vuoden välein lammikon pohjasta. Pohjailmastimilla vähennetään samalla siis ruoppamisesta aiheutuvia kustannuksia.

Puhdistamon vuotuinen energiankulutus laskee noin 930 MWh eli 6.6 % pohjailmastimien investoinnin jälkeen. Investoinnissa pohjailmastimilla on noin 37 %:ia pienempi energiankulutus kuin korvattavilla viidellä pintailmastimella. Tuloksia laskettaessa on oletettu, että 29 pintailmastinta on ympäri vuotuisesti päällä, vaikka todellisuudessa määrä voi olla enemmänkin. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että pohjailmastimen toiminta, energiankulutus ja ilmastustehokkuus ovat pintailmastinta paremmat, minkä takia pohjailmastimia kannattaa käyttää prosessin toimivuuden varmistamiseksi ja kustannusten vähentämiseksi.

8 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön lähtökohtana oli selvittää mittausten avulla Varkauden puhdistamon biologisen lammikon hapenkulutus ja arvioida sen perusteella pinta- ja pohjailmastimien hapensiirtonopeutta ja ilmastustehoa toisiinsa. Tutkimuksissa huomioitiin myös ilmastimien toiminta ja energiankulutus. Työssä käytetyt yhtälöt pohjautuvat kirjallisiin lähteisiin, kun taas yhtälöiden muuttujat laitevalmistajan ilmoittamiin arvoihin ja taulukkoarvoihin. Lammikon hapenkulutus arvioitiin OUR menetelmän avulla.

Lammikon toiminta on monimutkainen systeemi, minkä takia lammikkoa ja sen ilmastimia tutkiessa on tärkeää tietää puhdistamon muut päävaiheet. Näitä päävaiheita ovat jäteveden esikäsitely, selkeyttimet ja lietteenkäsittely, jossa kerätty liete kuivataan jatkokäyttöä varten. Lammikon suorituskykyyn vaikuttaa ilmastimien toiminta ja lammikkoon tulevan jäteveden laatu, mutta samalla lammikosta lähtevä biologisesti puhdistettu vesi vaikuttaa lammikon jälkeisiin vaiheisiin, kuten jälkiselkeyttimen kuormitukseen.

Varkauden biologisen lammikon hapenkulutus on suunnilleen $184 \text{ kg}_{O_2}/\text{h}$ pienellä virhemarginaalilla. Tulosten perusteella vain pohjailmastimen hapensiirtonopeus ylitti lammikon hapenkulutuksen, mutta pintailmastimien hapensiirtonopeus hipoi kuitenkin lähellä kulutuksen rajaa. Jos ilmastimilla ei saada tuotettua lammikon vaatimaa hapen määrää, niin silloin lammikon bakteerit eivät enää suoriudu optimaalisesti. Hapensiirtonopeuden korjauskertoimien valinta vaikuttaa kuitenkin oleellisesti ilmastimista saataviin tuloksiin. Lähteiden, mittausten ja laskujen perusteella pohjailmastin osoittautui toiminnaltaan, energiankulutukseltaan ja ilmastusteholtaan selvästi paremmaksi vaihtoehdoksi kuin pintailmastin.

LÄHDELUETTELO

David F Tilley. 2011. Aerobic Wastewater Treatment Process History and Development. IWA Publishing. ISBN 9781843395423.

Diffused aeration design guide. [Sanitairien sähköinen dokumentti]. [viitattu 13.11.2017].

Ilmakuva. Flootech.

Jätevedenkäsittelyn takuuarvot. 2017. Flootech.

Jätevesien puhdistamo. Stora Enso Oyj Varkauden tehdas. [sähköinen dokumentti]. Päivitetty 20.10.2017. [viitattu 24.10.2017].

Karttunen Erkki. 1998. Vesihuoltotekniikan perusteet. Hakapaino Oy. ISBN 952-13-0407-3.

Mark J. Hammer & Mark J. Hammer Jr. 2004. Water and Wastewater Technology. 5. painos. Carlisle Communications Ltd.

Markkula, Harri. 2017. Ilmastustehokkuuden laskenta. Henkilökohtainen tiedonanto 27.11.2017.

Pakarinen, Tenho. 2017. Puhdistamon energiankulutus. Henkilökohtainen tiedonanto 16.11.2017.

Puhdistamon esittelyaineisto. [Power Point esitys]. [viitattu 1.10.2017].

Roudasoja, Jorma. 2017. Ilmastimien kuormat. Henkilökohtainen tiedonanto 19.10.2017.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 1978. Vedenpuhdistamoiden suunnitteluohjeet.

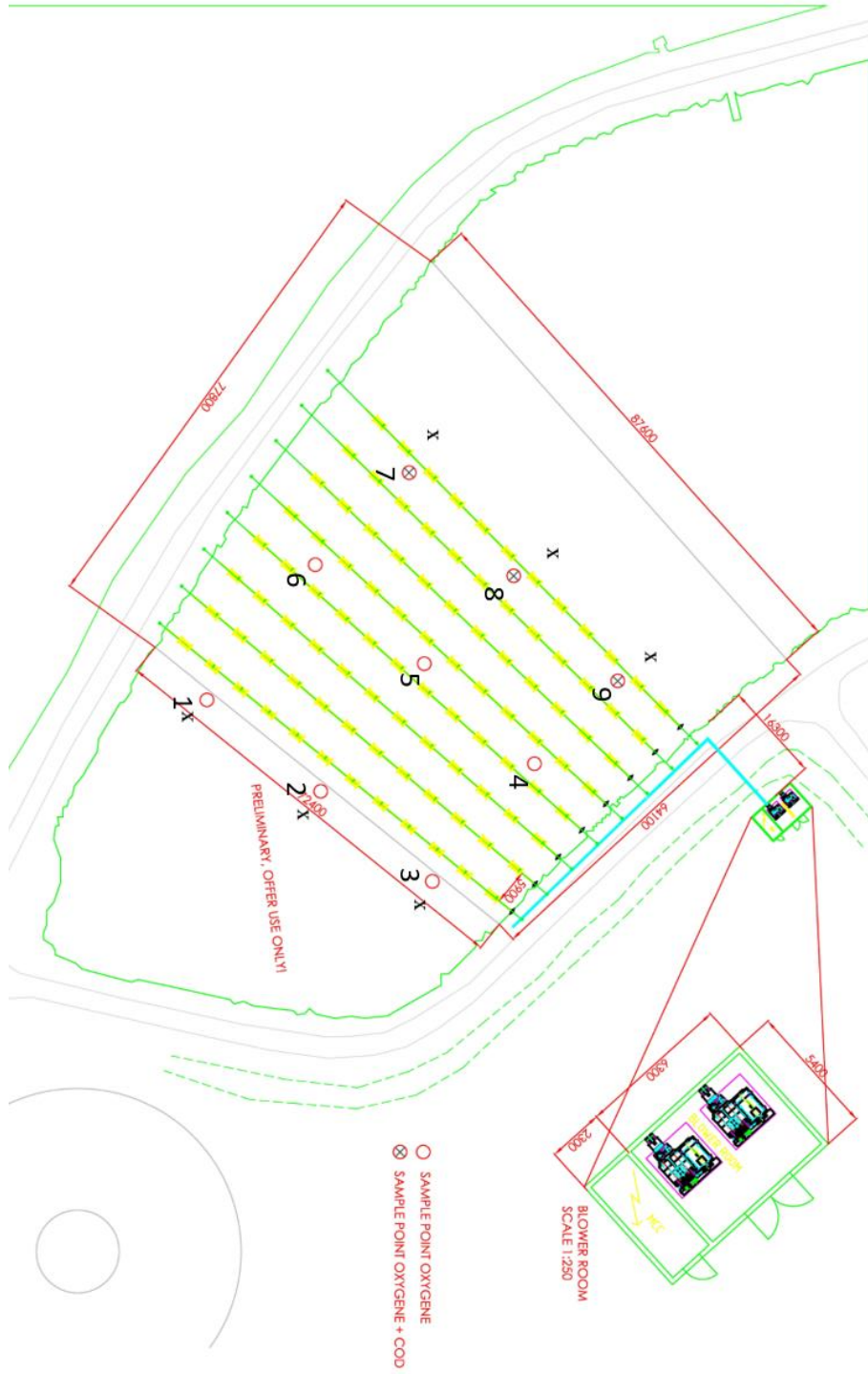
Tchobanoglous G., Burton F. ja Stensel H. 2003. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4. painos. McGraw-Hill Companies Inc. ISBN 0-07-041878-0.

Tekninen erittely. 2017. Flootech.

Ympäristönsuojelulaki 527. [Finlexin www-sivuilta]. Päivitetty 2014. [viitattu 25.10.2017]. Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527#Lidp450407488>

Liite 2: Lammikon alkupään mittauspisteet.



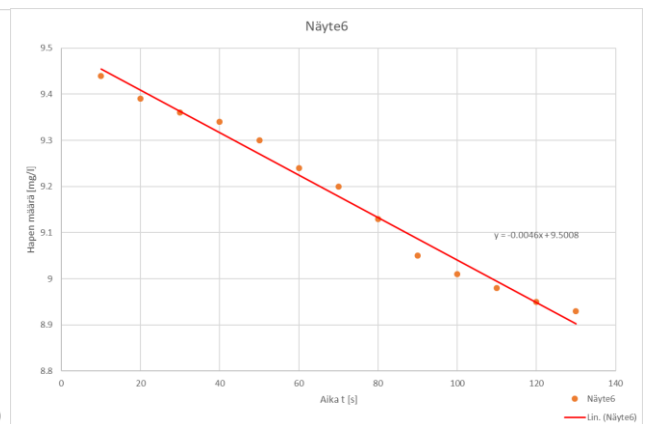
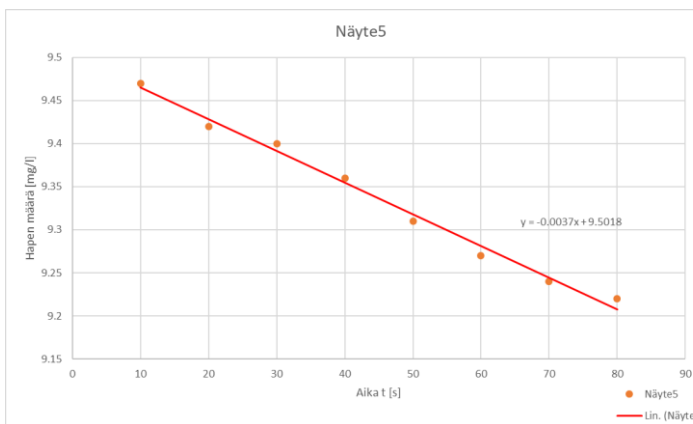
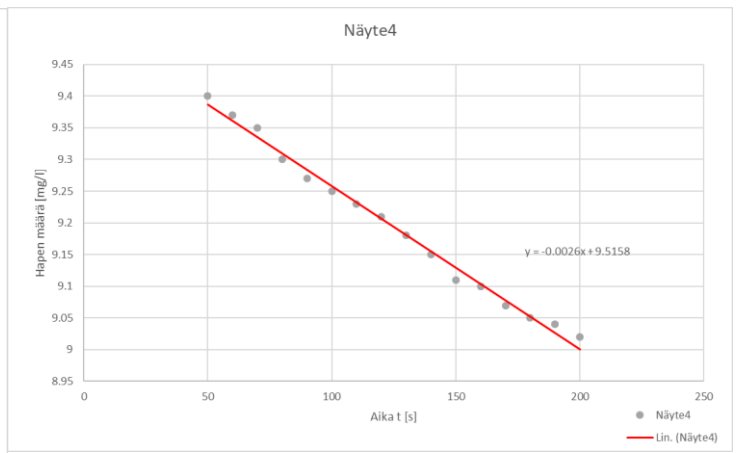
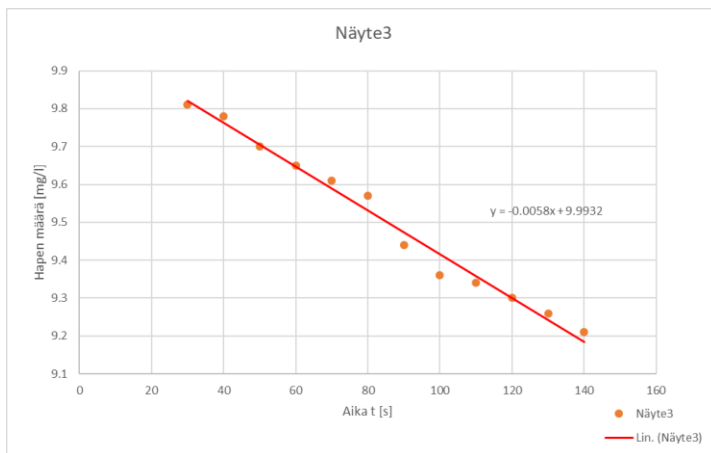
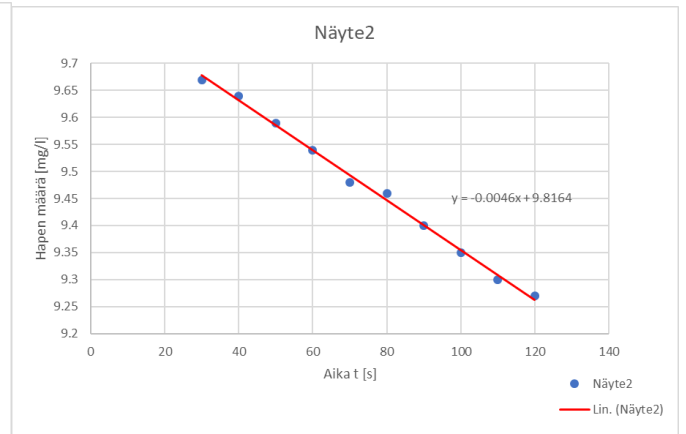
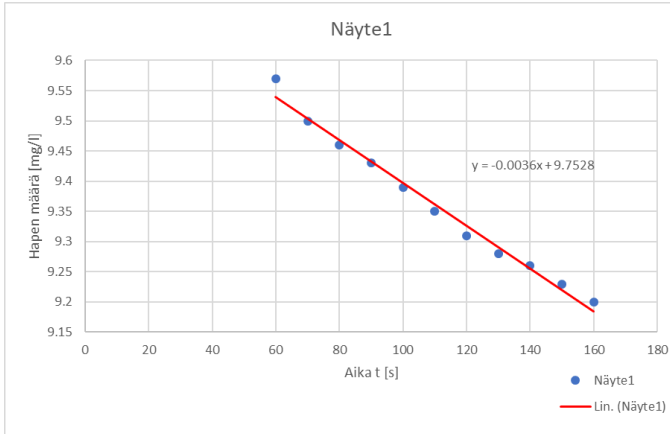
Liite 3: Jäteveden hapen kulutuksen mittaukselliset tulokset.

t [s]	Näyte1 O2 [mg/l]	Näyte2 O2 [mg/l]	Näyte3 O2 [mg/l]	Näyte4 O2 [mg/l]	Näyte5 O2 [mg/l]	Näyte6 O2 [mg/l]	Näyte7 O2 [mg/l]	Näyte8 O2 [mg/l]	Näyte9 O2 [mg/l]
10	10.1	9.78	10.3	9.65	9.47	9.44	9.8	9.64	9.66
20	9.95	9.69	9.92	9.54	9.42	9.39	9.75	9.62	9.56
30	9.83	9.67	9.81	9.5	9.4	9.36	9.71	9.61	9.48
40	9.75	9.64	9.78	9.47	9.36	9.34	9.65	9.59	9.4
50	9.66	9.59	9.7	9.4	9.31	9.3	9.6	9.48	9.34
60	9.57	9.54	9.65	9.37	9.27	9.24	9.54	9.4	9.28
70	9.5	9.48	9.61	9.35	9.24	9.2	9.47	9.37	9.23
80	9.46	9.46	9.57	9.3	9.22	9.13	9.41	9.36	9.18
90	9.43	9.4	9.44	9.27	9.11	9.05	9.35	9.33	9.08
100	9.39	9.35	9.36	9.25	9.1	9.01	9.29	9.29	9.05
110	9.35	9.3	9.34	9.23	9.1	8.98	9.24	9.27	9
120	9.31	9.27	9.3	9.21	9.1	8.95	9.19	9.2	8.95
130	9.28	9.26	9.26	9.18		8.93	9.14	9.19	8.92
140	9.26	9.24	9.21	9.15		8.93	9.1	9.18	8.89
150	9.23		9.2	9.11		8.91	9.06	9.16	8.86
160	9.2			9.1		8.9	9.02	9.13	8.84
170	9.19			9.07		8.89	9	9.1	8.81
180				9.05		8.88	8.96	9.08	8.8
190				9.04		8.86	8.94	9.05	8.78
200				9.02		8.84	8.91	9.03	8.76
T [°C]	17.3	23	19.9	20.7	21.1	21.9	20.7	20.5	20.6

Liite 3: Hapen kulutuksen mittaustulosten lineaarinen osuus.

Näyte1		Näyte2		Näyte3		Näyte4		Näyte5		Näyte6		Näyte7		Näyte8		Näyte9	
t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]	t [s]	O2 [mg/l]
		30	9.67	30	9.81			20	9.42	10	9.44	10	9.8			10	9.66
		40	9.64	40	9.78			30	9.4	20	9.39	20	9.75			20	9.56
		50	9.59	50	9.7			40	9.36	30	9.36	30	9.71			30	9.48
60	9.57	60	9.54	60	9.65	50	9.4	50	9.31	40	9.34	40	9.65			40	9.4
70	9.5	70	9.48	70	9.61	60	9.37	60	9.27	50	9.3	50	9.6			50	9.34
80	9.46	80	9.46	80	9.57	70	9.35	70	9.24	60	9.24	60	9.54	60	9.4	60	9.28
90	9.43	90	9.4	90	9.44	80	9.3	80	9.22	70	9.2	70	9.47	70	9.37	70	9.23
100	9.39	100	9.35	100	9.36	90	9.27			80	9.13	80	9.41	80	9.36	80	9.18
110	9.35	110	9.3	110	9.34	100	9.25			90	9.05	90	9.35	90	9.33	90	9.08
120	9.31	120	9.27	120	9.3	110	9.23			100	9.01	100	9.29	100	9.29	100	9.05
130	9.28	130		130	9.26	110	9.21			110	8.98	110	9.24	110	9.27	110	9
140	9.26			140	9.21	120	9.18			120	8.95	120	9.19	120	9.2	120	8.95
150	9.23					130	9.15			130	8.93	130	9.14	130	9.19		
160	9.2					140	9.11			140	9.1	140	9.1	140	9.18		
						150	9.1			150	9.06	150	9.06	150	9.16		
						160	9.1			160	9.02	160	9.02	160	9.13		
						170	9.07			170	9	170	9	170	9.1		
						180	9.05			180	8.96	180	8.96	180	9.08		
						190	9.04			190	8.94	190	8.94	190	9.05		
						200	9.02			200	8.91	200	8.91	200	9.03		

Liite 4: Jäteveden hapen määrä lineaarisesti ajan suhteen eri näytesteissä.



Liite4,II

