

Jätevedenkäsittelyprosessin reaaliaikainen optinen monitorointi

Jani Tomperi

Oulun yliopisto, Säättötekniikka, PL 4300, 90014 Oulun yliopisto.
Puh. 0294482462, jani.tomperi@oulu.fi, <http://www.oulu.fi/pyosaaen/>

Elisa Koivuranta

Oulun yliopisto, Kuitu- ja partikkelitekniikka, PL 4300, 90014 Oulun yliopisto.
elisa.koivuranta@oulu.fi, <http://www.oulu.fi/pyokuaien/>

Anna Kuokkanen

Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Helsinki.
anna.kuokkanen@hsy.fi, www.hsy.fi

Esko Juuso

Oulun yliopisto, Säättötekniikka, PL 4300, 90014 Oulun yliopisto.
esko.juuso@oulu.fi, <http://www.oulu.fi/pyosaaen/>

Kauko Leiviskä

Oulun yliopisto, Säättötekniikka, PL 4300, 90014 Oulun yliopisto.
kauko.leiviska@oulu.fi, <http://www.oulu.fi/pyosaaen/>

AVAINSANAT Aktiiviliete; ei-lineaarinen skaalaus; kiintoaine; kuva-analyysi; ristivalidointi;

TIIVISTELMÄ

Aktiivilietelaitoksen jäteveden ominaisuuksia monitoroitiin uudella kuva-analyysilaitteistolla ja kuva-analyysituloksia verrattiin jätevedenkäsittelyprosessin mittauksiin visuaalisesti sekä korrelaatioanalyysia käyttäen. Jätevedenpuhdistusprosessin toimivuutta kuvaava biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuus mallinnettiin kuva-analyysituloksia käyttäen. Tutkimus osoitti, että optinen monitorointimenetelmä antaa uutta hyödyllistä tietoa jäteveden ominaisuuksista ja kuva-analyysituloksia voidaan käyttää ennustamaan käsitellyn jäteveden laatua. Optinen monitorointimenetelmä antaa merkittävää lisäarvoa perinteisten prosessimittausten rinnalla prosessin tilan tarkastelussa ja ymmärtämisessä.

1 JOHDANTO

Teolliset ja kunnalliset jätevedet käsitellään yleisesti aktiivilieteprosesseissa, jotka ovat kompleksisia ei-lineaarisia biologisia prosesseja ja alttiita toimintaolosuhteisiin vaikuttaville ulkoisille ja sisäisille häiriöille. Häiriöistä toipuminen voi olla hidasta ja niiden vaikutukset jätevedenpuhdistuslaitoksen toimintaan ja puhdistustulokseen pitkäaikaisia. Oikeanlainen bakteeritasapaino takaa aktiivilieteprosessin tehokkaan toiminnan, jolloin lietteen laskeutuvuus on hyvä ja kiintoaineen määrä käsitellyssä jätevedessä on pieni. Häiriöt bakteeritasapainossa voivat aiheuttaa ympäristöongelmia ja taloudellisia menetyksiä. Kiristyvät jätevesiasetukset ja -lait (EU:n vesipuitedirektiivi, kansalliset säännökset) sekä tarve minimoida käyttökulut pakottavat jätevedenkäsittelylaitoksia panostamaan tarkempaan ja tehokkaampaan prosessinohjaukseen. Tarkan ohjauksen perustana on luotettava on-line-monitorointi. Prosessin toiminnan tehokkuutta on perinteisesti arvioitu mittaamalla esimerkiksi biologista ja kemiallista hapenkulutusta, poistuvan jäteveden kiintoainepitoisuutta tai laskeutuvuutta kuvaavaa lieteindeksiä. Näiden muuttujien mittaaminen osoittaa prosessin tilan kuitenkin vasta, kun korjaavien toimien tekeminen prosessiin on myöhäistä. Kiintoainepitoisuuden tai laskeutuvuuden mittaaminen ei myöskään kerro syitä prosessin huonoon tilaan, toisin kuin flokkien morfologioiden tarkastelu mahdollisesti osoittaa. /1, 2, 3, 4/

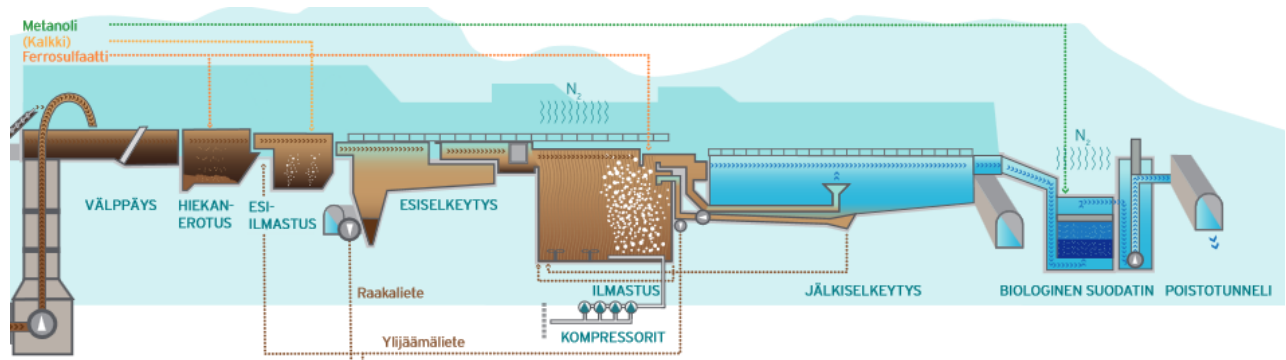
Jäteveden optinen tarkastelu on perinteisesti suoritettu silmämääräisesti mikroskooppia käyttäen. Menetelmä on subjektiivinen, työläs, usein epäsystemaattisesti suoritettu ja pitkäviiveinen, minkä vuoksi useita automaattisia optisia

monitorointi- ja kuva-analyysimenetelmiä on kehitetty jäteveden monitorointiin ja karakterisointiin (ks. Table 1 /3/). Kehitetyistä menetelmistä useat on testattu kuitenkin vain laboratorioissa tai pilot-laitteistolla eivätkä ne sovellu in-situ toimintaan. Tässä työssä käytetty data on kerätty optisella monitorointilaitteistolla, joka on useiden kuukausien testien perusteella todettu toimivaksi flokkien morfologian monitoroinnissa myös täyden mittakaavan aktiivilieteprosessissa /4/. Työssä verrataan aktiivilieteprosessin optisen monitoroinnin tuloksia perinteisiin prosessimittauksiin. Lisäksi biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuudelle tehdään yksinkertainen ennustemalli kuva-analyysimuuttujia hyödyntäen.

2 METODIT JA MATERIAALIT

2.1 Jätevedenpuhdistamo

Optinen mittauslaitteisto keräsi tietoa jäteveden ominaisuuksista yhdeltä yhdeksästä prosessilinjasta Helsingin Viikinmäessä sijaitsevassa Suomen ja Pohjoismaiden suurimmassa jätevedenpuhdistamossa. Rinnakkaisaostusperiaatteella toimivassa kallion sisään rakennetussa aktiivilietelaitoksessa käsitellään Helsingin ja lähikuntien 800 000 asukkaan (85 % kokonaisvirtaamasta) ja teollisuuden (15 % kokonaisvirtaamasta) jätevedet. Puhdistamon kokonaisvirtaama on keskimäärin noin 270 000 kuutiometriä vuorokaudessa, mutta sateet ja sulamisvedet voivat moninkertaistaa virtaaman. Jätevedet puhdistetaan mekaanisesti, kemiallisesti ja biologisesti (Kuva 1). Typenpoistoa on tehostettu biologisella suodattimella, joka perustuu denitrifikaatiobakteerien toimintaan. Prosessin alussa suuret partikkelit poistetaan välppäyksessä. Hiekka sekä vettä kevyemmät rasvat ja öljyt erotetaan jätevedestä ennen esiselkeytystä. Biologinen jätevedenkäsittely alkaa ilmastusaltaassa, jonka alkuosassa käsitelyyn tuleva jätevesi sekoitetaan jälkiselkeytysaltaasta palautettavaan aktiivilietteeseen. Orgaanista ainesta sisältävä biomassa (aktiiviliete) erotetaan käsitellystä jätevedestä jälkiselkeytysaltaasta, josta jätevesi johdetaan biologiseen suodatukseen ja poistotunnelia pitkin mereen. /5/



Kuva 1. Viikinmäen jätevedenkäsittelyprosessin yksikköoperaatiot. /5/

2.2 Optinen monitorointi ja kuva-analyysi

Optinen monitorointi ja kuva-analyysi suoritettiin päivitetyllä laitteistoversiolla ja menetelmillä, jotka on yksityiskohtaisesti kuvailtu julkaisussa /6/. Jätevesinäytteet pumpattiin ilmastusaltaasta ja syötettiin laimennettuna läpi kyvetin, jota kuvattiin korkearesoluutiokameralla. Erityisesti in-situ käyttöön suunniteltu pienikokoinen tutkimuslaitteisto mittaa useita erilaisia flokkien ja rihmojen morfologisia ominaisuuksia. Kokoparametrien, kuten ekvivalenttihalkaisija, flokkikoko ja rihmojen pituus, lisäksi laskettavia muotoparametreja ovat muun muassa fraktaalidimensio, pyöreys ja muototekijä. Parametrit laskettiin yksittäisten objektien keskiarvoina yhdessä kuvassa. Pienten flokkien (<25 µm) lukumäärä laskettiin flokkikokojakauman perusteella. Flokit kategorisoitiin kokoluokkiin niiden ekvivalenttihalkaisijan perusteella. Flokin muototekijä ja pyöreys ovat 1.0 täydelliselle ympyrälle. Objektilla, jolla on epäsäännölliset reunat, on suurempi kehäpituus pinta-alaan nähden ja täten pienempi muototekijä. Pyöreys määrittellään objektin alan suhtena ympyrän ala, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin objektin pituus.

2.3 Datan käsittely ja mallinnus

Useita erilaisia mittauksia sisältävä datasetti täytyy skaalata tai normalisoida ennen data-analyysin suorittamista. Tässä työssä mittausdata skaalattiin välille $[-2, 2]$ käyttäen epälineaarista skaalausmenetelmää, joka perustuu yleistettyihin normeihin, momentteihin ja vinouteen ^{/7/}. Keskenään korreloivien, kohinaisten ja merkityksettömien muuttujien käytön välttämiseksi mallinnuksessa, suoritettiin kaksivaiheinen muuttujavalinta: ensin muuttujat valittiin askeltavalla regressio-menetelmällä, joka lisää yksittäin parhaan muuttujan valittujen muuttujien joukkoon, ja lopullinen muuttujavalinta tehtiin manuaalisesti ottaen huomioon myös korrelaatioanalyysin tulokset.

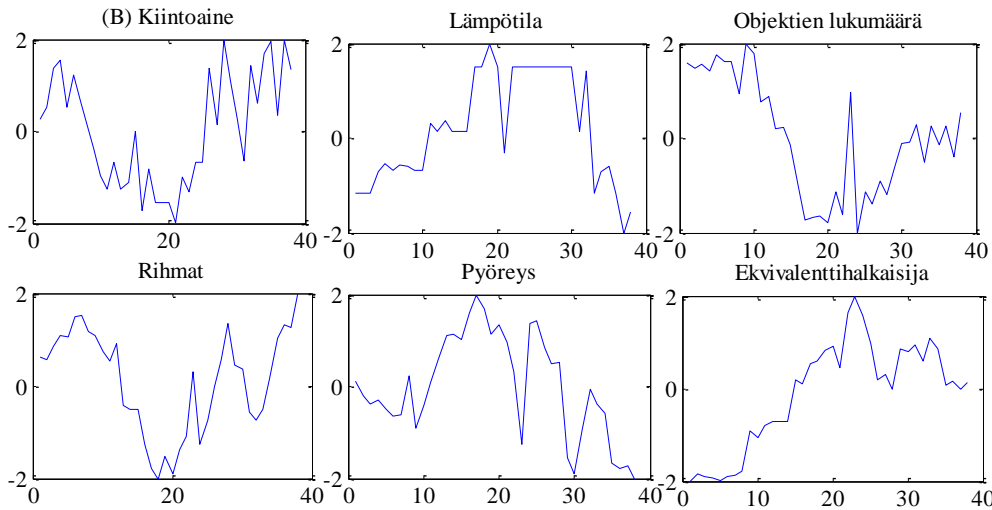
Data-analyysin ja mallinnuksen laadukkuus riippuu hyvin paljon käytettävän datan laadusta ja määrästä. Datan pitäisi sisältää kaikki mahdolliset olosuhteet ja muutokset ja sitä olisi oltava riittävän paljon. Ristivalidointi on käytännöllinen tapa ennustaa mallin hyvyys, kun dataa on vähän eikä erillistä validointidataa ole saatavilla. Ristivalidoinnissa alkuperäinen data jaetaan satunnaisesti yhtä suuriin osiin (k osaa). K kertaa suoritettavassa ristivalidoinnissa malli opetetaan $k-1$ osalla dataa ja yhtä osaa käytetään mallin testaukseen. Lopullinen estimaatti mallista saadaan yhdistämällä k tulosta. ^{/8/}

3 TULOKSET

Työssä käytetty datasarja sisälsi mittauksia noin puolen vuoden jaksolta, jolloin kuva-analyysi suoritettiin lähes päivittäin, toisinaan kaksi kertaa päivässä, mutta laboratoriomittaukset tehtiin vain kaksi tai kolme kertaa viikossa. Koska puuttuvia laboratoriomittausarvoja ei interpoloitu datasarjaan ja osa kuva-analyysikerroista epäonnistui muun muassa näytteenottimen tukkeutumisen vuoksi, lopullinen datasarja sisälsi vain 38 käyttökelpoista mittauskertaa.

Riippuvuuksia kuva-analyysimuuttujien ja prosessimittausten välillä tutkittiin visuaalisen tarkastelun ja korrelaatioanalyysin avulla. Osa analyysituloksista on esitetty laajemmin artikkelissa ^{/9/}. Korrelaatioanalyysin yksiselitteinen tulkinta on haastavaa jätevedenpuhdistusprosessin monimutkaisuuden vuoksi. Jätevesikuorma on osittain riippuvainen vuodenajasta ja virtausnopeudesta. Lietteen laatu ja lietepitoisuus riippuvat voimakkaasti jäteveden kuormasta ja lieteiästä, jota pääsääntöisesti ohjataan lämpötilan eli vuodenaajan mukaan nitrifikaation varmistamiseksi. Lieteikä on yksi tärkeimmistä tekijöistä, jotka määräävät, mitkä bakteerit ovat vallitsevia ja miten nämä bakteerit kasvavat ja muodostavat flokkeja. Jos lieteikä on liian pitkä suhteessa lämpötilaan, rihmojen määrä tyypillisesti kasvaa. Irtonaisten flokkien määrä voi osittain riippua liian pitkästä tai lyhyestä lieteiästä. Myös tulokuormituksen laatu ja vaihtelun suuruus voivat vaikuttaa lietteen ominaisuuksiin. Lämpötilasta riippuvainen anoksinen tilavuus vaikuttaa yhdessä tulevan jäteveden hiili-typpisuhteen kanssa nitraattipitoisuuteen aktiivilieteprosessin jälkeisessä jätevedessä. Muun muassa näiden syy-yhteyksien vuoksi näennäisiä korrelaatioita voi ilmetä analysoitaessa jätevedenpuhdistamon dataa. ^{/9/}

Kuvassa 2 on esitetty biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoaineen ja jäteveden lämpötilan lisäksi lietteen laatua kuvaavia kuva-analyysimuuttujia. Kiintoainepitoisuus seuraa lämpötilan muutosta: kesällä lämpötilan ollessa korkeampi biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuus on alhainen (prosessin tila on hyvä) ja lämpötilan laskiessa syksyllä ja talvella kiintoainepitoisuus kasvaa. Käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuuden ollessa alhainen, rihmojen pituus ja määrä ovat alhaisia, flokkit ovat suurempia ja pyöreämpiä, ja havaittujen objektien määrä on alhaisempi kuin prosessin tilan ollessa huonompi. Tällöin rihmojen pituus kasvaa, flokkien pyöreys vähenee ja havaittujen objektien määrä kasvaa. Lisäksi prosessin tilan ollessa huonompi muun muassa biologisesti käsitellystä jätevedestä mitattujen fosforin, sekä kiintoaineen mukana poistuvien typen ja raudan pitoisuudet ovat korkeammat.



Kuva 2. Prosessimittausten ja kuva-analyysituloksien käyttäytyminen puolen vuoden tarkastelujaksolla.

Korrelaatioanalyysin perusteella kuva-analyysimuuttujat korreloivat useiden prosessimittausten kanssa. Korrelaatiokertoimet eivät kuitenkaan olleet merkittävän korkeita ja suurimmat korrelaatiot tarkastelujaksolla olivat käsitellyn jäteveden kiintoaineen, fosforin ja typen pitoisuuksien kanssa (Taulukko 1). Kuva-analyysimuuttujat korreloivat lisäksi toistensa kanssa. Jäteveden lämpötila, virtaus, lieteikä, lietepitoisuus ja anoksinen osuus ovat jätevedenpuhdistusprosessin kannalta tärkeitä muuttujia, jotka vaikuttavat prosessin toimintaan ja puhdistustulokseen. Näiden muuttujien sekä biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuuden korrelaatiokertoimet on esitetty Taulukossa 2. Lietepitoisuus korreloi voimakkaasti vain lieteiän kanssa (0.64) ja on jätetty pois taulukosta. Jäteveden lämpötila ja virtaus korreloivat usean prosessimittauksen kanssa, mutta virtaus ei korreloi yhdenkään kuva-analyysimuuttujan kanssa. Korrelaatioanalyysin perusteella voidaan todeta, että virtauksen ollessa suuri kaikki tulevasta jätevedestä mitatut muuttujat ovat arvoiltaan pieniä, mikä johtuu sade- ja sulamisvesien laimentavasta vaikutuksesta. Lämpötila korreloi usean kuva-analyysimuuttujan kanssa ja voidaan olettaa, että lämpötilan ollessa korkea rihmojen pituus ja havaittujen objektien määrä on alhainen ja mitattu flokkikoko on suuri. Pidempi lieteikä näkyy suurempana ekvivalenttihalkaisijana. Kuva-analyysin hyödyllisyys voidaan todeta havaitsemalla, että millään ennen ilmastusallasta mitatulla muuttujalla ei ole yhtä korkeaa korrelaatiota kiintoainepitoisuuden kanssa kuin kuva-analyysimuuttujilla pyöreys (-0.57), rihmojen pituus (0.66) sekä rihmojen pituus/flokkien ala eli rihmojen määrä (0.69). Kiintoainepitoisuus korreloi myös useiden biologisesti käsitellystä sekä poistetusta jätevedestä mitatun muuttujan kanssa (rauta, COD, kokonaisfosfori, sekä ammonium-, nitraatti- ja kokonaistyyppi). Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty |0.50| suuremmat korrelaatiokertoimet valituille muuttujille. /9/

Taulukko 1. Kuva-analyysimuuttujien ja prosessimittausten korrelaatiokertoimet.

	Rihmojen pituus	Rihmat/ flokkikoko	Fraktaalidimen- sio	Pyöreys	Ekvivalentihal- kaisija	Objektien lkm
(B) Kiintoaine	0.66	0.69		-0.57		
(L) Fosfaatti	-0.65	-0.64				
(B) Kokonaistyyppi	0.54		0.60		-0.61	0.67
(B) Nitraattityppi	0.52		0.54		-0.50	0.58
(L) Alkaliteetti					-0.65	0.55
(B) pH					0.50	-0.54
(I) Sulfaatti	-0.53		-0.52			
(L) Kloori	-0.60		-0.64	0.55		-0.69
(B) Rauta	0.56	0.54				

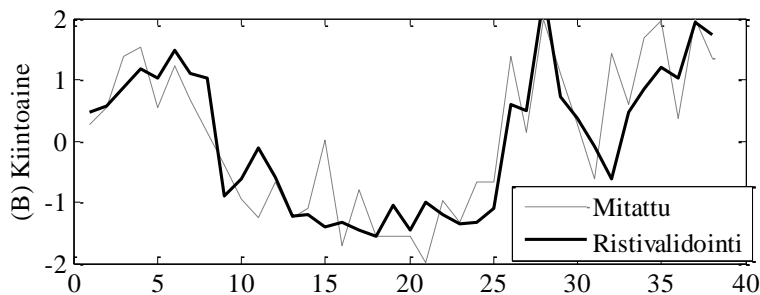
(I) tuleva jätevesi; (B) biologisesti käsitelty jätevesi; (L) lähtevä jätevesi

Taulukko 2. Kuva-analyysimuuttujien ja toimintaolosuhteiden sekä prosessimittausten korrelaatiokertoimet.

	(B) Kiintoaine	Virtaus	Anoksinen osuus	Lämpötila	Lietetika (palautussuhde)	(I) CODCr	(B) Kiintoaine	Virtaus	Lämpötila
Rihmojen pituus	0.66		-0.52	-0.65		(I) CODCr		-0.62	
Rihmat/flokkikoko	0.69					(I) Kiintoaine		-0.59	
Fraktaalidimensio			-0.56	-0.64		(I) Kokonaisfosfori		-0.73	0.58
Pyöreys	-0.57			0.50		(L) Fosfaatti	-0.66		0.53
Ekvivalenttihalkaisija			0.60	0.65	0.60	(I) Kokonaistyyppi		-0.69	0.52
Objektien mediaani ala			0.53	0.64	0.56	(B) Kokonaistyyppi	0.58		-0.56
Objektien lukumäärä			-0.66	-0.66	-0.50	(L) Kokonaistyyppi	0.67	0.55	
Virtaus				-0.59		(I) Ammoniumtyppi		-0.66	0.63
Anoksinen osuus				0.51		(B) Ammoniumtyppi	0.58	0.52	-0.59
Lämpötila		-0.59	0.51			(L) Nitraattityppi	0.56	0.52	
						(I) Alkaliteetti		-0.73	0.53

(I) tuleva jätevesi; (B) biologisesti käsitelty jätevesi; (L) lähtevä jätevesi

Kuva-analyysimuuttujia käytettiin yhdessä prosessimittausten kanssa mallintamaan kiintoainepitoisuus biologisesti käsitellyssä jätevedessä. Tutkimuksessa löydettiin useita muuttujakombinaatioita, joilla kiintoaineen mallintaminen onnistui, mutta tässä esitetään vain yksi malli. Manuaalisesti valitut kuva-analyysimuuttujat olivat jäteveden lämpötilan lisäksi flokkien pyöreys, sekä objektien koon mediaani ja keskiarvo. Ristivalidointimenetelmän selitysaste (R^2) ja virhe (RMSE) olivat 0.74 ja 0.61. Tulosta voidaan pitää riittävän hyvänä kiintoainepitoisuustason tarkasteluun, sillä optinen monitorointi suoritettiin vain yhdellä yhdeksästä heterogeenisestä linjasta, kun taas kiintoaine mitattiin altaasta, joka sisälsi kaikkien linjojen jätevedet. Vaikka mallin avulla ei saada tarkkoja arvoja, se kuitenkin kykenee ennustamaan biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuuden tason ja siinä tapahtuvat muutokset (Kuva 4).



Kuva 4. Mitattu ja mallinnettu kiintoainepitoisuus biologisesti käsitellyssä jätevedessä.

4 YHTEENVETO

Viikinmäen jätevedenpuhdistamon yhtä jätevesilinjaa monitoroitiin uudella optisella laitteistolla. Kuva-analyysistä saatuja tuloksia verrattiin perinteisiin prosessimittauksiin ja niiden välisiä yhtäläisyyksiä etsittiin. Ristivalidointimenetelmällä tarkasteltiin kuva-analyysimuuttujien ja prosessimittausten avulla luodun kiintoainepitoisuusmallin hyvyttä.

Työssä havaittiin, että optisen monitoroinnin muuttujilla on selvä yhteys joidenkin prosessimuuttujien ja puhdistustuloksen kanssa. Esimerkiksi rihmojen pituus ja määrä (rihmojen pituus/flokkien ala-suhde) korreloivat biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuuden kanssa ja ekvivalenttihalkaisija sekä havaittujen objektien lukumäärä korreloivat mitattujen ravinmäärien kanssa. Biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuuden

merkitys puhdistustulokselle on keskeinen ja sillä oli suurempi korrelaatiokerroin kuva-analyysimuuttujien kuin minkään ennen jälkiselkeytysallasta olevan prosessimittauksen kanssa, mikä todistaa optisen monitoroinnin ja kuva-analyysin hyödyllisyyden ja lisäarvon. Yksinkertainen malli kykeni ennustamaan biologisesti käsitellyn jäteveden kiintoainepitoisuustason ja siinä tapahtuvat muutokset kuva-analyysituloksia hyödyntäen. Optinen monitorointi osoittautui tärkeäksi työkaluksi jäteveden ominaisuuksien tarkastelussa ja prosessin toimivuuden ymmärtämisen lisäämisessä. Hyödyt mikroskoopilla tehtyyn tarkasteluun verrattuna ovat merkittävät. Jatkuvatoiminen on-line monitorointi on objektiivinen, informatiivisempi ja nopea havaitsemaan muutokset. Sen avulla muutokset ja niiden mahdolliset aiheuttajat havaitaan ennen kuin ne realisoituvat ongelminä lietteenlaadussa.

Kiitokset

Tämä työ suoritettiin osana CLEEN Oy:n (Cluster for Energy and Environment) vetämää MMEA-tutkimusohjelmaa (Measurement, Monitoring and Environmental Efficiency Assessment).

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Tchobanoglous G., Burton F. L., Stense H. D.: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th edition. 2003, 1819 p.
- /2/ Amaral A.L., Ferreira E.C.: Activated sludge monitoring of a wastewater treatment plant using image analysis and partial least squares regression. *Analytica Chimica Acta* 544(2005), 246–253.
- /3/ Mesquita D.P., Amaral A.L., Ferreira E.C.: Activated sludge characterization through microscopy: A review on quantitative image analysis and chemometric techniques. *Analytica Chimica Acta* 802(2013), 14–28.
- /4/ Koivuranta E, Keskitalo J., Stoor T., Hattuniemi J., Sarén M., Niinimäki J.: A comparison between floc morphology and the effluent clarity at a full-scale activated sludge plant using optical monitoring. *Environmental Technology*, 35(2014)13, 1605-1610.
- /5/ HSY Viikinmäki jätevedenpuhdistamo www.sivu.
<https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Viikinmaki/Sivut/default.aspx>.
- /6/ Koivuranta E, Keskitalo J, Haapala A, Stoor T, Sarén M, Niinimäki J.: Optical monitoring of activated sludge flocs in bulking and non-bulking conditions. *Environmental Technology*, 34(2013) 5-8, 679–686.
- /7/ Juuso E.: Integration of intelligent systems in development of smart adaptive systems: linguistic equation approach. - *Acta Universitatis Ouluensis. Series C, Technica* 476. Oulu. Dissertation. 2013, 258 p.
- /8/ Arlot S., Celisse A.: A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys* 4(2010), 40–79.
- /9/ Tomperi J., Koivuranta E., Kuokkanen A., Juuso E., Leiviskä K.: Real-time optical monitoring of wastewater treatment process. *Environmental Technology*, submitted 2015.