

**Lappeenrannan teknillinen yliopisto**

School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Kandidaatintyö

**TEKNIKAN KANDIDAATINTYÖ**

**DAF-TEKNOLOGIAN EROTUSASTE ERI SOVELLUKSISSA**

Mikko Lamminen

Lappeenranta 2017

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Mikko Lamminen

### **DAF-tekniikan erotusaste eri sovelluksissa**

Kandidaatintyö

Kevät 2017

24 sivua, 14 kuvaa, 3 taulukkoa

Työn tarkastaja: TkT Teemu Kinnarinen

Hakusanat: Jäteveden puhdistus, jäteveden käsittely, CFD -mallinnus, DAF

Tulevaisuudessa maapallon pohjavesialtaista yli puolet on vaarassa tyhjentyä. Vaikutus tulee osumaan voimakkaimmin maapallon tiheimmin asuttuihin sekä köyhimpiin alueisiin. Tästä globaalista ongelmasta johtuen on kehitetty erilaisia menetelmiä raakaveden puhdistamiseksi juomakelpoiseen muotoon sekä jäteveden puhdistamiseksi ympäristölle ystävällisempään muotoon. Puhdistusmenetelmiä on useita, mutta Dissolved Air Flotation(DAF) –tekniikan on havaittu olevan kaikista nykyteknologialla saavutettavissa olevista vaihtoehdoista optimaalisin.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka DAF-yksikön käyttämä vedenpuhdistusprosessi voitaisi saada optimoitua niin, että erotettavien partikkeleiden erotusaste erotusprosessissa olisi mahdollisimman suuri. Prosessin optimoimiseksi käytettiin Computational Fluid Dynamics(CFD) –malleja sekä mallien numeerisia menetelmiä selvittämään tarvittavat parametrit maksimaalisen erotusasteen saavuttamiseksi. CFD –malleilla on selvitetty optimaalinen käytettävä ilmakuplien koko, syöttönopeus sekä ilman tilavuusosuus. Saatujen tulosten perusteella optimoitu erotusprosessi toimisi erotettavilla partikkelikoilla 30-70 µm ilmakuplakoon ollessa 80 µm, ilman syöttönopeuden ollessa 11,8 m/s, kun ilman tilavuusosuus on alle 0,01.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology

School of Engineering Science

Chemical Engineering

Mikko Lamminen

### **The separation degree of DAF technology in different applications**

Bachelor's thesis

Spring 2017

24 pages, 14 figures, 3 tables

Inspector of the thesis: D. Sc. Teemu Kinnarinen

**Keywords:** Dissolved air flotation, wastewater treatment, CFD -modeling

In the future over a half of worlds' groundwater will be in danger to disappear. This will have a major effect in poor and highly inhabited areas. Because of this global problem, there has been several innovations concerning wastewater treatment. Within all available technology in hand, Dissolved Air Flotation (DAF) has been recognized to be the most optimal way to treat wastewaters.

The aim of this study was to find out, how to optimize the water separation process using Dissolved Air Flotation. Optimization in this study was made and analyzed with computational fluid dynamics (CFD) models. According to the results, the separation process is optimized when separating particle size is 30-70  $\mu\text{m}$  with size of 80  $\mu\text{m}$  air bubbles while air loading rate is 11.8 m/s and air fraction being below 0,01.

## SISÄLLYSLUETTELO

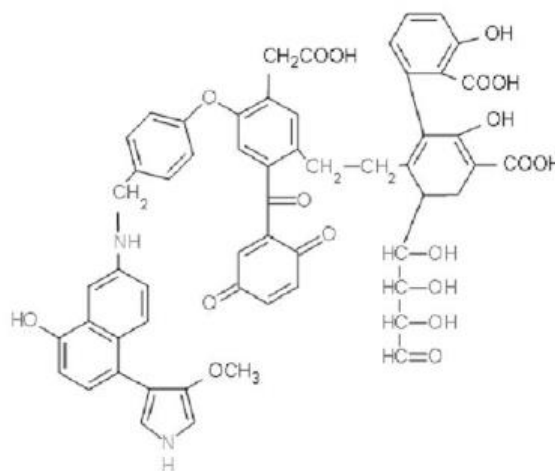
1. JOHDANTO .....	1
2. DAF:n ESITTELY .....	2
2.1    Toimintaperiaate .....	2
2.2    Prosessin optimointi .....	3
2.3    Kerrosvirtaustekniikka .....	4
2.3    CFD –mallinnus prosessin optimoinnille .....	4
2.4    CFD –mallinnuksen jatkotutkimukset .....	9
3. DAF TEOLLISUUDESSA .....	15
3.1    Tankkityypit .....	15
3.2    Suorakulmainen tankki .....	17
3.3    Ympyränmuotoinen tankki .....	17
4. EROTUSMENETELMIÄ ERI KOLLOIDITYYPEILLE.....	18
5. VERTAILU MUIHIN EROTUSMENETELMIIN.....	19
5.1    Sentrifugointi .....	19
5.2    Sedimentointi .....	19
5.3    Rumpusuodatus.....	20
6. VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN .....	21
6.1    Ekologinen jalanjälki .....	21
7. TULEVAISUUS .....	22
8. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	22
9. KIRJALLISUUSVIITTEET .....	24

## 1. JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, kuinka optimoida DAF -teknologian erotusprosessissa käytettävät parametrit siten, että saavutetaan erotusprosessille maksimaalinen erotusaste. Optimoinnin kohteina on prosessissa käytettävien ilmakuplien optimaalinen koko, nopeus sekä kuinka suurta ilman tilavuusosuutta on käytettävä maksimaalisen ilmakupla-partikkeli kosketusajan maksimoimiseksi. Tämä kandidaatintyö on puhtaasti kirjallisuustyö. Asiasisältö on koottu jo tehtyjä tutkimuksia lähteinä käyttäen.

Vedenpuhdistus on ollut jo vuosien ajan globaalisti tunnettu ongelma. Maailmassa olevista vesivarastoista noin 2,5 % on makeaa vettä ja 97,5 % on suolaista merivettä. Olemassa olevasta makeasta vedestä noin 70 % on sitoutuneena lumeen sekä jäähän, jolloin vain noin 1 % makeasta vedestä on suoraan käyttökelpoisessa muodossa. Tästä johtuen ihmiskunta on kehittänyt erilaisia menetelmiä veden puhdistamiseksi juomavedeksi sekä jäteveden puhdistamiseksi erilaisista ihmiselle haitallisista partikkeleista. (YK, 2017)

Viimeisten vuosikymmenten aikana juomavedeksi jakeluun tarkoitettua vettä on pyritty puhdistamaan esimerkiksi humuksesta. Humus voi muodostaa juomaveden desinfiointiin käytettävän kloorin kanssa terveydelle haitallisia tuotteita. Varsinkin Suomessa pintavedet ovat varsin humuspitoisia johtuen maan suuresta suoperäisyydestä. Humus sisältää monia vaikeasti hajoavia yhdisteitä, joten varsinaista rakennekaavaa sille ei voi määrittää. Kuitenkin sillä on olemassa ominaiset funktionaaliset ryhmät, jotka ovat merkittäviä terveydelle haitallisten yhdisteiden muodostumisessa. (Lumat, 2013)



Kuva 1 Esimerkkirakenne humusmolekyylistä. (Loon & Duffy, 2000)

Dissolved Air Flotation (DAF) on menetelmä, jolla pystytään erottamaan jätevedestä pieniä mikro-organismeja kuten leviä, kiinteitä partikkeleita sekä veteen liukenemattomia nestemäisiä yhdisteitä, kuten öljy. Työn rajaus on kuitenkin tehty niin, että keskitytään vain leviin sekä kiinteisiin partikkeleihin. Öljypohjaisten ainesosien sovelluksia on niin paljon ja toimivat pitkälti samalla periaatteella kuin levien ja kiinteiden partikkeleiden menetelmät, että DAF-tekniologian toiminta voidaan esittää näiden kahden osa-alueen avulla.

Tämänhetkisinä analyysi ja simulointimalleilla DAF on optimoitu erittäin erotustehokas verrattuna muihin erotusmenetelmiin. Uusimmilla Computational Fluid Dynamics (CFD) -malleilla on nykypäivän tutkimuksien avulla pystytty havainnollistamaan optimoidun DAF -järjestelmän teoreettisesti tarvittavat parametrit parhaimman erotusasteen saavuttamiseksi. CFD -malli on siis malli, jolla pystytään simuloimaan kaikki prosessiin vaikuttavat tekijät numeerisesti sekä datapankin perusteella. Tavoitteena on siis selvittää, kuinka suuret kuplat sitovat parhaiten partikkeleita ja millä nopeudella, kuinka suurta ilman tilavuusosuutta on käytettävä sekä kuinka maksimoida kupla-partikkeli kosketusaika.

## **2. DAF:n esittely**

### *2.1 Toimintaperiaate*

DAF (Dissolved Air Flotation) on vedenpuhdistuksessa nykypäivinä yleistynyt erotusmenetelmä (Haarhoff, 2008), jossa jätevettä puhdistetaan pienistä veteen liukenemattomista epäpuhtauksista (kolloideista), kuten kiintoainepartikkeleista, öljypohjaisesta materiaalista sekä bio-organismisista eliöistä kuten levistä. Tämä menetelmä on käytännöllinen eritoten juomaveden puhdistuksessa sekä teollisen jäteveden puhdistuksessa. (X. Zhang et al., 1988)

DAF -tekniikan prosessi kokonaisuudessaan on hyvinkin yksinkertainen. DAF -tekniologian toimintaperiaate perustuu ilman paineistamiseen tankkiin, jossa prosessoitavaa jätevettä käsitellään. Räjähdysherkkiä yhdisteitä sisältäviä jätevesiä prosessoidessa käytetään tyypeä räjähdysvaaran minimoimiseksi. Ilma paineistetaan esimerkiksi 3 atm paineeseen ja vapautetaan takaisin normaaliin ilmanpaineeseen (T.-S. Sim et al., 1988). Näin ollen erotusaltaan pohjalle muodostuu ilmakuplia, jolloin kuplien noustessa ylös epäpuhtaudet tarttuvat kuplien pintaan ja näin ollen kulkeutuvat veden pinnalle kiinnittyneinä ilmakuplien

pinnalle. Kuplien saavuttaessa pinnan erotetaan kuplat joko haravoimalla pinta mekaanisella kerääjällä tai käyttäen tiputusmenetelmää, eli kuplat juoksutetaan pudotusreunan yli keruualtaaseen. Jätevedessä olevat kolloidit määrittävät, onko jätevettä esikäsiteltävä ennen varsinaista prosessointia. Esimerkiksi levän poistamista varten tarvitsee prosessoitava jätevesi koagulaatiivista esikäsitelyä (J.K. Edzwald, 1995).

Prosessissa käytetyn veden kierrättäminen on tärkeää energian -ja vedenkulutuksen minimoimiseksi. Jos prosessoitavat partikkelit tarvitsevat esikäsitelyä, on prosessin ensimmäinen vaihe flokkulaatio. Puhdistettava vesi pumpataan patoaltaasta flokkulaatioaltaaseen. Pienen tiheyden ja halkaisijan omaavat partikkelit eivät laskeudu hyvin, joten koagulantin tehtävänä on kiinnittyä kolloidiin ja tiivistää ionista kaksoiskerrosta niin, että kolloidit tarttuvat toisiinsa ja näin ollen saavuttavat suuremman tiheyden kuin vesi, jolloin ne putoavat tankin pohjalle. Yleisimmin käytetyt koagulantit ovat alumiinisulfaatti ( $Al_2(SO_4)_3$ ) ja rautasulfaatti  $Fe_2(SO_4)_3$  (T.-S.Sim et al., 1988).

Flokkulaation jälkeen vesi pumpataan sedimentaatioaltaaseen, jossa koaguloitun veden annetaan laskeutua. Puhtaampi osa vedestä pumpataan tankin yläosasta polymeerinlisäys yksikön kautta suodatusyksikköön. Lisätyn polymeerin tehtävänä on neutraloida puhdistettavan kolloidin sähköinen varaus. Juomaveden puhdistusprosessissa vesi käytetään vielä suodatuksen jälkeen desinfiointialtaassa ja lisätään paikallisesti standardoitu määrä klooria (T.-S.Sim et al., 1988).

Ilmaa, jota käytetään DAF:ssa, voidaan käsitellä kierrätysnopeuden, massan, volyymin ja konsentraation avulla. Kierrätysnopeus/tehokkuus on korvaava parametri syötetylle ilmalle ja näin sitä käytetään mitoitus -ja operaattori parametrina. Käytettävä ilma yleensä ilmaistaan  $m_{ilma}/m_{kiinteä}$ . Tätä käytetään sakeuttamisessa ja lian erottamisessa isoissa konsentraatioissa, mutta se ei ole käytännöllistä pienissä konsentraatioissa erotettaessa kiinteää partikkelia (Sim et al., 1988).

## 2.2 Prosessin optimointi

DAF -tekniikalle on pystytty nykypäivänä kehittämään monia erilaisia malleja prosessin optimoimiseksi. Tällä hetkellä paras malli on saavutettu Computational Fluid Dynamics (CFD) mallinnuksella (Koh and Schwarz, 2003). Mallilla on pystytty optimoimaan käytettävien

ilmakuplien nopeus, tilavuusosuus ja koko, jolloin myös kaksoiskerrosvirtaus on pystytty maksimoimaan (Lakghomi et al., 2012). Toisena tärkeänä ilmiönä DAF –systeemin optimoinnissa on ilmakuplien klusteroituminen, jolla on edesauttavia vaikutuksia poistettavien ilmakuplien kokoon sekä poistonopeuteen. Klusteroitumista tapahtuu kuplien muodostumisvaiheessa sekä niiden noustessa pinnalle. Klusteroitumisilmiötä voidaan tehostaa lisäämällä erotustankkiin esimerkiksi lamellisia levyjä (Amato et al., 2001). Suurien ilmakuplarykelmien on tutkittu tehostavan prosessin erotusastetta (Leppinen and Dalziel, 2004).

### *2.3 Kerrosvirtaustekniikka*

Aiemmin on selvitetty, että horisontaalinen kerrostettu kaksisuuntainen kerrosvirtaus DAF:n erotusyksikössä johtaa suurempaan kuplien poistotehokkuuteen (Lakghomi et al., 2012). Kerrosvirtauksessa prosessissa käytettävät ilmakuplat kulkevat horisontaalisessa kerrostuneessa muodossa erisuuntiin koko tankin leveydellä, joka edesauttaa kiintoainepartikkelien kiinnittymistä ilmakupliin (Edzwald, 2007). Kerrostunut virtausilmiö on kuitenkin mahdollinen vain tietyissä olosuhteissa, jolloin ilman tilavuusosuuden sekä ilman syöttönopeuden muutoksella on vaikutusta alempaan horisontaaliseen ilmakuplavirtaukseen (Lundh et al., 2000-2001).

Kerrosvirtaustekniikka on merkittävässä roolissa prosessin optimoimisessa. Kerrosvirtauksen avulla pystytään kasvattamaan DAF –teknologian erotusastetta merkittävästi. Analyttisesti on saatu jonkinlainen käsitys kerrosvirtauksista, mutta vasta myöhemmin CFD –malleilla saadut tulokset ovat näyttäneet kerrosvirtauksen merkityksen (B. Lakghomi et al., 2015).

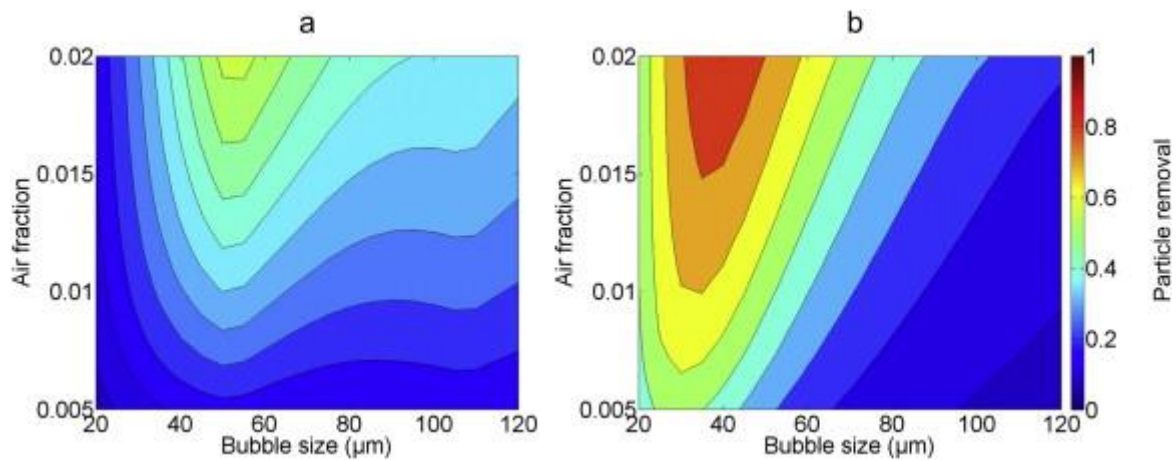
### *2.4 CFD –mallinnus prosessin optimoinnille*

Ensimmäisessä CFD –mallissa oli määritetty kerrostuneen virran vaikutusta kiintoainepartikkelien poistamiseen. Mallissa oli käytetty 10 µm partikkelikokoa ja kuplakokoa 20-120 µm sekä ilmalle tilavuusosuutta 0,005–0,02. Nämä arvot ovat ominaisia juomaveden puhdistukseen käytettävässä DAF laitteistossa (Edzwald, 2010).

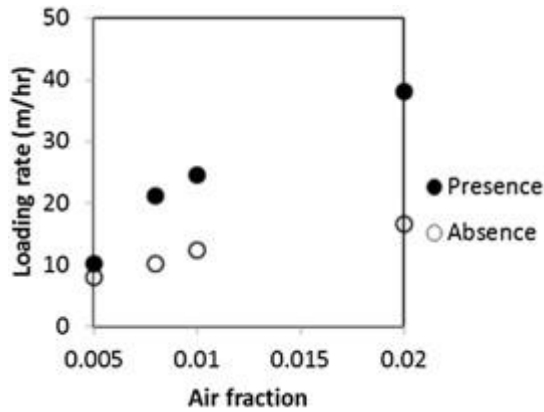
Kuvassa 2 osoitetaan, miten partikkelien tarttumiskyky muuttuu kerrostamattoman ja kerrostuneen ilmakuplavirtausilmiön läsnä ollessa. Tuloksista voi huomata, että ajettaessa



prosessia kerrostunutta virtausilmiötä hyödyntäen keskimääräinen partikkelienpoisto kasvoi 52 % (Lakghomi et al., 2012). Kuvassa 3 nähdään syöttönopeuden ja käytettävän ilman tilavuusosuuden muutoksen aiheuttama ilmakuplien talteenoton tehokkuuden muutos ajettaessa prosessia kerrostamattomalla sekä kerrostetulla virtaustekniikalla, kun partikkelierotusaste on 60 %. Jos lisätään vielä toinen horisontaalinen virtauskerros, on kupla/partikkeli rykelmien muodostumisen nopeudenkasvu todennäköisempää erotusalueella, jolloin erotusaste kasvaa. Näin ollen voidaan CFD -mallin perusteella todeta, että toisen virtauskerroksen lisääminen parantaa erotusastetta samalla lailla kuten edellisessä raportissa on todettu (Lakghomi et al., 2012).

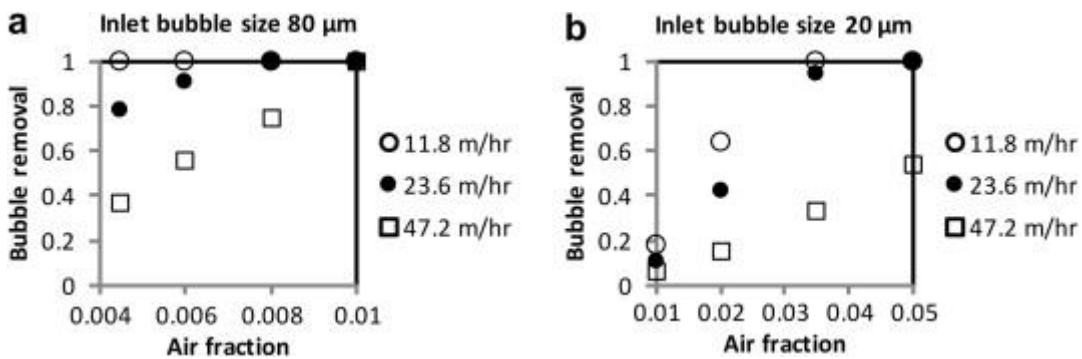


Kuva 2 CFD -mallilla laskettu ilman tilavuusosuuden ja kuplien koon vaikutus partikkelien poistoon (Lakghomi et al., 2012). a) ilman kerrostettua virtausta b) kerrostetulla virtauksella. Partikkelikoko 10 µm, tiheys 1100 kg/m<sup>3</sup>, partikkeli volyyymi 0,0001, syöttönopeus 23,6 m<sup>3</sup>/h.



Kuva 3 Ilmakuplien talteenoton tehokkuuden muutos, kun muutetaan syöttönopeutta ja ilman tilavuusosuutta käyttäen kerrostettua ja kerrostamatonta virtaustekniikkaa. (Lakghomi et al., 2012)

Teoriassa horisontaalisten virtauskerroksien muodostuminen erotusalueella edesauttaisi kuplien talteenottoa DAF systeemissä ja että ilmakuplien rykelmöityminen lisäisi horisontaalisen virtauskerroksien hyötyvaikutuksia (Edzwald, 2007). CFD -mallia oli käytetty näiden vaikutusten selvittämisessä realistisissa olosuhteissa soveltamalla menetelmään kuplien määrän tasapainottamiseen käytettävää mallia, joka edesauttaa ilmakuplien klusteroitumista. Kuplien erotusasteet eri ilman tilavuusosuuksilla ja syöttönopeuksilla CFD -mallinnuksella on esitetty kuvassa 4.



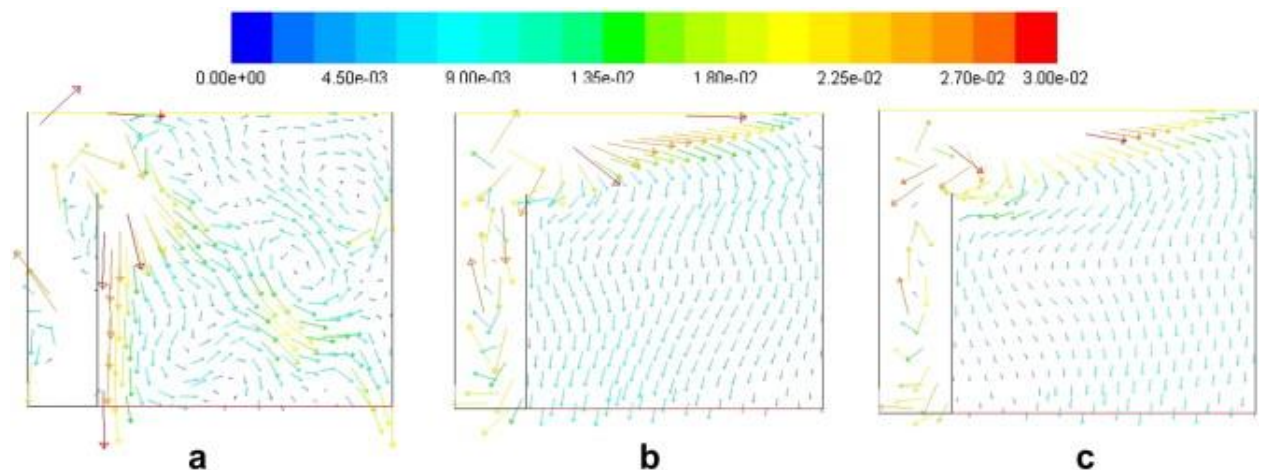
Kuva 4 Syöttövirran ilman tilavuusosuuden vaikutus kuplien talteenottoon eri syöttövirroilla, kun sovelletaan kuplien tasapainoitussmallia. a) Syöttövirran kuplakoko 80 μm b) Syöttövirran kuplakoko 20 μm (Lakghomi et al., 2012).

Kuvasta 3 voi nähdä, että kuplien erotustehokkuus kasvoi kasvattamalla ilman tilavuusosuutta systeemissä. Tämä johtuu siitä, että suuremmalla ilmaosuudella systeemissä kuplien

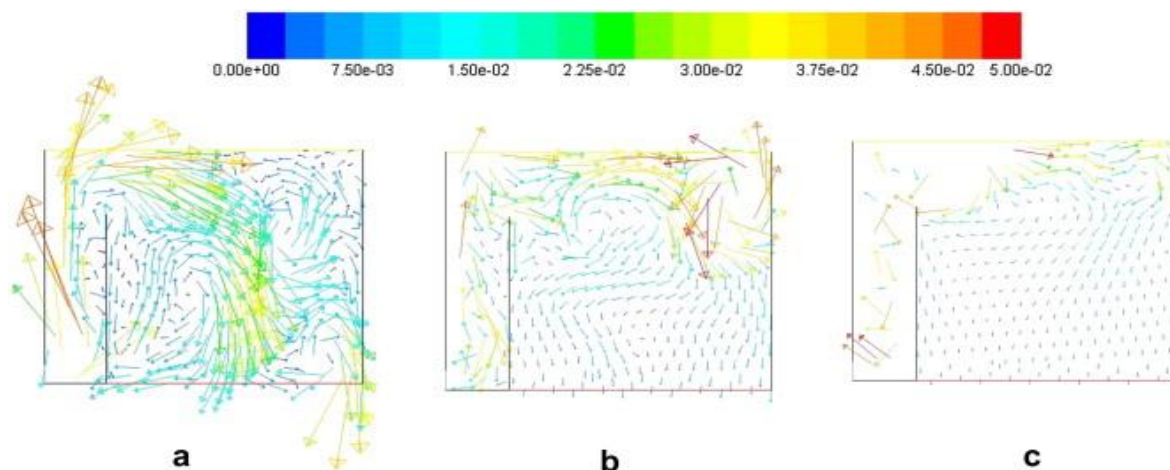
klusteroituminen lisääntyy, jolloin kuplat saavuttavat suuremman nopeuden suuremman kokonaistilavuuden vuoksi ja ovat täten helpommin ja nopeammin kerättävissä. (R. Hofmann et al., 2012).

Lisäksi oli huomattu, että jos systeemiä oli käytetty ilman kuplien klusteroitumista aiheuttavaa tasapainotusmenetelmää, syöttövirran kasvattaminen vähensi kuplien erottamista. Paras erotustulos oli saatu syöttövirran kuplakoolla  $80\ \mu\text{m}$ , kun syöttövirran nopeus oli  $23,6\ \text{m/h}$  ilman tilavuusosuudella  $0,008$  ja vastaavasti  $47,2\ \text{m/h}$  syöttövirralla ilman tilavuusosuudella  $0,01$  (B. Lakghomi et al., 2012).

CFD -mallinnuksella saadut tulokset osoittavat, että tämä käännteinen kerrosvirtaus vahvistuu, kun ilman tilavuusosuutta lisätään. Käännteistä kerrosvirtausta oli tutkittu  $23,6\ \text{m/h}$  syöttövirralla ja kolmella eri ilman tilavuusosuudella kuplakoille  $20\ \mu\text{m}$  ja  $80\ \mu\text{m}$ . Tuloksista voi huomata, että tietty ilman tilavuusosuus tarvitaan, jotta kerrostunutta virtausta havaitaan ja tuloksia voidaan verrata aikaisempien tutkimusten tulosten kanssa (Lundh et al., 2001). Saadut virtausnopeusvektorit on esitetty kuvissa 5 ja 6.

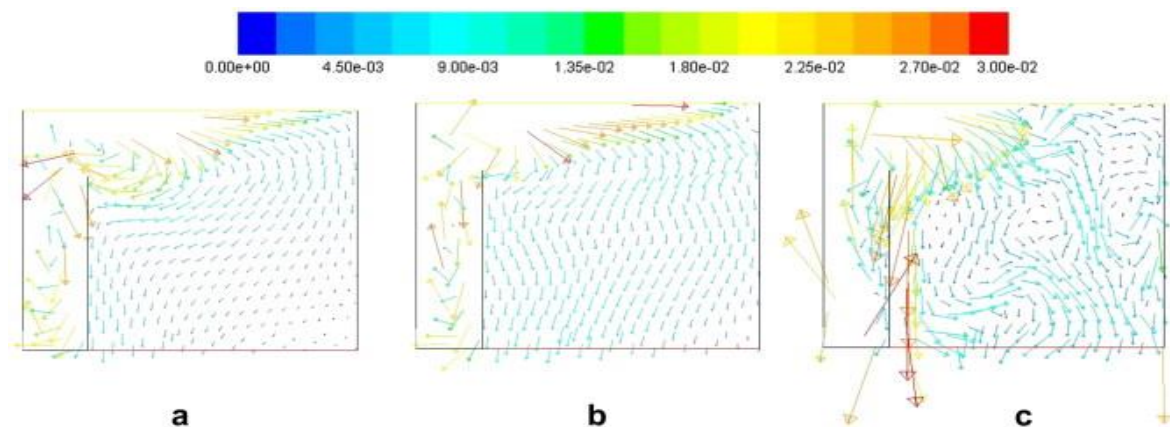


Kuva 5 Virtauksen nopeusvektorit ( $0\text{--}0,03\ \text{m/s}$ ) kuplien klusteroitumistekijän läsnäollessa a) Ilman tilavuusosuus  $0,005$  b) Ilman tilavuusosuus  $0,008$  c) Ilman tilavuusosuus  $0,01$ . Syöttönopeus  $23,6\ \text{m/h}$ , syötettävien kuplien koko  $80\ \mu\text{m}$ . (B. Lakghomi et al., 2012).



Kuva 6 Virtauksen nopeusvektorit (0-0,05 m/s) kuplien klusteroitumistekijän läsnä ollessa ja ilman tilavuusosuutta muuttamalla. a) Ilman tilavuusosuus 0,01 b) Ilman tilavuusosuus 0,035 c) Ilman tilavuusosuus 0,05. Syöttönopeus 23,6 m/h, syötettävien kuplien koko 20  $\mu\text{m}$ . (B. Lakghomi et al., 2012).

Tutkittaessa DAF:n erotusasteen optimointiin tarvittavia ilmiöitä oli tutkittu myös syöttönopeuden muutoksen vaikutusta kerrostuneeseen virtaukseen. Oli huomattu, että syötössä olevien kuplien koon ollessa 80  $\mu\text{m}$  oli saatu paras tulos syöttönopeudella 11,8 m/h. Kun syöttövirran nopeutta oli kasvatettu, pystyi havaitsemaan, että kerrosvirtausilmiö ei ollut enää stabiili suuremmilla syöttövirtausnopeuksilla. Virtausnopeudella 23,6 m/h oli havaittu jo merkittävää epästabiilisuutta ja 47,2 m/h virtausnopeudella käänteinen kerrosvirtaus tuhoutui täysin. Tämän mallin virtausnopeusvektorit on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 Virtauksen nopeusvektorit (0-0,03 m/s) kuplien klusteroitumistekijän läsnä ollessa ja ilman syöttönopeutta muuttamalla. a) 11,8 m/h b) 23,6 m/h c) 47,2 m/h. Ilman tilavuusosuus 0,008 ja ilmakuplien koko 80  $\mu\text{m}$ . (Lakghomi et al., 2012).

Ilman käyttöönotto DAF-laitteiston erotusyksikössä mahdollistaa käänteisen horisontaalisen ilmakuplakerrostuman muodostumisen jo olemassa olevan kerrostuman alle (Lakghomi et al., 2012). Analyttisessä mallissa oli huomattu tällaisen ilmiön olevan, mutta CFD-malli osoitti pätevästi, että tämä toinen kerros johtaa kuplien poistamisen tehostumiseen. Tehostuminen tapahtuu parhaiten, kun kuplien rykelmöityminen otetaan huomioon (Lakghomi et al., 2015).

CFD-mallinnus osoitti, että suuremmat kuplat samalla ilman tilavuusosuudella edesauttaisivat horisontaalista virtauskuviota (Lakghomi et al., 2012). Ilman tilavuusosuuden lisääminen systeemissä lisäsi kuplien klusteroitumista muodostaen suurempia kuplia sekä muodostaen käänteisen kerrosvirtausilmiön. Oikean DAF-systeemin optimoimiseen tarvitaan tarkkaa CFD-menetelmää ja on huomioitava hydraulikan merkitys simuloinnissa. Kun tarkka CFD-analyysi on saatavilla, on käytännöllistä käyttää sitä prosessin optimoimiseen ja näin ollen vähentää kalliiden kokeellisten testien määrää (Lakghomi et al., 2012).

### *2.5 CFD-mallinnuksen jatkotutkimukset*

Edellinen kaksivaiheinen (ilma/vesi) CFD-malli ehdotti, että ilman tilavuusosuuden lisääminen edesauttaisi kerrosvirtausta ja näin ollen lisäisi erotusastetta (B. Lakghomi et al., 2012). Jatkomallinnukset CFD-menetelmällä rakentuvat tämän teorian päälle lisäämällä systeemiin erotettavia partikkeleita sekä klusteroitumisen vaiheita. Näitä lisäyksiä analysoimalla oli selvitetty ilman tilavuusosuuden ja kuplien koon merkitys kiintoainepartikkeleiden erotustehokkuuteen (B. Lakghomi et al., 2015).

Uusi CFD-malli osoitti, että liian suuret kuplat ja klusterit erottuvat liian nopeasti ja näin ollen kupla-partikkeli kosketusaika on liian lyhyt (B. Lakghomi et al., 2015). Liian suuret kuplat eivät tunkeudu erotusalueelle, jossa niiden tehtävänä on edesauttaa kerrostunutta virtausilmiötä. Kerrostunut virtausilmiö muodostuu siis ilmakuplista tietyissä olosuhteissa sekä tiheyseroista (Lundh et al., 2001).

Kuplien koon suurentaminen sekä ilman tilavuusosuuden lisääminen tiettyyn pisteeseen asti edesauttaa merkittävästi kerrostunutta virtausilmiötä, mutta tämän pisteen ylitettyä ilman tilavuusosuuden sekä kuplakoon lisäys aiheuttaa liian nopean kuplien erotuksen, jolloin kerrostunutta ilmakuplavirtausta ei pysty muodostumaan ja näin ollen erotusaste romahtaa (Lundh et al., 2000-2001).

Saadut tulokset erotusasteen vaihtelulle ilman tilavuusosuutta sekä kuplakokoa muuttamalla on esitetty taulukossa I.

Taulukko I Partikkelien erotusasteen muutos, kun muutetaan kuplan kokoa sekä ilman tilavuusosuutta vakio syöttövirralla 11,8 m/h (Lakghomi et al., 2015).

<b>Kuplakoko/Ilman tilavuusosuus</b>	<b>0,005</b>	<b>0,008</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>
20 µm	0,08	0,10	0,27	0,35
40 µm	0,33	0,36	0,38	0,57
80 µm	0,55	0,70	0,40	0,22
120 µm	0,23	0,28	0,21	0,19

Kuten taulukosta I huomataan, paras erotusaste partikkeleilla oli saavutettu kuplakoolle 80 µm ilman tilavuusosuuden ollessa 0,008.

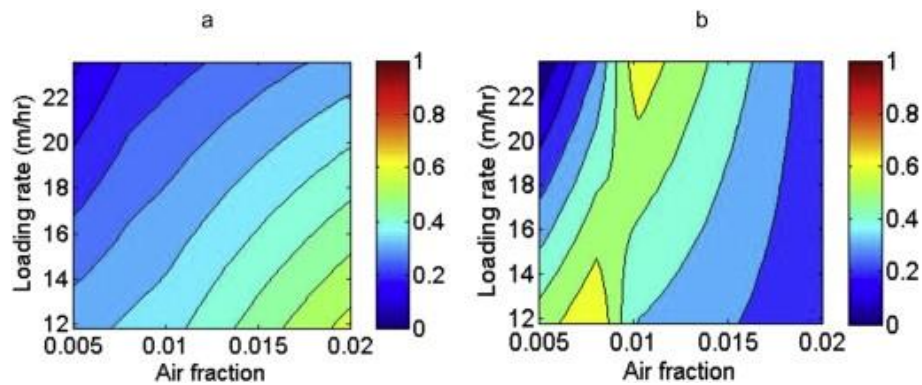
Sama mallinnus oli tehty toisen kerran syöttövirran ollessa 23,6 m/h. Saadut tulokset on esitetty taulukossa II.

Taulukko II. Partikkelien erotusasteen muutos, kun muutetaan kuplan kokoa sekä ilman tilavuusosuutta vakio syöttövirralla 23.6 m/h (Lakghomi et al., 2015).

<b>Kuplakoko/Ilman tilavuusosuus</b>	<b>0,005</b>	<b>0,008</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>
20 µm	0,01	0,02	0,09	0,23
40 µm	0,14	0,21	0,23	0,32
80 µm	0,02	0,30	0,67	0,24
120 µm	0,00	0,25	0,48	0,20

Tätä CFD mallia voidaan siis käyttää tarvittavan optimoidun ilman tilavuusosuuden selvittämisessä. Mallia oli sovellettu kuplien koille 40  $\mu\text{m}$  ja 80  $\mu\text{m}$ . Molemmissa tapauksissa voi huomata, että syöttövirran nopeuden lisääminen tarkoittaa myös ilman tilavuusosuuden lisäämistä, jotta yhtä tehokas partikkelierotus pystytään säilyttämään (Lakghomi et al, 2015).

Oleellista prosessissa on kerrosvirtausilmiö, jonka saavuttamiseksi täytyy lisätä ilman tilavuusosuutta ja näin ollen kuplien määrää kupla-partikkeli kosketusajan ollessa lyhyempi DAF -systemin kontaktialueella (Lakghomi et al., 2015). Näillä kuplakoilla saadut tulokset on esitetty kuvassa 8.



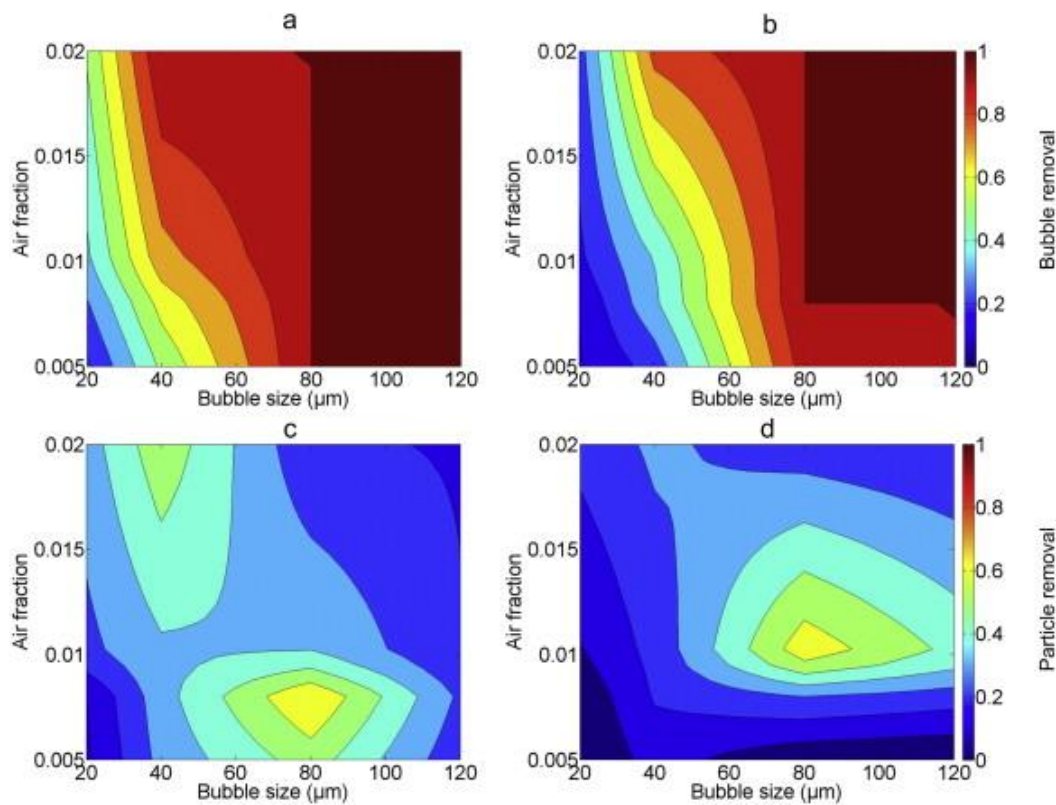
Kuva 8 Ilman tilavuusosuuden ja syöttönopeuden merkitys partikkelierotukseen. a) kuplien koko 40  $\mu\text{m}$ , b) kuplien koko 80  $\mu\text{m}$ . Partikkelikoko 10  $\mu\text{m}$ , tiheys 1000  $\text{kg}/\text{m}^3$  ja tilavuusosuus 0,0001. (Lakghomi et al., 2015).

Tätä CFD mallia oli käytetty siis optimaalisimman kuplakoon löytämisessä maksimaalisen partikkelierotuksen saavuttamiseksi. Mallia oli käytetty myös muuttamalla syöttövirran nopeutta ja näin ollen analysoimalla sen vaikutusta partikkelierotukseen. Saaduista tuloksista pystyi havaitsemaan, että kuplien koon kasvattaminen todellakin kasvattaa kuplien erotusastetta, kuten aikaisemmin oli jo todettu (Lakghomi et al., 2012). Kuvan 8 osioista c ja d voi huomata, että partikkelien erotusaste kasvoi tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen oli havaittu erotusasteen laskua. Tämä tulos on yhtenevä myös analyttisesti saatuihin tuloksiin, joten teoriaa oli voitu pitää paikkansa pitävänä. Ilman tilavuusosuuden ollessa yli 0,01 oli paras erotusaste 40  $\mu\text{m}$  kokoisille kuplille, kun taas ilman tilavuusosuuden ollessa alle 0,01 paras erotusaste oli havaittu olevan 80  $\mu\text{m}$  kuplille (Lakghomi et al., 2015).



Nämä tulokset noudattivat myös analyyttisesti saatuja tuloksia (Lakghomi et al., 2012). Kuitenkin partikkelien erotusasteen pieneminen tämän pisteen jälkeen riippuu kupla–partikkeli kontaktista sekä erotusalue mekaniemeista. Liian suuret kuplat tarkoittavat sitä, että erotustankkiin mahtuu vähemmän kuplia tilavuusyksikköä kohti, jolloin kupla–partikkeli kontaktin frekvenssi pienenee (Lakghomi et al., 2015).

Suuremmat kuplat saavuttavat kuitenkin suuremman nopeuden, joten ne nousevat nopeammin pinnalle ja näin ollen kuplien erotus tapahtuu nopeammin (Hedberg et al., 1998). Tästä johtuen kontaktiaika kuplien ja partikkelien välillä pienenee, joten partikkeleilla ei ole yhtä paljon aikaa kiinnittyä kupliin ja näin ollen partikkelien erotusaste pienenee (Lakghomi et al., 2012). Isoimmat kuplat eivät myöskään pysty tunkeutumaan erotusalueelle, jossa kerrosvirtausilmiötä käytetään hyväksi. Tämä niin ikään aiheuttaa kupla–partikkeli kontaktin häilymistä. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9 Partikkelien sekä kuplien erotusaste, kun muutetaan ilman tilavuusosuutta sekä kuplien kokoa käyttäen CFD mallia. a) kuplien erotus syötöllä 11,8 m/h b) kuplien erotus syötöllä 23,6 m/h c) partikkelierotus syötöllä 11,8 m/h d) partikkelierotus syötöllä 23,6 m/h. Käytetty partikkelikoko 10  $\mu\text{m}$  tiheydellä 1000  $\text{kg}/\text{m}^3$  tilavuusosuuden ollessa 0,0001 (Lakghomi et al., 2015).



Käytettyä CFD mallia oli sovellettu selvittämään partikkelien klusteroitumisen eroja DAF:n erotusalueella ja kontaktialueella. Oli huomattu, että suuri osa klusteroitumisesta tapahtuu kontaktialueella ilman tilavuusosuuden sekä syöttövirran vaihdellessa. Oli huomattu kuitenkin, että klusteroitumista tapahtuu enemmän erotusalueella, kun kuplien koko on optimoitu, jolloin kuplat pystyvät tunkeutumaan erotusalueelle ja näin ollen pystyvät muodostamaan kerrosvirtausilmiön, joka edesauttaa kupla-partikkeli kontaktia ja näin ollen kasvattaa erotusastetta. Saadut tulokset partikkelien klusteroitumisesta erotusalueella on esitetty prosentteina taulukossa III.

Taulukko III. Partikkelien klusteroituminen eri ilman tilavuusosuuksilla sekä kuplakoilla syöttövirran ollessa vakio 11,8 m/h. Partikkelikoko 10 µm tiheydellä 1100 kg/m<sup>3</sup>, partikkelien tilavuusosuuden ollessa 0,0001 (Lakghomi et al., 2015).

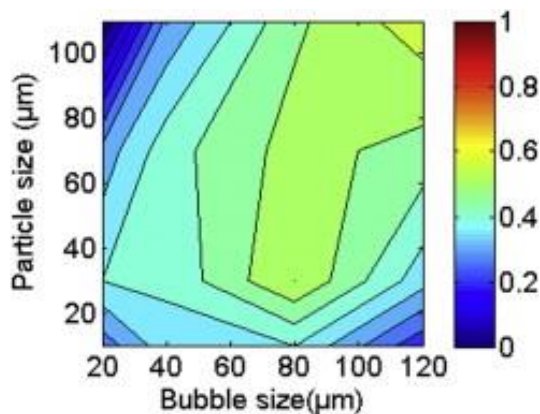
<b>Kuplakoko/Ilman tilavuusosuus</b>	<b>0,005</b>	<b>0,008</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>
20 µm	22 %	13 %	16 %	18 %
40 µm	11 %	16 %	22 %	33 %
80 µm	42 %	33 %	11 %	18 %
120 µm	17 %	24 %	10 %	12 %

CFD mallia oli käytetty selvittämään optimaalisin ilman tilavuusosuus maksimaaliseen partikkelien erotuksen tehostamiseen. Partikkelien erotus tehostui ilman tilavuusosuuden kasvaessa tiettyyn pisteeseen asti, mutta romahtaa tietyn pisteen jälkeen. Tämän pisteen voimme nähdä kuvasta 8 osioista c ja d. Käytettäessä vakiosyöttövirtaa 11,8 m/h, maksimaalinen erotusaste oli saavutettu ilman tilavuusosuuden ollessa 0,008 ja kuplan koon ollessa 80 µm. Toisessa mallinnuksessa syöttövirran ollessa 23,6 m/h, maksimaalinen erotusaste partikkeleille oli saavutettu ilman tilavuusosuuden ollessa 0,01-0,012 kuplakoilla 80-100 µm.

Optimoitu ilman tilavuusosuus aiheuttaa ilmiön, jossa kuplan pystyvät tunkeutumaan erotusalueelle mahdollisimman tehokkaasti ja näin ollen edesauttaen kerrosvirtausilmiön syntymistä. Kerrosvirtauksen johdosta kupla-partikkeli kontaktien määrä kasvaa.

Ilman tilavuusosuuden maksimipisteen jälkeen kuplat muodostuivat liian nopeasti ja näin ollen erottuivat jo kontaktialueella ilman, että tunkeutuivat erotusalueelle. Tämän pisteen yläpuolella kuplien määrä kontaktialueella on liian suuri, jolloin kuplien todennäköisyys kiinnittyä partikkeleihin laskee. Kuplat kiinnittyivät toisiinsa nousten ylös ilman haluttuja partikkeleita ja näin ollen systeemistä poistetut kuplat eivät ajaneet prosessin etua partikkelien poistossa (Lakghomi et al., 2015).

Viimeisenä CFD mallinnuksena oli käytetty ennakoimaan erotettavien partikkeleiden kokoa ja koon vaikutusta partikkelien erotusasteeseen. Kuten aikaisemmassa mallissa jo oli perusteltu (Lakghomi et al., 2012), optimaalinen partikkelikoko kasvaa, kun kuplien koko kasvaa. Kuplakoon ollessa maksimissaan 80  $\mu\text{m}$ , oli optimaalisin partikkelikoko välillä 30-70  $\mu\text{m}$  (Lakghomi et al., 2015). Kuitenkin kun kuplien kokoa oli kasvatettu yli 80  $\mu\text{m}$ :iin, partikkelien erotusasteen oli huomattu kasvavan. Tämä johtuu siitä, että suuremmilla kuplilla on enemmän pinta-alaa, johon partikkelit voivat kiinnittyä ja näin ollen kiinnittymisfrekvenssi kasvaa. Suuremmat kuplat pystyvät myös nostamaan suuremman kokoluokan partikkeleita. Liian suuret kuplat eivät toisaalta poista pienimpiä partikkeleita yhtä tehokkaasti kuin pienet kuplat. Suurimpia partikkeleita ei myöskään saada poistettua pienillä kuplilla, joten näiden kuplien välinen suhde on yksi optimoinnin kohteista. Erotusasteen vaihtelut partikkelien sekä ilmakuplien kokojen vaihdellessa on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10 Partikkelien koon sekä ilmakuplien koon vaikutus erotusasteeseen syöttövirralla 11,8 m/h ilman tilavuusosuuden ollessa 0,01. Partikkelien tiheys 1100 kg/m<sup>3</sup> ja massaosuus 0,0001 (Lakghomi et al., 2015).

Vaikka kuplien kokojen kasvattaminen luokin lisää tarttumispinta-alaa partikkeleille, optimaalisen kuplakokopisteen jälkeen erotusaste romahtaa kupla-partikkelikontaktiajan pienentyessä. Kuplien halkaisijan pienentyessä kokonaispinta-ala kuitenkin kasvaa, joka vaikuttaa erotusasteeseen pienimmillä partikkeleilla.

### **3. DAF TEOLLISUUDESSA**

DAF -teknologia on nykypäivänä jäteväettä suurissa määrin käsittelevien markkinoita johtavien yritysten huulilla. Tekniikkaa on yleisesti käytössä muun muassa petrokemian laitoksilla, jalostamoilla, maakaasun tuottajilla sekä vedenpuhdistuslaitoksilla.

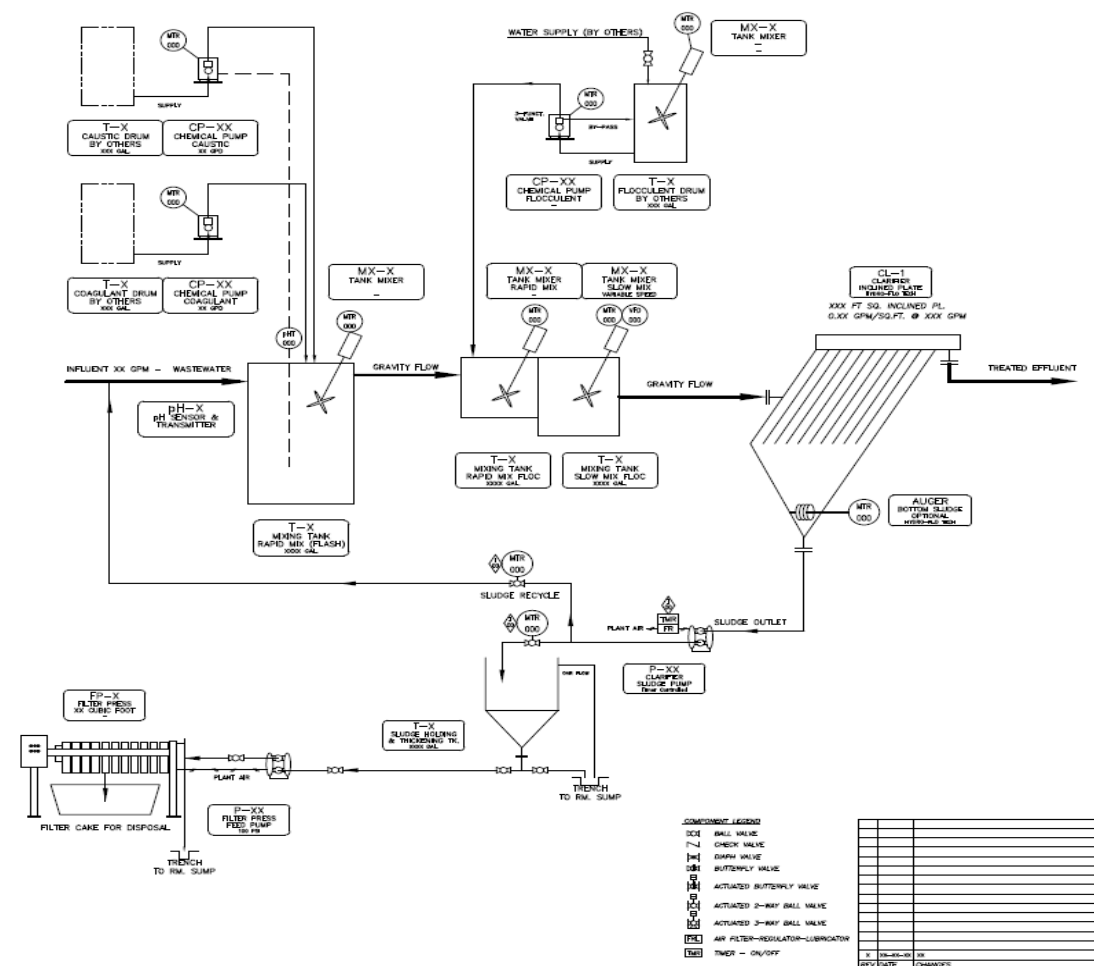
#### *3.1 Tankkityypit*

DAF-teknologiaa voidaan käyttää kahdella eri tankkityypillä: suorakulmainen ja ympyränmuotoinen. DAF -teknologiaa voidaan käyttää kahdella eri tankkityypillä: suorakulmainen ja ympyränmuotoinen. Tankkityypin valinnassa on tärkeää huomioida tehokkuuden ja turvallisuuden kannalta oleelliset tekijät. DAF erotusyksiköt mitoitetaan optimaaliseksi suhteuttamalla virtausnopeus erotustankin efektiiviseen pinta-alaan. Jokaisen DAF erotustankin tehokkuuteen vaikutetaan muuttamalla virtausnopeutta; mitä hitaampi virtausnopeus, sitä paremmat tulokset ovat.

DAF -erotusyksiköllä on ominaiset yläraja-arvot rasvoille, öljyille, eläinrasvoille (FOG) sekä erotettaville kiinteille partikkeleille (TSS), jolla edellä mainitut faktorit kykenevät rykelmöitymään prosessissa. Jos erotettavaa tuotetta akkumuloituu liikaa erotusyksikön keskitankissa, saattaa vaarana olla tuotteen ylivaluminen, jolloin erotettavaa tuotetta pääsee ympäristöön sellaisenaan. Oikeaoppisessa prosessissa poisto ja talteenottoyksiköt ovat erillään erotusyksiköstä, jolloin mahdollinen yliakkumuloituminen ei häiritse erotusyksikön toimintaa. DAF -tankit ja itse prosessi siis mitoitetaan TSS ja FOG arvojen mukaan; mitä suurempia

määriä näitä erotettavia partikkeleita halutaan erottaa, sitä laajemmassa skaalassa prosessi on suunniteltava.

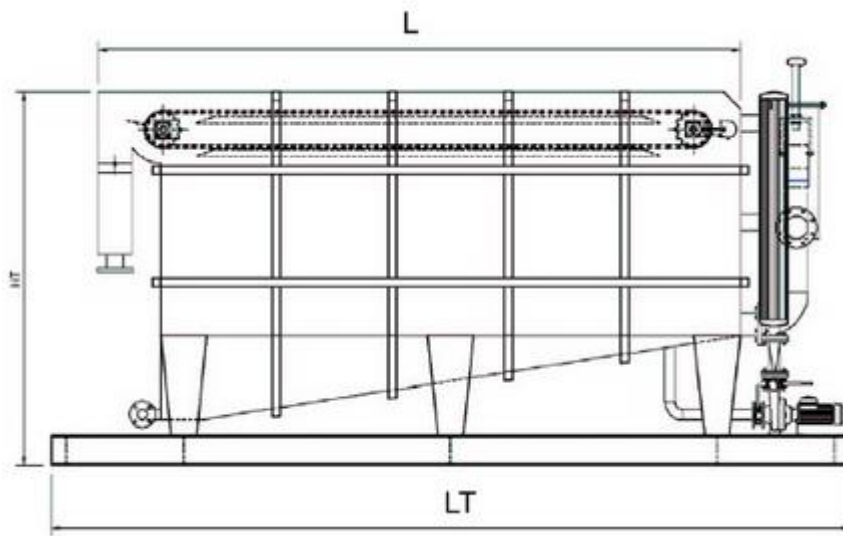
Jotta DAF –tekniikalla käytettävä erotusprosessi toimisi halutulla tavalla, on tärkeää ylläpitää analyysiä huoltotoimenpiteistä säännöllisesti. Operaationaalisten ja mekaanisten erheiden ehkäisemiseksi on prosessia hyvä monitoroida ja tarkastaa putkiston, suuttimien ja tiivisteiden mahdolliselta korroosiolta sekä muiden prosessissa olevien mekaanisten faktorien taholta. Mahdolliset mekaaniset häiriöt voivat aiheuttaa vakaviakin vuotoja ympäristöön, jolloin saastuneisuuden kartoitus sekä siivous saattavat tulla hyvinkin kalliiksi. Esimerkillinen DAF – prosessi pohjavedelle on nähtävissä kuvassa 11.



Kuva 11 Pohjavesistön puhdistukseen tarkoitettu DAF-prosessi (Hydroflo, 1990)

### 3.1.1 Suorakulmainen tankki

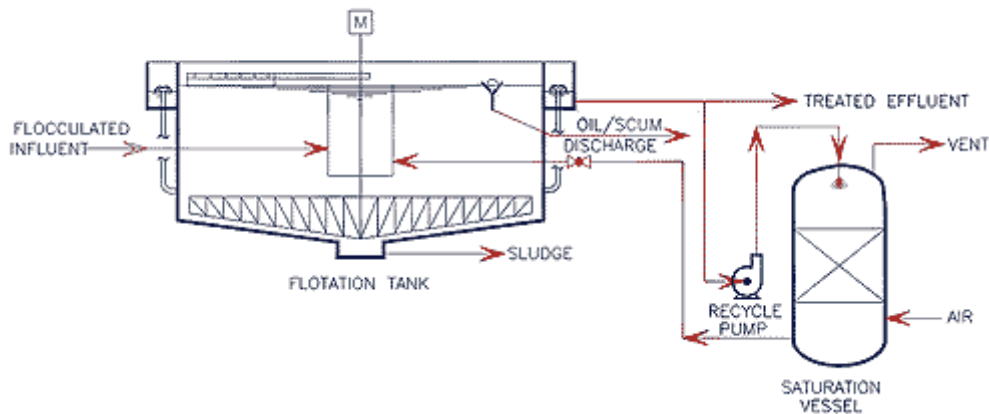
Suorakulmaista tankkia on helppo käsitellä niin logistisesti kuin asennuksen ja operoinnin kannalta. Muodon ansioista tankki vie operoimisalueella mahdollisimman vähän tilaa niin korkeudessa kuin leveydessä. Suorakulmainen tankki tuo kuitenkin omat haasteensa, sillä kiintoaines jää veden virtauksen rikkoutuessa tankin muodosta johtuen tankin kulmiin sekä pohjalle (Westech, 2012). Suorakulmainen tankki on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12 Suorakulmainen DAF-tankki (WPL, 2017)

### 3.1.2 Ympyränmuotoinen tankki

Ympyränmuotoisen tankin toimintaperiaate on samanlainen kuin suorakulmaisinkin. Tankki koostuu itse tankkialtaasta, dispersiotankista, partikkeliharavasta, keräysulokkeesta, efluenttikourusta, influenttin syötöstä, paineistetusta saturaation ja ilman kierrätysyhteelmästä sekä itse ohjausalustasta. Systemin kannalta oleelliset komponentit ovat kuitenkin flotaatiomekanismit ja painejärjestelmä. Pyöreä muoto kuitenkin mahdollistaa kokovaltaisen vuorovaikutustehokkuuden tankin kosketuspinnalle. Tämä muoto mahdollistaa myös energiatehokkuuden nopeammilla virtausnopeuksilla. Kiintoainepartikkeleita kiinnittyy vähemmän tankin seinämiin verrattuna suorakulmaiseen tankkiin (Westech, 2012). Ympyränmuotoinen DAF-tankki on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13 Ympyränmuotoinen DAF-tankki (WPL, 2017)

#### 4. EROTUSMENETELMIÄ ERI KOLLOIDITYYPEILLE

Erilaisia partikkeleita erottaessa on spesifioitava erotusprosessi juurikin kyseiselle partikkelille. Esimerkiksi anaerobiset partikkelit kuten kiinteät sekä orgaaniset partikkelit, kuten levät omaavat omanlaisensa fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Nämä ominaisuudet on otettava huomioon esimerkiksi raakaveden esikäsitelyssä. Vettä voidaan esikäsitellä lisäämällä veteen esimerkiksi kemikaaleja tai orgaanisia polymeerejä, kuten H<sub>2</sub>MV kationisia polymeerejä jotka edesauttavat flokkuloitumista sekä partikkelien laskeutumista. (Mels, 2001)

Levää puhdistettaessa käsiteltävä raakavesi tarvitsee koagulanttista esikäsitelyä, jonka tehtävänä on edesauttaa kolloidien laskeutumista tankin pohjalle. Levälajikkeilla, eritoten vihreillä levälajikkeilla on fysikaalisena ominaisuutena ominaista omata ioninen kaksoiskerros, jonka uloin kerros on negatiivisesti varautunut. Se siis poikkeaa muista kiintoaineista, jotka omaavat kutakuinkin neutraalin ulkokerroksen varauksen. Täten leväpartikkelit ovat stabiileja elektrostaattisen repulsiivisen vuorovaikutuksen vuoksi. Leväpartikkelit omaavat myös hydrofiilisiä ominaisuuksia, mistä johtuen vesimolekyylit absorboituvat leväpartikkelien sisään. Näiden partikkelien elektronegatiivisuus on koagulaatiossa tärkeää ottaa huomioon. On tutkittu, että leväpartikkelit ovat elektronegatiivisia pH asteikolla 2,5-11,5. (T.-S.Sim et al., 1988)

Kiinteillä partikkeleilla ei ole samanlaista ulkoista varausta kuin levillä, joten erotusprosessi ei tarvitse samanlaista esikäsitelyä kuin leväpartikkelit. Parhaimman arvion prosessin

etenemisestä ja käytännöllisyydestä saadaan pilotoimalla haluttu erotusprosessi ennen varsinaisen prosessin toteuttamista. (Charles C. Ross et al., 2008)

## 5. VERTAILU MUIHIN EROTUSMENETELMIIN

### 5.1 Sentrifugointi

Sentrifugointi leväpartikkelien erotukseen ei ole uusi menetelmä. Tämä menetelmä on käytännöllinen, jos työstetään pienillä partikkeli konsentraatiolla ja pienimmillä levälajikkeilla (Chlorella ja Oocystis). Leväpartikkeleille käytetään yleensä kiekkosentrifugia, joka on käytännöllinen todella pienillä kiintoainemäärillä. Havainnoista huomaa, että talteenoton tehokkuus sentrifugilla on jopa 90 % ja tämä tehokkuus on suoraan verrannollinen veden virtausmäärään. Kuitenkin levä/partikkeli konsentraatio on hyvä olla pieni käytettäessä kiekkosentrifugointia (0,04-0,07%), jolloin käsiteltävä veden määrä on suuri suhteessa veden sisältämään kiintoainepitoisuuteen. Tästä johtuen sentrifugointi ei ole energiatehokas. Oli huomattu, että sentrifugointi kulutti jopa 1,3kWh/m<sup>3</sup> raakavettä, joka käy kalliiksi. Raakaveden biologinen hapentarve oli 300mg/L. Puhdistetun veden biologinen hapentarve oli 100mg/L, joka on enemmän kuin DAF:lla tai rumpusuodattimella prosessoitu raakavesi. (T.-S.Sim et al., 1988)

### 5.2 Sedimentointi

Sedimentointimenetelmä perustuu painovoimaan. Kiintoaineen laskeutuminen voidaan antaa tapahtua luonnollisesti gravitaation avulla tai edesauttamalla sitä sentrifugoimalla. Partikkelien laskeutumisan mallintamiseen käytetään usein Stokesin lakia, jolla voidaan määrittää partikkelin laskeutuessa muodostuvia viskooseja voimia viskoosissa nesteessä. Stokesin laki kuitenkin nojaa oletuksiin, joissa virtaus on laminaarista, partikkelit pyöreitä, laskeutuva partikkelimassa on homogeenista, kontaktipinta on sileää sekä partikkelit eivät vuorovaikuta keskenään (Laidler et. al, 1982). Stokesin laki on esitetty yhtälössä 1.

$$F_d = 6\pi\eta Rv \quad (1)$$

jossa	$F_d$	Viskoosinen voima
	$\eta$	Dynaaminen viskositeetti
	$R$	Partikkelin säde
	$v$	Laskeutumisnopeus

Pelkästään luonnolliseen gravitaatioon perustuvat laskeutukset eivät ole suosittuja, sillä erilaiset luonnostaan syntyvät orgaaniset surfaktantit inhiboivat flokkulaatiota ja laskeutusta. Gravitaatioon nojaava menetelmä perustuu veden ja erotettavan partikkelin tiheyseroon, jolloin se sopii kiinteille partikkeleille. Vedellä on tapana absorboitua leväpartikkelien sisään, joten menetelmä ei leville juuri toimi, sillä partikkelien tiheys on täten samaa luokkaa kuin veden. Sedimentointi on enemmän aikaa vievää, mutta yleisesti paljon halvempi vaihtoehto kuin DAF. Optimoidulla DAF -prosessilla erotusaste on kuitenkin sedimentaatiota parempi. (C.H. Burton, 2007).

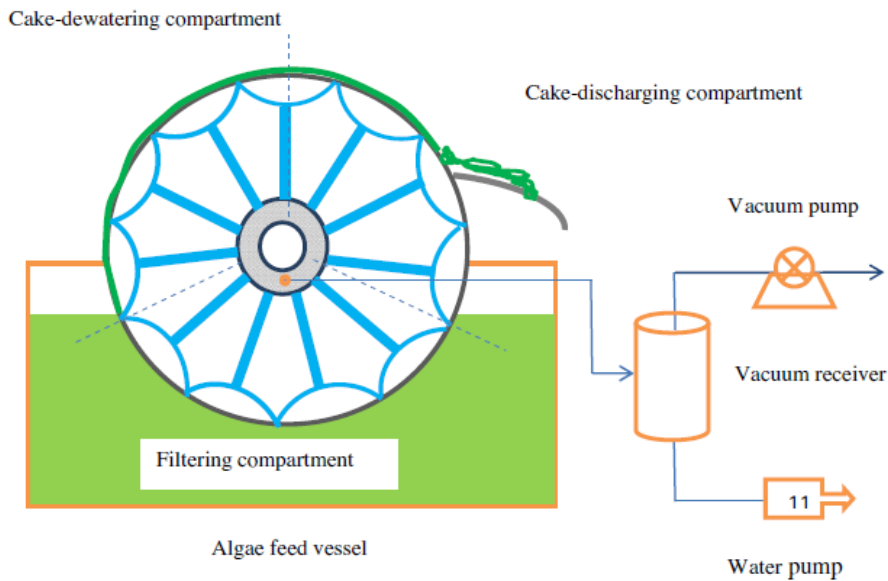
### 5.3 Rumpusuodatus

Rumpufiltraatiomenetelmä on yksi vanhimmista filtraatiomenetelmistä teollisessa mittakaavassa neste-kiinteä erotuksessa. Menetelmää oli pystytty hyödyntämään useisiin eri kohteisiin sopivuutensa vuoksi niin puhdistuksessa, kuivaamisessa kuin kiintoaineen pesemisessä.

Rumpufiltraation erotussysteemi koostuu itse pyörivästä rummista, rummun pinnalla olevasta kakusta, vakuumputkesta, leikkausterästä, itse filtraatioalueesta sekä pesuysiköistä. Menetelmä toimii siten, että rumpu pyörittää kakkua filtraatioalueen läpi (neste-kiinteä) samalla vakuumpumpun imiessä kakun sisäpintaa ja näin ollen kiinnittyneitä partikkeleita kohti rummun keskipistettä. Kiintoainepartikkelit jäävät kiinni kakun ulkopintaan, jolloin systeemiin liitetty terä leikkaa kiinnittyneen kiintoainemassan irti kakusta ja kiintoaines kerätään talteen. Rummun nopeutta voidaan säädellä vaihtamalla kakun paksuutta. Tämä filtraatiomenetelmä on oivallinen tapa käsitellä nesteitä, joilla on korkea kiintoainepitoisuus.



DAF –menetelmä mahdollistaa kuitenkin paremman lopputuloksen. Vaikkakin rumpusuodatus on automaattinen prosessi ja kiinteää ainesta voidaan erottaa paljonkin, ei kustannukset tule prosessin operoinnista vaan jatkuvasta tarvittavasta imusta, joka on ehdoton menetelmän kannalta. Vakuumi pumppu kuluttaa jatkuvalla syötöllä suuria määriä energiaa ja suhteutettuna rumpusuodatuksen erotusasteeseen sekä volyymiin DAF voittaa kustannustehokkuudessa. Hahmotelman rumpusuodatuksesta voi nähdä kuvassa 14.



Kuva 14 Rumpusuodatus (McCracken et. al, 2015)

## 6. VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖÖN

### 6.1 Ekologinen jalanjälki

DAF on nykypäivänä oiva vaihtoehto vedenpuhdistuksen saralla, kun on kyse pienistä partikkelipitoisuuksista ja pienistä partikkeleista. DAF –tekniikka mahdollistaa saman suorituskyvyn saavuttamisen käyttämällä jopa 60 % vähemmän tilaa kuin esimerkiksi klassinen sedimentointimenetelmä. Kustannus –sekä energiatehokkuutta on myös pyritty parantamaan, mutta optimoitunakin DAF kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin esimerkiksi sedimentointimenetelmä. Käytettävä energia kuluu prosessoitavan veden paineistamiseen sekä veden kierrätyksestä vastaavien pumppujen ylläpitämiseen. (Charles C. Ross et al., 2008)

Kemikaalien puolesta DAF tarvitsee erotettavasta partikkelimuodosta riippuen flokkulantteja, yleensä noin 4 ppm kokoisina annoksina. Erilaiset kemikaalit ympäristössä ovat aina rasite luonnolle, joten flokkulanttien käytön minimoiminen on yksi optimoinnin kohteista. Mekaaniset komponentit, kuten pumput ja lavat vähentävät kustannustehokkuutta niiden kulumisen vuoksi sekä tarvittavien operaattorien vuoksi. (Charles C. Ross et al., 2008)

## **7. TULEVAISUUS**

DAF –teknologia tulee olemaan tulevaisuudessa varsin vahvassa roolissa vedenpuhdistuksen saralla, kun tarkoituksena on puhdistaa pieniä kiintoainepartikkeleita sisältävää jätevettä. DAF ei kuitenkaan sellaisenaan usein riitä, vaan on integroitu muiden vedenpuhdistusmenetelmien kanssa. Tekniikan kehittyessä vauhdikkaasti joka vuosi saavutetaan uusia mahdollisuuksia kustannusten pienentämiseksi sekä energiatehokkuuden ja erotusasteen kasvattamiseksi. Optimointiin keskittyvät numeeriset mallit sekä tietokoneiden mahdollistamat avustavat analyysit sekä simuloinnit parantuvat jatkuvalla kehityksellä. Tulevaisuudessa esimerkiksi mahdollisuudet kaivosteollisuuden ja metallurgian sovelluksiin, AMD –yhdisteiden neutraloimiseen sekä sulfaattien käsittelyyn paranevat. (Rafael et al., 2007). Jotta DAF –teknologiaa voidaan hyödyntää näihin aloihin, tarvitaan kuitenkin paljon lisätutkimuksia.

## **8. JOHTOPÄÄTÖKSET**

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli optimoida DAF –yksikön erotusprosessi niin, että erotusaste erotettaville partikkeleille on mahdollisimman suuri. Erotusprosessia optimoitiin soveltamalla CFD –analyysimalleja optimoitaviin parametreihin. Optimoitavat parametrit olivat tässä työssä ilmakuplan koko, erotettavan partikkelin koko, ilman syöttövirran nopeus sekä ilman tilavuusosuus. Näiden parametrien mukaan oli pystytty optimoimaan horisontaalinen kaksoiskerrosvirtaus. Nämä CFD -mallinnukset ovat kuitenkin täysin teoreettisia, eikä tuloksia ole voitu varmistaa käytännön kokeilla.

Saatujen tulosten perusteella pystyi toteamaan, että optimoimalla prosessissa käytettävät parametrit oli saatu horisontaalinen kaksoiskerrosvirtaus maksimoitua. Tästä virtausilmiöstä

johtuen erotusprosessin erotusaste kasvoi jopa 52 % verrattuna erotusprosessiin ilman kaksoiskerrosvirtausta (Edzwald, 2010).

CFD –malleja on sovellettu yhteensä neljä kertaa kullekin parametrille ja tulosten perusteella pystyi varmistamaan optimaalisimmat arvot. Maksimaalinen erotusaste oli saavutettu, erotusprosessia oli ajettu ilmakuplakoolla 80  $\mu\text{m}$ . Tämä kuplakoko edesauttaa prosessia parhaiten, kun erotettava partikkelikoko on 30-70  $\mu\text{m}$ . Näillä kupla –ja partikkelikoilla optimaalisin ilman syöttönopeus oli havaittu olevan 11,8 m/s. Tällä syöttönopeudella käytännöllisin ilman tilavuusosuus oli havaittu olevan alle 0,01 (Lakghomi et al., 2015).

Optimaalisimmassa mahdollisessa erotusprosessissa tutkittavia parametreja on monta, mutta edellä mainitut parametrit ovat keskeisimpiä prosessin kannalta. Prosessin optimoiminen on monimutkaista, eikä samaa optimointimallia pystytä käyttämään universaalisti jokaiselle eri DAF tyypille. Tulevaisuuden analyysi- ja simulointimallit mahdollistavat vieläkin paremman optimoinnin, jolloin saataisiin lyhennettyä prosessiaikaa sekä vähennettyä energiankulutusta.

## **9. KIRJALLISUUSVIITTEET**

Amato T., Edzwald J., Tobiasson J. E, Hedberg T., An Integrated Approach To Dissolved Air Flotation, WS&T, pp. 19-26, 2001

Burton C., The Potential Contribution of Separation Technologies To The Management of Livestock Manure, Elsevier, 2007

Ross C., Valentine G. E, Use of Coupled Dissolved Air Flotation Process Treatment of Food and Dairy Processing Wastewaters, WEF, 2008

Edzwald J. K., Dissolved Air Flotation and Me, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA, 2010

Edwald J. K., Principles and Applications of Dissolved Air Flotation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA, 1995

Edwald J. K., Developments of High Rate Dissolved Air Flotation For Drinking Water Treatment, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003, USA, 2007

Haarhoff J., Dissolved Air Flotation: Process and Prospects For Drinking Water Treatment, IWA Publishing, 2008

Hedberg T., Dahlquist T., Karlsson D., Sörman L., Development of An Air Removal System For Dissolved Air Flotation, Department of Sanitary Engineering, Chalmers University of Technology, SE 412 97 Göteborg, Sweden, 1998

Laidler K., Meiser J., Physical Chemistry, 1982, Brooks Cole; 4 edition, 2002

Lakghomi B., Lawryshyn Y., Hofmann R., A Model of Particle Removal In a Dissolved Air Flotation Tank: Importance of Stratified Flow and Bubble Size, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 35 St. George Street, Toronto, ON M5S 1A4, Canada, 2015

Lakghomi B., Lawryshyn Y., Hofmann R., Importance of Flow Stratification and Bubble Aggregation In The Separation Zone of a Dissolved Air Flotation Tank, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 35 St. George Street, Toronto, ON M5S 1A4, Canada, 2012

Leppinen D. M., Dalziel S. B., Bubble Size Distribution In Dissolved Air Flotation Tanks, IWA Publishing, 2004

Lundh A., Sismondo S., Lexchin S., Busuioc J., Bero L. A., Experimental Studies of the Fluid Dynamics In the Separation Zone In Dissolved Air Flotation, IWA Publishing, 2000-2001

Koh and Schwarz, CFD Modeling of Bubble-particle Collision Rates and Efficiencies In a Flotation Cell, CSIRO Division of Minerals, Box 312, Clayton South, Vic. 3169, Australia, 2003

McCracken T., Shao P., Darcovich K., Ordorica-Garcia G., Reith M., O'Leary S., Algae-dewatering Using Drum Vacuum Filters: Process Modeling, Simulation and Techno-economics, Energy, Mining and Environment, National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada, 2015

Mels A., Physical-chemical Pretreatment As an Option For Increased Sustainability of Municipal Wastewater Treatment Plants, Thesis Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2001

Rodrigues R. T., Rubio J., Dissolved Air Flotation: Potential Applications In The Mining And Mineral Processing Industry , Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500-Prédio 75-Porto Alegre-RS -91501-970, Brazil, 2007

Sim T.-S., Goh A., Becker E. W., Comparison of Centrifugation, Dissolved Air Flotation and Drum Filtration Techniques for Harvesting Sewage-grown Algae, Department of Microbiology, National University of Singapore, Kent Ridge Road, Singapore 0511, 1988

Dissolved Air Flotation For Municipal Clarification And Thickening (Westech, 2012)

Zhang X., Wang L., Sommerfeld M., Hu Q., Harvesting Microalgal Biomass Using Magnesium Coagulation -Dissolved Air Flotation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430072, China, 2016

YK, 2017 [WWW-tiedosto] <http://www.ykliitto.fi/yk70v/ekologinen/vesi>

WPL, 2017 [WWW-tiedosto] <https://www.wplinternational.com/>