

Antti Autio

**PROSESSIJÄTEVESIEN PUHDISTAMINEN FLOTAATION
AVULLA**

**Opinnäytetyö
KESKI-POHJANMAAN AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kesäkuu 2010**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Tekniikka ja liiketalous	Aika Kesäkuu 2010	Tekijä/tekijät Antti Autio
Koulutusohjelma Kemiantekniikka		
Työn nimi Prosessijätevesien puhdistaminen flotaation avulla		
Työn ohjaaja Laura Rahikka		Sivumäärä 55 + 3
Työelämäohjaaja Sanna Harjunpää		
<p>Flotaatio on yleisesti käytössä oleva jätevesien puhdistusmenetelmä, jossa käsiteltävään jätevedeen puhalletaan ilmakuplia, jolloin jätevedessä olevat kiintoaineet törmäilevät ilmakupliin ja tarttuvat toisiinsa. Ilmakuplat nostavat partikkelit pintaan, mistä ne poistetaan ylitteenä, ja kirkastettu vesi jatkaa alitteena eteenpäin. Flotaatiota voidaan tehostaa erilaisilla lisäaineilla, jolloin saavutetaan parempia tuloksia aineiden tai niiden yhdistelmien mukaan. Työn toimeksiantajana toimi OMG Kokkola Chemicals Oy.</p> <p>Opinnäytetyössä käsitellään teoriana flotaatioon liittyviä kemiallisia ilmiöitä ja niihin liittyviä laskuja ja käsitteitä. Lisäksi käsitellään flotaatiossa käytettäviä lisäaineryhmiä ja sitä, minkälaisia vaikutuksia niillä pyritään saavuttamaan. Myös käytössä olevia erilaisia flotaatioprosesseja esitellään ja käydään läpi niiden toimintaa ja käyttöä.</p>		
Asiasanat flotaatio, flokkaus, koagulaatio, prosessijätevesi		

ABSTRACT

CENTRAL OSTROBOTHNIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	Date June 2010	Author Antti Autio
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis Flotation in the Process Wastewater Cleaning		
Instructor Laura Rahikka		Pages 55 + 3 Appendices
Supervisor Sanna Harjunpää		
<p>Flotation is a commonly used wastewater cleaning method, where air bubbles are blown through wastewater, when the solids in wastewater collide with air bubbles and mesh. The solids rise with air bubbles to the surface, where they are removed as overflow, and the clarified water goes forward as underflow. Flotation can be enhanced with different kinds of flotation reagents, which help to gain improved results depending on the reagents or their combinations. The study was commissioned by the company OMG Kokkola Chemicals Oy.</p> <p>As a theory basis some chemical phenomena, formulas and concepts concerning flotation are presented in the thesis. In addition, flotation reagents are discussed and what kind of influence they are designed to gain. Also different kinds of flotation processes, their function and usage are presented.</p>		
Key words flotation, flocculation, coagulation, process wastewater		

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY	3
2.1 OMG Kokkola Chemicals Oy	3
2.2 Prosessikuvaus	3
2.3 Ympäristö, turvallisuus ja laatu	5
3 FLOTAATIO	6
3.1 Yleistä	6
3.2 Teoria	7
3.2.1 Pintajännitys ja kontaktikulma	8
3.2.2 Sähköiset ilmiöt	9
3.2.3 Kupla-partikkelivuorovaikutus	13
3.3 Flotaatiotyypit	15
3.3.1 Luonnollinen flotaatio	16
3.3.2 Avustettu flotaatio	16
3.3.3 Aiheutettu flotaatio	17
4 KOAGULAATIO JA FLOKKAUS	18
4.1 Koagulaation ja flokkauksen periaatteita	18
4.2 Perikineettinen ja ortokineettinen flokkulaatio	19
4.3 Flokkaustesti	21
4.4 Koagulantit	22
4.5 Flotaatioreagenssit	23
5 FLOTAATIOLAITTEISTO	27
5.1 Yleistä	27
5.2 Flotaatiolaitteet	28
5.2.1 Elektrolyyttinen	29
5.2.2 Korkeapaineflotaatio (DAF)	30
5.2.3 Dispersed air flotaatio	31
5.2.4 Pneumaattinen	32
5.2.5 Mekaaniset kennot	35
5.3 Dispersiovesi	36
5.3.1 Dispersiovesi ja kuplien syntyminen	38
5.3.2 Kuplien muoto, koko ja nousunopeus	39
6 FLOTAATIO PROSESSIJÄTEVEDEN PUHDISTUKSESSA	42
6.1 Yleistä	42
LÄHTEET	44

1 JOHDANTO

OMG Kokkola Chemicals Oy on ollut jo usean vuoden ajan maailman johtava kobolttituotteiden valmistaja ja on toiminut Kokkolan suurteollisuusalueella vuodesta 1968 asti. OMG Kokkola Chemicals Oy on jatkuvasti kehittänyt prosessejaan sekä nostanut tuotantokapasiteettia ja tuotemääriä.

Tuotantomäärien noustessa on myös kiinnitetty huomiota ympäristöön ja sen suojeluun. Yksi esimerkki tästä ympäristönsuojelusta on liittyminen Responsible Care – Vastuu huomisesta -ohjelmaan liittyminen. Tämä opinnäytetyö on osa tätä jatkuvasti tapahtuvaa kehitystä ympäristönsuojelun parantamiseksi.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin prosessijäteveden puhdistusta flotaation avulla. Flotaatio on tehokas vedenpuhdistusmenetelmä, jota käytetään laajasti poistamaan kiintoainetta ja kolloidisia suspensioita kunnallisessa juoma- ja jäteveden puhdistuksessa. Alkuna flotaatio prosessina on saanut kaivostoiminnassa mineraalien rikastuksessa. Flotaatio on vuosien varrella noussut merkittäväksi jäteveden puhdistusmenetelmäksi myös teollisuuden suunnalla, kun ympäristövaatimukset ovat tiukentuneet.

Flotaatiossa jätevesi käsitellään ensin kemikaaleilla ennen flotaatiota, jolloin saadaan vedessä olevat kiintoainepartikkelit ja kolloidit muodostamaan flokkeja. Tämän jälkeen käsitelty jätevesi johdetaan flotaatioaltaaseen, jossa käytettävän flotaatiomenetelmän mukaan veteen puhalletaan paineilmaa tai muuta kaasua tai dispersioivettä. Dispersiovesi on prosessista otettua käsiteltyä vettä, joka on paineen avulla kyllästetty ilmalla. Altaassa käsitellyssä jätevedessä olevat flokit ja ilmakuplat törmäävät ja kiinnittyvät toisiinsa. Ilmakuplat nostavat flokit pintaan lieteerrokseksi, joka poistetaan, ja puhdistettu vesi johdetaan eteenpäin.

Tutkimuksen tavoitteena oli saada flotaation soveltuvuus OMG Kokkola Chemicals Oy:n prosessista syntyvän jäteveden käsittelyyn olemassa olevan jätevesikäsitteilyn lisäksi. Kriteereinä tuloksissa olivat flotaation toimivuus ja jäteveden puhtaus käsittelyn jälkeen. Lisäksi suunnitelmissa oli vertailukokeiden suoritus nykyisellä

jäteveden puhdistusmenetelmällä, jotta nähtäisiin ero menetelmien välillä. Kriteerinä menetelmien välillä oli jäteveden puhtaus, kuten flotaatitesteissäkin. Näiden lisäksi suoritettiin laskennallinen mitoitus tarvittavalle flotaatioaltaalle nykyisellä jäteveden virtauksella.

Testejä suoritettiin monella eri kemikaalien yhdistelmällä ja erikseen, jotta nähtäisiin niiden vaikutus tulokseen ja saavutettuun puhtauteen. Testejä ajettiin kahdesta eri kohdasta otetuilla näytteillä, jotta nähtäisiin flotaation vaikutus niissä kohdissa jätevedenpuhdistusprosessia.

2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY

2.1 OMG Kokkola Chemicals Oy

OMG Kokkola Chemicals Oy on osa kansainvälistä OM Group Inc. -konsernia. OMG-konserni on alallaan maailman johtava metallipohjaisten orgaanisten ja epäorgaanisten erikoiskemikaalien, pulvereiden ja metallien tuottaja ja markkinoija. Pääkonttori yhtiöllä on Yhdysvalloissa Clevelandissa. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

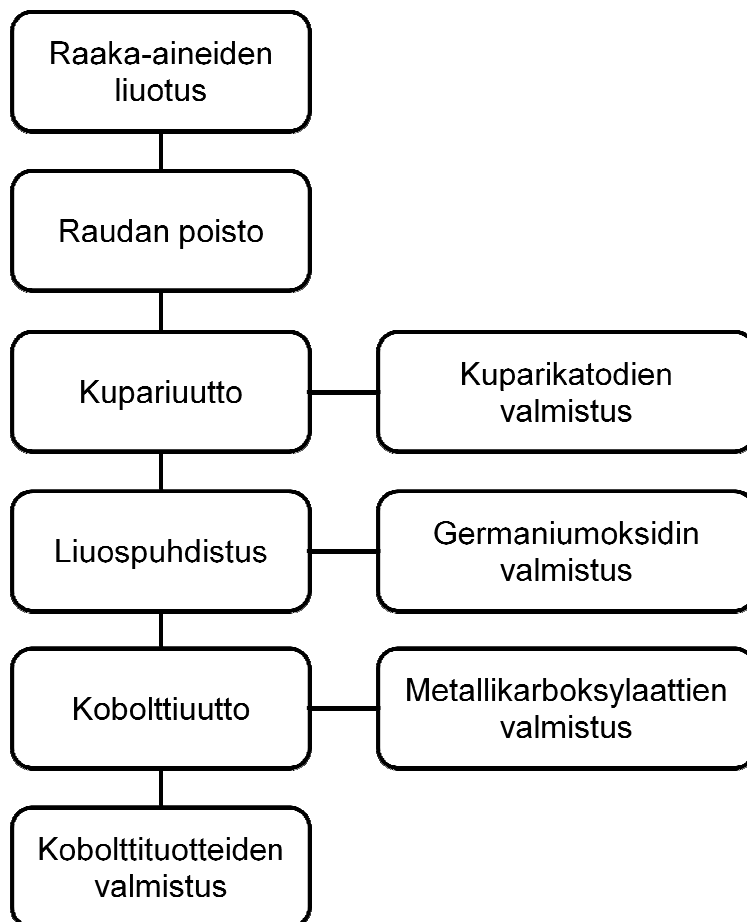
OMG Kokkola Chemicals on kehittänyt koko olemassaoloaikansa voimakkaasti tuotantoprosessejaan sekä nostanut tuotantokapasiteettiaan ja lisännyt tuotevalikoimaansa. Yhtiö on ollut jo usean vuoden ajan maailman johtava kobolttituotteiden valmistaja. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

OMG Kokkola Chemicals Oy valmistaa kaivosteollisuuden tuotteista korkean jalostusasteen kobolttikemikaaleja ja -pulvereita. Tuotantoprosessin raaka-aineina käytetään kobolttirikasteiden lisäksi Afrikassa sähkösulatosta tuotettua metalligranulia sekä erilaisia kobolttipitoisia välituotteita. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

2.2 Prosessikuvaus

Prosessin ensimmäisenä vaiheena on liuotus, jossa raaka-aine liuotetaan ja koboltti erotetaan muista metalleista. Raaka-aineen sisältämä kupari otetaan talteen elektrolyysiprosessilla puhtaana kuparikatodina. Myös muut arvometallit, kuten nikkeli ja germanium, erotetaan koboltista ja myydään joko välituotteina tai metallisuoloina. Kobolttiliuos puhdistetaan uuttoprosessilla, joka poistaa pienemmätkin epäpuhtaudet liuoksesta ennen lopputuotteiden valmistusta. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

Lopputuotteet, kobolttikemikaalit ja -pulverit, valmistetaan puhtaasta kobolttiliuoksesta. Kobolttisuolojen tuotantoon käytetään erilaisia kiteytys- ja saostusprosesseja sekä kalsinointia. Kobolttipulverit valmistetaan pelkistämällä koboltti metallipulveriksi vetykaasun avulla. Kemikaalitehtaan tuotevalikoimaan kuuluvat myös metallikarboksylaattit, joiden valmistukseen käytetään koboltin lisäksi muun muassa kalsiumia, mangaania, sinkkiä, zirkoniumia ja bariumia. Kuviossa 1 esitetään prosessi yksinkertaistettuna. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)



KUVIO 1. OMG Kokkola Chemicals Oy:n prosessikaavio (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

OMG Kokkola Chemicals Oy:n valmiit tuotteet ovat:

- Kobolttihydroksidi, $\text{Co}(\text{OH})_2$
- Kobolttioksidi, Co_3O_4
- Kobolttikarbonaatti CoCO_3
- Kobolttisulfaatti, $\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$

- Koolttiasetaatti, $\text{Co}(\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$
- Koolttipulverit ja -hienopulverit, Co
- Germaniumdioksidi, GeO_2
- Kuparikatodi, Cu. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

Kokkolan tehtaan tuotannon kilpailukyvyyn perustana on täysin automatisoitu jatkuvatoiminen prosessi ja tuotteiden korkea laatu. Itse kehitetty tuotantoteknologia mahdollistaa asiakasvaatimukset täyttävien tuotteiden valmistuksen eri käyttöalueille. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

2.3 Ympäristö, turvallisuus ja laatu

OMG Kokkola Chemicals Oy:n päämääränä on parantaa jatkuvasti ympäristönsuojelun sekä työterveyden, turvallisuuden ja laadun tasoa. Yhtiö on sitoutunut kansainväliseen ympäristönsuojelun, työterveyden, turvallisuuden hallintaa ja kehittämistä korostavaan Responsible Care – Vastuu huomisesta -ohjelmaan. Laadun sekä ympäristö- ja turvallisuusasioiden hallintajärjestelmä on rakennettu standardien ISO 9001, ISO 14001 ja OHSSAS 18001 mukaisesti. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

Ilmaan ja veteen kulkeutuvia päästöjä tarkkaillaan ympäristöviranomaisten hyväksymien ohjelmien mukaisesti. OMG Kokkola Chemicals Oy:n jätevesipäästöt ovat vähentyneet merkittävästi tuotanto- ja ympäristötekniikan kehittymisen tuloksena. Yhtiö kantaa vastuunsa henkilökunnan työterveydestä sekä turvallisuudesta. Toiminnan ja henkilöstön kehittämiseen panostetaan voimakkaasti, ja yhtiössä on jatkuvasti meneillään mm. työympäristön ja työn riskien tunnistamiseen ja hallintaan liittyviä projekteja. Tavoitteina on vähentää vuosittain työtaturmien määrää, ja lopullisena tavoitteena on luonnollisesti nolla tapaturmaa. (OMG Kokkola Chemicals Oy 2004.)

3 FLOTAATIO

3.1 Yleistä

Flotaatio on kiintoaine-neste- tai neste-nesteerotusmenetelmä, jota käytetään kiintoainehiukkasiin, joiden tiheys on pienempi kuin nesteen, jossa ne ovat. Flotaatio voidaan jakaa kolmeen eri alueeseen toimintansa perusteella: luonnollinen, avustettu ja aiheutettu flotaatio. Sanalla flotaatio on vedenkäsittelyssä perinteisesti kuitenkin tarkoitettu aiheutettua flotaatiota. (Degremont 1991a, 171.)

Flotaation kehitys merkittäväksi teollisuusprosessiksi voidaan jakaa kolmeen eri aikakauteen. Vuodesta 1860 vuoteen 1900 tehtiin pienen mittakaavan yrityksiä kelluttaa tai agglomeroida arvokkaita mineraaleja malmeista. Ensimmäisen patentin flotaatioon liittyen sai William Haynes vuonna 1860, jolloin ensimmäistä kertaa huomattiin, että pintaominaisuuksien erilaisuuksia voidaan käyttää hyväksi mineraalien erotuksessa. Vuonna 1877 Dresdeniin Saksaan rakennettiin ensimmäinen kaupallinen flotaatiotehdas. Vuosi 1885 oli tärkeä flotaation historiassa, koska silloin luotiin pohja flotaatiolle ja huomattiin sen potentiaali teollisena prosessina. Esimerkiksi kuplien käytön huomattiin parantavan saantoja. (Fuerstenau, Jameson & Yoon 2007, 65–67.)

Vuosien 1901 ja 1925 välisenä aikana taloudellinen tarve hienojakoisten sulfidipartikkelien rikastamiselle johti sinkki- ja lyijymineraalien flotaation tutkimiseen Australian Broken Hillissä (1901–1915) ja kuparimineraalien tutkimiseen Yhdysvalloissa (1911–1925). Näiden vuosien aikana keksittiin ja tutkittiin useita erilaisia flotaatioprosesseja, joita on nykyaikana käytössä. Tänä aikana flotaatiosta tuli myös teollisuusprosessi, jolla tuotettiin suuri osa kuparista, mikä teki laajamittaisen sähkönjakelun mahdolliseksi. (Fuerstenau ym. 2007, 65.)

Vuonna 1925 olivat jo käytössä tehokkaat ilmastuskennot sekä kemikaaleja käytettiin mineraalien selektiiviseen aktivointiin ja painamiseen. Vuosien 1925 ja 1960 välisenä aikana ei tapahtunut suurta kehitystä flotaation saralla sodan ja laman vuoksi. Tarve flotaatiolle mineraalien jalostuksessa jatkoi kuitenkin kasvuaan, joten

tehtaiden kokoa kasvatettiin. Tämä saavutettiin yksikköjen suurentamisen sijaan käyttämällä useita pienempiä yksikköjä, jotka tiedettiin jo valmiiksi luotettaviksi. Flotaatio tuli Skandinavian alueella suosituksi prosessiksi myös juomavesien käsittelyssä 60-luvulla. (Fuerstenau ym. 2007, 76; Huhtamäki 2007, 3.)

Flotaation käyttö mineraalituotannossa kasvoi nopeasti vuodesta 1950 alkaen (TAULUKKO 1), ja tänä aikana prosessiin tehtiin useita parannuksia. Keskityttiin lähinnä reagensseihin, flotaatiolaitteisiin ja automaation hallintaan. (Fuerstenau ym. 2007, 76–77.)

TAULUKKO 1. Maailman kaivosten sinkin ja kuparin tuotanto, 1950–2000 (Fuerstenau ym. 2007, 77.)

Metalli	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Kupari, Mt	2,3	4,1	6,3	7,6	9,0	11,0
Zinc, Mt	2,0	2,8	5,7	6,1	7,0	8,9

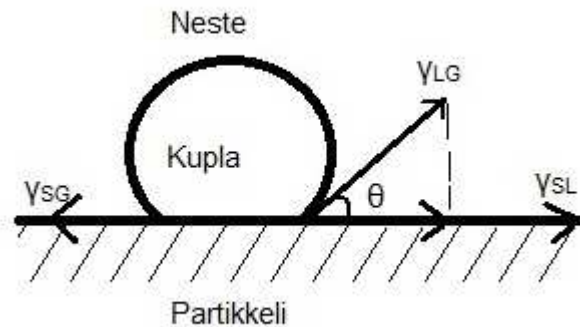
3.2 Teoria

Flotaatio on fysikaalinen prosessi, joka perustuu kolmen eri faasin vuorovaikutukseen. Nämä faasit ovat kiinteä, neste ja kaasu. Flotaatiota tutkiessa on hyvä ymmärtää kiinteän pinnan ja fysikaalisen pinnan kostuvuus ja flotaatioreagenssien aiheuttaman kemiallisen reaktion sekä kupla-partikkelikäyttäytymisen vaikutus flotaatioon. (Perry & Green 1997, 19–58.)

Flotaatioprosessissa hydrofiiliset eli vettä puoleensa vetävät partikkelit kostuvat vedestä, kun taas hydrofobiset eli vesimolekyylejä hylkivät partikkelit kostuvat öljyistä tai ilmakuplista. Tämän perusteella ilmakuplia käytettäessä hydrofobiset partikkelit nousevat kuplien avulla pinnalle, mistä partikkelit voidaan kerätä pois. Lisäämällä tarvittavat flotaatioreagenssit voidaan hydrofiiliset partikkelit muuttaa näiden reagenssien avulla kemiallisesti hydrofobisiksi. (Bailey, Bohnet & Brinder 2000; Perry & Green 1997, 19–56.)

3.2.1 Pintajännitys ja kontaktikulma

Kuplan tarttuessa partikkeliin tuhoutuvat kiinteä-neste- ja neste-kaasurajapinnat ja syntyy kiinteä-kaasurajapinta. Syntyy adheesio, joka määräytyy materiaalien rajatai pintaenergioista. Raja- ja pintajännityksillä määritellään se, kuinka hyvin materiaali on kostunut. Sidos on kestävä, jos kostuminen on tapahtunut täydellisesti. Pintajännitys mitataan kontaktikulman θ mukaan (KUVIO 2). Suhde kontaktikulmalle ja pintaenergialle saadaan Youngin yhtälöstä 1. (Bailey ym. 2000; Perry & Green 1997, 19–58.)



KUVIO 2. Reunakulman ja pintajännitysten suhde (mukaillen Bailey ym. 2000.)

$$\gamma_{SG} = -\gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

jossa:

- γ_{SG} on pinta- tai rajapintajännitys kiinteän ja kaasun rajapinnassa
- γ_{SL} on pinta- tai rajapintajännitys kiinteän ja nesteen rajapinnassa
- γ_{LG} on pinta- tai rajapintajännitys nesteen ja kaasun rajapinnassa
- θ on kontaktikulma

Hyödyllinen yhtälö kostuvuutta tutkittaessa on leviämiskertoimen kaava 2.

$$S = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (2)$$

jossa:

S on leviämiskerroin

Kun $S > 0$, tapahtuu täydellinen kostuminen, ja kun $S < 0$ tapahtuu osittainen kostuminen. Yhdistämällä tämän kaavan Youngin kaavan kanssa saadaan Young-Dupreen yhtälö 3. (Bailey ym. 2000; Perry & Green 1997, 19–58.)

$$S = \gamma_{LG}(\cos \theta - 1) \quad (3)$$

Jotta flotaatio tapahtuisi eli kupla-partikkeliadheesiolle olisi hyvät olosuhteet, kontaktikulman täytyy olla $\theta > 0$, ettei tapahdu täydellistä kostumista. Näin yhtälöstä 3 tulee negatiivinen. (Bailey ym. 2000; Perry & Green 1997, 19–58.)

3.2.3 Sähköiset ilmiöt

Raakavedessä kolloidit ovat poikkeuksetta negatiivisesti varautuneita. Negatiivinen pintavaraus saadaan neutralisoitua johtamalla siihen positiivisia ioneja, joita on myös raakavedessä. Yhdessä nämä varaukset muodostavat kolloidin ympärille kerroksen, jota kutsutaan sähköiseksi kaksoiskerrokseksi. (Degremont 1991a, 133; Zeta Potential.)

Kaksoiskerrosteoriaa käytetään kuvaamaan ionista olosuhdetta varautuneen kolloidin läheisyydessä ja selittämään, kuinka sähköiset vastavoimat tapahtuvat. Ensimmäisenä kannattaa huomioida kolloidin vaikutus positiivisiin ioneihin liuoksessa. Aluksi osa positiivisista ioneista muodostaa tiukasti kiinnittyneen kerroksen kolloidin ympärille negatiivisen kolloidin vetovoiman vuoksi. Muodostunutta kerrosta kutsutaan Sternin kerrokseksi. (Zeta Potential.)

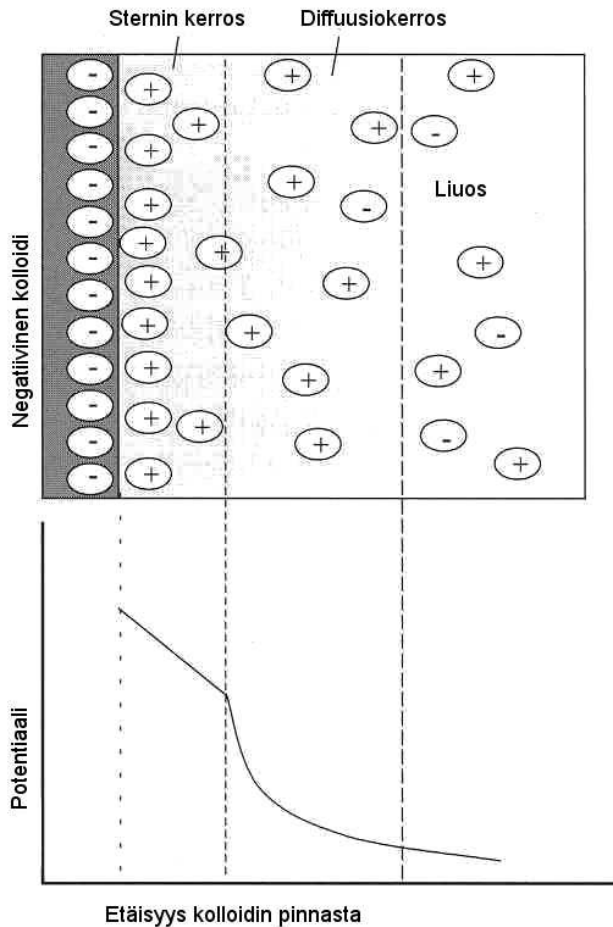
Ylimääräiset positiiviset ionit ovat yhä kiinnostuneita negatiivisen kolloidin vetovoiman vuoksi, mutta muodostunut Sternin kerros hylkii näitä ja muita positiivisia ioneja, jotka yrittävät lähestyä kolloidia. Tämä dynaamisen tasapainon tuloksena syntyy diffuusiokerros vastaioneja. Niillä on lähellä pintaa korkea konsentraatio,

joka vähenee asteittain etäisyyden mukaan, kunnes saavuttaa tasapainon liuoksen vastaionien konsentraation kanssa. (Zeta Potential.)

Samaan tapaan pinnan läheltä puuttuvat negatiiviset ionit, koska negatiivinen kolloidi hylkii niitä. Näillä negatiivisilla ioneilla on sama varaus kuin kolloidilla. Näiden konsentraatio vähenee tasaisesti etäisyyden kasvaessa kolloidista, koska kolloidin hylkivä voima tasaantuu positiivisten ionien vetovoimasta ja syntyy tasapaino. (Zeta Potential.)

Diffuusiokerros voidaan ajatella varautuneena ilmakehänä kolloidin ympärillä. Varaus tiheys miltä tahansa etäisyydeltä pinnalta on yhtä suuri kuin saman pisteen negatiivisten ja positiivisten ionien konsentraatioero. Varaustiheys on suurimmillaan lähellä kolloidin pintaa ja heikkenee tasaisesti lähelle nollaa, kun negatiivisten ja positiivisten ionien konsentraatio yhdentyy. (Zeta Potential.)

Kiinnittyneet vastaionit Sternin kerroksessa ja varautunut ilmakehä diffuusiokerroksessa muodostavat sen mitä kutsutaan kaksoiskerrokseksi (KUVIO 3). Tämän kerroksen paksuus riippuu ionien varauksesta ja konsentraatiosta liuoksessa. (Degremont 1991a, 133.)



KUVIO 3. Kaksoiskerros ja potentiaalın muutos (Ketola 2006.)

Zeta-potentiaalia käytetään laajasti selittämään sähköisen kaksoiskerroksen merkitystä flotaatiossa. Potentiaaliero Sternin kerroksen ja diffuusiokerroksen välillä on zeta-potentiaali. Zeta-potentiaali määrittää kolloidien liikkeitä ja niiden keskeiset vuorovaikutukset. (Bailey ym. 2000.)

Zeta-potentiaali voidaan mitata neljällä eri elektrokineettisellä tavalla, joita ovat elektroforeesi (electrophoresis), sedimentaatiopotentiaali (sedimentation potential), virtauspotentiaali (streaming potential) tai elektro-osmoosi (elektro-osmosis). Kahdessa ensimmäisessä tavassa syntyy liukupinta (shear plane) varattujen partikkelien liikehdinnästä, ja toisissa kahdessa varatut partikkelit pysyvät paikallaan. Yhtälössä 4 korreloidaan zeta-potentiaalia niiden partikkeleiden elektroforetin liikkuvuuden (electrophoretic mobility) suhteen, jotka ovat ulkoisen sähkökentän vaikutuksessa. (Bailey ym. 2000.)

$$\zeta = \frac{4\pi\eta}{\varepsilon} \frac{V_e}{E} \quad (4)$$

jossa:

ζ	zeta-potentiaali
η	nesteen viskositeetti
ε	permittiivisyys
V_e	partikkelin elektroforeettinen nopeus
E	sähkökentän voimakkuus

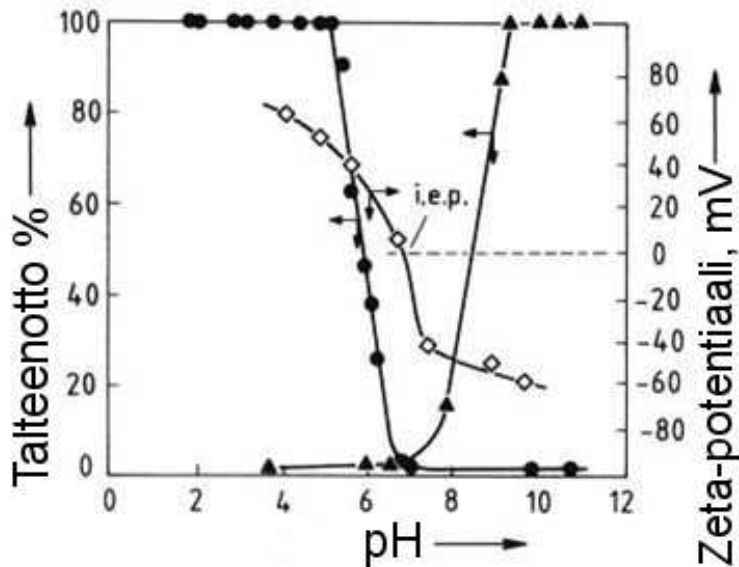
25 °C:ssa ja nesteen viskositeetin ollessa 0,895 mP a · s yhtälö 4 muuttuu muotoon:

$$\zeta = 12,8 V_e = 12,8 \mu \quad (5)$$

jossa:

μ	elektroforeettinen liikkuvuus
-------	-------------------------------

Zeta-potentiaalin merkitys tulee hyvin esille, kun tarkastellaan flotaatioreagenssien adsorptiota (KUVIO 4). Olosuhde, jossa $\zeta = 0$, tunnetaan isoelektrisenä pisteenä (iep). Vaikka isoelektrinen piste voidaan määrittää jokaiselle kiinteälle aineelle useissa olosuhteissa, niin useimmin käytetään pH:ta kuvaamaan niitä ionisia olosuhteita, joissa isoelektrinen piste esiintyy. (Bailey ym. 2000.)



KUVIO 4. Isoelektrisen pisteen ja göitiin (FeO(OH)) flotaatio-ominaisuuksien suhde
 ● = natriumlauryylisulfaatti (SDS), ▲ = lauryyliammoniumkloridi (Bailey ym. 2000.)

Zeta-potentiaali on kätevä tapa optimoida koagulaatioannostus veden ja jäteveden puhdistuksessa. Vaikeimpia poistettavia kiintoainehiukkasia ovat kolloidit, koska niiden pieni koko vaikeuttaa niiden tehokasta poistoa. Tehostaakseen tätä on kolloidien zeta-potentiaalia pienennettävä koagulanteilla. Varauksen ollessa pienempi tai kokonaan hävinnyt saadaan flokkuloinnilla kasvatettua kolloidien törmäyksiä, koska vastustavat voimat ovat heikentyneet. (Zeta Potential.)

3.2.4 Kupla-partikkeli vuorovaikutus

Edellisissä luvuissa on selitetty periaatteet, joilla saavutetaan flotaatiolle halutut olosuhteet, jolloin poistettavat partikkelit ovat hydrofobisia ja muut hydrofiilisiä. Seuraavaksi halutaan luoda olosuhteet kupla-partikkelikontaktille, liittymiselle ja niiden poistolle. Näitä kuvataan yksinkertaisesti kolmen stokastisen tapahtuman yhdistelmäksi, joita ovat kupla-partikkelitörmäyksen, liittymisen ja säilymisen todennäköisyydet. Näistä saadaan flotaatiolle todennäköisyysyhtälö 6. (Perry & Green 1997, 19–58; Bailey ym. 2000.)

$$P_f = P_c \cdot P_a \cdot P_s \quad (6)$$

jossa:

P_f	flotaation todennäköisyys
P_c	kupla-partikkelitörmäyksen todennäköisyys
P_a	kupla-partikkeliadheesio todennäköisyys
P_s	vakaan kupla-partikkeliliittymisen syntyminen todennäköisyys

Nämä kolme todennäköisyyttä ovat riippuvaisia eri asioista. Ensimmäistä hallitsevat flotaatiossa vallitsevat hydrodynaamiset olosuhteet. Toinen määräytyy pintajännityksistä ja kolmas on riippuvainen kupla-partikkelin kestävydestä nesteturbulenssissa ja muiden liuoksessa olevien partikkeleiden törmäyksistä. (Perry & Green 1997, 19–58.)

Kiintoaine, joka halutaan poistaa flotaatiolla, sisältää vesipohjaisen kalvon, jonka paksuus voi olla vain kymmeniä nanometrejä. Tämän kalvon stabiilisuus määrittelee sen voiko partikkeli kiinnittyä kuplaan törmäyksessä. Jos kalvo ohenee, repeää tai vetäytyy, voi adheesio syntyä. Aika, joka kalvolla kestää käydä läpi nämä prosessit, tunnetaan induktioaikana (induction time). Kalvon stabiilisuus voidaan määrittää erotuspaineen (disjoining pressure) avulla. (Bailey ym. 2000.)

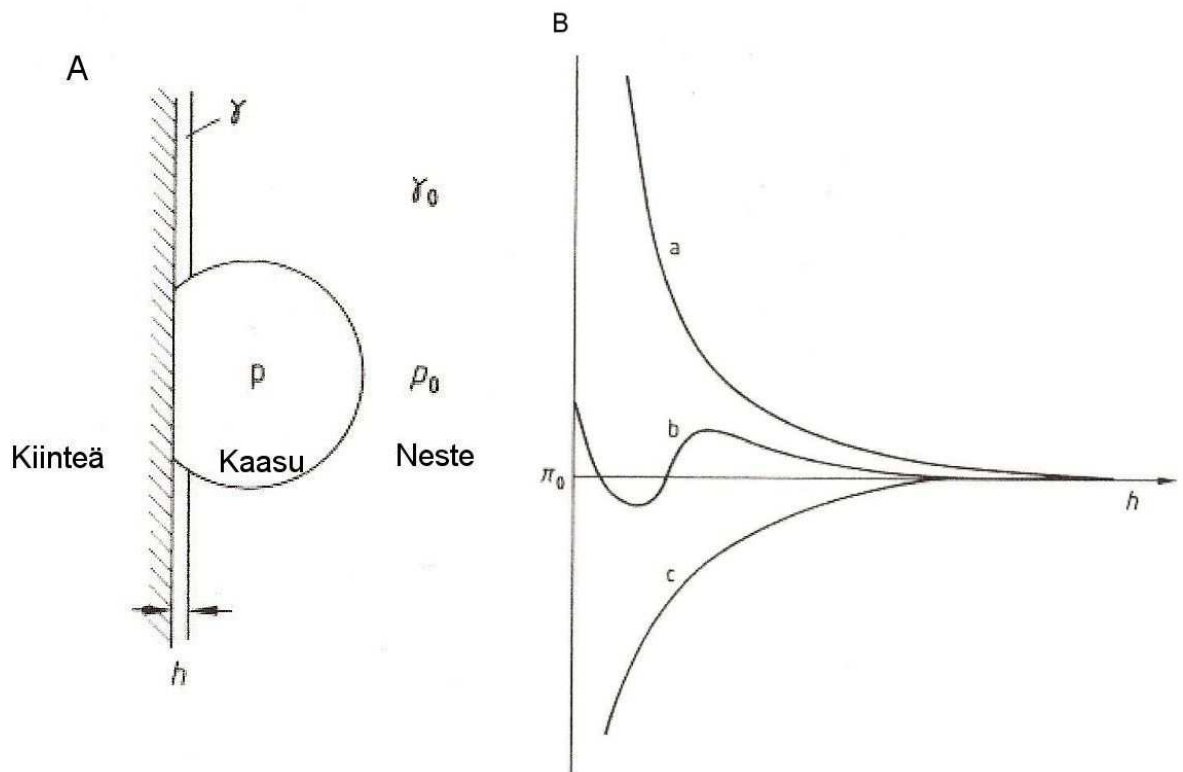
$$\pi_D = p - p_0 \quad (7)$$

$$\gamma = \gamma_0 \int_h^\infty \pi_D dh \quad (8)$$

jossa:

π_D	erotuspaine
p	paine kuplan sisällä
p_0	paine nesteessä
γ	pintajännitys nestekalvossa
γ	pintajännitys äärettömän paksussa kalvossa samassa nesteessä

Kuviosta 5 nähdään olosuhteet kalvon stabiilisuudelle.



KUVIO 5. Erotuspaineen konsepti. A) Esitys erotuskalvosta partikkelin ja kuvan välillä, B) Kalvon stabiilisuuden ja erotuspaineen suhde a) Stabiili kalvo, b) Meta-stabiili kalvo ja c) Epävakaa kalvo. (Bailey ym. 2000.)

Stabiileilla kalvoilla $\left(\frac{\partial \pi_D}{\partial h}\right)_T < 0$ ja epästabiileilla > 0 .

Erotuspaine on riippuvainen sähköisen kaksoiskerroksen vaikutuksen (π_E), liuotusvaikutuksen (π_S) ja London – van der Waalsin voimien (π_V) summasta ja kiinteän pinnan heterogeenisyydestä. (Bailey ym. 2000.)

3.3 Flotaatiotyypit

Flotaatioprosessit voidaan jakaa kolmeen erilaiseen kategoriaan niiden toimintatavan mukaan: luonnollinen flotaatio, avustettu flotaatio ja aiheutettu flotaatio. Luonnollinen flotaatio perustuu pelkästään flotaatioon tiheyseron avulla. Avustetussa flotaatiossa käytetään ulkopuolisia keinoja edistämään luonnostaan hyvin kelluvia

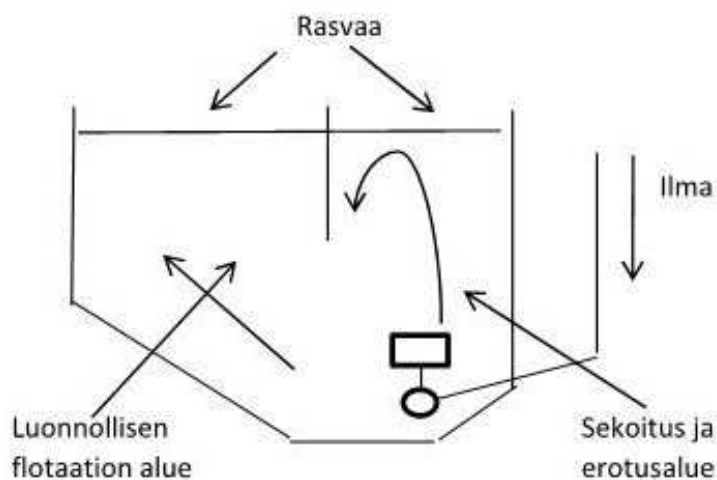
partikkeleita. Aiheutettu flotaatio tapahtuu, kun partikkelin tiheys on alun perin suurempi kuin liuoksen ja tiheyttä lasketaan keinotekoisesti. Teollisuudessa esiintyy yhdistelmiä näistä prosesseista. (Degremont 1991a, 171.)

3.2.1 Luonnollinen flotaatio

Luonnollista flotaatiota käytetään yleisesti kaikkiin alustaviin öljynerotusprosesseihin. Tätä flotaatioprosessia voi edeltää nesteyttävä prosessi (coalescing process), jotta saavutettaisiin parempi erotustehokkuus pienille partikkeleille. Luonnollinen flotaatio voi tapahtua myös käymisestä vapautuvien kaasujen avulla. (Degremont 1991a, 173.)

3.2.2 Avustettu flotaatio

Avustetussa flotaatiossa parannetaan luonnollista flotaatiota puhaltamalla kuplia liuokseen. Tätä prosessia käytetään esimerkiksi erottamaan rasvoja, jotka ovat dispergoituneena likavedessä. Prosessissa on yleensä kaksi erillistä aluetta, joista toinen on sekoitusta ja emulsiota varten ja toinen osa on flotaatiolle (KUVIO 6). (Degremont 1991a, 174–175.)



KUVIO 6. Öljynerotuksen periaate avustetulla flotaatiolla (mukaillen Degremont 1991a, 174)

Alustavassa öljynerotusvaiheessa liuokseen puhalletaan keskikokoisia kuplia (2–4 mm), jotta saadaan aikaan turbulenssia, jonka avulla erotellaan raskaat partikkelit. Tehokkaammassa öljynerotuksessa ilma hajotetaan hienojakoisiksi kupliksi (0,5–1 mm) vedenalaisella mekaanisella ilmastimella. Liikkuva elementti pitää huolen, että rasvat sekoittuvat ja erottuvat samalla, kun ilmakuplien aiheuttama noste nostaa partikkelit pinnalle. (Degremont 1991a, 174–175.)

3.2.3 Aiheutettu flotaatio

Aiheutetussa flotaatiossa partikkelit ovat tiheydeltään suurempia kuin liuos, jossa ne ovat, joten partikkeleiden tiheyttä joudutaan keinotekoisesti laskemaan. Tämä perustuu tiettyjen partikkeleiden kykyyn liittyä kaasukupliin, joina yleensä käytetään ilmakuplia, ja muodostaa partikkeli-kaasuyhdistelmiä, joiden tiheys on pienempi kuin ympäröivän liuoksen, jossa ne muodostavat dispergoituneen vaiheen. Tapahtuva ilmiö on kolmivaiheinen ja riippuvainen kolmen vaiheen fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista ja etenkin niiden rajapinnoista. (Degremont 1991a, 171.)

4 KOAGULAATIO JA FLOKKAUS

Kuten aiemmin mainittiin, pelkkä flotaatioprosessi ei yksin pysty poistamaan kaikkia kiintoainehiukkasia liuoksesta. Tarvitaan apukeinoja, jolla poistaa näitä vaikeimmin poistettavia hiukkasia, ja tässä hyödynnetään ennen flotaatiota tapahtuvaa koagulointia ja flokkausta.

4.1 Koagulaation ja flokkauksen periaatteita

Epäpuhtaudet, jotka ovat kolloidisessa tai liuenneessa muodossa, eivät pysty yhtymään ilman apukeinoja, jolloin tarvitaan koagulointia ja flokkaamista. Koaguloinnilla tarkoitetaan sähköisen kaksoiskerroksen destabilointia kolloidien ympäriltä, jolloin kolloidin zeta-potentiaali neutralisoituu tai pienenee riittävästi hiukkasten yhtymistä varten. (Peltokangas, Heinänen & Viitasaari 1995, 50; Degremont 1991a, 131–132.)

Flokkauksessa tapahtuu destabiloitujen partikkeleiden agglomeraatio mikroflokeiksi, joista syntyy myöhemmin isompia flokkeja. Flokkulantin lisäyksellä voidaan edistää flokkien syntymistä. Eli flokki muodostuu koagulaation, koagulaatio-flokkauksen tai pelkästään flokkauksen seurauksena. (Peltokangas ym. 1995, 52; Degremont 1991a, 135.)

Zeta-potentiaalia käsittelevässä luvussa mainittiin, että zeta-potentiaalın muutoksen avulla voidaan mitata tiettyjen koagulanttien tehokkuutta ja tarvetta. Aina ei kuitenkaan toimita näin, koska zeta-potentiaalın mittausta ei ole kovin yksinkertaista ja tiedon voi saada muillakin tavoin, esimerkiksi flokkaustestin avulla (luku 2.4.3). (Peltokangas ym. 1995, 52).

Syntyvät mikroflokkit ovat jatkuvassa edestakaisessa liikkeessä. Tätä kutsutaan Brownin liikkeeksi. Liike aiheuttaa mikroflokkien törmäyksiä ja yhteenliittymisiä. Koheesiovoimat ja kemiallinen sakkautuminen toimivat myös yhteen liittäväinä voimana. Mikroflokkien agglomeroitumista voidaan tehostaa ja lujittaa lisäämällä

polyelektrolyyttejä, jotka edistävät rakenteensa vuoksi kietoutumista. Kun flokki kasvaa, Brownin liikkeen vaikutus lakkaa myös, jolloin on tarvetta ulkopuoliselle voimalle, joka aiheuttaisi kontakteja. (Peltokangas ym. 1995, 52.)

4.2 Perikineettinen ja ortokineettinen flokkulaatio

Perikineettinen ja ortokineettinen flokkulaatio ovat kaksi siirtokerrointa, jotka määrittävät flokkulaation. Perikineettinen flokkulaatio liittyy Brownin lämpöliikkeeseen, jossa mikroflokkit ovat koaguloinnin jälkeen, ja siihen, kun van der Waals'in voimat alkavat aiheuttaa mikroflokkien yhtymistä. Tässä vaiheessa ei tarvita ulkopuolisia voimia hiukkasten liikkeeseen, ja vaihe kestää noin minuutin. Flokkautumisnopeus tai hiukkaslukumäärä tietyssä aikana saadaan yhtälöstä 9. (Peltokangas ym. 1995, 59; Degremont 1991a, 135.)

$$\frac{dn}{dt} = \alpha \cdot \frac{4kT}{3\mu} \cdot n^2 \quad (9)$$

jossa:

n	partikkelien määrä tilavuutta kohden
α	tehokkaiden törmäyksien fraktio (fraction of efficacious shocks)
k	Boltzmanin vakio
T	absoluuttinen lämpötila
μ	absoluuttinen viskositeetti
d	partikkelin halkaisija

Perikineettisen flokkulaation loputtua prosessi tarvitsee ulkopuolista energiaa liikkeen tuottamiseksi, jolloin flokkulaatio jatkuisi. Tämä vaihe on ortokineettinen flokkulaatio, ja sitä kuvataan Smoluchowski'in yhtälöllä. (Peltokangas ym. 1995, 59.)

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4}{3} \cdot G \cdot R_c^3 \cdot n^2 \quad (10)$$

jossa:

n	partikkelien määrä (kpl/m ³)
t	aika (s)
G	nopeusgradientti
R _c	törmäyssäde

Partikkeleiden halkaisijan d ollessa sama kaava saa muodon

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4}{3} \cdot G \cdot d^3 \cdot n^2 \quad (11)$$

Yhtälön perusteella flokkausajat kasvavat liian suuriksi, kun flokkikoko kasvaa, mutta flokkikoon kasvaessa kasvaa myös niiden ominaistilavuus, jolloin d suurenee ja tarvittava aika pienenee samalla. Flokkausaikaa voidaan lyhentää myös lisäämällä liuokseen valmiita isompia flokkeja, jolloin kaava saa muodon:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4}{3} \cdot G \cdot \left(\frac{D+d}{2}\right)^3 \cdot N \cdot n \quad (12)$$

jossa:

D	isojen flokkien halkaisija
N	isojen flokkien lukumäärä

Kun $D \gg d$, on D suurempana määräävä arvo, jolloin flokkaus aika lyhenee. Nopeusgradientin liiallinen kasvattaminen aiheuttaa turbulenttiset olosuhteet, jolloin flokit hajoavat. (Peltokangas ym. 1995, 60.)

Nopeusgradientti saadaan laskettua Camp-Steinin yhtälöstä. (Peltokangas ym. 1995, 58.)

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} \quad (13)$$

jossa:

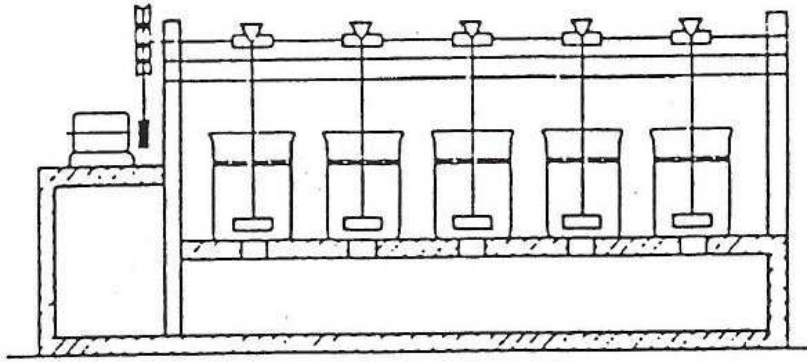
W sekoitusteho tilavuusyksikköä kohden

μ absoluuttinen viskositeetti

Nopeusgradientti on tärkeä tekijä, kun tutkitaan partikkeleiden yhteenliittymisen todennäköisyyttä. Kuten aiemmin mainittiin, liian suuri G-arvo aiheuttaa flokkien hajoamisen. Sopivat arvot koagulaatiossa ovat 400 s⁻¹ asti ja jopa 1000 s⁻¹ ja flokkulaatiossa noin 100 s⁻¹. (Peltokangas ym. 1995, 60; Degremont 1991a, 135–136.)

4.3 Flokkaustesti

Tarvittavien lisäaineiden annosmäärät voidaan likimäärin laskea, mutta tarkimmat tulokset saadaan tekemällä pienen mittakaavan testejä eri koagulanttiannosmäärillä, sekoitusnopeuksilla ja viipymisajoilla. Yleisin on flokkaustesti, jossa saadaan pienessä mittakaavassa tutkittua reagenssien vaikutusta ja säädettyä annosteluun, että haluttu vaikutus saavutetaan. Flokkaustestissä on rinnan useita astioita, joissa on sekoitin (KUVIO 7). (Peltokangas ym. 1995, 56–57; Degremont 1991a, 352–353.)



KUVIO 7. Flokkaustestilaitteisto (Peltokangas ym. 1995, 57.)

Testeissä voidaan testata vierekkäin eri annosmäärillä koagulanttia ja sen vaikutusta flokkien muodostukseen ja kokoon. Myös eri koagulanttien yhdistelmien toimivuutta sekä sekoitusnopeuden vaikutusta flokkeihin voidaan testata. On tärkeää pitää tarkkaa kirjaa siitä, miten testit on ajettu, koska tällöin saadaan luotettavaa tietoa. Testit on tärkeää suorittaa samassa lämpötilassa, ja pH:n tulee olla lähellä samaa kuin käsiteltävän liuoksen arvot tulevat olemaan. Tämäkin testi antaa suurin piirtein tarvittavat annosmäärät tehdasmittakaavan ajoihin, mutta viimeiset säädöt tehdään ajojen ja kokemusten perusteella. (Peltokangas ym. 1995, 56–57; Degremont 1991a, 352–353.)

4.4 Koagulantit

Kolloidin negatiivisen pintavarauksen neutralisointi saadaan aikaan lisäämällä kationeja, joita ovat epäorgaaniset koagulantit. Mitä korkeampi valenssi on, sitä tehokkaammin koagulaatio toimii. Tämä perustuu Schultz-Hardyn teoriaan, jonka mukaan kolmenarvoiset ionit ovat kymmenen kertaa tehokkaampia kuin kahdenarvoiset ionit. Koagulanttia valitessa kannattaa kiinnittää huomiota sen vaarattomuuteen ja hintaan, minkä vuoksi kolmenarvoinen rauta tai alumiinisulolat ovat laajasti käytettyjä. (Degremont 1991a, 136–137.)

pH:n vaikutus on tärkeässä osassa käytettäessä epäorgaanisia koagulantteja, koska epäorgaanisten koagulanttien hydrolyysi muuttaa liuoksen fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia, kuten pH:ta ja johtavuutta. pH on myös tärkeä tekijä

kolloidien poistossa, joten on tärkeää löytää optimi pH:n arvo, jolla saadaan tarpeeksi hyvä koagulaatio ja flokkulaatio. Tämä yleensä liittyy minimiliukoisuuteen ja käytettävään hydroksidiin, joihin vaikuttavat ionien vahvuus sekä orgaanisten yhdisteiden läsnäolo. (Degremont 1991a, 136–137.)

Koaguloinnissa voidaan myös käyttää orgaanisia koagulantteja, joita ovat kationiset polyelektrolyytit. Nämä neutraloivat suoraan negatiiviset kolloidit, jolloin lietteen synty pienenee merkittävästi. (Degremont 1991a, 136–137.)

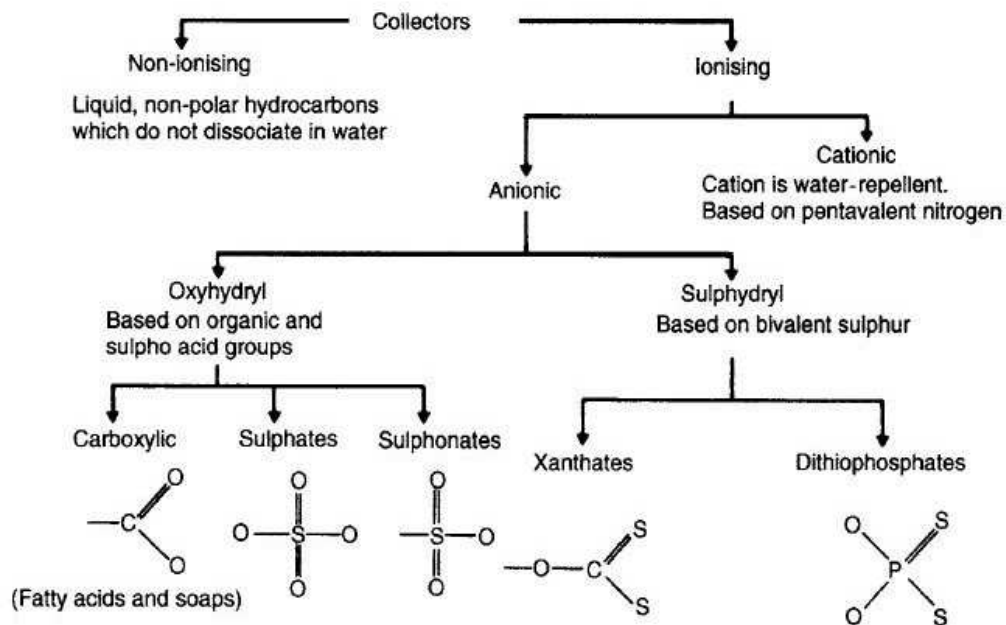
4.5 Flotaatioreagenssit

Flotaation kohdalla reagenssit jaetaan kokoojiin, vaahdotteisiin ja säännöstelyreagensseihin, joihin kuuluvat aktivaattorit, painajat sekä pH:n muuntajat. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Kokoojia käytetään pääasiassa tekemään partikkeleista hydrofobisia ja edistämään adheesiota ilmakehään, jotta flotaatio tapahtuisi. Kokoojat ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka muuttavat partikkelit vettä hylkiviksi. Tämä tapahtuu ionien tai molekyylien absorptiolla partikkelin pintaan. Kokoojat voivat olla ionisoivia yhdisteitä, jotka hajoavat ioneiksi liuoksessa, tai ionisoitumattomia yhdisteitä, jotka ovat liukenemattomia ja muuttavat partikkelit vettä hylkiviksi peittämällä niiden pinnan ohuella kalvolla. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

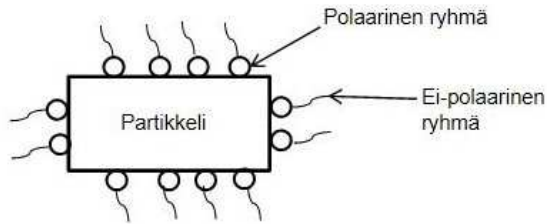
Ionisoivia kokoojia käytetään hyvin laajasti flotaatiossa, ja niillä on kompleksisia molekyylijä, jotka ovat asymmetrisiä rakenteeltaan ja ovat heteropolaarisia. Eli molekyyli sisältää ei-polaarisen hiilivetyryhmän ja polaarisen ryhmän. Ei-polaarisella hiilivedyllä on vettä hylkiviä ominaisuuksia, kun taas polaarinen ryhmä reagoi veden kanssa. Ionisoivat kokoojat absorboituvat partikkelin pintaan fysikaalisesti tai kemiallisesti, ja ne voidaan jakaa anionisiin tai kationisiin kokoojiin ei-polaarisen hiilivetyryhmän perusteella. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Ioniset kokoojat ryhmitellään vettä hylkivän ominaisuuden tuottavan ionin, kationin tai anionin mukaan, mitä kuvio 8 kuvaa.



KUVIO 8. Kokoojien luokittelu (Wills & Napier-Munn 2006, 271.)

Amfoteerisilla kokoojilla on pH:n mukaan anioninen tai kationinen toiminto. pH-arvo, missä amfoteeri tuottaa yhtä monta kationia ja anionia, sanotaan isoelektriseksi pisteeksi. Polaaristen osuuksien ja pinnan välisen kemiallisen, sähköisen tai fysikaalisen vetovoiman takia kokoojat absorboituvat partikkeliin polaarinen pää edellä, jolloin ei-polaarinen hydrofiilinen pää jää liuosta kohti ja tuottaa partikkelille hydrofiiliset ominaisuudet (KUVIO 9). Amfoteerisia kokoojia käytetään yleensä pieninä määrinä, koska ne ovat kalliita ja ne suurina määrinä aiheuttavat ei haluttua flotaatiota, jolloin selektiivisyys kärsii. Liiallinen määrä kokoojia voi myös alentaa saantoa. Tämä luultavasti johtuu partikkelin ympärille muodostuvasta kokoojien monikerroksisesta muodostumasta, jolloin partikkelin hydrofobisuus heikkenee. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000; Rahikka 2004.)



KUVIO 9. Kokoojien absorptio partikkelin pintaan (mukaiillen Perry & Green 1997, 19–58.)

Flotaatiota voidaan tehostaa käyttämällä pidemmän hiilivetyketjun omaavaa kokoojaa, jolloin hydrofobisuus kasvaa ja selektiivisyys ei kärsi. Kuitenkin ketjun pituus rajoittuu kahdesta viiteen hiiliatomiin, koska kokoojan liukenevuus heikkenee ketjun pidentyessä. Liukenevuuteen ja absorptioon vaikuttaa myös se, onko ketju suora vai haarautunut. Haarautuneilla ketjuilla on parempi liukenevuus verrattuna suoriin ketjuihin. Yleisesti käytetään useampaa kokoojaa tehostamaan flotaatiota, jolloin voidaan aluksi syöttää kokoojaa, joka kelluttaa erittäin hydrofobisia partikkeleita, ja myöhemmin lisätä kokoojaa nopeuttamaan hitaammin kelluvia partikkeleita. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Anioniset kokoojat voidaan kuvion 8 mukaan jakaa polaarisen ryhmän rakenteen perusteella kahteen eri ryhmään. Rasvahapoilla (oxyhydryl) on orgaaninen ja rikkipohjainen (sulpho-acid) anioni polaarisenä ryhmänä, ja kationi ei ole suuressa roolissa partikkeli-reagenssireaktiossa anionisissa kokoojissa. Tyypillisesti nämä ovat orgaanisia happoja tai saippuuita. Karboksylaattit eli varsinaiset rasvahapot ja niiden saippuat, ovat voimakkaita kokoojia mutta niillä on suhteellisen huono selektiivisyys. Karboksylaatteja käytetään kalsiumia, bariumia, strontiumia ja magnesiumia sisältävien mineraalien sekä alkalimetallien liukoisten suolojen flotaatiossa. Ryhmään kuuluvat myös sulfaatit ja sulfonaatit, joilla on samanlaisia ominaisuuksia kuin rasvahapoilla mutta jotka ovat heikompia kokoojia. Sulfaatit ja sulfonaatit ovat parempia selektiivisyyden suhteen. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Sulfhydryyliryhmä, josta käytetään myös nimeä tiolit, ovat yksi eniten käytettyjä kokoojia. Niiden polaarinen ryhmä sisältää kahdenarvoista rikkiä. Tiolit ovat erittäin voimakkaita ja selektiivisiä sulfiittimineraalien flotaatiossa. Tähän ryhmään kuuluvat merkaptaanit, ksantaatit ja tiofosfaatit, joista eniten käytettyjä ovat ksantaatit ja tiofosfaatit. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Kationisten kokoojien, joita ovat rasvahappojen amiinit ja amiinisuolat, vettä hylkivät ominaisuudet syntyvät kationisesta polaariryhmästä, joka perustuu viidenarvoiseen tyyppiin. Kationiset kokoojat ovat riippuvaisia liuoksen pH:sta, jolloin ne ovat aktiivisimpia hieman happamissa liuoksissa ja passiivisia vahvasti emäksisissä ja happamissa liuoksissa. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

Vaahdotteet ovat liuokseen lisättäviä reagensseja, joiden tarkoitus on edistää staabiilin vaahdotusvaiheen syntyä, jolloin ilmakuplat nostavat partikkelit liuoksen pintaan. Edistämisen ansiosta tarvittava aika flotaatiossa lyhenee. Vaahdotteiden toiminta on samanlaista kuin ionisoivien kokoojien, mutta ne keskittyvät ensisijaisesti ilma-nesterajapintaan. Vaahdotteina voidaan käyttää alkoholeja, hydroksyloituja polyeettereitä ja alkoksiryhmällä korvattuja parafiineja. (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000.)

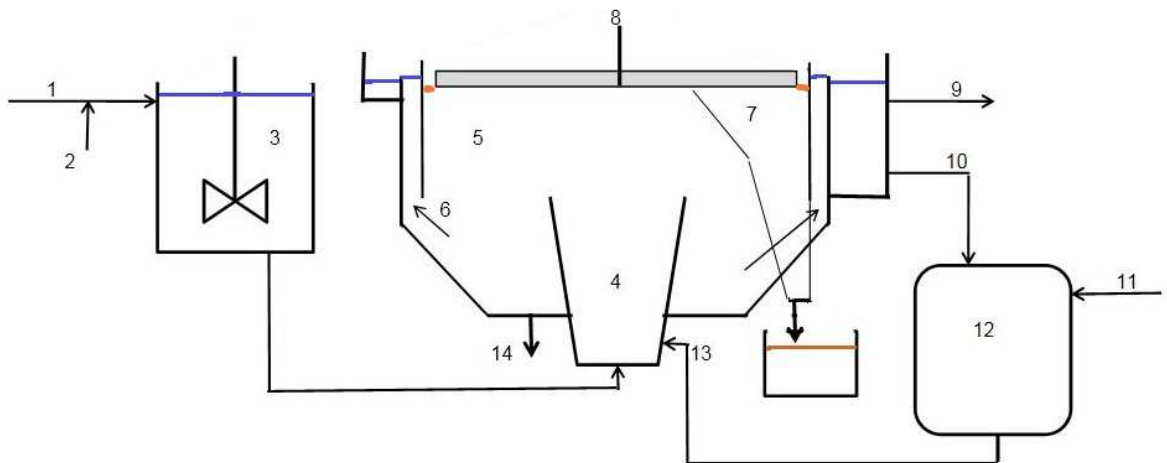
Lisäreagensseja, joihin kuuluvat aktivaattorit, painajat ja pH:n muuntajat, käytetään muokkaamaan liuoksen ominaisuuksia lähemmäksi haluttuja arvoja. Aktivaattorit edistävät kokoojareagenssien absorptiota haluttuihin kiintoaineisiin. Painajat auttavat parantamaan selektiivisyyttä estämällä muita kiintoaineita muuttumasta hydrofobisiksi ja näin estämällä niiden flotaation. pH-muuntimia käytetään, jotta pH saadaan halutulle tasolle. Muuntimina voidaan käyttää esimerkiksi kalsiumhydroksidia $\text{Ca}(\text{OH})_2$, natriumhydroksidia NaOH ja rikkihappoa H_2SO_4 . (Perry & Green 1997, 19–57; Bailey 2000; Rahikka 2004)

5 FLOTAATIOLAITTEISTO

5.1 Yleistä

Valmistajan ja tarpeen mukaan flotaatioaltaat voivat olla suorakaiteen muotoisia, pyöreitä, korkeita tai matalia. Vedenpuhdistuksessa yleisimmin käytetään suorakaiteen muotoisia flotaatioaltaita. (Degremont 1991b, 679.)

Suorakaiteisen ja pyöreän flotaatioaltaan toimintaperiaate on suurin piirtein sama (KUVIO 10). Ensin liuos (1) saapuu flokkulaattoriin (3), jota ennen liuokseen on saatettu lisätä flokkulanttia (2). Flokkulaattorista liuos syötetään flotaatioaltaaseen, missä liuos sekoitetaan reaktioalueella (4) dispersioveden (13) kanssa. Reaktioalueella syntyy kupla-partikkelikontakti, jolloin ympäröivää liuosta kevyempi kupla-partikkeli nousee erotusalueelle (5). Pintaan noussut liete erotetaan kaapimella (8) pois ja johdetaan kaukaloon (7). Puhdistettu liuos laskeutuu alemmas ja poistetaan kuonajakolevyn (6) avulla pois ja siirretään eteenpäin (9). (Degremont 1991b, 679–680.)



KUVIO 10. Flotaatioprosessi yleisesti (mukaillen Degremont 1991b, 680.)

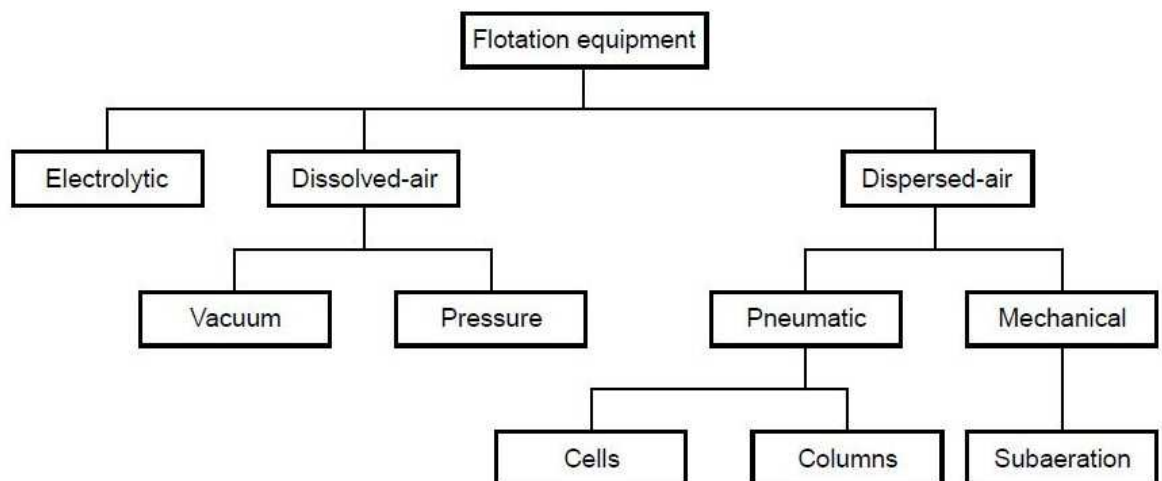
Dispersiovesi tuotetaan saturaattorissa (12), jossa osa käsitellystä liuoksesta joutuu kontaktiin ylipaineistetun ilman kanssa. Joissakin kohteissa ja isoissa yksiköis-

sä on flotaatioaltaan pohjalle myös laitettu pohjakaavin (14) laskeutunutta lietettä varten, joka poistetaan myös. (Degremont 1991b,)

Reaktioalueella (4) tapahtuvalla sekoituksella on tarkoituksena sekoittaa liuos dispersioveden kanssa ja hävittää kineettinen energia liuoksesta ennen reaktioalueelle saapumista. Joissakin tapauksissa lieterkerros pinnalla voi olla kymmenien senttimetrien paksuinen ja erittäin stabiili. Toisissa tapauksissa lieterkerros voi olla erittäin ohut ja hento. Pinnalla olevan kaapimen lapojen määrä riippuu kaapimen pyörimisnopeudesta, lapojen välisestä etäisyydestä ja poistettavan lietteen määrästä. (Degremont 1991b, 680.)

5.2 Flotaatiolaitteet

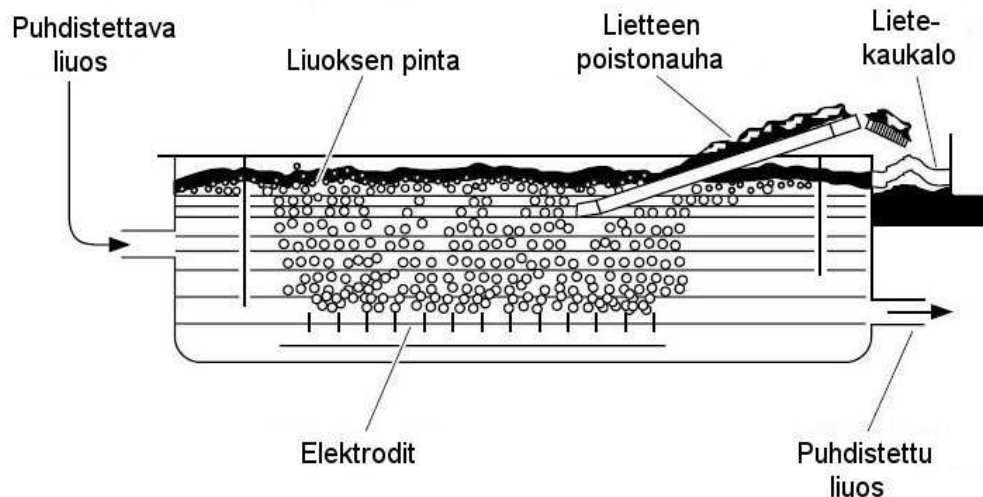
Erityyppiset flotaatiolaitteistot voidaan jakaa eri kategorioihin sen perusteella, kuinka ilmakuplat tuotetaan ja syötetään laitteistoon. Kuvioista 11 nähdään jaottelu eri kategorioihin. Jokaisella näistä on omat hyvät puolensa ja rajoituksensa. Näitä etuja ja rajoituksia täytyy harkita, kun valitsee omiin tarpeisiinsa sopivaa laitteistoa. (Perry & Green 1997, 19–59.)



KUVIO 11. Flotaatiolaitteistojen lajittelu kuplien tuottamis- ja syöttämistavan mukaan (Perry & Green 1997, 19–60.)

5.2.1 Elektrolyyttinen

Elektrolyyttisten flotaatiolaitteiden tai elektroflotaation toiminta perustuu vety- ja happikuplien tuottamiseen laimeassa vesipohjaisessa liuoksessa johtamalla sähkövirtaa kahden elektrodin välillä. Kuvioista 12 nähdään toimintakaavio elektroflotaatiolaitteesta. (Perry & Green 1997, 19–59.)



KUVIO 12. Elektroflotaatiolaitteen toimintakaavio (Perry & Green 1997, 19–60.)

Elektrodien mahdollisina materiaaleina voidaan käyttää alumiinia, platinointua titaania, titaania, jossa on lyijydioksidi pinnoitte, ja ruostumatonta terästä. Elektrodeille syötetään sähköä 5 ja 10 voltin väliltä. Sähkön kulutus on noin $0,5\text{--}0,7\text{ kW/m}^2$ liuoksen sähkönjohtokyvyn ja elektrodien välimatkan mukaan. (Perry & Green 1997, 19-59–60.)

Tärkein haittapuoli elektroflotaatiossa liittyy elektrodien huollon tarpeeseen. Elektrodeihin kertyy ajan myötä epäpuhtauksia, ja niitä pitää mekaanisesti puhdistaa. Elektrodeja joudutaan myös vaihtamaan tiheään tahtiin kulumisen takia. (Perry & Green 1997, 19–60.)

Kuplien koko vaihtelee noin $10\text{--}50\ \mu\text{m}$, ja kuplien muodostuminen tuottaa hyvin vähän turbulenssia. Kaasua syntyy noin $50\text{--}60\ \text{l/h/m}^2$. Elektroflotaatio on houkutteleva vaihtoehto käytettäväksi pienten partikkeleiden ja heikkojen flokkien erotuk-

seen. Erityisesti elektroflotaatio on huomattu taloudellisesti järkeväksi vaihtoehdoksi pienen mittakaavan toteutuksissa, joissa virtaus on 10–20 m³/h, kuplien tuottamiskapasiteetin takia. Elektroflotaatiota ei pidetä hyvänä prosessina juomakelpoisen veden puhdistuksessa, koska elektrodeista voi mahdollisesti liueta raskaita metalleja veteen ja ne voivat aiheuttaa pilaantumista. (Perry & Green 1997, 19–60; Degremont 1991a, 176.)

5.2.2 Korkeapaineflotaatio (DAF)

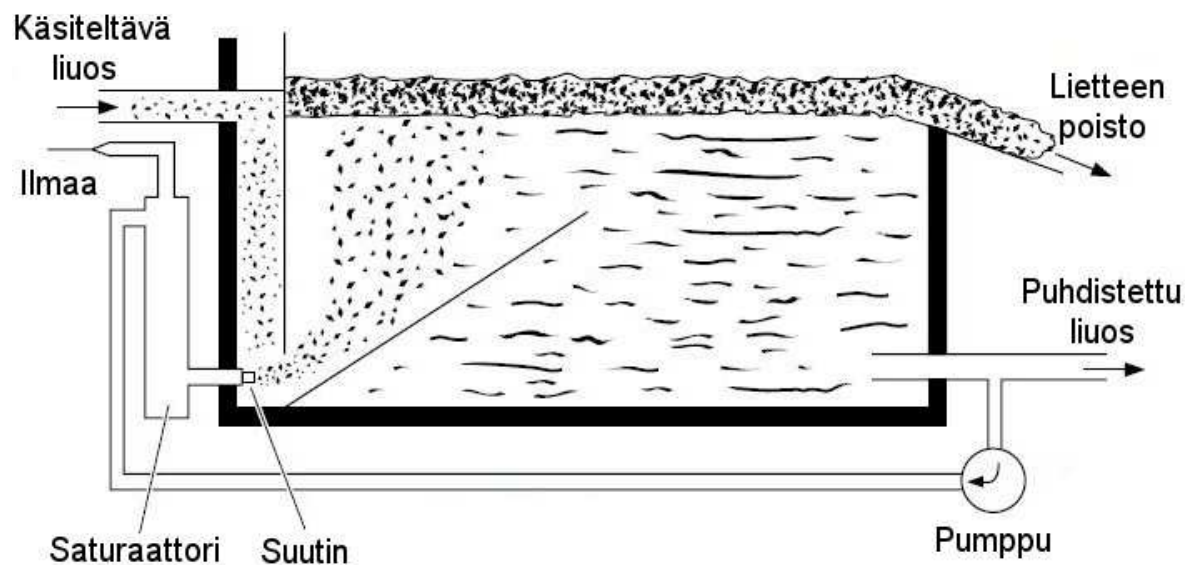
Korkeapaineflotaatio (dissolved-air flotation) tapahtuu prosessivirrasta otetun saturoidun nesteen avulla. (luku 5.3). Partikkeli-kuplakontakti tapahtuu suoralla kontaktilla, jolloin tarvitaan hyvin vähän mekaanista sekoitusta. Korkeapaineflotaatiossa kuplat ovat kokoluokkaa 20–100 µm, jolloin ei välttämättä tarvita ollenkaan vaahdotereagenssien lisäystä prosessiin. Tämä rajoittaa usein ilmalla kyllästymisen määrää, joten korkeapaineflotaatiota käytetään tavallisesti prosessivirtauksiin, joissa on pieni kiintoainepitoisuus (0,01–2 % tilavuudesta). (Perry & Green 1997, 19–60.)

Korkeapaineflotaatio voidaan jakaa kahteen pääryhmään, jotka ovat tyhjiöflotaatio (vacuum) ja paineflotaatio (pressure). Näistä paineflotaatio on laajemmin käytetty. Tyhjiöflotaatiossa käsiteltävä virtaus saturoidaan ilmakehän paineessa olevalla ilmalla ja syötetään flotaatitankkiin, missä vallitsee tyhjiö, jolloin kuplien tuotto kohoaa. Tätä prosessia voidaan ajaa vain panosprosessina, ja se vaatii monimutkaisia laitteita tuottamaan ja ylläpitämään tyhjiötä. (Perry & Green 1997, 19–60.)

Paineflotaatiossa prosessi toimii jatkuvana paineistuksen avulla. Paineflotaatiossa prosessivirtaus kyllästetään ilmalla paineistuksen avulla saturaattorissa ja syötetään flotaatioaltaaseen, joka toimii normaalissa ilmakehän paineessa. Paineen aleneminen johtaa pienten ilmakuplien syntymiseen, ja ne nostavat pintaan partikkelit, jotka sitten poistetaan lietteenä. (Perry & Green 1997, 19–60.)

Prosessissa voidaan paineistaan koko virtaus tai vain osa virtauksesta, jolloin osa virtauksesta syötetään altaaseen ilman ilmalla kyllästystä. Tämä vaihtoehto tuottaa

taloudellisesti säästöä, kun vain osa virtauksesta käsitellään. Kummassakin tapauksessa pitää ottaa huomioon virtauksen käsittely ennen allasta. Jos virtaus käsitellään flotaatioreagensseilla, flokkuloinnissa pitää ottaa huomioon flokkien kesto flotaatiossa. Yleisesti paineflotaatiossa käytetään ilmalla kyllästettyä, käsiteltyä liuosta. Käsiteltävä liuos syötetään suoraan altaaseen, jolloin osa puhdistetusta liuoksesta kierrätetään ja kyllästyksen jälkeen syötetään takaisin. Kuvioista 13 nähdään kyseisen paineflotaation toimintakaavio. (Perry & Green 1997, 19–60.)



KUVIO 13. Paineflotaation toimintakaavio. (Perry & Green 1997, 19–60.)

Korkeapaineflotaatiota käytetään useimmiten jäteveden ja juomakelpoisenveden käsittelyyn. (Perry & Green 1997, 19–60.)

5.2.3 Dispersed-air flotaatio

Dispersed-air flotaatiossa ilmakuplat tuotetaan joko pneumaattisesti (pneumatic) tai mekaanisesti (mechanical). Kummassakin tapauksessa tuotetut kuplat ovat verrattain suuria eli vähintään 1 mm:n kokoisia. Muodostuvien ilmakuplien kokoa ja vakautta kontrolloidaan lisäämällä vaahdotteita flotaatioprosessiin. (Perry & Green 1997, 19–61.)

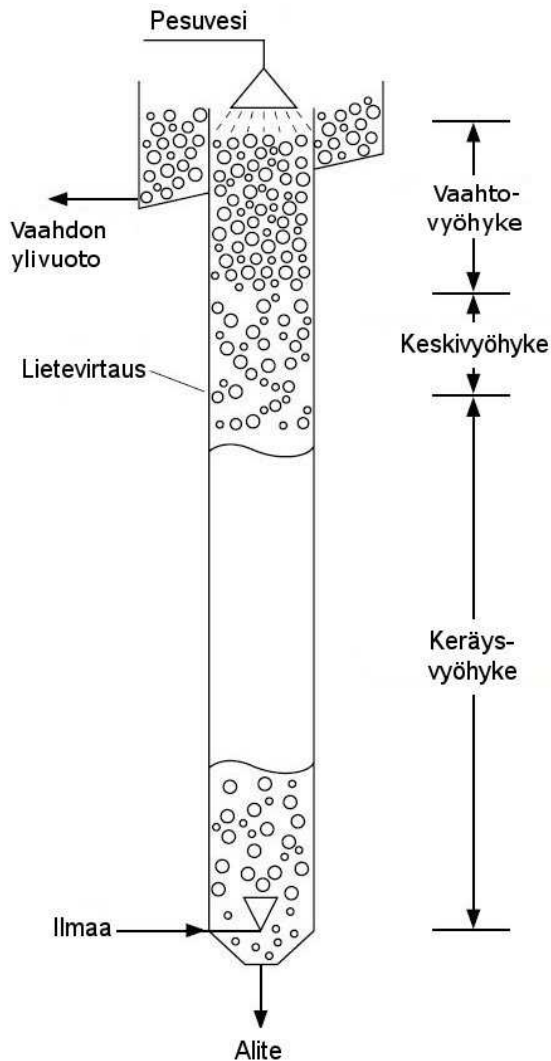
DA-flotaatio on erittäin yleinen flotaatiolaitte mineraaliteollisuudessa metallisten ja ei-metallisten malmien hyödyntämisessä sekä hiilen puhdistuksessa, jossa on korkeita pitoisuuksia tuhkaa ja rikkiä. Näissä tapauksissa syöttövirtaukset sisältävät suhteellisen suuren määrän kiintoainetta (5–50 % tilavuudesta) ja läpivirtaukset ovat suurusluokaltaan yli 4000 tonnia tunnissa. Tällaisten kiintoainemäärien hallinta flotaatiolaitteissa vaatii tarkkaa ohjausta ja seuranta. Prosessissa pitää ottaa huomioon kiintoaine suspension ominaisuudet ja edellytykset kupla-partikkelikontaktin tapahtumiselle, sekä mahdollistaa rauhallinen alue vaahdon alapuolelle ja tuottaa tarpeeksi paksu ja stabiili vahtokerros. (Perry & Green 1997, 19–61.)

5.2.4 Pneumaattinen

Flotaatiokolonnit kuuluvat pneumaattisiin flotaatiolaitteisiin, joissa ilmakuplien tuottaminen toteutetaan syöttämällä ilma suoraan liuokseen, jolloin mekaanista sekoitusta ei tarvita. Kolonnit rakennetaan pitkistä putkista, jotka ovat poikkileikkaukseltaan ympyränmuotoisia tai neliskulmaisia ja yleensä sisältävät sisäisiä välipohjia. Pituus vaihtelee 10–15 metrin välillä, ja pohjapinta-ala on 5–10 m². Kolonniin syötetään esikäsitelty lietevirtaus 2/3 kolonnin korkeudesta, ilma kolonnin alaosasta sekä pesuvesi kolonnin yläosasta. Poistoina ovat kolonnin yläosasta vaahdon ylivuoto, joka koostuu hydrofobisista partikkeleista sekä alaosasta alitevirtauksena hydrofiilisiä partikkeleita sisältävä liete. (Perry & Green 1997, 19–62.) Kuviossa 14 esitellään perinteinen flotaatiokolonnin toimintakaavio.

Flotaatiokolonnit toimivat vastavirtaperiaatteella, jolloin nousevat ilmakuplat kulkevat lietevirtauksen läpi. Tänä aikana hydrofobiset partikkelit liittyvät kupliin. Prosessi tapahtuu kolmessa erilaisessa vaiheessa, joita ovat vaahtovaihe, keskivaihe ja keräysvyöhyke. Hydrofobisten partikkelien talteenotto tapahtuu ilmakuplien avulla keräysvyöhykkeellä. Lietteen alaspäin suuntautuva virtaus koko kolonnin pituudelta säädetään alitteen poistonopeuden ja pesueden lisäyksen avulla. Tällä varmistetaan, että puhdistamatonta lietettä ei lähde nousemaan ylöspäin. Lisäksi nesteen alaspäin suuntautuva virtaus auttaa vähentämään hydrofiilisten partikkelien jumittumista nouseviin ilmakupliin keräysvyöhykkeellä sekä kupla-

partikkelikontaktin rikkoutumista kaikilla vyöhykkeillä. (Perry & Green 1997, 19–63.)



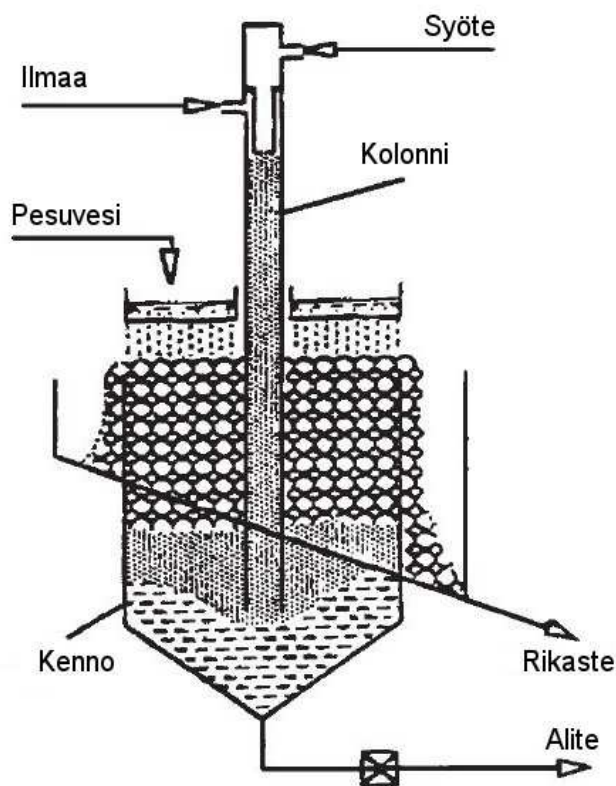
KUVIO 14. Flotaatiokolonnin toimintakaavio (Perry & Green 1997, 19–63.)

Kunnolla suunnitellut välipohjat vähentävät huonoa kiertoa ja parantavat kupla-partikkelikontaktia. Suurimman eron kolonnin suorituskyvyssä hydrofobisten partikkelien talteenotossa ja vaahdon laadun suhteen saadaan kuitenkin aikaan lietteen ja ilman syöttönopeuden sekä ilmakuplien pinta-alan avulla. (Perry & Green 1997, 19–63.)

On yleistä, että flotaatiokolonnit rakennetaan ns. talon sisällä niiden yksinkertaisen rakenteen vuoksi lukuun ottamatta patentoituja ilmansyöttötapoja sisältäviä laitteistoja. Tarjolla on useita ilmansyöttömalleja, joihin lukeutuvat yksinkertaiset huokoi-

set tulpat, jotka valmistetaan lasista, ruostumattomasta teräksestä tai kumista, sekä hienostuneemmat venturi- tai sisäiset sekoittimet. (Perry & Green 1997, 19–63.)

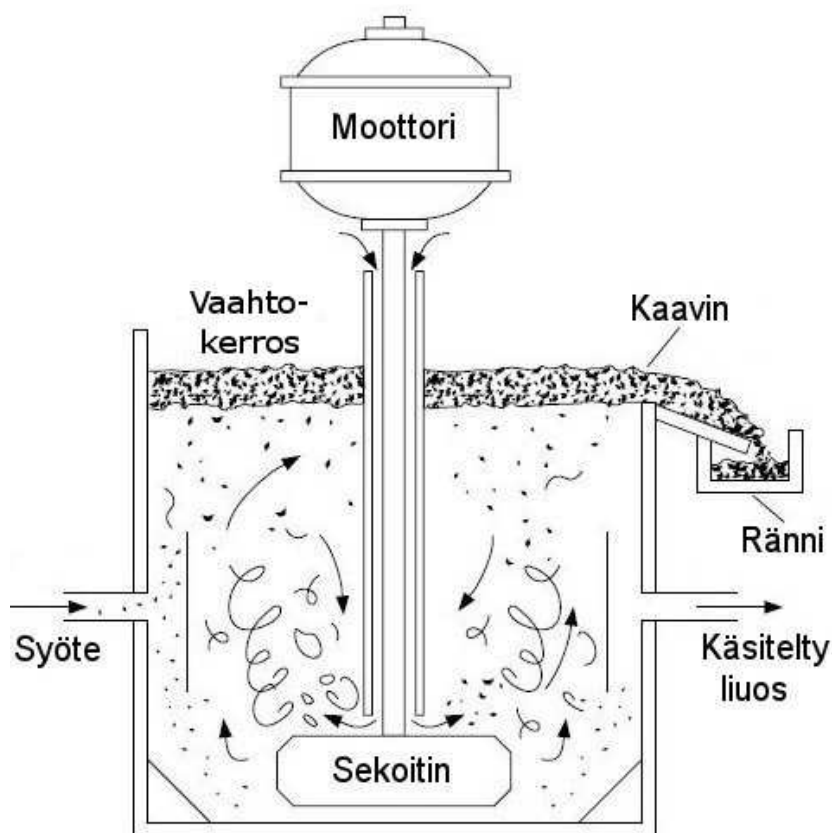
Etuina flotaatiokolonneilla on parantunut erotustehokkuus varsinkin hienojakoisilla materiaaleilla, alhaiset kustannukset, alhainen pinta-alan tarve ja helppo sopivuus automaattiseen ohjaukseen. Perusflotaatiokolonnista on useita muunnoksia, joita ovat esimerkiksi pakatut kolonnit, joihin on lisätty tätekappaleita. Tätekappaleet parantavat kuplien yhdenmuotoisuutta koko kolonnissa, edistävät kupla-partikkelikontaktia, lisäävät liete- ja kuplavaiheiden viipymäaika sekä aikaansaavat syvemmän vaahtovyöhykkeen. Jameson kenno (KUVIO 15) taas on yhdistelmä kenno- ja kolonnisuunnittelua. Siinä on pystysuora alaspäin suuntaava kolonni, missä ilma ja liete hajautuvat paksuun ilmakuplista koostuvaan vaahtoon luoden hyvän ympäristön kupla-partikkelikontaktille. Tämä vaahto lasketaan kennoon, jossa tapahtuu kupla-partikkelien ja lietteen erotus. (Perry & Green 1997, 19–63.)



KUVIO 15. Jameson kenno (Perry & Green 1997, 19–64.)

5.2.5 Mekaaniset kennot

Mekaaniset kennot (KUVIO 16), jotka paremmin tunnetaan flotaatiokennoina, ovat kuution tai sylinterin muotoisia. Niissä on siipipyörä, jota ympäröivät jakolevyt, joiden avulla syötetään liete kennoon ja poistetaan vaahto ylivuotona sekä käsitelty liuos alitteena. Ilma syötetään kennoon sekoittimen akselin ympärillä olevan putken avulla, joko itse ilmastuksella, joka syntyy pyörivän sekoittimen aiheuttamasta paine-erosta, tai ulkoisella puhaltimella tapahtuvalla ilman syötöllä. (Perry & Green 1997, 19–61.)



KUVIO 16. Flotaatiokennon toimintakaavio (Perry & Green 1997, 19–61.)

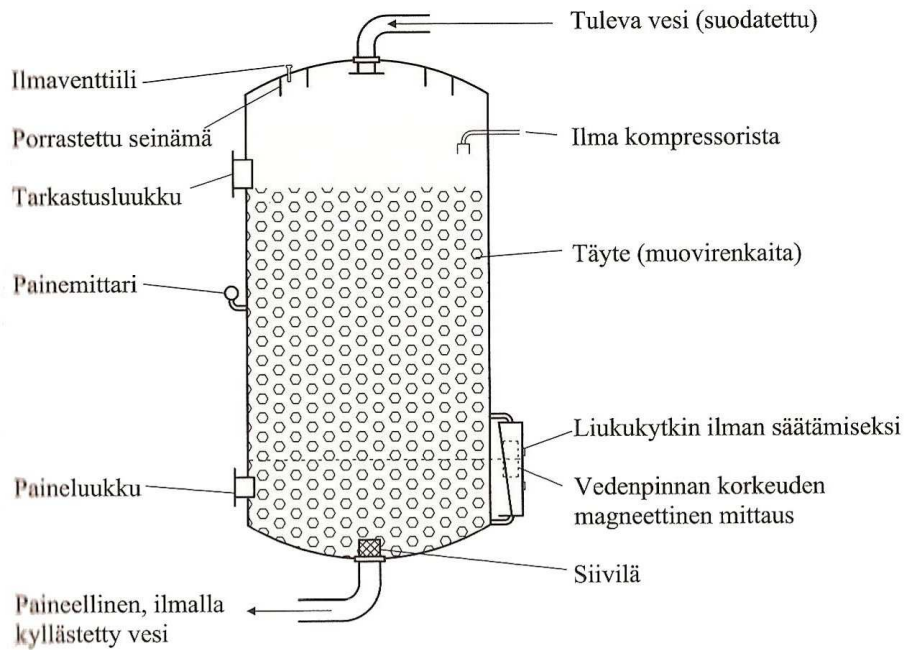
Tyypillisissä asennuksissa flotaatiokennoja asennetaan sarjaan, jolloin jokaisen kennon vaahto poistetaan yliterännillä ja käsitelty liuos siirtyy seuraavaan kennoon käsittelyyn. Kenno voi olla suunniteltu siten, että lietteen virtaus seuraavaan kennoon on rajoitettu padoilla tai se on rajoittamaton. (Perry & Green 1997, 19–61.)

Uudet mineraalien käsittelylaitokset suunnitellaan kapasiteetiltaan 2000–4000 t/h. Uusien flotaatiolaitteiden kapasiteetti on 10-kertainen verrattuna 15 vuoden takaisin laitteisiin. Suuremman mittakaavan flotaatiolaitteilla saavutetaan alhaisemmat aloitus- ja käyttökustannukset ja pienempi pinta-ala. On kuitenkin tärkeää ottaa huomioon, että suuremmat flotaatiokennot eivät vähennä tarvetta laittaa kennoja sarjaan. Suurempien kennojen käyttö rinnakkain vähentää kuitenkin kennojen kokonaisuutta, ja tällä tavalla saadaan säästettyä pumpuissa, putkituksessa ja muissa tarvittavissa lisälaitteissa. (Perry & Green 1997, 19–62.)

5.3 Dispersiovesi

Dispersiovesi tuotetaan ns. saturaattoreissa, jotka voivat olla täytteellä varustettuja tai ilman täytettä (KUVIO 17). Täytteiden tehtävänä on tehostaa dispersioveden muodostumista. Täytteinä voidaan esimerkiksi käyttää muovisia kappaleita. Vaikka täytetty saturaattori on tehokkaampi kuin pakkaamaton, käytetään useimmiten kuitenkin pakkaamatonta, koska saturaattorit joudutaan tarkastamaan säännöllisesti. Ilman täytettä joudutaan käyttämään 200 kPa korkeampaa painetta verrattuna täytettyyn, että sama määrä ilmaa liukenisi. (Karttunen 2004, 100; Edzwald 2010, 6–7.)

Vetenä käytetään flotaatiossa käsiteltyä liuosta kierrätettynä tai vettä suoraan linjasta otettua, mutta useimmiten käytetään käsiteltyä liuosta. Käsitelty liuos johdetaan saturaattoriin pumpulla ja ilma kompressorin avulla. (Karttunen 2004, 100; Edzwald 2010, 6–7.)



KUVIO 17. Täytteellä varustettu saturaattori (Karttunen 2004, 101.)

Ilma koostuu suurimmaksi osaksi hapesta (~ 21 %) ja typestä (~78 %), joista happi liukenee veteen enemmän kuin typpeä. Tämä johtaa siihen, että saturaattorissa muodostuu typellä rikastettu ilmakehä. Tasapainotilassa saturaattorin ilmakehässä on 85–87 % typpeä ja 15–13 % happea. Tämän vuoksi veteen liukenee vähemmän ilmaa kuin ilmakehän paineella toimivassa saturaattorissa. (Karttunen 2004, 100; Edzwald 2010, 6–7.)

Veteen liukenevan ilman määrä riippuu liuoksen ominaisuuksista, käytettävästä paineesta ja vallitsevasta lämpötilasta. Taulukosta 2 nähdään paineen ja lämpötilan vaikutus ilman liukoisuuteen; liukoisuus vaihtelee noin 110–200 mg/l. Tyypillisesti saturaattori suunnitellaan käyttämään 500 kPa:n painetta lämpötilan ollessa 20 °C, jolloin liukoisuus on 130 mg/l. (Karttunen 2004, 100; Edzwald 2010, 6–7.)

TAULUKKO 2. Paineen ja lämpötilan vaikutus ilman liukoisuuteen (mukaillen Edzwald 2010, 7.)

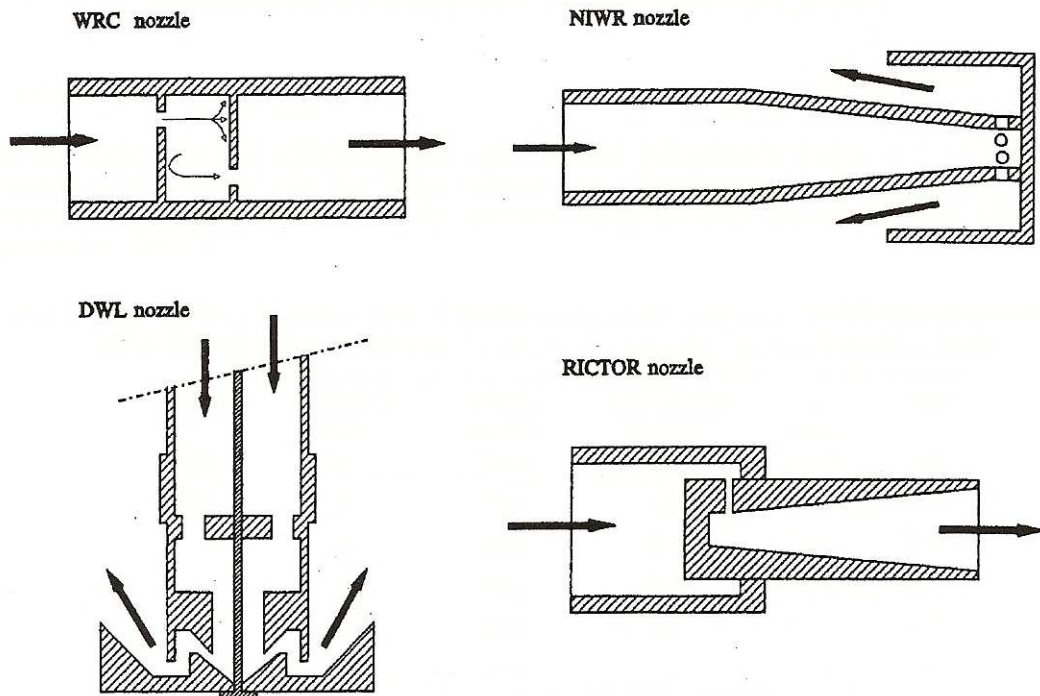
Saturaattorin paine (kPa)	Ilman määrä (mg/l)	
	5 °C	20 °C
400	144	108
500	172	130
600	202	151

Suuremmalla paineella saadaan aikaiseksi pienempiä kuplia, mutta 350 kPa:n jälkeen paineen nostolla ei ole merkittävää vaikutusta kuplien määrään. (Edzwald 2010, 7.)

5.3.1 Dispersiovesi ja kuplien syntyminen

Dispersioveden syöttö flotaatioaltaaseen tapahtuu yleensä säädettävistä tai kiinteistä suuttimista. Dispersioveden purkautuessa suuttimesta normaaliin paineeseen ilma vapautuu kuplina liuokseen. Kuplat syntyvät kahdessa vaiheessa, joista ensimmäinen vaihe tapahtuu paineen alenemisen jälkeen, jolloin kuplat kasvavat kuplaytimistä. Kuplien määrä pysyy vakiona, kun ei tapahdu törmäyksiä. Toinen vaihe tapahtuu, kun liuennut ilma on kokonaan kaasuuntunut. Ilman kokonaistilavuus pysyy samana, mutta kuplien määrä vähenee yhteentörmäyksiensä vuoksi. (Edzwald 2010, 6–7.)

Kuviossa 18 esitellään yleisimpiä suutinmalleja, joita on käytössä flotaatiolaitteissa. WRC, NWR ja RICTOR ovat kiinteitä suutinmalleja, kun taas DWL edustaa säädettävää suutinmallia. Säädettävät suuttimet on helppo automatisoida, jolloin saadaan dispersioveden määrä pysymään vakiona muuttuvissa virtauksissa. Säädettävät suuttimet ovat usein pienempiä virtausmäärältään verrattuna kiinteisiin, joten niitä asennetaan useampia. (Rykaart & Haarhoff 1995, 29–30.)



KUVIO 18. Yleisiä flotaatiossa käytettäviä suuttimia (Rykaart & Haarhoff 1995, 30.)

Suuttimet ovat erilaisia, mutta niissä on kuitenkin samanlaisia ominaisuuksia. NIWR- ja WRC-suuttimissa on törmäyspinta virtausreitillä. DWL-, RICTOR- ja NIWR-suuttimissa on suunnanmuutos virtausreitillä, ja RICTOR- sekä DWL-suuttimissa on kaventuva kohta suuttimen lopussa. (Rykaart & Haarhoff 1995, 29–30.)

5.3.2 Kuplien muoto, koko ja nousunopeus

Kuplien muotoon ja kokoon vaikuttavat käytetty paine, nousunopeus ja syöttötapa. Pienet kuplat (100 µm ja pienemmät) nousevat pallomaisina, suuremmat kuplat (1–10 mm) nousevat ellipsoidimaisina ja vielä suuremmat kuplat (>10 mm) ottavat kalottisen muodon. Kuplien koko voidaan laskea kaavasta 14. (Edzwald 2010, 7.)

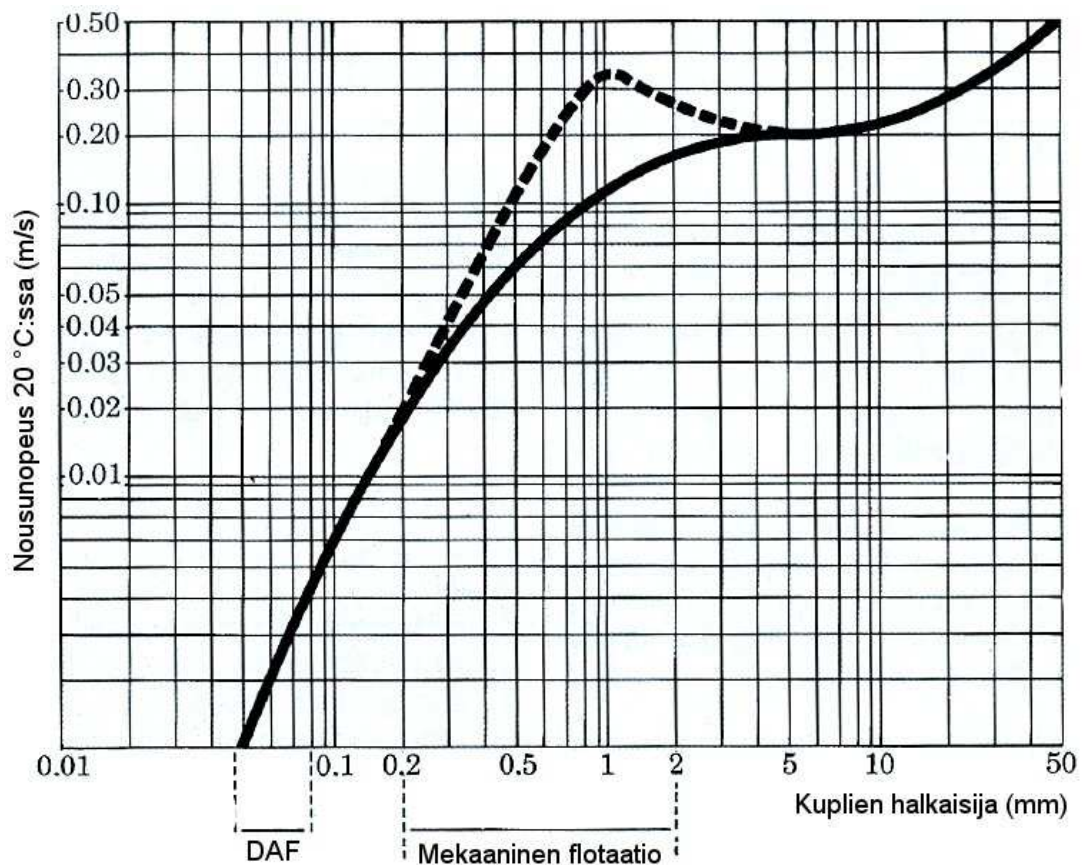
$$d_{cb} = \frac{4\sigma}{\Delta P} \quad (14)$$

jossa:

d_{cb} kuplien kriittinen halkaisija

σ pintajännitys
 ΔP paineenmuutos syötössä

Kaavasta nähdään, että mitä suurempi paine-ero suuttimessa syntyy, sitä pienempiä kuplat on. Mitä pienempiä kuplat ovat, sitä enemmän niitä voidaan vapauttaa kaasutilavuutta kohden. Mutta pienemmät kuplat nousevat hitaammin verrattuna isompiin (KUVIO 18), jolloin kuplia voi jäädä puhdistettuun liuokseen. (Edzwald 2010, 7.)



KUVIO 19. Kaasukuplan nousunopeus vedessä (Degremont 1991a, 172; Karttunen 2004, 97.)

Kuplien nousunopeus voidaan laskea Stokesin lain avulla, jossa käytetään nostaja vastusvoimia perusteena. Stokesin laki pitää paikkansa nousunopeuksien suhteen, kunhan kuplien halkaisija on pienempi kuin 100 μm . Isommilla kuplilla nousunopeudet kasvavat suuremmiksi kuin kaavalla 15 saadaan tulokseksi.

$$V = \frac{d^2 \cdot \Delta\rho \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (15)$$

jossa:

- d kuplan halkaisija
- $\Delta\rho$ ilman ja veden tiheyksien erotus
- g gravitaatiokiihtyvyys
- μ liuoksen viskositeetti (Degremont 1991a, 171.)

6 FLOTAATIO PROSESSIJÄTEVEDEN PUHDISTUKSESSA

6.1 Yleistä

Flotaatiota käytettiin alun perin mineraalien rikastuksessa ja käytetään vieläkin kiintoaineiden erotukseen käyttäen vakaata vaahtoa selektiiviseen erotteluun. Flo- taatioprosesseista etenkin korkeapaineflotaatiota (DAF) on hyödynnetty jätevesien ja kotitalouksien likavesien puhdistukseen useiden vuosien ajan. Yleisimmät käyt- tökohteet ovat olleet kiintoaineiden, ionien, makromolekyylien ja kuitujen poisto vedestä. (Rubio, Souza & Smith 2002, 140–141.)

Suurimmat erot tavanomaisen malmin flotaatioon käytettyjen prosessien ja jäteve- sien käsittelyyn käytetyn flotaation välillä ovat kuplien koossa ja tuotossa. Mineraa- lien flotaatiossa käytetään keskikokoisia tai isoja kuplia (300–1500 μm), koska nii- den on huomattu olevan optimaalisia mineraalipartikkelien vaahdotuksessa. Jäte- vesien flotaatiossa taas tarvitaan erittäin pieniä kuplia (<100 μm), jotta erittäin pie- net partikkelit ja kolloidit saadaan kellutettua. (Rubio ym. 2002, 140–141.)

Flotaatiossa täytyy varoa liian suuria leikkausnopeuksia. Yleensä kellutettavat kol- loidit ovat kerääntyneet yhteen, jolloin suuret leikkausnopeudet hajottavat synty- neet kerääntymät. Tämä täytyy etenkin huomioida jätevesien puhdistuksessa, koska mineraalien flotaatiossa tämän kaltaisia ongelmia ei ole. Prosessissa kan- nattaa myös huomioida mikrokuplien kyky nostaa tiheitä ja isoja kiintoainepartikke- leita. (Rubio ym. 2002, 140–141.)

Flotaation eduiksi voidaan lukea korkea selektiivisyys arvokkaiden metallien tal- teenotossa, korkea epäpuhtauksien poistotehokkuus, korkea ylivuotomäärä ja ly- hyt käsittelyaika. Lisäksi voidaan säästää kustannuksissa, kun voidaan valmistaa pienempiä tankkeja ja käyttää pienempää tilaa ja käyttökustannukset ovat mata- lammat uudemman sukupolven laitteilla. (Rubio ym. 2002, 140–141.) Taulukosta 3 nähdään eroja flotaation käytössä mineraalien prosessoinnissa ja jätevesien käsit- telyssä.

TAULUKKO 3. Erot flotaation käytössä mineraalien prosessoinnissa ja vesien ja jätevesienkäsittelyssä (Rubio ym. 2002, 140–141.)

	Mineraalien flotaa- tio	Vesien ja jätevesien käsit- tely
Syötteen kiintoainepitoisuus (%)	25–40	<4 (DAF) 10–30 (kolonnit)
Partikkelikoko (µm)	10–150	1–50 (ei flokkulaatiota) 1–5 mm flokkeja
Kuupien koko (µm)	600–200	30–100 (DAF) 100–600 (kolonnit)
Kuupien nousunopeus (m/h)	250–800	0,7–30 (DAF) 30–1000 (kolonnit)
Kuupien määrä (cm ³)	$9 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^6$ (DAF) $2 \cdot 10^6$ – $9 \cdot 10^3$ (kolonnit)
Kuupien pinta-ala (cm ²)	100–30	4000–600 (DAF) 600–100 (kolonnit)
Ilman käyttöaste (%)	15–25	8–14 (DAF) 20–40 (kolonnit)

LÄHTEET

- Ainali, I., Juuso, E., Sorsa, A. 2001. Vesikemikaalien annostelutyökalun kehittäminen: Flotaation perusteet, koejaksot ja mallinnus. Säättötekniikan laboratorio, Oulun yliopisto.
- Bailey, James, Bohnet, Matthias & Brinder, Jeffrey. 2000. Bohnet Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry 6th edition, Sähköinen julkaisu. Wiley-VCH.
- Cheremisinoff, Nicholas 2002. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. Massachusetts: Butterworth-Heinemann
- Degremont. 1991a. Water treatment handbook vol 1, 6th edition. Pariisi: Lavoisier.
- Degremont. 1991b. Water treatment handbook vol 2, 6th edition. Pariisi: Lavoisier.
- Edzwald, J. 2010. Dissolved air flotation and me, Water Research (2010). Amherst: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts.
- Fuerstenau, Maurice, Jameson, Graeme & Yoon, Roe-Hoan. 2007. Froth flotation: a century of innovation. Colorado: SME.
- Hexadecyl Trimethyl. Www-sivu. Saatavissa: <http://www.fefchemicals.com/nb/-hexadecyl.htm>. Luettu 18.5.2010
- Huhtamäki, M. 2007. Flotaatio asumajätevesien käsittelyssä. Tekniikan ja laitteiston valinta ja käyttö. Naanatali: Juurocon Oy.
- Karttunen, Erkki. 2004. Vesihuolto 2. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto.
- Ketola, Raimo. 2006. Kapillaarielektroforeesin perusteet. Analytiikan perusteet. Farmaseuttisen kemian osasto, Helsingin yliopisto.
- Kiuru, H. 2001. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). Laboratory of Environmental Engineering, Helsinki University of Technology.
- Lavallee, H. & Nadreau, J. (1997), Dissolved Air Flotation System use increases for secondary clarification, Pulp & Paper, 71.
- OMG Kokkola Chemicals Oy. Kemikaaliluettelo.
- OMG Kokkola Chemicals Oy. 2004. Kestävää kemiaa. Esitelehtinen.
- Peltokangas, J., Heinänen, J., & Viitasaari, M. 1991. Vesihuoltotekniikan yksikköoperaatiot ja yksikköprosessit osa 1. Vedenhankinta. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Perry, Robert & Green, Don. 1997. Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th Edition. New York: McGraw-Hill.

Pihkala, Juhani. 2003. Prosessitekniiikan yksikköprosessit, Opetushallitus.

Rahikka, Laura. 2004. Rikastustekniikka-kurssi. Luentomateriaali. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu.

Rubio, J., Souza M. & Smith, R. 2002. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Minerals Engineering 12 (2002). Elsevier Science Ltd.

Rykaart, E. & Haarhoff J. 1995. Behaviour of air injection nozzles in dissolved air flotation. Water Science and Technology, Volume 31 Issue 3–4, 25–35. IWA Publishing.

Vedenpuhdistusprosessi. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.psychowave.org/txt/perus.doc>. Luettu 18.5.2010.

Wills, Barry & Napier-Munn, Tim. 2006. Wills' Mineral Processing Technology 7th Edition. Elsevier Science & Technology Books.

Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes. Pdf-tiedosto. Zeta-meter, Inc. Saatavissa: <http://www.zeta-meter.com/5min.pdf>. Luettu 3.2.2010.