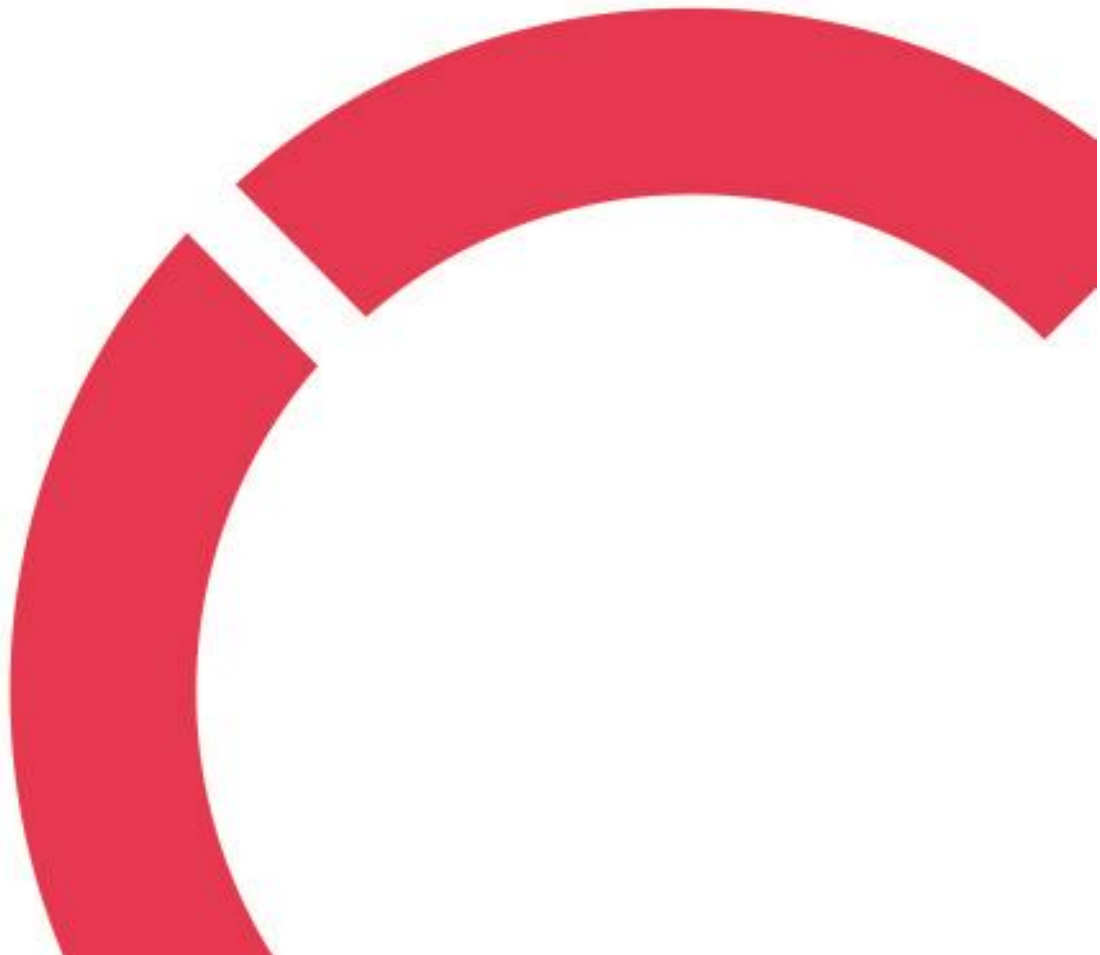


Merja Kumpumäki

**JÄTEVESIEN KARAKTERISOINTI JA KIINTOAINEEN LASKEU-
TUSPROSESSI**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Huhtikuu 2023**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Huhtikuu 2023	Tekijä/tekijät Merja Kumpumäki
Koulutus Kemiantekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi JÄTEVESIEN KARAKTERISOINTI JA KIINTOAINEN LASKEUTUSPROSESSI		
Työn ohjaaja Risto Puskala		Sivumäärä 32
<p>Tämä opinnäytetyö on toteutettu erään yrityksen toivomuksesta, tarkoituksena tutustua jätevesien karakterisointiin ja sen toteutustapoihin. Aihetta lähestyttiin ensin yleisellä tasolla, jonka jälkeen selvitetään mitkä asiat muuttuvat, jos kyseessä on epäorgaaninen jätevesi. Haluttiin selvittää, miten jätevesien karakterisointia suoritetaan, miten ominaisuuksia luokitellaan ja mitä asioita vesistä on syytä tutkia ja seurata.</p> <p>Teoriaosuudessa käydään läpi jätevesissä esiintyvän kiintoaineen laskeutusta, toteutustapoja sekä siihen liittyviä asioita kuten laitteistoa ja jäteveden ominaisuuksia, joilla voi olla merkitystä laskeutumisen lopputuloksen kannalta.</p> <p>Kokeellinen osuus tutkii epäorgaanisten jätevesien kiintoaineen laskeutusta laboratoriomittakaavassa. Kokeellisessa osuudessa käytettyjen vesien ja kemikaalien yksityiskohtaiset tiedot ovat salatusta liitteessä. Kokeessa selviää, mikä flokkulantti kullekin vedelle parhaiten sopii sekä millainen vaikutusastian muodolla ja sekoitustavalla on kiintoaineen laskeutumiseen.</p>		

Asiasanat Flokkulaatio, karakterisointi, laskeutus, sakeutus
--

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date April 2023	Author Merja Kumpumäki
Degree programme Chemical Engineering		
Name of thesis WASTEWATER CHARACTERIZATION AND SOLIDS SETTLINGPROCESS		
Centria supervisor Risto Puskala	Pages 32	
<p>This thesis was commissioned by industrial company and deals with wastewater characterization and chemically assisted settling of solids. The theory part contains information on the characterization of wastewater on a general level and regarding inorganic wastewater. The theory part also familiarizes the reader with the properties and the equipment that are important in terms of settling of solid matter.</p> <p>In the experimental part, different chemicals were tested in the laboratory. Based on the tests, the best chemicals were chosen for each wastewater and the tests also revealed the importance of the container and the mixing method for the success of flocculation.</p> <p>Detailed information on the chemicals used and wastewater can be found in the appendix, which is concealed.</p>		
<p>Key words Characterization, flocculation, sedimentation, settling, thickening</p>		

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 JÄTEVEDEN KARAKTERISOINTI.....	2
2.1 Teolliset jätevedet.....	3
2.2 Epäorgaanisen teollisuuden jätevedet	3
3 KIINTOAINEN LASKEUTUS JA LAITTEISTO	5
3.1 Laskeutukseen vaikuttavia tekijöitä.....	5
3.2 Flokkulaatio	6
3.3 Koagulaatio	7
3.4 Koagulaatioflokkaus	8
3.5 Apukemikaalit	9
3.5.1 Epäorgaaniset flokkulantit (metallisuolat)	10
3.5.2 Orgaaniset flokkulantit (synteettiset polymeerit)	10
3.6 Laitteisto.....	11
3.6.1 Allassakeutin.....	11
3.6.2 Lamellisakeutin	12
3.6.3 Sakeuttimen valinta ja mitoitus	14
4 JÄTEVEDEN OMINAISUUKSIA	15
4.1 Kiintoaineen vajoamisnopeus	15
4.2 Hydrofobia ja hydrofilia.....	16
4.3 Pintavaraus	16
4.4 Zeta-potentiaali	17
4.5 Redoxpotentiaali.....	18
4.6 Liuoksen johtokyky.....	18
5 KOKEELLINEN OSUUS	20
6 KOKEELLISEN OSUUDEN TULOKSET.....	22
7 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	27
LÄHTEET	29
KUVIOT	
KUVIO 1. Jäteveden karakterisoinnissa käytetty ominaisuuksien luokittelu.....	2
KUVIO 2. Kuvasarja flokkulaatiosta.....	7
KUVIO 3. Koagulaatioflokkaus.	9
KUVIO 4. Allassakeuttimen poikkileikkaus	11
KUVIO 5. Pyöreä allassakeutin ja haralaitteisto	12
KUVIO 6. Vinojen väliseinien vaikutus kiintoaineen laskeutumiseen.....	13
KUVIO 7. Kiintoainehiukkaseen vaikuttavat voimat	13

KAAVAT

KAAVA 1. Allas-sakeuttimen halkaisija.....	14
KAAVA 2. Kiintoaineen vajoamisnopeus.....	15
KAAVA 3. Sähkönjohtavuus I.	18
KAAVA 4. Sähkönjohtavuus II.	18

KUVAT

KUVA 1. Kaksoiskerros	17
KUVA 2. Jäteveten 2. muodostunutta kiintoainetta mikroskoopilla kuvattuna.....	23
KUVA 3. Kiintoaine laskeutuu	24
KUVA 4. Kiintoaine laskeutuneena.....	24
KUVA 5. Hienoin kiintoaine ei laskeudu	25
KUVA 6. Sekoituksen merkitys kiintoaineen laskeutumisessa	26

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Erikokoisten partikkeleiden laskeutusajat	5
TAULUKKO 2. Jätevesien lähtötiedot.....	20
TAULUKKO 3. Jäteveden 1. laskeutustestien tulokset.....	22
TAULUKKO 4. Jäteveden 2. laskeutustestien tulokset.....	23
TAULUKKO 5. Jäteveden 3. laskeutustestien tulokset.....	24

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on tutkia jäteveden karakterisointia: mitä se sisältää ja kuinka se voidaan toteuttaa epäorgaanisen teollisuuden jätevesille ja mitkä asiat siinä on tärkeitä huomioida. Työ tehdään yhteistyössä alueella toimivan, epäorgaanista teollisuutta edustavan yrityksen kanssa ja työhön sisältyy myös laboratorio-osuus, jossa tutkitaan yhteistyöyrityksen jätevesiä ja tehdään niille yrityksen toivomia laboratoriokokeita.

Työn tavoitteena on saada käyttökelpoinen tietopaketti siitä, miten jätevesiä voidaan karakterisoida, mitkä asiat ja ominaisuudet on tutkittavissa vesissä tärkeitä ja kuinka jätevesissä olevien kiintoainehiukkasten sakeuttaminen olisi mahdollisimman tehokasta. Työssä tarkastellaan aihetta epäorgaanisen teollisuuden tuottaman jäteveden kannalta.

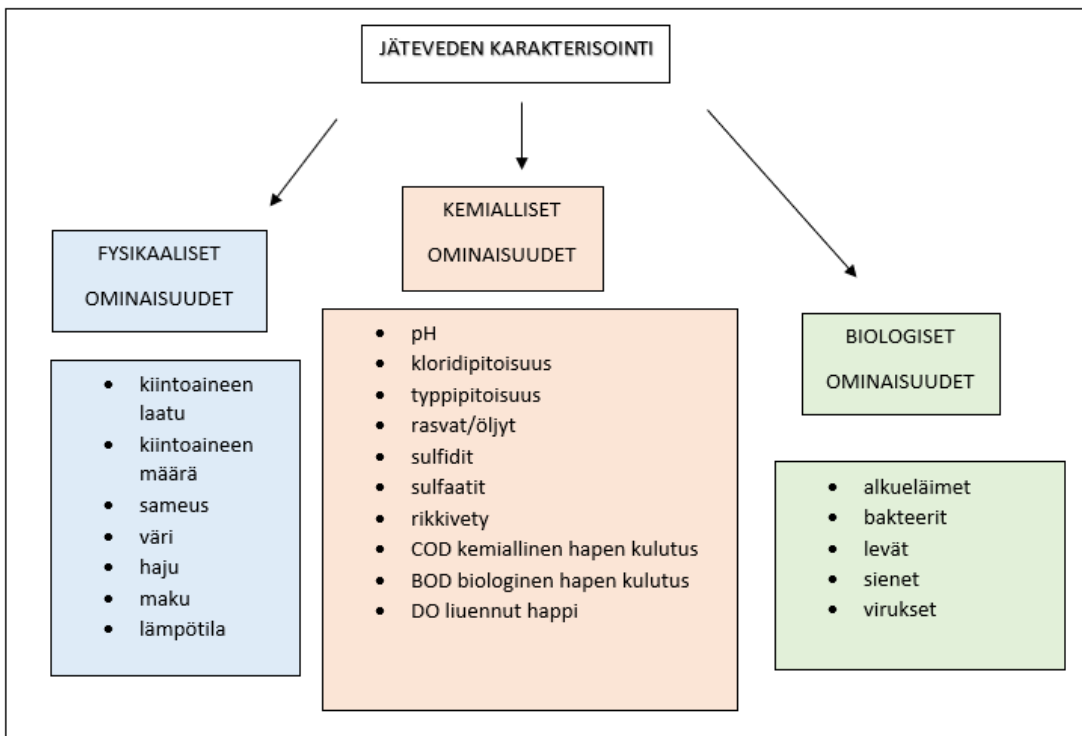
Tuotannossa tapahtuvien muutosten vaikutus jätevesien laatuun on huomattava ja se aiheuttaa vaihtelua vesissä olevien kiintoaineiden määrään sekä laatuun ja sitä kautta myös sen laskeutumiseen. Kokeellisessa osuudessa tarkastellaan tuotannossa syntyviä jätevesiä ja tutkitaan kiintoaineen kemiallisesti avustettua laskeutumista ennalta sovituilla kemikaaleilla.

Työn tutkiva osuus toteutettiin Centria ammattikorkeakoulun kemianlaboratoriossa yhteistyöyrityksen toimittamille vesinäytteille ja koesarjoissa käytettiin yrityksen valitsemia ja toimittamia kemikaaleja.

Tutkimusmenetelmien laadullisuuden ja tulosten luotettavuuden näkökulmasta tarkasteltuna tässä työssä käytetyt tutkimusmenetelmät ovat käytännönläheiset ja samanlaiset, joita tuotannollisessakin ympäristössä voidaan toteuttaa. Testien toistettavuus ja keskenään yhteneväiset tulokset antavat luotettavuutta tulosten oikeellisuudelle ja ovat keskenään vertailukelpoisia. Testattavien vesinäytteiden laatu on suoraa verrannollinen tuotantoprosessin vakauden tai epävakauden kanssa, joten tämän kaltaisten testien tulokset voivat olla hyvinkin vaihtelevat tuotannolliseen ajankohtaan nähden. Yksittäisistä testeistä ei vielä pysty suuria johtopäätöksiä tekemään, vaaditaan pidemmältä ajalta kerättyä historiatietoa, jotta saadaan laajempi käsitys kokonaisuudesta, varmuutta ja ennakoitavuutta vaihtelevuuteen.

2 JÄTEVEDEN KARAKTERISOINTI

Jäteveden karakterisointi tarkoittaa vedelle tehtävää monipuolista ominaisuuksien tunnistamista. Ominaisuuksien luokittelu ja analysointi perustuvat silmämääräiseen havainnointiin sekä monipuolisiin analyttisiin laboratoriomittauksiin ja testauksiin. Kaikessa laajuudessaan karakterisoinnissa huomioidaan jäteveden ominaisuuksia, jotka ovat fyysisiä, kemiallisia ja biologisia. (KUVIO 1.) Fyysiset ominaisuudet, joita voidaan määrittellä, ovat kiintoaineiden määrä ja laatu, sameus, väri, haju, maku ja lämpötila. Kemiallisiin ominaisuuksiin luetaan pH, kloridipitoisuus, typpipitoisuus, rasvojen ja öljyjen osuus, sulfidit, sulfaatit ja rikkivedyn (H_2S) määrä. Myös kemiallinen hapen kulutus (COD), liuennut happi (DO) ja biologinen hapen kulutus (BOD) kuuluvat kemiallisiin ominaisuuksiin. COD ja BOD ovat yleisesti käytettyjä parametrejä, jotka kertovat orgaanisen aineksen kemialliseen ja biologiseen hajoamiseen tarvittavan hapen määrän aerobisissa olosuhteissa ja normaalissa lämpötilassa. Biologisissa ominaisuuksissa huomioidaan ja tutkitaan mikro-organismeja, kuten sienet, levät, virukset, alkueläimet ja bakteerit. (SavEnviron 2021.) Tätä biologista mikro-organismia kutsutaan myös biomassaksi (Green & Perry 2008, 22–65).



KUVIO 1. Jäteveden karakterisoinnissa käytetty ominaisuuksien luokittelu. (mukaiillen SavEnviron 2021)

2.1 Teolliset jätevedet

Teollisuudessa syntyvät jätevedet voivat koostua talousjätevesistä, jotka syntyvät sosiaali- ja taukotiloissa, prosessijätevesistä, jotka ovat peräisin tuotantoprosesseista sekä jäähdytysvesistä, jotka voivat olla kertakäyttöisiä tai useasti jäähdytysjärjestelmissä kierrätettyjä (Green & Perry 2008, 22–58). Koska jokaisella teollisuuden alalla syntyy omanlaisiaan jätevesiä, erilaisista tuotannoista, on kullekin alalle määritelty omat päästöluvat, joista selviävät hyväksytyt päästötasot kaikille epäpuhtauksille. Jäteveden laadun hallinnassa optimaalisen lopputuloksen saavuttamiseksi on järkevää kunkin yrityksen itsenäisesti suorittaa kyseisen jäteveden laboratorio- ja pilottitestauksia, jotta ymmärtää ja tunnistaa jäteveden laadulliset vaihtelut ja niiden vaikutukset jäteveden käsittelyyn (Green & Perry 2008, 22–63). Teollisesta jätevedestä poistettavia epäpuhtauksia voivat olla esimerkiksi väriä aiheuttavat yhdisteet kuten orgaaninen aines ja pigmentit. Poistettavia ovat mahdollisesti myös metallit kuten sinkki, kupari, nikkeli ja kromi. Poistettavia ravinteita voivat olla typpiyhdisteet ja fosfori. Happea kuluttavia komponentteja voi olla myös syytä poistaa; niitä ovat esimerkiksi sokerit, proteiinit ja fenolit. Suspendoitunutta kiintoainesta voi jätevedessä myös olla. Sillä tarkoitetaan öljyjä, rasvoja, hydroksideja, kuituja, hiekkaa, savea, bakteereita ja leviä. Riippuu täysin tuotannosta, millaisia ainesosia jätevedestä kussakin tapauksessa on syytä poistaa. (Leppisaari 2017.)

2.2 Epäorgaanisen teollisuuden jätevedet

Tässä tapauksessa epäorgaanisen teollisuuden jätevesien karakterisoinnissa oleellisia analysoitavia ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi sameus, kiintoainekkuus ja sen laatu sekä kemialliset ja fyysiset ominaisuudet, kemiallinen hapen kulutus (COD), pH, lämpötila ja sähkönjohtavuus sekä tässä tapauksessa myös typpipitoisuus. Jäteveden sameus on analysoitavissa optisesti tai omalla sameusmittarilla. Sameus kertoo kiintoaineen läsnäolosta ja sen tiheydestä. Kiintoaineista huomioidaan, missä olomuodossa se on, onko se kelluvaa, laskeutuvaa, kolloidista vai liuenneena. Kiintoainesta luokitellaan seuraavin määrityksin: Total Solids (TS) on kokonaiskiintoainemääritys, joka kertoo kiintoaineen määrän, kun vesi on haihdutettu pois. Kokonaiskiintoainekkuus voidaan jakaa kahteen jakeeseen, suspendoituneeseen (TSS) eli suodatettavissa olevaan kiintoaineeseen ja liuenneeseen (TDS) kiintoaineeseen, joka jää suodatuksen jälkeen väliaineeseen. Suspendoitunut kiintoainekkuus voidaan erottaa vedestä suodattimella, jonka huokoskoko on n. 0,45-2,0 µm. Suodattimen läpäissyt materiaali luokitellaan liuenneeksi kiintoaineeksi. (Leppisaari 2017.)

Kemiallinen hapenkulutus (COD) kertoo tarvittavan hapen määrän, orgaanisen aineksen kemialliseen hapetukseen, vahvan kemiallisen hapettimen avulla. COD mitataan laboratoriossa standardoidulla menetelmällä. Korkea hapen kulutus arvo kertoo jätevedellä olevan kohonnut todennäköisyys aiheuttaa ei-toivottuja ympäristö vaikutuksia. (Rönkkö 2016.) PH, lämpötila ja sähkönjohtokyky ovat mitattavissa omilla mittareillaan. PH:n muutokset vaikuttavat esimerkiksi reaktionopeuksiin ja itse reaktioihin. Lämpötilan muutokset vaikuttavat kaasujen liukoisuuteen, viskositeettiin, joka vaikuttaa sedimentaatioon sekä jotkut epäpuhtaudet voivat muuttaa muotoaan lämpötilan muuttuessa. (Roms 2017.) Sähkönjohtavuus kertoo liuoksen kyvystä johtaa sähkövirtaa. Liuoksessa ionien tehtävänä on johtaa sähköä ja ionikonsentraatiolla on suora yhteys liuoksen johtokykyyn. (Leppisaari 2017.) Typeä voi esiintyä jätevedessä kolmessa eri muodossa: ammonium (NH_4^+), nitriitti (NO_2^-) sekä nitraatti (NO_3^-). Typpipitoisuutta ilmaistaan mg/l; se kuvastaa orgaanisen, ammonium-, nitriitti-, sekä nitraattitypen määrän. (Roms 2017.)

3 KIINTOAINEEN LASKEUTUS JA LAITTEISTO

Neste-kiintoaine-erotusprosessit ovat prosessiteollisuuden yksikköprosesseista yleisimpiä (Pihkala 2005, 37). Silloin seoksesta erotetaan jokin komponentti (Pihkala 2018, 50). Moitteettomasti toimiva erotusprosessi säästää kustannuksia (Pekkala 2019) ja vähentää myös tuotannosta syntyviä päästöjä. Sopivan erotusmenetelmän valintaan vaikuttavat lietteen ominaisuudet, erotuksen tarkoitus, tuotteelle asetetut vaatimukset sekä käytettävissä olevat aika ja resurssit (Pekkala 2019). Niissä tapauksissa, joissa kiintoaineet ovat minimaalisen pieniä hiukkasia, hyödynnetään erotusmenetelmässä kemiallista saostusta eli koagulaatiota, flokkulaatiota tai niiden yhdistelmää. (Pihkala 2005, 37). Ne perustuvat siihen, että kemikaalilisäyksellä autetaan kiintoaineen laskeutumisessa. Lietteen keskimääräisen partikkelikoon voi arvioida laskeutuskokeen avulla. (TAULUKKO 1.)

TAULUKKO 1. Erikokoisten partikkeleiden laskeutusajat. (Pekkala 2019).

KIINTOAINE	KOKO	AIKA/ 5 cm *
karkea	1 - 0,1 mm	1- 13 s
hieno	100 – 1 µm	13 s – 20 h
kolloidi	1 - 0,001 µm	20 h-20a

*) kiintoaineen tiheyden ollessa 2650 kg/m³; neste vettä

Kiintoaineen laskeutuksessa ja selkeytyksessä erona on se, että laskeutusta toteutetaan liuoksessa, jossa on paljon kiintoainesta ja se halutaan saada laskeutumaan alitteeseen. Selkeytyksessä kiintoaineen määrä liuoksessa on vähäisempi ja tavoitteena on saada muodostumaan mahdollisimman kirkasta ja puhdasta nestettä ylitteenä. (Pekkala 2019.) Jätevedessä liuenneena olevien metallien talteen ottamisessa hyödynnetään usein juuri laskeutusta/saostamista. Metallikationia sisältävään veteen lisättäessä anionia muodostuu niukkaliukoisia suoloja. Kun kyseessä on liuenneen metallin saostus, suoritetaan se hydroksidi-, sulfidi- tai karbonaattisaostuksena. (Uusitalo 2018.)

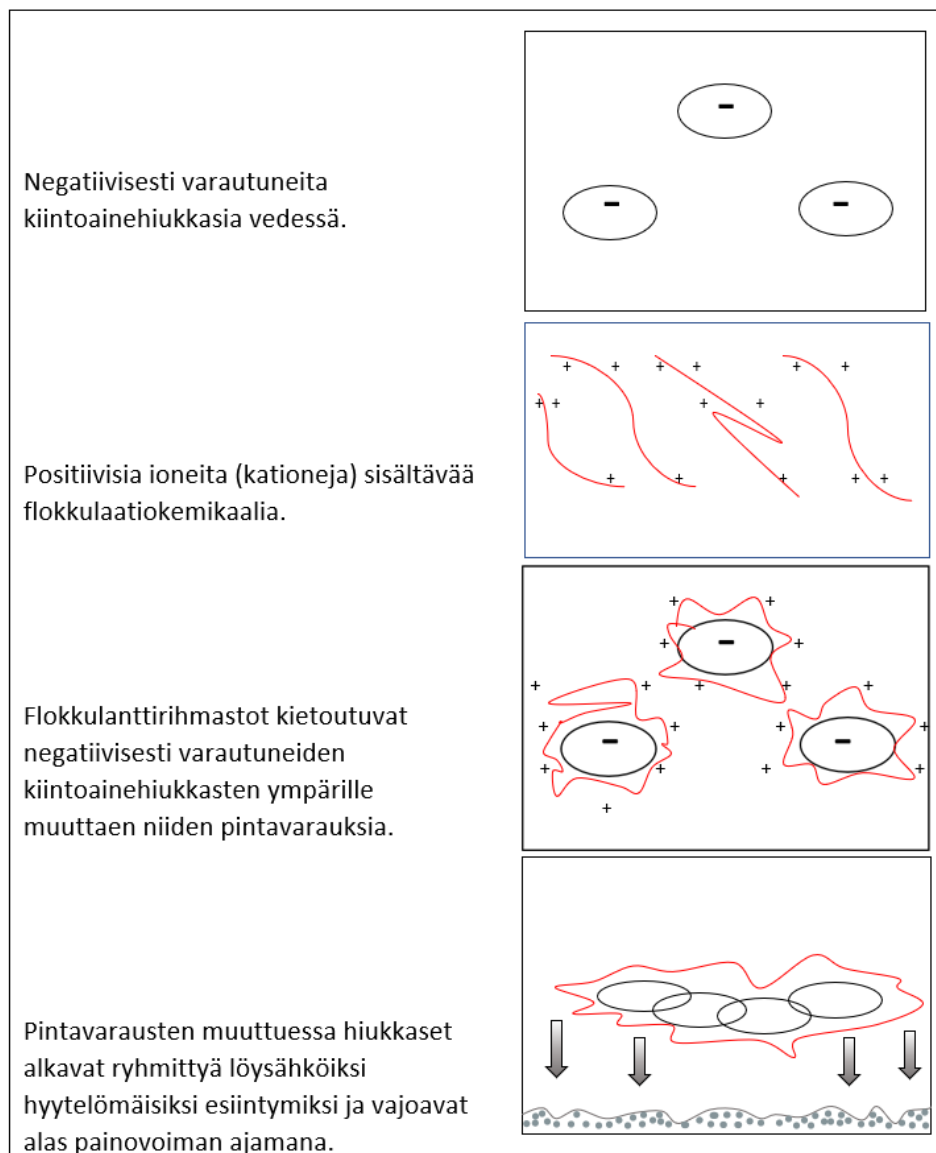
3.1 Laskeutukseen vaikuttavia tekijöitä

Laskeutukseen vaikuttavia asioita kiintoaineen ominaisuuksissa ovat raekokojakauma, raemuoto ja tiheys, rakeiden pintaominaisuudet sekä koostumus. Nesteen ominaisuudet, jotka vaikuttavat laskeutuk-

seen, ovat kiintoainepitoisuus, tiheys, lämpötila, viskositeetti, pintajännitys, pH sekä kemialliset ominaisuudet. Mekaaninen sekoitus, laskeutumisnopeus, flokkautuminen ja vajoamistavat vaikuttavat myös ilmiöön. (Pekkala 2019). Jos kyseessä on hyvin hienojakoinen kiintoaine, suuri vajoamisnopeus voidaan saavuttaa vain hyvin flokkuloidussa laimeassa seoksessa. Mitä pienempi nesteessä olevan kiintoaineen pitoisuus on, sitä nopeammin kiintoaines laskeutuu (Pihkala 2005, 39). Kun nesteessä olevan kiintoaineen määrä ylittää 10 prosenttia, liuos alkaa menettää nestemäisiä ominaisuuksia (Green & Perry 2008, 22–65). Laskeutuksesta haastavan tekee käsiteltävän vesiliuoksen moninaisuus ja se että useat komponentit ovat toistensa funktioita. (Lukkarinen 1987).

3.2 Flokkulaatio

Flokkulaatio on nesteessä olevan kiintoaineen tiivistymisilmiö, joka tapahtuu sakeuttimessa. Sakeutin muistuttaa sammiota tai allasta, jossa voi olla suppilomainen pohja. Flokkulaatiossa kiintoainetta sisältävään nesteeseen lisätään kemikaalia (flokkulantti), joka saa kiintoaineen ryhmittymään löysähköiksi, hyytelömäisiksi tai sienimäisiksi muodostelmiksi ja muodostuneet ryhmittymät vajoavat alas painovoiman ajamana. (Pekkala 2019.) Hyvin onnistuneessa flokkulaatiossa kiintoaineryhmittymät vajoavat alas ja kerääntyvät altaan pohjalle ja samalla kirkastunutta nestettä muodostuu pinnalle. Flokkuloivat kemikaalit toimivat siten (KUVIO 2), että kemikaaleissa olevat ionit (erityisesti positiivisesti varautuneet kationit) kiinnittyessään negatiivisesti varautuneelle kiintoainehiukkasen pinnalle, muuttavat hiukkasen sähköisiä ominaisuuksia saaden hiukkaset magneetin tavoin hakeutumaan yhteen ja kiinnittymään toisiinsa, muodostaen löysiä ryhmittymiä ja vajoamaan painovoimana ajamana alas. (Pihkala 2005, 37–40.)



KUVIO 2. Kuvasarja flokkulaatiosta. (mukaillen Pihkala 2005, 39)

Flokkulaatiokemikaaleista on runsas tarjonta sekä orgaanisia että epäorgaanisia. Kussakin käyttökoh- teessa valitaan sopivimmat aineet vallitsevien olosuhteiden mukaan. Flokkulaation apuaineita (flokku- lantteja) on satoja erilaisia. (Pihkala 2018, 51.)

3.3 Koagulaatio

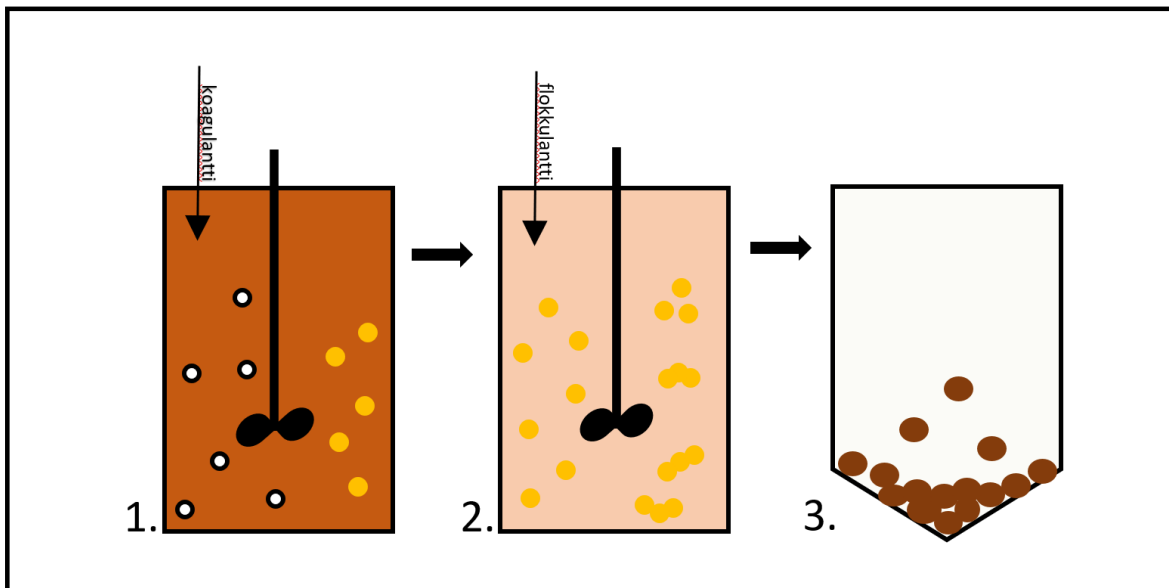
Koagulaation ja flokkulaation eroina mainittakoon, että koagulaatio liittyy vahvasti selkeytykseen ja flokkulaatio sakeutukseen. Kun laskeutettavaa kiintoainesta on nesteessä enemmän, käytetään kiintoai- neen sakeuttamiseen flokkulaatiota, kun taas kiintoainesta on vain vähän, on kyseessä nesteen kirkasta- minen, laskeutetaan vähäinen kiintoaines silloin koagulaation avulla. Koagulantteja voidaan käyttää

joko yhdessä flokkulanttien kanssa tai yksinään. Flokkulantin annostus merkitään yleensä g/t kiintoainetta, kun kyse on sakeutuksesta ja koagulantin annostus mg/l nestettä, kun kyseessä on nesteen kirkastaminen ja kiintoaineen pitoisuus on vähäinen. (Green & Perry 2008, 18–67, 18–68.) Koagulaatio on mahdollista tapahtua neljällä eri tavalla: kaksoiskerroksen kompressio, adsorptioepästabiloituminen, silloitus ja saostuminen. Koagulantin liiallinen pitoisuus voi saada kerran epästabiloituneen liuoksen stabiloitumaan uudelleen. (Leppisaari 2017.) Kun kolloidisten hiukkasten keskinäinen hylkivä sähkövaraus pienenee kemikaalin lisäämisen myötä, mahdollistuu hiukkasten sienimäisen massan muodostuminen. Koaguloivina aineina käytetään pääasiassa mineraalisia- tai orgaanisia koagulantteja tai näiden yhdistelmiä. (SNF 2023).

3.4 Koagulaatioflokkaus

Koagulaatioflokkaus on edellisten yhdistelmä. Siinä käytetään ensin koagulointiainetta rikkomaan kolloidisen kiintoaineen järjestäytyntä olemusta (destabilointi) ja pintavarauksia ja sitä kautta valmistelemaan olosuhteita paremmaksi tulevaa flokkulaatiota varten. Koagulantti sekä olosuhteet vaikuttavat siihen millä mekanismeilla epästabiloituminen tapahtuu. Koagulanttia voidaan käyttää myös vähentämään tarvittavan flokkulantin määrää (Green & Perry 2008, 18–67). Eli se voidaan mieltää ikään kuin esikäsittelyvaiheeksi ennen flokkulaatiota.

Kuviosta 3 käy ilmi, kuinka 1. vaiheessa, astiassa olevassa jätevedessä vasemmalla olevat kiintoainehiukkaset ovat hyvin kolloidisessa muodossa, eli vahvasti itsenäisiä. Niillä on vahvat hylkimisvoimat. Koagulantin lisäyksen jälkeen kiintoainehiukkasten hylkivät varaukset heikkenevät (astian oikeassa reunassa). 2. vaiheessa koaguloituun veteen lisätään flokkulanttia, joka tehoaa kiintoaineesiin paremmin, kun niiden varaukset eivät ole enää niin voimakkaat. Kiintoaineet alkavat muodostaa ryhmittymiä. 3. vaiheessa kiintoaine ryhmittymät vajoavat astian pohjalle painovoiman pakottamana ja yläosassa vesi kirkastuu.



KUVIO 3. Koagulaatioflokkaus. (mukaillen Actiflo 2016)

Kun kolloidishiukkasten väliset elektrostaattiset hylkimisvoimat on koagulantilla neutraloitu, korvautuvat ne Van der Waalsin vetovoimilla, joita kutsutaan myös dispersiivoimiksi. (Roms 2017.) Dispersiivoimia on kaikkien molekyylien välillä ja ne ovat sitä heikompia mitä pienemmistä hiukkasista on kyse (Opetustv 2015).

3.5 Apukemikaalit

Kemikaalien toimintamekanismi perustuu adsorptioon eli polymeerin ja kolloidin kiinnittymiseen. Kiintoaineen flokkautumista kuvaavia matemaattisia malleja on hyvin vähän, koska flokkautumisen toteutumiseen vaikuttavien tekijöiden määrä on hyvin laaja. Kemikaalien optimaalisen määrän arviointi on flokkautumiseen vaikuttavien ominaisuuksien runsauden vuoksi monimutkaista. Yliannostelun mahdollisuus on olemassa ja lopputulos on tällöin ei-toivottu. Partikkeleiden pinnoilla kemikaalin ylikylläisyys aiheuttaa hiukkasten keskinäisen hylkimisen uusiutumisen eikä kiintoaineksen laskeutuminen toteudu. (Vähäsavo 2014.) Laboratoriossa sekä tuotannossa tehtävissä kemikaalivalinnoissa tulee ottaa huomioon jäteveden pH, ioninen ympäristö, kuiva-ainepitoisuus (g/l) sekä mineraalisen ja orgaanisen kiintoaineen suhde (SNF 2023). Varmimmin toimivat kemikaalit valikoituvat vain testaamalla niitä ensin laboratoriossa ja sen jälkeen koeajamalla tuotannossa ja sama pätee myös annostelun suhteen: optimaalisen annostuksen löytää myös varmimmin testaamalla.

3.5.1 Epäorgaaniset flokkulantit (metallisuolat)

Epäorgaanisia flokkulantteja on vähemmän kuin orgaanisia. Epäorgaaniset ovat valtaosin metalli-ioneja sisältäviä. Niiden teho perustuu moniytimisten varauksellisten kompleksien muodostamiseen liuoksessa sekä adsorptiokykyyn (Leppisaari 2017). Epäorgaanisia flokkulantteja ovat esimerkiksi poltettu kalkki, ferrikloridi, ferrisulfaatti, alumiinisulfaatti, rikkihappo (Pihkala 2018, 51).

3.5.2 Orgaaniset flokkulantit (synteettiset polymeerit)

Suurin osa tarjolla olevista flokkulanteista on synteettisiä, polyakryyliamideja. Positiivisesti varatutuneita polymeerejä kutsutaan kationisiksi ja negatiivisia anionisiksi. Olemassa on myös varauksettomia polymeerejä sekä amfolyyttisiä polymeerejä, jotka sisältävät sekä anionisia että kationisia osia. Kationisten polymeerien käyttökohteet ovat alhaisemman pH:n alueella, sekä orgaanisten hiukkasten laskeutuksessa, kun taas anionisten polymeerien käyttökohteena ovat korkeamman pH:n olosuhteet ja mineraaliset hiukkaset. Polymeerien varaus ei ole ainoa niiden toimintaa ohjaava ominaisuus, muita polymeerien toimintaa ohjaavia ominaisuuksia ovat muun muassa ioninen voimakkuus, varaustiheys, hydrolyysin aste, molekyyliassa ja kaupallinen muoto.

Ioninen voimakkuus vaikuttaa adsorption tehokkuuteen ja voimakkuuden lisäys pienentää partikkeleiden välistä hylkimistä ja näin ollen partikkelit pääsevät lähemmäs toisiaan. Liian suuri ionien voimakkuus taas vähentää polymeeriketjujen ulottuvuutta adsorptiossa. Polyakryyliamidien molekyylien pituus riippuu monomeeriyksiköiden määrästä sekä varauksen voimakkuus on riippuvainen ionisoituvien sidosten luvusta. Tähän voidaan valmistusvaiheessa vaikuttaa hydrolyysiasteella. (Lukkarinen 1987.) Hydrolyysin aste ja varaustiheys vaikuttavat myönteisesti repulsiovuorovaikutuksiin ja mahdollistaa polymeeriketjun suuremman levinneisyyden liuoksessa. Optimaalinen hydrolyysiaste on 33 %. Liiallinen varaustiheys vähentää tapahtuvaa hiukkasten yhdistymistä. Molekyyliassa vaikuttaa muodostuvien flokkien ominaisuuksiin, mitä painavampi polymeeri, sitä suurempia ja heikkolaatuisempia flokkeja muodostuu. (Leppisaari 2017.) Hiukkasten ja flokkulantin välille syntyvät sidokset ovat pääasiassa ioni- ja vetysidoksia (SNF 2023). Synteettisiä polymeerejä ovat esimerkiksi Fennopol, Crosefloc ja Optifloc (Pihkala 2018, 52).

Flokkulantin valinnassa tulee ottaa huomioon syötevirran ominaisuudet sekä aiemmat kokemukset flokkulanteista, jos niitä on. Aiemmat kokemukset ovat arvokasta suuntaa antavaa tietoa. On hyödyll-

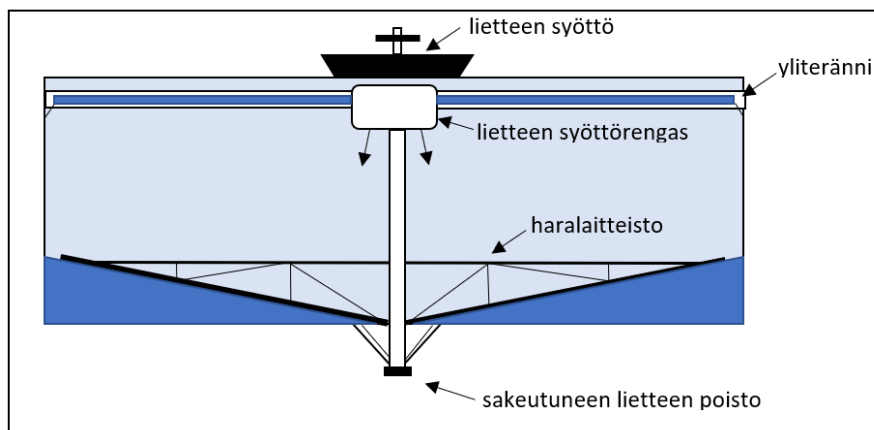
listä testata sekä anionista, ei-ionista että kationista ja polymeereistä sekä pitkäketjuista että lyhytketjuista. Flokkulointiaineen valmistajalta voi saada arvokasta tietoa sekä testauksessa, että sopivan annostelun suhteen. (Green & Perry 2008, 18–68.)

3.6 Laitteisto

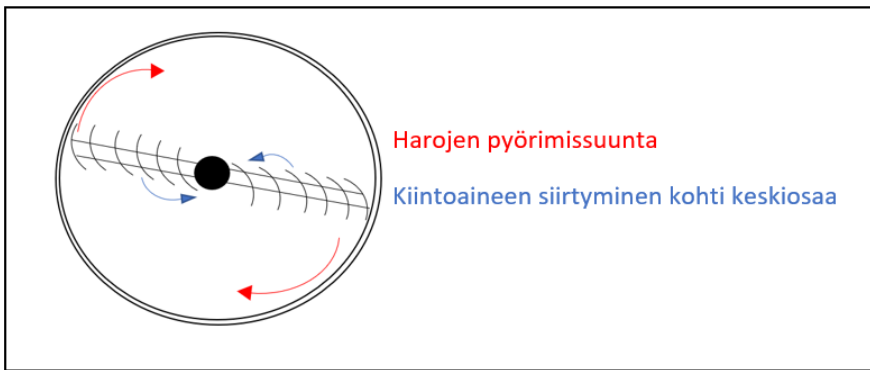
Kuten jo aiemmin mainittiin kiintoaineen laskeuttaminen, tapahtuu sakeuttimessa. Maan vetovoimaan perustuvia sakeuttimia on pääsääntöisesti kahta mallia: allassakeutin ja lamellisakeutin, näistä alla tarkemmat kuvaukset. On olemassa myös keskipakovoimaan perustuvia laitteita, niitä ovat syklonit ja sentrifugit, tässä työssä käsitellään vain allassakeuttimen ja lamellisakeuttimen toimintaperiaatteita.

3.6.1 Allassakeutin

Allasmallinen sakeutin muistuttaa pyöreää laaja-alaista sammiota (KUVIO 4), jossa on joko tasainen pohja tai sen sijasta pohja syvenee keskustaa kohti mentäessä. Sakeuttimeen johdetaan syötettä, joka sisältää kiintoainetta laskeuttavaa flokkulointiainetta.



KUVIO 4. Allassakeuttimen poikkileikkaus. (mukaiillen Pihkala 2018, 55)

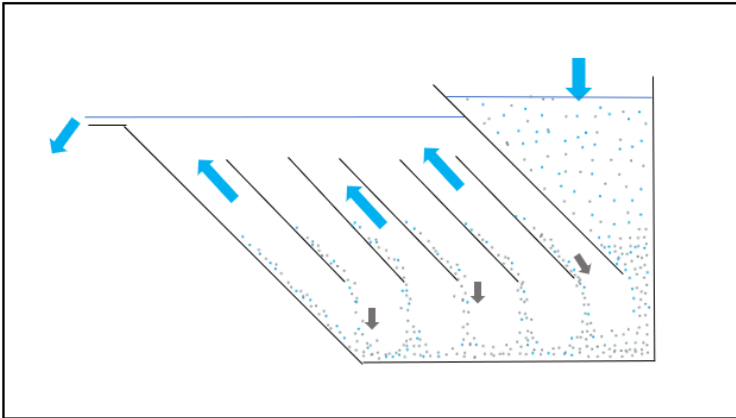


KUVIO 5. Pyöreä allasakeutin ja haralaitteisto. (mukaiillen Pihkala 2018, 55)

Allasakeuttimen pohjalla pyörii hyvin hitaasti haralaitteisto (KUVIO 5), joka tiivistää alas vajonneen kiintoaineen sekä ohjaa sen keskellä olevaan poistokartioon. Sakeuttimesta poistetaan kiintoainetta alitteena ja nestettä ylitteenä. (Pekkala 2019.) Arvokkaan kiintoaineen ollessa kyseessä sakeuttimessa käytetään kartionmuotoista pohjaa (Pihkala 2018, 54). Sakeuttimen ylite on harvoin täysin kirkasta, se sisältää aina kiintoaineita jonkin verran. Sakeuttimen ylikuormitus tilanteissa kiintoaineen määrä ylitteessä kasvaa (Pekkala 2019).

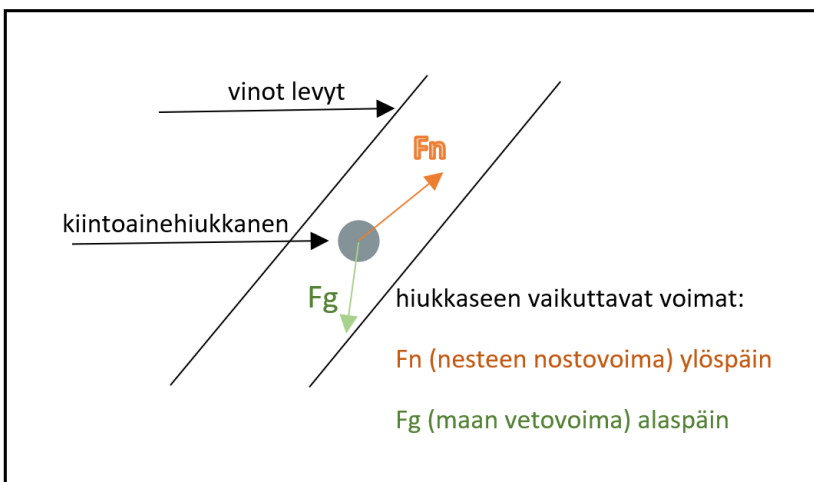
3.6.2 Lamellisakeutin

Lamellisakeutin on kartiolla pohjalla varustettu, vinon suorakaiteen muotoinen sakeutin/selkeytin, jonka sisään on asennettu useita vinoja levyjä n.45–60 asteen kaltevuuteen, nopeuttamaan kiintoaineen laskeutumista. Samansuuntaisten vinojen seinämien ansiosta laskeumapinta-ala moninkertaistuu ja kiintoaineen laskeutuminen tehostuu. (Pihkala 2018, 55.) Lamellisakeuttimessa neste virtaa ylöspäin ja kiintoaine laskeutuu vinoille seinämille liukuen sakeuttimen pohjalle. Sakeuttimen pohjalla sijaitsee suppilomainen lietetasku, jossa liete sakeutetaan ennen poistoa. (Pihkala 2018, 56.) Kuviossa kuusi havainnollistettuna miten vinot väliseinämät edesauttavat kiintoaineen laskeutumista.



KUVIO 6. Vinojen väliseinien vaikutus kiintoaineen laskeutumiseen. (mukaillen Pihkala 2005, 40)

Lamellisakeuttimen on mahdollista toimia neljällä eri periaatteella. Ne perustuvat erilaisiin virtauksiin, joita ovat myötävirta-, vastavirta-, poikkivirta- ja osittainen poikkivirtaperiaate. (Huttunen 2015.) Lamellisakeuttimessa kiintoainehiukkaseen vaikuttavat voimat ovat nesteen nostovoima (ylöspäin) sekä maan vetovoima (alaspäin), voimat on havainnollistettuna kuviossa seitsemän.



KUVIO 7. Kiintoainehiukkaseen vaikuttavat voimat. (mukaillen Pekkala 2019)

Lamellisakeuttimen etuja ovat pieni tilavuus, ei mekaanisia osia, lyhyet täyttö ja tyhjennysajat, ei vaadi suuria tiloja ja voidaan tarvittaessa laajentaa. Lamellisakeuttimen haittoiksi voidaan lukea se, ettei sillä ole puskurikapasiteettia, siinä on paljon likaantuvaa pintaa ja vaatii säännöllistä puhdistamista, ei kestä vaahtoa eikä suurta kiintoainekuormaa. (Pekkala 2019).

3.6.3 Sakeuttimen valinta ja mitoitus

Sakeutuslaitteiston suunnittelussa ja mitoituksessa on tarpeen karakterisoida syöte, ilman sitä on vaikea ennustaa suorituskykyä. Karakterisoinnin kannalta välttämätöntä on muuttujien tunnistaminen kuten syötteen kemiallinen koostumus sekä nesteen että kiintoaineen osalta, kiintoainepitoisuus, partikkelikokojakauma, joka huomioi karkeat partikkelit (+100 μ m) sekä hienot (-20 μ m) erikseen, hiukkasten ominaispainon, nesteen ominaispainon, liuenneiden aineiden pitoisuus nestefaasissa, lämpötila, pH. Kun syöte tunnetaan, huomioidaan koagulaatioon ja flokkaukseen liittyviä asioita esim. vaaditut sekoitusajat, energiavaatimukset ja kiintoainepitoisuudet. Tässä vaiheessa täytyy alkaa hahmottaa myös sakeuttimen syvyyttä ja pinta-alaa sekä tulokselliset tavoitteet. (Green & Perry 2008, 18–67.) Altaan tilavuus on yleensä tulovirtauksen funktio. Sekoituslaitteiston kokoon ja nopeuden valintaan vaikuttavat käyttöön tulevat reagenssit. (SNF 2023.) Kerättyjen tietojen perusteella päädytään hahmottamaan sakeuttimen malli. Kattavan suunnittelun jälkeen suoritetaan pilotointia ja testauksia laboratorio mitta-kaavassa (Green & Perry 2008, 18–67). Kaikkein pienimpiä partikkeleita ei saada koskaan sakeutettua ja erotettua nesteestä tehokkaimmillakaan laitteilla, koska nanomittakaavan hiukkaset laskeutuvat äärimmäisen hitaasti, jos ollenkaan. Lopullisen sakeuttimen valinnassa, suunnittelussa ja mitoituksessa joutuu pohtimaan myös, kuinka pitkälle viety erottelu on järkevää ja taloudellista.

Allas-sakeuttimen halkaisijan mitta voidaan laskea seuraavalla kaavalla (Jääskeläinen 2019):

$$D = \sqrt{\frac{4 * q_0 * t_u}{\pi * z_0}} \quad (1)$$

jossa

D = sakeuttimen / selkeyttimen halkaisija [m]

q_0 = lietteen tilavuusvirtaus [m³/h]

t_u = laskeutumisaika [h]

z_0 = sakeuttimen korkeus [m]

4 JÄTEVEDEN OMINAISUUKSIA

Jäteveden sisältämän hienon kiintoaineen partikkelikoon perusteella voi jäteveden luokitella joko kolloidiseksi tai ei-kolloidiseksi. Kolloidisessa vedessä partikkelikoko on keskimäärin pienempi kuin $1\mu\text{m}$ ja ei-kolloidisessa vedessä suurempi kuin $1\mu\text{m}$. Kolloidiset kiintoaineet eivät laskeudu omin avuin ja veden ominaisuudet säilyvät homogeenisenä. Ei-kolloidisen kiintoaineen laskeutumisenopeuteen vaikuttaa raekoko ja kiintoaineen pitoisuus. Kiintoaineen tilavuusosuus vaikuttaa laskeutumisenopeuteen vahvemmin kuin kiintoaineen paino-osuus. (Pekkala 2019.)

4.1 Kiintoaineen vajoamisnopeus

Kiintoaineen vajoamisen nopeuteen väliaineessa vaikuttavia asioita ovat kiintoaineen tiheys, hiukkasen läpimitta ja muoto, väliaineen tiheys ja viskositeetti. Laskeutuminen väliaineessa mukailee Stokesin lakia rakeesta $0,063\text{ mm}$ alkaen alaspäin seuraavan kaavan mukaisella tavalla. (Pihkala 2018, 44.)

$$v = \frac{s}{t} = \frac{(\rho' - \rho)gx^2}{18\mu} \quad (2)$$

v = kiintoainehiukkasen laskeutumisen loppunopeus, cm/s

s = laskeutumismatka, cm

t = laskeutumisaika, s

ρ' = hiukkasen tiheys, g/cm³

ρ = väliaineen tiheys, g/cm³

g = maan vetovoima

x = rakeen läpimitta, cm

μ = väliaineen viskositeetti, g/cm s

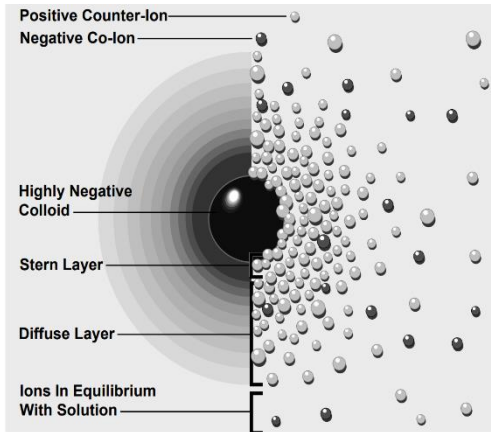
Yllä olevasta kaavasta voidaan selvittää laskeutumisenopeus, laskeutumismatka ja hiukkasen raekoko, kun tietty materiaali laskeutuu tunnetussa väliaineessa tarkan matkan (Pihkala 2018).

4.2 Hydrofobia ja hydrofiilia

Vedessä olevalla kolloidisella kiintoaineella on määriteltävä rajapinta kiinteän ja veden välillä. Karkean jaottelun mukaan epäorgaaniset kolloidit ovat hydrofobisia kuten savi, kulta, ei-hydratoituneet metallioksidit ja öljy. Hydrofiiliset partikkelit ovat orgaanisia kuten gelatiini, proteiinit, virukset ja bakteerit. Hydrofiilisten kolloidien pinnassa on polaarisia vesimolekyylejä sitovia funktionaalisia ryhmiä, joita ovat esimerkiksi karboksyyli-, hydroksyyli- tai amiiniryhmät. Jätevesi voi sisältää samanaikaisesti sekä hydrofobisia että hydrofiilisiä alueita, ja jotta tilanne ei olisi niin mustavalkoinen, kolloidit voivat sopivissa olosuhteissa, usein pH:n muuttuessa, vaihtaa hydrofobiasta hydrofiiliaan ja takaisin. (Leppisaari 2017.)

4.3 Pintavaraus

Vesiliuoksessa olevien kiintoainehiukkasten pinnassa on sähköinen varaus, jota kutsutaan pintavaraukseksi. Pintavaraus on hiukkasen oma varaus. Mitä pienempi hiukkanen on sitä enemmän pintakehämälliset voimat siihen vaikuttavat ja sitä tehokkaammin hiukkanen leijailee vedessä ollen kolloidisesti vakaassa olomuodossa. Hiukkasen sähköinen potentiaali on joko negatiivinen tai positiivinen, useilla kiinteillä partikkeleilla on nestefaasissa negatiivinen eli anioninen varaus. Varaustilalla on oleellinen merkitys vesiliuoksen stabiiliuden kannalta. Nopeat muutokset varauksissa voivat aiheuttaa muutoksia hiukkasten agglomeroitumiseen (yhdistymiseen), flokkaukseen (sakeutumiseen) sekä kemialliseen tasapainoon. Varaustilaan vaikuttaa vastaionien pitoisuus, pH, johtokyky, lämpötila ja aika. (Hämäläinen 2010.) Kun kolloidi (mikrohiukkanen) on varautunut sähköisesti, sen ympärille muodostuu sähköinen kaksoiskerros (KUVA 1), joka kuvaa kolloidin ionista ympäristöä. Hiukkasen ympärillä oleva sähköinen ympäristö on jakautunut kahdeksi kerrokseksi, liikkumaton Sternin kerros ja liikehtivä Gouyn-Chapmanin kerros. Partikkelin pintaan tiukasti kiinnittyvät vastavaraukselliset ionit vastustavat satunnaista lämpöliikettä ja kuuluvat Sternin kerrokseen. Hieman kauempana partikkelin ympärillä olevat irralliset ionit muodostavat Gouyn-Chapmanin kerroksen, diffuusiokerrokseen. (Leppisaari 2017.)



KUVA 1. Kaksoiskerros (Zeta-meter)

Diffuusiokerros on kuin varautunut ilmakehä kolloidin ympärillä. Ionien tiheys on voimakkaimmillaan hiukkasen pinnan läheisyydessä ja harvenee siirryttäessä hiukkasesta etäämmälle. Liuoksessa olevien ionien tyyppi ja pitoisuus määrittää kaksoiskerroksen paksuuden. (Zeta-meter.) Kaksoiskerros kuvastaa sähköisten olosuhteiden muutosta hiukkasen pinnan läheisyydessä. Olosuhteissa tapahtuvilla muutoksilla on suoranainen vaikutus hiukkasen pinnan sekä liuoksen keskinäisiin olosuhteisiin. (Hämäläinen 2010.)

4.4 Zeta-potentiaali

Zeta-potentiaali on ilmiö, joka muodostuu nesteeseen sekoittuneille hiukkasille. Se on partikkelin pintavarauksen ja siihen takertuneiden vastakkaismerkkisten ionien summa, joka ilmaisee hiukkasten ja nesteen muodostaman seoksen stabiilisuutta. Z-potentiaaliin vaikuttaa useat ominaisuudet kuten pH, lämpötila ja ionivahvuus. (Measurlabs 2023.)

Z-potentiaalin voimakkuus vaikuttaa kolloidisten hiukkasten kesken vallitsevaan hylkimisvoimaan ja sen ollessa lähellä nollaa on mahdollista saada kolloidiset hiukkaset kiinnittymään toisiinsa. (Roms 2017.) Z-potentiaalin voimakkuuteen voidaan vaikuttaa näytteeseen lisätyllä kationisella tai ionisella polymeerillä (Hämäläinen 2010). Potentiaalin ollessa negatiivinen on liuos anioninen ja kun z-potentiaali on positiivinen, on liuos silloin kationinen (Vähäsavo 2014). Zeta-potentiaalin ja pintavarauksen välinen suhde riippuu liuoksen ionien määrästä sekä kaksoiskerroksen paksuudesta (Zeta-meter).

Z-potentiaalia voidaan tutkia laboratoriossa mikroskoopin avulla seuraamalla kolloidisia hiukkasia niiden liikkeessä jännitekentässä (Zeta-meter). Z-potentiaalin yksikkö on millivolti (mV) (Measurlabs 2023). Z-potentiaalia voidaan käyttää ennustamaan hiukkasten pitkän aikavälin vakautta. Potentiaalin

ollessa korkea, joko negatiivisesti tai positiivisesti, välillä $-60\text{mV} - 60\text{mV}$ on hiukkasilla erinomainen vakaus pysyä itsenäisinä, kun taas potentiaalin ollessa välillä $-10\text{mV} - 10\text{mV}$, toisin sanoen lähellä nollaa, on mahdollista saada hiukkaset yhdistymään.

Zeta-potentiaalin kannalta on tärkeää tuntee myös nesteen ominaisuudet ja liuoksen pH. Z-potentiaali voi muuttua niiden vaikutuksesta voimakkaasti. Esimerkiksi hapon lisääminen liuokseen lisää protonien määrää kaksoiskerroksessa, joka nostaa z-potentiaalia positiivisempaan suuntaan. Suolan läsnäololla liuoksessa on oma vaikutuksensa liuoksen z-potentiaaliin ja hiukkasen kaksoiskerrokseen. Kun suolan määrää liuoksessa nostaa riittävästi, se puristaa kaksoiskerrosta tiiviimmäksi ja lopulta hajottaa sen, jolloin mahdollistuu hiukkasten agglomeroituminen (yhdistymisen). (NanoComposix 2019.) Eli kun z-potentiaalin arvo on lähellä 0 mV , hiukkaset kykenevät muodostaa mikroflokkeja. Mikroflokkien yhdistämistä voidaan toteuttaa flokkulaatiolla ja lopulta saada aikaan kiintoaineen laskeutuminen.

4.5 Redoxpotentiaali

Redoxpotentiaali (rH; ORP) ilmentää sähköistä potentiaalia, joka tarvitaan elektronin siirtämiseen hapettimesta pelkistimeen. R-potentiaali ilmaisee aineiden taipumusta joko hapettua tai pelkistyä eli redox reaktiot tarkoittavat hapetus- pelkistysreaktioita. Redox-mittauksia suoritetaan vedenkäsittelyn yhteydessä, ne kertovat veden laadusta. Kun aine hapettuu, hapen määrä lisääntyy ja elektronien määrä vähenee. Kun aine pelkistyy, hapen määrä vähenee ja elektronien määrä lisääntyy. Redox-reaktioissa pH:lla on oleellinen vaikutus ja redox olosuhteilla on oleellinen vaikutus aineiden liukenemiseen ja saostumiseen. Redox-potentiaalin voi mitata kannettavalla, pH-mittaria muistuttavalla mittarilla, joka antaa arvoksi millivolttia (mV). Lukuarvo kertoo liuenneen hapen määrän vedessä. (Ketola 2021.)

4.6 Liuoksen johtokyky

Puhdas vesi johtaa huonosti sähköä, kun veteen lisätään ioneita, johtokyky paranee.

Liuoksen johtokykyä ilmaistaan joko vastuksella (resistanssi, R) tai johtokyvyllä (konduktanssi, G). Sähkönjohtavuus (γ) voidaan laskea resistanssin ja konduktanssin avulla seuraavien kaavojen mukaisesti.

$$\gamma = k * 1/R \tag{3}$$

tai
$$\gamma = k * G \tag{4}$$

jossa k on elektrodikennon kennovakio. (Jaakkola 2009.)

Lämpötilan vaikutus johtokykyyn on oleellinen, sen nousu lisää ionien johtokykyä, mutta johtokyvyn kasvu on kuitenkin riippumaton liuoksen konsentraatiosta. Vahvojen elektrolyyttien johtokyky kasvaa lämpötilan noustessa, jokaista lämpöasteen lisäystä kohden noin 2 % verran. Kun elektrolyytti-ionien määrä liuoksessa kasvaa, sähkönjohtavuus voimistuu. Liuoksen viskositeetin kasvu puolestaan heikentää sähkönjohtokykyä. (Jaakkola 2009.)

5 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisessa osuudessa oli mukana kolme erilaista tuotannon jätevettä, kahdelta eri ajankohdalta. Flokkulantteja oli testissä 14 kpl ja ne saatiin kiteisessä muodossa joten, niistä valmistettiin kokeen alussa liuokset 0,1 % vahvuuteen. Liuos yleensä valmistetaan 0,1 % - 0,5 % vahvuuteen.

Flokkulanttijauhetta liuotettiin 0,1 g 100 ml:aan kädenlämpöistä vettä. Jauhe lisättiin veteen hitaasti kide kerrallaan, magneettisekoittimen sekoittaessa vettä saman aikaisesti. Kiteiden lisäyksen jälkeen liuosta sekoitettiin noin 60 minuutin ajan ja valmiit liuokset purkitettiin omiin purkkeihin.

Flokkulantit nimettiin aakkosin a:sta n:ään (a-n). Flokkulantteja oli sekä anionisia että kationisia.

Kokeellisen osuuden toteutus aloitettiin ensin tutkimalla vesiä mikroskoopilla, mittaamalla lämpötila, pH sekä johtokykyä, näiden jälkeen vesille suoritettiin laskeutustesti, joka tehtiin kaikilla 14 flokkulantilla. Ensimmäiset flokkutestit suoritettiin 250 ml:n vesimäärälle kohtalaisella annostuksella flokkulanttia, että joukosta erottuvat selvästi toimivat ja ne, jotka eivät toimi lainkaan. Testeissä annostus aloitettiin pienestä ja kasvatettiin pienillä lisäyksillä, taulukoissa on merkattuna annostukset, joilla saavutettiin merkityksellisiä tuloksia. Flokkulantit annosteltiin pienillä lääkeruiskuilla ja sekoitus suoritettiin kaatelemalla vesinäytettä kuusi kertaa kahden astian välillä, tehokkaan sekoittumisen varmistamiseksi. Sekoituksen jälkeen astia laskettiin pöydälle ja annettiin kiintoaineen rauhassa laskeutua.

Testeillä kartoitettiin mitkä flokkulantit toimivat parhaiten kiintoainetta nopeasti laskeuttamalla ja antavat puhtaimman ylitteen. Kaikista parhaiten toimivat flokkulantit testattiin toistamiseen 250 ml:n koossa ja niistä edelleen parhaan tuloksen antaneet testattiin litran näytteillä. Jätevesien lähtötiedot näkyvät taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Jätevesien lähtötiedot

27.3.2023				LÄHTÖTIEDOT
VESI	LÄMPÖTILA	pH	JOHTOKYKY	HUOMIOITAVAA esim. väri, koostumus
1.	19 °C	12,15	21,20	ruskehtavaa, leijailevaa ja hiutalemaista kiintoainesta
2.	19 °C	7,60	141,30	keltaista, ei silmin nähtävää kiintoainesta
3.	19 °C	11,89	25,50	tumman ruskeaa, hienoa kiintoainesta

Flokkulanttien yksityiskohtaiset tiedot on listattuna salatussa liitteessä. Flokkulantit oli nimetty a – n.

Flokkutestien jälkeen tutkittiin flokkulantin annostelun ja sekoituksen vaikutusta kiintoaineen laskeutumiseen. Testi suoritettiin kahdella samanlaisella mittalasilla, joissa oli identtiset 250 ml:n vesinäytteet, joihin lisättiin samat määrät flokkulanttia. Ensimmäiseen mittalasiin lisättiin flokkulanttia pienempinä annoksina, lisäysten välissä sekoittaen. Toiseen mittalasiin lisättiin yhtä paljon samaa flokkulanttia kerta annoksena ja yhden kerran sekoittaen.

Flokkulanttien testauksessa on tärkeää toistaa kaikille näytteille samat asiat samalla tavalla, näin koekäytön toistettavuus on mahdollista ja tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

6 KOKEELLISEN OSUUDEN TULOKSET

Jäteveden 1. laskeutustestissä (TAULUKKO 3.) flokkulantti d ei toiminut lainkaan. Kaikki muut antoivat toivotun suuntaisen tuloksen, mutta erilaisella aikajanalla. Nopealla kiintoaineen laskeutumisella ja kirkkaalla ylitteellä pääsivät uusintatesteihin a, f, h, k, l ja m. Suuremmalla annostuksella kolme parasta olivat a, f ja h. Annostusmerkintä tarkoittaa 2 grammaa jauhetta per 1 m³ vettä ja 4 grammaa jauhetta per 1 m³ vettä. Annostus voi tuotannossa olla tilanteen mukaan 1 g – 10 g jauhetta / 1000 litraa vettä.

TAULUKKO 3. Jäteveden 1. laskeutustestin tulokset

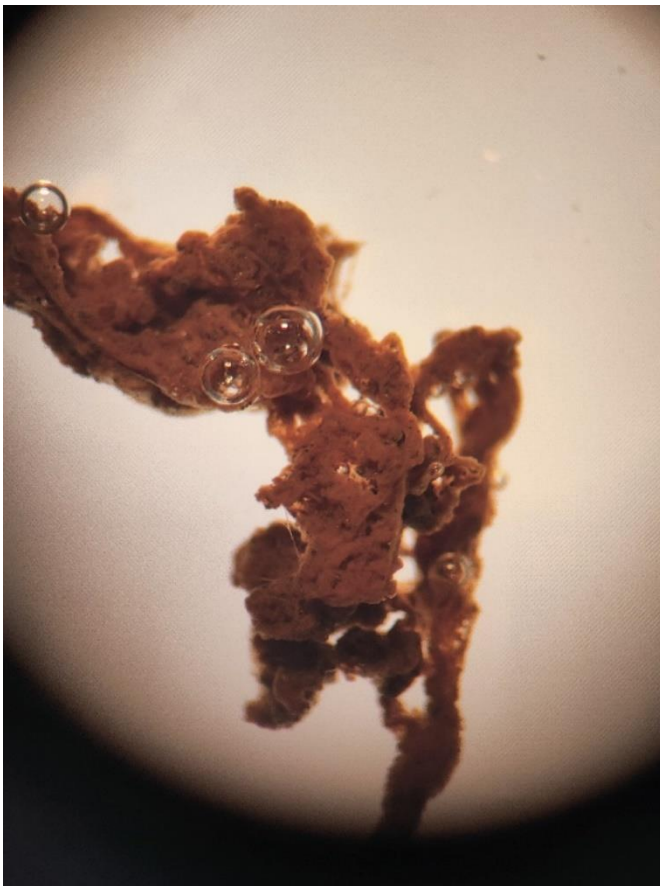
FLOKKU LANTTI	+/-		2 g/m ³	4 g/m ³	par- haat
a	+	jatkoon			1.
b	+				
c	+				
d	-				
e	+				
f	+	jatkoon			2.
g	+				
h	+	jatkoon			3.
i	+				
j	+				
k	+	jatkoon			
l	+	jatkoon			
m	+	jatkoon			
n	+				

Taulukossa 4 näkyy jäteveden 2. testin vastaavat tulokset. Parhaimmat tuloksen antoivat flokkulantit f, l, m ja n. Muut eivät yltäneet samoihin tuloksiin. Jätevedessä ei alkutilanteessa ollut silmin nähtävää kiintoainesta, jota lähteä laskeuttamaan. Flokkulantin lisäys synnytti veteen rihmastoja, joka laskeutui huonosti. Näistä oli vaikea määrittää paras koska flokkulantti oli rihmastoja, joka osittain painui pohjalle ja osittain jäi pinnalle kellumaan. Rihmasto oli hyvin tahmeaa ja tarttui astian seinämiin ja pohjaan tiukasti kiinni.

TAULUKKO 4. Jäteveden 2. laskeutustestin tulokset

FLOKKU LANTTI	+/-		2 g/m ³	4 g/m ³	parhaat
a	-				
b	-				
c	-				
d	-				
e	-				
f	+	jatkoon			2.
g	+	jatkoon	-		
h	+	jatkoon	-		
i	+	jatkoon	-		
j	+	jatkoon			
k	+	jatkoon			
l	+	jatkoon			1.
m	+	jatkoon			3.
n	+	jatkoon			4.

Kuvassa 2 näkyy miltä muodostunut kiintoaine näyttää mikroskoopilla tarkasteltuna.



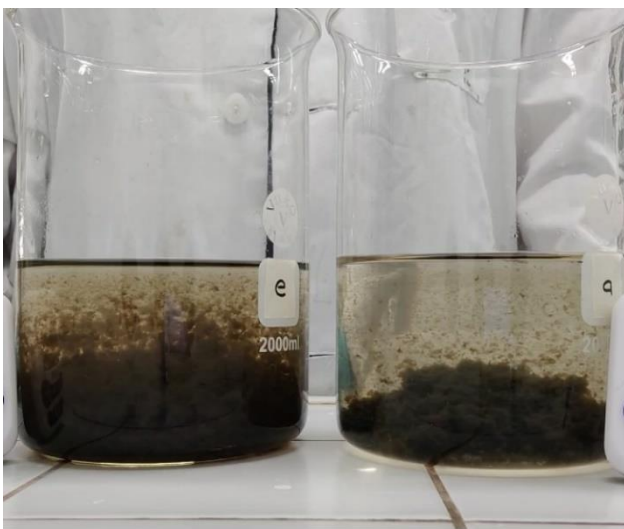
KUVA 2. Jäteveteen 2. testissä muodostunutta kiintoainetta mikroskoopilla kuvattuna

Taulukossa 5 on kolmannen jäteveden tulokset. Parhaan tuloksen antoi tässäkin flokkulantti a, toivotuja tuloksia antoi pienemmällä annostuksella myös e ja f sekä isommalla annostuksella myös h. Toisella kerralla, kun testi toistettiin, antoi f paremman tuloksen kuin e. Vesi oli eri ajankohdalta ja tämä todistaa sen, että hyvin pienet muutokset tuotannossa saattavat vaikuttaa flokkulanttien toimintaan. Myös flokkulantit e, g, i – n laskeuttivat kiintoainesta mutta huonommalla tuloksella.

TAULUKKO 5. Jäteveden 3 laskeutustestin tulokset

FLOKKU LANTTI	+/-		2 g/m ³	4 g/m ³	parhaat
a	+	jatkoon			1.
b	-				
c	-				
d	-				
e	+	jatkoon			
f	+	jatkoon			2.
g	+	jatkoon			
h	+	jatkoon			3.
i	+	jatkoon			
j	+	jatkoon			
k	+	jatkoon			
l	+	jatkoon			
m	+	jatkoon			
n	+	jatkoon			

Suuremmissa näytteissä nousi esiin laskeutusastian vaikutus kiintoaineen laskeutumiseen ja sen nopeuteen. Testissä oli litran näyte sekä laakeammassa mittalasissa että kapeassa korkeassa mittalasissa. Laakeammassa flokkulantti toimi toivotulla tavalla saaden kiintoaineen selkeästi painumaan astian pohjalle (KUVAT 3 ja 4).

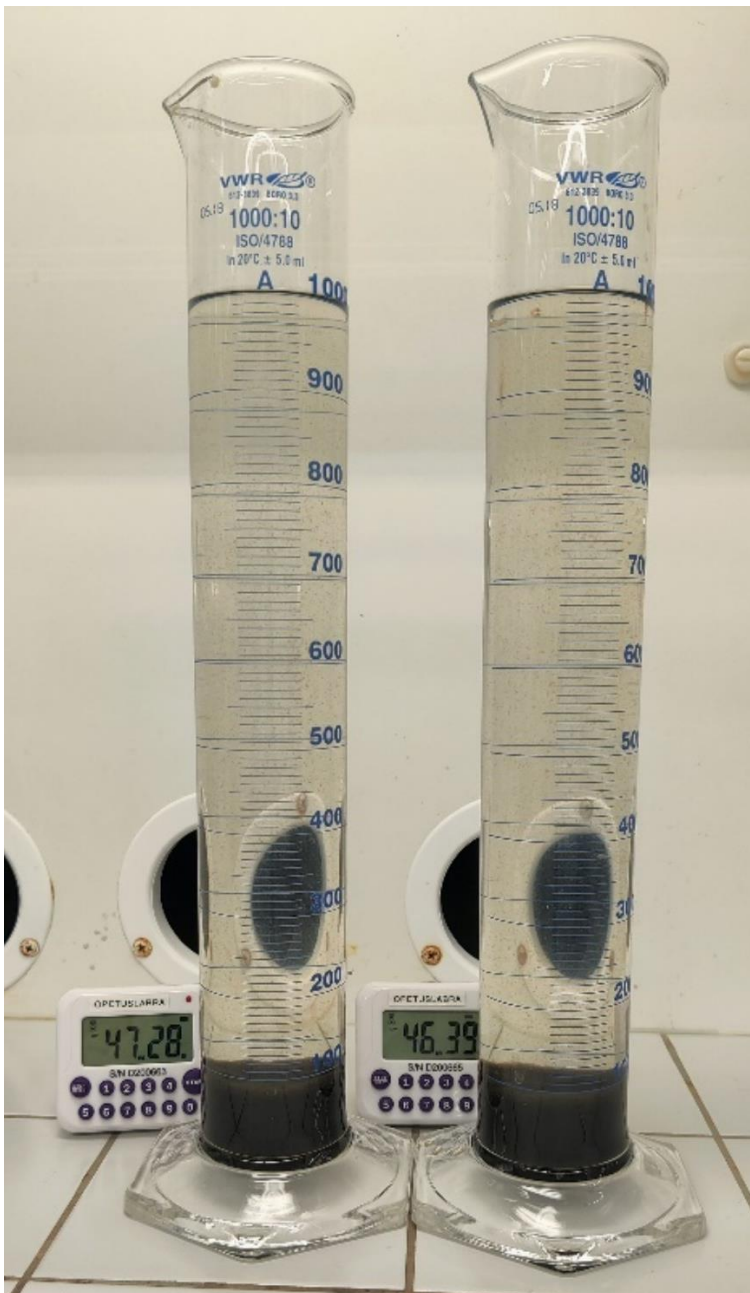


KUVA 3. Kiintoaine laskeutuu



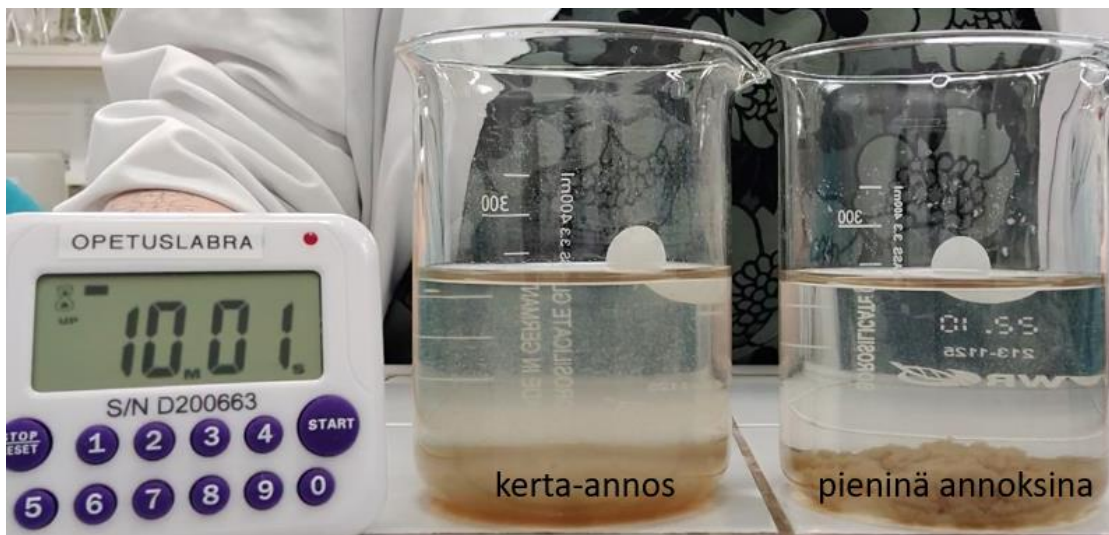
KUVA 4. Kiintoaine laskeutuneena

Kapeassa ja korkeassa mittalasissa laskeutuminen oli hyvin paljon hitaampaa ja vaivalloisempaa vaikka aiempien testien perusteella annostus olisi ollut riittävä. Hienoin kiintoaine ei päässyt laskeutumaan, kun vesi alkoi lopulta liikehtiä pystysuunnassa, jolloin osa hienoimmasta kiintoaineesta nousi, kun osa laski. Liikehdintä esti hienointa kiintoainesta päätyästä pohjalle. (KUVA 5). Suurin osa kiintoaineesta laskeutui pohjalle, mutta viimeisimmät ja hienoimmat jäivät leijumaan ylitteeseen. Ilmiö selittyy poikkipinta-alan laajuudella, kun poikkipinta-alaa on aiempaan testiin verrattuna niukasti, on laskeutuminen hidasta.



KUVA 5. Hienoin kiintoaine ei laskeudu

Viimeisimmässä kokeessa tutkittiin flokkulantin annostelutavan ja sekoituksen vaikutusta kiintoaineen laskeutumiseen. Testissä kävi ilmi, että tehokas sekoittaminen edistää flokkulanttien levittäytymistä vedessä saaden kiintoaineen paremmin ryhmittäytymään ja laskeutumaan. Pienempinä annoksina lisätty flokkulantti, ja useampaan kertaan sekoitettu vesi muodostivat kirkkaamman ylitteen nopeampaa kuin toinen näyte, jossa flokkulantti lisättiin kerta-annoksena, kerran sekoittaen. Ensimmäiseen (kuvassa oikeanpuoleiseen) mittalasiin muodostui paremmat ja isommat flokit ja kirkkaampi ylitte huomattavan paljon nopeammin kuin toisessa (kuvassa vasemmanpuoleisessa) lasissa. Kerta-annoksen lasissa hienoin kiintoaine ei oletettavasti koskaan päätenyt riittävästi kosketuksiin flokkulantin kanssa vaan jäi siitä syystä leijaillemaan ylitteeseen. Ero on nähtävillä kuvassa 6, oikeanpuoleisen lasin kiintoaine oli laskeutunut jo kolmessa minuutissa kuvassa näkyvään tulokseen, mutta eroavaisuus ylitteen kirkkaudessa oli huomattavissa vielä 10 minuutin kohdallakin. Testi toistettiin kahdesti kolmella eri flokkulantilla ja tulokset olivat jokaisessa samansuuntaiset.



KUVA 6. Sekoituksen merkitys kiintoaineen laskeutumisessa

Kiintoaineen vajoamisnopeus kasvaa kun kiintoaineen tiheys lisääntyy, flokkien tiheys ja koko kasvaa, lietteen kiintoaine vähenee ja flokattavan kiintoaineen karkeuden kasvaessa.

7 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Alun perin oli ajatuksena, että tämän opinnäytetyön teoriaosuus olisi tietopaketti, jossa syvennyttään jätevesien karakterisointiin ja siihen, kuinka sitä voidaan suorittaa ja millaisia asioita siinä olisi tärkeää huomioida. Kun tutkin aihetta jäteveden karakterisointi, tulin siihen lopputulemaan, että sille ei valitettavasti ole olemassa yhtä ainoaa toteutustapaa. Jokainen yritys tuottaa erilasta jätevettä ja koostumus on jokaisessa tapauksessa ainutlaatuinen ja voi olla myös hyvin vaihtelevaa. Olisi mahdotonta antaa vain yhdet kaikenkattavat toimintaohjeet, jotka sopisivat jokaiselle tuotannon alalle.

Kun jätevettä lähdetään karakterisoimaan, on hyvä hahmottaa ensin kaikki mitä jätevedeen voi päätyä ja luokitella niistä ne huomionarvoiset asiat ja elementit, joita on syytä seurata ja lopulta poistaa. Tärkeiden elementtien systemaattisella seurannalla ja mittauksilla saadaan arvokasta tietoa siitä, kuinka jäteveden ominaisuudet ja sisältö vaihtelevat tuotannon mukaan. Seuranta antaa luotettavuutta, tarkkuutta, toistettavuutta, nopeaa havainnointia ja mahdollistaa nopean reagoinnin tapahtuviin muutoksiin nähden sekä reaaliaikaista tietoa prosessista. Kun jätevedestä tunnistetaan asiat, joihin tulee reagoida, voidaan alkaa miettimään, miten haluttuja tuloksia saadaan aikaan ja miten halutut komponentit saadaan vedestä poistettua niin hyvin, että se on ajallisesti ja taloudellisesti järkevää.

Kun mietitään sakeuttimien, selkeyttimien ja suodatusten sekä vastaavien erotusprosessien vaihtoehtoja, niitä kannattaa ensin laboratoriomittakaavassa testata ja pilotoida. Jos mahdollista kannattaa myös vastaaviin maailmalla toimiviin prosesseihin tutustua ja hyödyntää sitä kautta saatua tietoa omassa projektissa.

Kun systemaattisesti analysoidaan sekä syntyvät jätevedet että puhdistusprosessista läpi kulkenut ja syntyvä puhtain lopputulos, kertoo näiden erotus puhdistusprosessin tehokkuudesta. Jos ylitteeseen karkaa jotain epäpuhtautta haluttua enemmän, on hyvä hahmottaa missä vaiheessa tuotantoprosessia se syntyy, voisiko prosessin kulkua muuttaa niin ettei ongelmaa syntyisi tai syntyisi mahdollisimman vähän. Voisiko vaihtoehtoisesti jäteveden puhdistusprosessissa tehtävillä muutoksilla saada komponentin eliminoidua ylitteestä. Jäteveden, joka sisältää kolloidisia hiukkasia, ei aina ole mahdollista saada kirkkainta lopputulosta, mutta on hyvä miettiä, kuinka pitkälle puhdistusprosessi on järkevää ja taloudellista viedä.

Kokeellisessa osuudessa testattiin 14 erilaista flokkulanttia kolmelle erilaiselle vedelle. Teorian pohjalta pystyi hahmottamaan jonkun suuntaisia tulosodotuksia, kun tiesi jätevesien lähtötilanteet, mutta pelkällä teorialla ei pysty perustelemaan mikä flokkulantti olisi toimivin. Tuotannon mittakaavassa tarkkoja toimivia ratkaisuja saa varmimmin vain testaamalla niitä ensin laboratorioissa ja sitten tuotannossa. Aina tuotannollisten muutosten yhteydessä, kun käytetyn flokkulantin toiminnassa tapahtuu muutoksia, on testit hyvä uusia. Aina kun puhdistettavassa jätevedessä tapahtuu muutoksia, se vaikuttaa flokkulantin toimintaan, eikä sama flokkulantti enää välttämättä ole se paras ja toimivin. Tällöin syy ja seuraus on syytä dokumentoida hyvin ja vastaavien tilanteiden olosuhdetietoja keräämällä saadaan aikaan historiatietoja, joiden pohjalta voi myöhemmässä vaiheessa päätellä mitkä tuotannossa tapahtuvat asiat muuttavat vesissä olevia olosuhteita niin että ne vaikuttavat flokkulanttien toimintaan ja niihin tapahtumiin voidaan alkaa systemaattisesti varautua.

Pelkkien teoriatietojen perusteella ei pysty täysin kertomaan mikä flokkulantti olisi paras kuhunkin tilanteeseen, flokkulantti on hyvä testaamalla valita. Teoreettisesti tarkasteltuna jätevedessä on hyvin laaja kirjo toisiinsa vaikuttavia asioita ja millaisessa suhteessa niitä jätevedessä on, niistä muodostuvat vallitsevat olosuhteet ja ne voivat vaihdella todella monella tavalla pienenkin ajan sisällä. Kun olosuhteet muuttuvat voi aikaisemmin parhaimman tuloksen antanut flokkulantti olla seuraavassa hetkessä huonompi kuin joku toinen.

Vaikka olisi simulaatio-ohjelma joka todennäköisyyksiin, matemaattisiin ja kemiallisiin laskelmiin perustuen ennustaisi liuoksessa tapahtuvat muutokset ja reaktiot syötetietojen pohjalta, olisi se tieto silti teoreettista eikä olisi avuksi oikean kemikaalin valinnassa.

Optimaalinen tilanne olisi, jos yrityksen omassa laboratorioissa voisi säilyttää flokkulantteja pieniä määriä, joilla tarvittaessa voisi koesarjoja suorittaa. Näin ollen saisi koesarjat tehtyä juuri sinä ajankohdaksi, kun ongelmia ilmenee, eikä tarvitsisi odottaa tuotannon ulkopuolisen tahon tekemiä testejä, muutokset voivat olla hetkessä jo normalisoituneet.

Kokeellisessa osuudessa oli haastavaa näin aloittelijana osata tulkita laskeutustestien tuloksia ja pystyä vertaamaan niitä toisiinsa. Pidin mielessä tuotannon olemassa olevat olosuhteet ja niiden rajallisuuden sekä taloudellisen näkökulman. Tarkastelin siis laskeutustestejä siltä kannalta, että nopeiten, pienimmällä mahdollisella annostuksella, kirkkaimman ylitteen antanut flokkulantti olisi paras. Haasteita ilmeni heti alku tilanteissa, joissa flokkulantteja oli useita, niistä useat antoivat lupaavan kirkasta ylitettä eikä ollut vain yhtä toimivaa, jonka olisi voinut valita parhaaksi. Koska jätevedessä on yhtäaikaaisesti

olemassa sekä positiivisia että negatiivisia varauksia ja flokkulantti toimii magneetin tavoin, antaa se silloin laskeutustuloksia sekä anionisena että kationisena. Testejä on silloin syytä jatkaa ja ottaa selvää kumpi lopulta antaa paremman tuloksen. Laskeutumiseen kulunut aika oli näissä kokeissa lopulta ratkaiseva tekijä.

Näillä testeillä saadut tulokset flokkulanteista eivät ole absoluuttinen totuus, jota voisi vielä suurempien oletusten perustana pitää. Nämä tulokset koskevat kyseisiä jätevesiä, joita oli syntynyt juuri tuona tuotannon hetkenä kuin ne on otettu. Tuotannossa ja prosesseissa tapahtuu jatkuvasti niin paljon muutoksia, jotka voivat heilauttaa jäteveden koostumusta ja kemiallisia tasapainoja ja varausten keskinäisiä suhteita niin paljon, ettei yksi ja sama flokkulantti voi millään antaa jatkuvasti vain parasta tulosta.

Alun perin oli odotuksena, että vesissä olisi ilmennyt joitakin tuotannossa haasteita aiheuttaneita ilmiöitä, mutta niitä ei kokeellisen osuuden aikana vesissä ilmennyt, joten haastavimmat ilmiöt jäivät näiden testien ulkopuolelle. Laskeutustestissä lisäsin flokkulanttia useassa erässä kuhunkin vesinäytteen ja jokaisen lisäyksen jälkeen sekoitin ja annoin kiintoaineen laskeutua. Mieleen heräsi kysymys: ”Kärsiikö kiintoaineen laskeutuminen, kun aina uudelleen sekoittamalla rikotaan muodostuneita ja laskeutuneita flokkeja?” Otin asiasta selvää kahdella rinnakkaisella vesinäytteellä, joista ensimmäiseen lisäsin flokkulanttia kuten testeissä ja toiseen lisäsin flokkulantin yhdellä kerta-annoksella ja yhdellä sekoituskerralla.

Oletin että kerta-annos olisi tehnyt suuremmat flokit ja selkeämmän ylitteen nopeammin kuin moneen kertaan sekoitettu, mutta tulokset olivat päinvastaiset odotuksiin nähden. Suoritin tämän testin vain jätevedelle 1, mutta toistin saman testin kolmella erilaisella flokkulantilla ja tulokset olivat kaikkien kordalla saman suuntaiset. Tämäkin huomio on selkeä laboratoriossa testattuna mutta voi olla tuotannon mittakaavassa erilainen, kun on suuremmat annostukset ja muuttuvat olosuhteet, jotka vaikuttavat lopputulokseen.

Flokkulantin annostus on syytä kohteeseen valita kiintoaineen määrän mukaan. Vesi, jossa on kiintoainesta paljon, vaatii vahvemman annostuksen flokkulanttia kuin vesi, jossa on vähemmän kiintoainesta. Tehokkainkaan flokkulantti ei aina saa aikaan täysin puhdasta ylitettä eikä siihen välttämättä päästä annostusta nostamallaakaan. Vedessä voi olla sellaista kiintoainesta mukana johon parhaimman lopputuloksen flokkulantti ei tehoa, vaikka annostuksen nostaisi maksimiin.

Työtä oli mielekästä tehdä, tutustua taustateoriaan ja tutkia flokkulaatiota. Juteltuani tuloksista kemiikaalien toimittajan kanssa tulimme lopputulokseen, että tutkivan osuuden testien tulosten luotettavuus on kohtalainen, mutta ikävä kyllä yksittäiset testit yhden ajankohdan vedelle ei anna vielä kovin suuria perusteita suuremmille johtopäätöksille. Testien toiston tärkeyttä ei voi ylikorostaa, ainakaan jos on kyse flokkulantin valinnasta.

LÄHTEET

- Actiflo. Selkeytys. Koagulointi, mikrohiellä tehostettu flokkaus ja laskeutus. Saatavilla: <https://docplayer.fi/3297866-Actiflo-selkeytys-koagulointi-mikrohiellä-tehostettu-flokkaus-ja-laskeutus-vesilaitokset-prosessivesi-jäteveden-kasittely.html> Viitattu 6.2.2023
- Green, D. W. & Perry, R. H. 2008 Perry's Chemical Engineers' Handbook. 8'th edition. Kansas. U.S.A. Viitattu 8.2.2023
- Huttunen, J. 2015. Putkiselkeyttimen suunnittelu, rakentaminen ja testaus. Insinööritö. Tekniikan ja liikenteen ala. Kuopio. Savonia ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201504073966> Viitattu 13.2.2023
- Hämäläinen, T. 2010. Varaustilan ja zeta-potentiaalimittaus. Opinnäytetyö. Paperiteknikan koulutusohjelma. Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2010060711648> Viitattu 14.2.2023
- Jaakkola, E. 2009. Automaattisen pH- ja johtolukumittauslaitteiston käyttöönotto ja validointi. Opinnäytetyö. Turku. Turun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200912036968> Viitattu 28.2.2023
- Jääskeläinen, K. 2019. Laboratorio työohje: Flokkulaatio. Kokkola. Centria ammattikorkeakoulu. Viitattu 13.4.2023
- Ketola, J. 2021. Pohjavesilaitoksen raudan- ja mangaaninpoiston tehostaminen. Opinnäytetyö. Biotuote- ja prosessitekniikka. Tampere. Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202102162361> Viitattu 3.3.2023
- Leppisaari, J. 2017. Koagulaation ja flokkulaation optimointi teollisuuden pesujäteveden käsittelyssä. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201708241801> Viitattu 7.2.2023
- Lukkarinen, T. 1987. Mineraalitekniikka Osa 2. Mineraalien rikastus. 1.painos. Helsinki: Insinööritieto Oy. Viitattu 2.2.2023
- Measurlabs 2023. Zetapotentiaali. Saatavissa: <https://measurlabs.com/fi/metelmat/zetapotentiaalinalyysi/> Viitattu 2.3.2023
- nanoComposix 2019. Zeta-potential tutor. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=GICvY-nLVa0> Viitattu 28.2.2023
- Opetustv. 2015. Kemia 1- Ihmisen ja ympäristön kemia. 1. Teoriaa dispersiivoimasta. Saatavissa: <https://opetus.tv/kemia/ke1/dispersiivoima/> Viitattu 14.2.2023
- Pekkala, T. 2019. Mekaaniset prosessit. Kiintoainesten erotus: Sakeutus ja selkeytys. Kemianteknikan koulutusohjelman kurssimateriaali. Kokkola: Centria ammattikorkeakoulu. Viitattu 19.1.2023
- Pihkala, J. 2005. Prosessitekniikan yksikköprosessit. 3.-1 tark. p. Helsinki. Opetushallitus.

Pihkala, J. 2018. Prosessitekniikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. 3. painos. Helsinki. Opetushallitus.

Roms, H. 2017 Apukoagulantin optimointi Paraisten Norrbyn jätevedenpuhdistamolle. Opinnäytetyö. Turku. Turun ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikka. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017061913782> Viitattu 9.2.2023

Rönkkö, V. 2016 Alkoholitehtaan jäte vesikuorman pienentäminen. Diplomityö. Helsinki. Aalto-yliopisto. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201609224149> Viitattu 7.2.2023

SavEnviron 2021. Physical Characteristics of Sewage. Saatavissa: <https://www.youtube.com/@savenviron1524/videos> Viitattu 28.2.2023

SNF. 2023. Coagulation Flocculation. Kemikaali-esite. SNF FLOERGER. Ranska. Viitattu 21.3.2023

Uusitalo, M. 2018. Raskasmetallien saostusmenetelmän pH- optimointi. Opinnäytetyö. Laboratoriotekniikka. Turku. Turun ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018062014155> Viitattu 3.3.2023

Vähäsavo, T. 2014 Apuaineen korvaaminen titaanihydraattimassan esipesussa. Opinnäytetyö. Pori. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405065974> Viitattu 2.3.2023

Zeta-meter. Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes. USA. Saatavissa: <http://www.zeta-meter.com/5min.pdf> Viitattu 22.2.2023

