

Markus Ruonala

SAVUKAASULAUHTEEN ESIKÄSITTELYPROSESSIN PARANTAMINEN

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Energiatekniikan koulutus

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK), Energiatekniikka
Tekijä	Markus Ruonala
Työn nimi	Savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin parantaminen
Toimeksiantaja	Kotkan Energia Oy
Vuosi	2023
Sivut	39 sivua, liitteitä 3 sivua
Työn ohjaajat	Anne Gango ja Teemu Fransas

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin parantaminen Hovinsaaren voimalaitoksella. Voimalaitoksen polttoaineseos vaihtelee nyt paljon Ukrainan sodan aiheuttamien polttoaineen saatavuusongelmien takia. Polttoaineseoksen vaihtelun vuoksi savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessi ei toiminut kunnolla. Työn tavoitteena on optimoida prosessin kemikaalien syöttö niin, että se toimisi myös vaihtelevalla polttoaineseoksella.

Työn teoriaosuudessa käsitellään jätenvedenpuhdistusta. Ensimmäisenä käydään läpi lauhteessa esiintyviä kiintoainepartikkeleita sekä niiden ominaisuuksia. Lisäksi tutustutaan jäteveden puhdistukseen kemiallisen saostuksen avulla, sen eri osiin koagulaatioon ja flokkulaatioon, sekä niissä tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin.

Tutkimusosuus aloitettiin luomalla voimalaitoksen automaatiojärjestelmään saostuskemikaaleille annostelulaskennat. Laskenta seuraa savukaasulauhteen kiintoainepitoisuutta. Prosessin optimointia varten kerättiin dataa vesianalyseillä sekä automaatiojärjestelmän historiatiedoista. Dataa tulkitsemalla pystyi tekemään johtopäätöksiä, milloin kemikaaleja syötettiin liikaa tai liian vähän. Muutoksia annostelulaskentaan tehtiin näiden tulkintojen perusteella.

Työn tuloksena esikäsitteilyprosessin kemikaalien syötölle luotiin karkea laskenta, joka tarvitsee vielä hienosäätöä. Lisäksi tuotiin esille huomiota prosessin toimivuuden ja säädön kannalta. Esikäsitteilyprosessi toimii optimoinnin jälkeen paremmin kuin alkutilanteessa ja on myös kustannustehokkaampi.

Asiasanat: koagulaatio, flokkulaatio, savukaasulauhde

Degree title	Bachelor of Engineering
Author	Markus Ruonala
Thesis title	Improving the flue gas condensate pretreatment process
Commissioned by	Kotkan Energia Oy
Time	2023
Pages	39 pages, 3 pages of appendices
Supervisors	Anne Gango and Teemu Fransas

ABSTRACT

The purpose of this bachelor's thesis was to improve the flue gas condensate pretreatment process in Hovinsaari power plant. The fuel mixture of the power plant varies remarkably due to the availability issues of fuels caused by the war in Ukraine. The flue gas pretreatment process was not working properly because of the changes in the fuel mixture. The target of this thesis was to optimize the chemical input of the process so that it would also work with varying fuel mixtures.

Wastewater treatment is addressed in the theory section. Firstly, the solid particles and their properties are presented. In addition, the theory section discusses the purification of wastewater using chemical precipitation, its different stages, coagulation and flocculation, as well as the chemical reactions taking place in them.

The research section started with the creation of dosing calculation programs for the precipitation chemicals for the power plant's automation system. The calculation program monitors the solids content of the flue gas condensate. The data for process optimization was collected using the automation system history feature as well as by water analysis. By interpreting the data, it was possible to draw conclusions when too large or too small amount of chemicals is fed. Changes to the dosage calculation were made with the help of these interpretations.

As a result, for the chemical dosing of the pretreatment process, a rough calculation was created which needs further fine-tuning. In addition, functionality and optimizing of the process are briefly discussed. After the optimization, the pretreatment process works better and is also more cost-effective.

Keywords: coagulation, flocculation, flue gas condensate

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	6
2	SAVUKAASULAUHTEEN ESIKÄSITTELYPROSESSI	7
2.1	Savukaasupesuri	8
2.2	Flokkulaattori	9
2.3	Lamelliselkeytin	10
2.4	Hiekkasuodatin	10
2.5	Välisäiliö	11
2.6	Lietteen käsittely	11
3	JÄTEVEDENPUHDISTUKSEN TEORIAA	12
3.1	Seurantaparametreja	12
3.2	Kolloidit	14
3.3	Sähköinen kaksoiskerros ja zetapotentiali	14
3.4	Kemiallinen saostus	16
3.4.1	Koagulaatio	16
3.4.2	Flokkulaatio	19
3.4.3	Polyalumiinikloridi	20
3.4.4	Polymeerit	20
4	ESIKÄSITTELYPROSESSIN ALKUTILANNE	21
5	VESIANALYYSIT	22
5.1	Jäännösalumiinin mittaaminen	23
5.2	Kiintoaineen mittaaminen	24
5.3	Polymeerin pitoisuuden määrittäminen	25
6	KEMIKAALIEN SYÖTTÖMÄÄRIEN OPTIMOINTI	25
6.1	Polyalumiinikloridi	26
6.2	Rikkihappo	28
6.3	Polymeeri	29
7	TULOKSET JA POHDINTA	31
8	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	34

KUVALUETTELO

LIITTEET

Liite 1. Polttotaseraportti 2022–2023

Liite 2. Polttotaseraportti 2021–2022

Liite 3. Savukaasulauhteesta kerätty historiadata

LYHENTEET

BOD	biokemiallinen hapenkulutus (Biochemical Oxygen Demand)
COD	kemiallinen hapenkulutus (Chemical Oxygen Demand)
DCS	hajautettu automaatiojärjestelmä (Distributed Control System)
NTU	sameuden yksikkö (Nephelometric Turbidity)
PAC	polyalumiinikloridi (Polyaluminum Chloride)
PPM	miljoonasosa (Parts Per Million)
SRF	kierrätyspolttoaine (Solid Recovered Fuel)
TDS	liuennut kiintoaine (Total Dissolved Solids)
TS	kokonaiskiintoaine (Total Solids)
TSS	suspendoitunut kiintoaine (Total Suspended Solids)

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Kotkan Energia Oy ja se tehdään Hovinsaaren voimalaitokselle. Tarkoituksena on selvittää keinoja, joilla voidaan kehittää ja optimoida savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessia varsinkin kemikaalien käytön osalta. Esikäsitteilyprosessissa käytettäviä kemikaaleja ovat polyalumiinikloridi (PAC), polymeeri sekä rikkihappo. Polyalumiinikloridi toimii prosessissa saostuskemikaalina, polymeeri saostuksen apuaineena ja rikkihappoa käytetään pH:n säätämiseen.

Vuoden 2022 aikana Hovinsaaren voimalaitoksen polttoaineseos on vaihdellut paljon Ukrainan sodan takia ja varsinkin turpeen määrä polttoaineseoksessa on lisääntynyt. Polttoaineseoksen vaihtuvuus on vaikuttanut savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessiin niin, että tähän asti käytössä ollut kiinteä polyalumiinikloridin ja polymeerin syöttö ei toimi toivotulla tavalla. Kiinteän syötön tilalle prosessiin luodaan savukaasulauhteen kiintoainepitoisuutta seuraava syöttökäyrä kummallekin kemikaalille parantamaan prosessin tehokkuutta.

Teoriaosuudessa käsitellään teollisuuden jätevesissä olevia partikkeleita eli kolloideja ja niiden ominaisuuksia. Osiossa käydään läpi myös kolloidien käsittelyssä käytettävää kemiallista saostusta ja siihen liittyviä kemiallisista reaktiota. Lisäksi perehdytään saostuksessa käytettäviin kemikaaleihin ja saostukseen vaikuttaviin muuttujiin.

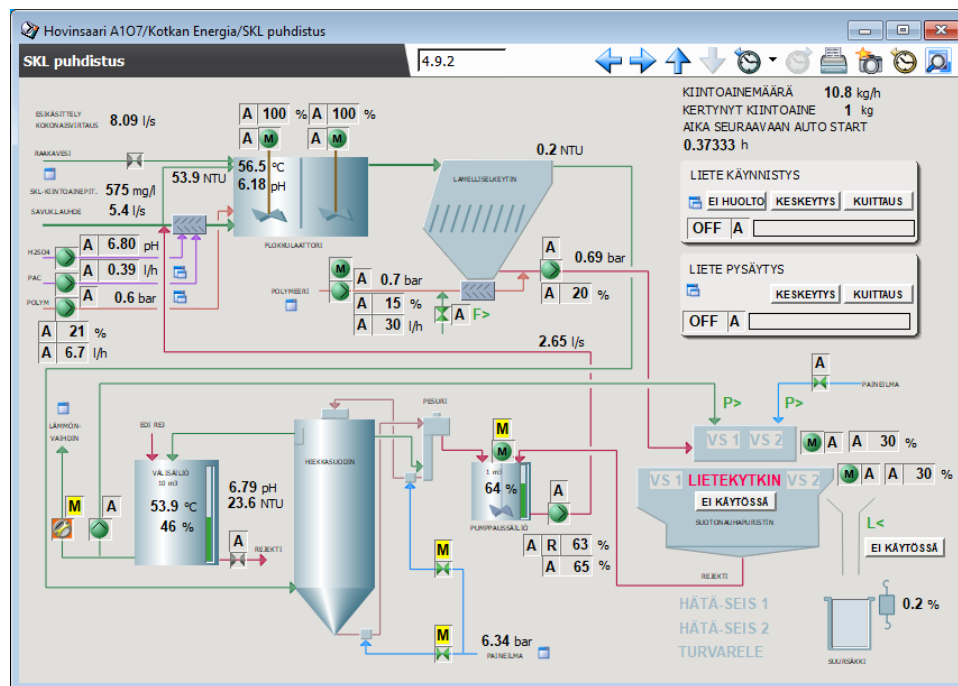
Tutkimusosuudessa esitellään lauhteen vesianalyysejä ja niiden merkitystä. Analyysien perusteella kerätyn historiadatan perusteella voidaan huomata erilaisia syy-seuraus-suhteita, joilla voidaan optimoida esikäsitteilyprosessia. Prosessia pyritään optimoimaan sekä käytännön toimivuuden että taloudellisuuden kannalta.

Työn tuloksena halutaan saada pohja savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin optimoinnille. Prosessin optimointi kestää kauan ja sitä on mahdoton toteuttaa lyhyellä aikavälillä. Tässä opinnäytetyössä pyritään vastaamaan kysymyksiin miten ja miksi.

2 SAVUKAASULAUHTEEN ESIKÄSITTELYPROSESSI

Savukaasulauhteen esikäsittelyprosessilla tarkoitetaan sitä lauhteenkäsittelyn osaa, jossa poistetaan suurin osa lauhteen kiintoaineesta. Puhdistettava lauhde syntyy savukaasupesurissa ja valmistellaan esikäsittelyprosessissa sellaiseksi, että sen laatu riittää jatkokäsittelyprosessiin.

Jatkokäsittelyprosessista puhdistetusta savukaasulauhteesta valmistetaan raakavettä eli sen laatu vastaa pinta- tai pohjavesiä. Suurin osa lauhteen epäpuhtauksista poistetaan lamelliselkeyttimessä, jonka kemikaalisyötön optimointiin tämä opinnäytetyö keskittyy. Hovinsaaren voimalaitoksen uusi vedenkäsittelylaitos on valmistunut vuonna 2019 ja se on Flootech Oy:n toimittama. Kuvassa 1 on Valmet DNA -automaatiojärjestelmän kuva savukaasulauhteen esikäsittelyprosessista.



Kuva 1. Esikäsittelyprosessin Valmet DNA -kuva.

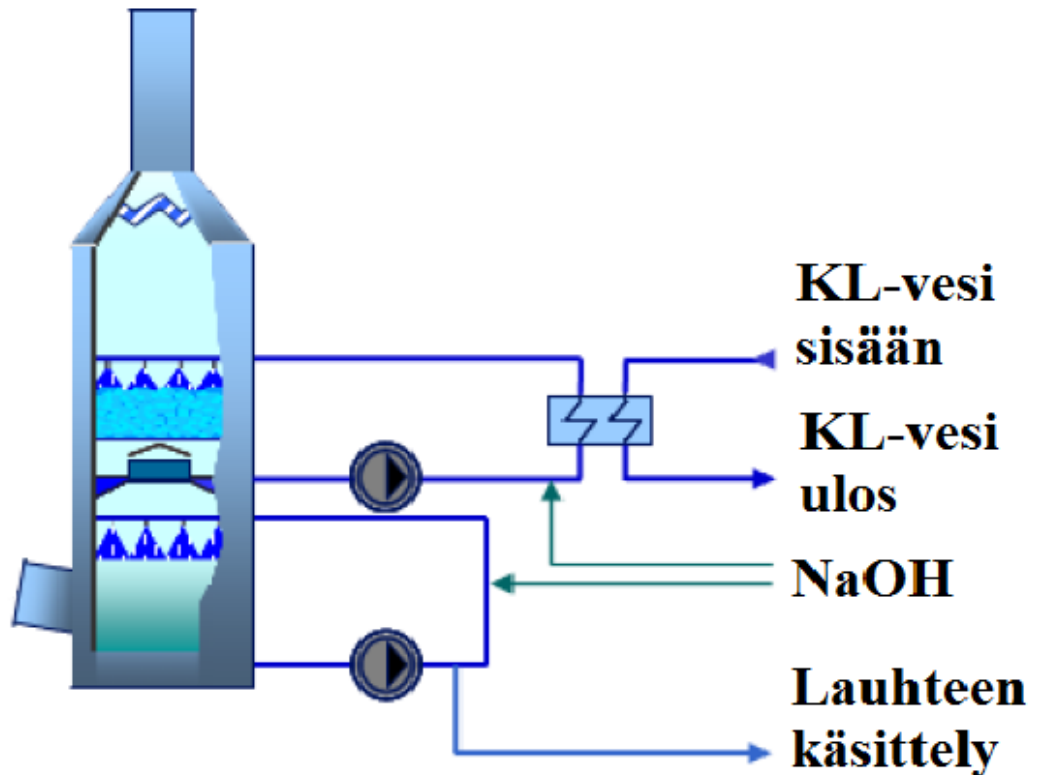
Esikäsittelyprosessin Valmet DNA -kuvassa savukaasulauhde tulee flokkulaattoriin kuvan vasemmasta yläkulmasta. Lauhteen sekaan sekoitetaan kemikaaleja. Flokkulaattorin jälkeen lauhde siirtyy lamelliselkeyttimeen, jossa suurin osa kiintoaineesta poistuu. Selkeyttimen jälkeen lauhde menee vielä hiekkasuodattimen läpi, josta se siirtyy välisäiliöön. Selkeytsaltaan rejekti pumpataan suotunauhapuristimelle, jossa kiintoaineesta puristetaan ylimääräinen neste pois. Suotunauhapuristimelta kuivattu kiintoaine johdetaan suursäkkiin.

2.1 Savukaasupesuri

Hovinsaaren voimalaitoksen savukaasupesuri on Aker Kvaernerin toimittama. Kyseessä on kiinteää polttoainetta (puu, turve ja SRF) käyttävän yhteistuotantolaitoksen savukaasujen puhdistus- ja lämmöntalteenottolaitteisto. Kattilan savukaasut johdetaan pesurin alaosaan, jossa ne kostutetaan suihkuttamalla sen sekaan pesuliuosta eli pesurissa olevaa vettä. Pesuliuoksen pH pyritään pitämään välillä 6–8 syöttämällä sen sekaan tarpeen mukaan 50 % natriumhydroksidiliuosta. (Aker Kvaerner, koulutusaineisto.)

Alavaiheesta savukaasut johdetaan pisaranerotin läpi täytekappalekerroksiin. Pisaranerotimella tarkoitetaan savukaasupesurin osaa, jossa kosteasta savukaasusta lauhdutetaan ylimääräinen neste pois. Sen toiminta perustuu tasoon mutkikkaita lamelleja. Savukaasun virratessa pisaranerotin läpi vesipisarat lauhtuvat lamellien seinille ja valuvat painovoiman vaikutuksesta alas. Täytekappaleet ovat muovisia, epäsäännöllisen muotoisia kappaleita, joiden tehtävänä on luoda savukaasuille ja pesuliuokselle mahdollisimman suuri kontaktipinta-ala. Täytekappalekerroksissa tapahtuu savukaasujen lauhdutus ja lämmöntalteenotto. (Gronmark.fi; Aker Kvaerner, koulutusaineisto.)

Täytekappalekerrosten alta pesuliuos pumpataan kahdelle lämmönvaihtimelle, joissa lämmitetään kaukolämpövettä. Lämmönvaihtimien jälkeen pesuliuos kierrätetään vielä glykolilämmönvaihtimen läpi tai palamisilman kostuttimeen ja lopulta takaisin pesuriin. Kostuttimen voi tarvittaessa ohittaa. Täytekappalekerrosten jälkeen savukaasu johdetaan piippuun. Pesurin alavaiheesta pumpataan pesuliuoskierron ylitettä vesilaitokselle esikäsitteilyprosessiin. Ennen esikäsitteilyä lauhteen lämpö otetaan talteen toisella glykolilämmönvaihtimella. (Aker Kvaerner, koulutusaineisto.)



Kuva 2. Kaksivaiheisen savukaasupesurin toimintaperiaate. (Rissanen 2016)

Kuvassa 2 on kaksivaiheinen savukaasupesuri. Ensimmäisessä vaiheessa eli alavaiheessa tapahtuu savukaasujen kostutus ja lietteen käsittely. Toisessa vaiheessa eli ylävaiheessa tapahtuu savukaasujen lauhtuminen ja lämmön talteenotto.

2.2 Flokkulaattori

Esikäsittelyn ensimmäinen osa on flokkulaattori. Se on kaksiosainen sekoitusallas ennen lamelliselkeytintä, jonka tehtävä on sekoittaa saostuskemikaalit lauhteeseen ja hämmentää liuosta saostuksen parantamiseksi. Polyalumiinikloridi ja rikkihappo syötetään liuokseen ennen flokkulaattoria sijaitsevassa putkisekoittimessa. Polymeeri syötetään flokkulaattorin pikasekoitusosan pohjaan. Flokkulaattorin ensimmäisessä osassa on pikasekoitin, joka sekoittaa kemikaalit tehokkaasti käsiteltävän lauhteen kanssa. Pikasekoittimen jälkeen lauhde siirtyy hämmennysosaan. Hitaasti pyörivä hämmennin mahdollistaa lauhteessa olevien kiintoainepartikkelien pakkaantumisen isommiksi flokeiksi eli kertymiksi, jolloin ne on helpompi erottaa lauhteesta selkeytysaltaassa. (Flootech 2019.)

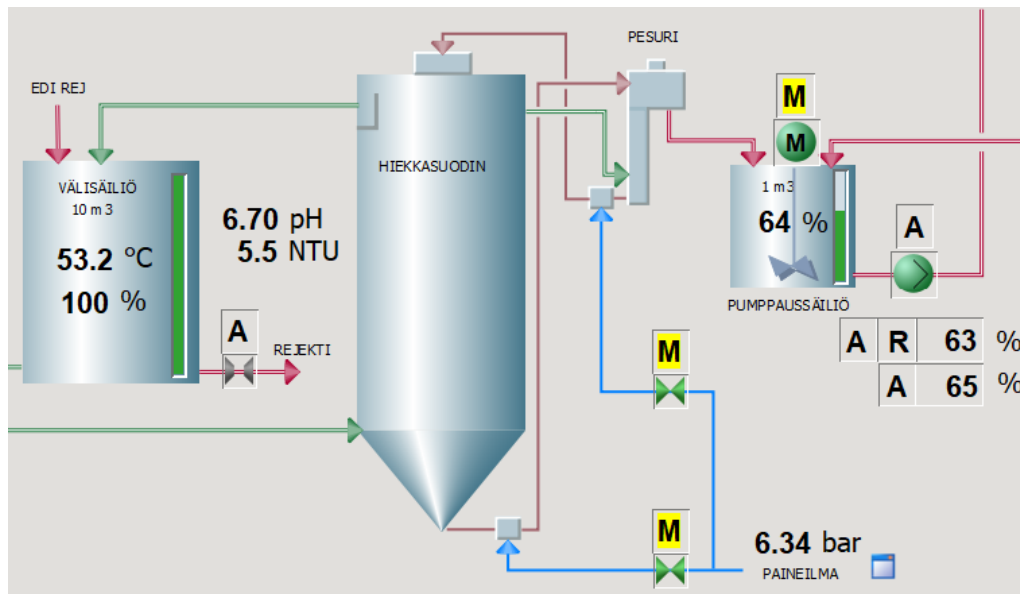
2.3 Lamelliselkeytin

Lamelliselkeyttimen toiminta perustuu vinoihin levyihin, jotka on upotettu selkeytysaltaan sisälle. Tällä tavalla pystytään lisäämään laskeutuksen pinta-alaa. Lamelleja on yhteensä 39 ja ne ovat 60 asteen kulmassa.

Laskeutuspinna-ala on 75 m^3 . Osa lamelleista on kuitenkin poistettu, sillä kiintoainetta alkoi pakkautumaan lamellien väleihin. Kiintoaineflokkit putoavat selkeyttimen pohjalle ja puhdistunut vesi eli kirkaste ohjataan hiekkasuodattimeen lamellien päältä. Lamelliselkeyttimen pohjalle muodostunut liete pumpataan tasaisin väliajoin lietteen käsittelyyn. (Flootech 2019.)

2.4 Hiekkasuodatin

Hiekkasuodatin on jatkuvatoiminen savukaasulauhteen puhdistusprosessi, jonka avulla lauhteen kiintoainepitoisuus lasketaan tarpeeksi alas jatkokäsittelyprosessia varten. Suodattimen toiminta perustuu vastavirtaperiaatteeseen, jossa käsiteltävä vesi syötetään suodattimen pohjalle ja puhdistuu noustessaan ylöspäin hiekkakerroksen läpi. Puhdistettu vesi johdetaan suodattimen päältä välisäiliöön. Hiekkaan kiinnittyneet kiintoainepartikkelit laskeutuvat hiekan mukana suodattimen pohjalle, josta hiekka nostetaan paineilman avulla hiekkapesurin päälle. Pesurissa hiekkaa tippuu alas labyrinthia pitkin, jossa virtaa pieni määrä puhdasta vettä alhaalta ylöspäin. Epäpuhtaudet irtoavat hiekasta vastavirtaperiaatteella ja poistuvat pesurin rejektiveden mukana. Rejektivesi johdetaan hiekkapesurilta pumppaussäiliöön ja sieltä takaisin lamelliselkeyttimeen. Painavat hiekanjyvät päätyvät hiekkapesurin pohjalle, josta ne siirretään paineilman avulla suodattimen päälle. Tämän seurauksena hiekkakerros suodattimen sisällä on koko ajan liikkeessä alaspäin. (Flootech 2019.)



Kuva 3. Hiekkasuodatin.

Kuvassa 3 nähdään hiekkasuodatusprosessin Valmet DNA –kuva. Savukaasulauhde tulee pesuriin vasemmalta alhaalta vihreän nuolen suunnasta. Kuvan oikeassa reunassa on pumppaussäiliö. Hiekkasuodattimen ja pumppaussäiliön välissä on hiekkapesuri. Paineilmalinjat ovat merkitty sinisellä.

2.5 Välisäiliö

Välisäiliö on nimensä mukaisesti puskurisäiliö savukaasulauhteen esi- ja jatkokäsittelyprosessien välissä. Säiliö toimii ikään kuin puskurina, sillä esikäsittelyprosessi ei pysty tuottamaan jatkokäsittelyprosessille tarpeeksi esikäsiteltyä lauhdetta. Niinpä jatkokäsittelyprosessi ei käy jatkuvasti, vaan prosessin käynnistys- ja pysäytyssekvenssit seuraavat välisäiliön pintaa.

2.6 Lietteen käsittely

Lamelliselkeyttimeltä pumpatun lietteen käsittely tapahtuu suotunauhapuristimella. Prosessissa on kaksi vaihetta: esiveden erotin ja puristin. Liete pumpataan puristimen päälle ja siihen lisätään polymeeria lietteen sakeuttamiseksi. Liete kulkee esiveden erotusviiraa pitkin puristusvyöhykkeelle. Tällä vyöhykkeellä suurin osa ylimääräisestä vedestä valuu viiran läpi ja pelkkä märkä liete jää viiralle. Puristusvyöhyke toimii mankelin lailla. Liete puristetaan kahden viiran väliin ja ylimääräinen vesi valuu viiran läpi. Viirujen läpi valunut vesi pumpataan pumppaussäiliön kautta

takaisin lamelliselkeyttimeen. Kuiva liete johdetaan puristusvyöhykkeen jälkeen lopputuotesäkkiin. (Flootech 2019.)

3 JÄTEVEDENPUHDISTUKSEN TEORIAA

Tässä kappaleessa perehdytään jätevedenkäsittelyn teoriaan, jota hyödynnetään savakaasulauhteen esikäsittelyprosessissa.

Esikäsittelyprosessi perustuu kemialliseen saostukseen, jossa on kaksi vaihetta. Näiden vaiheiden ymmärtäminen on tärkeää prosessin optimoinnin kannalta. Teoria käsittelee jätevedenkäsittelyä laajasti seurantaparametreista saostuskemikaalien toimintaan.

3.1 Seurantaparametreja

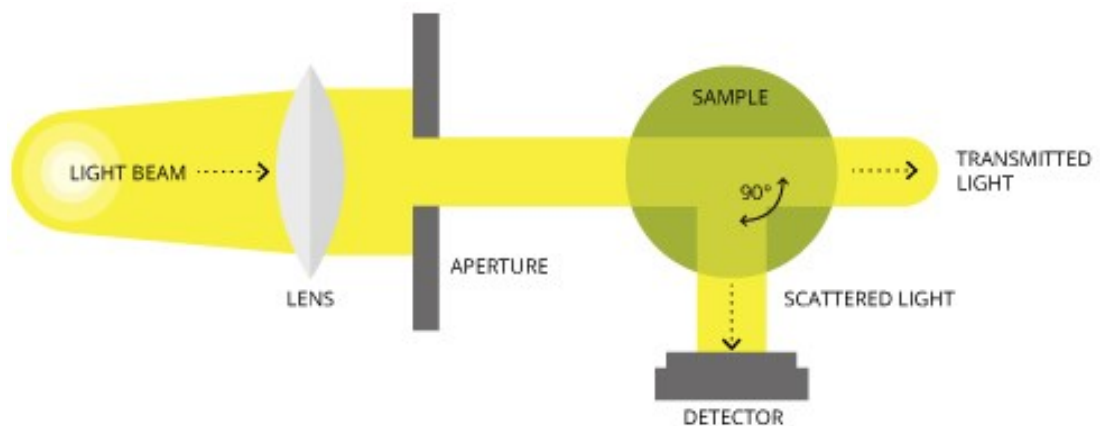
Vedenkäsittelyn seurannassa käytetään useita seurantaparametreja. Mitattavien prosessidatan avulla pysytään ajan tasalla prosessin kanssa ja niillä pystytään tulkitsemaan sen toimivuutta. Tärkeitä seurantaparametreja jätevedenkäsittelyssä ovat pH, kiintoaineen määrä, sähkönjohtavuus ja sameus.

Vedenkäsittelyn toimivuuden kannalta tärkein seurattavista parametreista on pH. Tämän työn kannalta olennaiset mittaukset ja säätimet ovat pesurissa ja flokkulaattorissa. Pesurin pH-säädöllä pesuliuos säädetään neutraaliksi, sillä savukaasujen pH vaihtelee polttoaineseoksen vaikutuksesta. Flokkulaattorin pH-säädön tarkoitus on päästä kemiallisen saostuksen kannalta optimaaliselle toiminta-alueelle.

Kiintoaineen määrä on yleinen fysikaalinen mitattava suure vedenkäsittelyssä. Sen yksikkö on kokonaiskiintoaine (TS), joka saadaan, kun kaikki vesi on haihdutettu pois näytteestä. Kokonaiskiintoaine jaetaan usein kahteen alakategoriaan, suspendoitunut kiintoaine (TSS) ja liuennut kiintoaine (TDS). TSS kuvaa kiintoainepartikkeleita, jotka eivät läpäise suodatinta, minkä huokoskoko on alle 2,0 mikrometriä. TDS:n muodostaa suodattimen läpäissyt kiintoaine. Hovinsaaren voimalaitoksella on käytössä GF/C suodattimia, joiden huokoskoko on 1,2 mikrometriä. Kiintoaine ilmoitetaan yleensä yksikössä mg/l tai ppm. (Woodside 2022.)

Sähkönjohtavuus tarkoittaa liuoksen kykyä johtaa sähköä. Sähkönjohtavuutta kasvattaa liuoksessa olevat ionit eli sitä voidaan käyttää TDS:n määrittämiseen ja päinvastoin. (Woodside 2022.) Sähköjohtavuuden yksikkö on S eli siemens, mutta vedenkäsittelyssä käytetään yleensä yksikköä $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sameus on yksikkö, jolla mitataan nesteen kirkkautta. Sen yksikkö on NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Nefelometrinen mittaus mittaa nesteen valonsirontaa. Suurempi valonsironta tarkoittaa likaisempaa vettä. Sameuden mittaus tapahtuu siten, että mitattavaan liuokseen näytetään valoa ja valonsirontaa mittaava anturi asetetaan kohtisuoraan valonlähteeseen nähden. Anturin on oltava lähellä valonlähdettä, jotta se voi aistia sironnan. Sameus määritetään nesteen kiintoainehiukkasista kimpoilevista valonsäteistä, jotka osuvat anturiin. Nefelometrisen mittausmenetelmän mittausalue on noin 0–40 NTU, joten se ei sovi erittäin likaisille vesille. Kuvassa 4 näkyy visuaalinen esitys nefelometrisen sameuden mittauksen toimintaperiaatteesta. (Fonderiest; Woodside 2022.)



Kuva 4. Nefelometrinen sameuden mittaus. (Fonderiest)

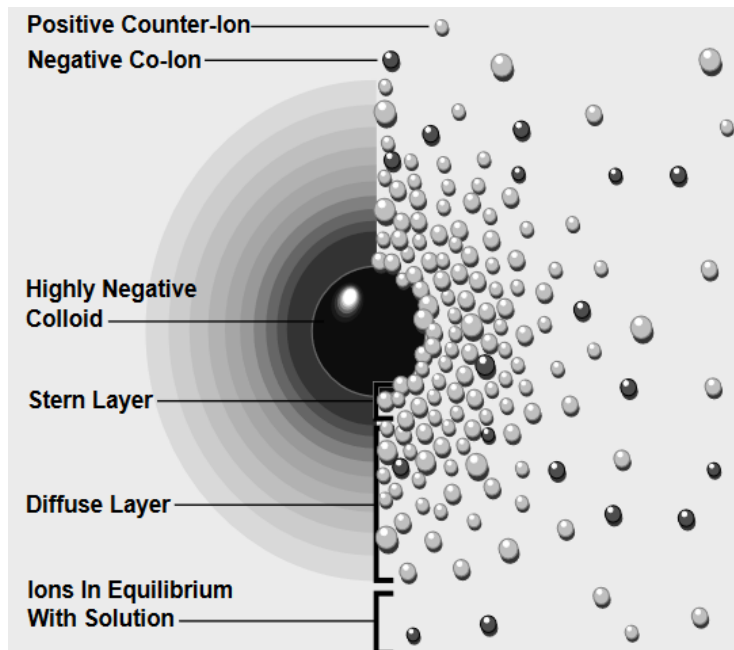
Yleisesti jätevedenpuhdistuksessa tärkeässä osassa olevia seurantaparametrejä ovat kemiallinen hapenkulutus (COD) ja biokemiallinen hapenkulutus (BOD). Kyseisillä seurantaparametreillä pystytään mittaamaan orgaanisen aineen määrää liuoksessa. (vesi.fi.) Hovinsaaren voimalaitoksella näitä parametrejä ei seurata, sillä savukaasulauhteen orgaanisen aineen pitoisuus on käytännössä olematon.

3.2 Kolloidit

Suurin osa teollisuuden jätevesistä puhdistettavista epäpuhtauksista ovat kolloideja. Kolloidit ovat halkaisijaltaan $10^{-6} - 10^{-3}$ mm ja niitä ovat muun muassa bakteerit, virukset ja makromolekyylit (Bratby 2016). Kolloideja esiintyy jätevesissä dispersiossa eli kahden toisiinsa liukenemattoman aineen seoksessa. Kolloideilla on dispersiossa negatiivinen pintavaraus, jonka takia ne hylkivät toisiaan eivätkä muodosta kertymiä eli flokkeja. Tätä ilmiötä kutsutaan stabiilisuudeksi. Kolloideja on vaikea poistaa vedestä, sillä ne pienen kokonsa ja massansa vuoksi läpäisevät mekaaniset suodattimet ja niiden laskeuttaminen on todella hidasta. Esimerkiksi halkaisijaltaan 10^{-5} mm kokoisen partikkelin laskeuttaminen luonnollisesti 1 senttimetrillä kestäisi 10 vuotta (Leppisaari 2017.)

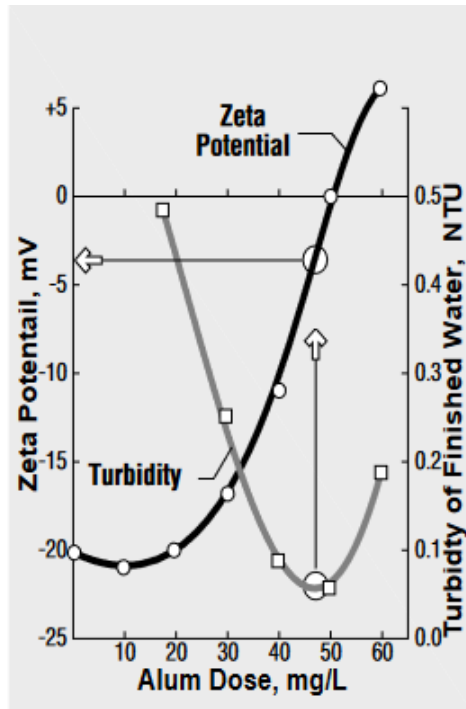
3.3 Sähköinen kaksoiskerros ja zetapotentiali

Sähköinen kaksoiskerros on malli, jolla kuvataan ionien käyttäytymistä kolloidin ympärillä. Kolloidien negatiivinen pintavaraus vetää puoleensa liuoksessa olevia positiivisia ioneja. Tätä kolloidien pinnalle muodostunutta vahvaa kerrosta kutsutaan Sternin kerrokseksi. Muutkin positiiviset ionit pyrkivät kolloidin läheisyyteen sen negatiivisen pintavarauksen takia, mutta Sternin kerros ja muut positiiviset ionit hylkivät toisiaan. Tasapainotila synnyttää diffuusiokerroksen vastaioneja. Positiivisten ionien konsentraatio pienenee, mitä kauemmaksi kolloidista mennään, kunnes saavutetaan sama konsentraatio liuoksen kanssa. Päinvastoin negatiivisten ionien konsentraatio kasvaa, mitä kauemmaksi kolloidista mennään, sillä kolloidi hylkii niitä. Diffuusiokerroksen jälkeen seuraa ns. bulkkiliuos, missä positiivisten ja negatiivisten ionien konsentraatiot ovat samat. Kolloidin ympärille muodostunutta Sternin kerrosta ja diffuusiokerrosta kutsutaan sähköiseksi kaksoiskerrokseksi. Visuaalinen malli sähköisestä kaksoiskerroksesta on nähtävissä kuvasta 5. (Montonen 2019; Zeta Potential.)



Kuva 5. Visuaalinen malli sähköisestä kaksoiskerroksesta. (Zeta Potential)

Zetapotentiaaliksi kutsutaan kolloidin sekä Sternin kerroksen ja diffuusiokerroksen välille syntynyttä sähköistä potentiaalia. Zetapotentiaalin yksikkö on millivoltti (mV) ja se on stabiilissa liuoksessa aina negatiivinen. Zetapotentiaalin mittaamiselle on useita mittausmenetelmiä, esimerkiksi virtauspotentiaaliin perustuva menetelmä. Mitä negatiivisempi zetapotentiaali on, sitä stabiilimpi kolloidi on. Zetapotentiaali kertoo siis sen energiamäärän, joka tarvitaan systeemin epästabilointiin. Potentiaalin lähestyessä nollaa repulsiivoimat katoavat ja kolloidit voivat liikkua liuoksessa vapaammin. Zetapotentiaaliin voidaan vaikuttaa muun muassa pH:ta muuttamalla tai lisäämällä ionirakennetta muuttavaa kemikaalia eli koagulanttia. Zetapotentiaali on siis käytännöllinen työkalu koagulantin syöttömäärän optimointiin. Kolloidien saostuksen kannalta on hyvä saada zetapotentiaali mahdollisimman lähelle nollaa. (Leppisaari 2017; Montonen 2019; Zeta Potential.)



Kuva 6. Esimerkki zetapotentiaalin käytöstä koagulantin syöttömäärän selvittämiseen. (Zeta Potential)

Kuvassa 6 voidaan nähdä liuksen zetapotentiaalin ja sameuden välinen suhde, jolla voidaan seurata saostuksen tehokkuutta. Zetapotentiaalin ollessa lähellä nollaa liuos on epästabilointunut kokonaan ja saostus toimii teoriassa parhaiten. Tätä saostuksen optimointimenetelmää ei kuitenkaan käytetä tämän työn tutkimuksessa.

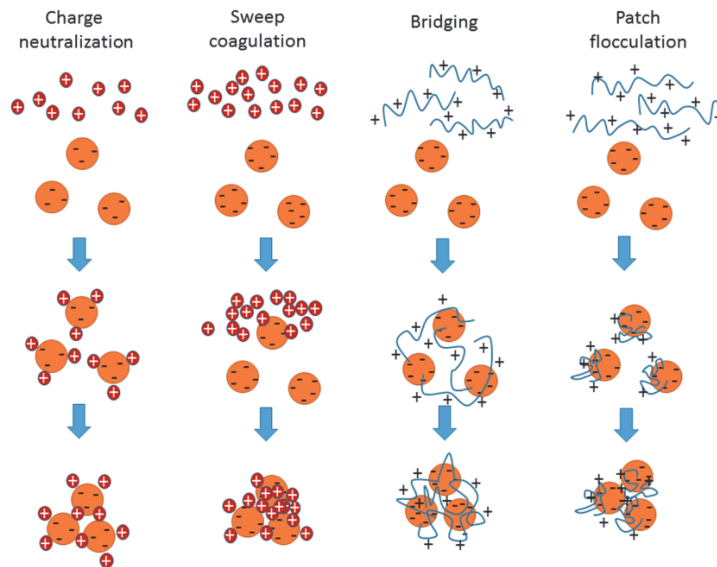
3.4 Kemiallinen saostus

Jotta kolloidit pystytään poistamaan tehokkaasti jätevesistä, pitää dispersion stabiilisuus rikkoa. Systeemin ollessa epätasapainossa kykenevät partikkelit sitoutumaan toisiinsa muodostaen suurempia flokkeja. Tätä menetelmää kutsutaan kemialliseksi saostukseksi. Kemiallinen saostus koostuu kahdesta osasta, koagulaatiosta ja flokkulaatiosta.

3.4.1 Koagulaatio

Koagulaatio on kemiallisen saostuksen ensimmäinen vaihe. Sen tarkoitus on rikkoa dispersion stabiilisuus lisäämällä liukseen koagulanttia. Koagulantin vaikutuksesta kolloidin ympärillä oleva sähköinen kaksoiskerros rikkoutuu ja se pääsee liikkumaan dispersiossa vapaammin. Koagulointi liuksessa voi tapahtua neljällä eri tavalla: kaksoiskerroksen kompressiolla,

adsorptioepästabiloitumisella, silloituksella tai saostumisella. Riippuen käytettävästä kemikaalista koagulointi voi tapahtua yhdellä tai usealla edellä mainituista tavoista. Kuvassa 7 on nähtävillä koagulaation ja flokkulaation toimintamekanismeja. (Bratby 2016; Leppisaari 2017.)



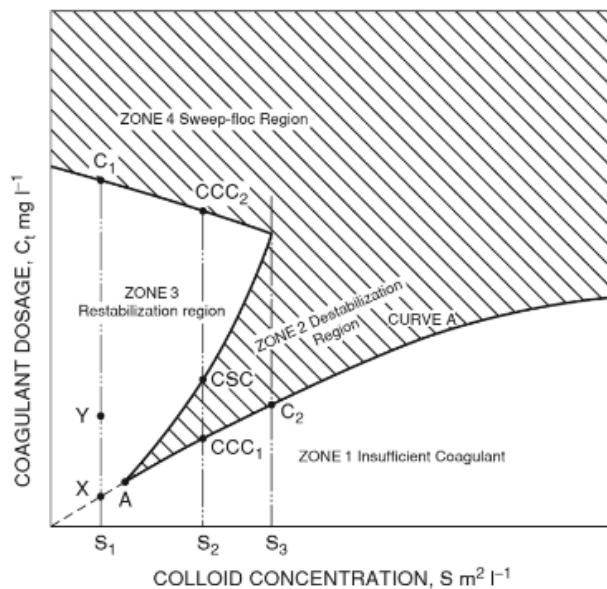
Kuva 7. Koagulaation ja flokkulaation toimintamekanismit. (Suopajärvi 2015)

Koaguloinnin kannalta on tärkeää, että käytettävä kemikaali sekoitetaan tasaisesti ja tehokkaasti dispersion sekaan, sillä koagulointireaktiot kestävät vain muutamia sekunteja ja flokkulaatio alkaa välittömästi niiden jälkeen. Tämän takia flokkulaattorit ovat usein kaksiosaisia. Ensimmäinen osa on pikasekoitus ja toinen osa on hämmennys. Flokkulaation tehostamiseksi liuokseen voidaan lisätä apukemikaalia kuten polymeeriä. (Bratby 2016; Leppisaari 2017.)

Koagulantit ovat yleensä alumiinin tai raudan suoloja, sillä niitä on saatavilla paljon ja niiden valmistus on edullista. Valmistukseen käytetään teollisuuslaitosten sivutuotteita. Yleisimpiä Suomen vesihuollossa käytettäviä koagulantteja ovat alumiinisulfaatti, alumiinikloridi, ferrikloridi eli rauta(III)kloridi, ferrisulfaatti eli rauta(III)sulfaatti ja ferrosulfaatti eli rauta(II)sulfaatti. (Huoltovarmuusorganisaatio 2020.) Tässä työssä käsitellään polyalumiinikloridia.

Kolloidikonsentraatiolla on merkittävä vaikutus koagulanttikonsentraatioon. Kuvasta 8 voidaan tulkita, että kolloidikonsentraation ollessa pieni (S_1)

koagulanttia tarvitaan paljon (C_1). Tätä johtuu siitä, että kolloidien törmäysmahdollisuus on pieni. Kolloidikonsentraation kasvaessa (S_2) syntyy alue, jossa koagulanttia tarvitaan vähän (CCC_1), mutta systeemin on mahdollista uudelleenstabiloitua koagulanttikonsentraation noustessa (CSC). Koagulanttikonsentraation kasvaessa tarpeeksi dispersio epästabiloituu uudestaan (CCC_2). Kolloidikonsentraation kasvaessa (S_3) uudelleenstabiloitumisalue poistuu ja dispersio epästabiloitumiseen tarvittava koagulanttikonsentraatio on suhteellisen pieni (C_2). (Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968.)

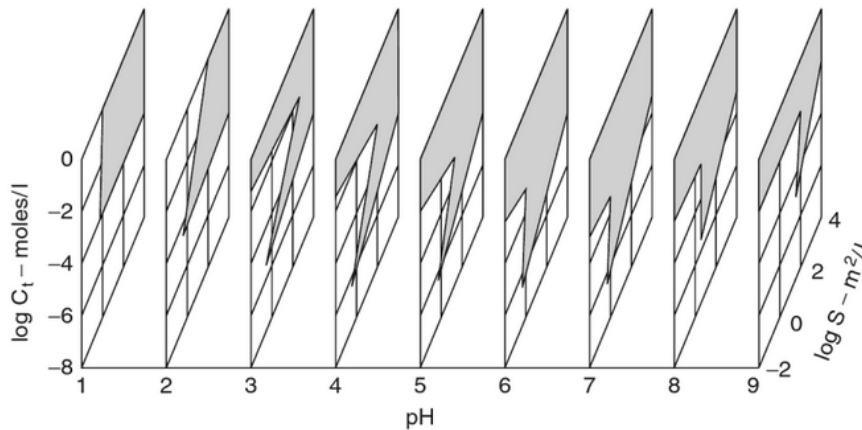


Kuva 8. Kolloidikonsentraation vaikutus koagulantin syöttöön, pH 4–5. (Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968)

Stumm & O'Melia saivat selville, että pH vaikuttaa merkittävästi liuoksen stabiloitumis- ja epästabiloitumisalueisiin. Koagulantista syntyvät hydrolyysituotteet sekä niiden pintavaraus muuttuvat pH:n vaikutuksesta. pH vaikuttaa myös kolloidien pintavaraukseen. Korkeassa pH:ssa kolloideilla on matalaa pH:ta negatiivisempi pintavaraus, jonka takia epästabiloimiseen tarvittava koagulanttikonsentraatio on suurempi. (Leppisaari 2017; Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968.) Yleisimmille jätevesien puhdistukseen käytetyille koagulanteille optimaalinen pH on välillä 4–7. (Huoltovarmuusorganisaatio 2020).

Kuvassa 9. on Stummin ja O'Melian tutkimuksien pohjalta luotu taulukko. Taulukon y-akselilla on koagulantin syöttö ja z-akselilla on

kolloidikonsentraatio. Yhdessä y- ja z-akseli muodostaa kuvan 9 mukaisia hahmotelmia stabiiloitumis- ja epästabiiloitumisalueista. Y-akselilla on pH-arvot. Koagulointi on onnistunut pH:n ollessa suurempi kuin kolme.



Kuva 9. pH:n vaikutus koagulaatioon. (Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968)

Morris ja Knocke tutkivat lämpötilan vaikutusta koagulointiin. Lämpötilalla ei kuitenkaan huomattu olevan suurta vaikutusta koagulaatioon yli 20 °C lämpötilassa. Matalat lämpötilat vaikuttivat negatiivisesti varsinkin alumiinipohjaisten koagulanttien tehokkuuteen. (Morris & Knocke 1984.) Tässä työssä tutkittavan lauhteen lämpötila on yli 50 °C.

3.4.2 Flokkulaatio

Flokkulaatio on kemiallisen saostuksen toinen vaihe, jossa epästabiloidut partikkelit muodostavat suurempia kertymiä törmäämällä toisiinsa. Prosessin voi jakaa kulkeutumiseen ja kiinnittymiseen. Kulkeutumisvaihe voidaan myös jakaa kahteen osaan, perikineettiseen ja ortokineettiseen flokkulaatioon. Kiinnitysvaihetta voidaan tehostaa koaguloinnin apuaineella, kuten polymeerillä. (Bratby 2016; Leppisaari 2017.)

Perikineettinen flokkulaatio eli mikroflokkulaatio tapahtuu heti koaguloinnin jälkeen ja kestää vain muutamia sekunteja. Sen aiheuttaa Brownin liike eli lämmöstä aiheutuva molekyylien satunnainen liike. Brownin liike pystyy liikuttelemaan halkaisijaltaan vain alle 0,1 µm kokoisia partikkeleita. Pelkästään lämpöliikkeen avulla pystytään muodostamaan halkaisijaltaan jopa 100 µm kokoisia flokkeja. (Bratby 2016; Leppisaari 2017.)

Ortokineettinen flokkulaatio eli makroflokkulaatio tapahtuu luomalla molekyyleille liikehdintää mekaanisesti esimerkiksi sekoittimella. Näin luodaan molekyyleille enemmän mahdollisuuksia törmätä toisiinsa. Sekoitusnopeuteen on kiinnitettävä huomiota, sillä liian hidas sekoitusnopeus ei aiheuta tarpeeksi molekyyliden välisiä törmäyksiä ja liian nopea sekoitusnopeus saattaa rikkoa muodostuneita flokkeja. Apukemikaalia, kuten polymeeriä käyttämällä voidaan vahvistaa muodostuneiden flokkien sidoksia ja sitä kautta nostaa sekoitusnopeutta. (Bratby 2016; Leppisaari 2017.)

3.4.3 Polyalumiinikloridi

Hovinsaaren voimalaitoksella koagulanttina käytetään polyalumiinikloridia (PAC). PAC on huoneenlämpötilassa kellertävä neste ja sen pH on noin 1,5. Se on Suomen vesihuollossa toiseksi käytetyin kemikaali ja sitä voidaan käyttää talousveden tuotantoon sekä jäteveden puhdistukseen. PAC on esihydrolysoitu, mikä tekee siitä vähemmän pH-riippuvaisen. PAC:ia on olemassa monta erilaista versiota riippuen siitä, kuinka monta OH^- tai Cl^- -ryhmää siinä on. Eri versiot muuttavat käsiteltävän veden pH-arvoa eri tavalla ja niiden saostus-pH-alue vaihtelee. Polyalumiinikloridin optimaalinen saostus-pH on välillä 6–7 ja ominaiskulutus 30–60 ppm (Huoltovarmuusorganisaatio 2020.) Hovinsaaren voimalaitoksen esikäsittelyprosessissa käytetty koagulantti on Kemiran PAX-XL 100.

3.4.4 Polymeerit

Polymeerejä eli pitkiä molekyyliketjuja voidaan käyttää koagulanttina tai koagulaation apuaineena. Kumpikin käyttötarkoitus perustuu polymeerin ominaisuuteen nostaa veden viskositeettia. Anionisia eli negatiivisesti varautuneita polymeerejä käytetään usein koagulaation apuaineena ja kationisia eli positiivisesti varautuneita polymeerejä käytetään koagulanttina. Hovinsaaren voimalaitoksella polymeeriä käytetään koagulantin apuaineena. Polymeeri toimii kuvassa 7 esitetyn silloitusmekanismin mukaisesti sitomalla negatiivisesti varautuneita flokkeja itseensä. Käytettävä polymeeri tulee valita tarkkaan, sillä ne yleensä toimivat vain tietynlaisissa olosuhteissa. Toimiakseen optimaalisesti pitää polymeeri sekoittaa tehokkaasti käsiteltävään liuokseen. (Leppisaari 2017; MRWA 2020.)

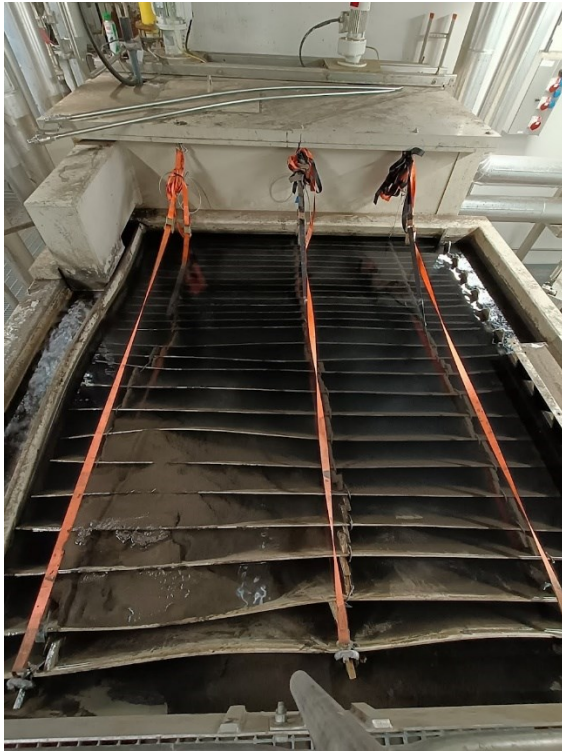
Apuaineena polymeerillä pyritään parantamaan koagulaation seurauksena syntyneiden kiintoaineflokkien ominaisuuksia, kuten flokin kokoa, lujuutta tai massaa. Nämä ominaisuudet mahdollistavat tehokkaamman laskeutuksen sekä mekaanisen suodatuksen käytön vedenpuhdistuksessa. Apuaineena käytetyn polymeerin pitoisuus liuoksessa on noin 0,5–1,5 ppm. Liuoksen polymeeripitoisuudella ei pitäisi olla vaikutusta syötettävän koagulantin määrään. (Leppisaari 2017; MRWA 2020.) Hovinsaaren voimalaitoksella käytetty polymeeri on Kemiran SUPERFLOC A-100, joka on anioninen polyakryyliamidi.

4 ESIKÄSITTELYPROSESSIN ALKUTILANNE

Hovinsaaren voimalaitoksen uusi vesilaitos otettiin käyttöön vuonna 2019. Silloin polyalumiinikloridille ja polymeerille mitoitettiin yksi kiinteä syöttömäärä, joka perustui sen aikaiseen keskimääräiseen polttoaineseokseen. Talvena 2021–2022 voimalaitoksen polttoaineseos koostui noin 67 % biopolttoaineesta, 17 % turpeesta ja 16 % kierrätyspolttoaineista. Talvena 2022–2023 polttoaineseos on muuttunut merkittävästi sillä biopolttoaineita ei ole saatavilla läheskään niin paljon kuin ennen. Nykyinen polttoaineseos koostuu noin 48 % biopolttoaineesta, 37 % turpeesta ja 15 % kierrätyspolttoaineista. Turpeen poltto sisältää tuhkaa kuin puu. Puuhakkeen tuhkapitoisuus on 0,5–1,5 m-% ja turpeen 4,5–6,5 m-% (VTT Oy 2016). Kasvanut turvepitoisuus siis nostaa syntyvän tuhkan määrää ja kasvattaa savukaasulauhteen kiintoainepitoisuutta. Liitteissä 1 ja 2 on nähtävissä yksityiskohtaiset polttotaseraportit Hovinsaaren voimalaitokselta. Raportit ovat lämmityskausilta 2021–2022 ja 2022–2023, jolloin kattilaa ajetaan pääasiassa täydellä teholla.

Kasvanut kiintoainepitoisuus on aiheuttanut haasteita esikäsittelyprosessissa. Haasteita ovat muun muassa lauhteen huono saostus, jonka takia prosessin seuraava vaihe hiekkasuodatus kärsii. Hiekkasuodattimen likaantuessa pahasti joutuu sen huuhtelemiseen käyttämään paljon puhdasta vettä. Lisäksi suodattimen puhtaaksi huuhtelu on aikaa vievä prosessi. Suuret kiintoainemäärät aiheuttavat myös sen, että selkeytysaltaan lamellien väliin

pakkautuu kiintoainetta, jota on joutunut huuhtelemaan auki kuvassa 10 näkyvillä pitkillä suutinputkilla.



Kuva 10. Kiintoainetta pakkautuneena selkeytsaltaan lamellien väleihin.

Tämän työn tarkoitus on luoda polyalumiinikloridille ja polymeerille syöttökäyrät, jotka seuraavat esikäsittelyyn tulevan savukaasulauhteen kiintoainepitoisuutta. Näin saavutetaan kemikaalien optimaalinen kulutus ja prosessin paras mahdollinen toiminta. Savukaasulauhteen vesianalyysit tähän opinnäytetyöhön toteuttaa Kotkan Energia Oy:n oma laborantti.

5 VESIANALYYSIT

Vesianalyysit ovat tämän opinnäytetyön tiedonkeruun kannalta tärkeä osa. Suurin osa tarvittavasta datasta on erilaisia laboratorioanalysejä savukaasulauhteesta ennen esikäsittelyä ja sen jälkeen. Analyysien lisäksi käytetään apuna automaatiojärjestelmästä saatuja mittauksia. Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti tutkimuksen kannalta oleelliset vesianalyysit.

5.1 Jäännösalmiinin mitta

Esikäsitellyn savukaasulauhteen jäännösalmiininipitoisuudella pystytään tarkastelemaan syötetyn polyalmiinikloridin määrää. Mittauksen tavoitearvo on noin 0,2 mg/l. Pitoisuuden mennessä tavoitearvon yli tarkoittaa sitä, että polyalmiinikloridin sisältämä alumiini ei ole saostunut kokonaan savukaasulauhteeseen eli sitä on syötetty tarpeettoman suuri määrä.

Tähän työhön jäännösalmiini on mitattu spektrofotometrillä (kuva 11). Spektrofotometri mittaa valon aallonpituutta eli väriä, jonka perusteella se pystyy laskemaan aineen määrän liuoksessa. Jokaiselle mitattavalle alkuaineelle on omat reagenssiluoksensa, jotka värjäävät näytteen eri värisiksi.



Kuva 11. HACH DR3900 spektrofotometri ja reagenssiputkia. (www.hach.com)

Huomattavia jäännösalmiininipitoisuuksia oli havaittavissa vain, kun esikäsiteltävän lauhteen pH on huomattavasti alle asetusarvon (alle 6). 17. päivä maaliskuuta tehdyn vertailuanalyysin tulokset kertovat, että pH:n ollessa 7 jäännösalmiinin pitoisuus oli 0,19 mg/l kun taas pH säädettyä arvoon 2,7, nousi alumiininipitoisuus arvoon 1,3 mg/l. Tämä johtui siitä, että jäännösalmiinin mittaamiseen käytetyt spektrofotometrin reagenssiaineet toimivat parhaiten pH-alueella 2,5–3,5. On siis tärkeää pitää analysoitavan lauhteen pH oikealla alueella edustavan analyysin saamiseksi. Jatkossa vesianalyysit tehtiin pH-säädetyyn liuokseen.

5.2 Kiintoaineen mittaus

Kiintoaineen mittaus lauhteesta perustuu SFS-EN 872:2005-standardiin. Lauhteen kiintoaine mitataan suodattamalla 500 millilitraa näytettä vakuumisuodatuslaitteiston avulla Whatman GF/C-suodattimen läpi. Ennen suodatusta suodatinpaperi kuivataan ja punnitaan. Suodatuksen jälkeen suodattimesta haihdutetaan neste pois laittamalla se uuniin kahdeksi tunniksi. Kuivauksen jälkeen suodatin punnitaan uudestaan. Lopuksi lauhteen kiintoainepitoisuus voidaan laskea kaavalla $\rho = \frac{1000 \text{ ml/l} \cdot (b-a)}{V}$, missä

ρ on kiintoaineen pitoisuus (mg/l)

b on suodattimen massa suodatuksen jälkeen (mg)

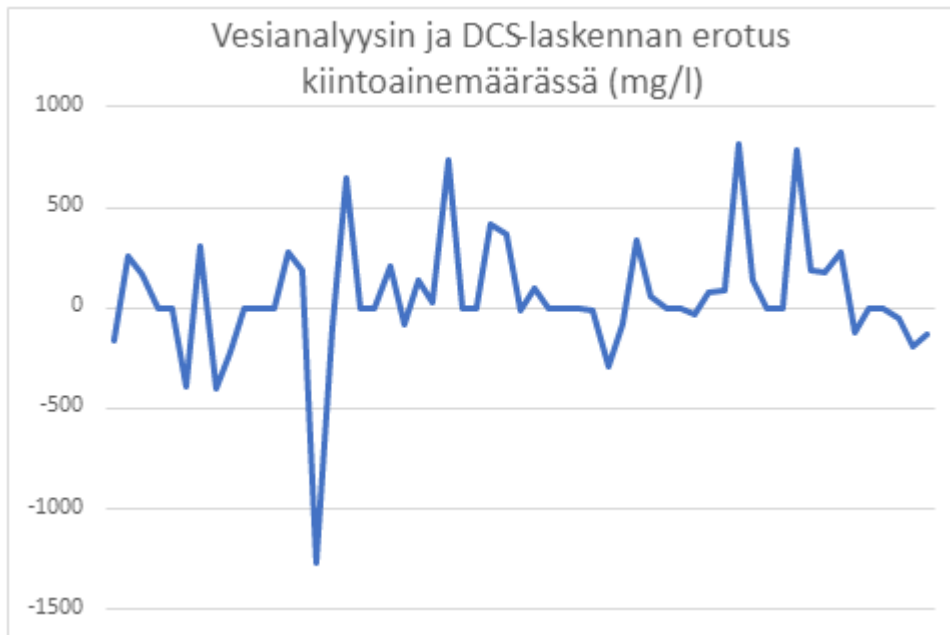
a on suodattimen massa ennen suodatusta (mg)

V on näytteen tilavuus (ml)

Voimalaitoksen automaatiojärjestelmässä on myös kiintoainemäärän laskenta, jonka tarkkuutta verrataan laboratorioanalyysin kanssa. DCS:n ilmoittama lauhteen kiintoainemäärä lasketaan kaavalla:

$$\frac{((\text{savukaasu ennen pesuria} - \text{savukaasu piipussa}) \cdot \text{savukaasun virtaus})/3600}{\text{savukaasulauhteen virtaus}}$$
$$= \frac{\left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} - \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\text{l/s}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{h}} = \text{mg/l}$$

Vertailtuani vesianalyysin kiintoainepitoisuutta ja automaatiojärjestelmän kiintoainepitoisuuden laskentaa totesin, että laskenta pitää pääosin paikkaansa. Erotusta analyysille ja laskennalle tuli keskimäärin ± 300 mg/l, mutta erotus voi johtua lauhteen näytteenoton ja laskentadatan ajankohdan eroista. Lauhteen näytteet on otettu aamuisin kello 7.00–8.00, kun taas laskentadata on mittauksen keskiarvo väliltä 7.00–8.00. Kuvassa 12 havainnollistetaan vesianalyysin ja DCS-mittauksen eroa. Vertailudataa on noin puolentoista kuukauden ajalta. Tuloksen perusteella koagulantin syötölle ei tarvitse luoda korjauskerrointa, joka korjaisi automaatiojärjestelmän tekemän laskennan virhettä.



Kuva 12. Kiintoaineen vesianalyysin ja DCS-laskennan vertailu.

5.3 Polymeerin pitoisuuden määrittäminen

Polymeerin pitoisuus määritetään silmämääräisesti laborantin toimesta kiintoaineen suodatuksen yhteydessä. Lauhteen suodattavuus oli joko hyvä, kohtalainen tai huono riippuen siitä kauan suodattaminen kesti. Tavoite olisi saada suodattavuus kohtalaiselle tasolle, joka kertoisi siitä, että lauhteessa olisi suunnilleen oikea määrä polymeeriä. Jos polymeeriä olisi liian vähän suodattuisi lauhde liian nopeasti ja polymeeriä ollessa liikaa kestäisi suodatus liian kauan. Suodatuksen kestolla ei ole merkitystä kiintoaineen mittaukseen.

6 KEMIKAALIEN SYÖTTÖMÄÄRIEN OPTIMOINTI

Työn tutkimusosa käsittelee savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin kemikaalien optimointia. Tarkoituksena on luoda kummalekin saostuskemikaalille savukaasulauhteen kiintoainemäärää seuraava kemikaalin syöttö. Rikkihapon osalta tutkitaan miten lamelliselkeyttimen pH vaikuttaa saostusprosessiin. Kemikaaleista polyalumiinikloridia käsitellään eniten, sillä sen optimoinnilla on suurin vaikutus prosessiin.

6.1 Polyalumiinikloridi

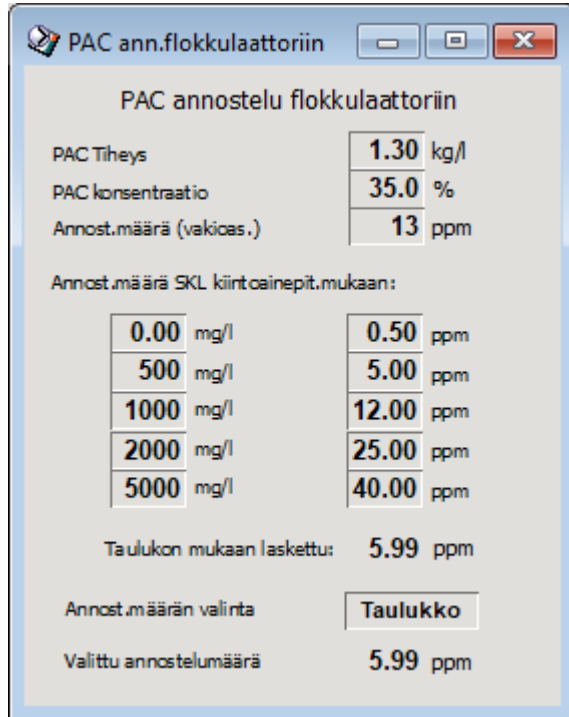
Polyalumiinikloridin syötön optimoimiseksi sille luotiin syöttökäyrä, jossa x-akselilla on syötetyn kemikaalin määrä ja y-akselilla savukaasulauhteen kiintoaineen määrä. Tavoitteena on saada lauhteen kiintoaineen optimaalinen saostus kaikilla kiintoainemäärillä. Lähtöpisteenä koagulantin syötössä käytetään vesilaitoksen käyttöönoton yhteydessä määritettyä 13 ppm kaikilla kiintoainepitoisuuksilla.

Annostuksen määrittelyyn on käytetty historiadataa savukaasulauhteen kiintoainepitoisuudesta, esikäsitellyn lauhteen jäännösalmiiniipitoisuudesta, lamelliselkeyttimen pH:sta sekä flokkulaattorin ja lamelliselkeyttimen sameuksista. Laboratorionäytteitä tulevasta ja esikäsitellystä savukaasulauhteesta alettiin tekemään aktiivisemmin vuoden 2023 alusta lähtien. Sitä edeltävältä ajalta historiatietoa on vähemmän.

Tärkeimmät seurattavat mittaukset ovat savukaasulauhteen kiintoainepitoisuus ja käsitellyn lauhteen alumiiniipitoisuus. Alumiiniipitoisuuden noustessa tiedetään, että koagulanttia syötetään sillä kiintoainemäärällä liikaa ja päinvastoin. On myös otettava huomioon tulevan savukaasulauhteen alumiiniipitoisuus, mutta se on usein melko pieni. Selkeytsaltaan veden kirkkaus on hyvä visuaalinen indikaattori saostusprosessin toimivuudesta. Flokkulaattoriin ja selkeytsaltaaseen asennetut sameusmittaukset puhdistetaan voimalaitoskäyttäjien toimesta kerran vuorossa. Jos antureita ei puhdisteta, ne menevät tukkoon eivätkä mittaa sameutta oikein.

Ensimmäisenä kokeiltiin nostaa polyalumiinikloridin kiinteää syöttöä 13 ppm:stä 20 ppm:ään. Jo viikon pituisen otannan perusteella pystyttiin todeta, että syöttömäärä oli liian suuri. Lauhteesta mitatut jäännösalmiiniipitoisuudet olivat nousseet selkeästi. Selkeytsaltaan pH kokeilujakson aikana pysyi samalla tasolla kuin ennen kokeilujaksoa, joten sillä ei ole vaikutusta mittaustuloksiin. Kiintoainepitoisuus savukaasulauhteessa kokeilujaksolla vaihteli välillä 500–2500 mg/l. Tammikuun ja helmikuun 2023 aikana kerätyn prosessidatan perusteella pystyin luomaan ensimmäisen version polyalumiinikloridin syöttötaulukosta. Prosessidatan perusteella pystyi näkemään, että pienillä, alle 1000 mg/l kiintoainepitoisuuksilla koagulanttia oli

liikaa. 13 ppm vaikutti olevan oikea syöttömäärä kiintoainepitoisuuksilla 1000–1500 mg/l. Korkeammilla kiintoainepitoisuuksilla ei ollut merkkejä koagulantin liian pienestä syöttömäärästä.



PAC annostelu flokkulaattoriin

PAC Tiheys 1.30 kg/l
PAC konsentraatio 35.0 %
Annost.määrä (vakioas.) 13 ppm

Annost.määrä SKL kiintoainepit.mukaan:

0.00 mg/l	0.50 ppm
500 mg/l	5.00 ppm
1000 mg/l	12.00 ppm
2000 mg/l	25.00 ppm
5000 mg/l	40.00 ppm

Taulukon mukaan laskettu: 5.99 ppm

Annost.määrän valinta Taulukko

Valittu annostelumäärä 5.99 ppm

Kuva 13. Polyalumiinikloridin annostelu flokkulaattoriin kiintoainemäärän mukaan.

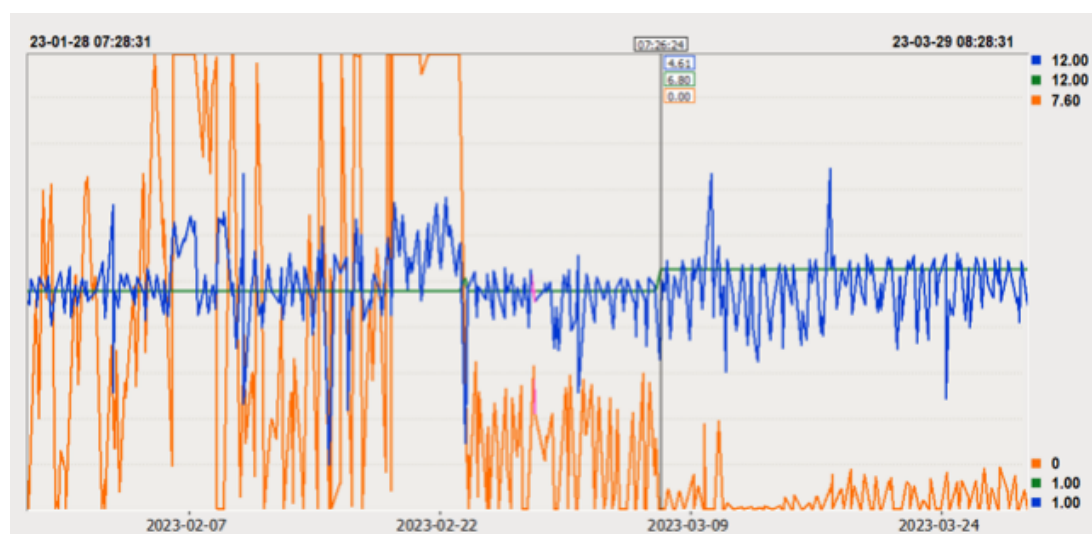
Kuvassa 13 on automaatiojärjestelmään luotu laskentataulukko polyalumiinikloridin syöttömäärälle. Järjestelmä syöttää kemikaalia yksikössä ppm ja se ottaa laskennassa huomioon kemikaalin tiheyden ja konsentraation. Kuvassa olevia kiintoainemääriä ja kemikaalin syöttömääriä pystyy muuttamaan haluamikseen arvoiksi kemikaalin syötön optimoimiseksi. Annostelumäärälle on myös mahdollista valita taulukon sijaan vakioasetusarvo, jonka pystyy itse määrittämään.

Jatkossa koagulantin syöttöä pystytään optimoimaan edellä mainittuja prosessisuureita seuraamalla. Tärkein seurattava muuttujapari on savukaasulauhteen kiintoainepitoisuuden ja käsitellyn lauhteen alumiinipitoisuuden välinen yhteys. Optimointityö jatkuu tämän opinnäytetyön jälkeen niin kauan, kunnes saostuminen kaikilla kiintoainepitoisuuksilla tapahtuu hyvin ja jäännösalumiinipitoisuudet pysyvät alhaalla.

6.2 Rikkihappo

Kuten prosessiesittelyssä kerrotaan, Hovinsaaren voimalaitoksella säädetään pesurilauhteen pH:ta kahdessa paikassa. Ensimmäisenä savukaasupesurin pH:n säätöpiiri pitää pesuliuoksen pH:n neutraalina, jotta ehkäistään korroosiota. Säätöpiirin asetusrvo automaatiojärjestelmässä on 6,7. Tähän käytetään 50 % natriumhydroksidiliuosta. Seuraavaksi esikäsitelyprosessin ensimmäisessä vaiheessa pH lasketaan haluttuun arvoon (6,3) rikkihapon avulla. Pesurissa syötetty lipeä lisää liuoksen alkaliteettia eli toimii puskurina pH:n muutoksille, jonka takia rikkihappoa kuluu esikäsitelyprosessissa tarpeettoman paljon. Lamelliselkeyttimen pH-asetusarvoa nostamalla arvosta 6.3 pystyisi säästämään rikkihappoa ja kustannuksia.

Kokeilimme muuttaa esikäsiteltävän lauhteen pH-arvoksi 6,8 nähdäksemme miten se vaikuttaa saostusprosessiin. Kappaleesta 5.4.1 voidaan todeta, että tarvittavan koagulantin määrä kiintoaineen saostamiseen nousee pH:n noustessa. Vaikka pH nousi noin 0,5 yksikköä ei se vaikuttanut merkittävästi saostusprosessiin, sillä lamelliselkeyttimen sameus ei noussut huomattavasti eikä lamellien väleihin syntynyt pakkautumia. Koejakson aikana koagulantin syöttömäärä on ollut vakio sekä käytetty sille luotua syöttökäyrää. Koejakson aikana kiintoainemäärä käsiteltävässä lauhteessa oli 100–1500 mg/l.



Kuva 14. Rikkihapon kulutuksen vähentyminen asetusrvon muutoksen jälkeen.

Kuvassa 14 nähdään historiatrendi lamelliselkeyttimeen syötetystä rikkihaposta. Vihreä kuvaa selkeyttimen pH-säädön asetusrvoa, sininen

selkeyttimen pH:n mittausarvoa ja oranssi syötetyn rikkihapon määrää yksikössä litraa tunnissa. Selkeyttimen pH:n asetuservon muutos tehtiin mustan pystyviivan kohdalla. Vaikka koagulanttia kuluu enemmän, on tämä ajotapa silti edullisempi kuin lähtötilanne, sillä rikkihappoa kuluu huomattavasti vähemmän kuin alkutilanteessa. Lisäksi vähentynyt kemikaalin kulutus tarkoittaa sitä, että kemikaalisäiliötä ei tarvitse täyttää niin usein. Rikkihappo on vahva happo ja se on erittäin syövyttävää. Rikkihapposäiliön täyttö on aina työturvallisuusriski, joten säiliön harvempi täyttö on työturvallisuuden kannalta hyvä asia.

6.3 Polymeeri

Polymeerin annostus oli tässä opinnäytetyössä hieman sivuroolissa, sillä se toimi pääpiirteittäin paremmin kuin polyalumiinikloridin annostus. Polymeerillekin luotiin samanlainen savukaasulauhteen kiintoainetta seuraava syöttökäyrä. Aluksi käyrästä tehtiin hieman eksponentiaalinen, jossa kiintoaineen ollessa 1000 mg/l polymeeriä syötettiin 1 ppm.

Kokeilujakson aikana (2–3/2023) uusi syöttökäyrä toimi yllättävän hyvin. Huomasin, että kiintoainemäärän ollessa pieni (alle 500 mg/l) polymeerin syöttö olisi liian pieni. Suurissa kiintoainemäärissä (yli 2000 mg/l) sen sijaan polymeeriä syötettäisi liikaa. Oikea polymeerin syöttömäärä olisi alueella 1000–1500 mg/l. Käyrää oli siis muutettava siten, että pienillä kiintoainemäärillä syötettäisiin enemmän polymeeriä ja suurilla kiintoainemäärillä sitä syötettäisiin vähemmän.

Polym.ann.flokkulaattoriin

Polymeerin annostelu flokkulaattoriin

Polymeerin konsentraatio %

Annost.määrä (vakioas.) ppm

Annost.määrä SKL kiintoainepit.mukaan:

<input type="text" value="0.00"/>	mg/l	<input type="text" value="0.00"/>	ppm
<input type="text" value="100"/>	mg/l	<input type="text" value="0.20"/>	ppm
<input type="text" value="1000"/>	mg/l	<input type="text" value="0.80"/>	ppm
<input type="text" value="2000"/>	mg/l	<input type="text" value="2.20"/>	ppm
<input type="text" value="5000"/>	mg/l	<input type="text" value="5.00"/>	ppm

Taulukon mukaan laskettu: ppm

Annost.määrän valinta

Valittu annostelumäärä ppm

Kuva 15. Polymeerin annostelu flokkulaattoriin kiintoainemäärän mukaan.

Polymeerin annostelumäärälle luotiin samanlainen kiintoainepitoisuutta seuraava laskentataulukko, joka on nähtävillä kuvassa 15. Se toimii täysin samalla tavalla kuin polyalumiinikloridille luotu taulukko. Ainut eroavaisuus laskennassa on se, että polymeerin laskennassa ei oteta huomioon sen tiheyttä.

Polymeerin syötön toimivuutta seuraamalla lauhteen kiintoainemittauksen aikana tehtävää suodattavuuden tulkintaa. Lauhteen kiintoainemäärää ja suodattavuutta voidaan helposti polymeerin määrää lauhteessa. Polymeerin määrä ei itsessään vaikuta saostusprosessiin, joten sen suhteen syötön tarkkuus ei ole niin tärkeä kuin polyalumiinikloridilla. Polymeeri sitoo saostuneita kiintoaineflokkeja yhteen, joten liian pieni syöttömäärä ei saavuta parasta mahdollista flokkulaatiota, kun taas liian suuri syöttömäärä olisi kemikaalin tuhlausta. Kuten polyalumiinikloridin kohdalla polymeerin syötön optimointia jatketaan, kunnes se saadaan halutulle tasolle.

7 TULOKSET JA POHDINTA

Työn päätavoite onnistui osittain. Kummallekin saostuskemikaalille onnistuttiin luomaan savukaasulauhteen kiintoainepitoisuutta seuraava annostelukäyrä. Annostelukäyrät ovat täysin toimivia ja ovat voimalaitoskäyttäjien käytössä. Molempien kemikaalien syöttökäyrien optimointi jäi vielä kesken, sillä se on aikaa vievää työtä. Täydellisen kemikaaliannostelun luominen on tällä hetkellä erittäin vaikeaa jatkuvasti muuttuvan polttoaineseoksen takia. Polttoaineseoksen muutoksien takia lauhteen kiintoainepitoisuus muuttuu jatkuvasti, joten yksinkertaisia askelvastekokeen tapaisia kemikaalin annostelun muutoksia on vaikea tehdä. Lisäksi jäännösalmiiniipitoisuuden väärä analyysimenetelmä mitätöi osan datasta. Kuvassa 16 on nähtävissä lamelliselkeytin, kun kemikaalien annostelukäyrät on otettu käyttöön.



Kuva 16. Lamelliselkeytin optimoinnin jälkeen.

Kemikaalien annostuksen optimointiin löytyi muutama syy-seuraus-suhde ja havainto, joita kannattaa ottaa huomioon annostuksien tulevassa säädössä:

- Tulevan savukaasulauhteen kiintoainemäärän ja esikäsitellyn lauhteen jäännösalmiiniipitoisuuden seuranta. Jäännösalmiinin tavoitearvo on 0,2 mg/l. Laboratorioanalyysien perusteella pystytään säätämään polyalumiinikloridin annostusta suuremmaksi tai pienemmäksi

kyseisellä kiintoainemäärällä sen perusteella onko jäännösalmiinin arvo suurempi vai pienempi kuin tavoitearvo.

- Sameuden DCS-mittauksien erotuksen seuranta flokkulaattorin ja lamelliselkeyttimen välillä. Jos mittauksien välinen ero on hyvin pieni tarkoittaa se sitä, että saostuminen ei tapahdu tehokkaasti. Lamelliselkeyttimessä olevan savukaasulauhteen sameus olisi saatava mahdollisimman pieneksi. Lisäksi saostuksen toimivuutta pystyy tulkitsemaan visuaalisesti lamelliselkeyttimeltä.
- Lamelliselkeyttimen pH tulisi pitää mahdollisimman tasaisena, sillä pH:n muutokset vaikuttavat koagulantin kulutukseen. Kemikaalien annostuslaskenta ei ota huomioon lamelliselkeyttimen pH:ta, joten se ei toimi oikein, jos pH heiluu paljon.
- Savukaasulauhteen kiintoainemäärän ja polymeerin määrän seuranta. Vesianalyysjä tehtäessä kiintoaineen suodatuksen yhteydessä tehtävä silmämääräinen lauhteen suodattavuus kertoo polymeerin määrän lauhteessa. Polymeerin määrä pyritään pitämään kohtalaisella tasolla, jolloin lauhde suodattuu suodatinpaperin läpi muutamassa sekunnissa. Polymeerin annostusta kyseisellä kiintoainemäärällä voidaan säätää suuremmaksi, jos lauhde suodattuu hyvin tai pienemmäksi jos lauhde suodattuu huonosti.
- Vertailtuani lauhteen kiintoainemäärän laboratoriomittausta ja DCS-laskentaa totesin, että laskenta pitää pääosin paikkaansa. Kiintoainemäärän ja kemikaalin syötön välille ei tarvitse tehdä minkäänlaista korjauskerrointa.

Lamelliselkeyttimen pH:n asetusarvon nosto arvosta 6.3 arvoon 6.8 on toistaiseksi toiminut hyvin. Vaikka teoriassa koagulantin kulutus nousee pH:n noustessa, on saostusprosessi toiminut silti moitteettomasti. Vaikka polyalumiinikloridia kuluisi enemmän, on silti järkevämpää ajaa esikäsitteilyprosessia korkeammassa pH:ssa, sillä rikkihappoa kuluu huomattavasti vähemmän pH:n säätöön. Jatkossa voisi miettiä enemmän, mikä olisi kaikista optimaalisin pH saostumisen kannalta ja löytää tasapaino kustannustehokkuuden ja prosessin toimivuuden väliltä.

Jäännösalmiinipitoisuuksia tutkiessani huomasin, että analysoitavan lauhteen pH:n ollessa matala jäännösalmiinipitoisuudet olivat korkealla. Luulin aluksi, ettei saostus ei toimi matalassa pH:ssa, mutta kävikin ilmi, että spektrofotometrin alumiinia mittaavan reagenssiliuoksen toiminta-alue pH:lle on 2,5–3,5. Jäännösalmiinia on mitattu oikean menetelmän mukaan maaliskuun puolesta välistä lähtien.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Kotkan Energia Oy ja sen tarkoituksena oli selvittää keinoja savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin parantamiseksi. Aihe oli ajankohtainen, sillä esikäsitteilyprosessi ei toiminut toivotulla tavalla Hovinsaaren voimalaitoksen polttoaineseoksen vaihdellessa suuresti polttoaineen saatavuusongelmien takia. Polttoainepula johtui Ukrainan sodasta.

Teorianosuudessa tutustutaan jätevedenpuhdistuksen teoriaan. Aihe oli minulle uusi ja se vaati paljon itseopiskelua. Erityisesti työn teoriaosuudessa perehdytään kemialliseen saostukseen ja sen kahteen osaan, koagulaatioon ja flokkulaatioon. Lisäksi esitellään saostuksessa käytettävät kemikaalit polyalumiinikloridi ja polymeeri. Lopuksi tutustutaan voimalaitoksella tehtäviin vesianalyysihin, joita käytetään työn kokeellisessa osuudessa.

Työn kokeellisen osuuden tarkoitus oli optimoida savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin kemikaalien syötöt. Kummallekin saostuskemikaalille luotiin uudet, savukaasulauhteen kiintoainemäärää seuraavat kemikaaliannostelut kiinteiden syöttömäärien sijaan. Kiintoainetta seuraava kemikaalien annostelu mahdollistaa optimaalisen saostuksen myös muuttavalla savukaasulauhteen kiintoainemäärällä. Lisäksi selvitettiin keinoja, joilla kemikaalien annostelua voidaan optimoida niin, että kemikaalia syötetään juuri oikea määrä. Lopuksi tutkittiin vielä pH:n vaikutusta saostusprosessiin.

Työn tuloksena saatiin selvitys kemiallisen saostuksen kemikaalien optimoinnissa. Tulos on hyvä lähtökohta prosessin tarkemmalle optimoinnille. Jokaisen kemikaalin kulusta on pystytty vähentämään. Varsinkin rikkihapon kulutus käsiteltävän lauhteen pH-säädössä on vähentynyt paljon. Opinnäytetyön tuloksena lisättiin savukaasulauhteen esikäsitteilyprosessin käytettävyyttä sekä pienennettiin prosessin kustannuksia.

LÄHTEET

Bratby, J. 2016. Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment. 3. painos. London. IWA Publishing.

Flootech Oy. 2019. Savukaasulauhteen käsittelylaitos. Käyttö- ja Huolto-ohjeet. Kotkan Energia Oy.

Fonderiest verkkosivut. Measuring Turbidity, TSS and Water Clarity. Saatavissa: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/turbidity-sensors-meters-and-methods/#TurbidMM18> [viitattu 1.2.2023]

Fransas, T. 2023. Prosessi-insinööri. Keskusteluja. Kotkan Energia Oy.

Grönmark verkkosivut. Kaasupesurit. <https://www.gronmark.fi/> [viitattu 1.2.2023]

HACH-verkkosivut. DR3900 spektrofotometri. Saatavissa: <https://www.hach.com/p-dr3900-laboratory-vis-spectrophotometer-with-rfid-technology/LPV440.99.00012> [viitattu 13.3.2023]

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uusittu painos. Helsinki: Edita, Opetushallitus.

Huoltovarmuusorganisaatio. 2020. Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen Suomen vesihuollossa. Kansallinen selvitys lyhyen ja pitkän aikavälin vaihtoehtoista. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.vvy.fi/site/assets/files/3226/kemiallisen_saostuksen_huoltovarmuuden_parantaminen.pdf [viitattu 11.2.2023]

Kemira Oyj. 2022. Käyttöturvallisuustiedote. KEMIRA PAX-XL 100.

Kemira Oyj. 2021. Käyttöturvallisuustiedote. KEMIRA SUPERFLOC A-100.

Leppisaari, J. 2017. Koagulaation ja flokkulaation optimointi teollisuuden pesujäteveden käsittelyssä. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25063/Leppisaari.pdf?sequence=4> [viitattu 22.1.2023]

Minnesota Rural Water Association (MRWA). 2020. Minnesota Water Works Manual. Chapter 12: Coagulation. 5. painos. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mrwa.com/wp-content/uploads/2021/04/12-Coagulation.pdf> [viitattu 13.2.2023]

Montonen. I. 2019. Selkeytysprosessin kemikaalisyöttöjen optimointi varaustilan ja zetapotentialin avulla. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160483/lida_Montonen_diplomity%C3%B6.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 1.4.2023]

Morris, J. & Knocke, W. 1984. Temperature Effects on the Use of Metal-Ion Coagulants for Water Treatment, Abstract (American Water Works Association). Saatavissa:

<https://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/j.1551-8833.1984.tb05302.x> [viitattu 11.2.2023]

Rantanen, A. & Tuominiemi, S. 2003. Kotkan Energia Oy. Savukaasujen lauhdutuslaitos. Koulutusaineisto. Aker Kvaerner

Rissanen, V. 2016. Savukaasupesurilauhteen lämmön hyötykäyttö vanajan voimalaitoksella. Lapeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa:

https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/125614/Diplomityo_Rissanen_Ville-Matti.pdf?sequence=2 [viitattu 12.4.2023]

Stumm, W & O'Melia, C. 1968. Stoichiometry of Coagulation. Viitattu J. Bratbyn julkaisussa. [viitattu 11.2.2023]

Suopajärvi, T. 2015. Functionalized Nanocelluloses in Wastewater Treatment Applications. Oulun yliopisto. Tutkielma. PDF-dokumentti. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/275634703_Functionalized_Nanocelluloses_in_Wastewater_Treatment_Applications [viitattu 13.2.2023]

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Julkaisu. PDF-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf> [viitattu 13.3.2023]

Vesi.fi -verkkosivut. Sanasto. Raakavesi. Saatavissa:

<https://www.vesi.fi/sanasto/raakavesi/> [viitattu 1.4.2023]

Woodside, J. 2022. Understanding Turbidity, TDS, and TSS. Blogi. Päivitetty 13.5.2022. Saatavissa:

<https://www.ysi.com/ysi-blog/water-blogged-blog/2022/05/understanding-turbidity-tds-and-tss> [viitattu 22.1.2023]

Yrjölä, H. 2023. Laborantti. Keskusteluja. Kotkan Energia Oy.

Zeta Potential: A Complete Course in 5 Minutes. PDF-dokumentti. Zeta-meter, Inc. Saatavissa: <http://www.zeta-meter.com/5min.pdf> [viitattu 7.2.2023]

Kuvaluettelo

Kuva 1. Esikäsittelyprosessin Valmet DNA -kuva.

Kuva 2. Kaksivaiheisen savukaasupesurin toimintaperiaate. (Rissanen 2016)

Kuva 3. Hiekkasuodatin.

Kuva 4. Nefelometrinen sameuden mittaus. (www.fonderiest.com)

Kuva 5. Visuaalinen malli sähköisestä kaksoiskerroksesta. (Zeta Potential)

Kuva 6. Esimerkki zetapotentialin käytöstä koagulantin annosteluun. (Zeta Potential)

Kuva 7. Koagulaation ja flokkulaation toimintamekanismit. (Suopajarvi 2015)

Kuva 8. Kolloidikonsentraation vaikutus koagulantin syöttöön, pH 4–5. (Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968)

Kuva 9. pH:n vaikutus koagulaatioon. (Bratby 2016; Stumm & O'Melia 1968)

Kuva 10. Kiintoainetta pakkautuneena selkeytysaltaan lamellien väleihin.

Kuva 11. HACH DR3900 spektrofotometri ja reagenssiputkia. (www.hach.com)

Kuva 12. Kiintoaineen vesianalyysin ja DCS-laskennan vertailu.

Kuva 13. Polyalumiinikloridin annostelu flokkulaattoriin kiintoainemäärän mukaan.

Kuva 14. Rikkihapon kulutuksen vähentyminen asetusarvon muutoksen jälkeen.

Kuva 15. Polymeerin annostelu flokkulaattoriin kiintoainemäärän mukaan.

Kuva 16. Lamelliselkeytin optimoinnin jälkeen.

Polttotaseraportti 01.09.2022-31.03.2023 (Hovinsaari)

Aine	m3	Netto (t)	%-osuus
Käyttöpaikka: Hovinsaari	956875	102815,605	100 %
Aineryhmä: 21 Turve	118344	37503,660	36,48 %
Jyrsinturve (14.10.10)	118344	37503,660	36,48 %
Aineryhmä: 111 Kaasut	591446	439,445	0,43 %
Maakaasu (131)	591446	439,445	0,43 %
Aineryhmä: 311 Metsäpolttoaine, puu	149987	40282,100	39,18 %
Rankahake, pienpuu 100 % (21.10.21.2)	68175	16938,700	16,47 %
Kokopuuhake, pienpuu 100 % (21.10.21.1)	8744	2561,200	2,49 %
Kokopuuhake pienpuu (Yhdyskunta) (21.10.21.4)	13143	3413,880	3,32 %
Kantomurske (21.10.40)	800	195,640	0,19 %
Metsätähdehake tai -murske (Yhdyskunta) (21.10.30.5)	4402	970,700	0,94 %
Metsätähdehake tai -murske (21.10.30)	54723	16201,980	15,76 %
Aineryhmä: 312 Teollisuuden puutähde	31427	10264,640	9,98 %
Erittelemätön teollisuuden puutähde (21.20.80)	8029	2975,260	2,89 %
Sahanpuru (21.20.20)	14876	4280,020	4,16 %
Kuori (21.20.10)	8522	3009,360	2,93 %
Aineryhmä: 315 Kierrätyspuu	44259	7259,992	7,06 %
Kierrätyspuumurske (A, B) (21.50.10.1)	44259	7259,992	7,06 %
Aineryhmä: 323 Sekapolttoaineet	21412	7065,768	6,87 %
SRF 1 (31.10.10.1)	21412	7065,768	6,87 %
Yhteensä	956875	102815,605	100 %

Polttotaseraportti 01.09.2021-31.03.2022 (Hovinsaari)

Aine	m3	Netto (t)	%-osuus
Käyttöpaikka: Hovinsaari	2517045	122190,223	100 %
Aineryhmä: 21 Turve	62044	21189,550	17,34 %
Jyrsinturve (14.10.10)	62044	21189,550	17,34 %
Aineryhmä: 111 Kaasut	2097002	1558,073	1,28 %
Maakaasu (131)	2097002	1558,073	1,28 %
Aineryhmä: 311 Metsäpolttoaine, puu	132295	35660,140	29,18 %
Kokopuuhake, pienpuu 100 % (21.10.21.1)	575	164,140	0,13 %
Metsätähdehake tai -murske (21.10.30)	57208	16596,980	13,58 %
Kantomurske (21.10.40)	350	83,100	0,07 %
Rankahake, pienpuu 100 % (21.10.21.2)	74162	18815,920	15,40 %
Aineryhmä: 312 Teollisuuden puutähde	147894	46121,450	37,75 %
Kuori (21.20.10)	126177	42539,520	34,81 %
Sahanpuru (21.20.20)	21717	3581,930	2,93 %
Aineryhmä: 315 Kierrätyspuu	59022	12441,791	10,18 %
Kierrätyspuumurske (A, B) (21.50.10.1)	59022	12441,791	10,18 %
Aineryhmä: 323 Sekapolttoaineet	18788	5219,219	4,27 %
SRF 1 (31.10.10.1)	18788	5219,219	4,27 %
Yhteensä	2517045	122190,223	100 %

