



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Mikko Ylenius

# Elektrokoagulaatiolaitteiston kehitys osaksi jätevesienkäsittelyprosessia

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

11.5.2020

Tekijä Otsikko	Mikko Ylenius Elektrokoagulaatiolaitteiston kehitys osaksi jätevesienkäsittelyprosessia
Sivumäärä Aika	35 sivua + 1 liite 11.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	materiaali- ja pinnoitetekniikka
Ohjaajat	lehtori Arto Yli-Pentti TkT Ville Kuokkanen
<p>Tämän insinööriyön päätarkoituksena oli selvittää elektrokoagulaatio (EC) -menetelmän potentiaaliset vaikutukset Kierto Ympäristöpalvelut Oy:n (KYP) Järvenpään toimipisteen viemäritävään veteen, arvioida muodostuvan kiintoaineen määrää ja suunnitella tapa sen erottamiseen käsittelystä vedestä sekä arvioida menetelmän käyttöönoton kannattavuutta käsittelytehon ja -kustannusten pohjalta. Työn edetessä tavoitteeksi muodostui myös pilottilaitteiston kehitys ja rakentaminen sekä teollisuusmittakaavan laitteiston alustava suunnittelu.</p> <p>Työ suoritettiin kahdessa vaiheessa, teoreettiseen tietoon pohjautuvilla käytännön kokeilla. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin menetelmän soveltuvuutta KYP:n viemäritävään veteen käyttämällä laboratoriomittakaavan laitteistoa KYP:n jätteenkäsittelyprosesseissa muodostuvan veden käsittelyyn. Testauksen perusteella todettiin, että EC-käsittely oli tehostanut kiintoaineen suodattumista pelkkään suodatukseen verrattuna, joten työssä edettiin seuraavaan vaiheeseen.</p> <p>Työn toisessa vaiheessa rakennettiin pilottimittakaavan EC-laitteisto, jonka toimivuutta tutkittiin käsittelemällä noin 1 m<sup>3</sup>:n erää KYP:n prosessivettä ja arvioimalla laitteiston tukkeutumisherkkyyttä, sekä kiintoaineen kulkeutumista järjestelmässä. Laitteistolla suoritettiin myös koeajoja, joiden perusteella arvioitiin käytettävän sähkövirran suuruuden vaikutusta käsiteltävään jäteveeteen.</p> <p>Menetelmä todettiin melko tehokkaaksi erityisesti kolloidisen kiintoaineen ja fosfaattien vähentämiseksi KYP:n prosessivedestä, ja sen käyttöönotto tuotantomittakaavassa saattaa olla kannattavaa, mikäli laitteiston hankintakulut pystytään pitämään alhaisina. Tehtyjen kokeiden perusteella laitteistossa havaittiin useita kehityskohtia, jotka tulee ottaa huomioon ennen siirrettävän pilottilaitteen tai tuotantomittakaavaan sopivan laitteen rakentamista. Käsittelyn aikana muodostuvan kiintoaineen määrä vaihtelee runsaasti eri prosessivesierien välillä, joten realistisen kokonaiskuvan saaminen muodostuvan kiintoaineen määrästä vaatii runsaasti lisäkokeita päivittäisistä näytteistä realistisen keskiarvon muodostamiseksi.</p>	
Avainsanat	teollisen jäteveden käsittely, elektrokoagulaatio, laitteiston kehitys

Author Title Number of Pages Date	Mikko Ylenius Development of an Electrocoagulation Unit Into a Part of Wastewater Treatment Process 35 pages + an appendix 11 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Materials and Surface Engineering
Instructors	lecturer Arto Yli-Pentti D. Sc. (Tech.) Ville Kuokkanen
<p>The main objectives of this engineering thesis were to determine the potential effects of the Electrocoagulation (EC) process to the sewage water produced by Kierto Ympäristöpalvelut Oy (KYP) at their hazardous waste treatment facility in Järvenpää, to estimate the amount of solid material formed in the process while designing a way to separate it from the treated water and to assess the profitability of the implementation of the method on the basis of treatment efficiency and costs. As the thesis project progressed, the pre-design of an industrial-scale continuous EC reactor became an additional objective that was achieved with a pilot scale model.</p> <p>The thesis project was conducted in two stages, utilizing practical experiments based on theoretical knowledge. The first stage of the project was to examine the suitability of the method for the treatment of KYP's process water using laboratory-scale equipment to treat small samples of water from the waste treatment process. The results from the first stage of testing indicated that electrocoagulation treatment had improved the filtration of suspended solids compared to the reference samples; thus, the project proceeded to the next stage.</p> <p>In the second stage of the project, a pilot-scale EC system was built and its functionality was tested by treating approximately 1 m<sup>3</sup> batches of KYP process water and by assessing the clogging sensitivity of the equipment, as well as the flow of solid particles through the system. Testing the model also included test runs to assess the impact of the amount of electric current on the wastewater to be treated.</p> <p>The method was found to be effective, in reducing colloidal solids and phosphates from KYP process water and its implementation on a production scale may be profitable if the purchase costs of the equipment can be kept low. During the experiment conducted, several development points were identified in the equipment, which should be considered before the construction of a mobile pilot device or especially a production scale model. The amount of solid material generated during treatment varied widely between different batches of process water; thus, obtaining a realistic overall picture of the amount of the generated solids requires multiple additional tests on daily samples to form a realistic average.</p>	
Keywords	Industrial wastewater treatment, electrocoagulation, equipment development

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teoriaa elektrokoagulaatiosta	2
2.1	Elektrokoagulaatio	2
2.2	Laitteiston suunnittelu ja mitoitus	6
3	Kokeellisen työn tavoitteet	10
4	Käytetyt menetelmät ja laitteistot	11
4.1	Laboratoriossa käytetty panostoiminen EC-laitteisto	11
4.2	Jatkuvatoimisen EC-laitteiston pilottimalli	13
5	Työn suoritus ja tulosten arviointi	16
5.1	Menetelmän soveltuvuuden arviointi	16
5.2	Jatkuvatoimisen pilottimittakaavaan EC-laitteiston testaus	18
5.3	Tulosten arviointi	23
6	Pohdintaa	26
6.1	Parannukset laitteistoon	26
6.2	Kustannukset	29
6.3	Johtopäätökset	32
	Lähteet	33

Liite 1. Panostoimisella laitteistolla tuotettujen vesinäytteiden raskasmetallianalyysin tulokset

## Lyhenteet ja käsitteet

BOD7	<i>Biological oxygen demand</i> . Kuvaa happimäärää, joka kuluu nestemäärässä biologiseen toimintaan seitsemän päivän aikana. [mg/l]
EC	<i>Electrocoagulation</i> . Elektrokoagulaatio
Flotaatio	Kiintoaineen erottuminen nesteen pintaan tiheyseron tai esimerkiksi kuplituksen kautta.
Koagulantti	Kemikaali tai ioni, joka aiheuttaa suspendoituneiden tai kolloidisten aineiden ja joidenkin liuenneiden ionien ja yhdisteiden erottumisen.
Kolloidi	Kolloidiseen seokseen on sekoittunut hiukkasia, joiden partikkelikoko on niin pieni (1–1000 nm), että ne pysyvät suspendoituneena pitkään ja ne usein läpäisevät suodattimet.
Kompleksi	Molekyyli, joka on muodostunut keskuksena toimivasta atomista tai ionista ja sitä ympäröivistä ligandeina toimivista molekyyleistä, atomeista tai ioneista.
KYP	Kierto Ympäristöpalvelut Oy
Laminaarinen virtaus	Tasainen virtaus, jossa hiukkasten liikeradat eivät sekoitu keskenään.
Turbulentti virtaus	Pyörteinen virtaus, jossa hiukkasten liikeradat sekoittuvat keskenään.
TOC	<i>Total Organic Carbon</i> . Orgaaninen kokonaishiili [mg/l]
TSS	<i>Total suspended solids</i> . Liuokseen suspendoituneen kiintoaineen kokonaismäärä [mg/l]

## 1 Johdanto

Teollisuuden eri prosesseissa syntyy suuria määriä nestemäisiä vaarallisia jätteitä, jotka sisältävät ravinteita kuten fosforia ja typpeä sekä raskasmetalleja, kuten nikkeliä, sinkkiä ja kuparia sekä muita vaarallisia yhdisteitä. Jätteiden käsittelyyn käytetään yleisesti useita eri kemiallisia, biologisia ja mekaanisia prosesseja. Raskasmetallien hydroksidisaostus pH:ta säätämällä ja lisäämällä rauta- ja alumiinisuoloja sisältäviä saostuskemikaaleja on suosittu tapa käsitellä teollisuuden jätevesiä [1]. Kierto Ympäristöpalvelut Oy (KYP) käyttää kemiallista saostusta eri teollisuudenalojen vaarallisten jätteiden käsittelyyn. Käsittelyssä muodostuvaan prosessiveden saattaa kuitenkin ajoittain jäädä korkeita ravinne- ja kiintoainepitoisuuksia, jotka rasittavat viemäroitynä kunnallisia jätevedenkäsittelylaitoksia ja viemäriverkostoa, sekä aiheuttavat yritykselle kuluja korkeiden prosessiveden viemärointikulujen muodossa. Tällä hetkellä suodatuksen jälkeen saostuvia kiintoaineita hallitaan suodattamalla kemiallisilla hapettimilla käsitelty prosessivesi uudelleen kammiosuotopuristimella ennen viemärointiä. Jos prosessissa pääsee raskasmetallijäämiä laitoksen märkähapetusaltaaseen, koko altaan sisältö ohjataan takaisin reaktoriin, jossa panos käsitellään uudelleen.

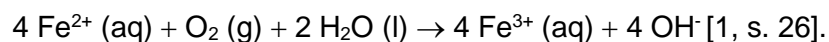
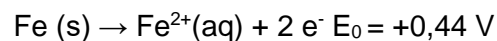
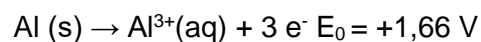
Tämän insinööriyön päätarkoitus oli vahvistaa menetelmän sopivuus KYP:n prosessivesiin ja suunnitella elektrokoagulaatioon (EC) perustuva, jatkuvatoiminen pilottilaitteisto, jonka avulla voidaan suunnitella tuotantomittakaavan laitteisto vaarallisten jätteiden käsittelyssä syntyvien prosessivesien laadun parantamiseksi, erityisesti ravinne- ja kiintoainepitoisuuksien suhteen sekä korkeana hapenkulutuksena ilmenevien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksien vähentämiseksi. Laitteiston odotettiin parantavan jäteveden laatua myös mahdollisten raskasmetallijäämien osalta. Työ toteutettiin yhdistämällä käytännön kokeita ja kirjallisista tutkimuksista saatua tietoa EC-menetelmästä ja laitteistojen suunnittelusta.

Työn aluksi käydään lyhyesti läpi teoriaa EC:stä menetelmänä, sekä EC-laitteistojen suunnitteluun ja mitoitukseen liittyviä huomion arvoisia asioita. Teoriaosuuden jälkeen esitellään työssä käytetyt laitteistot ja menetelmät sekä työn käytännön osuuden suoritus. Lopuksi tarkastellaan työn tuloksia ja esitetään niiden pohjalta tehdyt johtopäätökset.

## 2 Teoriaa elektrokoagulaatiosta

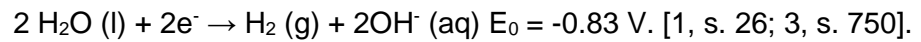
### 2.1 Elektrokoagulaatio

Elektrokoagulaatio on sähkökemiallinen vesien ja jätevesien käsittelymenetelmä, jossa käsiteltävään liuokseen liuotetaan sähkökemiallisesti metalli-ioneja johtamalla tasavirtaa elektrolyytinä toimivassa puhdistettavassa vedessä tai jätevedessä olevien elektrodien läpi. Menetelmässä käytetään tyypillisesti anodimateriaalina rautaa tai alumiinia niiden halvan hinnan, hyvän saatavuuden ja turvallisuuden vuoksi. Saostusmetallina voidaan käyttää muitakin metalleja, kuten magnesiumia, mutta tämä ei ole kuitenkaan tyypillistä. Katodimateriaalina voidaan käyttää anodin kanssa samaa materiaalia, mutta se ei kuitenkaan ole välttämätöntä. Tässä työssä käytettiin alumiinianodin parina rautakatodia ja päin vastoin; myös inerttien katodien käyttö on mahdollista. [1, s. 25.] EC-prosessin toiminta perustuu useisiin eri fysikaalisiin ja kemiallisiin reaktioihin. Keskeisimpänä reaktiona anodina käytetty metalli hapettuu ja liukenee käsiteltävään liuokseen alla olevien osareaktioiden esittämällä tavoilla. Käytännössä rauta liukenee pääasiassa vain kahdenarvoisena, mutta se voi hapettua kolmenarvoiseksi, mikäli veden happipitoisuus on riittävä.



Liuokseen lisättävä metalli sekä hydrolysoituu että polymerisoituu ja saa siten aikaan veden puhdistumista koagulaatiolla eli tekemällä vesiliuoksen sisältämiä negatiivisesti varautuneita vakaita kolloidisia haitta-ainepartikkeleita epävakaisiksi. Tämä mahdollistaa sen, että hiukkaset, jotka eivät muuten voisi lähestyä toisiaan hylkivien samanmerkkisten varaustensa vaikutuksesta, voivat nyt kerääntyä yhteen suuremmiksi partikkeleiksi. Vakauden muuttuminen voi tapahtua muun muassa neutraloimalla haitta-ainepartikkelien pintavarauksen vastakkaismerkkisten ionien adsorboituessa partikkelien pintaan, sekä kun anodilta liuennut metalli muodostaa liuoksen anionien kanssa helposti erotettavia niukkaliukoisia yhdisteitä, kuten metallihydroksideja eli käytännössä flokiksi kutsuttavaa sakkaa. [1, s. 22; 2.] EC-prosessin kokonaisuuden kannalta toinen keskeinen reaktio on

katodireaktio, jossa tapahtuu vesimolekyylin hajoaminen flotaatiota aikaan saavaksi vetykaasuksi (H<sub>2</sub>) ja hydroksidi-ioneiksi (OH<sup>-</sup>) alla olevan yhtälön mukaisesti:

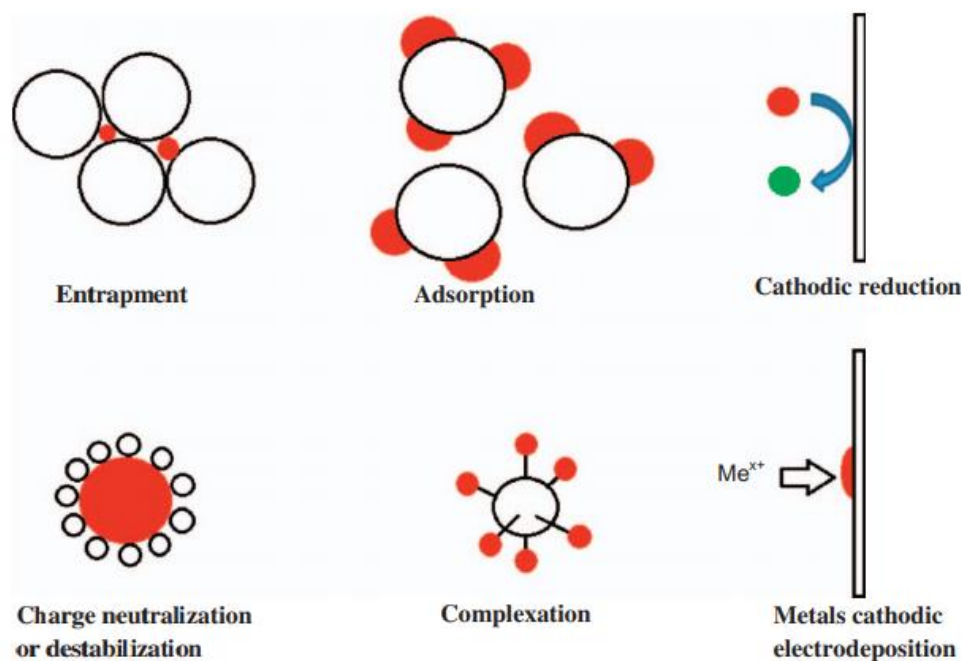


Hydroksidi-ionit pystyvät muodostamaan liuoksesta poistettavien raskasmetalli-ionien ja liuokseen liuottamalla lisättävien metalli-ionien kanssa niukkaliukoisia metallihydroksideja. Katodilla syntyvä vetykaasu puhdistaa myös omalta osaltaan käsiteltävää vettä floataation avulla, kantaen muodostuvaa kiintoainetta ja helposti haihtuvia epäpuhtauksia nesteen pintaan. [4, s. 2.]



Muodostuvat hydroksidit kiinnittyvät erilaisiin epäpuhtauksiin, esimerkiksi adsorptioon ja kompleksoitumisen kautta, jolloin saostunut alumiini- tai rautahydroksidi toimii keskukseksi ja raskasmetallit tai liuoksessa olevat orgaaniset yhdisteet ligandeina. Muita tapoja, joilla EC erottelee epäpuhtauksia liuoksista, ovat esimerkiksi metalli-ionien pelkistyminen katodin pintaan sivureaktiona tai epäpuhtauksien jääminen loukkuun ja kulkeutuminen erotettavan kiintoaineen mukana (kuva 1). [6, s. 270]. Prosessissa muodostuvan kiintoaineen erottaminen vedestä voidaan toteuttaa esimerkiksi laskeuttamalla, suodattamalla tai flotaatiolla.

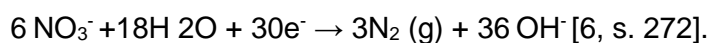
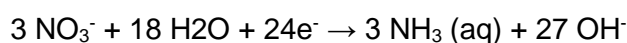




Kuva 1. Tärkeimpiä epäpuhtauksien poistomekanismeja EC:ssä [6, s. 271].

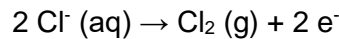
EC-menetelmän on todettu saostavan metallisia epäpuhtauksia tehokkaasti useissa tutkimuksissa. Eri tutkimuksissa on saatu useimmille metalleille jopa lähes 100 %:n reduktioita. Näissä tutkimuksissa on käytetty näytteinä sekä laboratoriossa valmistettuja synteettisiä näytteitä että teollisuudessa muodostuvia jätevesiä. Hyvä metallinpoistotehokkuus on saavutettu useilla lähtöpitoisuuksilla laajalla pH-alueella sekä happamissa että emäksisissä oloissa. [6, s. 280–282.]

EC:n on esitetty sivureaktiossa hajottavan ja poistavan tyyppiyhdisteitä liuoksista seuraavien mekanismien kautta:

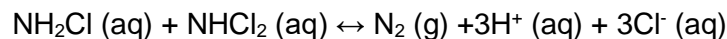
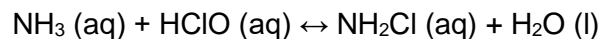


Reaktiossa muodostuva ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) on syövyttävä ja limakalvoja ärsyttävä ilmaa kevyempi kaasu [7]. Se on liukoinen veteen alhaisessa pH:ssa ja lämpötilassa. Kuitenkin lämpötilan ja liuoksen pH:n noustessa  $\text{NH}_3$  muuttuu niukkaliukoiseksi ja kaasuuntuu [8,

s. 483]. EC:n myös esitetään aiheuttavan liuoksessa olevien kloridi-ionien (Cl<sup>-</sup>) hapettumista kloorikaasuksi (Cl<sub>2</sub>). Kloori on kaasuna myrkyllistä, ilmaa raskaampaa ja sen vesiliuos syövyttää useimpia metalleja, kuten terästä [9]. Veteen liunneen kloorikaasun kuitenkin esitetään pelkistyvän kloridi-ioneiksi ja hypokloriittihapokkeeksi (HClO), joka muodostaa liuetessaan hypokloriitti-ioneja (ClO<sup>-</sup>). Liuoksen pH vaikuttaa vapautuvien hypokloriitti-ionien määrään siten, että emäksisissä liuoksissa vapautuu eniten hypokloriittia ja pH-arvon 9 yläpuolella hypokloriitin osuus on lähes 100 % [10, s. 2].



Hypokloriittihapoke ja hypokloriitti ovat tehokkaita desinfiointiin käytettyjä hapettimia. Hypokloriittihapokkeen desinfiointiteho on kuitenkin suurempi kuin hypokloriitin. Ammoniumionien ja ammoniakkin läsnä ollessa saattaa muodostua myös kloramiineja (NH<sub>2</sub>Cl, NHCl<sub>2</sub>, NCl<sub>3</sub>), joita käytetään veden desinfiointiin myös kunnallisessa vedenkäsittelyssä.



Kloramiinien muodostuminen on vedenpuhdistuksen kannalta edullista myös typenpoiston osalta niiden desinfiointivaikutuksen lisäksi, sillä kloramiinit hapettuvat typpikaasuksi, kun liuoksessa on riittävästi klooria ammoniikkiin verrattuna. [11. s. 5–7.]

Kaikkia EC:hen liittyviä toimintamekanismeja tai siinä tapahtuvia mahdollisia sivureaktioita ei kuitenkaan vielä täysin ymmärretä, ja käsiteltävän veden yksilöllinen koostumus voi vaikuttaa niihin suuresti [6, s. 270.] Tämän insinööriyön ohessa on tarkoitus selvittää, miten prosessissa teoriassa tapahtuvat sivureaktiot vaikuttavat käytännössä prosessin toimintaan ja täytyykö ne huomioida prosessia skaalatessa. Mahdolliset löydökset tulee myös huomioida vastaisuudessa, jos KYP alkaa toimittamaan EC-laitteistoja asiakkaille.

Taulukossa 1. on esitetty menetelmän teoretisoituja ja vahvistettuja ominaisuuksia, joihin kiinnitetään huomiota työn edetessä.

Taulukko 1. EC-menetelmän vahvuuksia ja heikkouksia

Vahvuus	Heikkous
Tehokkaampi orgaanisen aineksen erotelussa kuin kemialliset menetelmät [6, s. 269].	Elektrodeille saattaa muodostua ajon aikana heikosti sähköä johtava kerros, joka häiritsee prosessin toimintaa [6, s. 269].
Käsiteltävän liuoksen pH:n säätö on tarpeellista vain ääritapauksissa. Lisäksi EC tyypillisesti neutraloi käsiteltävää liuosta. [12, s. 91].	Käsiteltyyn veteen voi jäädä korkea alumiini- tai rautapitoisuus [6, s. 269].
Liuokseen ei lisätä anioneja, kuten kloridia tai sulfaattia, jotka nostavat muodostuvan sakan liukoisen kiintoaineen pitoisuutta [6, s. 269].	Anodit kuluvat, ja ne joudutaan vaihtamaan ajoittain [6, s. 269].
Pelkkiä kationeja lisättäessä riittää pienempi annostus kuin kemiallisessa saostuksessa, jolloin saostuvan materiaalin määrä vähenee [6, s. 269].	Käsitelty kirkas vesi saattaa samentua käsittelyn jälkeen metallien jälkisaostumisen takia. Tätä voi tapahtua sekä alumiinilla että raudalla, muttei välttämättä molemmilla samassa matriisissa. [13]
Pienuhko laitteistokoko suhteessa käsittelykapasiteettiin, hyvä skaalautuvuus [1, s. 32].	Vedessä täytyy olla riittävä sähkönjohtavuus. Luonnon vesiin saattaa joutua lisäämään klorideja. [1, s. 33; 14, s. 32].
Alhaiset käyttökulut [15, s. 347].	Korkea jännite nostaa energian kulutusta [12, s. 89].

Menetelmän heikkoudet on otettava huomioon erityisesti jatkuvatoimista laitteistoa suunniteltaessa. Esimerkiksi elektrodien vaihto ja puhdistus on voitava tehdä niin, ettei koko prosessia tarvitse ajaa alas liian usein tai liian pitkäksi aikaa.

## 2.2 Laitteiston suunnittelu ja mitoitus

Laitteiston mitoitus on tehtävä jokaiselle käsiteltävälle jätevesilaadulle erikseen, sillä eri haitta-ainetyypit ja niiden pitoisuudet vaativat eri koagulanttimetalliannostuksen, eli eri käsittelyajan tai -virran. Lisäksi joissain tutkimuksissa on harvinaisissa tapauksissa havaittu eri liuosten vastaavan selkeästi paremmin eri anodimateriaaleihin [13, s. 113]. Tässä työssä laitteiston suunnittelu aloitettiin testaamalla KYP:n jäteveden EC-käsittelyä panostoisesti laboratoriomittakaavassa sopivan elektrodimateriaalin, käsittelyvirran ja -ajan löytämiseksi. Sähkövirrasta, käsittelyajasta ja tilavuudesta muodostettiin kaava (1),

jolla laskettiin sähkövaraus tilavuudessa [C/l], jota käytetään mitoitusperusteena EC-laitteistolle myöhemmässä vaiheessa tätä työtä. Jatkuvatoimisen laitteen tapauksessa käsittelyaikana käytettiin yhtä tuntia (3 600 s) ja tilavuutena vesimäärää, joka käsitellään tunnin aikana.

$$\frac{It}{V} = \text{sähkövaraus tilavuudessa} \quad (1)$$

*I on sähkövirta ampeereina*

*t on käsittelyaika sekunteina*

*V on reaktorin tilavuus litroina*

Liian korkea virransyöttö suhteessa käsiteltävään vesimäärään voi johtaa prosessin energiatehokkuuden laskemiseen ja tarpeettoman suureen muodostuvan kiintoaineen määrään. Elektrodién pinta-alan ja sähkövirran suhde on myös tärkeää huomioida laitteistoa suunnitellessa. Jos virrantiheys ei ole sopiva, anodin pinnalle saattaa kehittyä passiivinen oksidikalvo, ja prosessissa tapahtuvat sivureaktiot saattavat muuttua. Tyypillisesti korkean virrantiheyden alueella tapahtuva elektrodién passivoituminen saattaa aiheuttaa koagulanttiannostuksen vähenemisen ja oksidikerroksen muodostumisen. Tässä tapauksessa anodisessa reaktiossa alkaa muodostumaan happikaasua ja liuoksessa olevat komponentit hapettuvat. Jos vain osa anodeista passivoituu, muut anodit saattavat liueta nopeammin. Tämä ei kuitenkaan välttämättömästi tapahdu, mikäli käsiteltävässä vedessä on hapettuvia komponentteja, kuten rauta(II)-ioneja, jotka voivat hapettua kolmenarvoiseen muotoon. [16, s. 107–109.] Tässä työssä käytetyt virrantiheydet ovat välillä 55 – 500 A/m<sup>2</sup>. Alan tutkimuksissa on huomattu, että virrantiheyden ollessa 10–150 A/m<sup>2</sup> vetykaasun muodostumisnopeus sekä kuplakoko ja koagulanttina toimivan metallin syöttönopeus ovat tyypillisesti parhaimmillaan EC-käsittelyn tehokkuuden kannalta. Jätevesiä on käsitelty onnistuneesti aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa jopa virrantiheyksillä 2,5–500 A/m<sup>2</sup> [1, s. 93; 17, s. 716; 4, s. 18]. Virrantiheyden laskemiseen käytettiin kaavaa 2.

$$\frac{I}{A} = i \quad (2)$$

*I on sähkövirta ampeereina*

*A on anodin tehokas pinta – ala neliömetreinä*

*i on anodinen virrantiheys*

Reaktorin tilavuuden  $V$  [ $m^3$ ] ja elektrodien pinta-alan  $A$  [ $m^2$ ] suhde on myös hyvä ottaa huomioon sopivan koagulanttimetallin konsentraation ja riittävän pitkän kaasukuplien nousureitin takaamiseksi. Yhdessä arseenin poistoon keskittyvässä EC-kokoomajulkaisussa mainitaan sopivaksi suhteeksi  $6,5-50 m^2/m^3$ . [17, s. 716]. Suhde laskettiin kaavalla 3.

$$\frac{A}{V} = \text{pinta – alan ja tilavuuden suhde} \quad (3)$$

*A on anodin tehokas pinta – ala neliömetreinä*

*V on reaktorin tilavuus kuutiometreinä*

Tämän työn aluksi tehtiin oletus, että  $6,5-50 m^2/m^3$  on myös KYP:n jätevedelle sopiva suhde, jota voidaan käyttää testeissä. Laboratoriomittakaavan laitteistoa rakennettaessa ja testatessa kuitenkin huomattiin, että tärkein edellä mainituista kriteereistä on koagulantin annostelu.

Korkea virrantiheys sekä pieni anodipinta-ala reaktorin kokoon suhteutettuna eivät muodostaneet ongelmia lyhyissä koeajoissa, joiden välissä elektrodit pestiin. Jatkuvatoinen pilottikoon laite kuitenkin suunniteltiin niin, että virrantiheys pysyy riittävän alhaisena, ettei korkea virrantiheys aiheuttaisi anodien passivoitumista, vaikka anodeja ei joka ajon välillä pestäisikään. Laitteen monimutkaisemman rakenteen vuoksi pinta-alan ja tilavuuden suhdetta on vaikea arvioida verrattuna yksinkertaiseen panosreaktoriin.

Aiheesta tehdyissä tutkimuksissa ei ole selkeää konsensusta siitä, lasketaanko vain elektrodin sisäpuoli vai molemmat puolet tehokkaaksi pinta-alaksi EC:ssä. Tässä insinööriyössä on laskettu vain elektrodien välit tehokkaaksi pinta-alaksi, sillä käytettyjen laitteistojen elektrodien sisäpinnat ovat selvästi syöpyneemmät verrattuna ulkopintoihin, vaikka ensimmäisissä testeissä havaittiinkin vetykaasun vapautuvan elektrodin molemmiin puolin.

Yleisesti tiedetään, että jännitteeseen vaikuttaa johtimen poikkipinta-ala, materiaali, lämpötila, ja pituus. Sähkökemiallisessa kennossa voidaan ajatella elektrodilevyjen välistä elektrolyyttiä johtimena. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kennon jännite kasvaa elektrodien etäisyyden kasvaessa ja niiden pinta-alan kutistuessa. Jännitteen nousu kasvattaa laitteiston energiankulutusta. Energiansäästön kannalta elektrodien pinta-alan kannattaa olla suuri ja niiden välimatkan niin pieni kuin mahdollista. Elektrodilevyjen asettelu tulisi myös järjestää niin, että muodostuvan kiintoaineen aiheuttama tukkeumariski saadaan minimoitua ja mahdolliset muodostuvat tukokset saadaan avattua tehokkaasti ilman tarvetta keskeyttää laitoksen tuotantoa.

Anodien kulutus on tärkeää huomioida erityisesti tuotantomittakaavan laitteistoa suunniteltaessa ja sen kannattavuutta arvioidessa. Liukenevan koagulanttimetallin määrä käsiteltävää vesikuutiota kohden voidaan laskea kaavalla 4 [4, s. 18].

$$\frac{M}{Q} \times \frac{I}{zF} = m \quad (4)$$

*M on liukenevan metallin moolimassa grammoina per mooli*

*Q on reaktorin virtaama litroina sekunnissa*

*I on käsittelyvirta ampeereina*

*z on anodin liuetessa vapautuvien elektronien määrä*

*F on Faradayn vakio*

*m on liukenevan materiaalin määrä kilogrammoina per kuutiometri käsiteltyä vettä*

KYP:n tapauksessa alumiini liukenee kolmenarvoisena Al(III)-ionina ja rauta Fe(II)-ionina. Tässä insinööriyössä prosessin virtahyötysuhteen oletetaan olevan 100% mutta useissa tutkimuksissa myös on havaittu alumiinianodien liukenevan 18–32 % enemmän, kuin yhtälön 4 perusteella pitäisi [18, s. 85].

Suurille virtaamille ja pitoisuuksille tarkoitettua laitetta suunniteltaessa on otettava huomioon myös prosessissa vapautuvat kaasut, sillä vetykaasu saattaa muodostaa räjähdysalttiin seoksen ilman kanssa [19.] Vapautuvat kloori- ja ammoniakkikaasut saattavat tuottaa ongelmia niiden pitoisuuksien noustessa korkeiksi. Tässä työssä käytetyillä virrantiheyksillä prosessivesistä ei kuitenkaan havaittu normaalista poikkeavaa kaasun vapautumista. Ongelma saattaa tulla vastaan tilanteessa, jossa anodit passivoituvat liian suuren virrantiheyden takia, jolloin liukoiset kloridi-ionit alkavat hapettumaan.

### 3 Kokeellisen työn tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteet olivat seuraavat:

- Selvittää EC-menetelmän potentiaalinen vaikutus jätevesien jäännöspitoisuuksiin. Alkuvaiheessa tarkasteltiin vain KYP:n suurimpien jätevirtojen käsittelystä muodostuvia jätevesiä. Päämielenkiinnon kohteina olivat raskasmetallit, biologinen hapenkulutus, orgaaniset yhdisteet ja ravinteet.
- Luoda ratkaisu jatkuvatoimiseen kiintoaineen poistoon KYP:n jätevesistä ja muodostuvan kiintoainemäärän seuraamiseen.
- Arvioida menetelmän käyttöönoton kannattavuutta käsittelytehon ja kustannusten pohjalta.

Työn edetessä projektin tavoitteeksi tuli myös pilottimittakaavan laitteen suunnittelu ja rakennus tuotantomittakaavan laitteen suunnittelemisen pohjustamiseksi. Pilottilaitteella tehtyjen kokeiden ohessa myös suunniteltiin parannuksia laitteistoon tulevia versioita ja tuotantomittakaavan laitteistoa varten. Laitteiston suunnittelussa käytettiin pohjana KYP:n omistuksessa olevaa patenttia jatkuvatoimisesta EC-laitteistosta, joka toimii ilman

sekoittajia ja jossa käsiteltävä vesi virtaa elektrodiparien välissä [20]. Malli valittiin osittain siksi, että se on melko helppo suunnitella siirrettäväksi pilottiversioksi, joka voidaan kuljettaa tekniikasta kiinnostuneen potentiaalisen asiakkaan tiloihin käyttövalmiina kokeilujaksoa varten. Haasteita suunnitteluun tuo laitoksen virtauksen suuri vaihtelu sekä määrällisesti että laadullisesti ja sen yhdistäminen mahdollisimman itsenäiseen ja jatkuvatoimiseen prosessiin. Menetelmän kannattavuusarviota varten mitoitettiin teoreettinen EC-laitteisto niin, että sillä voitaisiin käsitellä kaikki KYP:n Järvenpään toimipisteessä syntyvät jätevedet. Laitoksen virtaamakeskiarvo tuotannon työaikana (klo 6.–22) on n.  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . Laitteisto suunniteltiin niin, että huoltotyöt, kuten elektrodien pesu ja vaihto, voidaan suorittaa laitoksen tuotannon ollessa käynnissä.

## 4 Käytetyt menetelmät ja laitteistot

Työ suoritettiin kahdessa eri päävaiheessa. Aluksi EC-menetelmän soveltuvuutta KYP:n prosessiveteen arvioitiin laboratoriomittakaavan panoslaitteistolla. Menetelmän soveltuvuuden varmistuttua rakennettiin pilottimittakaavan EC-laitteisto KYP:n hallussa olevan patentin mukaisen mallin toimivuuden varmistamiseksi ja ongelmakohtien havaitsemiseksi.

### 4.1 Laboratoriossa käytetty panostoiminen EC-laitteisto

Työn ensimmäisessä vaiheessa käytettiin yksinkertaista laboratoriomittakaavan panostointia EC-laitteistoa, jolla määriteltiin jatkuvatoimiselle laitteistolle sopivat ajoparametrit. Laitteistoon (kuva 2) kuului 30 A – 20 V DC:n virtalähde, magneettisekoittaja, 1 000 ml:n dekantterilasi ja elektrodina mitoiltaan 100x60 mm:n alumiini- ja rautalevyt, jotka oli asetettu 10 mm:n päähän toisistaan nylonista valmistettuja pultteja, muttereita ja aluslevyjä käyttäen. Laitteiston tehokas anodipinta-ala oli  $0,006 \text{ m}^2$ .





Kuva 2. Laboratoriossa käytetty pienen mittakaavan panostoiminen EC-laitteisto.

Testeissä käytettävä käsittelyaika ja sähkövirran suuruus valittiin kokeilemalla ja seuraamalla sakan muodostusta silmämääräisesti useista näytteistä käyttäen vuorotellen eri anodeja. Näytteenä testeissä käytettiin prosessivettä KYP:n Järvenpään toimipisteen märkähapetusaltaasta, jossa laitoksen tuotannon eri prosessien vedet yhdistyvät.

Käsittelyparametrien valinnan jälkeen tehtiin näytesarja, jossa viisi märkähapetusaltaasta eri päivinä otettua näytettä käsiteltiin valituilla parametreillä sekä alumiini- että rauta-anodia käyttäen toisen metallilevyn toimiessa samanaikaisesti katodina. Näytteistä mitattiin kiintoainepitoisuudet Hach Lange DR3900 -spektrometrin TSS-ohjelmalla ilman EC-käsittelyä suodattamattomana ja suodatettuna sekä EC-käsittelyiden jälkeen suodatettuina.

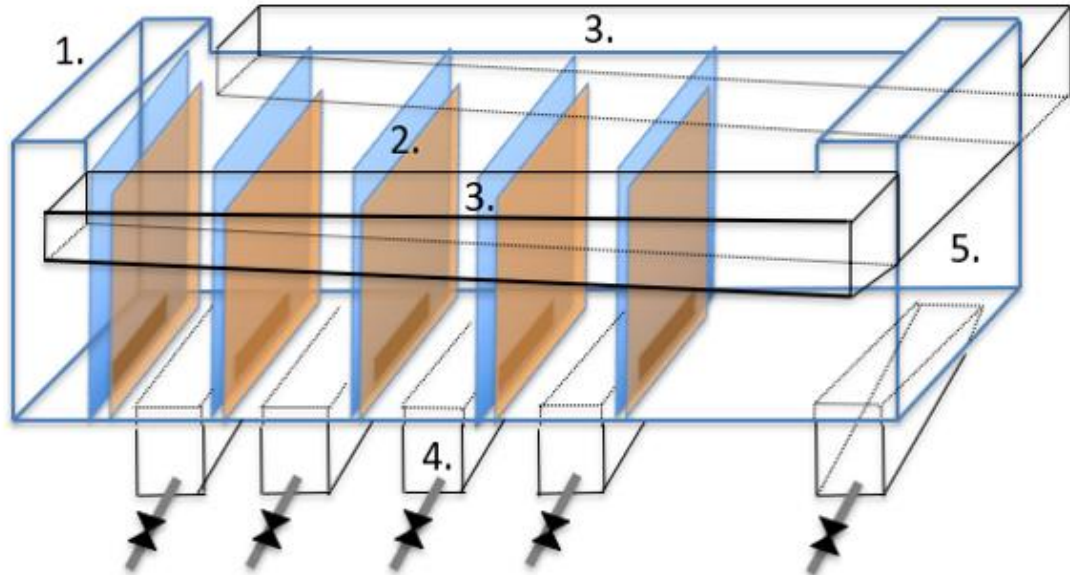
Näytesarjojen suodatetut näytteet valmistettiin suodattamalla vertailunäytteet käyttäen suodatinpaperia. EC-käsitellyt näytteet suodatettiin välittömästi käsittelyajan täytyttyä ja suodosten kiintoainepitoisuus mitattiin välittömästi mahdollisen metallien jälkisaostumisen vääristävän vaikutuksen välttämiseksi. Suodatetut näytteet ja ensimmäinen vertailunäyte lähetettiin ulkopuoliseen akkreditoituun laboratorioon, jossa niistä analysoitiin seuraavaa:

- kokonaistyyppi (SFS-EN ISO 11905-1)  $\pm 15$  %
- TOC (SFS-EN 1484:1997)  $\pm 15$  %
- kokonaisalumiini (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaisfosfori (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaiskromi (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaiskupari (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaisnikkeli (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaisrauta (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaissinkki (SFS-EN ISO 11885:2009)  $\pm 20$  %
- kokonaisarseeni (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 20$  %
- kokonaiselohopea (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 20$  %
- kokonaishopea (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 20$  %
- kokonaiskadmium (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 15$  %
- kokonaislyijy (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 20$  %
- kokonaistina (SFS-EN ISO 17294-2:2016)  $\pm 20$  %.

#### 4.2 Jatkuvatoimisen EC-laitteiston pilottimalli

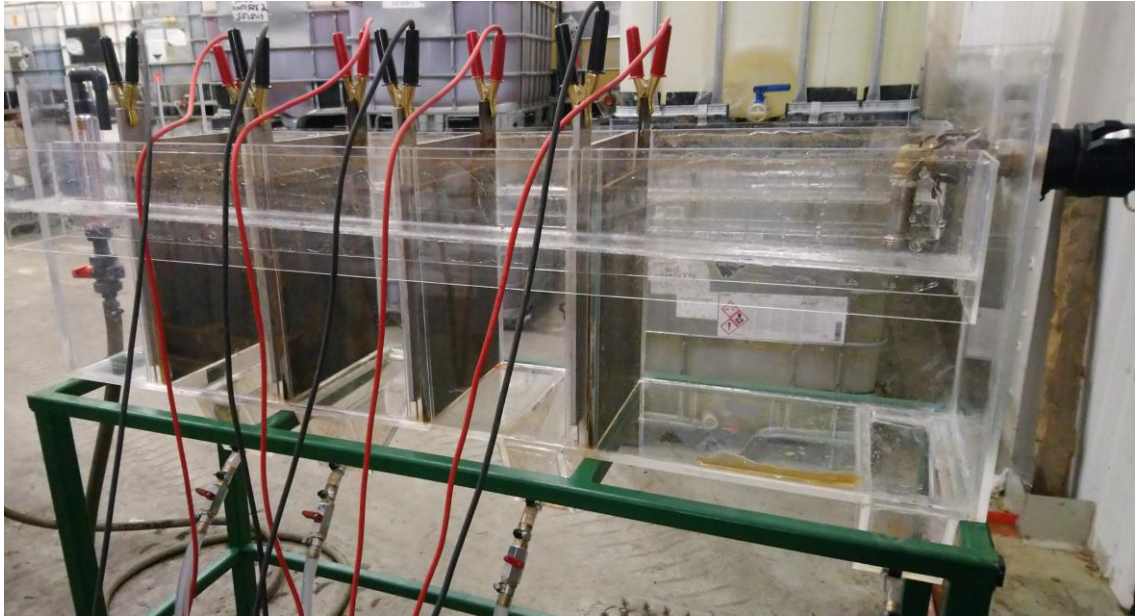
Kun menetelmän riittävä soveltuvuus KYP:n prosessiveteen saatiin osoitettua laboratoriomittakaavan testauksella, aloitettiin jatkuvatoimisen laitteiston kehitystyö. Laitteistosta rakennettiin pilottikokoinen mallilaitteisto (kuva 3 ja kuva 4) polymetyylimetakrylaatti PMMA-levyistä KYP:n omistamaa patenttia mukaillen. Laitteessa muodostuvan kiintoaineflokkin on tarkoitus sekä nousta veden pintaan että osittain laskeutua elektrodiparien välisiin lokeroihin, joista se poistetaan laitteiston alaosassa olevien venttiilien kautta. Laitteen lopussa on suurempi lokero, johon kiintoaineen on tarkoitus laskeutua ennen

veden ylivirtausta jatkokäsittelyyn. Suurempaan lokeroon voidaan myös tarvittaessa lisätä levy pari tai sellainen voidaan poistaa virrantiheyden säätämiseksi virran pysyessä vakiona.



Kuva 3. Havainnekuva pilottilaitteistosta.

Kuvassa 3 puhdistettava vesi syötetään laitteistoon yläkautta (1.) kuvan vasemmanpuoleisesta reunasta ja se kulkee patentin kuvaamalla tavalla elektrodilevyjen (2.) välistä, alittaen elektrodiparin ensimmäisen levyn ja ylittäen toisen levyn. Käsittelyssä muodostuva matalatiheyksistä kiintoainetta sisältävä veden pintaan nouseva vaahto ohjataan laitteen sivuilla olevien kourujen (3.) kautta astiaan, josta se saadaan edelleen ohjattua jatkokäsittelyyn, kuten suodatukseen. Korkeamman tiheyden omaava kiintoaine, joka laskeutuu käsittelyssä pohjaan, voidaan poistaa käyttämällä perättäisten levyparien välissä olevien lokerojen pohjassa olevia kaukaloita (4.). Käsitelty vesi ohjataan alivirtauksena viemäriin (5.) ja kiintoaineen ja vaahton sisältävä jae ohjataan kammiosuotopuristimeen tai muuhun sopivaan kiintoaineen erotuslaitteeseen.



Kuva 4. Jatkuvatoiminen pilottilaitteisto tiiveyskokeen jälkeen.

Pilottilaitteen suunnittelun pohjana oli patentin alkuperäisen haltijan NBTEC Oy:n Oulun yliopiston alaiselle Oulu Mining Schoolille valmistama laite. Pilottilaitteistolla tehtiin koeajoja käyttäen näytteenä KYP:n prosessissa muodostuvaa vettä, jotta nähtiin, onko mallissa tukkeutuvia kohtia. Näin pystyttiin arvioimaan täysikokoisen prosessin huoltoväliä. Pilottilaitteeseen liittyvät kemialliset analyysit tehtiin ulkopuolisessa akkreditoitussa laboratoriossa. Pilottivaiheessa käytetyt analyysimenetelmät olivat seuraavat:

- BOD7-ATU (SFS-EN 1899-1:1998)  $\pm 20$  %
- kiintoaine vesinäytteestä (SFS-EN 872)  $\pm 27$  %
- liuennut typpi jätevedestä Kjeldahl-menetelmällä (SFS 5505)  $\pm 20$  %
- kokonaistyyppi jätevedestä Kjeldahl-menetelmällä (SFS 5505)  $\pm 20$  %
- liukoinen fosfori (ISO 11885)  $\pm 12$  %
- kokonaisfosfori (ISO 11885)  $\pm 12$  %
- liukoinen alumiini (ISO 11885)  $\pm 12$  %
- liukoinen rauta (ISO 11885)  $\pm 12$  %.

## 5 Työn suoritus ja tulosten arviointi

### 5.1 Menetelmän soveltuvuuden arviointi

Menetelmän toimivuus KYP:n prosessissa muodostuvan veden käsittelyyn varmistettiin ensin etsimällä riittävä käsittelyaika ja sähkövirran suuruus, jolla käsiteltävään veteen saatiin silminnähtävä vaikutus. Testejä tehtiin, kunnes havaittiin, että useimpien näytteiden sisältämät kiintoaineet flokkaantuivat tiiviiksi hiutaleiksi noin 5 minuutin käsittelyn jälkeen sekä alumiini- että rauta-anodilla 1 litran dekanterilasissa 3 A:n sähkövirralla. Annostelu laskettuna kaavan 1 mukaisesti oli siis 900 C/l. Anodin pinta-alan suhde käsiteltävään vesimäärään on  $6 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ja testeissä käytetty virrantiheys oli  $500 \text{ A}/\text{m}^2$ . Alustavissa testeissä käytetty virrantiheys on suurempi kuin yleisesti on havaittu ideaaliksi. Tämä kuitenkin hyväksyttiin, sillä menetelmä vaikutti toimivan hyvin.

Silmämääräiset löydökset vahvistettiin tarkemmilla tutkimuksilla, joissa käytettiin märkähapetuksesta saatuja prosessivesinäytteitä. Veden koostumus muuttuu päivittäisen tuotannon mukaan, joten jokaisesta näytteestä tehtiin oma näytesarjansa, johon kuului vertailunäyte, suodatettu vertailunäyte ja sekä alumiini- että rauta-anodeja käyttäen EC-käsitellyt ja suodatetut näytteet. Suodattamattomista vertailunäytteistä tutkittiin välittömästi sekoituksen jälkeen kiintoainepitoisuus ja suodatettujen näytteiden kiintoainepitoisuus mitattiin heti suodatuksen jälkeen. Näytteitä suodatettaessa ensimmäisen 10 sekunnin aikana valunut suodos saattoi olla muuta osaa sameampaa. Näissä tapauksissa suodoksen alkuosa otettiin sivuun näytteestä. Tämä vastaa KYP:n tuotannon ohjetta kierrättää prosessissa suodosvettä suotopuristimen läpi, kunnes se on kirkasta, ennen suodoksen ohjaamista märkähapetusaltaaseen.

Sarjojen suodokset ja yksi suodattamaton vertailunäyte lähetettiin ulkopuoliseen laboratorioon, joka analysoi niistä kokonaisfosforin ja eri metallien pitoisuudet ICP-MS/OES-menetelmillä sekä TOC-pitoisuuden standardin SFS-EN 1484:1997 mukaisesti ja kokonaistypen määrän standardin SFS-EN ISO 11905-1 mukaisesti. Tärkeimmät analyysitulokset on esitetty taulukossa 2. Raskasmetallien osalta todettiin, ettei menetelmää voida käyttää luotettavasti KYP:n prosessin jäämäpitoisuuksiin, joten raskasmetallien analyysitulokset jätettiin pois taulukoista selvyiden vuoksi. Raskasmetallien mittaustulokset on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 2. Panostoimisella laitteistolla tuotettujen vesinäytteiden analyysitulokset.

Suure	TSS	TOC	N	P	Al	Fe
Yksikkö	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<b>Vertailunäyte 1.</b>	813	2 800	600	970	1,1	1,4
<b>1. 0 suodos</b>	118	3 100	600	940	0,4	1,5
<b>1. Al-EC</b>	12	2 900	590	740	2,3	1,4
<b>1. Fe-EC</b>	4	2 900	580	730	4,3	9,4
<b>Vertailunäyte 2.</b>	431					
<b>2. 0 suodos</b>	227	2 000	85	390	8,2	4,1
<b>2. Al-EC</b>	25	1 800	84	330	7,9	3,8
<b>2. Fe-EC</b>	55	2 500	99	340	15	7,5
<b>Vertailunäyte 3.</b>	17 168					
<b>3. 0 suodos</b>	52	6 700	5 900	8,1	20	2,8
<b>3. Al-EC</b>	8	6 800	5 700	5,3	27	1,5
<b>3. Fe-EC</b>	8	6 900	5 800	4,6	28	9,2
<b>Vertailunäyte 4.</b>	1 400					
<b>4. 0 suodos</b>	300	14 000	12 000	0,66	1,7	7,9
<b>4. Al-EC</b>	200	14 000	11 000	0,63	35	8,8
<b>4. Fe-EC</b>	200	14 000	11 000	0,64	4,2	12
<b>Vertailunäyte 5.</b>	1 170					
<b>5. 0 suodos</b>	661	3 300	64	5,3	0,1	0,015
<b>5. Al-EC</b>	13	2 400	57	0,77	2,0	2,3
<b>5. Fe-EC</b>	5	3 000	59	0,14	0,5	88

Alumiini- ja rauta-anodien välillä ei vaikuttanut olevan merkittävää systemaattista eroa veden kiintoaineen suodatamisen parantamisen suhteen. Mittaustulosten perusteella lasketut EC-käsittelyjen ja suodatettujen näytteiden reduktioprosentit verrattuna pelkkään suodatukseen on esitetty taulukossa 3. Taulukossa metallien negatiiviset reduktioprosentit johtuvat rauta- ja alumiini-ionien liukenemisestä käsiteltyyn liuokseen. Typen ja TOC:n osalta negatiiviset arvot johtuvat todennäköisesti menetelmään ja näytteenottoon liittyvistä epävarmuuksista.



Taulukko 3. Eri anodimateriaaleilla laboratorioskaalan kokeissa saadut reduktiot eri mittausparametreille, pelkkään suodatukseen verrattuna.

<b>Alumiinianodi</b>						
Näyte→	1.	2.	3.	4.	5.	Keskiarvo
<b>TSS</b>	90 %	89 %	85 %	33 %	98 %	79 %
<b>TOC</b>	6 %	10 %	-1 %	0 %	27 %	8 %
<b>N</b>	2 %	1 %	3 %	8 %	11 %	5 %
<b>P</b>	21 %	15 %	35 %	5 %	85 %	32 %
<b>Al</b>	-440 %	4 %	-35 %	-2 000 %	-1 300 %	-750 %
<b>Fe</b>	7 %	7 %	46 %	-11 %	-15 000 %	-3 000 %
<b>Rauta-anodi</b>						
Näyte→	1.	2.	3.	4.	5.	Keskiarvo
<b>TSS</b>	97 %	76 %	85 %	33 %	99 %	78 %
<b>TOC</b>	6 %	-25 %	-3 %	0 %	9 %	-2 %
<b>N</b>	3 %	-16 %	2 %	8 %	8 %	1 %
<b>P</b>	22 %	13 %	43 %	3 %	97 %	36 %
<b>Al</b>	-900 %	-83 %	-40 %	-150 %	-250 %	-300 %
<b>Fe</b>	-500 %	-83 %	-230 %	-52 %	-590 000 %	-117 000 %

Heikosta raskasmetallien saostustehosta huolimatta menetelmä vaikutti täyttävän hyvin päätarkoituksensa: vähentää viemäroittävän veden ravinne- ja kiintoainepitoisuutta, erityisesti kiintoaineen osalta. Tämän perusteella projektia päätettiin jatkaa jatkuvatoimisen pilottilaitteiston kehitysvaiheeseen.

## 5.2 Jatkuvatoimisen pilottimittakaavaan EC-laitteiston testaus

Jatkuvatoimiselle laitteistolle valitun mallin toimivuutta ja sen heikkouksia, kuten tukkeutumisalttiutta, arvioitiin pienoismallilaitteistolla suoritettujen koeajojen perusteella. Pienoismallilaitteiston keskeiset mitat ja tärkeimmät ominaisuudet on kuvattu taulukkoon 4. Ensimmäisissä kokeissa kiinnitettiin erityisesti huomiota elektrodiparien välien tukkeutumisalttiuteen, kiintoaineen kulkeutumiseen ja virtauksen turbulenttien ja laminaaristen alueiden jakautumiseen laitteistossa.

Taulukko 4. Jatkuvatoimisen pilottilaitteiston keskeiset mitat ja ominaisuudet.

<b>Sisämitat</b>	290x400x1 390 mm (leveys x korkeus x pituus)
<b>Hyötytilavuus</b>	160l
<b>Anodien tehokas kokonaispinta-ala</b>	0,45 m <sup>2</sup>
<b>Elektrodien välimatka</b>	10 mm
<b>Alumiinielektrodin paino</b>	3 kg/kpl
<b>Rautaelektrodin paino</b>	9 kg/kpl
<b>Elektrodien kytkentä</b>	Rinnan
<b>Virtalähde</b>	Kempower IPM 15 (0–15 V 0–1 000 A)
<b>Käsittelykapasiteetti</b>	250 l/h

Kokeet aloitettiin reaktorin tiiveyden ja virtalähteen toiminnan testauksella. Kun laitteiston todettiin olevan riittävän tiivis, siihen syötettiin prosessivettä ja virtalähde käynnistettiin laitteiston toiminnan ja kiintoaineen kulkeutumisen selvittämiseksi. Koeajojen ensimmäisessä vaiheessa elektrodiparien väliin ei muodostunut tukoksia ja levyparien välissä virtaava vesi pysyi testien aikana turbulenttina kantaen muodostuvan sakan pois levyparien välistä. Jännite pysyi kokeiden aikana alle 10 voltissa, jopa suunniteltuun nähden yli kaksinkertaisella sähkövirralla (150 A). Tämä johtuu osaltaan KYP:n prosessiveden poikkeuksellisen suuresta sähkönjohtavuudesta.

Sakan poistoon tarkoitetut kaukalot sijoitettiin laitteiston rakennusvaiheessa eri etäisyyksien päähän elektrodipareista optimaalisen paikan löytämiseksi. Koeajojen aikana kuitenkin huomattiin, että vaikka levypareja lähimpänä olevat kaukalot vaikuttivat toimivan parhaiten. Kiintoainetta kuitenkin kerääntyi testien aikana koko levyparien väliselle alueelle. Laitteistoon syötettiin myös jätteenkäsittelypanos, jossa oli runsaasti kiintoainetta ja EC-käsittelyn jälkeen laitteistoon muodostuneen kiintoaineen annettiin laskeutua yön yli (kuva 5). Pilottivaiheen kokeissa käytettiin kahta rauta-anodia ja kahta alumiinianodia, jotka olivat laitteessa vuorotellen. Kussakin levyparissa katodina toimi samanaikaisesti toisesta metallista valmistettu levy.





Kuva 5. Yön yli laskeutunut kiintoainefaasi pilottilaitteistossa.

Laitteeseen syötettiin seuraavana aamuna puhdasta vettä, ja siitä poistettiin kiintoainetta pohjan poistiventtiilien kautta. Vesi lähti virtaamaan välittömästi laitteiston läpi kantaen elektrodien väliin jäänyttä kiintoainetta ja huuhdellen laitetta. Lisäksi tässä työssä tehtyjen koeajojen aikana seurattiin ajoittain myös kiintoaineen kulkeutumista levyparien välissä käyttäen lisävaloa. Tässä työssä tehtyjen kokeiden aikana ei havaittu alkavan tukkeuman merkkejä. Näiden havaintojen perusteella tehtiin johtopäätös, ettei tukkeuma laitteistossa ainakaan KYP:n vesiä käsiteltäessä ole todennäköinen muussa kuin poikkeustilanteessa.

Laitteistolla suoritettiin kolme koeajoa eri päivinä otetuista noin 1 m<sup>3</sup>:n prosessivesinäytteistä. Testeillä oli tarkoitus osoittaa EC-käsittelyn skaalautuvuus verrattuna laboratorio-laitteeseen, sekä menetelmän toimivuus myös jatkuvatoimisessa laitteessa. Näytteitä käsiteltiin ajamalla ne laitteiston läpi 250 l/h virtauksella käsittelyvirran ollessa 62,5 A. Koagulanttiannostus oli kaavalla 1 laskettuna 900 C/l, kuten panoskokeissakin. Käsitelystä vedestä otettiin näytteet ylivuotoputken kautta, joista analysoitiin KYP:n jätevesimaksun hinnoitteluun vaikuttavat keskeiset fysikaalis-kemialliset ominaisuudet. Näiden kolmen koeajon analyysien tulokset ovat taulukossa 5. Käsiteltyjä näytteitä verrattiin käsittelemättömiin prosessivesinäytteisiin samasta erästä.

Taulukko 5. Pilottilaitteiston ensimmäisen koeajosarjan ylivuotonäytteiden analyysitulokset.

Koeajo	Tutkittu ominaisuus [mg/l]	Vertailunäyte	Käsitelty näyte	Reduktio	Reduktio KA
1	BOD7	9 500	10 000	-5 %	
2	BOD7	8 300	5 900	29 %	
3	BOD7	19 000	9 200	52 %	25 %
1	Kiintoaine	3 100	2 000	35 %	
2	Kiintoaine	320	130	59 %	
3	Kiintoaine	550	52	91 %	62 %
1	Fosfori	37,6	27,8	26 %	
2	Fosfori	8,3	8,5	-2 %	
3	Fosfori	7,2	1,3	82 %	35 %
1	Typpi	1 400	1 600	-14 %	
2	Typpi	1 200	1 000	17 %	
3	Typpi	5 100	5 200	-2 %	0 %

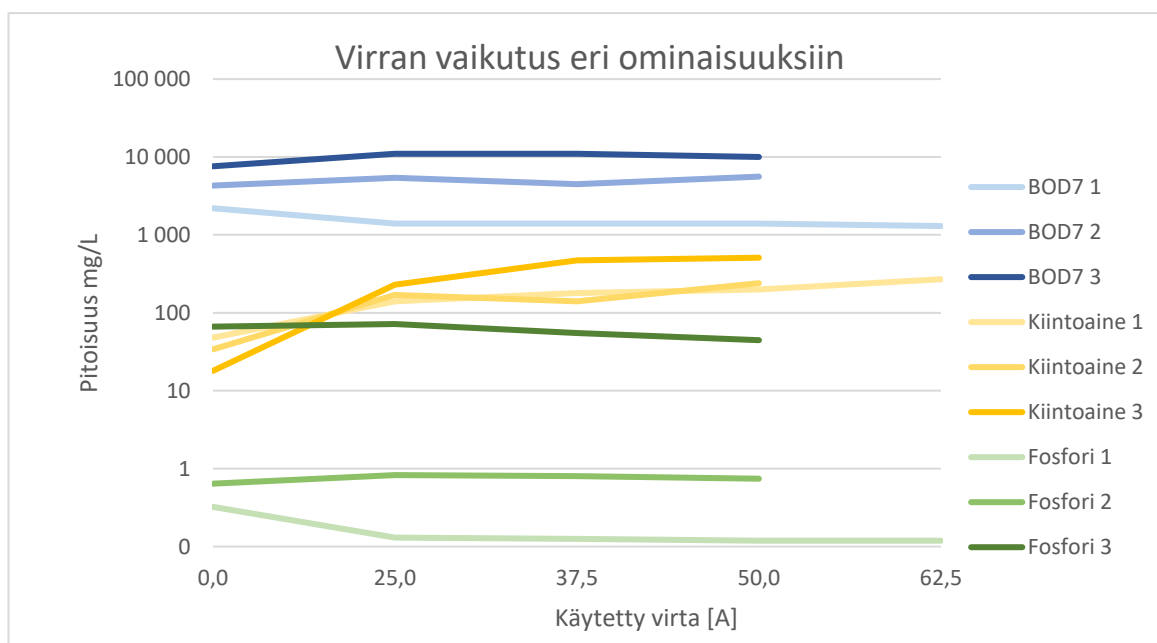
Koeajojen 1-3 aikana muodostui runsaasti kiintoainetta, jonka pääteltiin olevan pääasiassa alumiini- ja rautapitoista hydroksidisakkaa, joka muodostuu, kun metalleja yliannostellaan liuokseen. Tämän takia päätettiin myös tehdä koesarja optimaalisen käsitteilyvirran löytämiseksi. Kokeissa käytettiin virtaamaa 250 l/h koko kokeen ajan ja käsitteilyvirtaa nostettiin asteittain.

Kokeet aloitettiin täyttämällä reaktori puhtaalla vedellä laitteen huuhtelemiseksi kiintoainejäämistä. Koe aloitettiin, kun huuhteluvesi alkoi valumaan poistoputkesta. Prosessiveinäytettä alettiin syöttämään suoraan reaktoriin virtaamalla 250 l/h ja ylivuotoputkesta otettiin vertailunäyte (0 A), kun reaktorin vesi oli vaihtunut 45 min syötön jälkeen. Muut näytteet tuotettiin vastaavalla tavalla, nostaen käsittelyvirtaa aina edellisen näytteenoton jälkeen. Käytetyt virrat ja koagulanttiannostukset olivat 25 A (360 C/l), 37,5 A (540 C/l), 50 A (720 C/l) ja 62,5 A (900 C/l). Näytteistä tutkittiin BOD7 sekä fosfori- ja kiintoainepitoisuudet. Ensimmäisessä kokeessa suurin vaikutus saatiin jo 25 A virralla, joten koeajo päätettiin toistaa kahdella uudella prosessivesierällä suurinta koagulanttiannostusta lukuun ottamatta. Kokeiden tulokset ovat esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Pilottilaitteiston toisen koeajosarjan ylivuotonäytteiden analyysitulokset.

Koeajo	Tutkittu ominaisuus [mg/l]	0 A	25 A	37,5 A	50 A	62,5 A
1	BOD7	2 200	1 400	1 400	1 400	1300
2	BOD7	4 300	5400	4500	5 600	
3	BOD7	7 600	11 000	11 000	10 000	
1	Kiintoaine	48	140	180	200	270
2	Kiintoaine	34	170	140	240	
3	Kiintoaine	18	230	470	510	
1	Fosfori	0,32	0,13	0,13	0,12	0,119
2	Fosfori	0,64	0,83	0,80	0,75	
3	Fosfori	67	72	55	45	

Taulukon lukuarvoista ja kuvan 6 kuvaajista nähdään, että suurimmat koagulanttiannostukset eivät tuottaneet mainittavia parannuksia vedenlaatuun suhteessa pienempiin annostuksiin. Toisen ja kolmannen koesarjan kohdalla nähdään kuitenkin nousu kaikissa arvoissa vertailunäytteen ja 25 A testin välillä. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, ettei reaktorin vesi ollut ehtinyt täysin vaihtua ennen näytteenottoa, joten vertailunäyte on todellisuutta laimeampi.



Kuva 6. Virran vaikutus käsiteltävään jäteveteen.

Mahdollinen syy hitaaseen veden vaihtumiseen on laitteiston rakenne ja prosessiveden hieman hanavettä korkeampi tiheys. Suolapitoisuutensa vuoksi tiheä prosessivesi painuu laitteen pohjalle vähemmän tiheän hanaveden jäädessä laitteen pintaan, ja koska näyte otetaan reaktorin ylivirtauksena, voidaan olettaa, että saatu näyte oli todellista prosessivettä laimeampaa.

### 5.3 Tulosten arviointi

Koeajoista saaduista tuloksista voidaan päätellä, että menetelmän pääreaktiot, joissa alumiini ja rauta liukenevat muodostaen kiintoaineita epäpuhtauksien kanssa ja tehostaen suspendoituneiden kiintoaineiden erottumista, vaikuttavat toteutuvan teoriassa kuvatulla tavalla jo annostuksella 360 C/l. Tuloksista myös huomataan, että teoriaosuudessa mainittu typen poistuminen ei ole merkittävää tässä työssä käytetyllä virrantiheydellä. Myöskään kloorikaasun vapautumista ei havaittu reaktorin läheisyydessä. Hypokloriitin ja kloramiinien muodostuminen prosessissa on kuitenkin mahdollista ja sitä tukee myös BOD7-arvon laskuna näkyvä veden hygienisoituminen. Menetelmän tehotomuus KYP:n prosessiveden raskasmetallijäämiin selittyy osittain jäämien pienellä pitoisuudella sekä sillä, että KYP:n prosessi on tehokas raskasmetallien saostukseen, joten prosessista läpi pääsevät pienetkin raskasmetallipitoisuudet ovat tyypillisesti kompleksoituneena. Liitteen 1 taulukossa nähdään, että ainoa näyte, jonka raskasmetallipitoisuus ylittää viemäroinnissä sallitut raja-arvot, on näyte 4. Käsittely ei myöskään vaikuttanut näihin pitoisuuksiin. Taulukossa 2 nähdään, että näytteessä 4 on ollut suuri typpi-pitoisuus, tämän perusteella voidaan olettaa, että prosessiveden sisältämät raskasmetallit ovat muodostaneet ammoniumkompleksin. Raskasmetallit myös kilpailevat adsorptiopaikoista liuoksen muiden ionien kanssa. Alan tutkimuksissa on osoitettu kokeellisesti esimerkiksi, että korkea silikaatti- ja fosfaattikonsentraatio heikentää EC:n tehoa arseenin poistossa [20, s. 3801].

Menetelmä vaikuttaa olevan melko tehokas tietyntyyppisiin jätevesiin, jotka sisältävät suspendoitunutta kiintoainesta tai anioneja, kuten fosfaatteja, jotka muodostavat raudan ja alumiinin kanssa niukkaliukoisia suoloja. Tällaisia voisivat olla esimerkiksi maitotuotteiden tai maalin valmistuksessa muodostuvat teollisuuden jätevedet tai peltojen ja kaatopaikkojen läheisyydessä muodostuvat hulevedet.

Pilottilaitteen koeajoissa, joissa tutkittiin virran vaikutusta menetelmän tehoon, havaittiin myös ylivuotona poistuvan käsitellyn veden kiintoainepitoisuuden nousu koeajon edessä. Tämä ei kuitenkaan todennäköisesti liity pelkästään käsittelyvirtaan, vaan myös siihen, että laitteeseen kerääntyy käytön aikana kiintoainetta eikä kaikki laskeudu laitteen pohjaan ennen ylivuotoputkea. Tämä tulee huomioida laitteen seuraavia versioita suunnitellessa. Koeajojen aikana huomattiin myös, että laitteiston pintaan muodostuvan vaahdon määrä vaihteli runsaasti eri prosessivesierien välillä (kuva 7).



Kuva 7. Ajon aikana muodostuva vahtokerros pilottilaitteessa.

Vaikka prosessiveden laatu vaikuttaa olevan tärkein sakan muodostumiseen vaikuttava ominaisuus, myös vetykaasun muodostukseen ja metallin liukenemiseen vaikuttavalla käsittelyvirralla on suuri rooli vaahdomäärän hallinnassa.

Tässä työssä tehdyissä kokeissa ei havaittu anodien passivoitumisen aiheuttamia ongelmia. Tehdyt koeajot kuitenkin olivat verrattain lyhyitä ja alumiinianodien pintaan havaittiin muodostuvan huokoinen suolakerros jo tehtyjen kokeiden aikana. Tämä kuitenkin



tapautui vain yksittäisiä prosessivesieriä käsitellessä riittävän korkealla sähkövirralla. Kuvassa 9 nähdään, että kuvan taka-alalla olevan alumiinianodin pintaan on muodostunut vaalea kerros, mutta sitä vastoin etualalla näkyvän rauta-anodin pinnassa ei ole vastaavaa kerrosta.



Kuva 8. Rauta- ja alumiinianodit koeajon jälkeen.

Alan tutkimuksissa on havaittu, että molemmat, rauta- ja alumiinianodit saattavat passivoitua käsiteltävän veden eri suolojen vaikutuksesta. Esimerkiksi sulfaatti-ionien läsnäolo saattaa kirjallisuuden mukaan aiheuttaa alumiinin passivoitumista, mutta ei raudan. Nitraattien läsnäolo liuoksessa saattaa aiheuttaa molempien materiaalien passivoitumista. Kloridi-ionit puolestaan aiheuttavat molempien materiaalien syöymistä, ehkäisten passivoitumista [6, s. 272]. Kloridi-ionien vaikutus saattaa selittää, miksi passivoitumista havaittiin vain osassa kokeista eikä KYP:n tapauksessa passivoituminen välttämättä tuota ongelmaa, sillä suuri osa KYP:n käsiteltävästä prosessivedestä sisältää runsaasti kloridi-ioneja. Suola irtoaa levyn pinnasta kevyesti pyyhkimällä, joten tuotantomittakaavan laitteiston puhdistukseksi todennäköisesti riittää huuhtelu painepesurilla. Levyjen pesu olisi kuitenkin ylimääräinen työvaihe, joten olisi paras, jos se pystyttäisiin välttämään kokonaan.

Huomionarvoista on myös, että KYP:n vesiä käsitellessä jännite ei noussut kertaakaan yli 10 V:n ja 25 A virralla jännite oli keskimäärin noin 1,5 V, joten tunnin pituinen käsittely vei sähköenergiaa 37,5 Wh ja kuution käsittelyssä sähköön kulutus on 0,15 kWh/m<sup>3</sup>.

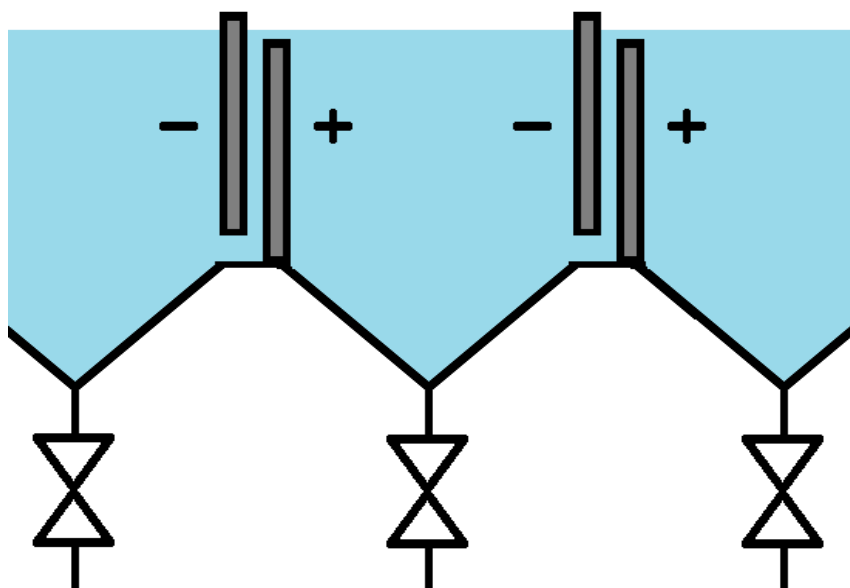
## 6 Pohdintaa

### 6.1 Parannukset laitteistoon

Pilottivaiheen kokeiden perusteella patentin mukainen malli toimii hyvin. Elektrodien välistä turbulenttina virtaava vesi pitää välin vapaana tukoksista. Malliin saa melko pieneen tilaan tarvittaessa useita levyjä, ja malli on silti muokattavissa eri kokoihin tiloihin ja erilaisiin prosesseihin sopivaksi. Mallissa on myös etuna, ettei erillisiä sekoittimia vaadita. Koeajojen aikana kuitenkin huomattiin ongelmakohtia, jotka tulee ratkaista ennen kuin tuotantomittakaavan laitteistoa voidaan alkaa rakentamaan tai liikuteltavaa pilottilaitteistoa voidaan alkaa markkinoimaan potentiaalisille asiakkaille.

Kokeiden aikana havaittiin, etteivät pilottilaitteiston PMMA-levyjen liimaukset kestäneet laitteen liikuttelusta johtuvia tärähdyksiä. Tulevien laitteistojen osat kannattaa valmistaa hitsattavasta muovista ja tilata valmiiksi muotoon koneistettuna, jolloin saadaan varmasti yhteensopivat osat. Hitsaamalla saadaan aikaan riittävän lujat liitokset levyjen välillä.

Laitteistossa elektrodiparien väliin kerääntyy kiintoainetta, joka poistetaan perättäisten elektrodiparien väleissä olevien venttiilien kautta. Laitteiston pohja on kuitenkin vaakasuora, ja pitkällä aikavälillä pohjalle kerrostuu kiintoainetta, jota ei saada poistettua muuten kuin huuhtelemalla laitteisto. Tuotantomittakaavan laitteistossa koko laitteiston tyhjentäminen ja huuhteleminen saattaa olla ongelma ja muodostuva sakka saattaa pahimmillaan muodostaa kovia kerroksia, jotka tukkivat reaktorin ja joiden hajottaminen ja reaktorista poistaminen vie aikaa. Laitteiston pohja voitaisiin muotoilla kuvan 8 mukaisesti ongelman poistamiseksi.



Kuva 9. Ehdotus laitteiston pohjan läpileikkauksesta sakan kertymisen estämiseksi.

Levyparien välit voisivat olla pyramidin muotoiset niin, että kiintoaineen poistoon tarkoitettu venttiili on pyramidin kärjessä. Tällöin laskeutuva kiintoaine valuu kohti poistoventtiiliä ja on helposti poistettavissa venttiilin kautta. Virtaus levyparien alareunassa on riittävän turbulenti kuljettamaan kiintoaineen eteenpäin, joten kiintoaineen kerrostumisesta johtuvan tukkeutumisen riski on pieni. Laitteiston vaatiman telineen tukipalkit voidaan sijoittaa vaakatasoiselle alueelle levyjen alla, joka myös kannattelee levyjen painoa.

Pilottilaitteistossa huomattiin, että poistoventtiilit tukkeutuvat helposti elektrodeista irtoavasta ruostelastusta. Tämä on otettava huomioon erityisesti uusien pilottimittakaavan laitteistojen suunnittelussa varmistamalla, että venttiilit ja poistoputket ovat riittävän suuret. Tuotantomittakaavan laitteessa venttiilit on todennäköisesti mitoittava joka tapauksessa niin suureksi, ettei ongelmaa ilmene. Lisäksi myös laitteen syöttöputken ja ensimmäisen levyparin väliseen tilaan tarvitaan poistoputki, että laite on helpompi tyhjentää kokonaan tarvittaessa. Vaikka kiintoainepitoista flokkia ei muodostu merkittävästi levyparien ulkopuolella, esimerkiksi syötettävän prosessiveden sisältämä kiintoaine saattaa kerrostua laitteeseen ja aiheuttaa tukoksia. Siirrettävässä pilottilaitteessa venttiili on erityisen tärkeä, jotta laitteisto voidaan tyhjentää siirtoa varten. Ylivirtauksena käsitellyn veden mukana poistuvan kiintoaineen määrää voidaan hallita lisäämällä lamellierotin laitteen loppuun. Väärin mitoittettuna lamellierotin kuitenkin saattaa päästää kiintoaineen läpi tai olla altis tukkeumille.



Anodien passivoituminen saattaa aiheuttaa ongelmia, erityisesti jos käsitellään pitkiä jaksoja vähäkloorisia jätevesiä. Tämä on mahdollista, esimerkiksi jos asiakasyrityksen prosesseissa muodostuva jätevesi ei ole klooripitoista, mutta sisältää esimerkiksi nitraatteja tai sulfaatteja. Kuten tämän työn teoriaosuudessa todetaan, passivoituminen tapahtuu tyypillisesti korkean virrantiheyden alueella. Ongelma voidaan siis todennäköisesti ehkäistä kasvattamalla anodien pinta-alaa. Mikäli virrantiheyttä ei voida käytännöllisesti laskea riittävän alhaiseksi, muita mahdollisia tapoja passivoitumisen ehkäisemiseksi ovat

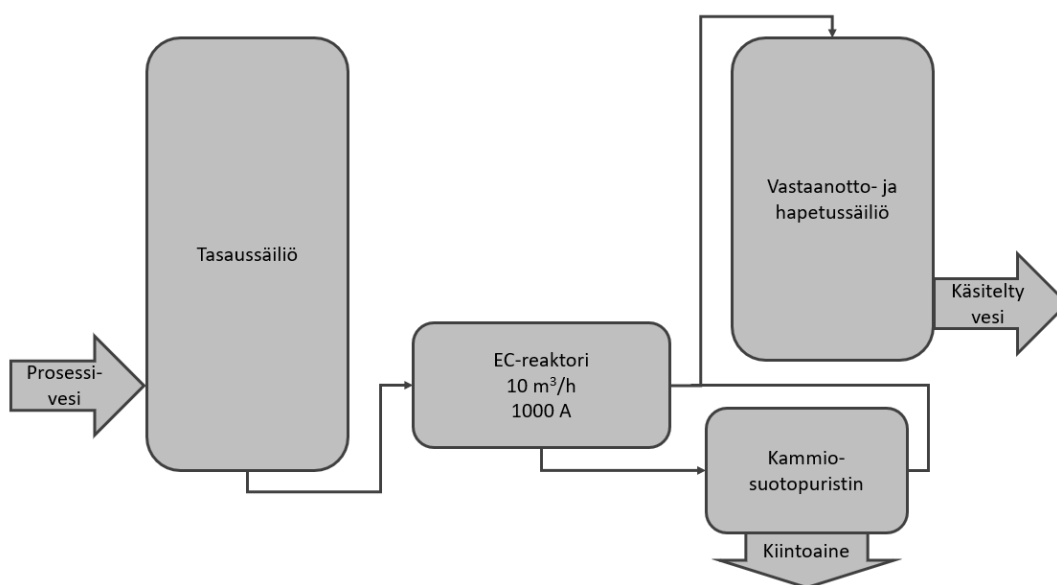
- virran suunnan jaksottainen kääntäminen tai vaihtovirran käyttö tasavirran sijaan [1, s. 33; 6, s. 272].
- magnesiumilla seostetun alumiinin käyttö anodimateriaalina puhtaan alumiinin sijaan [22, s. 8].
- passiivikerroksen poistaminen jaksottaisella ultraäänikäsittelyllä [6, s. 275; 23, s. 113].

Todennäköisesti helpoin ja toimintavarmoin tapa on kuitenkin valita anodimateriaali käsiteltävän jäteveden mukaan niin, että se ei passivoitu veden suolojen vaikutuksesta. Tämä ei välttämättä ole kuitenkaan aina mahdollista esimerkiksi veden laadun vaihtelun takia.

Prosessissa vapautuva vetykaasu saattaa syttyä leimahtaen, jos sitä pääsee kertymään laitteen tai ympäröivän tilan rakenteisiin niin, että sen pitoisuus ilmassa on yli 4 %. Staattinen sähkö tai kuuma pinta saattavat riittää vedylle syttymislähteeksi, ja syttyvä kaasupilvi saattaa aiheuttaa vaikeita palovammoja palavan kaasun sisään jääville henkilöille. [19.] Laitetta voidaan siis käyttää vain avoimessa tai hyvin ilmastoidussa tilassa, jossa vetykaasu ei pääse kertymään. Tämä on erityisen tärkeää huomioida suunnitellessa tuotantomittakaavan laitetta, koska suuren käsittelykapasiteetin myötä myös muodostuvan vedyn määrä kasvaa merkittävästi.

## 6.2 Kustannukset

Prosessin kannattavuutta ja käyttökustannuksia arvioitiin esimerkkiproessin avulla. Teollisen mittakaavan EC-laitteiston suunnitteluun tuo haastetta KYP:n prosessissa muodostuvan jäteveden jaksottainen virtaus. Jätevettä saattaa muodostua 1-20 m<sup>3</sup>/h laitoksen prosessien ollessa käynnissä. Suuri vaihtelu virtauksessa tekisi laitteen mitoittamisen vaikeaksi. Ongelma kuitenkin voidaan kiertää ohjaamalla kaikki laitoksen prosessivesi tasaussäiliöön, josta se ohjataan EC-reaktoriin tasaisella virtaamalla 10 m<sup>3</sup>/h, kun vettä on kertynyt esimerkiksi 5 m<sup>3</sup>. Laitteesta poistuva kiintoainepitoinen flokki voidaan käsitellä suotopuristimella. Suodatettu vesi voidaan ohjata käsitellyn veden kanssa viemäritäiväksi tai erilliseen säiliöön, jossa veden käsittelyä jatketaan esimerkiksi sähkökemiallisella otsonoinnilla BOD7-arvon laskemiseksi tai strippauksella ammoniumtyypen poistamiseksi. Kuvassa 10 on esitetty prosessikaavio mahdolliselle EC-laitteiston kokonaisprosessille.



Kuva 10. Esimerkki tuotantomittakaavan EC-laitteiston kokonaisprosessista.

Kuvan 8 esimerkkiprosessi perustuu tässä työssä käytettyyn pilottilaitteeseen verrattuna 40-kertaiselle virtaamalle 10 m<sup>3</sup>/h sekä oletukseen, että 360 C/l vahvistetaan riittäväksi sähkövaraukseksi litrassa eli koagulanttiannostukseksi. Laite voisi olla sisäpuolelta 1,5 m leveä, 1,5 m korkea ja 3,0 m pitkä. Tässä tapauksessa laitteen tilavuus olisi 6,75

$\text{m}^3$ , jolloin laitteiston tilavuus suhteessa virtaamaan olisi samaa suuruusluokkaa pilottilaitteistoon verrattuna. Yksittäisen anodin tehokas pinta-ala olisi  $2,25 \text{ m}^2$ , joten neljää levyä käytettäessä anodien kokonaispinta-ala olisi  $9 \text{ m}^2$  ja anodinen virrantiheys  $1000 \text{ A}$  virtaa käytettäessä olisi  $111 \text{ A/m}^2$ . Pilottimittakaavan laitteessa virrantiheys  $25 \text{ A}$  virtaa käytettäessä oli  $56 \text{ A/m}^2$ , mikäli tuotantomittakaavan laitteeseen halutaan vastaava virrantiheys, laitteeseen voidaan lisätä useampia levyjä, laitteen painoa voidaan kompensoida käyttämällä ohuempia levyjä. Esimerkkilaitteessa  $20 \text{ mm}$  paksu alumiinianodi painaisi noin  $125 \text{ kg}$  ja vastaava rauta-anodi noin  $360 \text{ kg}$ . Kaikki levyt painaisivat yhteensä noin  $1450 \text{ kg}$ , jos kaikki neljä katodia valmistettaisiin alumiinista ja laitteessa olisi kaksi rauta-anodia ja kaksi alumiinianodia. Levyjen paino on huomioitava laitteen tukirakenteiden sekä laitteen huoltotoimintojen, kuten levyjen vaihdon suunnittelussa. Levyt voidaan myös valmistaa ohuemmasta materiaalista, jolloin vaihtoväli lyhenee, mutta levyt kevenevät.

Laitteiston käyttöjännite riippuu käsiteltävästä vedestä sekä itse laitteistosta. Oletettavaa kuitenkin on, että virrantiheyden ja elektrodien välin ollessa samaa luokkaa kuin pilottilaitteessa ja mikäli esimerkiksi johtimet ovat oikein mitoitetut, jännite ei kasva tuotantomittakaavan prosessissa huomattavaksi. Esimerkiksi  $10 \text{ V}$ :n jännitteellä ja  $1000 \text{ A}$ :n virralla käsitellessä prosessin EC-reaktori kuluttaisi sähköä noin  $10 \text{ kWh}$  tunnissa eli  $1 \text{ kWh}$  käsiteltyä kuutiometriä kohden, sähkön hinnalla  $70,72 \text{ €/MWh}$  sähkön osuus käsittelyn hinnasta olisi noin  $0,07 \text{ €/m}^3$  [24; 25].

Anodien kulutus on toinen keskeinen osa EC-prosessin käyttökuluista. Prosessissa, jossa  $1000 \text{ A}$  virralla käsiteltäessä puolet virrasta jakautuu alumiini- ja puolet rauta-anodille, anodien kulutus olisi rauta-anodin osalta noin  $52 \text{ g/m}^3$  ja raudan osalta noin  $17 \text{ g/m}^3$ . Rakenneteräksen kilohinta on noin  $0,35 \text{ €/kg}$  ja alumiinin kilohinta on noin  $1,4 \text{ €/kg}$  [26]. Molempien metallien hinta käsiteltyä vesikuutiota kohden on näin ollen noin  $0,02 \text{ €/m}^3$  eli yhteensä noin  $0,04 \text{ €/m}^3$ .  $20 \text{ mm}$  paksuilla levyillä voitaisiin käsitellä yli  $3000 \text{ m}^3$  KYP:n prosessivettä ennen kuin levyjen massasta on kulunut  $50 \%$ . KYP:n tämänhetkisellä tuotantokapasiteetilla levyjen vaihtoväli olisi  $2\text{--}3$  kertaa vuodessa, mikäli levyt vaihdettaisiin, kun niistä on kulunut  $50 \%$ .

Levyt kuitenkin kuluvat pistemäisesti kloridipitoisissa olosuhteissa, joten prosessin toimivuuden vuoksi ja turvallisuuden takaamiseksi levyjen kuntoa kannattaa tarkkailla erityisesti laitteiston käytön alkuvaiheessa ennen kuin levyjen kulumistapa pitkäkestoisessa käytössä tunnetaan [27, s. 4522].

EC-prosessin käytössä suurin kuluerä on todennäköisesti kiintoaineen käsittely. Tässä työssä ei kuitenkaan pystytty arvioimaan prosessissa muodostuvan kiintoaineen määrää sen suuren vaihtelun ja vähäisen koemäärän vuoksi. Kiintoaineen määrää arvioidessa on huomioitava muodostuvan flokin ja vaahdon lisäksi myös käsiteltävässä vedessä mahdollisesti oleva kiintoaine. Todennäköisesti helpoin tapa saada realistinen kuva kiintoainemäärästä on käsitellä ja suodattaa tietty määrä KYP:n prosessivettä tuotannon ohessa päivittäin esimerkiksi kahden kuukauden ajan, jolloin saadaan kokonaiskuva muodostuvasta kiintoaineen määrästä.

Laitteiston rakentamispäätökseen vaaditaan lisättestausta sopivan käsittelyvirran valitsemiseksi sekä muodostuvan kiintoaineen määrän ja suodattavuuden varmistamiseksi tuotantokokoluokan suotopuristimella. Mikäli prosessi voidaan toteuttaa edellä esitetyllä tavalla, on teoriassa mahdollista käyttää pilottilaitteessa käytettyä virtalähdettä. Tämä laskee prosessin käyttöönoton kuluja huomattavasti. Lisäksi KYP:llä on käytössä useita suotopuristimia ja on mahdollista, että EC:ssä muodostuva sakka voidaan käsitellä muun tuotannon ohessa samoilla laitteilla. Tällöin suurimmat hankintakulut olisivat todennäköisesti prosessin instrumentaatio, asennus ja nostimet.

### 6.3 Johtopäätökset

Ennen täysikokoisen laitteiston suunnittelua on hyvä arvioida, päästäänkö samaan lopputulokseen muilla menetelmillä. Tutkittujen näytteiden heterogeenisuus johtuu suurelta osin KYP:n prosessien monimuotoisuudesta ja vaihtelusta, kuitenkin suuret fosfori- ja kiintoainepitoisuudet muodostuvat poikkeustilanteissa, kuten suotopuristimen kankaan revetessä tai epäonnistuneen panoksen yhteydessä. Olisikin hyödyllistä tarkastella KYP:n jätteidenkäsittelyprosessia kokonaisuutena ja harkita, voiko esimerkiksi laadunvalvonnan ja jätteenkäsittelyreseptien kehityksellä saada vastaavan tai jopa suuremman hyödyn kuin tilaa ja resursseja vievien lisäprosessien kehityksestä. Laitteiston rakentaminen ja käyttöönotto saattaa kuitenkin olla kannattavaa, mikäli sillä halutaan mahdollisuus osoittaa potentiaalisille asiakkaille, että yritys luottaa tekniikkaan ja se on sovellettavissa teollisessa mittakaavassa, jopa KYP:n vaihtelevaan prosessiin.

## Lähteet

- 1 Kuokkanen, Ville. 2016. Utilization of electrocoagulation for water and wastewater treatment and nutrient recovery — Techno-economic studies. Väitöskirja. Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Luonnontieteellinen tiedekunta. Jultika – Oulun yliopiston julkaisuarkisto.
- 2 Suolojen liukoisuus veteen. Verkkoaineisto. Taulukot.com <[http://www.taulukot.com/kemia/yhdisteet/#suolojen\\_liukoisuus\\_veteen](http://www.taulukot.com/kemia/yhdisteet/#suolojen_liukoisuus_veteen)> Luettu 11.7.2019
- 3 Al-Shannag, Mohammad; Al-Qodah, Zakaria; Bani-Melhem, Khalid; Rasool Qtaishat, Mohammed & Alkasrawi, Malek. 2015. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. Engineering Journal Vol. 260, s. 749–756.
- 4 Hakizimana, Jean; Gourich, Bouchaib; Chafi, Mohammed; Stiriba, Youssef; Vial, Christophe; Drogui, Patrick & Naja, Jamal. 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. Desalination 404 (2017), s. 1–21.
- 5 Vepsäläinen, Mikko. 2012. Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. VTT Science 19. Espoo: VTT.
- 6 Garcia-Seguraa, Sergi; Eibanda, Maria; de Melo, Jailson & Martínez-Huitlea, Carlos. 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its associations with other technologies Journal of Electro-analytical Chemistry 801 (2017), s. 267–299.
- 7 OVA-ohje: Ammoniakki. 2017. Verkkoaineisto Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/ammoni.html>>. Luettu 6.3.2020
- 8 Capodaglio, Andrea; Hlavínek, Petr & Raboni, Massimo. 2015. Physico-chemical technologies for nitrogen removal from wastewaters: a review. Revista Ambiente & Água 10(3) 2015, s. 481–498.
- 9 OVA-ohje: Kloori. 2017. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/kloori.html>>. Luettu 6.3.2020
- 10 Basic Chemistry of Chlorination. Verkkoaineisto. Hydroinstruments. <<http://www.hydroinstruments.com/files/Basic%20Chemistry%20of%20Chlorination.pdf>>. Luettu 20.8.2019
- 11 Lamminpohja, Jasmina. 2017. Monoklooriamiiniklooraus vedenpuhdistuksessa. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 12 Kuokkanen, Ville; Kuokkanen, Toivo; Rämö, Jaakko & Lassi, Ulla. 2013. Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater—A Review. *Green and Sustainable Chemistry* 3 2001, s. 89–121.
- 13 Kuokkanen, Ville. 2019. EC-erityisasiantuntija, Kierto Ympäristöpalvelut Oy. Järvenpää. Keskustelu 12.7.2019
- 14 Mollah, Yousuf; Schennach, Robert; Parga, Jose & Cocke, David. 2001. Electrocoagulation (EC) – science and applications. *Journal of Hazardous Materials B84* (2001), s. 29–41.
- 15 Reilly, Matthew; Cooley, Andrew; Tito, Duarte; A Tassou, Savvas & Theodouru Michael. 2019. Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia* 161 (2019), s. 343–351.
- 16 Mäkinen, Helena. 2001. Luku 12 – Anodit ja anodimateriaalit. Teoksessa Loh-tari, Lauri; Hienonen, Mirja; Léman, Jukka; Tunturi, Pekka & Virta, Lauri (toim.). *Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely osa III. Suomen Galvanotekni-nen Yhdistys – Finlands Galvanotekniska Förening ry.*
- 17 Song, Peipei; Yang, Zhaohui; Zeng, Guangming; Yang, Xia; Xu, Haiyin; Wang, Like; Xu, Rui; Xiong, Weiping & Ahmad, Kito. 2017. Electrocoagulation treat-ment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review. *Chemical Engineer-ing Journal* 317, s. 707–725.
- 18 Kuokkanen, Ville; Kuokkanen, Toivo; Rämö, Jaakko & Lassi, Ulla. 2015. Elec-trocoagulation treatment of peat bog drainage water containing humic sub-stances. *Water Research* 79, s. 79–87.
- 19 OVA-ohje: Vety. 2017. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/vety.html>>. Luettu 16.3.2020
- 20 Rajaniemi, Kyösti; Metsävainio, Veli-Pekka & Kuokkanen, Ville. 2019. Patenti. FI 127889 B. Helsinki: Patenttihakemistohallitus.
- 21 Sık, E; Koby, M; Demirbas, E; Gengec, E & Oncel, M. 2017. Combined ef-fects of co-existing anions on the removal of arsenic from groundwater by elec-trocoagulation process: Optimization through response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering* Vol 5, s. 3792–3802.
- 22 Dura, Adelaide & Breslin, Carmel. 2019. The removal of phosphates using electrocoagulation with Al–Mg anodes *Journal of Electroanalytical Chemistry* Volume 846, artikkeli 113161.

- 23 He, Cheng-Chun; Hu, Ching-Yao & Lo, Shang-Lien. 2016. Evaluation of sono-electrocoagulation for the removal of Reactive Blue 19 passive film removed by ultrasound. *Separation and Purification Technology* Volume 165, s. 107–113.
- 24 Day-ahead prices. Verkkoinstituutio. Nord pool AS. <<https://www.nordpool-group.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?dd=FI&view=chart>>. Luettu 5.3.2020
- 25 Sähkön hintatilat. Verkkoinstituutio. Energiavirasto. <<https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilat>>. Luettu 5.3.2020
- 26 Featured LME Prices: US\$ 20 March 2020. 2020. Verkkoinstituutio. London Metal Exchange. <<https://www.lme.com/>>. Luettu 23.3.2020
- 27 Hua, C.Y; Loa, S.L & Kuan, W.H. 2003. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Research* 37, s. 4513–4523.



**Liite 1. Panostoimisella laitteistolla tuotettujen vesinäytteiden raskasmetallianalyysin tulokset.**

Suure	As	Hg	Ag	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	Sn
yksikkö	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<b>1. 0 suodos</b>	0,033	0,0004	1,4	0,0044	0,073	0,4	0,001	0,23	0,5	0,005
<b>1. AI-EC</b>	0,027	0,0002	0,587	0,0046	0,052	0,39	0,0013	0,2	0,2	0,005
<b>1. Fe-EC</b>	0,022	0,0003	0,0062	0,0042	0,029	0,3	0,0007	0,25	0,14	0,003
<b>2. 0 suodos</b>	0,016	0,0008	7,0	0,0047	0,01	0,18	0,015	0,032	0,079	0,003
<b>2. AI-EC</b>	0,019	0,0006	0,056	0,0046	0,0095	0,19	0,015	0,073	0,1	0,003
<b>2. Fe-EC</b>	0,017	0,0006	0,086	0,0043	0,0059	0,035	0,013	0,046	0,072	0,004
<b>3. 0 suodos</b>	0,012	0,0005	0,002	0,0039	0,33	1,6	0,0058	0,68	0,54	0,003
<b>3. AI-EC</b>	0,017	0,0004	0,004	0,0042	0,32	1,3	0,0052	0,51	0,42	0,002
<b>3. Fe-EC</b>	0,01	0,0004	< 0,001	0,0038	0,28	0,11	0,0048	0,56	0,28	0,002
<b>4. 0 suodos</b>	0,062	0,0006	0,0459	0,0043	1,7	0,37	0,02	3,1	5,0	0,003
<b>4. AI-EC</b>	0,043	0,0006	0,048	0,0042	1,7	0,48	0,02	3,4	5,1	0,002
<b>4. Fe-EC</b>	0,049	0,0006	0,046	0,0039	1,7	0,40	0,02	3,2	5,1	0,002
<b>5. 0 suodos</b>	0,012	< 0,0001	0,093	0,0093	0,014	0,051	0,0009	0,05	0,065	0,002
<b>5. AI-EC</b>	0,015	< 0,0001	0,05	0,0092	0,0034	0,038	< 0,0001	0,53	0,018	0,002
<b>5. Fe-EC</b>	0,015	< 0,0001	0,05	0,015	0,0068	0,036	< 0,0001	0,071	0,014	0,002