



Lauri Salo

Elektrokoagulaation soveltuvuus elintarviketeollisuuden jätevesien käsittelyyn

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

17.10.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Lauri Salo
Otsikko:	Elektrokoagulaation soveltuvuus elintarviketeollisuuden jätevesien käsittelyyn
Sivumäärä:	30 sivua + 2 liitettä
Aika:	17.10.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine:	Bio- ja elintarviketekniikka
Ohjaajat:	Projekti-insinööri Severi Lintula Lehtori Arto Yli-Pentti

Insinööritö tehtiin Econet Oy:n toimeksiantona, ja sen aiheena oli puhdistaa elintarviketeollisuudesta peräisin olevia jätevesiä elektrokoagulaatiomenetelmää käyttäen. Elektrokoagulaatio on sähkökemiallinen menetelmä, jossa yhdistyvät perinteisen koagulaation, flotaation ja sähkökemian hyödyt vesien käsittelyssä.

Työn aikana rakennettiin laboratoriomittakaavan elektrokoagulaatiolaitteisto, jota käyttäen puhdistettiin Econet Oy:n asiakasyrityksen toimittamia jätevesiä. Laitteistossa käytettävien elektrodien materiaaleiksi valittiin ruostumaton teräs sekä alumiini.

Ennen varsinaista kokeellista osuutta tehtiin testiajo, jonka perusteella päädyttiin käyttämään elektrokoagulaation tukena myös esikäsittelyä sekä polymeerisaostusta. Kokeellinen osuus jakautui kolmeen eri koeajoon, joissa pyrittiin löytämään sopivimmat parametrit sekä jäteveden kemiallisen hapenkulutuksen (COD) että värin maksimaaliseen reduktioon. COD-tavoitteena puhdistetulle jätevedelle oli 700 mg/l, sillä vesi olisi tällöin riittävän puhdasta jatkokäsittelyä varten.

Työtä voi pitää onnistuneena, sillä menetelmän avulla päästiin vaadittuun veden laatuun, ja työ auttoi myös teollisen mittakaavan laitteiston suunnittelussa. On kuitenkin syytä uskoa, että energiankulutusta ja esikäsittelyä voidaan vielä optimoida alhaisempien käyttökustannuksien aikaansaamiseksi.

Avainsanat: elektrokoagulaatio, jäteveden puhdistus, COD

Abstract

Author: Lauri Salo
Title: Feasibility of Electrocoagulation for Treatment of Food Industry Wastewaters
Number of Pages: 30 pages + 2 appendices
Date: 17 October 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major: Biotechnology and Food Engineering
Supervisors: Severi Lintula, Project Engineer
Arto Yli-Pentti, Senior Lecturer

This thesis was commissioned by Econet Oy. The aim of the thesis was to implement an electrocoagulation process, which was used to remove impurities from wastewater originating from food industry. Electrocoagulation is a broad-spectrum technology that combines the characteristics of coagulation, flotation and electrochemistry in wastewater treatment.

The first stage of this project consisted of designing and building a laboratory scale electrocoagulation apparatus, which was later utilized to treat wastewater samples provided by a client company of Econet Oy. The chosen electrode materials in the apparatus were stainless steel and aluminium.

Before the experimental phase, a trial run was conducted. On the basis of that particular run, a pre-treatment procedure and polymeric flocculation were also introduced in the experimental phase. The experimental phase itself was divided into three different examinations. The intention was to find the most suitable parameters for maximal reduction of chemical oxygen demand (COD) and colour of the wastewater. The COD target was set to 700 mg/l, which meant that the water would then be purified enough for post-processing purposes.

The thesis can be considered a success, since the water quality target was met. It also helped in the development of a full-scale electrocoagulation process. However, it is worth mentioning that energy efficiency and pretreatment could still be optimized to achieve lower operating costs.

Keywords: electrocoagulation, wastewater treatment, COD

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Elektrokoagulaation teoriaa	3
2.1	Elektrokoagulaatio menetelmänä	3
2.2	Elektrokoagulaatiomenetelmän vahvuudet ja heikkoudet	6
2.2.1	Vahvuudet	6
2.2.2	Heikkoudet	7
2.3	COD	7
3	Laitteisto	8
3.1	Laitteiston suunnittelu ja mitoitus	8
3.2	Laitteiston rakentaminen	10
3.3	Turvallisuus	11
4	Kokeellinen osuus	14
4.1	Edeltävät kokeet	14
4.2	Kokeiden suunnittelu	16
4.3	Ensimmäinen koeajo	18
4.4	Toinen koeajo	20
4.5	Kolmas koeajo	21
5	Tulokset	23
6	Tulosten tarkastelu	25
7	Johtopäätökset	27
	Lähteet	29

Liitteet

Liite 1: Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen elektrodien punnitustulokset

Liite 2: Alumiinista valmistettujen elektrodien punnitustulokset

Lyhenteet

BOD: *Biochemical Oxygen Demand*. Biokemiallinen hapenkulutus.

COD: *Chemical Oxygen Demand*. Kemiallinen hapenkulutus.

EC: *Electrocoagulation*. Elektrokoagulaatio.

PLA: *Polylaktidi*. 3D-tulostuksessa käytettävä materiaali.

TOC: *Total Organic Carbon*. Orgaanisen hiilen kokonaismäärä.

TSS: *Total Suspended Solids*. Suspensoituneen kiintoaineen kokonaismäärä.

1 Johdanto

Jäteveden puhdistuksessa voidaan hyödyntää monia erilaisia käsittelymenetelmiä. Yleisesti ottaen ne luokitellaan joko mekaanisiin, biologisiin tai kemiallisiin menetelmiin [1], ja itse puhdistusprosessi puolestaan jakautuu tyypillisesti neljään eri vaiheeseen, jotka ovat esikäsittely-, primääri-, sekundääri- ja tertiääri-vaihe [2, s. 164].

Esikäsittely- ja primäärivaiheissa käytetään pääosin mekaanisia käsittelymenetelmiä neste- ja kiintoainefaasien erottamiseksi toisistaan. Esikäsittelyvaiheessa karkea kiintoaine poistetaan, jotta se ei aiheuttaisi vahinkoa prosessilaitteille eikä häiriötä itse prosessille [2, s. 178]. Esimerkkejä mekaanisista sovelluksista ovat mm. sihdit, suodattimet ja selkeyttimet. Hienojakoisen kiintoaineen sekä kolloidisen aineen erotukseen käytetään lisäksi kemiallista flokkausta [3, s. 173].

Primäärivaiheessa jätevesi selkeytetään laskeutuksen tai flotaation avulla. Selkeytys voidaan suorittaa painovoimaisena, jos kiintoainepartikkelien tiheys on suurempi kuin veden tiheys. Gravitaatioselkeyttimessä jätevesi johdetaan joko selkeyttimen keskiöön tai alkuosaan riippuen siitä, käytetäänkö pyöreää vai suorakaiteen muotoista allasta. Selkeytynyt jätevesi poistuu vastaavasti altaan ulkoreunalta tai loppupäästä. Altaaseen laskeutuva liete kaavitaan pohjalta ja pumpataan lietteenkäsittelyyn [3, s. 173]. Flotaatiossa puolestaan jäteveteen johdetaan dispersiovettä paineenalaisesta järjestelmästä. Dispersiovesi sisältää liuennutta ilmaa, joka vapautuu hienokuplina paineen alentuessa. Ilmakuplat tarttuvat kiintoainepartikkeleihin nostaen ne selkeyttimen pintaan, ja pinnalle kerääntyvä liete kaavitaan lietesäiliöön. Puhdistettu jätevesi poistetaan pinnan alta. [3, s. 174.]

Sekundäärivaihe koostuu useimmiten biologisista käsittelymenetelmistä. Biologinen käsittely perustuu jätevedessä olevien mikrobien toimintaan. Tavallisin biologinen prosessi on niin kutsuttu aktiivilietemenetelmä. Jätevettä ilmastetaan,

eli veteen johdetaan pieniä ilmakuplia, jolloin jäteveden aerobiset bakteerit alkavat kasvaa ja lisääntyä. Kasvaessaan bakteerit kuluttavat jäteveden eloperäistä ainetta ja typpeä vapautuu ilmaan typpikaasuna [4]. Orgaanisesta hiilestä 60–70 % kuluu uusien mikrobisolujen muodostumiseen, ja solut käyttävät loput 30–40 % hiilestä energian tuottamiseen [3, s. 175]. Biologisilla prosesseilla voidaan poistaa liuenneita orgaanisia yhdisteitä, jotka aiheuttavat biokemiallista (BOD) ja kemiallista (COD) hapenkulutusta [3, s. 175].

Tertiäärivaiheen tarkoituksena on varmistaa jäteveden riittävä laatu, jotta sen voi laskea takaisin vesistöön. Sitä käytetään yleensä ympäristöluparajojen saavuttamiseksi. Tertiäärivaiheessa keskitytään erityisesti jäännös-COD:n ja värin poistamiseen jätevedestä [3, s. 181–182]. Mekaaninen suodatus, flotaatio ja hapetustekniikat ovat esimerkkejä tertiäärivaiheen sovelluksista [5, s. 20–21]. Myös kemiallista saostusta (koagulaatio + flokkulaatio) on yleisesti käytetty, mutta sen haittapuolia ovat korkeahkot käyttökustannukset sekä muodostuvan lietteen jatkokäytön vaikeudet [3, s. 181–182].

Tämän insinööriyön lähtökohtana oli käyttää elintarviketeollisuudessa syntyvän sokeripitoisen jäteveden puhdistuksen apuna elektrokoagulaatiomenetelmää. Kyseessä on sähkökemiallinen teknologia, joka yhdistää perinteisen koagulaation, flotaation ja sähkökemian hyödyt vesien ja jätevesien käsittelyssä [6, s. 5]. Insinööriyön aikana rakennettiin Econet Oy:n toimeksiannosta laboratoriomittakaavan elektrokoagulaatiolaitteisto, jolla puhdistettiin Econet Oy:n asiakasyrityksen toimittamia, elintarviketeollisuudesta peräisin olevia voimakkaan värisiä jätevesiä. Saatujen tulosten perusteella voitiin arvioida, sopiiko menetelmä edellä mainittujen jätevesien puhdistukseen, sekä mahdollisen teollisen mittakaavan laitteen mitoitus. Puhdistustuloksissa arvioitiin COD-reduktiota sekä värin poistoa.

2 Elektrokoagulaation teoriaa

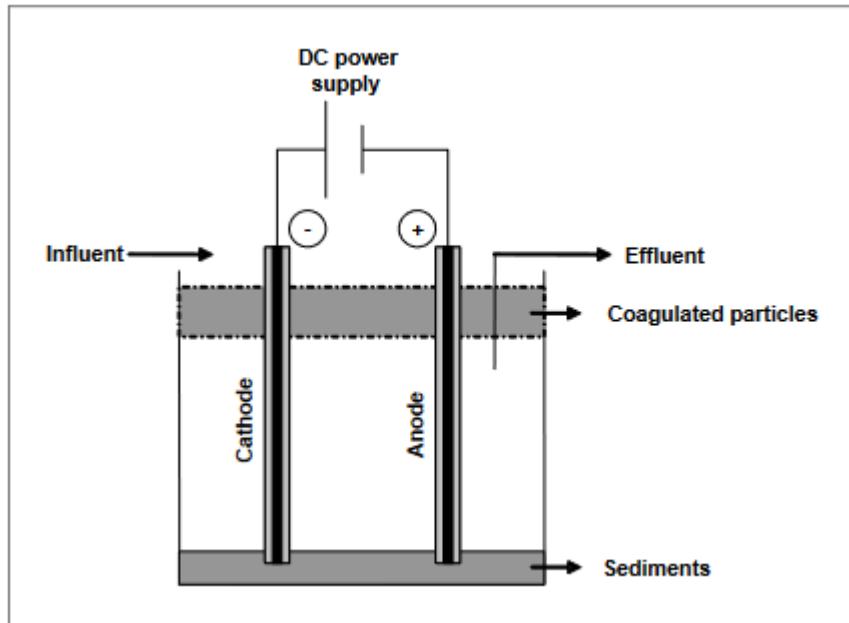
Elektrokoagulaatio (EC) on nykyisellään vakiintunut teknologia veden käsittelyssä. Kyseessä on sähkökemiallinen teknologia, joka on tunnettu jo yli vuosisadan ajan ja patentoitu 1900-luvun taitteessa. Teknologiaa ei kuitenkaan juuri käytetty vedenkäsittelyssä ennen 2000-lukua, sillä investointi- ja sähkökustannuksia pidettiin tuolloin liian korkeina muihin teknologioihin verrattuna [6, s. 25]. Tätä nykyä menetelmän käyttökustannukset ja energiankulutus ovat kuitenkin varsin alhaiset ($0,6\text{--}1,0 \text{ €/m}^3$; $0,75\text{--}1,1 \text{ kWh/m}^3$) [7], joten elektrokoagulaatio on ottanut paikkansa käyttökelpoisena teknologiana vedenkäsittelyn saralla. Elektrokoagulaatiota pidetään vihreänä teknologiana, sillä prosessiin ei yleensä tarvitse lisätä lainkaan kemikaaleja [6, s. 32]. Ympäristöystävällisyys onkin kasvattanut mielenkiintoa EC-menetelmää kohtaan globaalilla tasolla [6, s. 17].

2.1 Elektrokoagulaatio menetelmänä

Elektrokoagulaatiossa on kyse epäpuhtauksien saostamisesta elektrolyysin avulla käyttäen apuna liukenevaa metallianodia [8, s. 105]. Useimmiten anodimateriaalina käytetään rautaa tai alumiinia johtuen niiden hyvästä saatavuudesta, edullisesta hinnasta, myrkyttömyydestä ja todistetusta tehokkuudesta [6, s. 25].

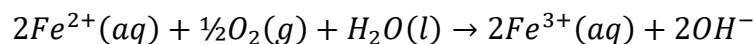
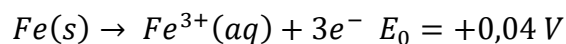
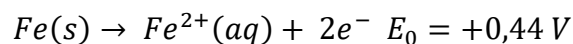
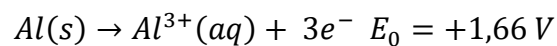
Elektrokoagulaation tarkoituksena on muodostaa saostumia ja seoksia kolloidien välille, jotta nämä yhdisteet voidaan erottaa. Koagulanttien irtoaminen jätevedeen tapahtuu elektrolyytisesti: anodielektrodi, yleensä Fe tai Al, liukenee. Kun elektrodi on liennut, vapautuu kaasua (O^2 , H^2), mikä aiheuttaa flotaatiota. Flotaation tehostamiseksi voidaan käyttää flokkausainetta, mikäli siihen on tarvetta. [9, s. 203.]

Yksinkertaisimmassa muodossaan elektrokoagulaatiolaitteistoon kuuluu elektrolyyttinen kenno, joka sisältää anodin ja katodin (kuva 1). Kun elektrodit on yhdistetty tasavirtalähteeseen, anodilla (positiivinen elektrodi) tapahtuu hapetusreaktio ja katodilla (negatiivinen elektrodi) puolestaan pelkistysreaktio. [9, s. 204.]

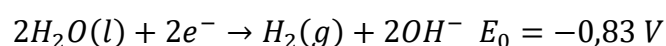


Kuva 1. Havainnekuva elektrokoagulaatiosta [9, s. 203.]

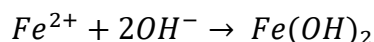
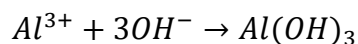
Elektrokoagulaation aikana anodilla tapahtuvissa reaktioissa anodimetalli hapettuu. Rauta liikenee käytännössä aina kahdenarvoisena, mutta mikäli veden happipitoisuus on riittävä, se voi hapettua kolmenarvoiseksi [6, s. 26]:



Katodilla tapahtuvassa reaktiossa vesimolekyyli hajoaa vetykaasuksi ja hydroksidi-ioneiksi [6, s. 26]:



Al^{3+} - tai Fe^{2+} -ionit muodostavat alumiini- tai rautahydroksidia katodilla vapautuneen OH^{-} :n kanssa [8, s. 105]:



Tietyissä pH-arvossa (6–8) saostuneet hydroksidit edistävät kolloidien samanaikaista koaguloitumista tai hiutaloitumista. Elektrokoagulaatio edistää poistettavien epäpuhtauksien yhtäaikaista saostumista. [8, s. 105.]

Elektrokoagulaatioprosessin jälkeen voidaan mahdollisuuksien mukaan hyödyntää elektroflotaatiota. Tällöin elektrolyysi hajottaa veden H²- ja O²-kaasuiksi muodostaen kaasukuplia, joiden vaikutuksesta flotaatio tapahtuu. Tämä toimintatapa soveltuu erityisesti pienen kokoluokan laitteistoihin, joiden sähkönkulutus on vähäistä. [9, s. 204.]

Elektrokoagulaatio soveltuu seuraavien substanssien poistamiseen:

- laskeutuvat, suspendoituvat ja liukenemattomat kiintoaineet
- kolloidiset partikkelit
- eläin- ja kasvirasvat
- orgaaniset yhdisteet (BOD, COD)
- ravinteet (esim. fosfaatit)
- oksidimuotoiset raskasmetallit tai liukenemattomat Fe- tai Al-saokset
- epäorgaaniset suolat
- kompleksiset orgaaniset molekyylit (esim. väriaineet)
- öljyemulsiot
- bakteerien ja virusten inaktivointi [9, s. 204].

Elektrokoagulaatiota ei kuitenkaan yleisesti ottaen pidetä erityisen sopivana tekniikkana liuenneiden orgaanisten molekyylien poistamiseen, vaikka COD-arvon putoamista onkin havaittu monissa eri tapauksissa. Konsensus onkin se, että elektrokoagulaatiosta on enemmän hyötyä raskasmetallien, emulsioiden ja kolloidien poistamisessa [9, s. 204]. Esimerkiksi kobolttia on laboratorio-olosuhteissa saatu poistettua EC-menetelmää käyttäen peräti 98,66 %, ja mangaania

98,22 % [10]. Emulsioiden tapauksessa COD-arvon putoaminen on ollut jopa 95 %:n luokkaa, ja väri poistui vedestä 99-prosenttisesti [11].

Sokerin poistamista elektrokoagulaatiomenetelmää käyttäen on tehty tois-
taiseksi melko vähän. Erään sokeriruokoa prosessoivan tehtaan jätevesistä ha-
vaittiin, että elektrokoagulaatiolla voitiin saavuttaa 85 %:n COD-reduktio ja 89
%:n värireduktio, kun pH oli 6,5, elektrodien etäisyys 20 mm, virrantiheys 156
Am⁻² ja elektrolyytin konsentraatio 0,5 M (NaCl). Kun elektrokoagulaatioproses-
sin jälkeen lisättiin kemialliseksi koagulantiksi ferrosulfaattia, jonka massakon-
sentraatio oli 5 mM, COD-reduktioksi saatiin 98 % ja värin reduktioksi 99,7 %.
[12.]

2.2 Elektrokoagulaatiomenetelmän vahvuudet ja heikkoudet

2.2.1 Vahvuudet

Elektrokoagulaatiolaitteisto on fyysisesti melko pienikokoinen, ja isoja sekoitus-
tai sedimentointialtaita ei yleensä tarvita. Laitteiston suunnittelu, asennus ja
käyttö on suhteellisen helppoa ja yksinkertaista. Laitteisto voidaan automati-
soida, ja tekniikka sisältää hyvin vähän tai ei ollenkaan liikkuvia osia; täten yllä-
pitokustannukset pysyvät alhaisina. [6, s. 32.]

Kiinteän ja nestemäisen aineksen erottelu on tehokkaampaa elektro-
koagulaation ansiosta. Elektrokoaguloitu sakka on keskimäärin parempilaatuista
kuin tavanomainen fysikaalis-kemiallinen sakka. EC myös madaltaa suuresti
muodostuvan sakan määrää, mikä on jälkikäsitellyä ajatellen hyvä asia. Muo-
dostuvat lietepartikkelit ovat suurempia, vakaampia ja helpompia kuivattaa.
Elektrokoaguloitujen jätevedet sisältävät vähemmän liukenemattomia orgaanisia
aineita kuin fysikaalis-kemialliset. [6, s. 32; 9, s. 205.]

Menetelmän avulla on mahdollista poistaa hyvin pieniä kolloidisia partikkeleita.
Muodostuvat ilmakuplat työntävät kevyttä lietettä ylöspäin, jolloin se on helppo
poistaa pinnalta. Kemikaaleja ei välttämättä tarvita prosessissa lainkaan, sillä

koagulantti vapautuu anodireaktion myötä. Funktionaalinen pH-alue, jolla elektrokoagulaatio toimii, on varsin laaja; parhaiten prosessin hyödyt saadaan kuitenkin esiin mahdollisimman neutraalissa pH:ssa. Parhaassa tapauksessa jätevesi voidaan jopa neutraloida EC:n avulla. [6, s. 32; 9, s. 205.]

2.2.2 Heikkoudet

Anodimetalli liukenee jäteveteen hapettumisreaktion myötä, ja tästä syystä anodielektrodit on vaihdettava säännöllisesti. Anodien epätasainen liukenevuus voi pienentää EC:n hyötysuhdetta. Kun liukenevana anodimateriaalina käytetään rautaa, se voi aiheuttaa veden värjäytymistä. [9, s. 205.]

Elektrodien passivoitumista voi tapahtua etenkin silloin, kun niiden materiaalina käytetään alumiinia. Passivoituminen rajoittaa metallin liukenemista, ja näkyy energiankulutuksen lisääntymisenä. Anodin passivoituminen tapahtuu hapettamalla, jolloin sen pinnalle muodostuu oksidikerros. [6, s. 33.] Katodin passivoitumisessa puolestaan saostumat kertyvät pinnalle, mikä aiheuttaa sähkönkulun estymisen [9, s. 205].

Optimaalisesti toimiakseen elektrokoagulaatio tarvitsee sopivan veden johtokyvyn. Teolliset jätevedet sopivat prosessiin korkean ionikonsentraationsa vuoksi, mutta luonnonvesien ja vain vähän saastuneiden jätevesien johtokykyä tarvitsee nostaa elektrolyytin, kuten NaCl:n avulla. Riippuen veden johtokyvystä ja epäpuhtauksista, tarvittava sähkökapasiteetti saattaa nousta huomattavasti. [6, s. 33; 9, s. 205.]

2.3 COD

Kemiallista hapenkulutusta (Chemical Oxygen Demand, COD) käytetään mittaamaan orgaanisten yhdisteiden määrää vedessä. COD-analyysissä selviää hapen määrä, jonka orgaaniset yhdisteet tarvitsevat hapettuakseen [9, s. 47]. COD-testin hyötynä on erityisesti sen nopeus, sillä sen tekeminen kestää vain noin kahdesta kolmeen tuntia [2, s. 40].

Eniten käytetyissä COD-seurantamenetelmissä käytetään hapettavana aineena dikromaattia, ja epäorgaanisen kloridin vaikutusta vaimentavat elohopeasuolat. COD:ta mitatessa täytyy huomioida myös suspendoituneiden kiintoaineiden kokonaismäärä (TSS), sillä TSS:n poistotehokkuus vaikuttaa COD:n määrään [9, s. 47–48]. EU:ssa on pohdittu COD-analyysin korvaamista Total Organic Carbon (TOC) -analyysillä jätevesien puhdistuksen monitoroinnissa, sillä REACH-asetus rajoittaa COD-analyysissä käytettävän kaliumdikromaatin käyttöä [13]. TOC-arvolla tarkoitetaan orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneen hiilen määrää [9, s. 51].

Tässä työssä tavoitteena oli saavuttaa COD-arvoksi 700 mg/l. Tällöin jätevesi olisi ISO 6060 -standardin [14] mukaisten raja-arvojen sisällä (30–700 mg/l) ja riittävän puhdasta jatkokäsittelyä varten.

3 Laitteisto

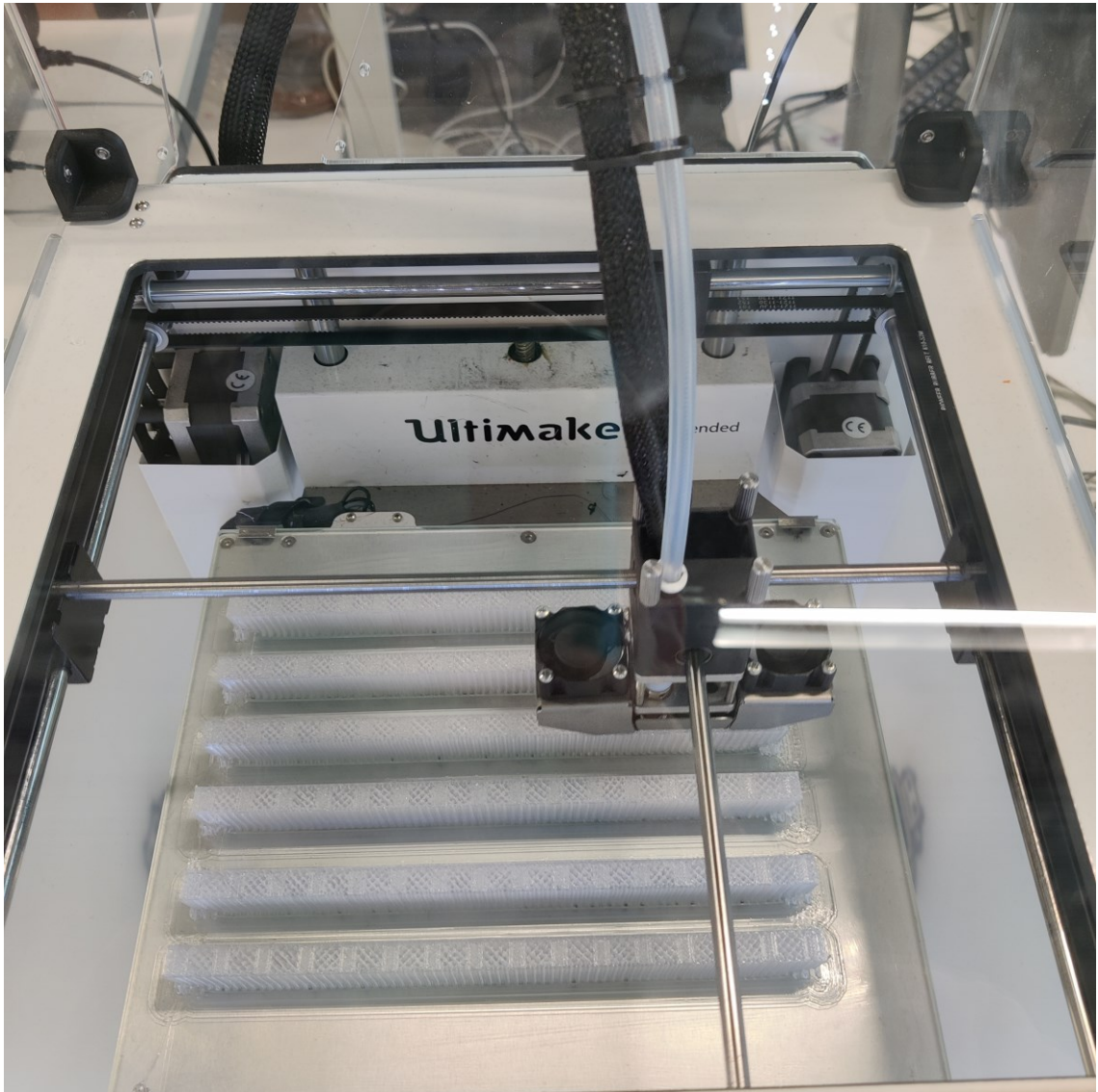
3.1 Laitteiston suunnittelu ja mitoitus

Elektrokoagulaatiolaitteistoja on olemassa kahta eri tyyppiä: laitteisto, jossa käytetään levyanodeja ja -katodeja sekä laitteisto, jossa käytetään itsepuhdistuvaa rengasanodia [8, s. 106–107]. Tämän insinööriyön laitteistossa käytettiin levyelektrodimenetelmää.

Kokeellista osuutta varten suunniteltiin vetokaappiin mahtuva laboratoriomittakaavan elektrokoagulaatiolaitteisto. Laitteiston tilavuudeksi tuli 14 litraa, ja elektrodilevyjä laitteeseen mahtuu yhteensä 14 kappaletta. Elektrodien materiaaleiksi valittiin ruostumaton teräs sekä alumiini niiden hyvän saatavuuden ja kustannustehokkuuden ansiosta. Kaikki elektrodit olivat kooltaan 200 mm x 200 mm x 3 mm.

Kaikki rakenneosat valmistettiin läpinäkyvästä 4 mm:n paksuisesta akryylillevystä, pois lukien elektrodien kiinnikkeet, jotka valmistuivat 3D-tulostamalla

polylaktidi (PLA)-filamentista (kuva 2). Kiinnikkeiden mallinnus tapahtui Tinkercad-ohjelmistoa käyttäen.



Kuva 2. 3D-tulostettavat elektrodien kiinnikkeet.

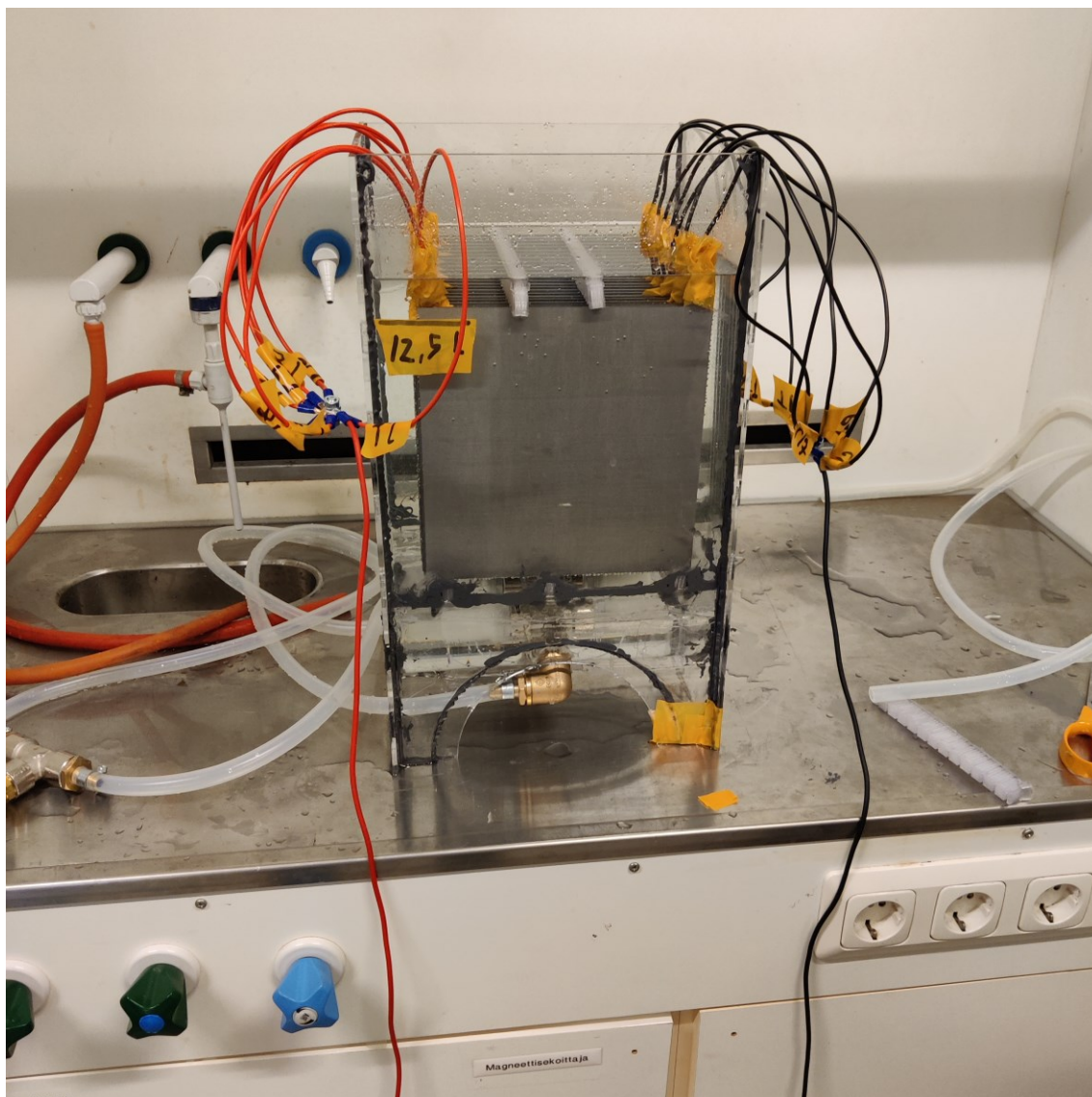
Lisäksi laitteen alaosaan suunniteltiin sekoitinputkisto, jonka avulla paineilmaa pystyttiin hyödyntämään prosessissa niin esikäsittelyvaiheessa kuin varsinaisten kokeidenkin aikana.

3.2 Laitteiston rakentaminen

Akryylileikkeiden valmistuksessa hyödynnettiin Metropolian Arabian kampuksen teollisen muotoilun osaamista ja laitteistoa, ja elektrodien leikkaus muotoonsa tapahtui Myyrmäen kampuksen konetekniikan laboratorion Prima Power -laserleikkurilla.

Akryyliosat sekä elektrodien kiinnikkeet liimattiin yhteen Acrifix 192 -akryylimuoviliimalla, ja annettiin kuivua vuorokauden ajan. Elektrodeihin kiinnitettiin puristettavien kaapelikenkien avulla sähköjohdot, jotka saatiin liitettyä tasavirtasuuntaajaan banaaniliittimin. Lopuksi sekoitinputkisto ruuvattiin kiinni laitteiston alaosaan.

Laitteiston nestetiiviys varmistettiin siten, että laitteisto täytettiin vedellä haluttuun tilavuuteen asti (kuva 3).



Kuva 3. Valmis elektrokoagulaatiolaitteisto.

Vuotojen tilkitsemiseksi laitteiston saumoihin lisättiin täyteaineeksi silikonia, ja kun laitteiston todettiin olevan nestetiivis, se oli valmis käytettäväksi.

3.3 Turvallisuus

Kun jännitettä nostetaan riittävästi, vety- ja happikaasun tuotto on mahdollista. Happikaasua syntyy anodilla, vetykaasua katodilla. Prosessissa vapautuva vetykaasu saattaa muodostaa räjähdysalttiin seoksen ilman ja syntyvän

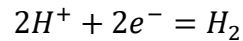
happikaasun kanssa. Vety on erittäin helposti syttyvä kaasu, ja vedyn ja ilman seoksen sytyttämiseen riittää 0,02 mJ:n energia. Sen syttymisrajat ovat 4–75,6 %. [15.]

Jännitteen nousu ehkäistiin käyttämällä tasavirtasuuntaajaa QPX750SP, johon voitiin asettaa maksimijännite (kuva 4).



Kuva 4. Tasavirtasuuntaaja QPX750SP.

Vetykaasun muodostuminen tapahtuu seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



sillä kaasumuotoinen vety esiintyy kaksiatomisena molekyylinä. Vetykaasun ainemäärän muodostuminen laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$\frac{It}{zF} = n \quad (1)$$

jossa

- I on sähkövirta [A]
- t on aika [s]
- z on anodin liueteissa vapautuvien elektronien määrä
- F on Faradayn vakio
- n on ainemäärä [mol].

Oletettiin, että sähkövirta on 50 ampeeria ja koe kestää 60 sekuntia:

$$\frac{50 \text{ A} * 60 \text{ s}}{2 * 96485 \text{ As/mol}} = 0,015546 \text{ mol}$$

Vetykaasua syntyy 60 sekunnissa:

$$0,015546 \text{ mol} * 22,43 \frac{\text{dm}^3}{\text{mol}} = 0,348707 \text{ dm}^3 \rightarrow 0,000349 \text{ m}^3$$

Vetokaapin virtaukseksi mitattiin ~18,7 m³/h -> 0,311667 m³/min. Tällöin vetykaasua muodostui vetokaapissa:

$$\frac{0,000349 \text{ m}^3/\text{min}}{0,311667 \text{ m}^3/\text{min}} = 0,001119 \rightarrow 0,11 \%$$

Vetykaasun muodostuminen vetokaapissa jäi siis selvästi syttymisrajan (4 %) alle, joten kokeiden suorittaminen oli turvallista.

4 Kokeellinen osuus

Kokeellisessa osuudessa käsiteltävä vesi oli elintarviketeollisuudesta peräisin olevaa, punaiseksi värjäytynyttä jätevettä, jonka COD oli korkea sen sokeripitoisuuden vuoksi. Käsiteltäväksi oli saatu 14 litraa näytettä kutakin koeajoa varten. Kokeissa käytetty COD-mittausmenetelmä oli Palintest COD/20000 [16].

4.1 Edeltävät kokeet

Ennen varsinaista kokeellista osuutta tehtiin testiajo A (kuva 5). Testiajossa käytettiin koeastianana 10 cm x 15 cm x 20 cm:n kokoista dekantterilasia, johon asetettiin yksi pari ruostumattomasta teräksestä valmistettuja elektrodeja (10 cm x 10 cm). Laitteeseen syötettiin sähkövirtaa tasavirtasuuntaajalla QPX750SP. EC-saostettu näyte suodatettiin, ja suodos saostettiin lisäämällä polymeeriä 20 mg/l. Polymeerien lisäyksen jälkeen näyte suodatettiin vielä kerran uudelleen.



Kuva 5. Testiajo A:n koejärjestely. Vasemmalla peristalttinen pumppu, keskellä koeastia elektrodeineen, oikealla tasavirtasuuntaaja.

Testiajon aikana otettiin neljä näytettä (kuva 6), joista saatiin mitattua seuraavat COD-arvot:

- A0 (käsittelemätön näyte): 6 700 mg/l
- A1 (EC-saostettu näyte): 5 700 mg/l
- A2 (EC-saostettu ja suodatettu näyte): 5 200 mg/l
- A3 (polymeerillä saostettu ja uudelleen suodatettu näyte): 4 200 mg/l.



Kuva 6. Näytteet vasemmalta oikealle: A0, A1, A2 ja A3.

Todettiin, että suodatus ei ole tehokasta, sillä syntyvä sakka tukki suodattimen jatkuvasti. Polymeerisaostuksen ansiosta COD aleni ja näytteen väri kirkastui, joten kokeissa edettiin seuraavaan vaiheeseen, eli koeajoihin B, C ja E.

4.2 Kokeiden suunnittelu

Koesuunnitelma tehtiin testiajon A pohjalta. Suunniteltiin kolme koeajoa, jotka merkittiin B, C ja E. Ajoissa B ja E käytettiin ruostumattomasta teräksestä (AISI 304) valmistettuja elektrodeja, C-ajossa alumiinista (EN AW-5754) valmistettuja elektrodeja. B-ajossa ei tehty esikäsittelyä, kun taas ennen C- ja E-ajoja näyte esikäsiteltiin. Esikäsitteilynä käytettiin tarkoitukseen soveltuvaa Econet Oy:n suunnittelemaa biologista prosessia. B-ajon jälkeen näytteitä saostettiin polymeeriliuoksella; C- ja E-ajoissa ei käytetty polymeerisaostusta. Kokeita oli tarkoitus ajaa siihen asti, kunnes faasit alkoivat erottua toisistaan.

Virrantiheys on oleellinen parametri kokeellisessa osuudessa, ja se saadaan laskettua kaavalla

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

jossa J on virrantiheys [A/m^2], I virta [A] ja A virran läpäisemä pinta-ala [m^2].

Lähtökohtana oli saada laitteistosta irti niin paljon kuin mahdollista. Tästä syystä kokeissa päätettiin käyttää niin monta elektrodia kuin laitteistoon mahtuu, eli 14 kappaletta. Jokaisen elektrodin pinta-ala oli 0,2 m x 0,2 m. Kirjallisuudesta löydettyjen tietojen perusteella virrantiheyden arvo 100 A/m^2 toistui useaan otteeseen erilaisten jätevesien elektrokoagulaatioprosessien optimaalisissa olosuhteissa [6, s. 75; 17; 18]. Jotta virrantiheys saatiin mahdollisimman lähelle haluttua 100 A/m^2 :n lukemaa, päädyttiin kahdessa ensimmäisessä koeajossa syöttämään laitteistoon sähkövirtaa 50 ampeerin verran. Näin virrantiheydeksi saatiin 96,2 A/m^2 . Kolmannessa koeajossa kokeiltiin, mitä vaikutusta sähkövirran pienemmällä annostelulla on ajon kannalta. Sähkövirraksi asetettiin 30 A, ja tällöin virrantiheys oli 58 A/m^2 .

Parametrit, joihin kokeellisessa osuudessa päädyttiin, nähdään taulukosta 1.

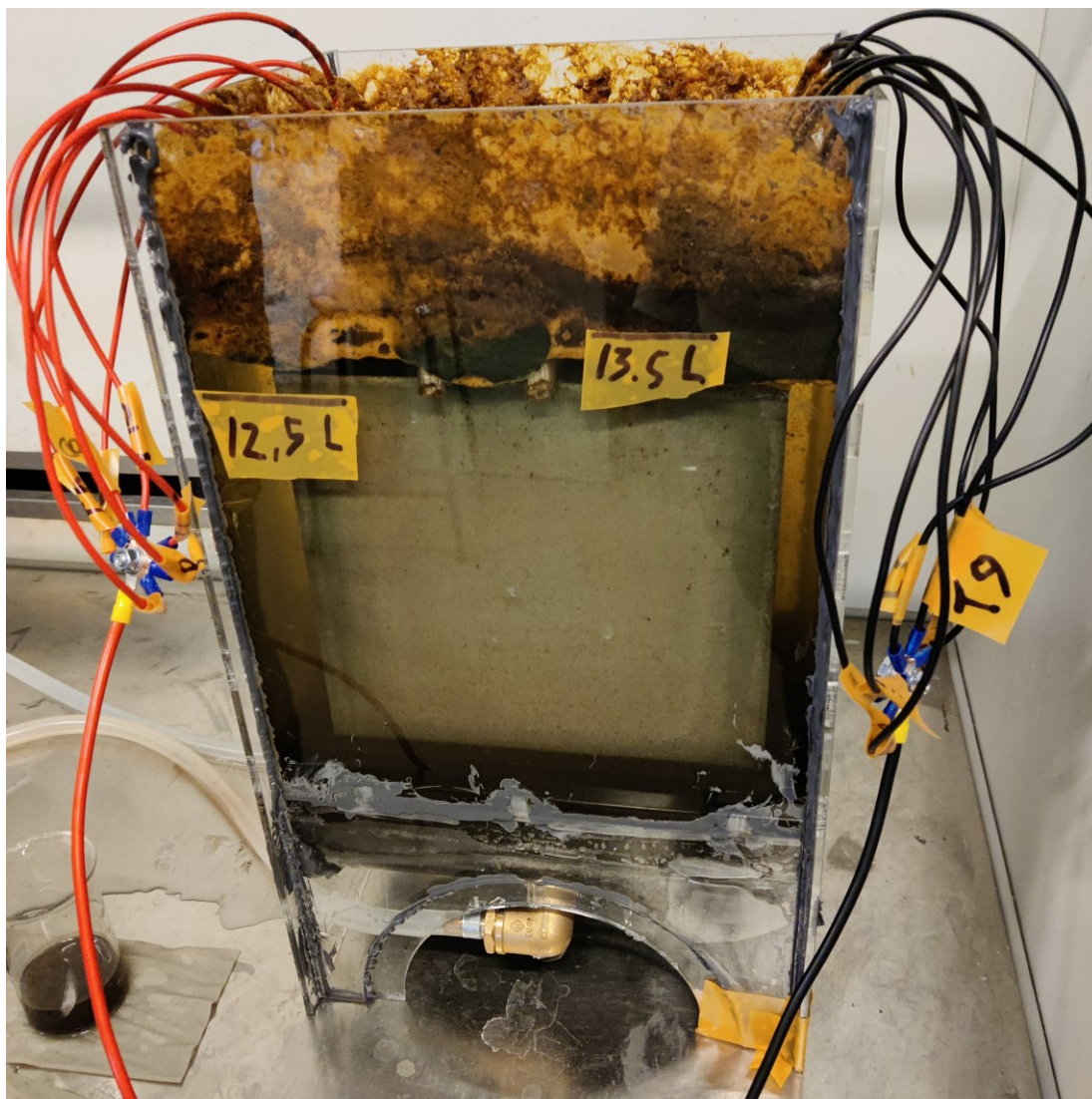
Taulukko 1. Kokeellisen osuuden parametrit.

Koeajo	Elektrodit	Esikäsittely	Saostus	Virrantiheys
B	ruostumaton teräs AISI 304	ei	polymeeri	96,2 A/m^2
C	alumiini EN AW-5754	kyllä	ei	96,2 A/m^2
E	ruostumaton teräs AISI 304	kyllä	ei	58 A/m^2

COD-mittausta varten näytteen pinnalta pipetoitiin 0,2 ml ennen ja jälkeen jokaisen ajon. Tavoitteena oli saada COD-arvoksi alle 700 mg/l. Myös näytteen väri oli tarkoitus saada niin kirkkaaksi kuin mahdollista.

4.3 Ensimmäinen koeajo

Ensimmäisessä koeajossa (B) käytössä oli 14 kappaletta ruostumattomasta teräksestä valmistettuja elektrodeja. Ajo kesti 33,5 minuuttia, virta oli 50 ampeeria ja virrantiheys 96,2 A/m². Näytettä ei esikäsitelty. Sakan muodostuminen oli runsasta (kuva 7).



Kuva 7. Ensimmäinen koeajo (B) ennen polymeerien lisäystä. Sakkaa on muodostunut sekä pinnalle että pohjalle.

Kokeen aikana otettiin viisi 100 ml:n näytettä, jotka merkittiin B0–B4. Näytteestä B0 COD mitattiin ennen ajoa, näytteestä B1 ajon jälkeen. Näytteisiin B2, B3 ja B4 lisättiin ajon jälkeen flokkausaineeksi 0,1-prosenttista polymeeriliuosta:

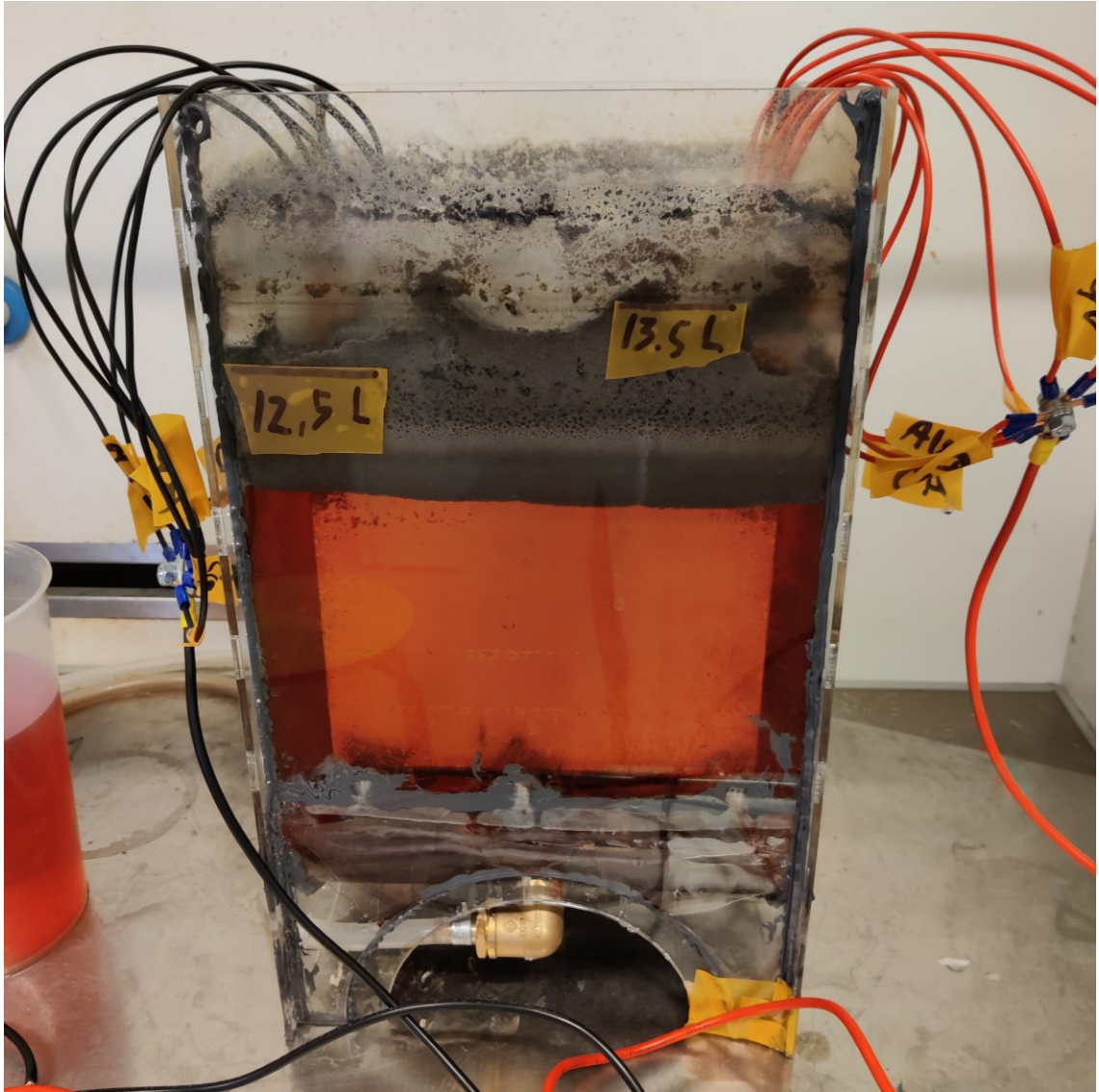
- B2: nonioninen, 10 ml
- B3: keskianioninen, 10 ml
- B4: korkea-anioninen, 10 ml + korkeakationinen, 2 ml.

Polymeerin syöttämisen jälkeen syntynyttä liuosta sekoitettiin lasisauvalla noin minuutin ajan ja jätettiin tekeytymään, kunnes muodostuva sakka laskeutui

dekanterilasin pohjalle. Polymeerien annettiin vaikuttaa näytteisiin useamman vuorokauden ajan, minkä jälkeen niiden pinnalta pipetoitiin 0,2 ml:n näytteet COD-mittausta varten.

4.4 Toinen koeajo

Toisessa koeajossa (C) käytössä oli 14 kappaletta alumiinista valmistettuja elektrodeja. Näytteelle tehtiin esikäsitely. Ajo kesti 8 minuuttia virran ollessa 50 ampeeria ja virrantiheyden $96,2 \text{ A/m}^2$. Sakka muodostui pinnalle nopeasti, mutta näytteelle tunnusomaisen punaisen värin poistuminen oli heikohkoa (kuva 8).



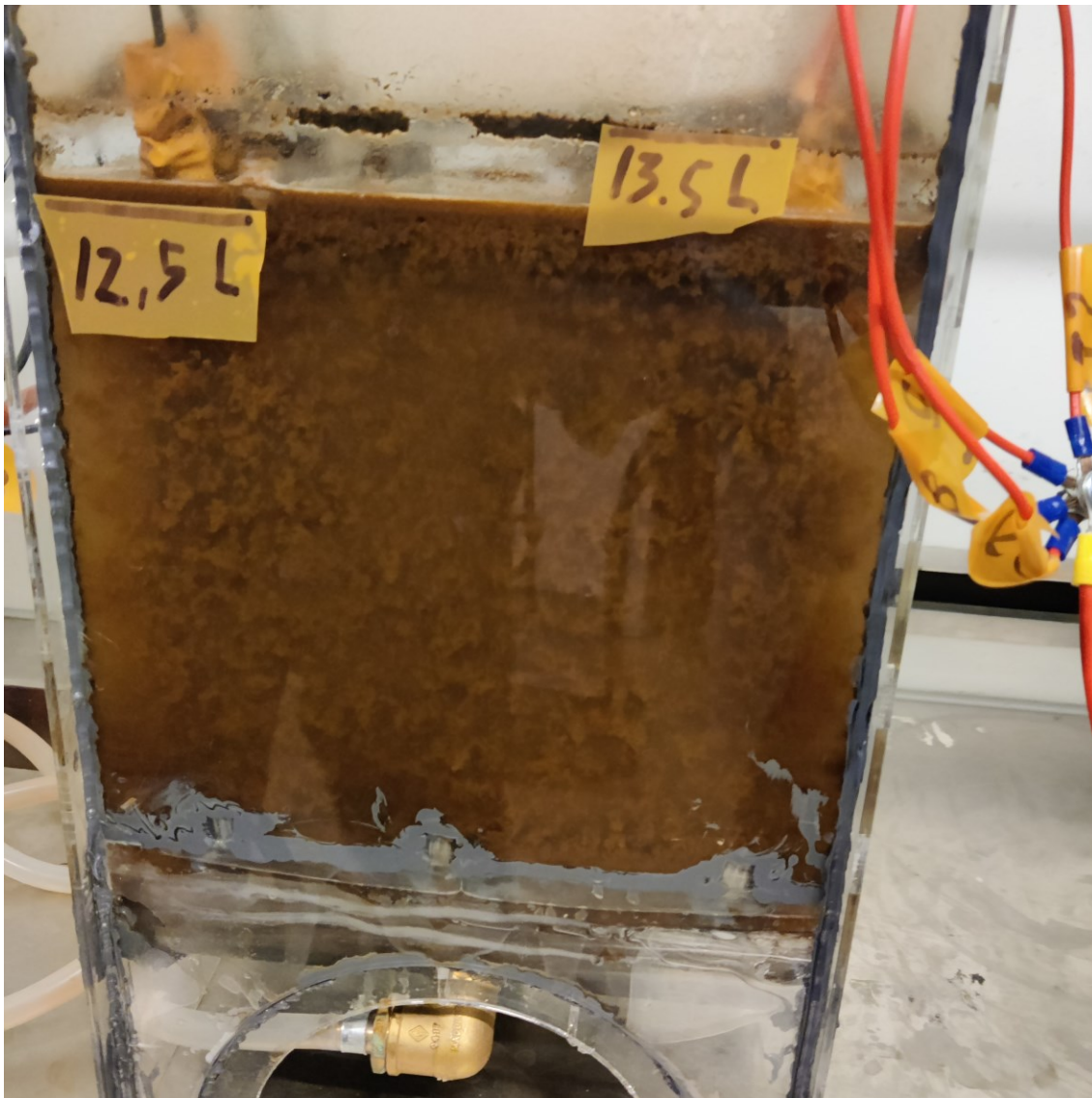
Kuva 8. Toisen koeajon (C) jälkeen. Faasit ovat erottuneet selvästi, ja sakka nousut pinnalle. Väri on pysynyt punertavana.

Näytteen pinnalta pipetoitiin COD-mittausta varten neljä 0,2 ml:n näytettä, jotka merkittiin C0–C3. COD-arvot mitattiin ennen ja jälkeen sekä esikäsittelyn että ajon.

4.5 Kolmas koeajo

Kolmannessa koeajossa (E) käytössä oli 14 kappaletta ruostumattomasta teräksestä valmistettuja elektrodeja. Näytteelle tehtiin esikäsittely. Ajo kesti 30

sekuntia virran ollessa 30 ampeeria ja virrantiheyden 58 A/m^2 . Sakka alkoi muodostua hyvin nopeasti (kuva 9), ja tästä syystä koetta ei tarvinnut jatkaa pidemmälle.



Kuva 9. Kolmas koeajo (E) päättynyt. Sakka on alkanut muodostua.

Myös kolmannen koesarjan aikana näytteen pinnalta pipetoitiin neljä 0,2 ml:n näytettä, jotka merkittiin E0–E3. COD-arvot mitattiin ennen ja jälkeen sekä esikäsittelyn että ajon.

5 Tulokset

Kokeen aikana laitteessa kulkevan sähkövarauksen määrä saatiin laskettua seuraavalla kaavalla:

$$It = Q \quad (3)$$

jossa I on sähkövirta ampeereina, t on aika sekunteina ja Q on sähkövaraus ampeerisekunteina.

Koeajon B sähkövaraus:

$$50 \text{ A} * 2010 \text{ s} = 100\,500 \text{ As} \rightarrow 27,9 \text{ Ah}$$

Koeajon C sähkövaraus:

$$50 \text{ A} * 480 \text{ s} = 24\,000 \text{ As} \rightarrow 6,667 \text{ Ah}$$

Koeajon E sähkövaraus:

$$30 \text{ A} * 30 \text{ s} = 900 \text{ As} \rightarrow 0,25 \text{ Ah}$$

Taulukosta 2 nähdään ensimmäisen koeajon tulokset. Näyte B0 on otettu ennen ajoa (0 Ah). Näytteet B1–B4 on otettu ajon jälkeen (sähkövaraus 27,9 Ah).

Taulukko 2. Ensimmäisen koeajon (B) tiedot.

Näyte	Sähkövaraus	COD	Polymeeri
B0	0	2 500 mg/l	Ei lisätty
B1	27,9 Ah	4 300 mg/l	Ei lisätty
B2	27,9 Ah	4 500 mg/l	Nonioninen 10 ml
B3	27,9 Ah	4 300 mg/l	Keskianioninen 10 ml
B4	27,9 Ah	4 100 mg/l	Korkea-anioninen 10 ml + korkeakationinen 2 ml

COD-tavoitteesta (700 mg/l) jäätiin varsin kauaksi. Huomionarvoista on, että COD-arvo nousi merkittävästi elektrokoagulaation jälkeen.

Taulukosta 3 nähdään toisen koeajon tulokset. Näyte C0 on otettu ennen esikäsitteilyvaihetta. Näytteet C1 ja C2 on otettu esikäsitteilyvaiheen jälkeen. Näyte C3 on otettu ajon jälkeen (sähkövaraus 6,667 Ah).

Taulukko 3. Toisen koeajon (C) tiedot.

Näyte	Sähkövaraus	COD	Polymeeri
C0	0	4 000 mg/l	Ei lisätty
C1	0	2 500 mg/l	Ei lisätty
C2	0	2 600 mg/l	Ei lisätty
C3	6,667 Ah	1 500 mg/l	Ei lisätty

Toisessa ajossa päästiin jo selvästi lähemmäksi haluttua COD-tavoitetta.

Taulukosta 4 nähdään kolmannen koeajon tulokset. Kolmannen ajon näytteistä E0 on otettu ennen esikäsitteilyvaihetta, E1 esikäsitteilyn jälkeen, E2 ja E3 ajon jälkeen (sähkövaraus 0,25 Ah).

Taulukko 4. Kolmannen koeajon (E) tiedot.

Näyte	Sähkövaraus	COD	Polymeeri
E0	0	3 700 mg/l	Ei lisätty
E1	0	1 700 mg/l	Ei lisätty
E2	0,25 Ah	400 mg/l	Ei lisätty
E3	0,25 Ah	400 mg/l	Ei lisätty

Kolmannessa ajossa päästiin viimein COD-tavoitteeseen (700 mg/l tai alle).

6 Tulosten tarkastelu

Elektrodit punnittiin ennen ja jälkeen ensimmäisen ja toisen koeajon. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen elektrodien punnitustulokset nähdään liitteestä 1. Parittomat elektrodit olivat toimineet katodeina ja niiden punnitustulos on jätetty huomiotta massahäviön laskemisessa.

Elektrodien massahäviö laskettiin kaavalla

$$x = \frac{(x_2 + x_4 + x_6 + \dots + x_n)}{n} \quad (4)$$

jossa x on keskiarvo, ja aineiston muodostaa jono $x_2, x_4, x_6, \dots, x_n$, eli anodielektrodien massan erotus. Havaintojen lukumäärä n on tässä tapauksessa 7.

$$\frac{(2,23 \text{ g} + 1,25 \text{ g} + 2,04 \text{ g} + 2,64 \text{ g} + 2,72 \text{ g} + 2,91 \text{ g} + 2,79 \text{ g})}{7} = 2,369 \text{ g}$$

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen anodien keskimääräiseksi massahäviöksi saatiin 2,369 g.

Alumiinista valmistettujen elektrodien punnitustulokset nähdään liitteestä 2. Myös alumiinielektrodien kohdalla parittomat elektrodit olivat toimineet kato-deina ja niiden punnitustulokset jätettiin huomioimatta massahäviön laskemisessa.

Anodeina toimineen alumiinielektrodien keskimääräinen massahäviö laskettiin niin ikään kaavaa 3 käyttäen, ja tulokseksi saatiin vain 0,177 g. Tähän vaikuttaa etenkin koeajojen pituuksien vaihtelu — koeajo B kesti peräti 33,5 minuuttia, kun taas koeajo C vain 8 minuuttia.

Ruostumattoman teräksen massahäviö ampeerituntia kohti oli

$$\frac{2,369 \text{ g}}{27,9 \text{ Ah}} = 0,085 \text{ g/Ah}$$

Alumiinin massahäviö ampeerituntia kohti oli

$$\frac{0,177 \text{ g}}{6,667 \text{ Ah}} = 0,027 \text{ g/Ah}$$

Ruostumattoman teräksen massahäviö ampeerituntia kohti oli siis miltei 3,2 kertaa suurempi kuin alumiinin. Kolmannen koeajon jälkeen punnitusta ei tehty, sillä sitä ei katsottu tarpeelliseksi ajon matalan virrankulutuksen takia.

Polymeereillä ei ollut mainittavaa vaikutusta B-koesarjan COD-reduktioon eikä värin poistoon, joten niiden lisäys jätettiin pois koesarjojen C ja E näytteistä. Koesarja E:ssä käytössä olleella pienemmällä virrantiheydellä (58 A/m^2) puolestaan päästiin huomattavasti nopeammin parempaan lopputulokseen kuin koesarjoissa B ja C, joissa virrantiheytenä oli $96,2 \text{ A/m}^2$.

Kaikki asiakasyrityksen toimittamat näytteet eivät olleet keskenään täysin samanlaisia, mikä nähdään alku-COD:n vaihtelusta. Koesarja B:ssä COD-arvo yllättäen nousi kokeiden jälkeen, minkä syy ei täysin selvinnyt. Aikataulullisista syistä näytteiden annettiin seistä vetokaapissa noin viikon verran ennen polymeerien lisäyksiä, mutta tämä ei yksistään selitä asiaa. COD-näytteet pipetoitiin

aina jäteveden pinnalta, joten voi olla, että koesarja B:n näyte ei välttämättä ollut tasalaatuinen. Käytetyssä COD-mittausmenetelmässä saattoi myös olla epävarmuutta.

7 Johtopäätökset

Menetelmä katsottiin soveltuvaksi tämän teollisuudenalan jätevesiin, sillä sen avulla päästiin haluttuun COD-tulokseen. Vaikka testatulla laitteistolla päästiin vaadittuun veden laatuun, on kuitenkin syytä uskoa, että energiankulutusta ja esikäsitteilyä voidaan vielä optimoida alhaisempien käyttökustannuksien aikaansaamiseksi. Esimerkiksi sähkövirran annostelua prosessiin voitaisiin parannella optimaalisen virrantiheyden aikaansaamiseksi.

Kokeista saatujen tulosten perusteella ruostumaton teräs sopii anodimateriaaliksi alumiinia paremmin, etenkin värin poistamiseen. Ruostumaton teräs kuitenkin jätti näytteeseen lievän keltaisen värin. Tämä luultavasti johtuu ruostumattomasta teräksestä liukenevasta kromista, joka hapettuu kuudenarvoiseksi. Kuudenarvoisen kromin päästämiseksi vesiin on hyvin tiukat raja-arvot, ja mikäli kromi näkyy veden värissä, sitä lienee jo liikaa. Siksi anodimateriaalina on jatkossa syytä käyttää ruostumattoman teräksen sijaan tavallista terästä.

Massahäviöiden suhteen alumiinielektrodit puolestaan toimivat paremmin, sillä niiden massahäviö ampeerituntia kohden oli jopa 3,2 kertaa pienempi kuin ruostumattomalla teräksellä. Ajojen pituuserojen takia massahäviön laskemisessa on kuitenkin huomattavan paljon epävarmuutta, ja yhden koesarjan perusteella ei vielä voida vetää kovinkaan pitkälle meneviä johtopäätöksiä asian suhteen.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin keskittyä massahäviöiden tarkempaan määrittämiseen. Luotettavampien COD-tulosten saamiseksi COD-mittaukset olisi myös syytä varmentaa sekä validoida. Epäselväksi jäi etenkin se, johtuiko koesarja B:ssä havaittu COD:n merkittävä nousu näytteiden ottamisesta, käsittelystä vai

mistä. COD-mittausten hinta voi niin ikään nousta varsin korkeaksi, joten kustannusten minimoimista silmällä pitäen niiden tilalle voisi mahdollisesti ottaa jonkin toisen mitattavan suureen, joka korreloisi COD:n kanssa.

Käytetty esikäsittely todettiin tehokkaaksi elektrokoagulaatiota tukevaksi menetelmäksi, kun taas polymeerisaostuksen hyödyt jäivät varsin minimaalisiksi. Työtä voi kaiken kaikkiaan pitää onnistuneena, sillä se auttoi teollisen mittakaavan laitteiston suunnittelussa.

Lähteet

- 1 Jätevedenpuhdistamolla tapahtuu. Verkkoaineisto. Suomen ympäristökeskus. <<https://www.vesi.fi/vesitieto/jatevedenpuhdistamolla-tapahtuu/>>. Luettu 24.5.2023.
- 2 von Sperling, Marcos. 2007. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. Biological Wastewater Treatment Series, Volume One. London: IWA Publishing.
- 3 Seppälä, Markku J.; Klemetti, Ursula; Kortelainen, Veli-Antti; Lyytikäinen, Jorma; Siitonen, Heikki & Sironen, Raimo. 2002. Paperimassan valmistus. 2-1. Saarijärvi: Gummerus.
- 4 Jätevedenpuhdistusprosessi. Verkkoaineisto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. <<https://www.hsy.fi/vesi-ja-viemarit/jatevedenpuhdistusprosessi-lyhyesti/>>. Luettu 24.5.2023.
- 5 Koivuniemi, Jenni. 2016. Teollisuuden jätevesien puhdistukseen liittyvän uuden teknologian kaupallistaminen. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 6 Kuokkanen, Ville. 2016. Utilization of electrocoagulation for water and wastewater treatment and nutrient recovery: techno-economic studies. Väitöskirja. Oulun yliopisto.
- 7 Krystynik, Pavel; Kluson, Petr; Masin, Pavel; Syc, Michal; Jadrny, Josef & Krusinova, Zuzana. 2023. Implementation of electrocoagulation for reduction of Zn in an outlet stream from waste incineration plant. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. Vol. 188.
- 8 Suomen Galvanotekninen Yhdistys – Finlands Galvanotekniska Förening ry. 2003. Pintakäsittelylaitosten vesien käsittely. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 9 Brinkmann, Thomas; Giner Santonja, Germán; Yükseler, Hande; Roudier, Serge & Delgado Sancho, Luis. 2016. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).
- 10 Jain, Ananya; Rai, Saumitra; Srinivas, Rallapalli & Al-Raoush, Riyadh I. 2022. Bioinspired modeling and biogeography-based optimization of electrocoagulation parameters for enhanced heavy metal removal. Journal of Cleaner Production. Vol. 338.

- 11 Meas, Yunny; Ramirez, José A.; Villalon, Mario A. & Chapman, Thomas W. 2010. Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochimica Acta*. Vol. 55, issue 27.
- 12 Sahu, Omprakash. 2019. Electro-oxidation and chemical oxidation treatment of sugar industry wastewater with ferrous material: An investigation of physicochemical characteristic of sludge. *South African Journal of Chemical Engineering*. Vol. 28, s. 26–38.
- 13 Assessment of Chemical Oxygen Demand/Total Organic Carbon (COD/TOC) ratios in refinery effluents. Verkkoaineisto. Concawe. <<https://www.concawe.eu/publication/assessment-of-chemical-oxygen-demand-total-organic-carbon-cod-toc-ratios-in-refinery-effluents/>>. Luettu 12.6.2023.
- 14 ISO-6060. Water quality – Determination of the chemical oxygen demand. 1989. Genève: International Organization of Standardization.
- 15 Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Vety. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://ova.ttl.fi/vety>>. Luettu 26.8.2023.
- 16 COD/20000. Photometric test for Chemical Oxygen Demand in effluents and wastewater. Verkkoaineisto. Palintest. <<https://www.palintest.com/tests/cod-20000/>>. Luettu 5.5.2023.
- 17 Ozay, Yasin; Kökdemir Ünşar, Elçin, Işık, Zelal; Yılmaz, Fatih; Dizge, Nadir; Perendeci, N. Altınay; Mazmanci, M. Ali & Yalvac, Mutlu. 2018. Optimization of electrocoagulation process and combination of anaerobic digestion for the treatment of pistachio processing wastewater. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 196, s. 42–50.
- 18 Özyonar, Fuat & Korkmaz, Mehmet Utku. 2022. Sequential use of the electrocoagulation-electrooxidation processes for domestic wastewater treatment. *Chemosphere*. Vol. 290.

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen elektrodien punnitus tulokset

Elektrodi	Massa ennen (g)	Massa jälkeen (g)	Massan erotus (g)
Ruostumaton teräs 1	974,62	973,91	0,71
Ruostumaton teräs 2	978,88	976,65	2,23
Ruostumaton teräs 3	976,29	975,76	0,53
Ruostumaton teräs 4	977,85	976,60	1,25
Ruostumaton teräs 5	979,88	979,42	0,46
Ruostumaton teräs 6	976,90	974,86	2,04
Ruostumaton teräs 7	971,17	970,90	0,27
Ruostumaton teräs 8	976,42	973,78	2,64
Ruostumaton teräs 9	979,67	979,26	0,41
Ruostumaton teräs 10	976,38	973,66	2,72
Ruostumaton teräs 11	961,86	961,65	0,21
Ruostumaton teräs 12	973,69	970,78	2,91
Ruostumaton teräs 13	976,01	975,65	0,36
Ruostumaton teräs 14	975,15	972,36	2,79

Alumiinista valmistettujen elektrodien punnitustulokset

Elektrodi	Massa ennen (g)	Massa jälkeen (g)	Massan erotus (g)
Alumiini 1	345,48	345,54	-0,06
Alumiini 2	345,97	345,67	0,3
Alumiini 3	345,38	345,40	-0,02
Alumiini 4	345,60	345,41	0,19
Alumiini 5	346,06	346,16	-0,1
Alumiini 6	345,45	345,39	0,06
Alumiini 7	345,79	345,89	-0,1
Alumiini 8	345,61	345,49	0,12
Alumiini 9	346,21	346,20	0,01
Alumiini 10	345,69	345,55	0,14
Alumiini 11	346,44	346,45	-0,01
Alumiini 12	344,97	344,59	0,38
Alumiini 13	347,59	348,01	-0,42
Alumiini 14	345,28	344,88	0,4