



Tuure Järvilehto

Mikrolevänerottelulaitteen kehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

28.10.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Tuure Järvilehto
Otsikko: Mikrolevänerottelulaitteen kehitys
Sivumäärä: 51 sivua + 1 liite
Aika: 28.10.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine: Koneensuunnittelu
Ohjaajat: Pekka Salonen

Opinnäytetyössä kehitettiin lyhyen kirjallisuuskatsauksen pohjalta pienikokoinen mikrolevänerottelulaite. Työn lopuksi laitteella testattiin mikro-suodatusta, elektro-suodatusta ja elektrokoagulaatiota mikrolevän viljelyliuoksen erottelussa. Tavoitteena oli kehittää laite, joka toimii erotteluprosessin ensimmäisenä vaiheena.

Työ toteutettiin Metropolian Urban & Local -hankkeelle projektiyhteistyössä SMC Automationin kanssa. SMC Automation toimitti ruostumattomasta teräksestä valmistettuja sintrattuja suodatinelementtejä, joita testattiin erottelulaitteessa elektro-suodatuksen. Lisäksi SMC toimitti laitteessa käytetyt letkut ja liittimet.

Työn alussa toteutettiin lyhyt kirjallisuuskatsaus, jossa perehdyttiin yleisimpiin mikrolevänerottelumenetelmiin. Kirjallisuuskatsaus toimi perustana erottelulaitteen kehitykselle. Tämän jälkeen kehitetty erottelulaite valmistettiin manuaalikoneistuksen ja 3D-tulostuksen keinoin. Lopuksi laitteen toimivuutta testattiin alustavilla kokeilla.

Testit osoittivat elektro-suodatuksen vähentävän suodatinelementin pintaan kertyvän suodatinkakun muodostumista mikro-suodatuksen verrattuna. Elektrokoagulaatiotesteissä mikrolevää ei onnistuttu täysin koaguloimaan, mutta koagulanttina toimivan raudan todettiin värjäävän biomassan ruskeaksi. Elektrokoagulaation ja -suodatuksen yhdistämisellä lyhyissä testeissä saavutettiin energiakustannuksen kannalta paras tulos, mutta kyseisissä testeissä suodatinelementti myös likaantui eniten.

Avainsanat: elektrokoagulaatio, elektro-suodatus, mikrolevä

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Tuure Järvilehto
Title: Development of Microalgae Separation Device
Number of Pages: 51 pages + 1 appendix
Date: 28 October 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Mechanical design
Supervisor: Pekka Salonen

In this thesis, a small-scale microalgae separation device was developed based on a brief literature review. The device was used to test microfiltration, electrofiltration, and electrocoagulation for separating microalgae from its cultivation medium. The goal was to develop a device that would function as the first stage in the separation process.

The thesis was completed as a part of the Urban & Local project in collaboration with SMC Automation, who provided stainless steel sintered metal filters for testing in electrofiltration. In addition, SMC provided the hoses and connectors needed for the separation device.

In the beginning, a brief literature review was conducted to find the commonly known microalgae separation methods. This worked as the basis for the development process, after which the developed device was fabricated by the means of machining and 3D-printing. After this, the device's performance was evaluated with preliminary tests.

The test results indicated that electrofiltration reduced the formation of a filter cake on the filter element surface compared to conventional microfiltration. With electrocoagulation, the algae could not be completely coagulated and the iron used as coagulant was observed to cause discoloration of the algae. The combination of electrofiltration and -coagulation yielded the best result regarding the energy cost of filtrate but also the most fouling of the filter was observed.

Keywords: Electrocoagulation, electrofiltration, microalgae

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Työn tavoitteet, rajaus ja rakenne	1
2.1	Tavoitteet ja rajaus	1
2.2	Työn rakenne	2
2.2.1	Kirjallisuuskatsaus	2
2.2.2	Kehitysvaihe	2
2.2.3	Valmistusvaihe	3
2.2.4	Testausvaihe	3
3	Mikrolevät elintarvikkeena	3
4	Mikrolevän erottelumenetelmät	4
4.1	Suodatus	5
4.2	Koagulaatio ja flokkulaatio	7
5	Kehitysvaihe	11
5.1	Konseptit	12
5.2	Laitteen suunnittelu	14
5.2.1	Materiaalivalinnat	14
5.2.2	Elektrodikokoonpano	15
5.2.3	Erottelukammio	17
5.2.4	Pumppuyksikkö	19
6	Valmistusvaihe	20
6.1	Koneistetut osat	20
6.2	3D-tulosteet	21
6.3	Pumppuyksikkö	23
6.4	Pääkokoonpano	25
7	Testaus	27
7.1	Materiaalit ja menetelmät	27
7.1.1	Prosessituotteiden alkuainepitoisuudet	27

7.1.2	Kiintoainepitoisuus	28
7.1.3	Optinen tiheys	29
7.1.4	Testeissä käytetty mikrolevä	29
7.1.5	Testijärjestely	30
7.1.6	Energiakustannus	31
7.2	Mikrosuodatustesti	32
7.3	Elektrosuodatustesti 12 V:n jännitteellä	33
7.4	Elektrosuodatustesti 6 V:n jännitteellä	36
7.5	Elektrokoagulaatiotesti	38
7.6	Yhdistetty elektrosuodatus ja -koagulaatio	41
8	Tulokset ja niiden analysointi	44
9	Johtopäätökset	47
10	Yhteenveto	48
	Lähteet	49
	Liitteet	
	Liite 1: Testien parametrit ja tulokset	

Lyhenteet

- EDX: *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*. Ainetta rikkomaton analysointitekniikka, jolla saadaan tietoa näytteen sisältämien alkuaineiden määristä.
- FAO *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö.
- In situ Latinankielinen ilmaus, joka tarkoittaa ilmiön, mittauksen tai käsittelyn tapahtumista alkuperäisessä paikassa.
- RST: Ruostumaton teräs.
- WHO *World Health Organization*. Maailman terveysjärjestö.

1 Johdanto

Mikrolevät ovat yksisoluisia, makeissa ja suolaisissa vesissä kasvavia, fotosynteesiin kykeneviä mikro-organismeja. Luonnossa ne hyödyntävät auringonvaloa, hiilidioksidia sekä vesistöissä esiintyviä ravinteita, kuten typpeä ja fosforia biomassan tuotantoon. Vesistöjen ekosysteemeissä ne toimivat perustuottajina, muodostaen näiden ravintoverkon perustan [1]. Maailmanlaajuisesti mikrolevät ovat merkittävä osa luonnollista hiilensidontaa ja niiden kerrotaan tuottavan jopa noin puolet ilmakehän hapesta [2].

Ne ovat lupaava raaka-aine elintarviketeollisuuden tarpeisiin, sillä ne sisältävät runsaasti proteiineja, vitamiineja ja hyödyllisiä rasvahappoja. Kosmetiikka- ja lääketeollisuudessa voidaan hyödyntää mikrolevistä eristettyjä yhdisteitä, kuten antioksidantteja ja pigmenttejä. [3.] Lisäksi mikroleviä voidaan hyödyntää kaupunkien, maatalouden ja teollisuuden jätevesien ravinteiden talteenotossa [4].

Vaikka mikrolevillä on monia lupaavia ominaisuuksia, niiden tuotannon teolliseen mittakaavaan skaalaaminen ja korkeat tuotantokulut luovat haasteita. Alan kirjallisuudessa suurimmaksi haasteeksi on usein nimetty biomassan erottelu. Mikrolevät ovat tyypillisesti kooltaan alle 30 µm, tiheydeltään hyvin lähellä viljelyliuoksen tiheyttä ja ne kasvavat suhteellisen laimeissa konsentraatioissa (kuivapaino noin 0,2–0,5 g/l). Tästä syystä erottelussa täytyy käsitellä lopputuotteen saantiin nähden suuria nestemääriä. [5, s. 500.]

2 Työn tavoitteet, rajaus ja rakenne

2.1 Tavoitteet ja rajaus

Mikrolevän erottelu viljelyliuoksesta on monivaiheinen prosessi. Työn tavoitteena on kehittää pienikokoinen mikrolevänerottelulaite, joka toimii tämän prosessin ensimmäisenä vaiheena. Opinnäytetyö on osa Metropolian Urban & Local -hankkeen mikrolevänerotteluprojektia, joka on toteutettu yhteistyössä SMC

Automation Oy:n kanssa. SMC toimittaa sintrattuja metallisuodatinelementtejä testattavaksi mikrolevän erotteluun. Lisäksi SMC toimittaa tarvittavat letkut ja liittimet. Työn aikana perehdytään myös muihin yleisesti tunnettuihin mikrolevänerottelumenetelmiin, jonka pohjalta omavalmisteinen laite suunnitellaan, valmistetaan ja lopuksi tämän toimivuutta testataan. Työ on toteutukseltaan hyvin kokeellinen ja virheiden kautta oppimista vaaliva kokonaisuus, jossa haastavaan ja laajaan aihealueeseen on tavoitteena tutustua käytännön tekemisen kautta.

2.2 Työn rakenne

2.2.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksen aikana perehdytään mikrolevän erottelua käsittelevään tutkimuskirjallisuuteen. Tämän tavoitteena on tutustua yleisesti tunnettuihin mikrolevänerottelumenetelmiin ja löytää ideoita erottelulaitteen kehittämiseen ja tunnistaa erityisesti mikrolevän elintarviketuotantoon parhaiten soveltuvat menetelmät. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta valitaan muutama tällainen menetelmä, joihin syvennyttään kappaleessa 4.

2.2.2 Kehitysvaihe

Työn pääpaino on erottelulaitteen kehitys- ja valmistusvaiheissa. Aluksi määritetään suunniteltavan laitteen lähtövaatimukset. Näiden pohjalta hahmotellaan muutama konsepti, joista valitaan kehityskelpoisin vaihtoehto. Kehitysvaiheen loppupuolella laite 3D-mallinnetaan Autodesk Fusion 360 -ohjelmistolla. Suunnitellut osat pyritään suunnittelemaan geometrian ja materiaalien puolesta sellaisiksi, että ne ovat helposti pestävissä ja ettei niistä liukene aineita prosessoitavaan nesteeseen.

2.2.3 Valmistusvaihe

Tässä vaiheessa suunnitellut osat valmistetaan ja hankitaan osat, joita saa valmiina, jonka jälkeen näistä kootaan itse erottelulaite. Omavalmisteisten osien valmistamiseen käytettävissä olevat menetelmät ovat:

- FDM-3D-tulostus
- CNC- ja manuaalikoneistus
- hitsaus
- laserleikkaus ja särmäys.

2.2.4 Testausvaihe

Testausvaiheessa projektin aikana valmistetulla erottelulaitteella tehdään alustavia testejä, joiden perusteella laitteen toimivuutta arvioidaan. Testien yhteydessä tehdyt laboratorioanalyysit on toteutettu rajallisella laboratoriotyöskentelykokemuksella, joten tulokset tulee tulkita suuntaa antavina.

3 Mikrolevät elintarvikkeena

Mikrolevää on hyödynnetty elintarvikkeena jo satoja vuosia. Atsteekkien kerrotaan käyttäneen Texcoco-järvestä kerättyä spiruliinaa (*Arthrospira platensis* tai *Arthrospira maxima*) ravinnokseen jo 1300-luvulla [6]. Nykyisin tunnistettuja mikrolevälajeja löytyy yli 40 000 lajia [7]. Tunnistetuista lajeista bioteknologisesti oleellisimpia viherlevälajeja ovat mm. *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluvialis*, *Dunaliella salina*, ja *Spirulina maxima*, jotka ovat jo laajasti kaupallisessa käytössä pääasiassa ravintolisinä ihmisille ja eläimille. [8, s. 462.]

Lähes kaikissa sovelluksissa, joissa kuivattua leväbiomassaa jatkokäsitellään, täytyy tämän nestepitoisuuden olla alle 10 %. Liiallinen kosteus nopeuttaa biomassan pilaantumista tukemalla bakteerien, homeen ja sienien kasvua. Kosteuspitoisuus alle 7 % on teknisesti realistinen ja riittää estämään mikrobien kasvun. [8, s. 463.]

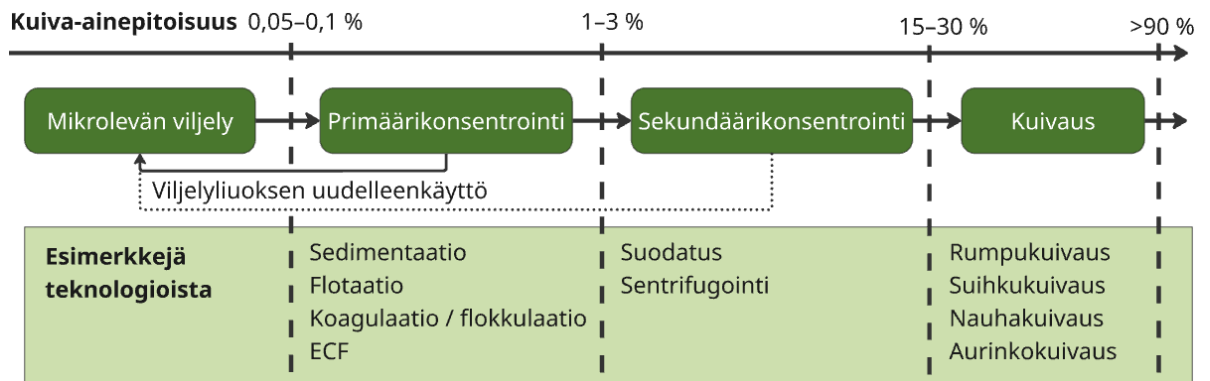
Monien levälajien uloin soluseinä koostuu selluloosasta, jota ihmisen ruoansulatus ei pysty rikkomaan. Ainoastaan märehäivien eläimien ruoansulatus kykenee hajottamaan tämän soluseinämän. Tuotettaessa mikrolevää elintarvikekäyttöön, tulee se prosessoida niin, että sen uloin soluseinä rikkoontuu. Tähän kuitenkin poikkeus on esim. Spiruliina, jonka soluseinä ei ole este proteiineja pilkkoville entsyymeille. [8, s. 465–466.]

4 Mikrolevän erottelumenetelmät

Mikrolevän erotteluun käytetään nykyisin mekaanisia, biologisia, kemiallisia ja sähköön perustuvia menetelmiä [5, s. 500; 9, s. 1490]. Yleistä on käyttää näistä kahden tai useamman menetelmän yhdistelmää korkeamman erottelunopeuden ja alhaisempien erottelukustannusten saavuttamiseksi [9, s.1490]. Kaksivaiheisen erotteluprosessin kerrotaan laskevan erottelun kustannuksia jopa yli kymmenkertaisesti [10].

Erotteluprosessin vaiheille ei vaikuttaisi vielä olevan tiettyä vakiintunutta kaavaa, mutta yleisesti prosessi jaetaan vähintään kahteen vaiheeseen. Eri lähteissä näitä vaiheita kutsutaan esimerkiksi paksuntamiseksi ja vedenpoistoksi (eng. thickening and dewatering), primääri- ja sekundäärikonsentroidiksi tai korjuuksi ja vedenpoistoksi [9–11]. Koska kummankin vaiheen tavoite on nostaa mikrolevän konsentraatiota, lienee selkeintä käyttää termejä primääri- ja sekundäärikonsentroidiksi.

Visigalli ym. [10] listaavat primäärikonsentroidimenetelmiksi mm. sedimentaation, flotaation, koagulaation ja flokkulaation sekä elektrokoagulaatioflotaation (ECF). Tällaisilla menetelmillä mikroleväsuspension kuiva-ainepitoisuus pystytään nostamaan tyypillisesti noin 1...3 %:iin. Kuvassa 1 on esitetty mikrolevänerotteluprosessin vaiheita havainnollistava kaavio.



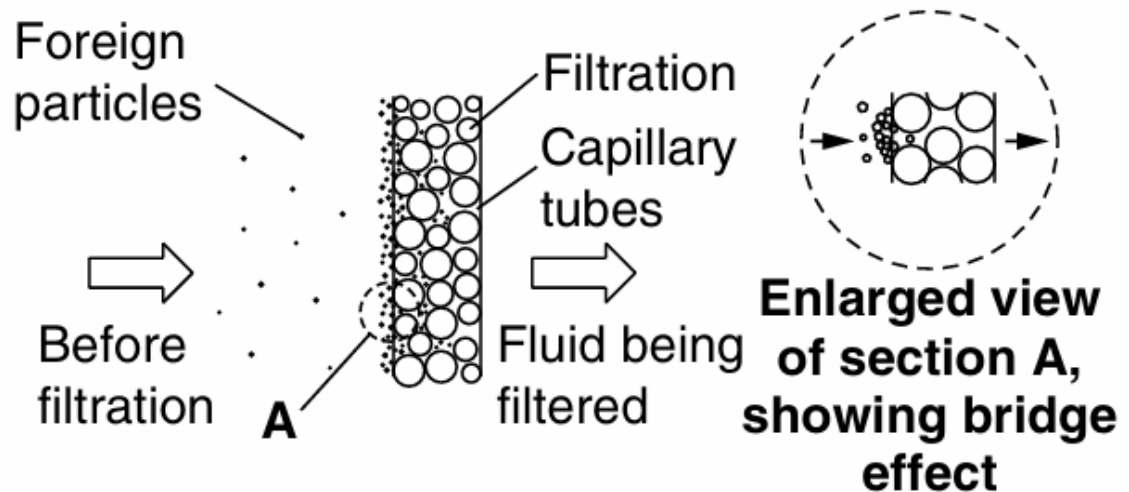
Kuva 1. Mikrolevänerotteluprosessin vaiheet [10].

Kirjallisuuskatsauksessaan Singh ja Patidar [5] vertailivat mikrolevän erottelumenetelmiä niiden ominaisuuksien perusteella. Vertailussa tarkasteltiin ominaisuuksia kuten biomassan laatu, määrä, kustannus, prosessointiaika, lajisoveltavuus ja myrkyllisyys. Vertailun tuloksena tutkimuksessa nimettiin elintarvikekäyttöön parhaiksi erottelumenetelmiksi koagulaatio ja flokkulaatio, sentrifugointi ja suodatus.

Monissa lähteissä kerrotaan mikrolevän erottelun muodostavan jopa 20–30 % mikrolevän tuotantokustannuksista, viitaten suhteellisen vanhoihin lähteisiin. Fasaei ym. [11, s. 355] tarkastelivat teknistaloudellisessa analyysissään 28 erilaista suuren mittakaavan mikrolevänerottelun tapausta ja raportoivat erottelukustannusten osuuden olevan nykyisin 3–15 %, josta merkittävä osuus on työn kustannus. Tutkimuksessa todettiin, että erottelun kustannukset avoaltaissa kasvatetulle mikrolevälle ovat 0,3–2,0 €/kg levää, ja suljetuissa fotobioreaktoreissa alle 0,5 €/kg.

4.1 Suodatus

Suodatus on yksi yleisimmistä tunnetuista fyysisistä erottelumenetelmistä, jolla ilma- tai nestevirroista pystytään erottelemaan kiintoainetta, pisaroita tai mikroorganismeja. Erottelu perustuu huokoiseen väliaineeseen, jonka ainoastaan eroteltavan seoksen kaasu-/nestefaasi pystyy läpäisemään (kuva 2). [12.]



Kuva 2. Havainnekuva sintratin suodatinelementin toiminnasta [13].

Suodatusprosessi voidaan luokitella esimerkiksi ajavan voiman tai suodatusmekanismien perusteella. Eri suodatusmekanismeja ovat mm. pintasuodatus, kakku-suodatus ja syväsuodatus. Syväsuodatuksessa partikkelit jäävät kiinni suodatinväliaineen kanaviin, kun taas kakku- ja pintasuodatuksessa partikkelit jäävät väliaineen pinnalle. Suodatuksen ajavana voimana voi toimia yli- tai alipaine, painovoima tai (näennäinen) keskipakoisvoima. Suodatuksen tavoite voi olla nesteen kirkastus, kiintoaineen talteenotto tai molemmat. [12.] Mikrolevänerotellussa päätavoite on biomassan talteenotto, mutta myös viljelyliuos tulisi kerätä talteen tämän uudelleenkäyttöä varten, veden ja ravinteiden kulutuksen vähentämiseksi.

Mikrolevän erottelu viljelyliuoksesta suodatuksen avulla on haasteellista mikroleväsolujen mikroskooppisen pienen koon vuoksi. Esimerkiksi *Chlorella vulgaris*-solut ovat halkaisijaltaan vain noin 2–10 μm [2]. Koska tavoitteena on leväsolujen talteenotto, ei niiden haluta tunkeutuvan väliaineen sisälle, joten mikrolevien erotteluun hyödynnetään joko mikro- tai ultrasuodatusta. Mikrosuodattimiin luokitellaan huokoskooltaan 0,1–10 μm suodattimet ja ultrasuodattimiin ne, joiden huokoskoko on 1–100 nm [9, s. 1497]. Tällaisilla suodattimilla leväsolut kertyvät suodattimen pinnalle muodostaen suodatinkakun, joka heikentää virtausta suodattimen läpi. Suodatinkakun kertymisen ehkäisemiseen on monia keinoja, kuten ristivirtaussuodatus, dynaaminen suodatus ja elektro-suodatus [14].

Elektrosuodatus

Elektrosuodatus on elektroforeesiin perustuva menetelmä, jossa suodatinelementin pinnalle muodostuvan kakun kertymistä pyritään ehkäisemään luomalla suodattimen pinnalle sähkökenttä, joka hylkii pintavaraukseltaan negatiivisia mikroleväsoluja [15]. Jotta suodattimen pinnalle saadaan luotua sähkökenttä, täytyy suodattimen johtaa sähköä. Tämä voidaan toteuttaa pinnoittamalla suodatinmembraani sähköä johtavalla materiaalilla [15], tai yksinkertaisesti käyttämällä suodatinelementtiä, joka on valmistettu luonnostaan sähköä johtavasta materiaalista, kuten ruostumattomasta teräksestä (RST).

Elektrosuodatuksessa suodattimen on toimittava katodina, jotta tämä hylkii pintavaraukseltaan negatiivisia mikroleväsoluja. Anodimateriaaliksi tulisi valita elektrokemiallisesti inertti materiaali, jotta tästä ei elektrolyysissä liukenisi ainetta nesteeseen. Tällaisia materiaaleja ovat mm. titaani ja grafiitti [16, s. 202; 17, s. 13].

4.2 Koagulaatio ja flokkulaatio

Koagulaatio ja flokkulaatio ovat kaksi peräkkäin tapahtuvaa prosessia, joita tyypillisesti hyödynnetään jätevesien käsittelyssä suspendoituneen kiintoaineen erotteluun nesteestä [18]. Mikrolevän erotteluun koagulaatio ja flokkulaatio on myös todettu toimivaksi ja tätä on jopa ehdotettu parhaimmaksi erottelun menetelmäksi sen skaalattavuuden ja laajan lajisoveltuvuuden vuoksi [5, s. 502].

Aihetta käsittelevään kirjallisuuteen tutustuessa käy nopeasti ilmi, että termejä käytetään jokseenkin ristiin puhuttaessa ilmiöstä tai prosessista, jonka seurauksena partikkelit kertyvät ryppäisiin eli flokkeihin. Kirjassaan *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, John Bratby määrittelee termit seuraavasti:

- Koagulaatio on prosessi, jossa tietty suspensio tai liuos destabiloidaan. ts. koagulaation tehtävä on kumota tekijät, jotka ylläpitävät järjestelmän stabiilisuutta.

- Flokkulaatio on prosessi, jossa destabiloituneet hiukkaset tai destabiloitumisen seurauksena muodostuneet partikkelit saataan yhteen, jolloin ne joutuvat kosketuksiin ja muodostavat näin suurempia agglomeraatteja. [19.]

Bratbyn määritelmä ei siis välitä siitä, onko suspension destabiloituminen saatu aikaan esim. metallisuoloilla vai polymeereilla. Suspension destabiloiva aine on koagulantti, ja tästä seuraavaa flokkiintumista edistävät aineet ovat flokkulantteja.

Koagulointiin voidaan käyttää epäorgaanisia ja/tai orgaanisia koagulantteja. Esimerkkejä epäorgaanisista koagulanteista ovat mm. alumiinisulfaatti ($Al_2(SO_4)_3$), ferrisulfaatti ($Fe_2(SO_4)_3$) ja ferrikloridi ($FeCl_3$). [20.] Näistä alumiinisulfaatti on jätevesien käsittelyssä yleisimmin maailmalla käytetty ja on yksi kustannustehokkaimmista vaihtoehdoista. Epäorgaanisia koagulantteja pidetään usein näiden orgaanisia verrokkeja kustannustehokkaampana ratkaisuna ja näitä voidaan käyttää monenlaisiin vedenkäsittelyn sovelluksiin, mukaan lukien elintarviketuotannon sovellukset. [21.]

Orgaanisia koagulantteja on mm. polymeerit, amiinit ja akryyliamidit. Nämä ovat usein patentoiduin menetelmin ja reseptein valmistettuja aineita, joiden tarkat koostumukset ovat salaisia, mikä puolestaan voi vaikuttaa niiden saatavuuteen ja hintoihin. [20.]

Mikrolevän käyttökohteesta riippuen, tulee sen koaguloinnissa huomioida koagulantin myrkyllisyys ja sen vaikutus viljelyliuoksen uudelleenkäytettävyyteen. Esimeriksi kitosaani on sen myrkyttömyyden ja biohajoavuuden vuoksi monien mikrolevälajien koagulointiin laajalti käytetty orgaaninen polyelektrolyytti [17]. Tiettyjen mikrolevälajien koagulaatio on myös mahdollista aiheuttaa nostamalla viljelyliuoksen pH-arvoa. Tällaista ilmiötä kutsutaan autokoagulaatioksi. Tämä ei kuitenkaan ole kontrolloituun teollisen skaalan koagulaatioon ja flokkulaatioon tarpeeksi luotettava menetelmä. [9, s. 1494.]

Elektrokoagulaatio

Elektrokoagulaatio on sähköön perustuva koagulointimenetelmä, jossa koagulantti liuotetaan *in situ* käsiteltävään nesteeseen liukenevasta metallianodista elektrolyysin avulla. Elektrokoagulaatiolaitteet ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia. Ne eivät vaadi lainkaan liikkuvia osia ja ovat skaalattavissa käytännössä mihin tahansa kokoluokkaan. Teollisuuden jätevesien käsittelyssä elektrokoagulaatio on toimivaksi todistettu menetelmä, mutta mikrolevän erotteluun sitä on testattu ainoastaan laboratorioskaalassa [22, s. 2]. Yksinkertaisesta rakenteesta huolimatta elektrokoagulaatio on kuitenkin monimutkainen elektrokemiallinen prosessi, jossa monet fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt vaikuttavat erottelun toimivuuteen ja tehokkuuteen [16, s. 200].

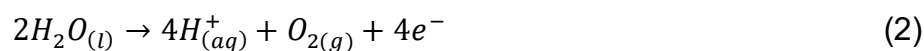
Pratama ja Hadiyanto [23] totesivat tutkimuksessaan tehokkaimmiksi anodimateriaaleiksi magnesiumin, alumiinin ja raudan. Yleisimmin käytetyt materiaalit ovat kuitenkin rauta ja alumiini näiden todistetun tehokkuuden, saatavuuden ja edullisuuden vuoksi [16, s. 200; 24, s. 25]. Elektrokoagulaatiota käytettäessä eläinrehuksi, kalojen ravinnoksi tai ihmisille elintarvikekäyttöön tarkoitetun mikrolevän erotteluun, tulee biomassan metallipitoisuus tutkia erottelun jälkeen huolellisesti. Rauta on ihmisen elimistölle oleellinen ravintoaine. Ruokaviraston mukaan miehillä raudan tarve on 9 mg/vrk ja naisilla (murrosiästä vaihdevuosi-ikään) 15 mg/vrk [25, s. 38]. Laboratoriossa elektrokoagulaatiolla (rauta-anodilla) on saavutettu yli 95 %:in erottelutehokkuus *Chlorella vulgaris* -mikrolevällä, säilyttäen yhä sen soveltuvuuden ihmisravinnoksi (biomassan Fe-pitoisuus < 4 mg/g) [22, s. 5]. Rautaionit reagoivat herkästi fosfaattien kanssa, joten fosfaatit kilpailevat mikrolevän kanssa koagulantista. Tästä syystä viljelyliuoksen fosfaattipitoisuuden tulisi olla erotteluvaiheessa hyvin alhainen. Tutkimuksessaan Lucakova ym. [22, s. 6] saavuttivat yli 90 % erottelutehokkuuden fosfaattipitoisuuden ollessa alle 0,15 mg/l.

Alumiinin sen sijaan on todettu kertyvän eläinkudoksiin ja sen on todettu aiheuttavan ihmisissä ja eläimissä monia erilaisia terveyshaittoja. Lisäksi alumiinin on todettu heikentävän kasvien kasvua ja juurien kehittymistä, vähentäen veden ja ravinteiden saantia (maaperän pH-arvon ollessa alle 5,5). [10, s. 10.] FAO ja

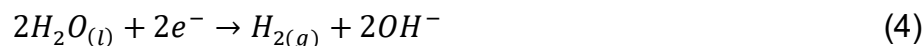
WHO ovat määrittäneet kaikille ruoassa ja lisäaineissa esiintyville alumiiniyhdisteille väliaikaisen siedettävän viikkosaannin (eng. Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI) 2 mg/kg kehonpainoa [26, s. 6].

Anodimateriaalin ollessa metallia M , voidaan elektrodeilla tapahtuvat elektrokemialliset reaktiot kuvata kaavoin 1–4 seuraavasti [16, s. 201–202]:

Anodilla:



Katodilla:



Kun anodimateriaalina käytetään rautaa tai alumiinia, liuenneet Fe^{3+} - ja Al^{3+} -ionit hydrolysoituvat välittömästi muodostaen vastaavia monomeerisia ja polymeerisia hydroksideja, jotka toimivat varsinaisina koagulantteina [16, s. 202]. Käsiteltävän nesteen pH-arvolla on merkittävä vaikutus siihen, mitä hydroksidilajeja reaktioissa muodostuu [24, s. 27].

Veden elektrolyysissä jännitteen ollessa riittävän suuri, elektrodeilla muodostuu vety- ja happikuplia, jotka kiinnittyvät flokkiintuneisiin mikroleviin ja kuljettavat ne nesteen pinnalle, edistäen mikrolevän erottelua [10, s. 2; 16, s. 202]. Vety ja happi voivat kuitenkin sekoittuessaan muodostaa helposti syttyvän kaasuseoksen. Tämän aiheuttamat riskit on tärkeä huomioida suurempia elektrokoagulaatiolaitteita suunniteltaessa.

Anodilta liukenevan metallin määrää voidaan arvioida Faradayn lain avulla (kaava 5).

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{z \cdot F} \quad (5)$$

jossa m on anodilta liunneen metallin massa (g), I on elektrodien läpi kulkeva virta (A), t on elektrokoagulaation kesto (s), M on anodimateriaalin moolimassa ($M_{Fe} = 55,85 \text{ g/mol}$), z on anodilta liunneiden ionien valenssi ($z_{Fe} = 2$) ja F on Faradayn vakio, eli yhden moolin elektronien varaus ($F = 96\,485 \text{ C/mol}$). [10, s. 3; 24, s. 28]. Liuotettavaan koagulantin määrään voidaan siis vaikuttaa suoraan virtaa säätelämällä.

5 Kehitysvaihe

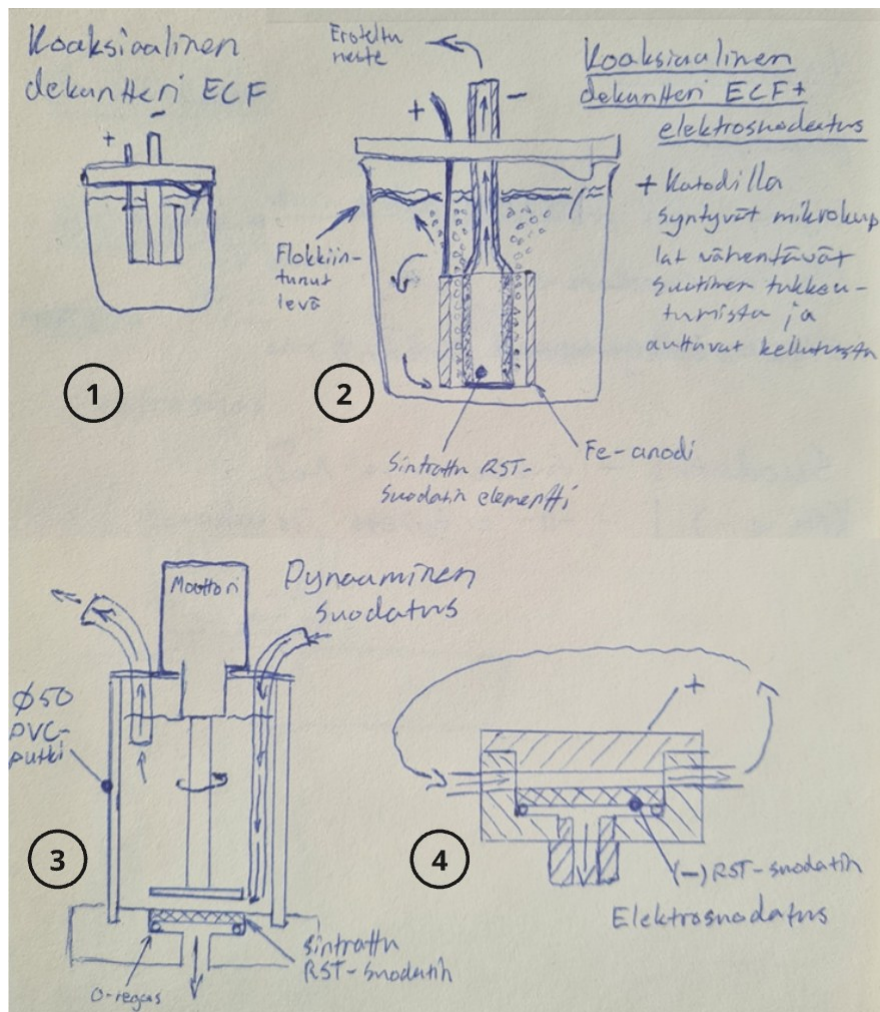
Laitteen kehittäminen aloitettiin vaatimuslistan määrittämisellä. Jotta laitteen valmistus ei kävisi valmistusteknisesti turhan haastavaksi, haluttiin laite suunnitella pienikokoiseksi ja helposti saatavilla olevista osista ja materiaaleista rakennettavaksi. Materiaalien tulee kuitenkin olla elintarvikekäyttöön soveltuvia, jotta varmistutaan siitä, ettei näistä liukene käsiteltävään nesteeseen aineita. Lisäksi erottelukammion haluttiin olevan läpinäkyvä, jotta erotteluprosessin aikana tapahtuvat ilmiöt olisivat visuaalisesti havainnoitavissa. Vaatimukset ovat listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Erottelulaitteen lähtövaatimukset.

Vaatus
Rakennettavissa helposti saatavilla olevista osista ja materiaaleista.
Pienikokoinen.
Helppo purkaa ja osat helposti pestävissä.
Materiaalit elintarvikekäyttöön soveltuvia.
Erottelukammio läpinäkyvä.

5.1 Konseptit

Kirjallisuuskatsauksessa vastaan tulleista menetelmistä elektroosuodatus, dynaaminen suodatus ja elektrokoagulaatioflotaatio (ECF) vaikuttivat eniten testaamisen arvoisilta ja mahdollisesti toteutettavissa olevilta. Näistä laadittiin neljä konseptia (kuva 3). Ideoiden syntyyn vaikuttavia tekijöitä olivat mm. saatavilla olevat materiaalit, kirjallisuuskatsauksessa vastaan tulleet ratkaisut ja lähtövaatimukset (taulukko 1). Lisäksi ideoihin vaikutti merkittävästi projektiyhteistyön tuoma mahdollisuus testata SMC Automationin valmistamia ruostumattomasta teräksestä sintrattuja suodatinelementtejä. Konseptien laatimishetkellä oli siis tiedossa, että laitteessa tullaan käyttämään joko putkimaista tai kiekkomaista suodatinelementtiä.



Kuva 3. Käsin piirretyt konseptikuvat.

Konsepti 1. on hahmotelma yksinkertaisesta elektrokoagulaatiolaitteesta koaksiaalilla elektrodilla, jossa elektrodeina toimii sisäkkäin aseteltu putkimainen anodi ja tankomainen katodi. Elektrodit ovat kiinnitetty kanteen, joka valmistettaisiin esim. POM-muovista koneistamalla ja astiana toimii 400 ml dekanterilasi. Konsepti on äärimmäisen yksinkertainen ja toimisi ainoastaan elektrokoagulaation testaamiseen, joten tämä konsepti toimi lähinnä askeleena ajatuksenkulussa kohti jalostetumpaa ideaa.

Konsepti 2. on perusrakenteeltaan ensimmäistä konseptia vastaava, dekanterilasiin asetettava elektrodikokoonpano – hieman jatkojalostettuna. Anodi on vastaava kuin ensimmäisessä konseptissa, katodina toimii sen sijaan putki, jonka päätyyn voidaan asentaa putkimainen RST-suodatinelementti. Tällä kokoonpanolla laitteella voidaan testata elektrosuodatusta. Jos laitteella halutaan testata myös elektrokoagulaatiota, voidaan suodattimen paikalle asentaa samoilla mitoilla valmistettu RST-putki tulpaksi.

Konsepti 3. on jäljitelmä lähteessä [14, s. 897] kuvatussa jatkuvatoimisesta dynaamisesta suodatuslaitteesta, jossa suodatinkakun kertymistä ehkäistään suodattimen pinnan läheisyydessä pyörivällä kiekolla. Suodatinelementtinä toimii kiekkomainen sintrattu RST-suodatinelementti, joka on kiinnitetty kammion pohjaan. Erottelukammio valmistettaisiin läpinäkyvästä PVC-putkesta ja kammion pohja ja kansi POM-muovista koneistamalla. Mikroleväsuspensio syötetään suodattimen läheisyyteen kannen läpi viedyllä ohuella putkella. Konsentroitunut mikroleväsuspensio imetään pois kammion pinnan tuntumasta. Ajatuksena oli, että suodattimen päällä pyörivää kiekkoa voitaisiin pyörittää pienellä DC-moottorilla, mutta tämän ja kiekon yhdistävälle akselille olisi suunniteltava jonkinlainen tiivistetty läpivienti, jotta moottoriin ei missään tilanteessa pääsisi nestettä.

Konsepti 4. kuvastaa ideaa kiekkomaisesta ristivirtauselektrosuodatuslaitteesta. Plus-symbolilla merkattu kansi toimii anodina ja sintrattu RST-suodatinelementti katodina. Mikroleväsuspensio virtaa kiekon sivusta sisään ja vastakkaiselta puolelta ulos. Syöte kiertää laitteen läpi samalla, kun suodos imetään kiekon

pohjasta. Suodattimen pinnan suunnassa virtaava syöte ja suodattimen ja kan- nen välissä vallitseva sähkökenttä ehkäisevät suodatinkakun muodostumista.

Kaikki konseptit ovat pääasialliselta rakenteeltaan pyörähdyssymmetrisiä. Kon- septien 1 ja 2 kohdalla tämä johtuu ideasta käyttää erottelukammiona dekannte- rilasia. Konseptin 3 kohdalla katsottiin helpoimmaksi valmistaa vesitiivis erotte- lukammio muoviputkesta, jolloin pohja ja kansi voidaan tiivistää yksittäisillä O- renkailla, kun taas suorakaiteen mallisen erottelukammion kohdalla kammion seinät täytyisi tiivistää esimerkiksi silikonimassalla tai tasotiivisteillä.

5.2 Laitteen suunnittelu

Elektrodin rakenteeksi valittiin konseptissa 2 esiintyvä koaksiaalinen rakenne, jossa anodi ja katodi ovat aseteltu sisäkkäin. Erottelukammio kuitenkin päätet- tiin suunnitella enemmän konseptin 3 mukaisesti, eli läpinäkyvästä PVC-put- kesta. Tämä mahdollisti erottelulaitteen suunnittelun jatkuvatoimiseksi siten, että syöte tuodaan kammioon tämän pohjasta, konsentroidu mikroleväsuspensio poistetaan kammion yläpään suunniteltavan ylivuotoaukon kautta ja suodos imetään kammion keskiosasta elektrodin keskiputken (katodiputki) kautta. Erottelulaitteen rakenne hahmoteltiin uudestaan käsin piirtämällä, jonka jälkeen osat mallinnet- tiin Autodesk Fusion 360 -CAD-mallinnusohjelmistolla.

5.2.1 Materiaalivalinnat

Laitteessa käytettävät mikroleväsusension kanssa kosketukseen joutuvat osat suunniteltiin valmistettavaksi elintarvikekontaktimateriaaleiksi soveltuvista mate- riaaleista, jotta varmistuttaisiin, ettei materiaaleista liukene tai irtoa ainetta käsi- teltävään nesteeseen. Metalliosat (elektrokoagulaatioon käytettävää teräsano- dia lukuun ottamatta) tulee valmistaa ruostumattomasta teräksestä ja muoviosat esimerkiksi POM- tai PVC-muovista.

FDM-3D-tulostukseen on saatavilla elintarvikekäyttöön hyväksytyjä tulostusma- teriaaleja, mutta näistä valmistetut osat eivät kuitenkaan sellaisenaan täytä

elintarvikekontaktiin tarkoitetun osan vaatimuksia, sillä FDM-tulostuksella ei pystytä valmistaa tarpeeksi sileitä pintoja. Tämä on kuitenkin mahdollisesti korjattavissa pinnoittamalla osat elintarvikekäyttöön sertifioidulla hartsilla.

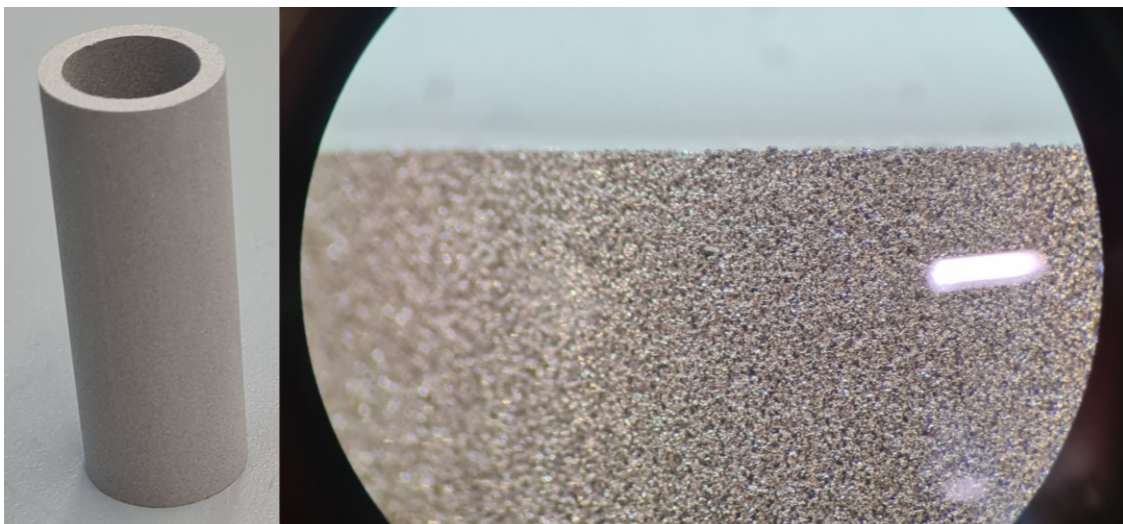
Elektrokoagulaatiota päätettiin testata rauta-anodilla tämän todetun elintarvikekelpoisuuden vuoksi. Puhdasta rautaa ei kuitenkaan ollut työn resurssien puitteissa saatavilla, joten anodi päätettiin valmistaa S355 rakenneteräksestä tämän korkean rautapitoisuuden (> 97 %) ja saatavuuden vuoksi.

Elektrolyysissä elektrodien tehtävä on luoda suodatinelementin pinnalle sähkökenttä. Anodimateriaalin ei haluta liukenevan nesteeseen, eli materiaalin tulee olla elektrokemiallisesti inertti. Elektrolyysiin anodimateriaaliksi valittiin tästä syystä ruostumaton teräs AISI 304, perustuen lähteessä [27] esitettyyn väittämään ruostumattoman teräksen inerttiydestä. Tämä kuitenkin osoittautui virheelliseksi väittämäksi (ks. luku 7.3).

5.2.2 Elektrodikokoonpano

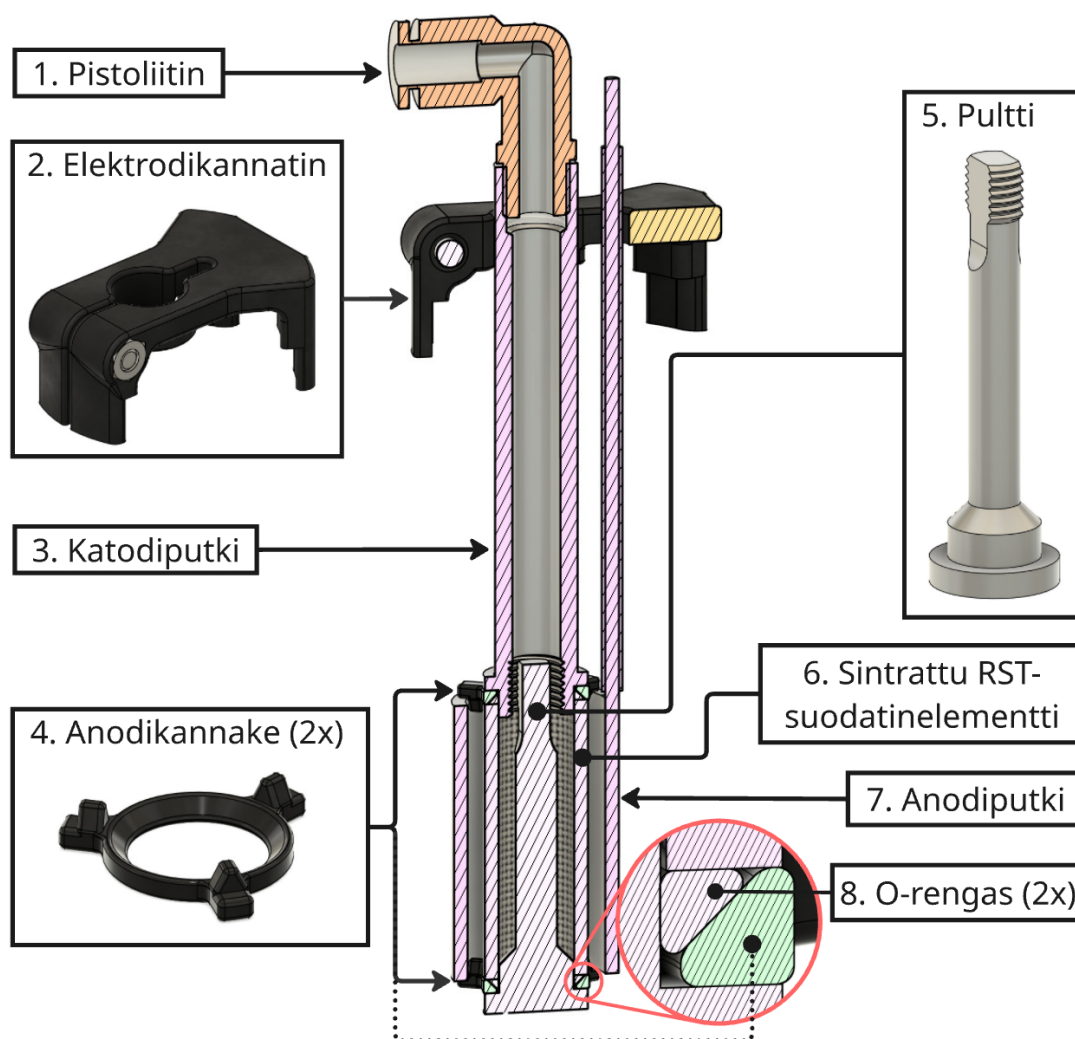
Elektrodikokoonpanon suunnittelussa oleellisimpia huomioon otettavia asioita ovat elektrodien geometria, suodattimen kiinnitystapa ja sen tiivistäminen sekä elektrodien välinen kiinnitys. Elektrodit tulee kiinnittää toisiinsa mekaanisesti sähköä eristävällä materiaalilla. Anodia kannattelevan osan tulee kohdistaa se katodin suhteen keskeisesti, jotta elektrodien vastakkaisten pintojen välinen etäisyys on kaikkialta yhtä suuri.

Suodattimena toimii SMC:n valmistama, halkaisijaltaan 14 mm ja pituudeltaan 40 mm, putkimainen sintrattu RST-suodatinelementti (kuva 4). Suodatin on valmistettu SUS316L ekvivalentista materiaalista. Suodattimen huokoskooksi valittiin 2 µm, joka oli saatavilla olevista vaihtoehdoista pienin. Tämän katsottiin soveltuvan testauksessa käytettävän *Chlorella vulgaris* -lajikkeen suodatukseen, sillä kyseisen lajin leväsolut ovat tyypillisesti halkaisijaltaan 2–10 µm [2]. On kuitenkin mahdollista, että pienimmät leväsolut voivat jäädä jumiin suodattimen kapillaarikanaviin.



Kuva 4. SMC Automationin valmistama putkimainen sintrattu RST-suodatinelementti. Oikealla mikroskooppikuva suodattimen pinnasta (35x suurennos).

Elektrodikokoonpanon rakenne ja numeroidut osat ovat esitetty kuvassa 5. Elektrodikokoonpano suunniteltiin ripustettavaksi erottelukammion ylivuotoaukon kautta 3D-tulostetun elektrodikannattimen (osa 2.) avulla. Suodatinelementti (osa 6.) ja anodiputki (osa 7.) suunniteltiin kiinnitettäväksi katodiputkeen (osa 3.) omavalmisteisella pultilla (osa 5.), joka mahdollisti suodoksen virtaamisen tämän kierteiden ohitse. Katodiputken yläpäähän asennetaan SMC:n toimittama pistoliitin, jonka kautta suodos pumpataan ulkoiseen astiaan. Anodille suunniteltiin 3D-tulostettavat sähköä johtamattomat kannakkeet (osa 4.), joilla tämä voitiin ripustaa katodiin. Anodikannakkeisiin suunniteltiin vino pinta, jolla O-rengasta hyödynnetään hieman epätavalliseen tapaan tiivistämään sekä taso- että sylinteripinta samanaikaisesti.



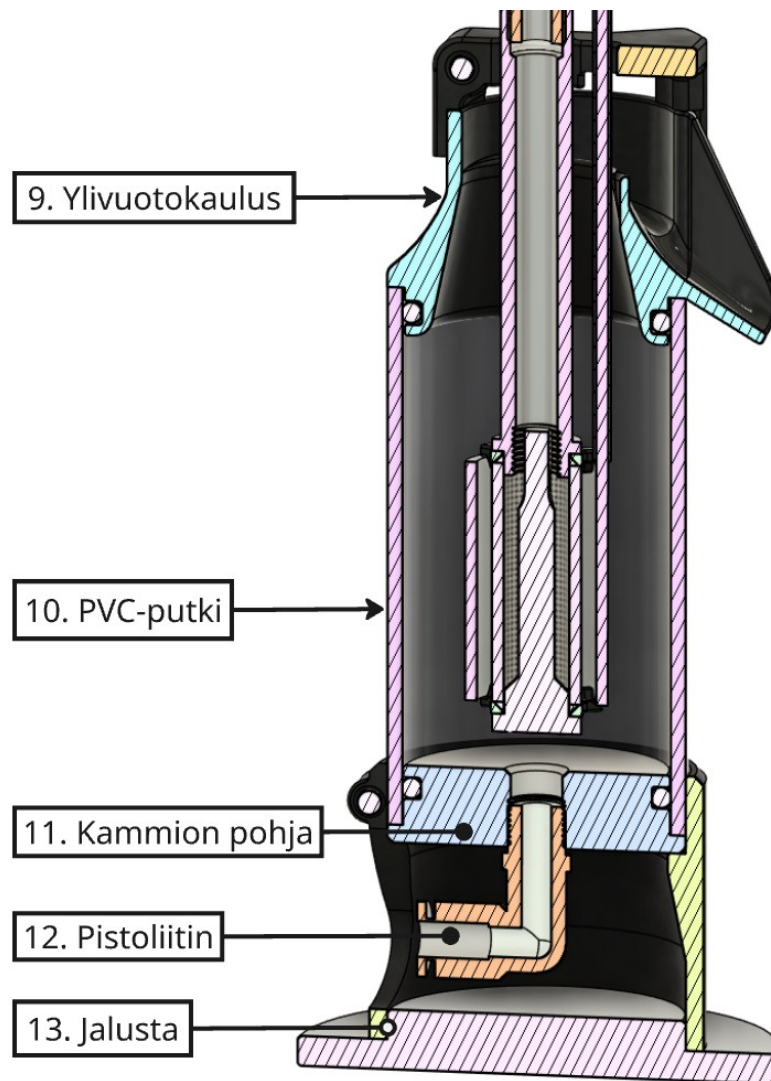
Kuva 5. Elektrodikokoonpanon rakennetta ja osia havainnollistava poikkileikkauskuva.

5.2.3 Erottelukammio

Erottelukammion rakennetta havainnollistava leikkauskuva osanumeroineen on esitetty kuvassa 6. Erottelukammio eli säiliö, jonka keskellä elektrodikokoonpano sijaitsee, haluttiin suunnitella läpinäkyvästä materiaalista, jotta erotteluprosessin aikana tapahtuvat ilmiöt olisivat mahdollisesti nähtävissä. Tähän päätettiin hyödyntää toisesta projektista ylijäänyttä, ulkohalkaisijaltaan $\varnothing 50$ mm läpinäkyvää PVC-putkea (osa 10.). Putken yläpäähän suunniteltiin ylivuotokaulus (osa 9.), jonka kautta konsentroitunut leväsuspenso voitiin ohjata nokan avulla erottelulaitteen viereen asetettuun dekanterilasiin. Ylivuotoratkaisuun päädyttiin

siitä syystä, että elektrokoagulaation tapauksessa, elektrodeilla syntyvien vety- ja happikuplien odotetaan nostavan mikroleväflokkit nesteen pintaan, josta nämä voidaan yksinkertaisimmin kerätä talteen ylivuotomenettelyn keinoin.

Kammion pohjaksi suunniteltiin POM-muovista sorvattava kiekkomainen tulppa (osa 11.), jonka keskeltä syöte voidaan tuoda kammioon pistoliittimen (osa 12.) kautta. Erottelukammion jalustaksi (osa 13.) suunniteltiin yksinkertainen osittain halki leikattu, 3D-tulostettava putki, joka kiristetään erottelukammion ulkopintaan pannan tavoin ruuvin ja mutterin avulla. Tämän pohjaan liimattavaksi suunniteltiin sorvattava teräskiekkö, joka toimi jalustassa lisäpainona ja -pinta-alana.



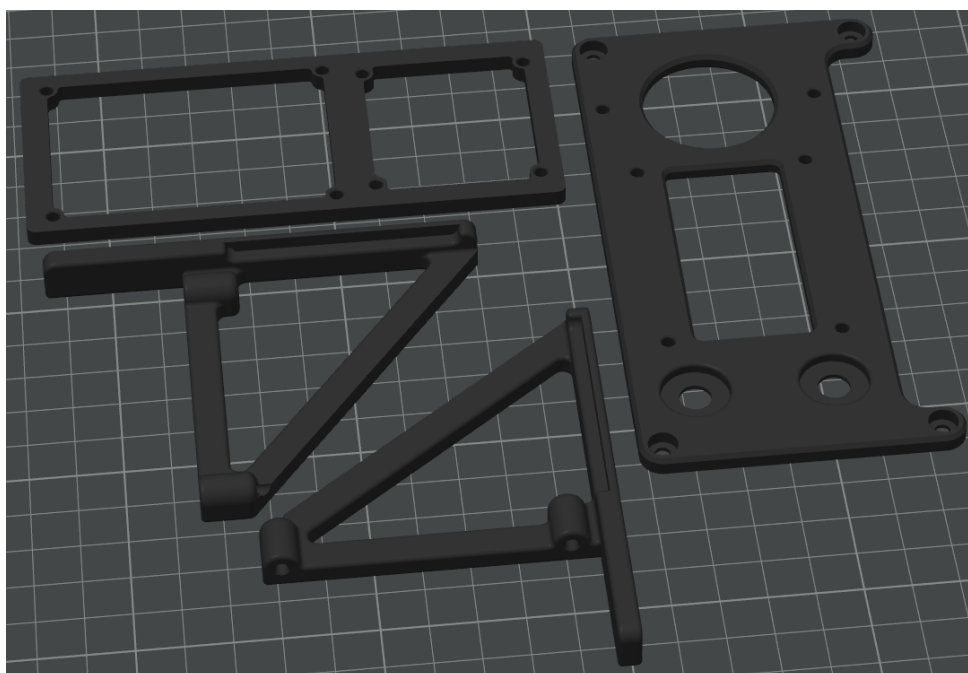
Kuva 6. Erottelukammiota ja elektrodikokoonpanon asettelua havainnollistava poikkileikkauskuva.

5.2.4 Pumppuyksikkö

Nesteiden pumppaamiseen suunniteltiin yksinkertainen pumppuyksikkö, joka koostuu seuraavista komponenteista:

- 12 V peristalttinen pumppu
- 12 V kalvopumppu
- Arduino Nano Every -kehityskortti
- Arduino Nano ruuviliitinsovitin
- L298N moottorinohjain
- kaksi potentiometriä
- 5,5 mm DC-virtaliitin.

Komponenttien liittämiseksi yhdeksi yksiköksi, suunniteltiin näille 3D-tulostettava runko. Runko suunniteltiin neliosaiseksi, jotta osat voitiin 3D-tulostaa vaakatasossa ilman tukimateriaalia (kuva 7). Tähän kokoonpanoon kuuluu kaksi jalkaa, kiinnityslevy pumppuille ja potentiometreille, ja kehys piirikorteille.



Kuva 7. Kuvakaappaus BambuStudio -ohjelmasta, pumppuyksikön rungon osien 3D-tulostusasettelusta.

Rungon osat suunniteltiin liitettäväksi toisiinsa M3- ja M4-ruuvien avulla. FDM 3D-tulosteissa pienet ruuviliitokset, joihin ei kohdistu suuria voimia, voidaan usein toteuttaa yksinkertaisesti sylinterimäisellä reiällä. Reikä mitoitetaan hie- man ruuvin nimellismittaa pienemmäksi niin, että ruuvia kiinnittäessä se muo- vaa reikään itselleen kierteen. Sopivan tiukkuuden löytämistä helpottaa erillisen koekappaleen tulostaminen, johon on mallinnettu muutamia eri kokoisia reikiä. Tässä tapauksessa sopiva tiukkuus esimerkiksi M3 ruuville saavutettiin 2,7 mm reiällä. Tällaisia liitoksia suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota tulos- teen kerrosten suuntaan, sillä kerrosten suuntaisten reikien tapauksessa ruuvin aiheuttama radiaalisuuntainen paine reiän sisäpinnalla saattaa aiheuttaa kerros- ten delaminoitumisen, eli näiden toisistaan irtoamisen.

6 Valmistusvaihe

6.1 Koneistetut osat

Laitteen valmistus aloitettiin koneistettavien osien valmistuksesta (osat esitetty kuvassa 8). Elektrodikokoonpanon omavalmisteiset osat (pois lukien elektrodi- ja anodikannakkeet) ja kammion pohja valmistettiin pääosin Colchester Triumph 2000 -manuaalisorvilla. Anodiputkia valmistettiin kaksi kappaletta – yksi ruostu- mattomasta AISI 304 teräksestä ja yksi S355-rakenneteräksestä. Johtimeksi RST-anodiin hitsattiin halkaisijaltaan 2 mm ja noin 90 mm pitkä pala ruostumat- toman teräksen TIG-hitsaamiseen tarkoitettua lisäainelankaa. Teräsanodin joh- timeksi hitsattiin puolestaan pituudeltaan vastaava, halkaisijaltaan 3 mm vedetty S355 pyörötanko. Johtimet eristettiin oikosulkujen varalta kutistesukalla.



Kuva 8. Manuaalikoneistetut osat.

6.2 3D-tulosteet

Erottelulaitteessa 3D-tulostettavia osia olivat ylivuotokaulus, elektrodi- ja anodikannakkeet, jalustan putki sekä tulosteiden hartsipinnoituksessa käytetty vaaluma-astia. Osat valmistettiin Metropolian koneistuslaboratorion Bambu Lab X1C -3D-tulostimella. Tulosteiden materiaaliksi valittiin polylaktidimuovi (PLA) sen hyvien tulostusominaisuuksien vuoksi.

3D-tulosteiden hartsipinnoitus

Leväsuspension kanssa kosketuksiin joutuvat 3D-tulostetut osat, eli ylivuotokaulus ja anodikannakkeet pinnoitettiin elintarvikekäyttöön sertifioidulla Epoxyfood-hartsilla. Osien pinnoittamiseen tarvittiin seuraavat laitteet ja tarvikkeet (kuva 9):

- vaaka
- alipainekammio

- alipainepumppu
- sekoitusastia
- sekoituslasta
- sivellin
- hengityssuoja
- kumihanskat.

Hartseja käsiteltäessä on tärkeää käyttää asianmukaisia henkilösuojaimia – tärkeimpänä kumihanskat ja hengityssuojain.



Kuva 9. Hartsipinnoituksessa käytetty laitteisto ja tarvikkeet.

Hartsi valmisteltiin punnitsemalla A- ja B-komponenttia pahvimukiin valmistajan ohjeistamalla sekoitussuhteella (100:55). Komponentit sekoitettiin sekoituslastalla huolellisesti, jonka jälkeen se asetettiin alipainekammioon noin viiden minuutin ajaksi ilmakuplien poistoa varten. Tämän jälkeen hartsi siveltiin pinnoitettavaan osiin pienellä siveltimellä. Pinnoittamisen jälkeen osat asetettiin varovasti 3D-tulostetun valuma-astian päälle, joka sitten asetettiin lämpökaappiin (kuva 10), 50 °C lämpötilaan noin vuorokauden ajaksi. Valuma-astiaan oli mallinnettu kolme teräväreunaista seinää, joilla ylivuotokauluksen ja valuma-astian välinen kontaktipinta-ala saatiin minimoitua.

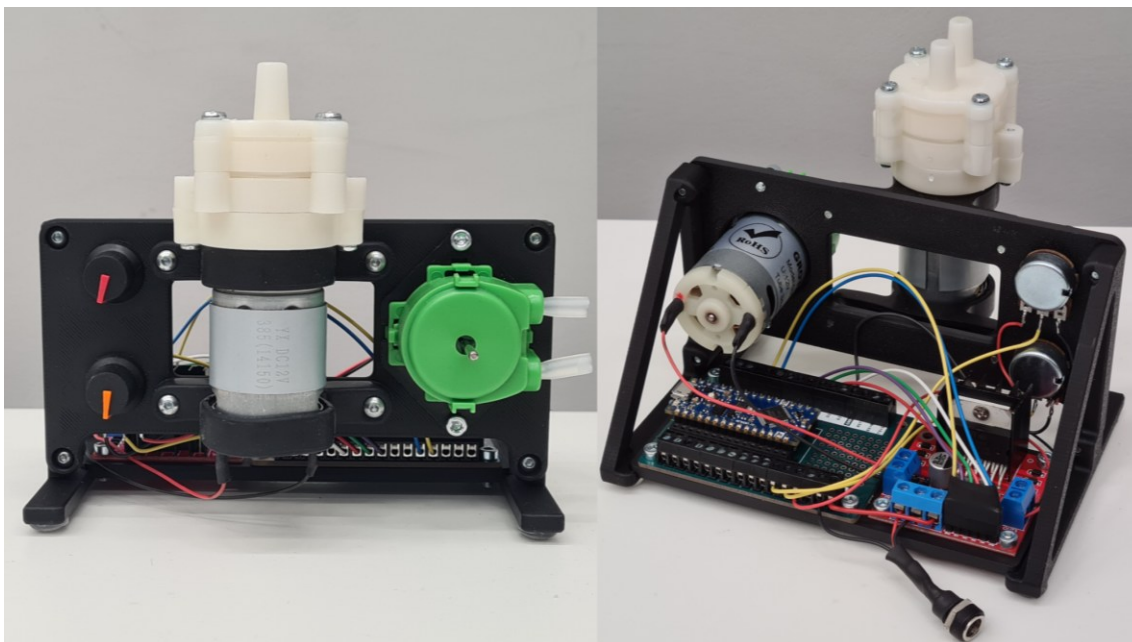


Kuva 10. Hartsipinnoitetut 3D-tulosteet kuivumassa lämpökaapissa.

Korkeammalla kuivumislämpötilalla voidaan yleensä nopeuttaa hartsien kuivumista. Osia ei kuitenkaan voitu kuivata valittua korkeammassa lämpötilassa, sillä PLA-muovit alkavat pehmenemään n. 60 °C lämpötilassa. Kuivauslämpötilaksi valittiin materiaalivalmistajan suosittelema, kyseiselle tulostusfilamentille sopiva kuivauslämpötila 50 °C. Vielä osien kuivumisen jälkeen ylivuotokauluksen ja anodikannakkeiden valuma-astiaan osuneet kohdat hiottiin ja näihin lisättiin hartsia sen verran, että paljaaksi jääneet kohdat saatiin myös peitettyä.

6.3 Pumppuyksikkö

Pumppuyksikkö valmistettiin 3D-tulostamalla tämän rungon osat. Rungon osat kiinnitettiin toisiinsa M3- ja M4-ruuveilla, jonka jälkeen tähän kiinnitettiin pumput, potentiometrit ja piirikortit (kuva 11). Arduino Nano -kehityskortti yhdistettiin ruuviliitinsovittimeen kytkentöjen tekemisen helpottamiseksi.



Kuva 11. Koottu pumppuyksikkö.

Kehityskortin ohjelmointi toteutettiin lähes täysin tekoälyn avulla, pieniä muokkauksia lukuun ottamatta. Pumppujen nopeuden säätöön vaadittava ohjelma on rakenteeltaan sen verran yksinkertainen, että OpenAI:n o1-mini -tekoälymallilta tämän laatiminen vaati ainoastaan yksittäisen syötteen ja muutamia omia muokkauksia koodiin. Syötteessä määritettiin yksityiskohtaisesti tiedot kehityskorttiin liitettävistä komponenteista sekä ohjelman vaaditusta toiminnallisuudesta.

Moottoreita ohjataan kaksikanavaisella L298N-moottorinohjaimella, joka säätelee moottoreiden nopeutta, kehityskortilla generoitavan pulssisuhdesäätösignaalin (PWM) avulla. Potentiometrillä säädetään signaalijännite välillä 0–5 V, jonka kehityskortti lukee 10-bittisen analogisen sisääntulon kautta, muuntaen jännitteen lukuarvoksi välillä 0–1023. Tämä taas muutetaan lukuarvoksi väliltä 0–255 (8-bittiä), jolla moottorinohjaimelle syötettävän PWM-signaalin pulssisuhde määritetään.

6.4 Pääkokoonpano

Kun kaikki osat oli valmistettu, voitiin erottelulaite koota ensimmäisen kerran. Kuvassa 12 nähdään koottu erottelulaite (oikealla) verrattuna mallinnusohjelmalla renderöityyn 3D-malliin (vasemmalla). Kuten kuvasta nähdään, erottelulaitteen valmistuksessa onnistuttiin miltei täydellisesti suunnitelman mukaisesti.



Kuva 12. Renderöinti erottelulaitteen CAD-mallista (vas.) verrattuna oikeassa elämässä rakennettuun erottelulaiteeseen (oik.).

Koska laitteen alustavassa testauksessa käytetään edullisia kiinalaisvalmisteisiä pumppuja, joiden teknisistä ominaisuuksista on heikosti tietoa saatavilla, täytyi syötteen ja suodoksen enimmäistilavuusvirta määrittää itse mittaamalla. Syötteen enimmäistilavuusvirta määritettiin pumppaamalla vettä erottelukammion läpi pumpun maksiminopeudella. Suodatuksen enimmäisvirta määritettiin vastaavasti pumppaamalla vettä koottuun elektrodikokoonpanon läpi. Virtaus

mitattiin keräämällä yhden minuutin aikana pumpattu vesimäärä dekantterilasiin ja määrittämällä sen massa punnitsemalla. Mittaus suoritettiin kummassakin tapauksessa viisi kertaa. Nämä ja erottelulaitteen muut olennaiset tekniset ominaisuudet ovat listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Erottelulaitteen tekniset ominaisuudet.

Erottelukammion ja pumppujen ominaisuudet	
Kammiotilavuus [ml]	116
Syötteen enimmäistilavuusvirta [ml/min]	140
Suodatuksen enimmäistilavuusvirta [ml/min]	460
Elektrodikokoonpanon ominaisuudet	
Elektrodien välinen etäisyys [mm]	2,5
Suodattimen ominaisuudet (katodi)	
Huokoskoko [μm]	2
Ulkohalkaisija [mm]	15
Seinämäpaksuus [mm]	2
Pituus [mm]	40
Aktiivinen pinta-ala [mm^2]	1885
Putkielektrodin ominaisuudet (anodi)	
Sisähalkaisija [mm]	20
Pituus [mm]	40
Sisäpinta-ala [mm^2]	2513

7 Testaus

Testien toteutusta ja tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että ne toteutettiin rajallisella laboratoriotyöskentelykokemuksella. Kokeiden tulokset antavat suuntaa erottelulaitteen ja prosessin toimivuudesta, mutta ne eivät vastaa täysimittaisia laboratoriotason tutkimuksia, jotka edellyttäisivät syvempää kemian, sähkökemian ja laboratorioanalytiikan asiantuntemusta.

Testausvaiheessa erottelulaitteen toimivuutta ja tehokkuutta arvioitiin eri mitauksien avulla. Toimivuuden arviointi perustuu testien aikana ja jälkeen tehtyihin huomioihin muun muassa laitteen käyttökokemuksesta, puhdistettavuudesta, ja osien kunnosta tehtyihin visuaalisiin arvioihin. Parametreja, joiden avulla erottelun tehokkuutta mitattiin, olivat erottelulla saavutettu kiintoaineen laskennallinen konsentraatio (g/l), mikrolevän poistotehokkuus (%), energiakustannus (Wh/l) ja prosessivirtojen tilavuusvirrat (ml/s).

Jokaisen testin välissä kaikki erottelulaitteen osat pestiin huolellisesti ja oleellisten osien kunto valokuvattiin. Testeistä kerättyjä näytteitä säilytettiin jääkaapissa ennen analyysieja korkeintaan viisi päivää.

7.1 Materiaalit ja menetelmät

7.1.1 Prosessituotteiden alkuainepitoisuudet

Näytteiden alkuainepitoisuudet määritettiin energiadispersiivisellä röntgenfluorenssispektrometrillä (jäljempänä EDX-analyysi) niin, että näytteissä 0, 4.2 ja 5.1 biomassaa jätettiin näytteeseen analyysin ajaksi. Loput näytteistä olivat joko suoraan erottelusta saatuja suodoksia tai konsentraatteja, joista kiintoaine oli suodatettu sen konsentraation mittausta varten. Myös näytteistä suodatetusta biomassasta oli tarkoitus tehdä kuivan aineen EDX-analyysit, mutta kerätyissä näytteissä kuiva-ainetta oli tähän tarkoitukseen liian vähän.

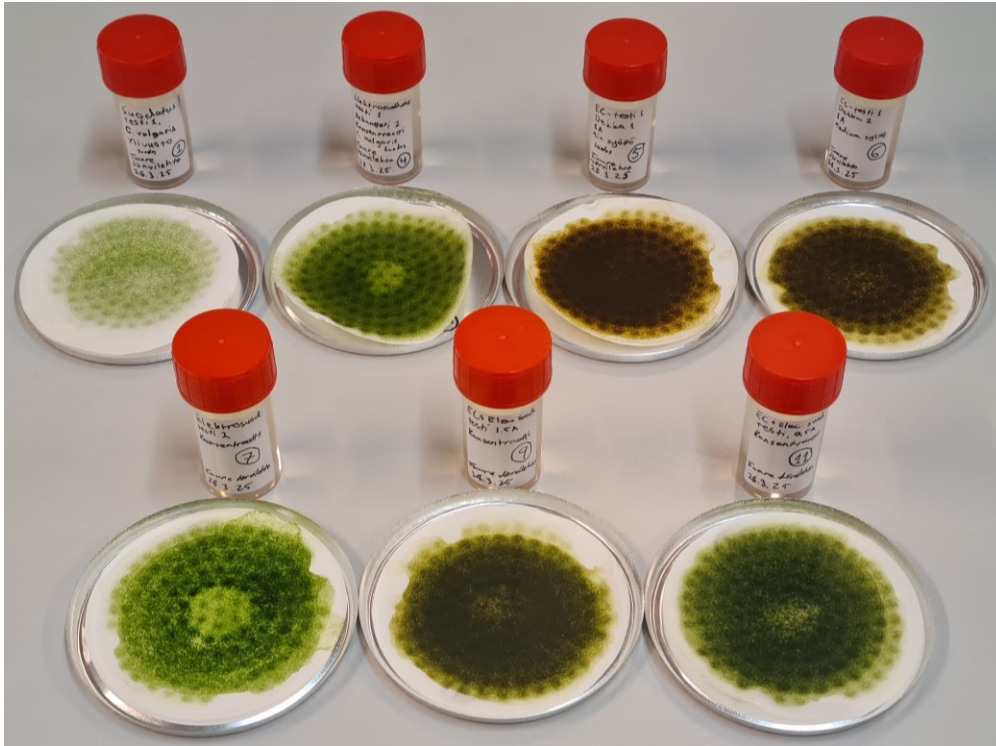
EDX-analyysistä saatiin tuloksena näytteen alkuainepitoisuus yksikössä ppm, 3σ -virherajoilla. Esimerkki EDX-analyysistä saadusta tulosteesta kuvassa 13.

Analyte	Result	[3-sigma]
P	1700.118 ppm	[64.371]
Ca	839.629 ppm	[15.473]
S	572.665 ppm	[94.906]
K	427.268 ppm	[14.048]
Cl	151.150 ppm	[35.855]
Fe	21.098 ppm	[4.552]
Cu	13.616 ppm	[2.884]
H2O	99.627 %	[-----]

Kuva 13. Kuvakaappaus EDX-analyysin tulosteesta (näyte 0, mikroleväsuspension alkutila).

7.1.2 Kiintoainepitoisuus

Testeistä kerätyistä konsentraattinäytteistä suodatettiin niiden sisältämä kiintoaine 2 µm huokoskoon suodatinpaperille (kuva 14) imusuodatuksen avulla, jonka jälkeen nämä asetettiin lämpökaappiin 24 h ajaksi, lämpötilaan 105 °C. Tämän jälkeen kuivatut suodatinpaperit asetettiin jäähtymään eksikaattoriin tunnin ajaksi. Kiintoainepitoisuuden mittaustuloksissa kuitenkin havaittiin mahdollisia mittausvirheitä, joten näitä tuloksia ei käytetty laitteen tehokkuuden arviointiin. Mikroleväsuspension alkutilasta biomassan määrittäminen näytteen tilavuudella 100 ml, jotta mittausvirhe olisi pienempi. Testeistä kerätyt näytteet olivat tilavuudeltaan noin 35 ml.



Kuva 14. Suodatetut konsentraattinäytteet.

7.1.3 Optinen tiheys

Näytteiden optinen tiheys määritettiin Shimadzu UV-1900i spektrofotometrillä, aallon pituudella 680 nm (OD680). Erottelulaitteen mikrolevän poistotehokkuus määritettiin suodosten OD-mittaustuloksien perusteella kaavalla

$$Poistoteho (\%) = \left(1 - \frac{OD_{suodos}}{OD_{syöte}}\right) \cdot 100 \quad (6).$$

7.1.4 Testeissä käytetty mikrolevä

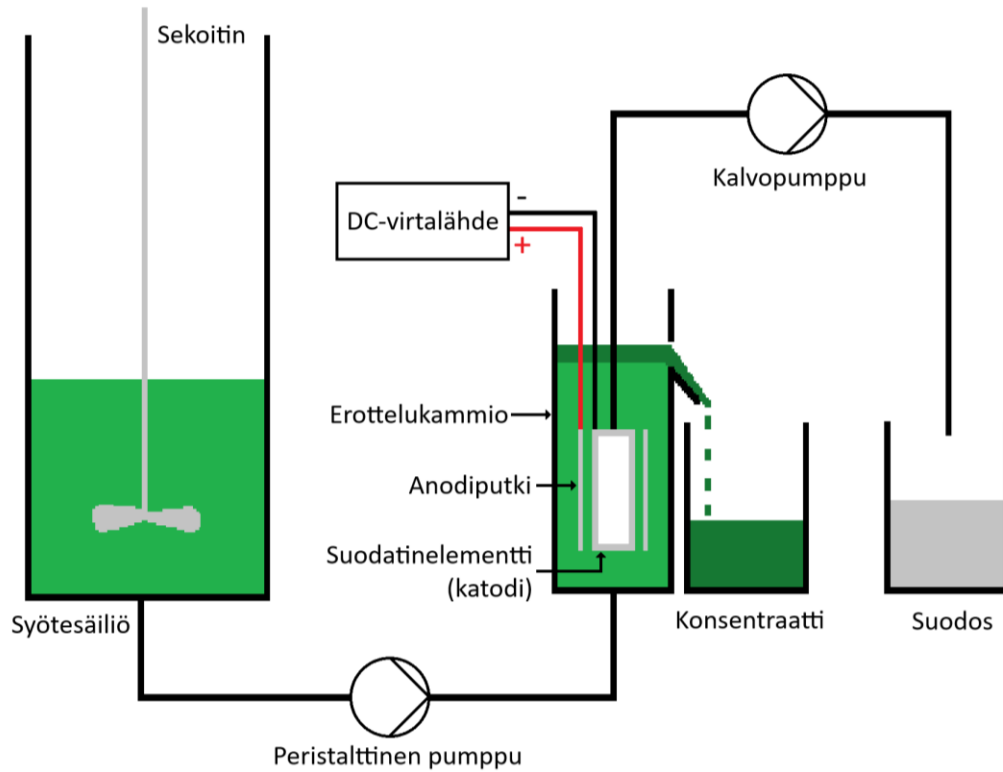
Testeissä käytetty mikrolevä on lajikkeeltaan *Chlorella vulgaris*, joka kasvatettiin kolmessa noin 4,5 litran kolonni-fotobioreaktorissa, 14 vuorokauden ajan. Valaistuksena kasvatuksen aikana toimi sinipuna-LED-kasvatusvalot, jotka olivat vuorokauden aikana 16 tuntia päällä, ja 8 tuntia pois päältä. Viljelyliuoksena toimi tavallinen hanavesi, johon oli sekoitettu 7 ml/l Substral-kasviravinnetta.

Alkutilassa leväsuspension pH-arvon mitattiin olevan 8,8. Mikrolevän konsentraatio oli suhteellisen alhainen 0,13 g/l ja viljelyliuoksen ortofosfaattikonsentraatio oli lähteessä [22, s. 6] todettuun fosfaattipitoisuuden kriittiseen rajaan (0,15 mg/l) nähden poikkeuksellisen korkea 722 mg/l. Erottelulaitteen testauksen kannalta olosuhteet eivät ole optimaaliset.

7.1.5 Testijärjestely

Testijärjestelmän osat järjestettiin pöydälle vierekkäin testien videointia varten. Videoinnin avulla saatiin kätevästi taltioitua virtalähteen näytöltä elektrodeille syötetty jännite, virta ja teho aikaleimoinen. Tietokoneen näytölle asetettiin Arduino IDE -ohjelman kautta näkyville terminaali-ikkuna, johon Arduinolta tulostettiin pumppujen nopeuksia kuvaavat arvot. Lisäksi videoinnin avulla pystyttiin taltioimaan testin aikana visuaalisesti havainnoitavissa olevia tapahtumia, jotka olisi muuten saattaneet jäädä huomioimatta.

Syötesäiliönä käytettiin akryylistä valmistettua sylinterimäistä viiden litran säiliötä, johon asetettiin sekoittaja mikrolevän sedimentoitumisen estämiseksi. Syöte pumpattiin säiliön pohjassa sijaitsevan letkuliittimen kautta erottelukammioon 12 V peristalttisella pumpulla, josta suodos pumpattiin erilliseen astiaan 12 V kalvopumpun avulla. Prosessituotteet kerättiin 400 ml dekanterilaseihin. Elektrodienvirtalähteenä testeissä käytettiin OWON ODP3031 -virtalähdettä. Erottelulaitteen testijärjestely on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Havainnekuva testijärjestelystä.

7.1.6 Energiakustannus

Elektro-suodatuksen ja -koagulaation energiankulutus (E) määritettiin kaavalla

$$E = (P_{pump} + P_e)t \quad (7)$$

jossa P_{pump} on pumppuyksikön teho (W), P_e elektrodeille syötetty keskimääräinen teho (W) ja t on testiin kulunut aika (h). Tämän avulla elektro-suodatuksen energiakustannus (SEC) laskettiin kaavalla

$$SEC = \frac{E}{V_{suodos}} \quad (8)$$

jossa V_{suodos} on testin aikana kerätyn suodoksen tilavuus (l). Elektrokoagulaation energiakustannusta ei voitu määrittää, koska testeissä levää ei onnistuttu

koaguloimaan siten, että olisi muodostunut selvää kirkastetta ja konsentraattia, jonka suhteen energiakustannus olisi pystytty laskemaan.

7.2 Mikrosuodatustesti

Ensimmäisenä kokeena erottelulaitteella testattiin mikrosuodatusta. Elektrodikoonpanoon ei asennettu anodiputkea, jotta suodatinelementti olisi helpommin nähtävissä. Mikrosuodatustesti kuitenkin keskeytettiin suodatinelementin lähes täydellisen tukkeutumisen vuoksi. Suodattimen pinnalle kertyi tasainen kerros mikrolevää (kuva 16), joka aiheutti valitulle suodatuspumppulle liian suuren vastuksen. Testin keskeyttämisestä huolimatta suodosta ja ”konsentraattia” saatiin kerättyä tarpeeksi OD-mittauksia varten. Näistä mikrosuodatuksen mikrolevän poistotehokkuuden mitattiin olevan 96 % ja konsentraatin konsentraatiokertoimen 0,99. Tämä todistaa, että testin alussa mikrolevä konsentroitui ainoastaan paikallisesti suodattimen pinnalle tukkien tämän, jolloin loppu syöte virtasi suodattimen ohitse konsentroitumatta.



Kuva 16. Mikrosuodatuksen aikana suodattimen pinnalle kertynyt suodatinkakku.

7.3 Elektrosuodatustesti 12 V:n jännitteellä

Elektrosuodatustesteissä elektrodiin asennettiin katodiksi RST-suodatinelementti ja anodiksi RST-anodiputki. Ensimmäisessä testissä virtalähteen jännitteeksi asetettiin 12 V. Testien aikana elektrodien läpi kulkeva virta vaihteli välillä 1,6–1,9 A, jolloin elektrolyysin teho oli keskimäärin 21 W. Testiin kulunut aika oli 25 min, joten kokonaisuudessaan erottelun energiankulutus oli noin 10,3 Wh.

Konsentraattia kerättiin kahteen dekanteriin yhteensä 586,6 ml ja suodosta 193,4 ml (kuva 17), joten suodosta syntyi konsentraattiin nähden suhteessa 1:3. Tällöin erottelun energiakustannus kirkastettua litraa kohden oli 53,2 Wh/l. Näyte 3 kerättiin ensimmäisestä dekanterista, näytteet 4 ja 4.2 toisesta ja näyte 4.1 suodoksesta. Yhteensä järjestelmän läpi virtasi testin aikana 780 ml mikroleväsuspensiota.

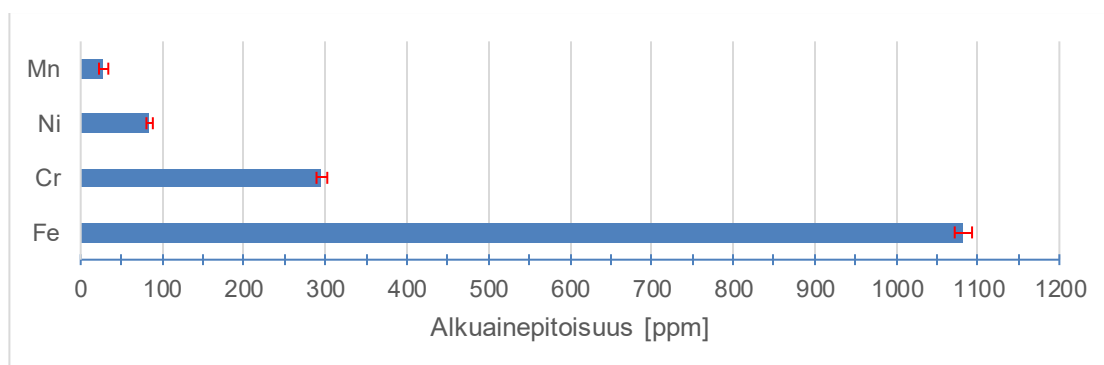


Kuva 17. 12 V Elektrosuodatustestin tuotteet. Konsentraatti (dekanteri 1 vasemmalla), konsentraatti (dekanteri 2 keskellä), suodos (oikealla).

Konsentraatti oli pH-arvoltaan keskimäärin 5,55 ja suodos 12,5. Alkutilaan nähden suodoksen pH-arvo nousi siis 3,8 yksikköä, kun taas konsentraatin pH-arvo laski 3,3 yksikköä. Suodos oli hajultaan erittäin pistävä ja väriltään valkean läpi kuultavaa. Molemmista dekantereista oli havaittavissa levän osittaista flokkiintumista, mikä voi johtua anodilta liuenneesta raudasta tai pH-muutoksen aiheuttamasta autokoagulaatiosta. Konsentraatti kerättiin dekantereihin muuttamatta

prosessiparametreja näiden välissä, mutta tästä huolimatta toisessa dekantterissa flokkiintumista tapahtui selvästi enemmän.

Testin oleellisin havainto oli, ettei ruostumaton teräs ole anodimateriaalina inertti. Näytteessä 4.2 rautaa havaittiin $1082,3 \pm 10,6$ ppm, kromia $295,7 \pm 6,6$ ppm, nikkeliä $84,5 \pm 3,9$ ppm ja mangaania $28,1 \pm 5,7$ ppm (kuvaaja 1).



Kuvaaja 1. Näytteen 4.2 metallipitoisuudet.

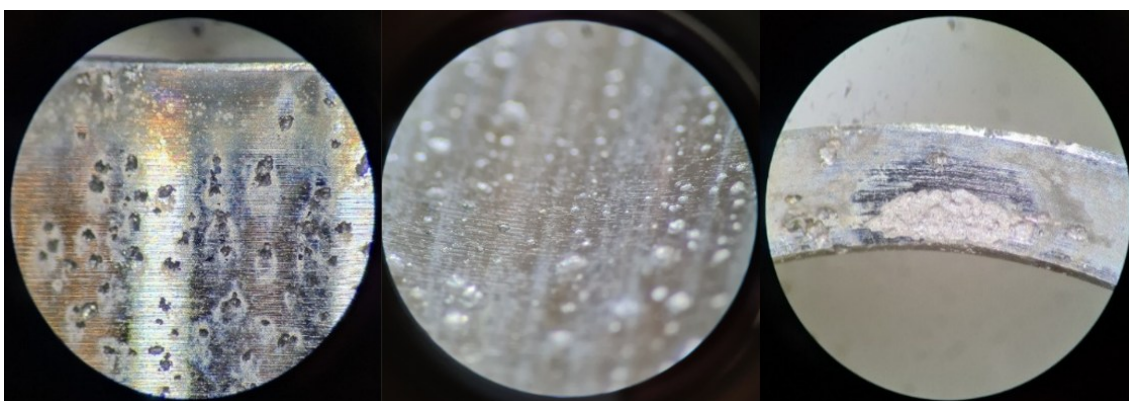
Kaikkiaan näitä – mitä ilmeisimmin RST-anodista peräisin olevia metalleja – havaittiin yhteensä $1490,6 \pm 26,8$ ppm. Pelkästään jo edellä mainittujen metallien pitoisuus näytteessä on siis EDX-analyysin mukaan vähintään 1,46 g/l, joten näytteen kiintoainepitoisuuden mittaustuloksen (1,03 g/l) on oltava virheellinen. Tästä syystä tuloksissa on mukana "laskennallinen biomassan konsentraatio" (0,176 g/l), joka on laskettu olettaen, että prosessin läpi syötetty biomassa ($0,13 \text{ g/l} * 0,78 \text{ l} =$) 0,10 g on nyt konsentraatin tilavuudessa 586,6 ml. Tällöin saavutettu konsentraatiokerroin olisi 1,33, joka myös hieman lähemmin vastaa konsentraatinäytteiden OD-mittaustuloksista laskettua keskimääräistä konsentraatiokerrointa 1,35.

Sähkökentän avulla suodatin pysyi puhtaampana kuin mikrosuodatustestissä ilman sähkökenttää. Suodattimen pinnalle kertyi mikrosuodatukseen nähden paljon ohuempi kerros mikrolevää (kuva 18), josta suuri osa irtosi astianpesuaineen ja harjauksen avulla. Tämän jälkeen suodatin puhdistettiin liottamalla 2-molaarisessa suolahappoliuoksessa vuorokauden ajan.



Kuva 18. Sintrattu RST-suodatinelementti 12 V elektrofiltratusta ennen ja jälkeen (8x suurennos).

Prosessin aikana anodiputken kaikille pinnoille oli muodostunut mikroskooppisia kraatereita kohtiin, joista metallia oli liuennut (kuva 19). Tällaista korroosiota kutsutaan pistekorrosioksi. Tämä on ruostumattomalle teräkselle tyypillinen paikalliskorroosion muoto erityisesti kloridipitoisissa ympäristöissä, ja se johtuu materiaalin pintaa suojaavan oksidikalvon paikallisesta hajoamisesta [28].



Kuva 19. Mikroskooppikuvat RST-anodiputken kunnosta 12 V elektrofiltratustestin jälkeen (35x suurennos).

Testin aikana erottelukammiossa havaittiin tapahtuvan ilmiö, jossa elektrodien ympärillä virtaava neste kirkastui ja kammion pohjalle muodostui tasainen, noin puolen senttimetrin paksuinen kerros muuhun nesteeseen nähden sameaa mikroleväsuspensiota (kuva 20). Elektrodeilla syntyvät happi- ja vetykuplat loivat

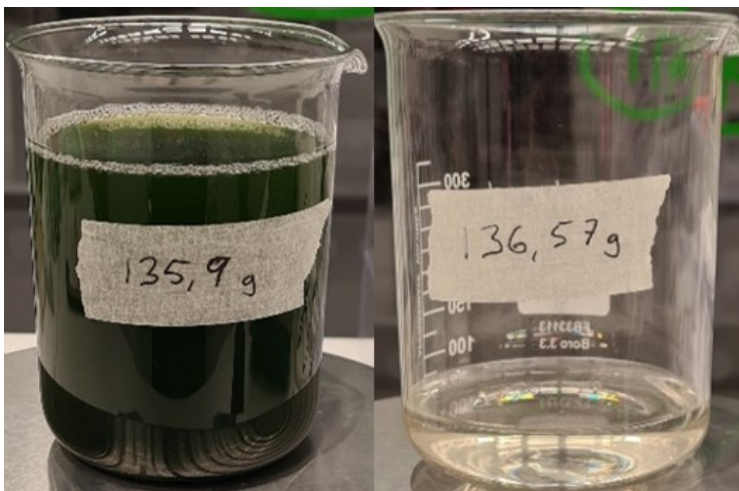
noustessaan elektrodien väliin virtauksen, joka silmin nähten imi pohjalle muodostuneesta kerroksesta tummanvihreää syötettä, kuljettaen sen elektrodien välistä ja ylivuodon kautta konsentraattiasiaan.



Kuva 20. Kuvasarja 12 V elektro-suodatustestissä tapahtuneesta kirkastumisilmästä.

7.4 Elektro-suodatustesti 6 V:n jännitteellä

Toisessa elektro-suodatustestissä käytettiin vastaavaa elektrodikokoonpanoa kuin ensimmäisessä, mutta suodatinelementti vaihdettiin uuteen, ja jännitteeksi asetettiin 6 V. Näillä asetuksilla virta oli keskimäärin 0,61 A (35 % edellisestä) ja teho 3,66 W (18 %). Testin kesto oli 15 min, jonka aikana konsentraattia kertyi 368,7 ml (näyte 7) ja suodosta 61,4 ml (näyte 8) (kuva 21). Erottelun energiankulutus oli 1,9 Wh, jolloin energiakustannus kirkastettua litraa kohden oli 31,2 Wh/l.



Kuva 21. 6 V:n elektrosuodatustestistä kerätty konsentraatti ja suodos.

OD-mittauksen perusteella konsentraatin konsentraatiokerroin oli 1,11 ja suodoksesta määritetty mikrolevän poistotehokkuus oli 96 %. Suodosta syntyi konsentraattiin nähden suhteessa 1:6, eli konsentraatin biomassan konsentraation voidaan arvioida nousseen noin 16 %.

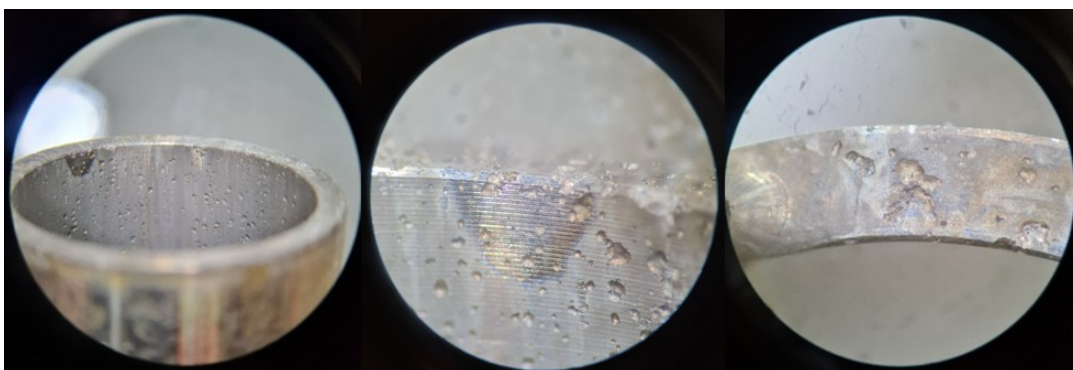
Konsentraatin pH laski edelliseen kokeeseen verrattuna vain maltilliset 1,5 pH-yksikköä, kun taas suodoksen pH nousi lähes yhtä paljon kuin aiemmin, 3,4 pH-yksikköä. Suodoksen suuri pH-muutos on looginen suodattimen toimiessa kato-dina. Kaikki sen läpi kulkeva neste kulkee katodilla tapahtuvan pelkistysreaktion läpi. Konsentraattiin sen sijaan voi sekoittua syötettä, joka ei ole kulkenut anodireaktion kautta, mikä selittää sen pienemmän pH-muutoksen. Tässä testissä konsentraatissa ei ollut havaittavissa flokkiintumista, eikä erottelukammiossa tapahtunut vastaavaa kirkastumisilmiötä, kuin edellisessä 12 V:n elektrosuodatus-testissä. Elektrodeilla ei myöskään syntynyt läheskään yhtä paljon vety ja happi-kuplia edelliseen testiin nähden.

Puolta pienempi jännite laski nesteen poistamisen energiakustannusta 41 %, mutta samalla suodoksen tilavuusvirta laski 47 %. Suodattimeen jäi visuaalisen arvion perusteella vähemmän biomassaa kuin 12 V:n jännitteellä ajetussa testissä (kuva 22), mikä voi olla selitettävissä puolta pienemmällä tilavuusvirralla ja lyhyemmällä testin kestolla.



Kuva 22. RST-suodatinelementti 6 V elektro-suodatusta ennen ja jälkeen.

Testissä käytettiin samaa aiemmassa elektro-suodatustestissä käytettyä RST-anodia, jonka pinnalle oli jo muodostunut kraatereita. Toisen testin aikana kraatereit näyttävät hieman syventyneen ja putken sisäpinnalle muodostui tasainen, valkean värinen mattapinta (kuva 23).



Kuva 23. Mikroskooppikuvat RST-anodiputken kunnosta 6 V:n elektro-suodatustestin jälkeen (suurennot järjestyksessä vasemmalta oikealle 8x, 35x, 35x).

7.5 Elektrokoagulaatiotesti

Elektrokoagulaatiotestissä elektrodiin asennettiin teräsanodi ja suodattimen paikalle katodiputken pätyyn asennettiin suodattimen mitoilla valmistettu RST-

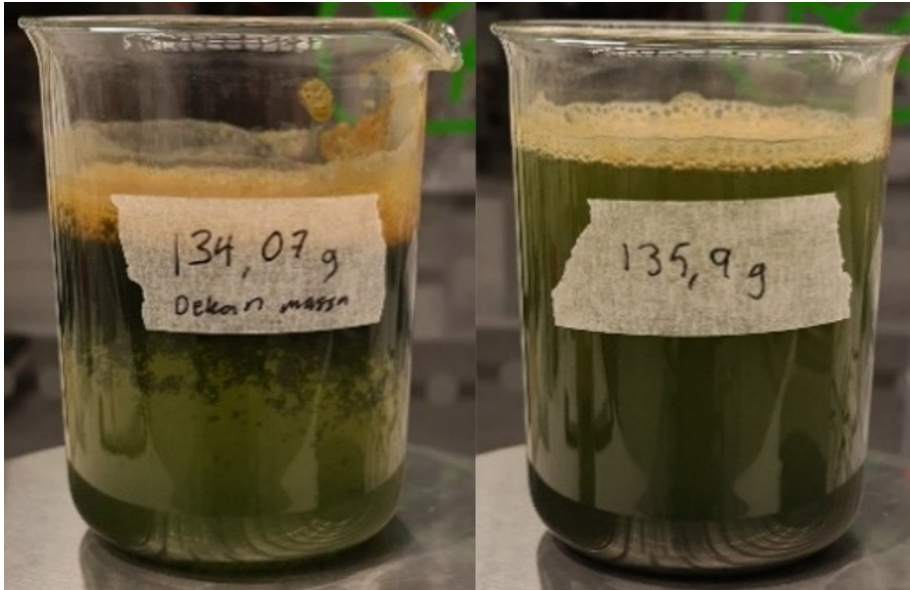
putki (kuvassa 8 merkattu "RST-tulppa"), joka toimi suodoksen imukanavan tulppana. Tällöin ainoa reitti ulos erottelukammioista oli ylivuotoaukon kautta.

Ensimmäiset testit suoritettiin sähkövirroilla 0,05 A, 0,5 A ja 1,0 A ja syöttöpumpun nopeudella 2,3 ml/s. Näistä missään testissä levä ei sekoittamisesta huolimatta silminnähden flokkiintunut tai sedimentoitunut normaalia nopeammin (kuva 24).



Kuva 24. Elektrokoagulaatiotestin tuotteet virralla 0,5 A (vasen) ja 1,0 A (oikea), tilavuusvirralla 2,3 ml/s.

Viimeisenä tehtiin testit tilavuusvirralla 0,56 ml/s (näyte 5) ja 1,12 ml/s (näyte 6), sähkövirran ollessa 1,0 A ja teho noin 6,4 W (kuva 25). Näistä ensimmäisessä levä flokkiintui osittain ja nousi elektrolyysissä syntyneiden kuplien avulla nesteen pintaan muutamassa minuutissa. Prosessin aikana mikroleväsuspension pH-arvo nousi n. 0,5 yksikköä.



Kuva 25. Elektrokoagulaatiotestin tuotteet virralla 1,0 A, tilavuusvirralla 0,56 ml/s (vasen) ja 1,12 ml/s (oikea).

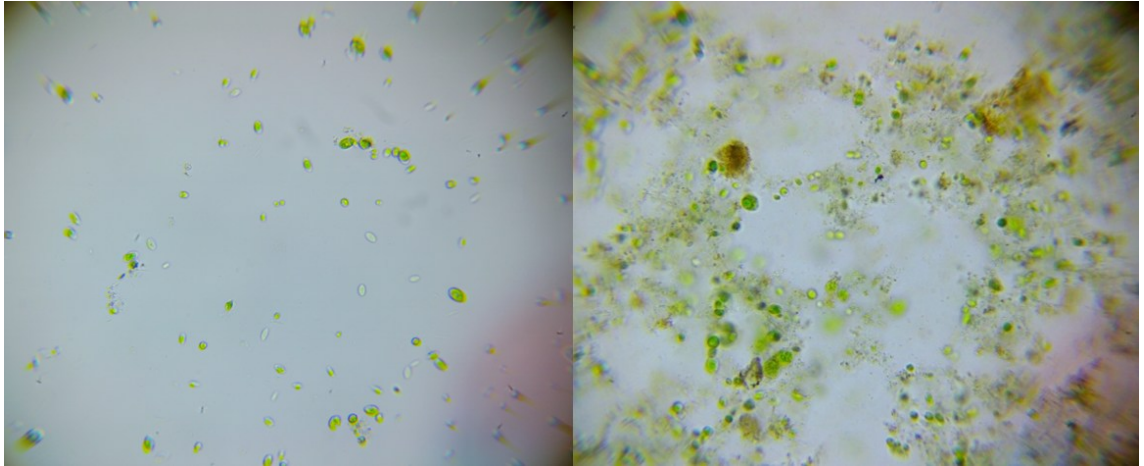
Noin tunnin sisällä aiemmin kelluneet flokit sedimentoituivat dekanterin pohjalle, jolloin supernatantti (sedimentin yläpuolelle jäävä neste) hävitettiin ja dekanterin pohjalle kertyneestä sakasta kerättiin näyte 5.1. Näytteistä 5 ja 6 suodatettiin kiintoaine sen konsentraation määrittämiseksi (kuva 26), jonka jälkeen näiden suodoksista tehtiin EDX-analyysit. Kuvasta 26 nähdään miten vahvasti koagulanttina toimiva rauta värjää biomassan.



Kuva 26. Näytteistä 5 ja 6 suodatettu kiintoaine.

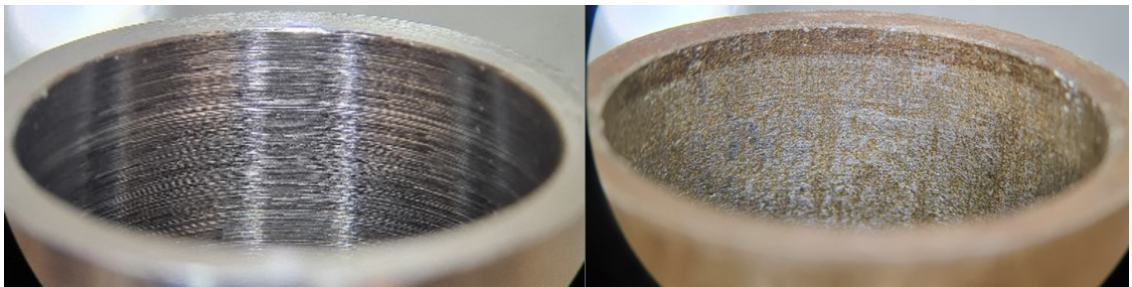
Näytteestä 5.1 kiintoainetta ei suodatettu, jotta sen alkuainepitoisuudet voitiin havaita EDX-analyysillä. Tuloksista nähtiin sen sisältävän merkittävä määrä

rautaa (4352 ± 23 ppm) ja fosforia (1757 ± 76 ppm). Näytteestä 5.1 otetussa mikroskooppikuvassa on mikrolevän ympärillä nähtävissä elektrokoagulaation saostamaa ainesta (kuva 27).



Kuva 27. Mikroskooppikuvat elektrokoagulaation vaikutuksesta. Vasemmalla näyte 0 (alkutila) ja oikealla näyte 5.1 (40x suurennos).

Prosessin aikana teräsanodin sisäpinta hapettui röpelöiseksi ja putken ulkopuolelle muodostui tasainen kerros ruostetta (kuva 28).



Kuva 28. Mikroskooppikuvat teräsanodista elektrokoagulaatiota ennen ja jälkeen (8x suurennos).

7.6 Yhdistetty elektrosuodatus ja -koagulaatio

Viimeisenä testinä suoritettiin yhdistetty elektrokoagulaatio ja -suodatustesti. Asetelma on vastaavanlainen, kuin elektrosuodatuksessa, mutta RST-anodin sijaan käytetään S355-rakenneteräksestä valmistettua anodiputkea. Testit

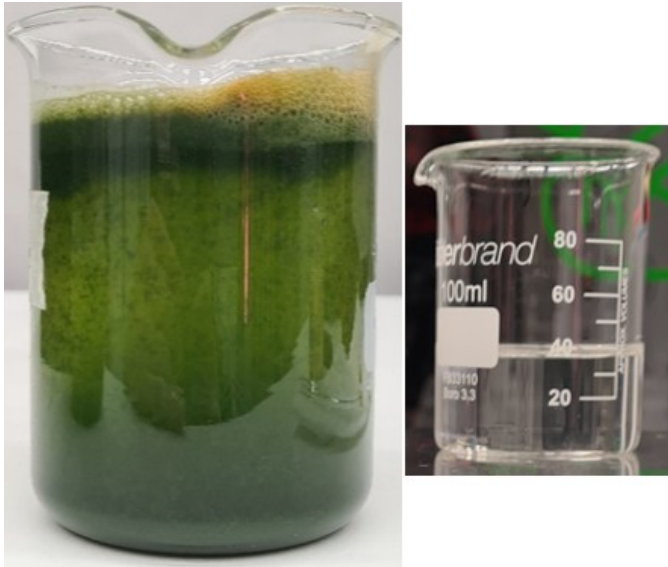
suoritettiin sähkövirroilla 0,5 A ja 1,5 A. Näistä ensimmäinen, 0,5 A:n testi kesti noin 8 minuuttia, jonka aikana laitteen läpi virtasi yhteensä 285,2 ml syötettä. Tästä suodosta kertyi 63,2 ml ja konsentraattia noin 222 ml. Vastaavasti 1,5 A:n testin kesto oli 11 min, ja syötteen kokonaistilavuus oli 423,1 ml, josta suodosta saatiin 35,9 ml ja konsentraattia 387,2 ml. Testien tuotteista kerättiin näytteet 9–12.

0,5 A virralla mikrolevä ei näyttänyt flokkiintuvan lainkaan ja suodos oli kellertävää (kuva 29). Kyseisellä virralla suodosta syntyi konsentraattiin nähden suhteessa 2:7, kun taas 1,5 A virralla suhde oli noin 1:11. Tämä todennäköisesti johtuu suodattimen tukkeutumisesta, sillä testit suoritettiin aikarajoitteiden takia peräkkäin, puhdistamatta suodatinta testien välissä.



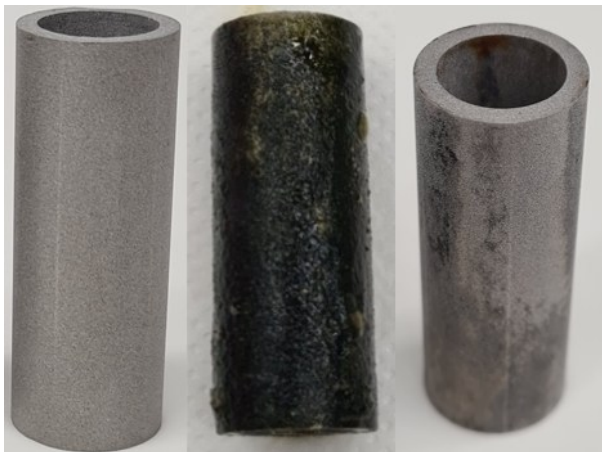
Kuva 29. Yhdistetyn elektro-suodatus ja -koagulaatiotestin tuotteet virralla 0,5 A.

1,5 A virralla levä flokkiintui ainoastaan osittain, vastaavasti kuin elektrokoagulaatiotestissä, mutta tämän suodos oli täysin kirkasta (kuva 30). Lienee mahdollista, että korkeamman potentiaalinsa ansiosta, suodattimen läpi kulkevaan nesteeseen liuenneet rautaionit, ovat kiinnittyneet suodattimen pintaan tehokkaammin.



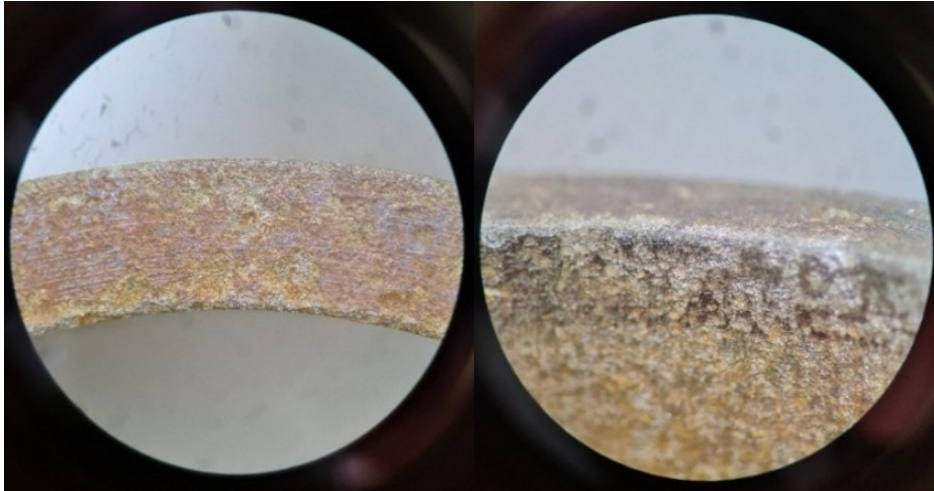
Kuva 30. Yhdistetyn elektroosuodatus ja -koagulaatiotestin tuotteet virralla 1,5 A.

Testien aikana myös suodattimen pintaan jäi merkittävä määrä aikaisempiin havaintoihin nähden selvästi tummempaa levää, joka oli kiinnittynyt suodattimeen aiempia kovemmin. Testin jälkeen suodatin puhdistettiin uittamalla 2-molaarisessa suolahappoliuoksessa vuorokauden ajan. Tämänkin jälkeen suodatin oli selvästi heikommassa kunnossa aiempiin testeihin verrattuna. (kuva 31).



Kuva 31. Suodatinelementti ennen testejä, testien jälkeen ja suolahappoliuotuksen jälkeen (vastaavasti vasemmalta oikealle).

Testaukseen käytettiin samaa, jo elektrokoagulaatiotestissä käytettyä anodia. Kuten voitiin odottaa, anodin pinta hapettui entisestään. Testien jälkeen anodin pinta oli kauttaaltaan tasaisen ruostekerroksen peitossa (kuva 32).



Kuva 32. Mikroskooppikuvat rauta-anodista yhdistetyn elektrosuodatus ja -koagulaatiotestin jälkeen (35x suurennos).

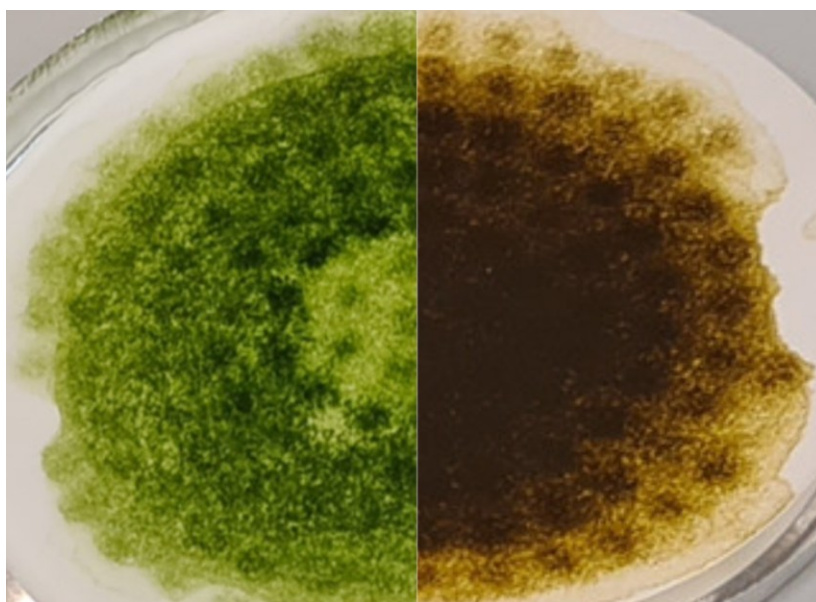
Erikoista on, että 0,5 A virralla suodoksen tilavuusvirta oli yhtä suuri, kuin RST-anodilla 1,7 A virralla tehdyssä testissä, mutta nesteen poistamisen energiakustannus oli 76 % pienempi. Mahdollisesti juuri tämän (sähkövirtaan suhteessa suuremman tilavuusvirran) ansiosta suodoksen pH-arvo nousi testeistä vähiten, vain 2,1 yksikköä. Myös konsentraatin pH-arvo laski ainoastaan 0,3 yksikköä.

8 Tulokset ja niiden analysointi

Mikrosuodatustestissä ilman sähkökenttää suodoksen virtaus laski hyvin nopeasti miltei olemattomaksi. Suodatukseen valittu pumppu oli selvästi suodattimen pinnalle muodostuneen suodatinkakun vastukselle alitehoinen. Sähkökentän avulla sen sijaan suodatin pysyi puhtaampana pidempään ja suodoksen virta vaikutti pysyvän tasaisempana. Elektrosuodatustesteissä RST-anodista liukeni konsentraattiin raudan lisäksi myös raskasmetalleja kuten kromia, nikkeliä ja mangaania, mikä rajoittaa tällä menetelmällä erotellun biomassan käyttökohteita. Testeissä tuli ilmi myös yksi elektrosuodatuksen rakenteellinen haaste –

sen vaikutus suodoksen pH-arvoon. Suodattimen toimiessa katodina, suodoksen pH-arvo välttämättä nousee, sen kulkiessa katodilla tapahtuvan pelkistymisreaktion läpi.

Elintarvikekäytössä, usein myös tuotteen visuaalisilla ominaisuuksilla on merkitystä. Elektrosuodatustesteissä, joissa anodimateriaalina toimi ruostumaton teräs, konsentroitua mikrolevä pysyi väriltään vihreänä, kun taas elektrokoagulaatiotestissä teräsanodilla, biomassa värjäytyi tumman ruskeaksi (kuva 33). Värjäytyminen ei tapahtunut välittömästi elektrokoagulaation jälkeen, vaan väri tummui vähitellen, n. vuorokaudessa, kunnes biomassa oli täysin tumman ruskeaa.



Kuva 33. Suodatettu biomassa elektrosuodatuksen (vas.) ja elektrokoagulaation (oik.) jälkeen.

Elektrokoagulaation ja -suodatuksen yhdistämisellä saavutettiin alhaisin energiakustannus (12,7 Wh/l poistettua nestettä), jolloin suodoksen tilavuusvirta oli 0,13 ml/s. Elektrosuodatuksella sama tilavuusvirta saavutettiin energiakustannuksella 53,2 Wh/l. Erottelumenetelmien yhdistämisessä ongelmia kuitenkin aiheutti raudan ja kiintoaineiden kertyminen suodattimeen. Kyseinen testi toteutettiin suodattimella, jota oli uitettu 2-molaarisessa suolahappoliuoksessa

vuorokauden ajan suodattimeen kertyneen orgaanisen aineen poistamiseksi. Vasta testien jälkeen kuitenkin selvisi, että tämä ei ole RST-osien puhdistamiseen soveltuva kemikaali, sillä se voi aiheuttaa materiaalille vakavaa korroosiota jo suhteellisen alhaisilla konsentraatioilla [29]. Suodatinelementti on valmistettu SUS316L ekvivalentista materiaalista, jolla kerrotaan olevan 304/304L laatuihin verrattuna merkittävästi parempi korroosionkestävyys, ja 316L-laadun kerrotaan kestävän jopa laimeita suolahappoliuoksia [30]. 2-molaarista suolahappoliuosta ei kuitenkaan voida katsoa laimeaksi, joten ei voida sulkea pois mahdollisuutta, että tämä on vaikuttanut suodatinelementin toimivuuteen mekaanisesti ja/tai elektrokemiallisesti.

Taulukossa 3 on listattu tuloksia testeistä, joissa käytettiin jokseenkin vertailtavissa olevaa elektrodikokoonpanoa, eli muut kuin elektrokoagulaatiotesti. Taulukkoon on kerätty testien oleelliset tulokset, eli tilavuusvirrat, pH-arvot, energiakustannus, konsentraatin konsentraatiokerroin ja mikrolevän poistotehokkuus. Tarkempaa tarkastelua varten kaikki testeistä kerätyt tulokset ja testien parametrit löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 3. Testien tuloksista valikoidut vertailtavat arvot. ES = elektro-suodatus, EK = elektrokoagulaatio.

Menetelmä	Syöte			Konsentraatti				Suodos			
	Virta [A]	Tilavuusvirta [ml/s]	pH	Tilavuusvirta [ml/s]	pH	Konsentraatiokerroin (lask.)	Konsentraatiokerroin (OD)	Tilavuusvirta [ml/s]	pH	Energia-kustannus [Wh/l]	Mikrolevän poistotehokkuus
ES	1,72	0,52	8,8	0,39	5,5	1,33	1,35	0,13	12,6	53,2	-
ES	0,61	0,48		0,41	7,3	1,17	1,11	0,07	12,2	31,2	96,2 %
EK + ES	1,5	0,64		0,59	9,0	1,29	1,70	0,05	12,5	88,8	95,9 %
EK + ES	0,5	0,59		0,46	8,5	1,09	1,52	0,13	10,9	12,7	93,7 %

Konsentraatiokerroin on esitetty taulukossa sekä laskennallisen konsentraation, että OD-mittaustulosten perusteella laskettuna. Näitä vertailemalla nähdään, ettei tulokset oli kovin tarkkoja. Kuitenkin näistä saadaan käsitys siitä, ettei saavutetut konsentraatiokertoimet ole kovinkaan suuria lukuja. Mikrolevän

poistotehokkuus sen sijaan oli sintratusuodatinelementin ansiosta kaikissa testeissä yli 93 %. Suodoksissa elektrodeista peräisin olevia metalleja havaittiin ainoastaan (yhdistetystä elektrosuodatus ja -koagulaatiotestistä kerätyssä) näytteessä 10, jossa rautaa oli $130,70 \pm 5,27$ ppm ja kromia $40,34 \pm 6,31$ ppm.

9 Johtopäätökset

Elintarvikkeeksi tarkoitetun mikrolevän erottelussa elektrosuodatuksen avulla tulisi käyttää liukenematonta anodimateriaalia, kuten titaania tai grafiittia, jotta tämä ei liukenisi käsiteltävään mikroleväsuspensioon. Elektrokoagulaation kohdalla taas tulee kiinnittää erityistä huomiota erotellun biomassan metallipitoisuuksiin.

Sintrattu RST-suodatinelementti todettiin elektrosuodatuksen toimivaksi ratkaisuksi. Tämän rakenteellisten ominaisuuksien ansiosta se on helposti integroitavissa osaksi elektrodikokoonpanoa ja on kemiallisesti pestävissä uudelleenkäyttöä varten. Elektrosuodatuksessa suodoksen pH-arvo nousee ja konsentraatin pH-arvo laskee, mikä saattaa vaikuttaa mikrolevän laatuun ja kirkastetun viljelyliuoksen uudelleenkäyttöön.

Elektrokoagulaation ja -suodatuksen yhdistämisen ideana oli, että sama energia, joka kulutetaan elektrosuodatuksessa suodattimen tukkeutumista ehkäisevän sähkökentän luomiseen, samalla vapauttaisi rauta-anodista koagulanttia, joka taas erottelun seuraavassa vaiheessa helpottaisi levän talteenottoa. Näiden yhdistäminen ei kuitenkaan välttämättä ole järkevää, sillä anodista liukenevaa rautaa kertyy selvästi suodattimeen. Lisäksi kyseisellä erottelukammion rakenteella, prosessissa jo koaguloitunut levä saattaa päästä kulkeutumaan erottelukammiossa uudelleen elektrodien väliin, eikä sähkökenttä tällöin enää pysty vaikuttamaan pintavaraukseltaan neutraloituun levään, jolloin suodattimen likaantuminen lisääntyy. Tästä syystä erottelukammio tulisi suunnitella niin, että elektrodien välistä levä pääsee kulkeutumaan kuplien mukana ainoastaan ylöspäin, yhtä reittiä ulos kammioista.

10 Yhteenveto

Työssä kehitettiin lyhyen kirjallisuuskatsauksen pohjalta pienikokoinen omavalmisteinen mikrolevän erottelulaite, jonka on tarkoitus toimia mikrolevän erottelun primäärikonsentroitivaiheena. Laite kehitettiin rakenteeltaan sellaiseksi, että tällä voitiin testata kolmea eri erottelumenetelmää: mikro-suodatusta, elektro-suodatusta ja elektrokoagulaatiota. Laite valmistettiin 3D-tulostuksen ja manuaalikoneistuksen avulla.

Työssä testattiin SMC Automationin tarjoamaa sintrattua RST-suodatinelementtiä mikrolevän erotteluun elektro-suodatuksen avulla. Erottelutesteissä, joissa suodatinta käytettiin, saavutettiin kaikissa vähintään 93 % mikrolevän poistotehokkuus, joten suodatinelementti todettiin toimivaksi ratkaisuksi tähän tarkoitukseen.

Elektro-suodatuksen todettiin vähentävän suodattimen pinnalle kertyvän suodatinkakun muodostumista normaaliin mikro-suodatukseen nähden. Testeissä havaittiin RST-anodista liukenevan käsiteltävään nesteeseen raudan lisäksi kromia, nikkeliä ja mangaania, mikä rajoittaa tällä tavoin erotellun biomassan mahdollisia käyttökohteita. Elektrokoagulaatiotesteissä mikrolevää ei onnistuttu koaguloimaan täysin ja koagulanttina toimivan raudan todettiin värjäävän biomassaa ruskeaksi. Yhdistetyn elektro-suodatuksen ja -koagulaation testeissä saavutettiin energiakustannuksen kannalta paras tulos, mutta näiden yhdistäminen samaan erottelukammioon ei ole kannattavaa suodattimen lisääntyneen likaantumisen vuoksi.

Lähteet

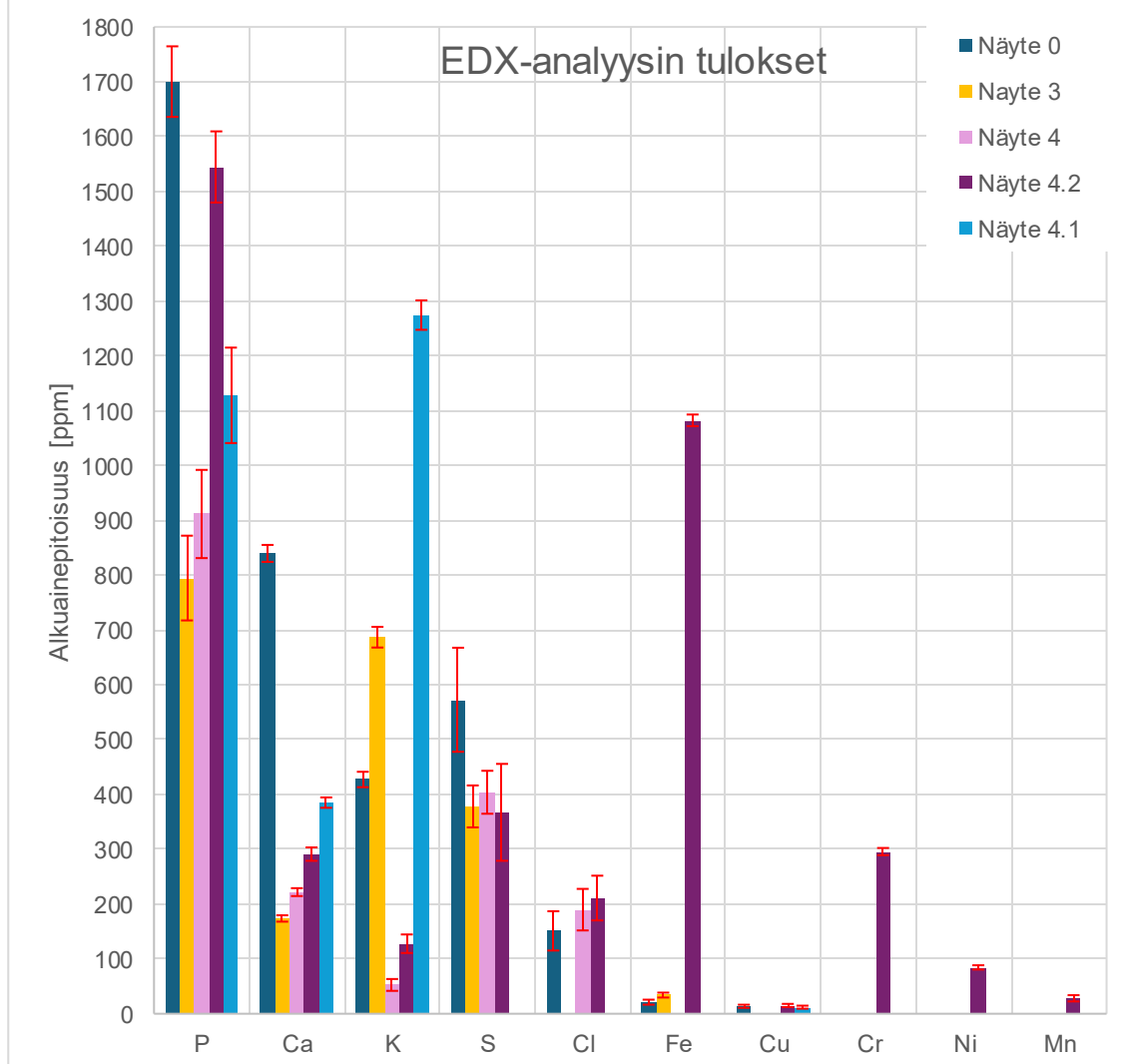
- 1 Riihimäki, Anu. Toimiva ravintoverkko turvaa meren elämän. Verkkoaineisto. Itämeri.fi. <https://itameri.fi/fi-FI/Opi_ja_tutki/Ekologia/Ravintoverkko>. Luettu 13.02.2025.
- 2 Safi, Carl; Zebib, Bachar; Merah, Othmane; Pontalier, Pierre-Yves & Vacarcia, Carlos. 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Vol 35, s. 266.
- 3 Matos, Ângelo Paggi. 2019. Chapter 3 - Microalgae as a potential source of proteins. *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications*.
- 4 Ojanen, Suvi; Tyystjärvi, Esa & Jokinen, Kari. 2017. Utilization of microalgae in industrial symbiosis, focus on Finland. *Natural resources and bioeconomy studies*. 33/2017. Natural Resources Institute Finland (Luke). s. 4.
- 5 Singh, Gulab & Patidar, S.K. 2018. Microalgae harvesting techniques: A review. *Journal of Environmental Management*. Vol. 217.
- 6 García, Jose L.; de Vicente, Marta & Galán, Beatriz. 2017. Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Microbial Biotechnology*. Vol. 10, s. 1017.
- 7 Hu, Qiang; Sommerfeld, Milton; Jarvis, Eric; Ghirardi, Maria; Posewitz, Matthew; Seibert, Michael & Darzins, Al. 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*. Vol. 54(4), s. 621–639.
- 8 Richmond, Amos, & Hu, Qiang. 2013. *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. John Wiley & Sons, Incorporated, Newark.
- 9 Barros, Ana I.; Gonçalves, Ana L.; Simões, Manuel; Pires, José C.M. 2014. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 41.
- 10 Visigalli, Simone; Barberis, Maria Giulia; Turolla, Andrea; Canziani, Roberto; Zrimec, Maja Berden; Reinhardt, Robert & Ficara, Elena. 2021. Electrocoagulation–flotation (ECF) for microalgae harvesting – A review. *Separation and Purification Technology*. Vol. 271, s. 1.

- 11 Fasaei, F.; Bitter, J.H.; Slegers, P.M. & vanBoxtel, A.J.B. Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research* 31.
- 12 Ripperger, Siegfried; Gösele, Walter & Alt Christian. 2012. *Filtration, 1. Fundamentals*. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Vol. 14, s. 679–680.
- 13 Sintered Metal Element (Bronze/Stainless Steel). Datalehti. SMC Corporation. <<https://www.smcworld.com/catalog/iFilter-Hyd-en/mpv/E112-SM-Elements/data/E112-SM-Elements.pdf>>. Luettu 24.03.2025.
- 14 Šulc, Radek & Hladíková Martina. 2022. The Potential of Dynamic Filtration for Microalgae Harvesting. *Chemical Engineering Transactions*. Vol 94, s. 895–900.
- 15 Kim, Dong-Yeon; Hwang, Taewoon; Oh, You-Kwan & Han, Jong-In. 2014. Harvesting *Chlorella* sp. KR-1 using cross-flow electro-filtration. *Algal Research*. Vol. 6B, s. 170.
- 16 Mollah, Mohammad Y.A.; Morkovsky, Paul; Gomes, Jewel A.G.; Kesmez, Mehmet; Parga, Jose & Cocke, David L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. B114.
- 17 Deepa, Ponnuvel; Sowndhararajan, Kandhasamy & Kim, Songmun. 2023. A Review of the Harvesting Techniques of Microalgae. *Water*. Vol. 15(17), s. 13.
- 18 Maria, Melani. 2016. Difference Between Coagulation and Flocculation. Verkkoaineisto. Pediaa. <<https://pediaa.com/difference-between-coagulation-and-flocculation/>>. Luettu 25.02.2025.
- 19 Bratby, John. 2006. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Second edition. London: IWA Publishing.
- 20 Daphtary, Neel. 2021. Coagulation water treatment: Which coagulants are best for your facility? Verkkoaineisto. Chemtech International. <<https://chemtech-us.com/coagulation-water-treatment-which-coagulants-are-best-for-your-facility/>>. Luettu 25.02.2025.
- 21 Jones, Brian. 2020. Inorganic and organic coagulants: Making an informed decision. Verkkoaineisto. Veolia. <<https://blog.veoliawatertechnologies.co.uk/inorganic-vs-organic>>. Luettu 25.02.2025.

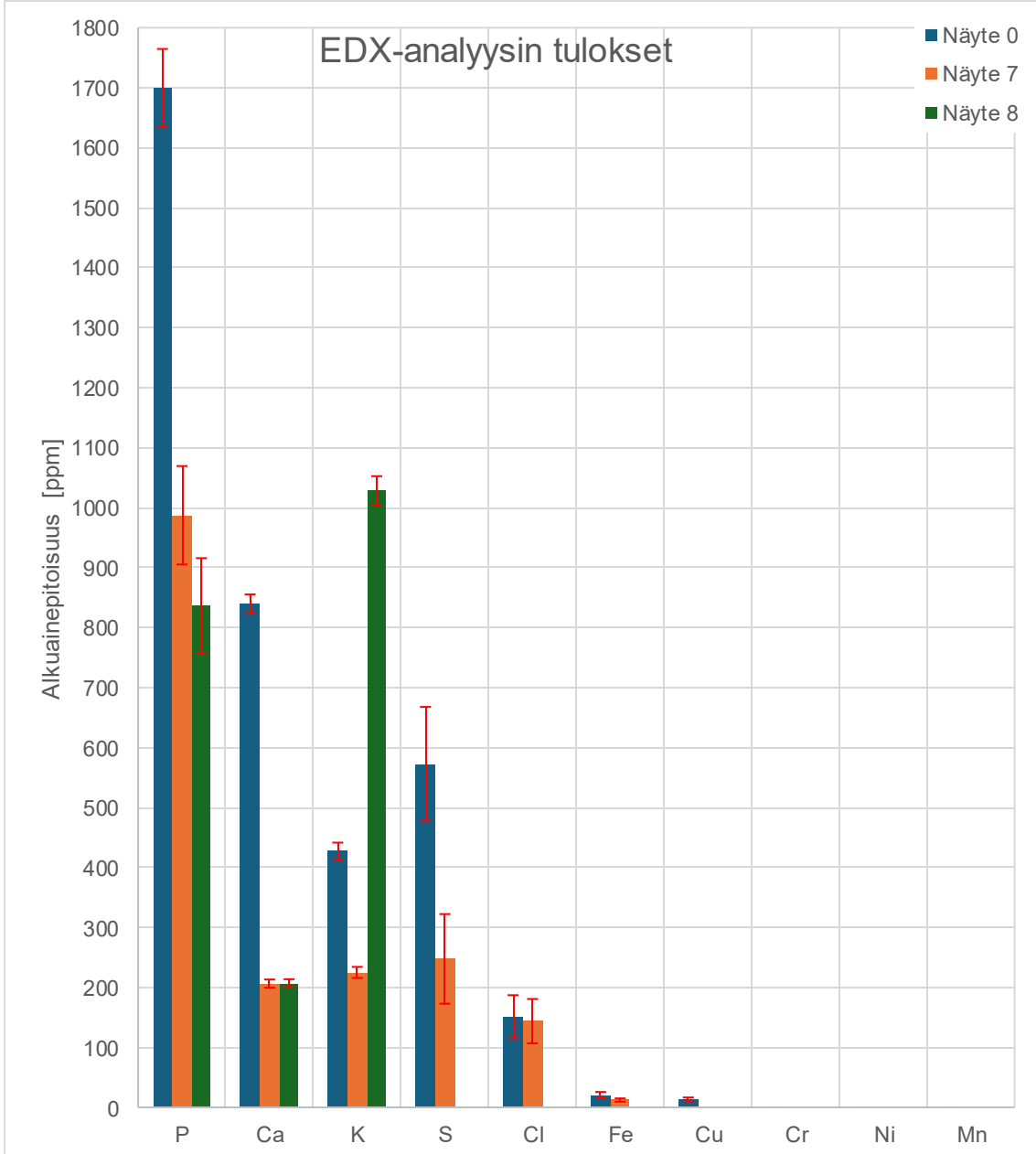
- 22 Lucakova, Simona; Branyikova, Irena; Kovacikova, Sara; Pivokonsky, Martin; Filipenska, Monika; Branyik, Tomas & Ruzicka, Marek C. 2021. Electrocoagulation reduces harvesting costs for microalgae. *Bioresource Technology*. Vol. 323.
- 23 Pratama, Wahyu Diski & Hadiyanto, Hadiyanto. 2024. Evaluation of different electrodes in electrocoagulation-flotation process for *Chlorella vulgaris* harvesting. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. Vol. 10, s. 7.
- 24 Kuokkanen, Ville. 2016. Utilization of electrocoagulation for water and wastewater treatment and nutrient recovery – Techno-economic studies. Väitöskirja. Oulun yliopiston tutkijakoulu; Oulun yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Luonnontieteellinen tiedekunta. OuluREPO – Oulun yliopiston julkaisuarkisto.
- 25 Valtion ravitsemusneuvottelukunta & Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. 2024. Kestävää terveyttä ruoasta – kansalliset ravitsemussuositukset 2024. Helsinki: PunaMusta Oy.
- 26 Joint FAO/WHO food standards programme codex committee on contaminants in foods – working document for information and use in discussions related to contaminants and toxins in GSCTF. 2018. Utrecht, Alankomaat.
- 27 Abdel-Shafy, Hussein I.; Morsy, Rehan M. M.; Hewehy, Mahmoud A. I.; Razeq, Taha M. A. & Hamid, Maamoun M. A. Treatment of industrial electroplating wastewater for metals removal via electrocoagulation continuous flow reactors. 2022. *Water Practice & Technology*. Vol 17(2), s. 558.
- 28 Corrosion resistance of stainless steel. Verkkoinfo. Outokumpu. <<https://www.outokumpu.com/fi-fi/expertise/stainless-basics/corrosion-resistance>>. Luettu 01.07.2025.
- 29 Stainless steels for highly corrosive environments. Outokumpu Supra range datasheet. Datalehti. Outokumpu. <<https://www.outokumpu.com/en/products/product-ranges/supra>>. Luettu 05.07.2025.
- 30 What Is SUS316L Stainless Steel? Properties, Composition, and Applications. Verkkoinfo. GNEE Steel. <<https://www.stainless-steels.com/info/what-is-sus316l-stainless-steel-properties-c-102871175.html>>. Luettu 01.10.2025.

Testien parametrit ja tulokset

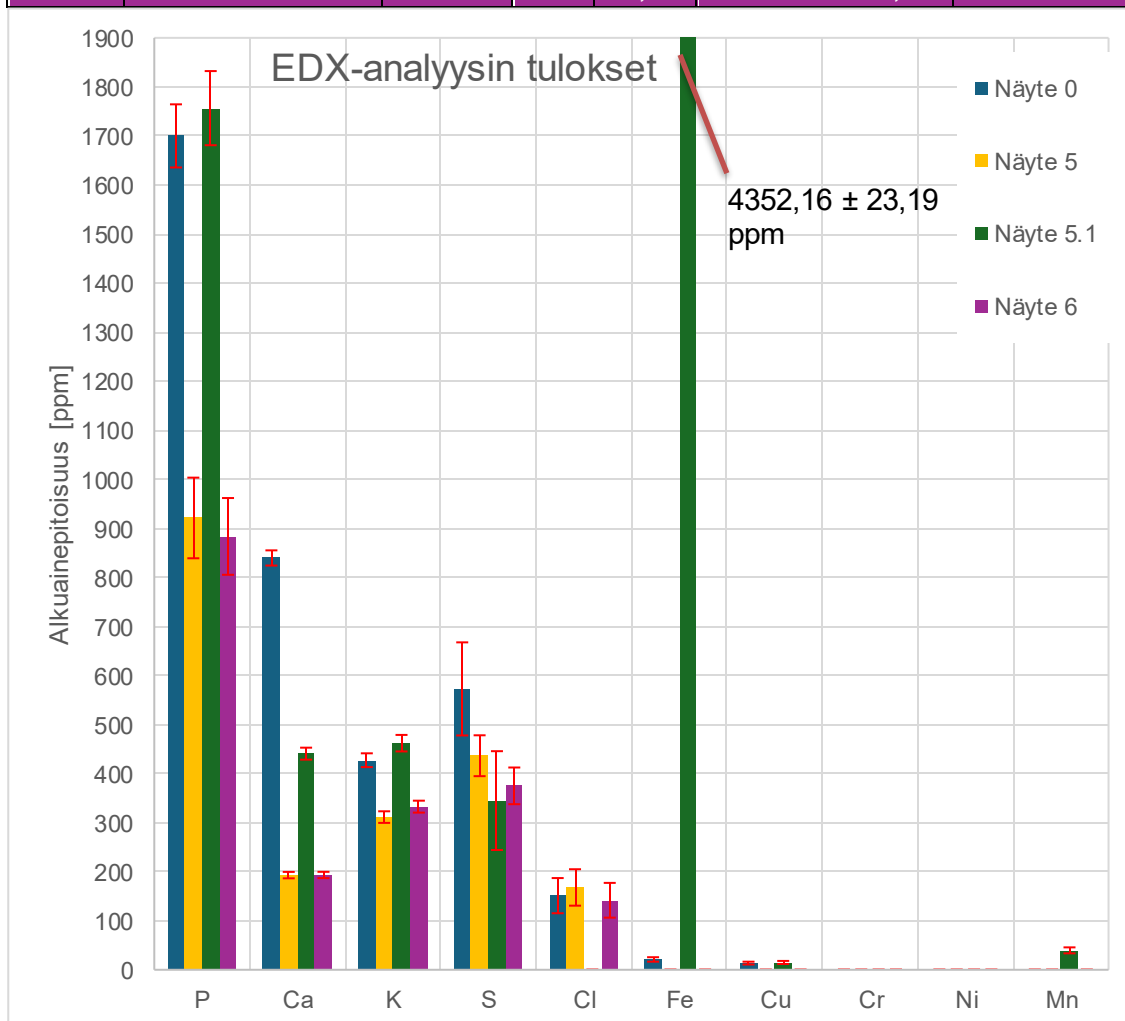
Testin parametrit – Elektrosuodatus (12 V)						
Jännite (vakio) [V]	12	Testin kesto [min]	25,03			
Virta (keskiarvo) [A]	1,7	Pumppuyksikön teho [W]	4,00			
Virtatiheys anodilla [A/m ²]	685,6	Energian kulutus [Wh]	10,3			
Virtatiheys katodilla [A/m ²]	914,1	Energiakustannus [Wh/l]	53,2			
Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	7,0	Laskennallinen biomassan konsentraatio [g/l]	0,176			
Teho (keskiarvo) [W]	20,7					
Näytteiden ominaisuudet						
Näyte #	Selite	Tilavuus [ml]	pH	OD680	Kiintoaineen konsentraatio [g/l]	Tilavuusvirta [ml/s]
0	Syöte (alkutila)	779,9	8,8	1,693	0,132	0,52
3	Konsentraatti (dek. 1)	376,1	5,5	2,200	-	0,39
4	Konsentraatti (dek. 2)	210,4	5,6	2,367	1,032	
4.2						
4.1	Suodos	193,4	12,6	-	-	0,13



Testin parametrit – Elektrosuodatus (6 V)						
Jännite (vakio) [V]	6	Testin kesto [min]	15,00			
Virta (keskiarvo) [A]	0,61	Pumppuyksikön teho [W]	4,00			
Virtatiheys anodilla [A/m ²]	242,50	Energian kulutus [Wh]	1,9			
Virtatiheys katodilla [A/m ²]	323,34	Energiakustannus [Wh/l]	31,2			
Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	9,84	Laskennallinen biomassan konsentraatio [g/l]	0,154			
Teho (keskiarvo) [W]	3,66					
Näytteiden ominaisuudet						
Näyte #	Selite	Tilavuus [ml]	pH	OD680	Kiintoaineen konsentraatio [g/l]	Tilavuusvirta [ml/s]
0	Syöte (alkutila)	430,0	8,8	1,693	0,132	0,48
7	Konsentraatti	368,7	7,3	1,880	0,268	0,41
8	Suodos	61,4	12,2	0,065	-	0,07



Testin parametrit – Elektrokoagulaatio						
Dekanteri 1			Dekanteri 2			
Testin kesto [min]	9,00		Testin kesto [min]	5,58		
Jännite (keskiarvo) [V]	6,39		Jännite (keskiarvo) [V]	6,13		
Virta (vakio) [A]	1,00		Virta (vakio) [A]	1,00		
Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	6,39		Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	6,13		
Teho (keskiarvo) [W]	6,39		Teho (keskiarvo) [W]	6,13		
Pumppuyksikön teho [W]	1,80		Pumppuyksikön teho [W]	2,00		
Energian kulutus [Wh]	1,2		Energian kulutus [Wh]	0,8		
Virtatiheys anodilla [A/m ²]			397,90			
Virtatiheys katodilla [A/m ²]			530,53			
Näytteiden ominaisuudet						
Näyte #	Selite	Tilavuus [ml]	pH	OD680	Kiintoaineen konsentraatio [g/l]	Tilavuusvirta [ml/s]
0	Syöte (alkutila)	674,4	8,8	1,693	0,132	1,7
5	Dekanteri 1	300,3	9,2	3,460	1,178	0,6
5.1	Sakka (Dek. 1)	-	-	-	-	-
6	Dekanteri 2	374,1	9,3	2,760	0,744	1,1



0,5 A testin parametrit – Yhdistetty elektosuodatus ja -koagulaatio			
Jännite (keskiarvo) [V]	3,95	Testin kesto [min]	8,08
Virta (vakio) [A]	0,50	Pumppuyksikön teho [W]	4,00
Virtatiheys anodilla [A/m ²]	198,95	Energian kulutus [Wh]	0,8
Virtatiheys katodilla [A/m ²]	265,27	Energiakustannus [Wh/l]	12,7
Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	7,90	Laskennallinen biomassan konsentraatio [g/l]	0,170
Teho (keskiarvo) [W]	1,98		

1,5 A testin parametrit

Jännite (keskiarvo) [V]	8,93	Testin kesto [min]	11,00
Virta (vakio) [A]	1,50	Pumppuyksikön teho [W]	4,00
Virtatiheys anodilla [A/m ²]	596,85	Energian kulutus [Wh]	3,2
Virtatiheys katodilla [A/m ²]	795,80	Energiakustannus [Wh/l]	88,8
Resistanssi (keskiarvo) [ohm]	5,96	Laskennallinen biomassan konsentraatio [g/l]	0,144
Teho (keskiarvo) [W]	13,41		

Näytteiden ominaisuudet

Näyte #	Selite	Tilavuus [ml]	pH	OD680	Kiintoaineen konsentraatio [g/l]	Tilavuusvirta [ml/s]
0	Syöte (alkutila)	708,3	8,8	1,693	0,132	-
9	Konsentraatti (1,5 A)	387,2	9,0	2,870	1,048	0,59
10	Suodos (1,5 A)	35,9	12,5	0,070	-	0,05
11	Konsentraatti (0,5 A)	222,0	8,5	2,580	0,764	0,46
12	Suodos (0,5 A)	63,2	10,9	0,107	-	0,13

