

**Ammoniumtypen talteenotto biokaasuprosessin rejektivesistä
integroimalla bioelektrokemiallinen käsittely kalvokontaktorin kanssa
(BioNH₄)**

Tampereen yliopisto (TAU), Tampereen ammattikorkeakoulu (TAMK), Aalto Yliopisto (Aalto),
NPHarvest, Pirkanmaan Jätehuolto Oy (PJH Oy)

Hankkeen kesto: 1.5.2024 – 30.11.2025

Rahoituslähde: Ympäristöministeriö

Tiivistelmä

Typpi on tärkeä ravinne maataloudessa, ja sen talteenottoa jätevirroista pitäisi tehostaa. Biojätettä ja puhdistamolietettä käsitellään usein biokaasuprosessissa, jolloin osa tuestä päätyy liukoisessa muodossa, ammoniumtyyppinä ($\text{NH}_4\text{-N}$) mädätteen liukoiseen osaan eli rejektiveteen. Tässä hankkeessa kehitettiin ja optimoitiin ammoniumtyypin talteenottoon integroitua prosessia, jossa yhdistettiin biosähkökemiallinen prosessi kalvokontaktorin kanssa.

Hankkeessa skaalattiin biosähkökemiallinen prosessi laboratoriomittakaavasta (n. 100 mL) pilot-mittakaavaan (n. 100 L). Biosähkökemiallisessa prosessissa mikrobit tuottavat rejektiveden orgaanisesta aineesta sähkövirtaa, jolla konsentroidaan $\text{NH}_4\text{-N}$ rejektivesistä ioninvaihtokalvon läpi katodille. Katodin pH:n nousu muuntaa $\text{NH}_4\text{-N}$:n ammoniakiksi (NH_3) ja mahdollistaa sen erottamisen liuoksesta kalvokontaktorilla, jonka avulla voidaan tuottaa kaupallista lopputuotetta, kuten ammoniumsulfaattia. Biosähkökemiallisen prosessin skaalaaminen osoitti, että mittakaavaa kasvattamalla pystyttiin ylläpitämään melko hyvin $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuuksia, jotka olivat pilot reaktorissa $47.3 \pm 8 \%$. Sen sijaan mittakaavan kasvattaminen nosti prosessin energiankulutus n. kaksinkertaiseksi 1 L mittakaavaan verrattuna. Laboratoriomittakaavan integroidulla prosessilla saatiin katolyytin ammoniumtyyppistä talteen parhaimmillaan 40–50 %.

Hankkeessa testattiin viiden erilaisen kationikalvon selektiivisyyttä ammoniakille mallinnetulla ja oikealla rejektivedellä tavoitteena kalvon ominaisuuksien parempi hallinta ja kalvovalinnan perusteiden selvittäminen. Mittaussarjojen johtopäätöksenä kaksi testatuista kalvotyypeistä osoittautui suorituskyvyltään parhaiksi ja niitä testattiin pilot-reaktorissa. Myös kalvokontaktorin toimintaa optimoitiin uudentyypiselle tyypirikkaalle vedelle ottaen huomioon kiintoaineen ja suolapitoisuuden vaikutukset. Rinnakkaisioneilla ja kiintoaineilla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta ammoniakkin aineensiiirtoon, mikä todettiin sekä kokeellisesti että mallinnuksen avulla.

Hankkeessa myös arvioitiin uudenlaisen integroidun prosessin teknoekonomista kannattavuutta. NHParvestin operointikustannukset arvioitiin pienemmiksi kuin teollisen mittakaavan strippereiden operointi, kun taas BES-prosessin ja integroidun prosessin operointikustannukset olivat hieman suuremmat. Prosessien kustannuksia peilattiin myös niistä saataviin hyötyihin, kuten pienempi tyypinpoiston tarve jätevedenkäsittelyssä sekä tyypilannoitteen myynnistä saatavat tuotot. Kaikki prosessit osoittautuivat vertailussa kannattaviksi siinä tapauksessa, että vaihtoehtona on tyypinpoisto jätevedenpuhdistamolla. Tutkittujen talteenotto-prosessien taloudellisuus riippuu vaihtoehtoisen käsittelyn kustannuksista sekä lopputuotteen kysynnästä.

Hankkeessa pystyttiin osoittamaan, että biosähkökemiallinen reaktori voidaan skaalata ja ylläpitää lähes yhtä suuri ammoniumtyypin poistotehokkuus kuin laboratoriomittakaavassa. Lisäksi pystyttiin osoittamaan, että integroitu prosessi toimii sekä laboratorio- että pilot-mittakaavassa, mikä antaa hyvät valmiudet kehittää prosessia eteenpäin jatkossa.

Sisällysluettelo

1.	Hankkeen tausta	4
2.	Hankkeen toteutus	6
2.1	BES-reaktorin optimointi laboratoriomittakaavassa	6
2.2	Kalvokontaktorin optimointi	6
2.3	Biosähkökemiallinen typen talteenotto pilot-mittakaavassa	7
2.4	BES-reaktorin ja kalvokontaktorin integrointi.....	7
2.5	Teknoekonominen analyysi	7
2.6	Viestintä.....	8
3.	Hankkeen tulokset	10
3.1	BES-reaktorin optimointi laboratoriomittakaavassa	10
3.2	Kalvokontaktorin optimointi	10
3.3	Biosähkökemiallinen typen talteenotto pilot-mittakaavassa	11
3.4	BES-reaktorin ja kalvokontaktorin integrointi.....	12
3.5	Teknoekonominen analyysi	13
4.	Hankkeen vaikutukset	14
5.	Talousraportti.....	15
6.	Yhteenveto.....	16
	Lähdeluettelo	17

1. Hankkeen tausta

Typpi on tärkeä ravinne maataloudessa fosforin lisäksi. Ravinteena käytettävä typpi tuotetaan pääosin Haber-Bosch menetelmällä, jonka tuottamisessa käytetään fossiilisia polttoaineita ja joka tuottaa noin 1.2 % maailman kasvihuonepäästöistä (Smith ym. 2020). Euroopan avomaatalouden energiankulutuksesta 50 % on arvioitu aiheutuvan ravinteiden tuotannosta, pääasiassa Haber-Bosch prosessista (Paris ym. 2022). Monissa maatalouden ja yhdyskuntien sivu- ja jätevirroissa on ravinteita, jotka tulisi ottaa talteen tehokkaammin ja kierrättää takaisin maatalouteen ravinnetuotteina. Suomessa vuodessa tuotettujen biomassojen on arvioitu sisältävän 95 000 t typpeä (vuosina 2014–2016), josta n. 5 300 t on asutuksen ja teollisuuden biojätteissä ja n. 3 700 t asutuksen ja teollisuuden puhdistamolietteissä (Marttinen ym. 2017). Yhdyskuntien biojätteitä ja puhdistamolietteitä prosessoidaan usein biokaasuprosessilla, jolloin suurin osa ravinteista päätyy mädätteeseen eli biokaasuprosessista lähtevään materiaalivirtaan. Biojätteestä peräisin olevan mädätteen ravinteita voidaan hyödyntää käyttämällä mädätettä sellaisenaan tai kiinteän ja nestemäisen virran erotuksen jälkeen ravinnetuotteina. Mädätteen prosessointi voi olla tarpeen, jos halutaan esimerkiksi konsentroida mädätteessä olevia ravinteita. Puhdistamolietteestä peräisin olevan mädätteen hyötykäyttöä on sen sijaan säädelty laissa. Lisäksi puhdistamoliete sisältää mm. raskasmetalleja, mikromuoveja, lääkeaineita ja muita orgaanisia yhdisteitä, jotka ravinnekäytössä aiheuttavat riskejä. Tästä syystä puhdistamolietteessä olevia ravinteita hyödynnetään maataloudessa harvemmin. Jos puhdistamolietteessä olevat ravinteet saataisiin konsentroitua puhtaampaan muotoon, niiden käyttö tulevaisuudessa voisi olla helpompaa.

Tällä hetkellä puhdistamolietteen biokaasuprosessin rejektivesiä johdetaan usein takaisin jätevedenpuhdistamolle. Koska näissä rejektivesissä on suuria pitoisuuksia ammoniumtyppeä, ne kasvattavat jätevedenpuhdistamon typpikuormaa ja energian ja kemikaalien tarvetta. Tästä syystä ammoniumtypen talteenotto biokaasuprosessin rejektivesistä mahdollistaisi i) uusiutuvien typpiravinteiden tuottamisen, ii) fossiililla polttoaineilla tuotettujen typpiravinteiden ja niistä johtuvien kasvihuonekaasupäästöjen pienenemisen, sekä iii) jätevedenpuhdistamon energian ja kemikaalien tarpeiden pienenemisen. Typpeä voidaan poistaa biokaasuprosessin rejektivesistä mm. strippaamalla tai struviitin saostuksella. Kummatkin prosessit tarvitsevat kemikaaleja, jotka nostavat kustannuksia. Lisäksi strippausprosessissa käytetään usein energiaa lämpötilan nostoon ja/tai ilmastukseen strippausprosessin tehostamiseksi.

Vaihtoehtoinen menetelmä strippaukselle voisi olla biosähkökemiallinen typen talteenotto, jota tehdään biosähkökemiallisella systeemillä (BES). Tässä prosessissa bakteerit toimivat anodi-elektrodilla biokatalyytteina ja hapettavat rejektivedessä olevaa orgaanista ainetta tuottaen sähkövirtaa, kun taas katodilla protoneja pelkistetään vedyksi, mikä nostaa samalla katodiliuoksen pH:ta. Tuotettua sähkövirtaa voidaan käyttää hyväksi kuljettamaan ionimuodossa oleva ammoniumtyppi ioninvaihtokalvon läpi anodilta katodille, johon ammoniumtyppi konsentroituu (Galeano ym. 2023). Koska katodilla pH nousee pelkistysreaktioiden seurauksena, on katodille mahdollista integroida ammoniumtypen strippaus joko ilmavirralla (Sotres ym. 2015) tai kalvokontaktoreilla (Han ym. 2022). Alustavat laboratoriotutkimukset ovat osoittaneet, että ammoniumtypen (bio)sähkökemiallinen konsentroida vähentää huomattavasti orgaanisten haitta-aineiden määrää lopputuotteessa, sillä lopputuotteeseen päätyi maksimissaan ≤ 2.3 % lääkeaineista ja ≤ 3 % per- ja polyfluoratuista alkyylilyhdisteistä (PFAS), joita havaittiin rejektivedessä (Koskue ym. 2022a).

Toinen vaihtoehtoinen tapa typen erottamiseen nesteestä on strippauksen sijaan kalvokontaktori. Kalvokontaktorit ovat yleisesti käytössä aineensiirron toteutuksessa eri faasien välillä. Aineensiirto perustuu siihen, että tietyt molekyylit siirtyvät kalvon läpi pitoisuusgradientin ansiosta, kun taas toiset molekyylit (esimerkiksi vesi) eivät pääse kalvon läpi sen selektiivisyyden takia. Näissä sovelluksissa yleinen käytännön ongelma on kalvojen tukkeutuminen käsiteltävän veden kiintoaineen takia, erityisesti jätevesisovelluksissa. Aalto-yliopistossa kehitetty NPHarvestin (Uzkurt Kaljunen, 2023) etu on se, että prosessilla on korkea kiintoaineen sietokyky, mikä mahdollistaa myös kiintoainepitoisten vesien käsittelyn (jopa 700 mg/L). Prosessissa on saostukseen perustuva esikäsittely, mutta se ei ole tarpeen, mikäli käsiteltävässä jätevedessä ei ole merkittävän korkea kiintoainepitoisuus. NPHarvest-prosessia voidaan siis käyttää typen erottamiseen suoraan. Koska aineensiirto perustuu pitoisuusgradienttiin, mitä korkeampi pitoisuusero nestefaasien välillä, sitä tehokkaampi aineensiirto on. Tämän vuoksi NPHarvest-prosessin yhdistäminen BES:in kanssa tarjoaa potentiaalisia etuja ammoniakkin talteenottotehokkuuden kannalta, sillä käsiteltävällä nesteellä eli katolytyillä on korkea ammoniumtyypipitoisuus (esim. 10 g/L; Koskue ym. 2021). Suolapitoisuuden nousu voi kuitenkin rajoittaa tässä tapauksessa kaasunsiirtoa.

BioNH₄ -hankkeessa kehitettiin ja optimoitiin uudenlaista pilot-mittakaavan biosähkökemiallista prosessia, jolla voidaan konsentroida ammoniumtyyppiä biokaasuprosessin rejektivesistä. Konsentroidun ammoniumtypen erottamista katodilta tutkittiin kalvokontaktorilla. Pilot-mittakaavan kokeiden onnistumiseksi tehtiin laboratoriomittakaavan BES-kokeita, joilla mm. selvitettiin paras ioninvaihtomembraani tutkitulle rejektivedelle ja optimoitiin laboratoriomittakaavassa oikealla rejektivedellä syötetyn BES-reaktorin viipymä ja ammoniumtypen kuormitus. Kalvokontaktorien tehokkuutta optimoitiin laboratoriossa ottaen huomioon korkeat ammoniumtypen ja suolojen pitoisuudet. Kalvokontaktorimallia kehitettiin hankkeessa sisältämään kiintoaineen ja suolapitoisuuden vaikutukset, jotta jatkossa voidaan käsiteltävän laadun perusteella valita tehokas talteenottomenetelmä mallinnusta hyödyntäen. Hankkeen lopussa tehtiin kevyt teknoekonominen tarkastelu BES-prosessista, NPHarvest prosessista sekä integroidusta BES ja kalvokontaktori -prosessista.

2. Hankkeen toteutus

Hanke toteutettiin viidessä eri työpaketissa, joiden toimenpiteet, toteuttajat ja aikataulu on esitetty alla olevissa luvuissa. Alaluvuissa on myös pohdittu mahdollisia eteen tulleita muutoksia sekä positiivisia huomioita ja haasteita. Lisäksi alla on koonti hankkeen viestintätoimista ja siihen liittyvistä onnistumisista ja haasteista.

2.1 BES-reaktorin optimointi laboratoriomittakaavassa

Tämä työpaketti koostui kahdesta eri tavoitteesta. TAMK tutki eri toimittajien kationinvaihtokalvoja (Membranes International, Fumatech, Selemion, Fuji ja Eurodia) kaksikammioisessa, abiottisessa sähkökemiallisessa reaktorissa. Tavoitteena oli tutkia synteettisellä ja oikealla rejektivedellä eri kalvojen ioniselektiivisyyttä ja ionien siirtotehokkuutta. Ensimmäiset kokeet tehtiin mallinnetulla rejektivedellä syksyllä 2024 ja niiden tuloksia hyödynnettiin pilot-mittakaavan BES-reaktorin kalvojen valinnassa. Laajemmat kokeet oikealla rejektivedellä tehtiin vuoden 2025 kesän ja syksyn aikana.

Näiden lisäksi TAU:lla ajettiin kaksikammioisia BES-reaktoreita kahdessa eri mittakaavassa. Pienemmän tilavuuden reaktoreissa (n. 70 mL työtilavuus) rikastettiin vuoden 2024 aikana mikrobiyhteisö, joka pystyi hajottamaan oikeassa rejektivedessä (Biomyly, lietelinja, Pirkanmaan Jätehuolto) olevaa orgaanista ainetta ja muuntamaan sitä sähkövirraksi. Suuremman tilavuuden reaktoreissa (n. 1 L työtilavuus) optimoitiin BES-reaktorin parametreja, mm. viipymä ja ammoniumtyypen kuormitus, oikealla rejektivedellä sekä ylläpidettiin mikrobiyhteisöä pilot-mittakaavan BES-reaktorin käyttöön. Suuremman tilavuuden BES-reaktoreita operoitiin tammikuusta 2025 lähtien hankkeen loppuun saakka.

2.2 Kalvokontaktorin optimointi

Tämä työpaketti toteutettiin Aalto yliopistossa ja se koostui kokeellisesta ja mallinnusosasta, joissa tutkittiin rinnakkaiskationien ja kiintoaineen vaikutuksia ammoniakkin aineensiirtoon laboratoriomittakaavan kalvokontaktoreissa.

Kokeita ajettiin rinnakkain kahdella toisistaan riippumattomilla 0,6 L:an reaktorilla, joissa käytettiin synteettistä rejektivettä (kutsuttu ”bulkiksi”). Sitä valmistettiin liuottamalla ammoniumkloridia hanaveteen, johon lisättiin myös muita suoloja sekä kiintoainetta, kokeista riippuen. Kalvojen sisäpuolella virtaava rikkihappo toimi strippausliuoksena. Rinnakkaisioneina tutkittiin pitoisuuksilla Na^+ 1, 3, 6, ja 10 g/L, K^+ (0,5, 3, 6 ja 10 g/L), Ca^{2+} (0,27, 1 ja 3 g/L) ja Mg^{2+} (0,1–0, 3–0, 6–0,99 g/L), yksittäisinä mainituilla pitoisuuksilla sekä kirjallisuuteen pohjautuvalla sekoituksella. Kiitoaineina käytettiin lasihelmiä (1, 3, 5 ja 10 g/L), zeoliittia (1, 3, 5 ja 10 g/L), kaoliinisavea (1, 3, 5 ja 10 g/L), selluloosaa (1, 3, 5 ja 10 g/L) ja humushappoa (0,1, 0,5 ja 1 g/L). Eri kokeiden vertailukelpoisuuden vuoksi pidettiin kaikki kokeelliset parametrit vakioina lukuun ottamatta kiintoaine- ja ionityyppi ja -pitoisuus. Vertailukokeissa synteettinen rejektivesi koostui ammoniumkloridista ja hanavedestä ilman muita suoloja tai kiintoaineita.

Reaktori mallinnettiin Comsol Multiphysics-ohjelmistolla. Mallin syötteinä olivat alkuperäinen ammoniakkipitoisuus bulkkinesteessä, bulkkinesteen virtaama ja ammoniakkin kokonaisaineensiirtokerroin kalvojen läpi, ja ne pohjautuivat kokeellisiin tuloksiin. Mallin tuotoksena oli bulkkinesteen ammoniakkipitoisuus ajan myötä, ja sen vertaamalla kokeellisesti mitattuihin ammoniakkipitoisuuksiin malli pystyttiin validoimaan.

2.3 Biosähkökemiallinen typen talteenotto pilot-mittakaavassa

Hankkeen aikana suunniteltiin ja toteutettiin TAU:lla pilot-mittakaavan BES-reaktori (työtilavuus 105 L). BES-reaktori on kolmikammioinen reaktori, jossa katodikammion molemmiin puolin on anodikammio. Reaktorin osat tilattiin Tunkualta, kationinvaihtokalvot kahdelta eri toimittajalta (Membrane Internationals, Ralex), virrankerääjät Espanjasta (Special Metals and Products) ja anodielektrodina käytettiin hiilivaahtomateriaalia (Elementic Oy). Viivästyksiä reaktorin rakentamisessa tuottivat virrankerääjien viivästyneet toimitusajat sekä anodielektrodimateriaalin löytäminen. Ennen käytetyt anodielektrodimateriaalien toimittajat eivät enää pystyneet toimittamaan materiaaleja ja lopuksi ratkaisu löydettiin paikalliselta yritykseltä, joka tekee hiilivaahtomateriaaleja orgaanisista sivuvirroista. Reaktorin suunnittelu tehtiin vuonna 2024 ja reaktorien kokoaminen ja ajo aloitettiin keväällä 2025 ja niitä ajettiin hankkeen loppuun saakka.

Pilot-ajot ajettiin rejektivedellä, jota haettiin Pirkanmaan jätehuollon Biomyly - biokaasulaitokselta (lietelinja) 1–4 viikon välein. Rejektiveden ammoniumtypen pitoisuus vaihteli välillä 2.0–6.1 g/L ja liukoisen kemiallisen hapenkulutuksen (sCOD) pitoisuus välillä 27–38 g/L, pH:n ollessa välillä 7.4–8.5. Reaktorit aloitettiin panoskokeina, jolloin uutta rejektivettä syötettiin anodille n. 30 päivän välein. Kun virrantiheydet sekä NH₄-N poisto anodilta katodille tasaantui, aloitettiin reaktoreiden jatkuvatoiminen syöttö. Kokeiden aikana reaktorien viipymää laskettiin 26 tunnista 18 tuntiin ja edelleen 12 tuntiin. Kokeiden aikana selvitettiin optimiolosuhteet NH₄-N talteenoton maksimoimiseksi.

2.4 BES-reaktorin ja kalvokontaktorin integrointi

Pilot-reaktorin aloituksen viivästymisen vuoksi kalvokontaktori integroitiin ensin laboratoriomittakaavan reaktoreihin TAU:lla. Kalvokontaktori liitettiin osaksi katodiliuoksen kierrätystä, johon konsentroituu ammoniumtyppeä BES-reaktorin ajon aikana. Kalvon sisällä kierrätettiin rikkihappoa, kuten Aallossakin tehdyissä kokeissa. Hankkeen lopussa kalvokontaktori integroitiin myös pilot-mittakaavan reaktorin katodille, pilot-reaktorin viipymän ollessa 18 tuntia toisessa reaktorissa ja 12 tuntia toisessa. Integroiduilla reaktorikonfiguraatioilla testattiin, miten tehokkaasti kalvokontaktori ottaa talteen katodiliuokseen siirtyvän ammoniumtypen.

2.5 Teknoekonominen analyysi

Hankkeessa tehtiin kevyt teknoekonominen analyysi (TEA) sekä erillisille prosesseille (BES-reaktori, NPHarvest) että integroidulle ratkaisulle (BES-reaktori ja kalvokontaktori). Analyysissa huomioitiin operatiiviset kustannukset sekä tarvittavien investointien määrä siinä määrin, kun se oli mahdollista saatavissa olevalla datalla. Teknoekonominen tarkastelu tehtiin hankkeen lopussa ja siihen osallistuivat kaikki hankkeen partnerit.

TEA:ssa huomioitiin prosessien TRL (technical readiness level), jonka arvioitiin olevan 7–8 NPHarvest prosessille ja 4–5 BES-prosessille. TEA laskettiin käyttäen syötteenä rejektivettä Pirkanmaan jätehuollon biokaasuprosessista, joka käsittelee jätevesilietteitä ja jota käytettiin myös pilot-reaktorissa. Arvioitiin rejektiveden vuotuisen virtaaman olevan 10 000 m³.

Hankkeessa oli myös tarkoituksena selvittää mallinnuksen avulla, miten integroidun BES-reaktorin ja kalvokontaktorin liittäminen käsittelemään jätevedenpuhdistamon biokaasulaitoksen rejektivesiä vaikuttaa jätevedenpuhdistamon toimintaan (mm. sähkönkulutus, metanolin lisäys). Tällainen mallinnus on kuitenkin jo kertaalleen tehty osana aikaisempaa projektia, jossa on tutkittu rejektivesiä käsittelevän BES-reaktorin vaikutuksia jätevedenpuhdistamoon eri typen talteenottotehokkuuksilla (Koskue et al. 2022b). Koska malli antaa tuloksia vain integroidun prosessin vaikutuksista jätevedenpuhdistamon toimintaan, eivät tulokset suuresti eroaisi aiemmin tehdyn mallinnuksen tuloksista. Hankkeen aikana hyväksyttiin muutosehdotus, jonka seurauksena mallinnusta ei toteutettu tässä hankkeessa.

2.6 Viestintä

Taulukkoon 1 on koottu hankkeen aikana tehtyjä viestintätoimia sekä vielä hankkeen jälkeen suunniteltua viestintää. Hankkeen aikana hanketta sekä sen tuloksia esitettiin onnistuneesti sekä kansallisesti (Vesihuoltopäivät 2025) että kansainvälisesti (kolmessa kansainvälisessä konferenssissa). Hankkeen tavoitteita sekä tuloksia on lisäksi esitetty erilaisille kohderyhmille, ml. yritysten ja tutkimusorganisaatioiden edustajat, kollegat ja opiskelijat. Lyhyen hankkeajan vuoksi hankkeen tieteelliset julkaisut lähetetään arvioitavaksi vasta vuonna 2026. Lisäksi tavoitteena on kirjoittaa vuoden 2026 aikana yleistajuisempi artikkeli esimerkiksi Vesihuolto -lehteen.

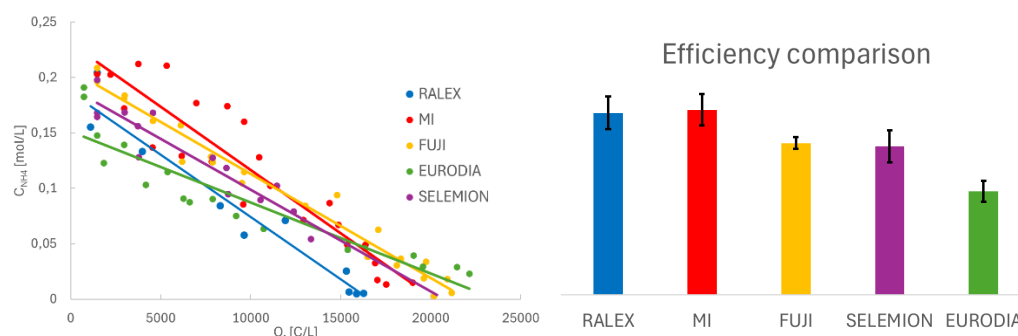
Taulukko 1. BioNH₄ -hankkeen viestintätoimet.

Viestintätoimi	Kohderyhmä
Projektin verkkosivut	Suuri yleisö, kollegat, kansainvälinen tiedeyhteisö
Esitelmä Vesihuoltopäivillä, 14-15.5.2025, Tampere	Kollegat, viranomaiset
Esitelmä kansainvälisessä konferenssissa <ul style="list-style-type: none"> - EcoSTP, 23-26.5.2025, Stockholm - ISTMET9, 16-19.9.2025, Leipzig - NordIWA, 23-25.9.2025, Oslo 	Kansainvälinen tiedeyhteisö
Pilot-laitteiston esittely IBC Finland -yhdistyksen ja Business Finlandin rahoittaman IsoSUS -projektin partnereille, sekä Solar Foodsin henkilökunnalle	Yritysten ja tutkimus-organisaatioiden edustajat
Avoimet päivät pilot-laitteistolla	Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunnan henkilöstö (TAU)
Projektin esittely Resource Recovery -kurssilla ja projektityön aihe Kestävä kehitys -kurssilla	TAU:n opiskelijat
Hankkeen esittely Aalto-yliopiston Vesi- ja ympäristötekniikan sidosryhmätapaamisessa 4.4.2025	Yritysten ja tutkimus-organisaatioiden edustajat
Diplomityö: Sadia Suchi, Impacts of Co-existing Cations and Suspended Solids on Ammonia Recovery In Membrane Contactors, Aalto-yliopisto	Kansallinen ja kansainvälinen tiedeyhteisö
TAMK - opinnäytetyöt <ul style="list-style-type: none"> - Laboratoriomittakaavan reaktorin anodimateriaalien vertailututkimus - Kationinvaihtomembraanien vertailututkimus rejektivedellä TAMK – kirjalliset työt <ul style="list-style-type: none"> - Kaasuanalysointimen sekä ionikromatografian käyttöohjeet sekä käyttöönottoraportit - Kationinvaihtomembraanien vertailututkimus mallivedellä 	Kansallinen ja kansainvälinen korkeakouluyhteisö, laboratoriohenkilökunta
Hankkeen jälkeiset suunnitelmat: <ul style="list-style-type: none"> - Artikkelin kirjoitus Vesitalous / Kunnallistekniikka lehteen - Esitelmä Nutrient Removal and Recovery -konferenssissa, 17-21.5.2026, Delft - 3 – 4 tieteellistä julkaisua 	Kollegat, viranomaiset Kansainvälinen tiedeyhteisö

3. Hankkeen tulokset

3.1 BES-reaktorin optimointi laboratoriomittakaavassa

Kationikalvoja tutkittiin TAMK:in laboratoriossa ensin mallinnetulla jätevedellä ja myöhemmin oikealla rejektivesinäytteellä viiden eri kalvovalmistajan kationinvaihtokalvoilla. Tulosten perusteella kaikki kalvot toimivat rejektivedelle ja kaikkien kalvojen kationinsiirto kalvon läpi tapahtui suoraan verrannollisesti johdettuun virtaan. Kalvot erottuivat ammonium-ionin siirron tehokkuuden perusteella – eri kalvojen virrankäytön tehokkuus ammonium-ionille vaihteli ja kaksi kalvoa osoittautui tehokkaimmiksi (Membrane International (MI) ja Ralex; Kuva 1) ilman mitattavaa tehokkuuseroa. Tulosten tarkempi analyysi julkaistaan TAMK:in opinnäytetyönä.



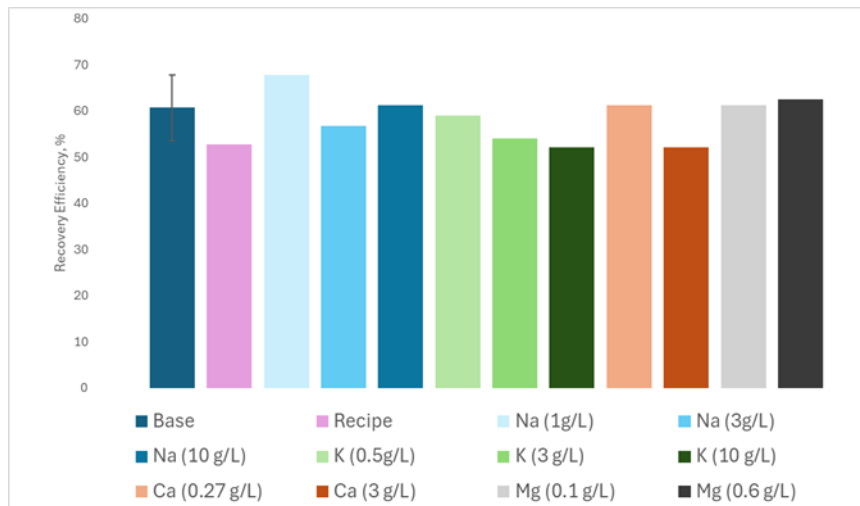
Kuva 1. Kationinvaihtokalvojen ammoniuminsiirto sekä virrantehokkuuden vertailu.

Pienillä BES-reaktoreilla aloitettiin mikrobiyhteisön kasvattaminen synteettisellä rejektivedellä ja panosajoilla, ja noin kuukaudessa saatiin rikastettua mikrobiyhteisö, joka tuotti tasaisesti sähkövirtaa ja poisti ammoniumtyyppiä anodilta katodille ($54,5 \pm 1,3$ %). Reaktoreita ajettiin myöhemmin jatkuvatoimisena ja oikealla rejektivedellä. Näillä olosuhteilla saavutettiin $56,9 \pm 3,8$ % $\text{NH}_4\text{-N}$ poisto, virrantiheys $0,24 \pm 0,02$ mA/cm² ja energiankulutus $2,7 \pm 0,2$ kWh/kg-N_{poistettu}. Reaktoreilla anodin pH pysyi neutraalina (pH 7,6–8,0), kun taas katodin pH nousi odotetusti arvoihin 10,0–12,0.

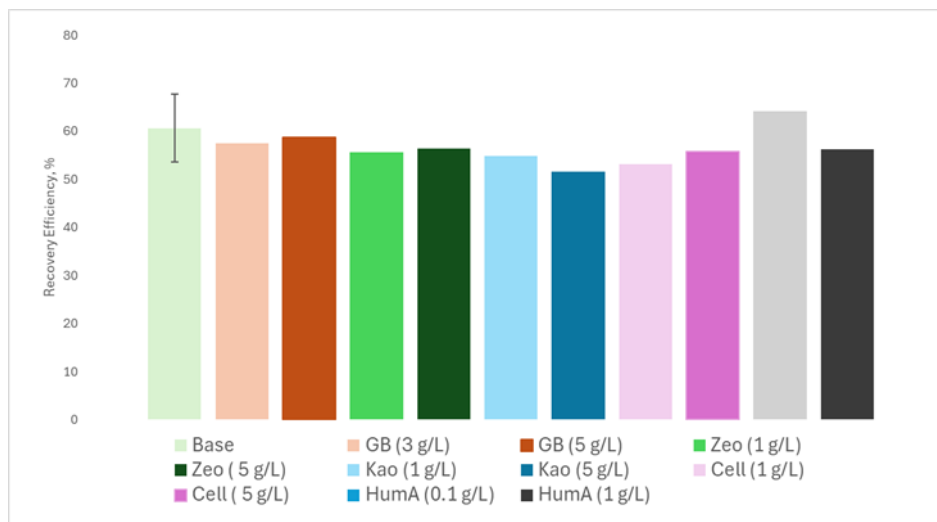
Suuremmilla BES-reaktoreilla optimoitiin reaktorin viipymää (16 h, 8,3 h ja 5,4 h) ja $\text{NH}_4\text{-N}$ kuormitusta oikealla rejektivedellä. Reaktorit aloitettiin panoskasvatuksina, mikä mahdollisti sopivan mikrobiviljelmän rikastumisen anodille. Tämän jälkeen reaktorit muutettiin jatkuvatoimiseksi ja niiden viipymä optimoitiin. Optimiolosuhteilla saavutettiin 58 ± 8 % $\text{NH}_4\text{-N}$ poisto, virrantiheys $0,45 \pm 0,05$ mA/cm² ja energiankulutus 5–6 kWh/kg-N_{poistettu}. Näilläkin reaktoreilla anodin pH pysyi välillä 7–8, kun taas katodin pH vaihteli välillä 9,5–12,7.

3.2 Kalvokontaktorin optimointi

Laboriomittakaavassa 0,6 L:an kontaktoreilla päädyttiin n. 61 %:n talteenottotehokkuuteen kontrollikokeissa, joiden ammoniakkipitoisuus oli 4500 mg NH_4^+ /L. Kuvissa 2 ja 3 näkyy ammoniumin talteenottotehokkuudet eri ioneilla (kuva 2) ja kiintoaineilla (kuva 3).



Kuva 2. Ammoniumin talteenottotehokkuudet neljällä ionilla eri pitoisuuksilla.



Kuva 3. Ammoniumin talteenottotehokkuudet eri pitoisuuksilla viidellä kiintoainetyypillä (GB= lasihelmet; Zeo= Zeoliitti; Kao= kaoliinisavi; Cell: selluloosa; HumA: humushappo).

Rinnakkaisioneilla ja kiintoaineilla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta ammoniakkin aineensiirtoon, ja samaan johtopäätökseen päädyttiin mallinnustuloksilla. Rinnakkaisioneilla ei ollut lainkaan vaikutusta mallinnettuun ammoniakkipitoisuuteen bulkissa, ja 50 %:n kiintoaineen tilavuusosuudella (750 g/L, kiintoaineen tiheydellä 1500 g/L) mallinnettu ammoniakkipitoisuus poikkesi maksimissaan 15 %:lla ammoniakkipitoisuudesta ilman kiintoainetta.

3.3 Biosähkökemiallinen typen talteenotto pilot-mittakaavassa

Pilot-mittakaavan ajot aloitettiin panosajoina, minkä aikana anodille lisättiin uutta rejektivettä noin 30 päivän välein. Reaktorien ylösajo kesti noin 30 päivää, jona aikana $\text{NH}_4\text{-N}$ poisto anodilta katodille kasvoi n. 20 %:sta 72 %:iin. Tämän jälkeen reaktoreita ajettiin jatkuvatoimisina 26 h viipymällä, rejektiveden $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuuden ollessa välillä 1,7–2,1 g/L. $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuus

vaihteli välillä 35–63 % (keskiarvo 47.3 ± 8 %), virrantiheys oli n. 0.062 mA/cm^2 ja energiankulutus oli välillä 12–15 kWh/kg- $\text{N}_{\text{poistettu}}$. Kun viipymä laskettiin 18 tuntiin (rejektiveden $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuus oli n. 3.1 g/L), $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuus oli n. 48 %, virrantiheys 0.055 mA/cm^2 ja energiankulutus n. $9.7 \text{ kWh/kg-}\text{N}_{\text{poistettu}}$. Koska rejektiveden $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuus vaihteli ajojen aikana, pilot-reaktorilla saatuihin tuloksiin vaikuttavat reaktorin viipymän lisäksi rejektiveden $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuudet. $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuuksien lisäksi myös rejektiveden COD:n pitoisuuksissa ja koostumuksissa on muutoksia, mikä vaikuttaa mm. virrantiheyteen. Rejektiveden muutoksista huolimatta molemmilla korkeammilla viipymillä saatiin n. 48 % $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuudet, kun taas energiankulutus laski huomattavasti, kun viipymää laskettiin. Kun viipymä laskettiin 12 h:iin, $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuus laski alle 20 %:in, mikä viittaa siihen, että tämä viipymä on tällä reaktorikonfiguraatiolla ja rejektivedellä liian lyhyt.

BES-reaktorin skaalaamisen tulokset n. 100 mL:sta 105 L:aan on koostettu taulukkoon 2. BES-reaktorin mittakaavan 10-kertainen nostaminen n. 100 mL:sta n. 1 L:aan nosti sekä $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuutta että virrantiheyttä, kun taas prosessin energiankulutus nousi lähes kaksinkertaiseksi. Mittakaavan nostaminen edelleen n. 100-kertaiseksi, pienensi hieman $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuutta sekä huomattavasti virrantiheyttä, kun taas energiankulutus kasvoi n. kaksinkertaiseksi. Tulokset osoittavat, että prosessin skaalaaminen pystyi ylläpitämään melko hyvin ammoniumtyypen poistotehokkuuden, kun taas prosessia tulisi edelleen kehittää, jotta prosessin virrantiheyttä saataisiin nostettua ja energiankulutusta pienennettyä. Näitä asioita voidaan kehittää mm. reaktorikonfiguraatiota kehittämällä sekä elektrodi- ja kalvomateriaaleja optimoimalla.

Taulukko 2. BES-reaktorin tulosten vertailu eri mittakaavojen välillä.

Mittakaava	$\text{NH}_4\text{-N}$ poisto (%)	Virrantiheys (mA/cm^2)	Energiankulutus ($\text{kWh/kg N}_{\text{poistettu}}$)
100 mL	54.5 ± 1.3	0.24 ± 0.02	2.73
1 L	58 ± 8	0.45 ± 0.05	5–6
105 L	47.3 ± 8	0.06 ± 0.006	9–15

3.4 BES-reaktorin ja kalvokontaktorin integrointi

Laboratio-mittakaavassa kalvokontaktori integroitiin BES-reaktoriin viipymällä 8,3 h. Integroitu prosessi saavutti aluksi n. 40–50 % $\text{NH}_4\text{-N}$ talteenoton BES katolyytista. Ajon aikana katolyytin $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuus pieneni, siitä huolimatta, että sitä siirrettiin jatkuvasti anodilta katodille. $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuuden pieneneminen sekä rikkihapon kyllästyminen ammoniumsulfaatilla johtivat siihen, että kalvokontaktorin $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuus pieneni ajan saatossa. Prosessin tehokkuutta voidaan jatkossa parantaa mm. rikkihapon vaihtoa optimoimalla sekä katolyytin pH:ta kontrolloimalla sähkövirran avulla, mikä vaikuttaa $\text{NH}_4\text{-N}$ olomuotoon sekä $\text{NH}_4\text{-N}$:n mahdolliseen haihtumiseen katodilta.

Pilot-mittakaavassa kalvokontaktorin ja BES-reaktorin integrointi viivästyi reaktorin kanssa koetuista teknisistä haasteista johtuen ja integroidut ajot tehtiin vasta marraskuun puolella. Raportin kirjoittamisen aikaan pilot-mittakaavan integroitujen kokeiden tulosten analysointi on vielä kesken, eikä tuloksista pystytä kirjoittamaan luotettavasti.

3.5 Teknoekonominen analyysi

Teknoekonomisessa arvioinnissa verrattiin kolmea erilaista typen talteenottoa: biosähkökemiallista typen talteenottojärjestelmää (BES), NPHarvest prosessia ja BES:iin integroitua kalvokontaktorin. Tavoitteena on vertailla näiden prosessien käyttökustannuksia ja arvioida prosessien nykyistä ja tulevaa toteutettavuutta ottaen huomioon myös pääomakustannukset.

NPHarvestin operointikustannukset arvioitiin pienemmiksi kuin teollisen mittakaavan strippereiden operointi, kun taas BES-prosessin ja integroidun prosessin kustannukset olivat hieman suuremmat (Taulukko 3).

Prosessien kustannuksia peilattiin myös niistä saataviin hyötyihin. Typen talteenotolla saavutettu hyöty muodostuu säästöistä jätevedenkäsittelyssä, kun resurssi-intensiivistä typenpoistoa tarvitaan vähemmän, sekä lopputuotteena syntyvän typpilannoitteen tuotosta. Kaikki prosessit osoittautuivat vertailussa kannattaviksi siinä tapauksessa, että vaihtoehtona on typenpoisto jätevedenpuhdistamolla, jossa rejektiveden käsittelymaksu perustuu VVY:n Teollisuusjätevesioppaan suositukseen. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että tutkittujen talteenottoa prosessien taloudellisuus riippuu vaihtoehtoisen käsittelyn kustannuksista sekä lopputuotteen kysynnästä.

Taulukko 3. Verrattavien prosessien operointikustannukset (OPEX). Kahta teollisen mittakaavan sovellusta verrataan referensseinä.

	Teollinen haihdutus-stripperi*	Pieni teollinen stripperi*	BES	NPHarvest	BES + kalvo-kontaktori
Virtaama (m³/vuosi)	190 000	6752,5	10 000	10 000	10 000
Typen talteenotto (%)	95	-	50	90	45**
Ylläpitokustannukset - materiaalit (€/m ³)	-	-	1,80	-	1,80
Ylläpitokustannukset – henkilöstö (€/m ³)	0,46	-	0,46	0,46	0,60
Energiankulutus (€/m ³)	4,60	6,87	10,3	0,6	11,3
Kemikaalikustannukset (€/m ³)	0,07	2,00	-	3,4	0,3
Kustannukset yhteensä (€/m³)	5,13	8,87	12,6	4,46	14,0

* Kaljunen et al. (2021), ** Typen talteenotto arvioitu olettaen 90 % typen talteenotto kalvokontaktorilla

Yhteenvedon voidaan todeta, että hankkeen tavoitteet saavutettiin erinomaisesti. Jatkokehitystä pitää tehdä etenkin pilot-mittakaavan BES-reaktorin osalta, jotta saadaan vähennettyä prosessin energiankulutusta sekä materiaalikustannuksia, eritoten ioninvaihtokalvojen ja käytettävien elektrodien osalta. BES-reaktorin ja kalvokontaktorin integrointia tulisi jatkossa kehittää edelleen, ottaen huomioon mm. eri prosessien kalvojen pinta-alat sekä niiden suhteet toisiinsa. Lisäksi sekä BES-reaktorin että integroidun prosessin NH₄-N poistotehokkuutta tulisi edelleen parantaa prosessia optimoimalla.

4. Hankkeen vaikutukset

Hankkeessa kehitettiin integroitua prosessia, biosähkökemiallinen prosessi integroituna kalvokontaktoriin, jolla voitaisiin tulevaisuudessa ottaa talteen ammoniumtyypeä esimerkiksi biokaasuprosessin rejektivesistä. Integroitua prosessia sekä yksittäisiä prosesseja ja materiaaleja kehitettiin ja testattiin sekä laboratorio- että pilot-mittakaavassa.

Projektissa pystyttiin osoittamaan, että BES-reaktori voidaan skaalata ja ylläpitää lähes yhtä suuri ammoniumtyypen poistotehokkuus kuin laboratoriomittakaavassa. Lisäksi pystyttiin osoittamaan, että integroitu prosessi toimii sekä laboratorio- että pilot-mittakaavassa, mikä antaa hyvät valmiudet kehittää prosessia eteenpäin jatkossa. BES-reaktorin skaalaaminen suurempaan mittakaavaan kasvatti energiankulutusta n. 2-kertaisesti, mitä tulisi pyrkiä pienentämään jatkokehityshankkeissa.

Kaasuselektiivisen kalvon (NPHarvest) osalta saatiin lisätietoa muiden ionien ja kiintoaineen vaikutuksista ammoniakkin aineensiirtoon ja käyttäytymiseen kalvoreaktorissa. Tuloksilla on iso vaikutus kalvoreaktorin ja esikäsitteilyn jatkokehityksessä. Hankkeessa kehitettiin myös kalvoreaktorin mallinnusta eteenpäin siten, että malli huomioi myös käsiteltävän virran kiintoaineen.

Hankkeen aikana hanke työllisti 21 henkeä, 5,7 henkilötyövuoden edestä. Koska kyseessä on TKI-hanke ei se suoraan aiheuta talous- ja työllisyysvaikutuksia sekä ympäristövaikutuksia. Integroitua prosessia tulisi kehittää eteenpäin ennen kuin sitä voidaan viedä suurempaan mittakaavaan.

NPHarvestille hankkeen tulokset osoittavat, että integroidulla prosessilla voidaan tehostaa NPHarvestin kalvokontaktorin toimintaa. Lisäksi laajemmin hyötynä on se, että pH-säätökemikaalin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ tai NaOH) kulutus voidaan välttää integroidussa prosessissa. Tämä – NPHarvestin prosessin näkökulmasta – pienentää tästä kemikaalista syntyvää ympäristökuormaa (eli hiilijalanjälkeä) sekä operatiivisia kustannuksia.

5. Talousraportti

Hankkeen kokonaiskustannukset vuosille 2024–2025 olivat 575 423 €, josta oman rahoituksen osuus on 35 % (TAU, Aalto, TAMK) ja 20 % (NPHarvest).

Taulukossa 4 on esitetty hankkeen kustannusarvio ja Taulukossa 5 rahoitussuunnitelman toteutuminen. Hankkeen aikana hyväksyttiin seuraavat muutokset kustannusarviossa: NPHarvestin budjetissa 5000 € siirrettiin palkoista ja henkilösivukuluista välineisiin ja laitteisiin, Aallon budjetissa 3000 € siirrettiin välineistä ja laitteista henkilöstökustannuksiin, TAMKin budjetissa 7210 € siirrettiin henkilöstökustannuksista välineisiin ja laitteisiin, ja TAU:n budjetissa 5000 € siirrettiin välineistä ja laitteista ostopalveluihin (1000 €) sekä henkilöstökustannuksiin (4000 €).

Taulukko 4. Hankkeen kustannus- ja rahoitusarvio.

Kustannus	TAU		Aalto		TAMK		NPHarvest	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Palkkakulut	52360	60408	53000	38760	25676	26190	10100	10100
Henkilösivukulut	24609	28392	25440	18605	12838	13095	1973	1973
Henkilöstökustannukset	76969	88800	78440	57365	38514	39285	12073	12073
Välineet ja laitteet	40000	10000	5000	0	6000	6000	2500	2500
Ostopalvelut	1000	3000	0	0	0	0	0	0
Yleiskustannukset (20 %)	23594	20360	16688	11473	8903	9057	2915	2915
Kokonaiskustannukset	141563	122161	100128	68838	53417	54342	17487	17487
Ympäristöministeriöltä	92016	79404	65083	44745	34721	35322	13990	13990
Oma rahoitus	49547	42756	35045	24093	18696	19020	3498	3498
Hankkeen kokonaiskustannukset					575 423			
Ympäristöministeriöltä					379 271			
Oma rahoitus					195 152			

Koko hankkeen kustannukset olivat hieman arvioitua pienemmät, 568 681 €. TAU ja Aalto käyttivät kaikki myönnettyistä kustannuksista, kun taas TAMKin ja NPHarvestin kustannukset olivat hieman myöntöä pienemmät.

Taulukko 5. Rahoitussuunnitelman toteutuminen.

Kustannus	TAU		Aalto		TAMK		NPHarvest	
	2024	2025	2024	2025	2024	2025	2024	2025
Palkkakulut	30 571	86 393	30 212	63 490	5 260	42 181	2 126	13 890
Henkilösivukulut	14 368	40 604	14 501	30 475	2 620	21 090	415	2 712
Henkilöstökustannukset	44 940	126 997	44 714	93 965	7 890	63 271	2 542	16 602
Välineet ja laitteet	17 124	22 333	0	1 546	2 844	11 918	0	2 807
Ostopalvelut	714	3 440	0	1 597	0	0	0	0
Yleiskustannukset (20 %)	12 555	30 554	8 942	18 793	2 147	15 038	508	3 882
Kokonaiskustannukset	75 335	189 896	53 657	115 902	12 882	92 711	3050	23 292
Ympäristöministeriöltä	49 444	123 432	34 877	75 336	8 373	60 262	2 440	18 634
Oma rahoitus	26 623	66 463	18 779	40 565	4 509	32 449	610	4 658
Hankkeen kokonaiskustannukset					568 681			
Ympäristöministeriöltä					369 643			
Oma rahoitus					199 038			

6. Yhteenveto

Hanke pysyi onnistuneesti skaalaamaan biosähkökemiallisen prosessin laboratorio-mittakaavasta pilot-mittakaavaan sekä integroimaan kalvokontaktorin biosähkökemialliseen prosessiin, mahdollistaen ammoniumtyypen talteenoton biokaasuprosessin rejektivesistä.

Laboratoriokokeet osoittivat kahden kaupallisen ioninvaihtokalvon (Membrane Internationals, Ralex) soveltuvan erityisen hyvin ammoniumtyypen talteenottoon. Kalvokontaktorin optimointi uudentyypisille vesille osoitti, etteivät suuretkaan rinnakkaisionien pitoisuudet ja kiintoaine vaikutta merkittäväsi ammoniakkin aineensiirtoon. Molempia tuloksia hyödynnettiin integroitua prosessia skaalattaessa.

Biosähkökemiallisen prosessin skaalaaminen osoitti, että reaktorin mittakaavaa kasvattamalla pystyttiin ylläpitämään melko hyvin $\text{NH}_4\text{-N}$ poistotehokkuuksia, jotka olivat pilot reaktorissa $47.3 \pm 8 \%$. Sen sijaan mittakaavan kasvattaminen nosti prosessin energiankulutus n. kaksinkertaiseksi 1 L mittakaavaan verrattuna. Laboratoriomittakaavan integroidulla prosessilla saatiin katolyytin ammoniumtyyppistä talteen parhaimmillaan 40–50 %.

Kevyt teknoekonominen analyysi osoitti, että NPHarvest prosessin operointikustannukset ovat todennäköisesti pienemmät kuin teollisen mittakaavan strippereiden, kun taas biosähkökemiallisen prosessin ja integroidun prosessin operointikustannukset olivat hieman suuremmat. Kaikki prosessit osoittautuivat vertailussa kannattaviksi siinä tapauksessa, että vaihtoehtona on tyypenpoisto jätevedenpuhdistamalla.

Tämä on ensimmäinen kerta, kun biosähkökemiallista prosessia sekä integroitua prosessia hyödynnetään biokaasuprosessin rejektivesien käsittelyyn. Tulokset ovat lupaavia, mutta prosessi vaatii jatkokehitystä ennen sen skaalaamista ylöspäin. Etenkin biosähkökemiallisen prosessin energiankulutusta sekä prosessiin materiaalikustannuksia tulisi jatkossa pienentää. Materiaalikustannuksista etenkin ioninvaihtokalvot sekä käytettävät elektrodit kasvattavat kustannuksia. Energiankulutukseen voidaan vaikuttaa materiaalivalintojen lisäksi reaktorin suunnittelulla, jossa tulisi taata elektrodien sijoittaminen lähemmäksi toisiaan. Biosähkökemiallisen ja kalvokontaktorin integroinnista saatiin alustavia tuloksia, jotka ovat lupaavia. Näiden prosessien integrointia tulisi jatkossa kehittää edelleen, ottaen huomioon mm. eri prosessien kalvojen pinta-alat sekä niiden suhteet toisiinsa.

Lähdeluettelo

- Galeano MB, Sulonen M, Ul Z, Baeza M, Baeza JA, Guisasola A. 2023. Bioelectrochemical ammonium recovery from wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal* 472: 144855.
- Han C, Yuan X, Ma S, Li Y, Feng Y, Liu J. 2022. Simultaneous recovery of nutrients and power generation from source-separated urine based on bioelectrical coupling with the hydrophobic gas permeable tube system. *Science of the Total Environment* 824: 153788.
- Kaljunen JU, Al-Juboori R, Mikola A, Righetto I, Konola, I. 2021 Newly developed membrane contactor-based N and P recovery process: pilot-scale field experiments and cost analysis; *Journal of Cleaner Production* 281, 125288.
- Koskue V, Rinta-Kanto JM, Freguia S, Ledezma P, Kokko M. 2021. Optimising nitrogen recovery from reject water in a 3-chamber bioelectroconcentration cell. *Separation and Purification Technology* 264, 118428.
- Koskue V, Monetti J, Rossi N, Nieradzik L, Freguia S, Kokko M, Ledezma P. 2022a. Fate of pharmaceuticals and PFASs during the electrochemical generation of a nitrogen-rich nutrient product from real reject water. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10: 107284.
- Koskue V, Pyrhönen V-P, Freguia S, Ledezma P, Kokko M. 2022b. Modelling and techno-economic assessment of (bio)electrochemical nitrogen removal and recovery from reject water at full WWTP scale. *Journal of Environmental Management* 19: 115747.
- Marttinen S, Venelampi O, Iho A, Koikkalainen K, Lehtonen E, Luostarinen S. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa, Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-437-3>.
- Paris B, Vandorou F, Balafoutis AT, Vaiopoulos K, Kyriakarakos G, Manolakos D, Papadakis G. 2022. Energy use in open-field agriculture in the EU: A critical review recommending energy efficiency measures and renewable energy sources adoption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158: 112098.
- Smith C, Hill AK, Torrente-Murciano L. 2020. Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy & Environmental Science* 13(2): 331-344.
- Uzkurt Kaljunen, J. 2023. Waste nutrients harvested: Design and evaluation of nitrogen and phosphorus recovery processes utilizing membrane contactor and adsorption techniques. Helsinki: Aalto University. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-1137-8>.