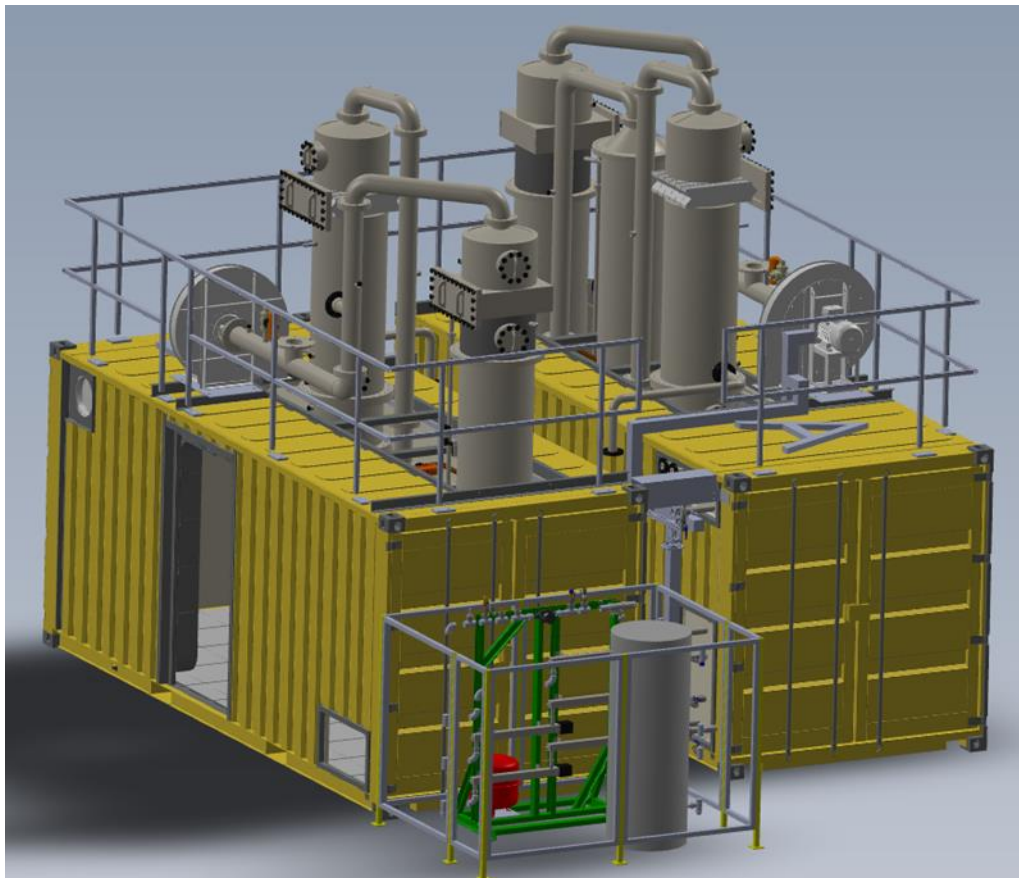


Samenvatting NoChemNAR Project

Kostprijsreductie bioenergie door Chemical Free Ammonium Recovery

Subsidieproject TEHE119005



18 november 2024

Dit project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

De partners binnen het project zijn: Nijhuis Saur Industries, TU Delft, Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap de Dommel, Waterstromen en Biota Nutri BV.

Binnen het project zijn verschillende publicaties van TU Delft uitgekomen. Hieronder wordt een kort overzicht gegeven van de publicaties op het punt van publicatie van dit rapport:

Mutahi, G., van Lier, J. B., & Spanjers, H. (2024). Leveraging organic acids in bipolar membrane electrodialysis (BPMED) can enhance ammonia recovery from scrubber effluents. *Water Research*, 265, Article 122296. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122296>

Narayan, D., van Berlo, E., van Lier, J. B., Spanjers, H. (2024). Recovery of sulfuric acid and ammonia from scrubber effluents using bipolar membrane electrodialysis: Effect of pH and temperature, *Separation and Purification Technology*, 338. Article 126605. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126605>

Andere publicaties zijn op het moment van schrijven nog onder ontwikkeling. Hierin wordt onder andere gekeken naar het effect van verschillende membraanconfiguraties in bipolaire membraanelektrodialyse (BPMED) op terugwinningsefficiëntie, energieconsumptie en stroomefficiëntie van ammoniakterugwinning. Ook wordt Design of Experiments (DOE) methodologie gebruikt om ammonium en citroenzuurterugwinning te optimaliseren in BPMED.

SAMENVATTING AMMONIAK STRIPPER-WASSER ONTWIKKELING

Stikstofverwijdering uit afvalwater is belangrijk om eutrofiëring en andere schade aan de directe omgeving te voorkomen. Menselijke activiteit creëert stikstofrijk afvalwater uit afvloeiing van de landbouw en rioolwater. Steeds strengere milieunormen worden lastig te bereiken in conventionele actiefslibsystemen op gemeentelijke afvalwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), waardoor de noodzaak ontstaat om stikstof uit de zijstroom te verwijderen. Slibvergistingsafvalwater is bijzonder interessant voor stikstofverwijdering of -terugwinning vanwege het hoge gehalte aan gehydrolyseerde stikstof, zoals ammonium.

Luchtstrippen en zuur wassen (Engels: Air Stripping and Acid Scrubbing, ASAS) is een technologie om stikstof terug te winnen met een hoge toepasbaarheid op digestaatstromen. ASAS-systemen van de huidige generatie worden echter minder economisch haalbaar met een afnemend ammoniumgehalte in gemeentelijke vergisters in vergelijking met vergisters met industriële of mestgrondstoffen. We onderzochten de prestaties van een tweede-generatie ASAS-pilotsysteem, ByoWATER, met een hoge drijvende kracht achter de massaoverdracht van ammoniak, zelfs bij lagere bedrijfstemperaturen of een lager ammoniumgehalte.

De efficiëntie van ammoniumverwijdering (in %) in de enkele ByoWATER-pilot was tot 70% (80°C-werking) op digestaat met industriële grondstoffen en 51% (70°C) op gemeentelijk digestaat. De tweefasige ByoWATER pilot bereikte een verwijderingsefficiëntie van respectievelijk 85% en 67% op hetzelfde afvalwater bij dezelfde temperatuur en elektriciteitsinput. Een maximale ammoniumverwijderingsefficiëntie van 94% werd bereikt bij 80°C en verhoogde gasrecirculatie. Het tweetraps ontwerp van ASAS-systemen heeft de potentie om het thermische energieverbruik te verminderen met behoud van de prestaties van een conventioneel systeem. Hieruit blijkt dat ammoniumterugwinning met ASAS-systemen mogelijk is op gemeentelijk digestaat, maar dat de verwijderingsefficiëntie afneemt in vergelijking met industriële vergisters met voedsel- of landbouwafval of mestgrondstoffen. De belangrijkste oorzaak wordt verondersteld de lagere pH en alkaliteit van gemeentelijk digestaat te zijn. Bovendien zorgt het lagere ammoniumgehalte van het afvalwater voor een lagere absolute ammoniumverwijdering in vergelijking met industriële

afvalwaterbronnen. De ASAS-kosten per kilogram verwijderde stikstof zijn daarom relatief hoog voor gemeentelijk afvalwater.

We hebben de bevindingen van deze pilotstudie gebruikt om de kosten van een volwaardig systeem op gemeentelijk digestaat te evalueren. Voor een digestaatstroom van $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ met $1,17 \text{ kgN m}^{-3}$ en 85% verwijderingsefficiëntie, komt TOTEX zonder productverkoop op een totaal van € 2,83 kgN^{-1} en € 3,76 kgN^{-1} verwijderd voor respectievelijk een een- en tweetraps ByoWATER-systeem. De operationele kosten zijn sterk afhankelijk van de prijzen van warmte en elektriciteit, en bij hoge warmteprijzen heeft een tweetrapssysteem de voorkeur. De prijs per kilogram verwijderde stikstof daalt aanzienlijk bij een toenemend ammoniumgehalte van het afvalwater. Deze pilotfase leidde tot de succesvolle ontwikkeling van een ASAS-systeem met een hoge stripefficiëntie bij lagere bedrijfstemperaturen.

De full-scale technologie is in staat om ammonium consequent en met hoge efficiëntie te verwijderen en kan flexibel worden gebruikt met een korte opstart- en uitschakeltijd. Dit is een voordeel ten opzichte van biologische alternatieven, zoals anammox, waar de operationele stabiliteit niet gegarandeerd is en prestatieverlies gedurende langere perioden kan optreden. Bovendien zorgt ASAS voor besparingen op de uitstoot van broeikasgassen (BKG), dankzij de verminderde N_2O -uitstoot op de RWZI. Biologische stikstofverwijdering in actief slib en anammox-systemen kan aanzienlijke N_2O -emissiefactoren van 1,6% van inkomende stikstof ervaren (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 2019). Bovendien is biologische stikstofverwijdering destructief voor functionele vormen van stikstof, terwijl ammonium met ASAS in zijn functionele vorm teruggewonnen wordt. Naast operationele voordelen zijn de kosten van stikstofverwijdering met ByoWATER, €2,29 kgN^{-1} , zeer concurrerend met die van anammox, ongeveer €3,77 kgN^{-1} in 2020 (Vineyard et al, 2020).

SAMENVATTING ONTWIKKELING STRIPPER-WASSER – BULLETPOINTS

- Stedelijke afvalwaterzuiveringsinstallaties in Nederland vereisen verwijdering van stikstof in de deelstroom om te voldoen aan de effluentnormen.
- Fysisch-chemische stikstofverwijdering is robuust, flexibel en kosteneffectief.
- Uit deze pilotstudie blijkt dat gesloten luchtstrippers en zure wassers kunnen worden verbeterd door de gasstromen en vloeistofstromen van meerdere systemen in tegenstroom met elkaar te verbinden. Dit zorgt voor lagere bedrijfstemperaturen of voor een verhoogde verwijderingsefficiëntie wanneer dat nodig is.
- Het ByoWATER-systeem kan 85% van de stikstofvracht in de deelstroom verwijderen met een totale eigendomskosten van ongeveer € 2,83 kgN^{-1} .
- Twee-traps ByoWATER systeem, in tegenstroom bedreven, leidt tot een mogelijke daling van de bedrijfstemperatuur met 20°C . De totale eigendomskosten voor deze configuratie bedragen € 3,76 kgN^{-1} als gevolg van verhoogde CAPEX en elektriciteitsverbruik.
- ByoWATER-systemen, een- en tweetrapssystemen, zijn kostenconcurrerend met anammox-systemen.
- ByoWATER-systemen, een- en tweetrapssystemen, verminderen de totale uitstoot van broeikasgassen door RWZIs.

SAMENVATTING: BPMED-TERUGWINNING VAN EFFLUENT VAN SCRUBBERS

Luchtstrippen en zure wassing (ASAS) is een veelbelovende technologie voor de verwijdering van ammonium in de deelstroombehandeling van stedelijk afvalwater. De technologie is robuust, flexibel en economisch concurrerend met het biologische alternatief in anammox-systemen. De totale uitstoot van broeikasgassen (BKG) door RWZIs kan worden verlaagd door stikstofverwijdering in de deelstroom met ASAS. Het gebruik van grondstoffen wordt echter verhoogd door ASAS toe te passen in plaats van biologische alternatieven. Bovendien fluctueert de verhandelbaarheid van het geproduceerde ammoniumsulfaat door het jaar heen en is deze regioafhankelijk, waardoor grote vloeistofbuffers nodig zijn.

Regeneratie van waterzuur door bipolaire membraanelektrodialyse (BPMED) kan deze uitdagingen met ASAS aanpakken. Regeneratie van zuur maakt het gebruik van (veiligere of meer wenselijke) organische zuren mogelijk, en ammoniakterugwinning door BPMED levert een veelzijdige ammoniakoplossing op. Deze oplossing wordt efficiënt verder geconcentreerd door destillatie (ook wel stoomstrippen en rectificatie genoemd) vanwege de hoge dampdruk van de ammoniakoplossing bij $\text{pH} > 11$. Door het proces wordt een ammoniakoplossing van industriële kwaliteit (25%) met een hoge zuiverheid geproduceerd, die gemakkelijk op de markt kan worden gebracht als grondstof voor de productie van kunstmest, rookgasbehandeling of zelfs als energiedrager.

Het pilot BPMED-systeem is veelzijdig getest bij stroomdichtheden tussen 150 en 500 A m^{-2} , waarbij een coulombische efficiëntie tot 70% is aangetoond. Het stroomverbruik neemt evenredig af met de ammoniakconcentratie in het product, als gevolg van teruggdiffusie van ammoniak. We hebben de regeneratie van waterzuur en de productie van ammoniak aangetoond bij een energieverbruik tussen 4 en 6 kWh kgN^{-1} voor een 2% opgelost ammoniakproduct. Er gaat geen ammoniak verloren uit het systeem in de tweekamer-BPMED-opstelling.

Opwaardering door destillatie wordt voorgesteld om het opgeloste ammoniakproduct te concentreren tot een commercieel aantrekkelijke 25% NH_3 -oplossing. De energiebehoefte voor deze stap is relatief laag in vergelijking met de voorgaande ASAS en BPMED vanwege de hoge pH en zuiverheid van het product.

BPMED is een technologisch haalbare manier om waterzuur en ammoniak terug te winnen. Deze technologie vervangt de aankoop van zuur door een volledig geëlektrificeerde regeneratie van het zuur. De totale eigendomskosten zijn daarom sterk afhankelijk van de lokale elektriciteitsprijs en beschikbaarheid. We hebben de totale kosten geëvalueerd met een elektriciteitsprijs van $\text{€}0,20 \text{ kWh}^{-1}$ en $\text{€}0,10 \text{ kWh}^{-1}$ en laten zien dat gecombineerde ASAS-BPMED-distillatie een vergelijkbare TOTEX oplevert als alleen ASAS bij de lagere elektriciteitsprijzen. Bovendien heeft het BPMED-concept een goede synergie met ambities voor energieneutraliteit, circulariteit van grondstoffen en fossiele onafhankelijkheid. Anorganische zuren geproduceerd uit fossiele bronnen worden vervangen door elektriciteit die kan worden geproduceerd uit hernieuwbare bronnen.

ASAS, met of zonder BPMED, verlaagt de totale uitstoot van broeikasgassen door RWZIs afkomstig van N_2O tegen een concurrerende prijs voor de verwijdering van stikstof in de deelstroom. TOTEX wordt geschat op $\text{€}3,34 \text{ kgN}^{-1}$ voor het totale concept, dat concurrerend is met anammox-technologieën met een prijs van ongeveer $\text{€}4 \text{ kgN}^{-1}$. Hogere chemieprijzen geven de voorkeur aan het BPMED-concept, omdat hierin op een chemievrije manier een industrieel relevante grondstof wordt teruggewonnen. Een evaluatie per geval is vereist op basis van lokale elektriciteits- en warmtepunten voor de toegevoegde waarde van BPMED.

De BPMED-pilot bevestigde laboratoriumbevindingen en de goede prestaties zijn interessant voor opschaling van het proces. Er zijn meerdere organisaties die ernaar uitkijken om de komende jaren de technologie naar de markt te brengen om stikstof duurzaam terug te winnen uit afvalstromen.

SAMENVATTING BPMED-TERUGWINNING VAN AFVALWATER VAN SCRUBBERS – BULLETPOINTS

- Stedelijke afvalwaterzuiveringsinstallaties in Nederland vereisen in veel gevallen verwijdering van stikstof uit de deelstroom om te voldoen aan effluentnormen.
- Luchtstrippen en zure wassing is een fysisch-chemische technologie voor stikstofverwijdering die robuust, flexibel en kosteneffectief is.
- Luchtstrippers en zure wassers hebben zure toevoer nodig.
- Bipolaire membraanelektrodialyse kan waterzuur regenereren met behulp van elektriciteit.
- Bipolaire membraanelektrodialyse kan een zuiver opgelost ammoniakproduct terugwinnen.
- Een totale behandelingsoplossing van ByoWATER met BPMED en destillatie realiseert circulair gebruik van waterzuur en productie van 25% NH_3 -oplossing voor een total cost of ownership van €3,34 kgN^{-1} met een elektriciteitsprijs van €0,20 kWh^{-1} . Dit is concurrerend met anammox-technologieën.
- ByoWATER met BPMED en destillatie zorgt voor een kosteneffectieve chemievrije verwijdering van stikstof in de deelstroombehandeling met een broeikasgasreductie van de RWZI.