

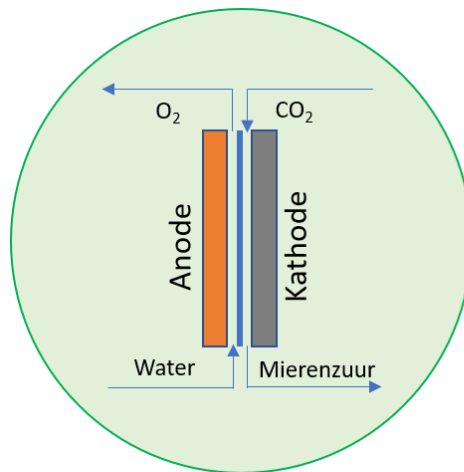
Power to Formic Acid (P2FA)

“Van elektriciteit naar mierenzuur”

TNO

TU Delft

CE Delft
Committed to the Environment



COVAL Energy

Openbaar eindrapport, 29 oktober 2019

“Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.”
Projectnummer: TEEI116076



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Inhoudsopgave

1.	Uitgangspunten en doelstellingen van het project	3
2.	Behaalde resultaten, knelpunten en perspectief van de toepassing	4
2.1	Elektrochemische reactor en meetopstellingen	4
2.2	Thermodynamische modellering.....	7
2.3	Implementatie van de technologie richting pilot installatie.....	15
2.4	Technisch economische evaluatie	17
2.5	LCA (Life Cycle Assessment).....	21
2.6	Conclusies inclusief knelpunten en toepassingsperspectief	23
3.	Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehuishouding, versterking van de kennispositie)	24
4.	Spin off binnen en buiten de sector	25
5.	Overzicht publicaties	25
6.	Overige informatie	26

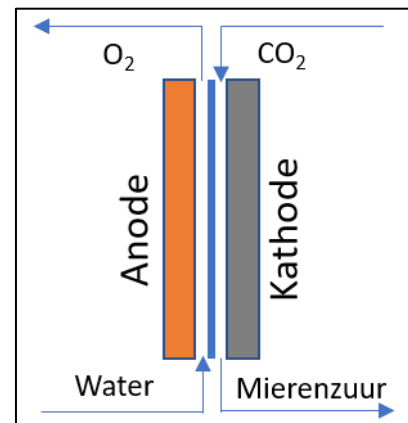
1. Uitgangspunten en doelstellingen van het project

De energietransitie in Nederland zoekt naar oplossingen waarbij duurzaam opgewekte elektriciteit kan worden ingezet in de industrie ter vervanging van fossiele grondstoffen, waarbij de CO₂ emissie fors gereduceerd kan worden. Het combineren van elektrificatie en CO₂ hergebruik is hiervoor een veelbelovende mogelijkheid waarbij de 'carbon footprint' verlaagd kan worden, en de flexibiliteit van het elektriciteitsnetwerk kan worden ondersteund. Mierenzuur (inclusief afgeleide formiaat zouten) is een interessant en veelbelovend product dat elektrochemisch uit CO₂ kan worden gemaakt.

Het doel van het project is dan ook om een continu elektrochemisch proces te ontwikkelen waarbij CO₂ wordt omgezet naar mierenzuur met behulp van groene stroom.

Zo'n proces ziet er in principe uit zoals hiernaast is weergegeven:

- Het omzettingproces vindt plaats in een (of meer) elektrochemische cel(len), met daarin een anode en een kathode, gescheiden door een membraan;
- Elektrische stroom wordt toegevoerd aan de elektrodes, waarbij de anode positief, en de kathode negatief geladen is;
- Aan de kathodezijde wordt CO₂ toegevoerd, die door toevoeging van 2 H⁺-ionen en elektronen wordt omgezet in mierenzuur HCHOOH (of formiaat CHOO⁻);
- Aan de anodezijde wordt water toegevoerd, dat door onttrekking van 2 H⁺-ionen en elektronen wordt omgezet naar zuurstof O₂.



De samenwerkende partners in dit project vormen een keten van CO₂ bron naar mierenzuur afname:

- Mestverwerking Friesland: mestverwerkend bedrijf met een proces waarbij uit fermentatie CO₂ vrijkomt;
- Coval Energy: ontwikkelaar van technologie om CO₂ direct om te zetten in mierenzuur;
- Team Fast: studenteninitiatief om mierenzuur in te zetten als groene brandstof voor stadsbussen;
- TNO/VoltaChem: onderzoeksorganisatie met expertise op het gebied van Power2X-oplossingen;
- TU Delft: onderzoeksorganisatie met expertise op het gebied van modellering van elektrochemische processen en gerelateerde experimenten ten behoeve van opschaling;
- CE Delft: onderzoeksorganisatie met expertise op het gebied van maatschappelijke inbedding van Power2X-ontwikkelingen;

De belangrijkste activiteiten binnen dit project zijn:

- Het ontwerpen en bouwen van een continu doorstroomde elektrochemische reactor met bijbehorende hulpsystemen;
- Het testen van het functioneren van de reactor, en het bedienen van de reactor met continue en intermitterende elektriciteitstoevoer;
- Het bepalen van de prestatie indicatoren Faraday en energie efficiëntie ("current- and energy efficiency"), stroomdichtheid ("current density"), specifieke productie van mierenzuur in kg per kWh, en de vergelijking met de doelstellingen;
- Het thermodynamisch modelleren van de processen in de reactor;
- Het opzetten van een business case, en het maken van een plan voor een toekomstig pilot project;

- Het uitvoeren van een systeem analyse om te bepalen in welke mate deze technologie zou kunnen bijdragen aan netondersteuning en CO₂ hergebruik;
- Het uitvoeren van een LCA ("life cycle analysis").

Het beoogde resultaat is een kleine elektrochemische reactor voor continue mierenzuurproductie met gebruikmaking van intermitterende groene elektriciteit, inclusief:

- Experimenteel gevalideerde prestatie indicatoren;
- Potentie van meerder business cases;
- Implementatieplan voor een opschaling van de technologie;
- Kennisverspreiding via diverse fora.

2. Behaalde resultaten, knelpunten en perspectief van de toepassing

2.1 Elektrochemische reactor en meetopstellingen

De elektrochemische reactor is ontworpen en gebouwd door Coval Energy, en geschikt voor zowel batch-proeven als continue proeven. De reactor is opgebouwd uit 1 elektrode-membraan-elektrode module met een oppervlak van ongeveer 10 x 20 cm, en geschikt om tot een druk van 80 bar te bedrijven.

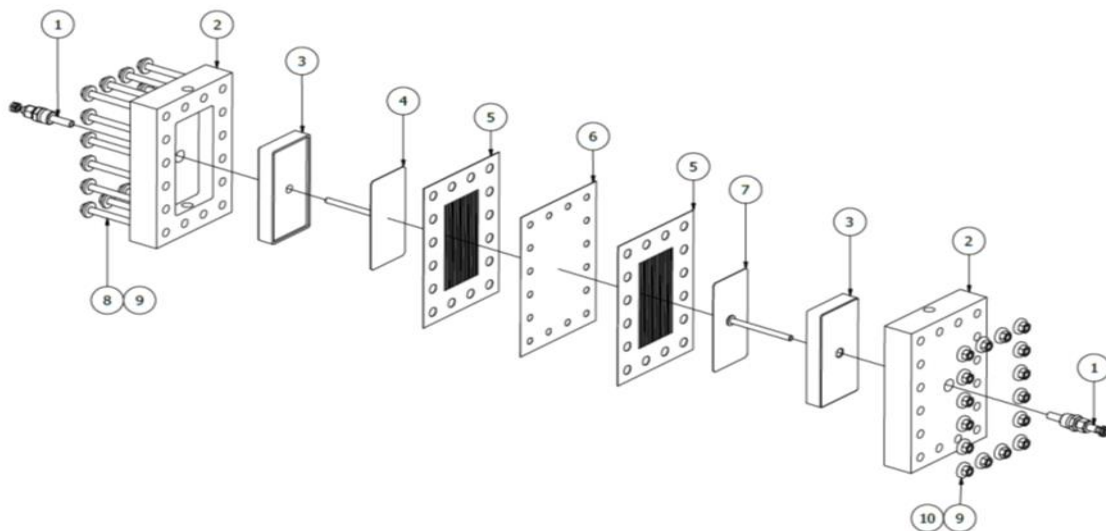
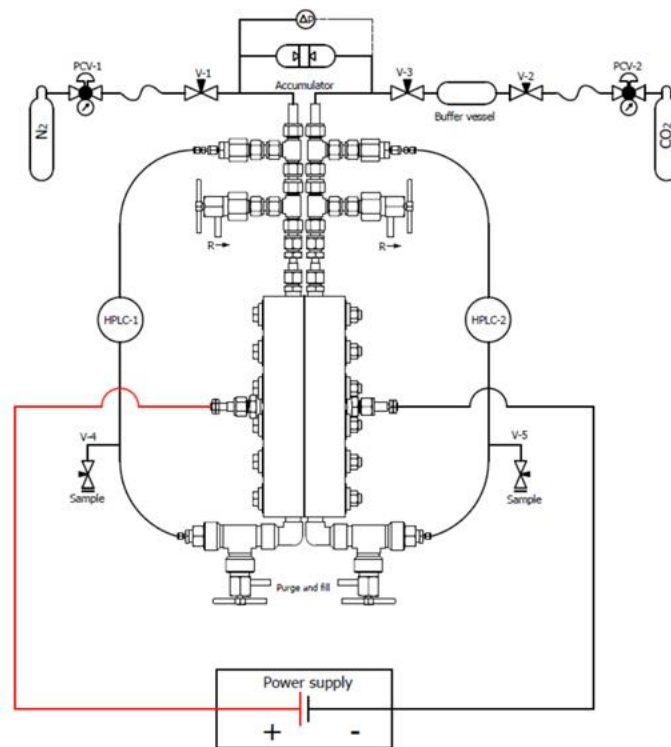


Figure 4: Exploded view of the reactor. (1) Insulator, (2) Reactor shell, (3) Teflon fluid distributor, (4) Anode, (5) Teflon spacer and seal, (6) Membrane, (7) Cathode, (8) Hex head bolt, (9) Isolating washer, (10) Hex nut.

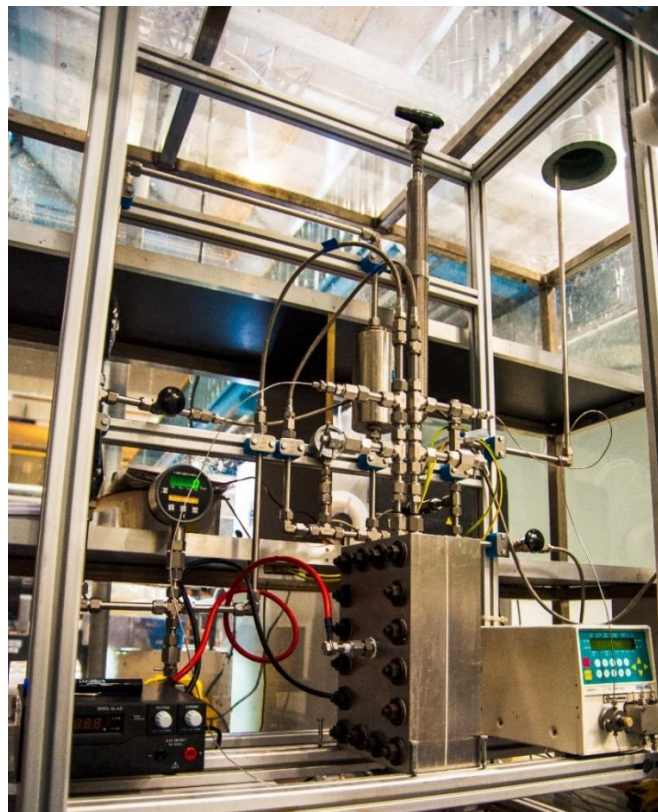
Hierboven is het principe van de constructie weergegeven in een zogenaamde 'exploded view'. De reactor is opgebouwd als een rechthoekig drukvat (2) met daarin een anode (4), een membraan (6) en een kathode (7). De stroomtoevoer vindt plaats via geïsoleerde stroomdoorvoeren (1). Het binnenwerk is voorzien van diverse aanpasbare tussenstukken en afdichtingen (3, 5).

Hieronder is de reactor schematisch weergegeven als batch-opstelling, zoals die bij de TU Delft is gebruikt. Zoals te zien is, kan zowel aan kathode- als aan de anodezijde elektrolyt worden rondgepompt om te laten reageren in de reactor. Via een labvoeding wordt een spanning op de kathode en anode gezet. Het systeem kan onder druk worden gezet via koolzuurgas aan de kathodezijde en stikstof aan de anodezijde. Tussen beide gescheiden systemen is een accumulator aangebracht om drukverschillen te voorkomen. De elektrolyt aan kathodezijde (katholyt) wordt bij het op druk brengen van het systeem verzadigd met CO₂ door het contact met koolzuurgas.

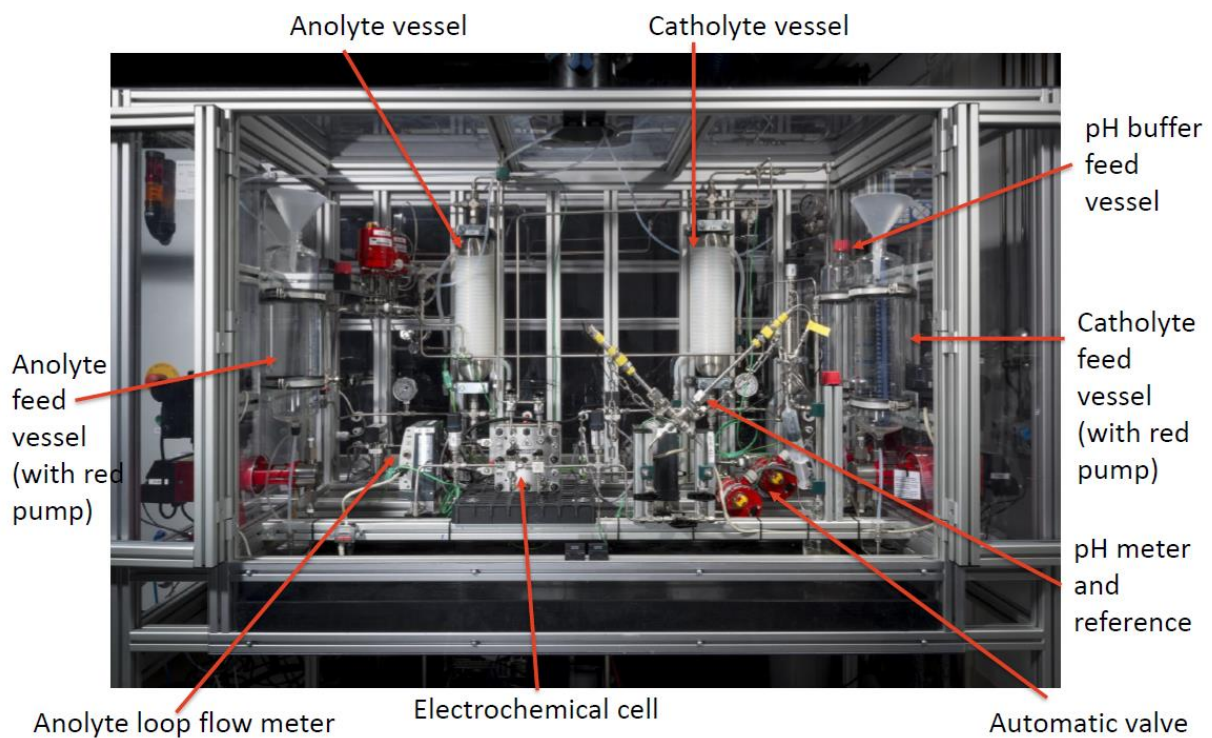
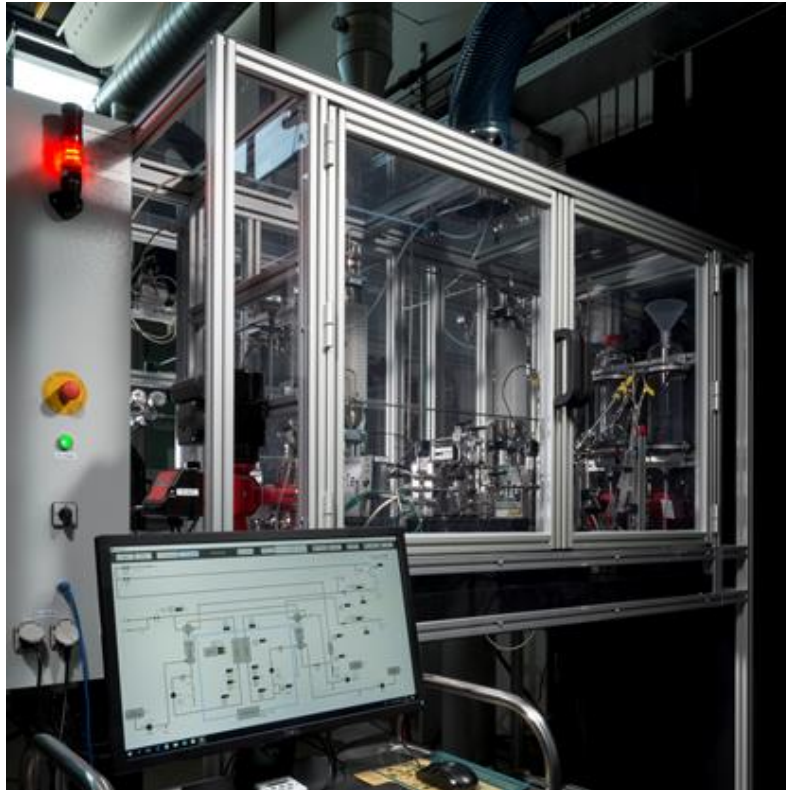
Het nadeel van deze opstelling is dat er slechts kort gemeten kan worden vanwege de beperkte hoeveelheid CO_2 en vloeistoffen in het systeem.



Op onderstaande foto is de reactor te zien in de batch opstelling bij TU Delft.



Om langer te kunnen meten is door TNO een meetopstelling ontworpen en gebouwd waarmee dezelfde reactor continu doorstroomd kan worden, zodat experimenten met een langere meetduur kunnen worden uitgevoerd. In deze meetopstelling kunnen continu CO_2 , elektrolyten en water worden toegevoerd, en producten worden afgevoerd. Tevens worden alle procesdata automatisch gemeten en geregistreerd. Deze meetopstelling is hieronder afgebeeld (overigens met een andere cel).



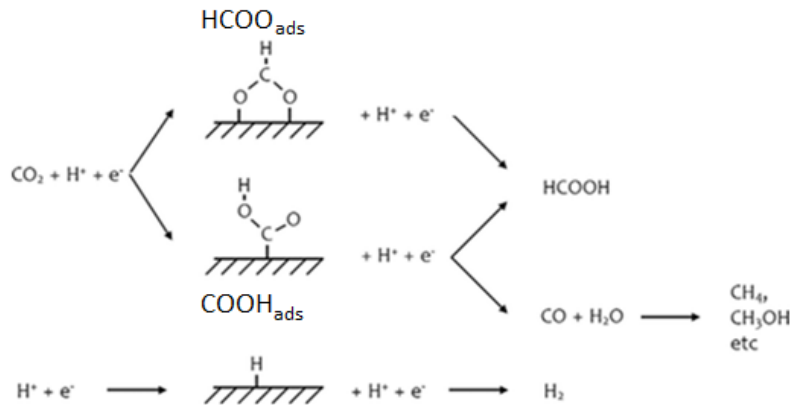
Deze opstelling maakt het mogelijk om alle metingen uit te voeren zoals die in het projectplan zijn aangegeven.

2.2 Thermodynamische modellering

Bij deze modellering is een model op atoomschaal gemaakt van het oppervlak van de kathode waarop CO_2 wordt omgezet, en vergeleken met beschikbare literatuur data. Dit model is vervolgens uitgebreid om het effect van oppervlakte bezetting mee te nemen, een effect dat nog maar beperkt wordt beschreven in de literatuur.

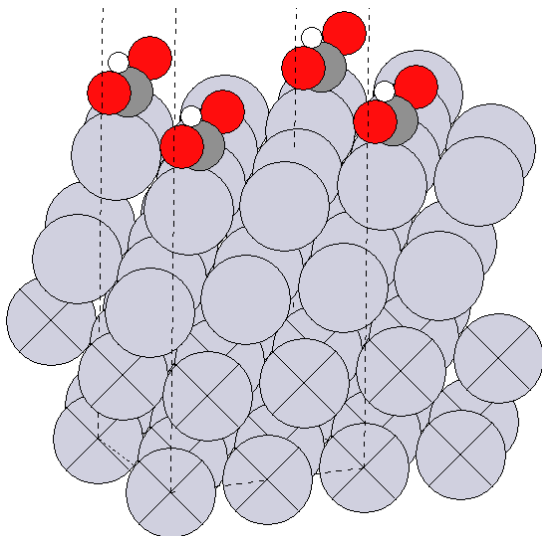
Het materiaal dat wordt gebruikt als elektrode wordt algemeen gezien als de meest bepalende factor in de selectiviteit van de elektrochemische omzetting, omdat het een oppervlakte reactie betreft en alle tussenproducten komen hiermee in contact.

Voor deze modellering is DFT (Density Functional Theory) toegepast, waarbij vooral is gekeken naar de energieniveaus van de tussenproducten, omdat het tussenproduct bepaalt welke eindproducten gevormd kunnen worden. In het algemeen start de CO_2 reductie met de adsorptie van het CO_2 molecuul op het elektrode oppervlak, waarna tussenproducten worden gevormd zoals hieronder weergegeven.

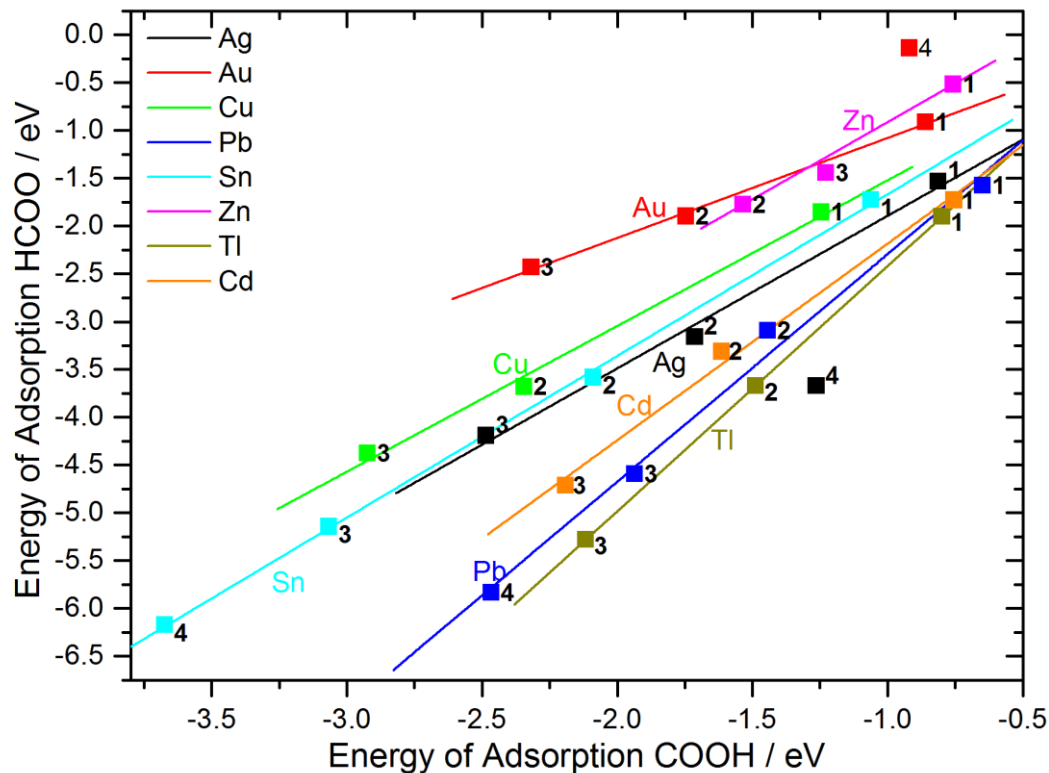


De resultaten van het DFT model zijn vergeleken met de literatuur, waaruit bleek dat het verschil minder dan 0,02 eV was.

Hieronder is een typische configuratie weergegeven ter beeldvorming, waarbij COOH is geadsorbeerd op een elektrode oppervlak, met een oppervlakte bezetting van 25%.



De uitbreiding van het DFT model om het effect van oppervlakte bezetting te bepalen is bereikt door de adsorptie energieën te berekenen voor COOH, HCOO, H, and CO voor 1 – 4 adsorbenten op een 2x3x4 cel. Hieronder zijn enkelen resultaten weergegeven voor elektrodeoppervlakken van Au, Ag, Cu, Zn, Sn, Pb, Tl en Cd.



Deze vergelijking is interessant omdat, terwijl beide tussenproducten mierenzuur kunnen worden, alleen HCOO omgezet kan worden in CO. Dit inzicht bestond nog niet.

Vervolgens is ook een reactormodel opgezet en zijn simulaties uitgevoerd van mierenzuurvorming onder druk. Voor de resultaten wordt verwezen naar het hierover gepubliceerde artikel (Modeling the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide to Formic Acid or Formate at Elevated Pressures, Andrew R. T. Morrison et al., Journal of The Electrochemical Society, 166 (4) E77-E86 (2019)).

Experimenteel onderzoek

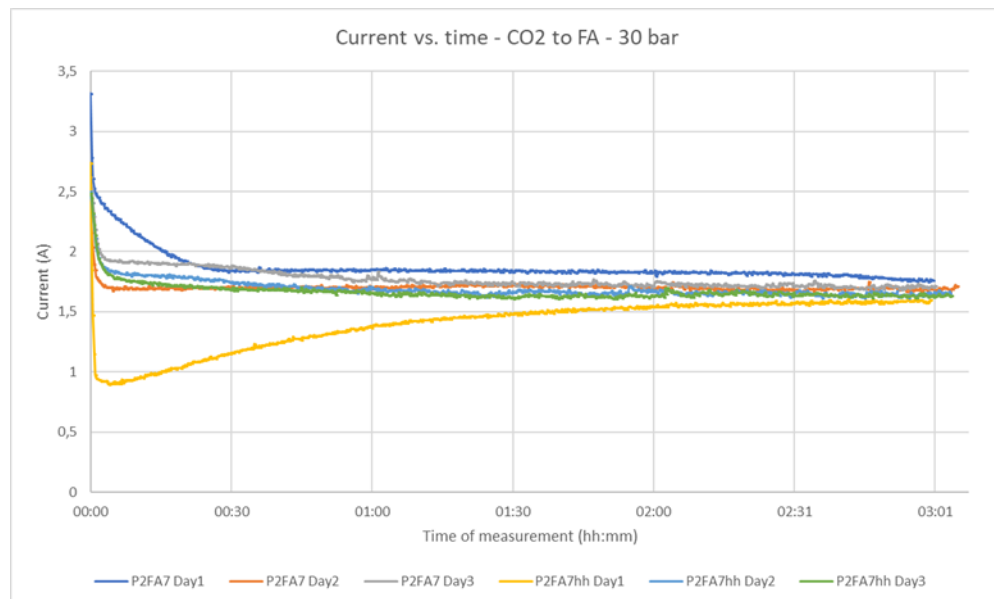
Het project heeft aangetoond dat de elektrochemische cel onder hoge druk direct CO₂ kan omzetten naar mierenzuur (en afhankelijk van de pH, formiaat) onder stabiele bedrijfsomstandigheden, zoals blijkt uit de uitgevoerde experimenten. Deze experimenten zijn tweevoudig of drievoudig uitgevoerd om te verzekeren dat de resultaten kunnen worden herhaald.

Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste resultaten, die ook voor een verdere implementatie van belang zijn:

1. Stroom

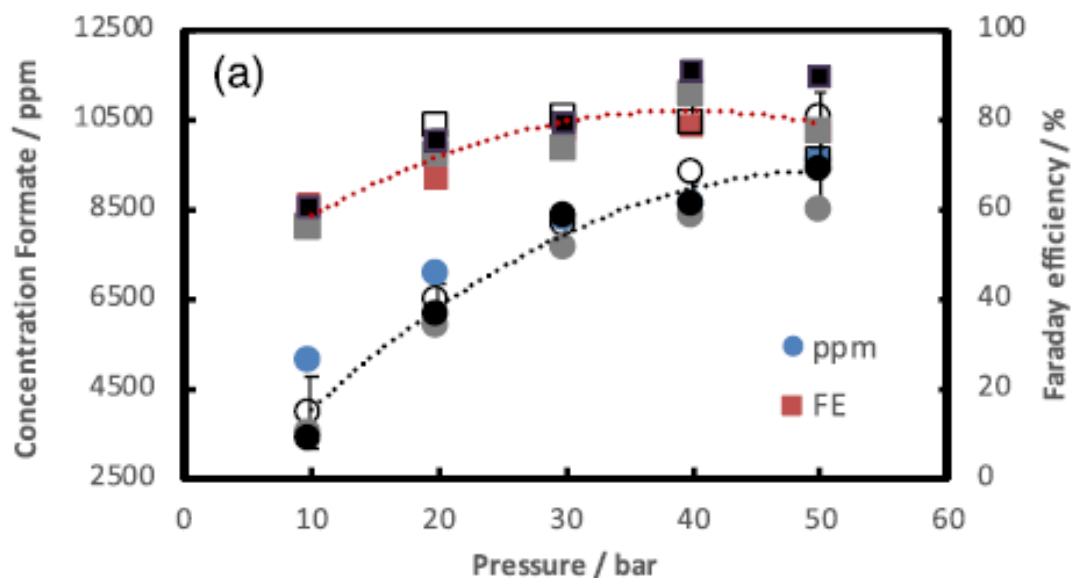
De stroom lijkt constant te zijn bij een celspanning van 3,5 V, zowel voor batch omstandigheden als voor continue stromingsmetingen. De duur van de tests varieert van ongeveer 20 minuten (batch) tot ongeveer 4 uur (continu). In de continue meting werd duidelijk dat de cel na ongeveer 1 uur een stabiele stroom bereikt. Als er echter eerdere experimenten waren uitgevoerd, zelfs de

dag voordien, dan stabiliseert de stroom binnen 10-15 minuten. Hieronder een grafische weergave hiervan.



2. Druk effect

Zoals blijkt uit de resultaten, worden significant hogere opbrengsten verkregen door de elektrochemische cel onder hogere druk te bedienen. Het effect van de opbrengst is bijna lineair met een druk tot 30-40 bar, waarna het afvlakt.



Concentratie van formaat (cirkels) en Faraday-efficiëntie (vierkanten) als functie van de druk voor CO₂-elektrolyse bij 3, 5 V met behulp van een BPM.

3. Faraday of stroom efficiëntie

De Faraday of stroom efficiëntie – het percentage elektronen dat in het beoogde molecuul terechtkomt – bereikt een niveau van ongeveer 90% bij 40 bar druk, zoals te zien is in bovenstaande figuur. Dit is een hoog niveau en een goede basis voor verdere ontwikkeling naar een commerciële toepassing. Het is interessant om te zien dat de Faraday-efficiëntie een relatief vlak optimum bereikt rond 40 bar.

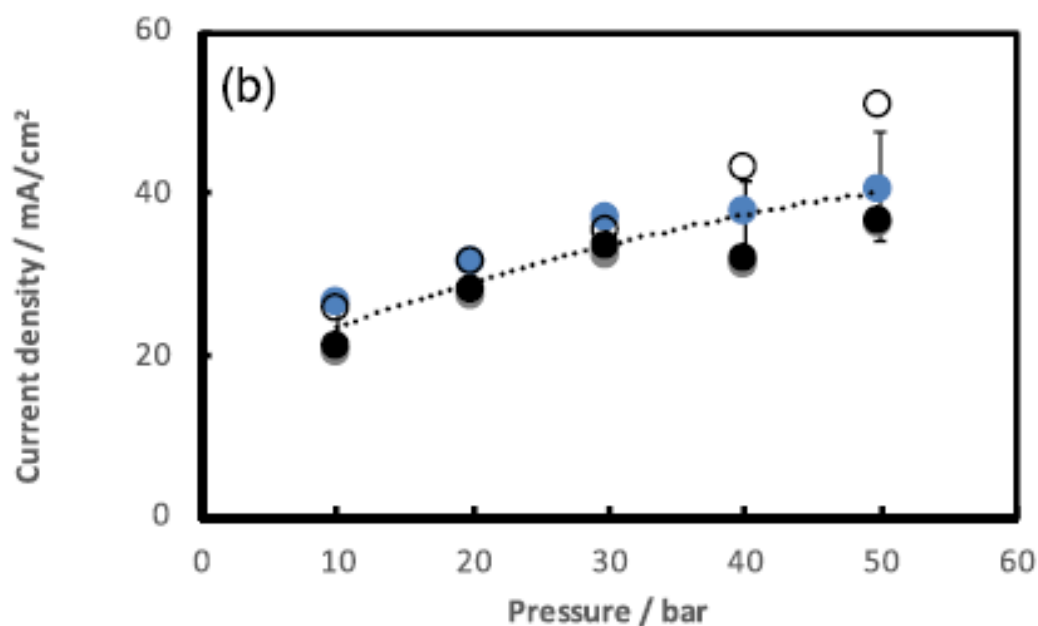
Dit betekent een hoge selectiviteit voor mierenzuur. De beoogde waarde voor dit project bedroeg 80%.

Ter vergelijking, de Faraday efficiëntie bij atmosferische omstandigheden is rond de 50-60% op zijn best.

4. Stroom dichtheid

De stroomdichtheid – de hoeveelheid Amperes per vierkante centimeter – bereikt op zijn best niveaus van 50 mA/cm^2 , zoals te zien is in onderstaande figuur. De stroomdichtheid is een indicatie van de compactheid voor de reactor constructie en de daarmee samenhangende investeringskosten per ton product, omdat hiermee het vereiste membraan en elektrode oppervlak wordt bepaald dat nodig is voor de vereiste capaciteit van een dergelijke reactor. De bereikte waarde is lager dan de beoogde waarde van 125 mA/cm^2 .

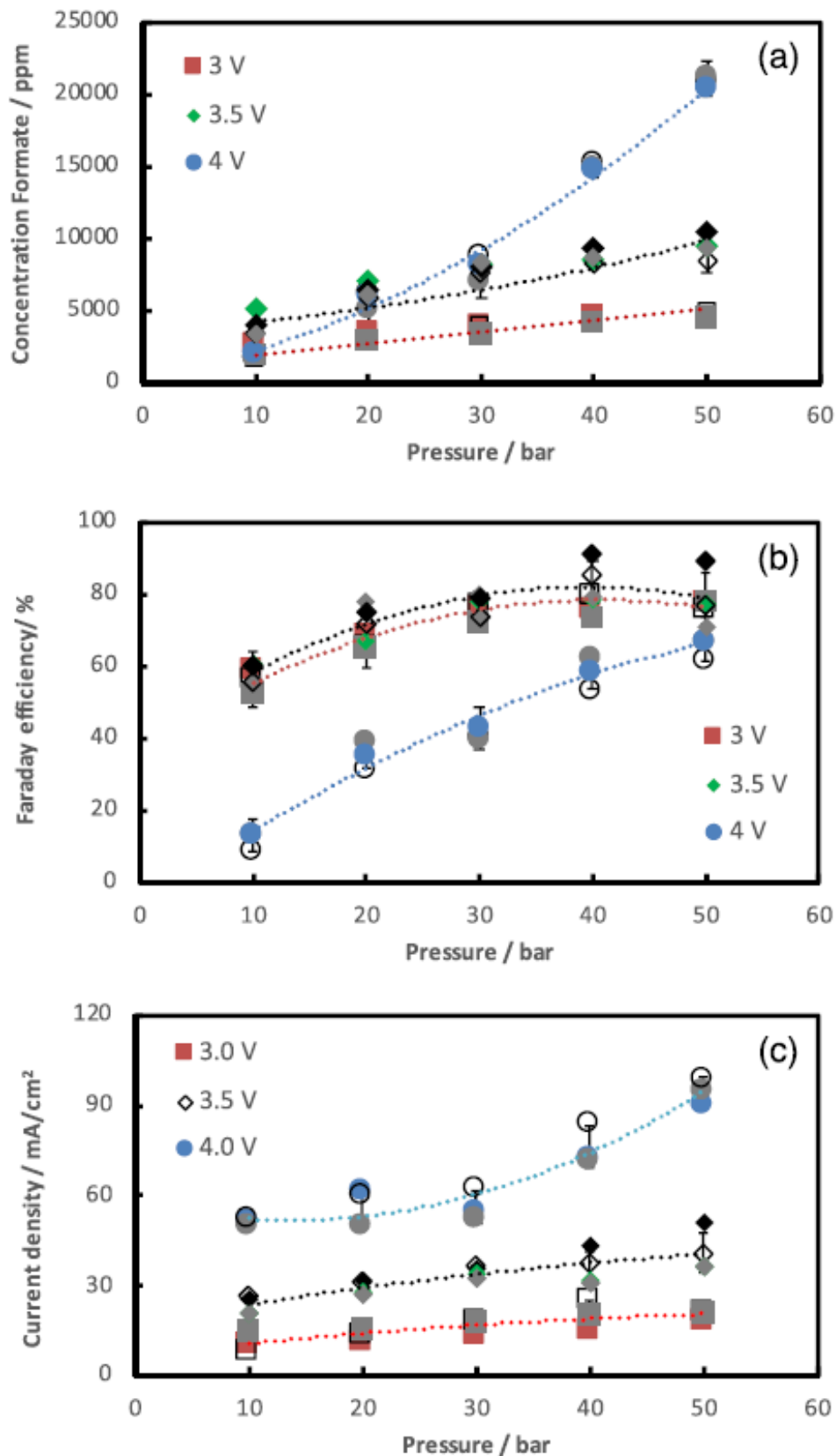
Overigens kan de stroomdichtheid vergroot worden door de celspanning te verhogen; de consequentie is dan wel dat de Faraday efficiëntie lager wordt.



Stroom dichtheid van formaat (cirkels) als een functie van druk voor CO_2 elektrolyse bij 3, 5 V met behulp van een BPM.

5. Celspanning

De meeste tests zijn uitgevoerd met een celspanning van 3,5 volt. Gezien de opstellingen was dit een goede keuze voor zowel atmosferische selectie cellen als de hogedruk opstellingen. Deze celspanning was hoger dan de beoogde waarde van 2,1 V, maar is verklaarbaar als rekening wordt gehouden met de activeringspotentiala voor het bipolaire membraan van ongeveer 0,9 V. Deze activeringspotentiala was blijkbaar niet meegenomen in de beoogde waarde van 2,1 V. Zoals wordt weergegeven in onderstaande figuur, moet worden opgemerkt dat de celspanning ook als een optimalisatie waarde kan worden gezien: bij het toepassen van een hogere celspanning neemt de mierenzuur/formiaat productie toe en neemt de stroomdichtheid toe, maar neemt de Faraday efficiëntie af omdat meer waterstof wordt geproduceerd.



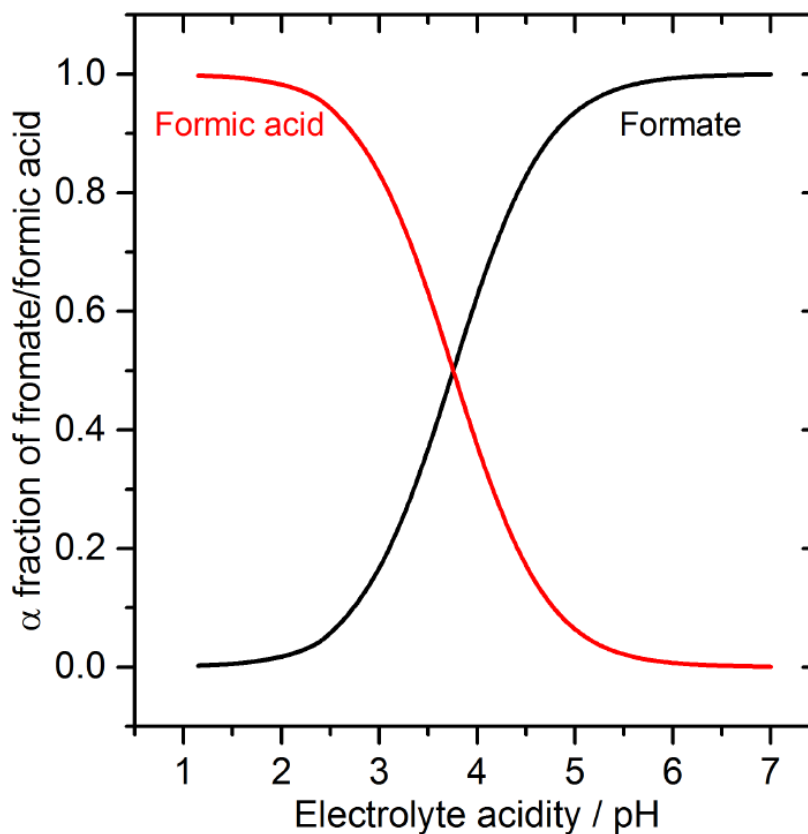
Effect van het celpotential op de (a) formiaat productie, (b) Faraday efficiëntie, en (c) stroom dichtheid als functie van de druk voor CO₂ elektrolyse bij 3 V (vierkanten), 3, 5 V (diamanten) en 4 V (cirkels) met behulp van een BPM.

6. Elektriciteitsverbruik

Het elektriciteitsverbruik – de hoeveelheid elektriciteit die nodig is voor 1 kg product – is een parameter die (het merendeel van) de operationele kosten van de reactor bepaalt, aangezien deze de totale elektrische efficiëntie vertegenwoordigt. Het omvat de effecten van Faraday efficiëntie en celspanning. Het gemeten elektriciteitsverbruik bedraagt ongeveer 4 kWh per kg mierenzuur/formiaat, wat ongeveer 10% hoger is dan het streefcijfer van 3,5 kWh/kg. Het nummer als zodanig wordt beschouwd als bevredigend, omdat het een positieve business case mogelijk maakt.

7. Mierenzuur of formiaat

In de elektrochemische cel kunnen zowel mierenzuur als formiaat worden geproduceerd. Het verschil wordt bepaald door het gebruik van een zure of alkalische elektrolyt: de pH van de elektrolyt bepaalt in grote mate of mierenzuur of formiaat wordt gevormd, zoals weergegeven in onderstaande figuur. De electrochemische cel kan onder beide omstandigheden stabiel bedreven worden.



Vorming van mierenzuur en/of formaat als functie van pH

8. Productieniveau

Het productieniveau van mierenzuur is ongeveer 10.000 ppm_w per 20 minuten bij 3,5 V en 50 bar, zoals te zien is in bovenstaande figuur. Dit betekent een concentratie stijging van 3% per uur.

9. Bijproducten

De omvang van de verwachte bijproducten H₂ en CO was zeer laag. De H₂ productie was ongeveer 1%, en CO was onder detectieniveau. De initiele aanname was 5% voor zowel H₂ als

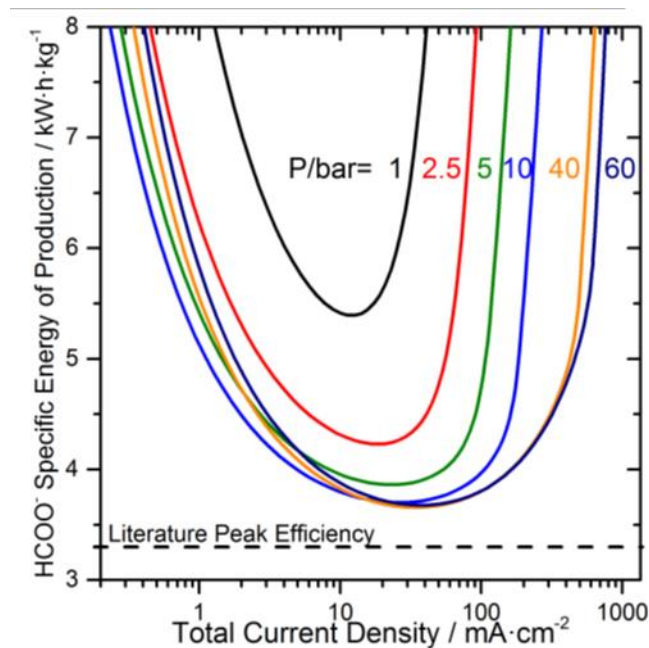
CO. Dit is een zeer goed resultaat, omdat het de inspanning voor het verwijderen van deze gassen vermindert.

10. Interactie met modelleren

Op basis van de reactormodellering blijkt dat het werkgebied van het elektrochemische proces goed is gekozen.

Uit onderstaande figuur kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. Een hogere druk leidt tot een lager specifiek energieverbruik;
2. Boven 40 bar is de extra verbetering laag;
3. Het specifieke energieverbruik heeft een 'optimum' van ongeveer 3,7 kWh/kg;
4. De corresponderende stroomdichtheid heeft een waarde tussen 20 en 100 mA/cm².



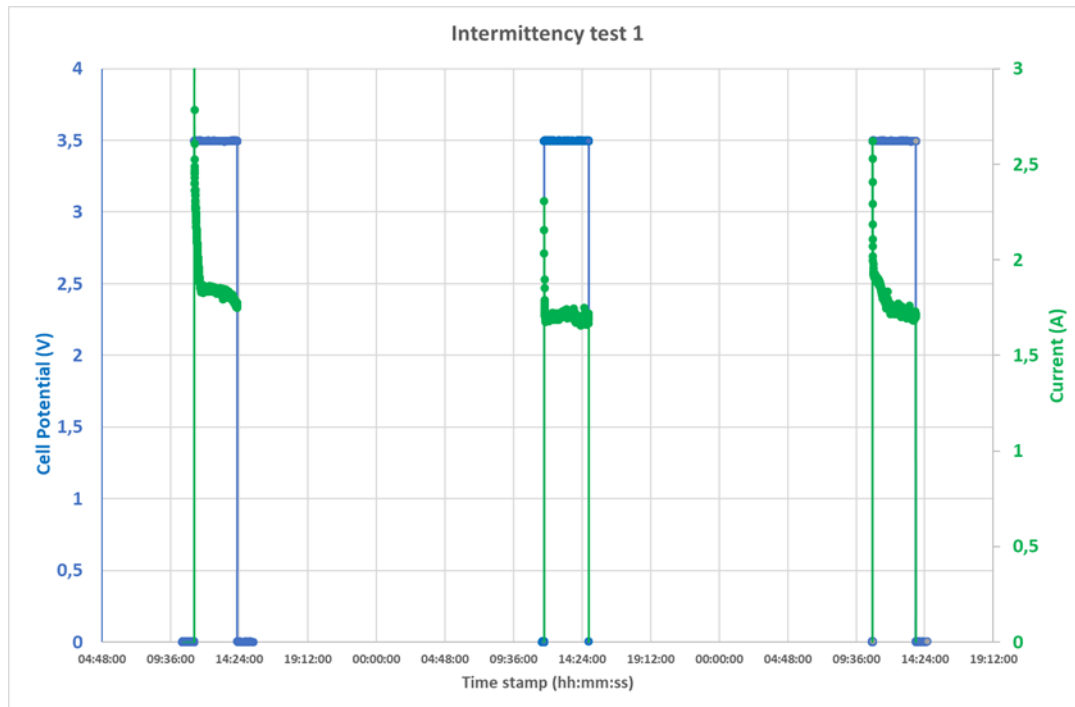
Specifiek energie verbruik van formiaatproductie, als functie van druk en stroomdichtheid.

11. Intermitterende elektriciteitstoevoer

Het effect van met tussenpozen toegevoerde elektriciteit is onderzocht om een eerste idee te krijgen hoe de reactor zou reageren op een intermitterende voeding, zoals kan worden verwacht van hernieuwbare energie zoals wind en zon.

Een dergelijke test is uitgevoerd op 3 opeenvolgende dagen, waarbij de reactor 4 uur wordt bedreven, vervolgens uitgeschakeld, en de volgende dag opnieuw wordt gestart. De productie van mierenzuur/formiaat gaat verder op het punt waar de eerdere test werd stopgezet, en er zijn geen negatieve effecten op de productkwaliteit waargenomen.

Zoals te zien is in onderstaande figuur, vertoont de stroom bij elke herstart een gelijksoortig patroon. Dit impliceert dat de reactor een herhaalbaar gedrag vertoont, en dus geschikt kan zijn voor intermitterende stroomtoevoer.



Patroon stroom bij 3 opeenvolgende tests met intermitterende stroomtoevoer.

Het waargenomen gedrag is een goed uitgangspunt om de opties voor een strategie voor procesregeling te bepalen, waarmee omgegaan kan worden met de effecten van fluctuerende en/of intermitterende voeding.

Als de celspanning als vast wordt aangenomen, zal het effect zijn dat de stroom zal variëren. Om te kunnen omgaan met een fluctuerende stroom zijn de volgende besturingsopties beschikbaar:

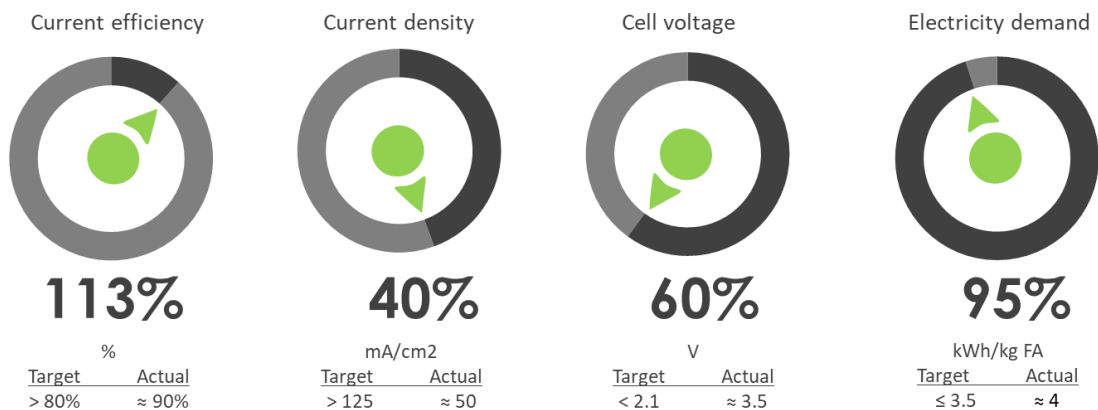
1. Niets doen: de reactor zal produceren als er stroom beschikbaar is, met het patroon zoals is waargenomen tijdens de intermitterende tests;
2. Ontwerp het productieproces in modules, zodat modules kunnen worden in- en uitgeschakeld, afhankelijk van het beschikbare vermogen;
3. Gebruik een batterij tussen de hernieuwbare stroombron en het proces, om pieken en dalen in de voeding te egaliseren;
4. Gebruik een opslag van mierenzuur/formiaat om voldoende toevoer naar het achtergeschakelde productieproces te verzekeren;
5. Een combinatie van de opties 1-4, afhankelijk van de toepassing.

12. Samenstelling van het gas

Een te verwachten CO₂ rijke stroom van een biogas- of mestverwerkingsinstallatie zal waarschijnlijk een CO₂ concentratie hebben – na reiniging en/of afvang - van 20-40%_{vol.}. Om te onderzoeken welk effect een dergelijke concentratie zou hebben op de celprestaties en de mierenzuur/formiaatproductie in vergelijking met zuivere CO₂, is een test ontworpen met een menggas van 20-80 en 40-60 volumepercent van respectievelijk CO₂ en N₂. Op die manier worden geen verontreinigingen geïntroduceerd die de vergelijking kunnen vertroebelen. Uit de test is geen significant verschil naar voren gekomen tussen beide gasen en/of drukken. Verwacht was dat een lagere partiële druk van CO₂ een lagere Faraday efficiëntie tot gevolg zou hebben en een lagere mierenzuur/formiaat productie.

Overzicht

Hieronder zijn de doelstellingen van het project grafisch weergegeven, met daarbij de bereikte resultaten.

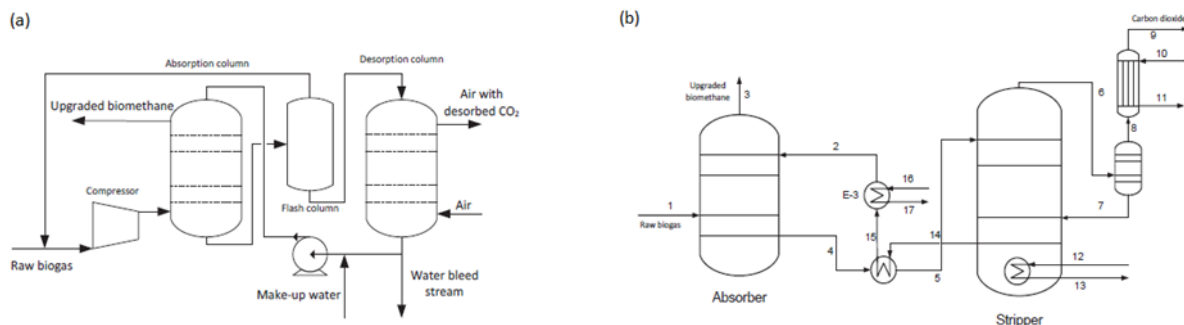


Overzicht van projectplan doelen en resultaten.

2.3 Implementatie van de technologie richting pilot installatie

Mogelijke integratie met een biogasinstallatie c.q. mestverwerker

In dit project zijn verschillende in de literatuur beschreven biogas-upgrade technologieën beschouwd en is een conceptuele vergelijking gemaakt tussen de verschillende technologieën.



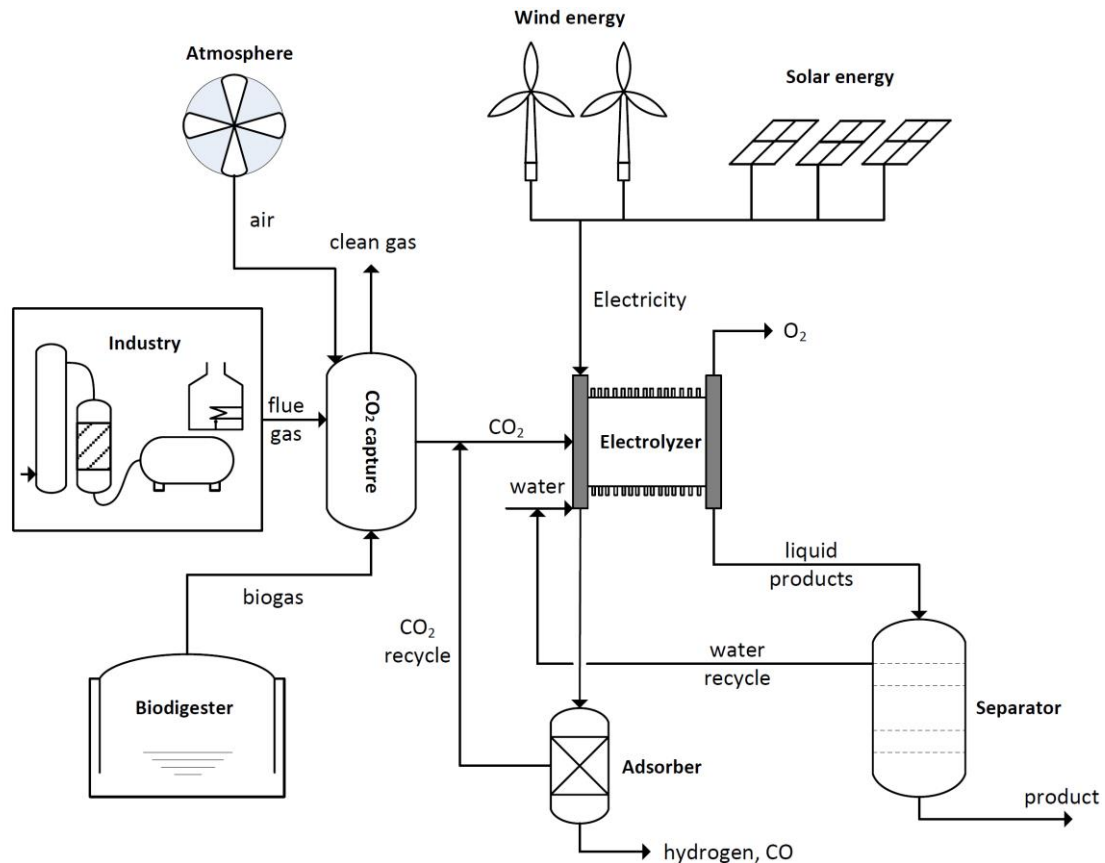
Procesoverzicht voor (a) fysisch CO_2 - verwijderingsproces en (b) chemisch CO_2 - verwijderingsproces.

Op basis van de uitgevoerde literatuuronderzoeken, lijkt een 'amine scrubber' de voorkeurstecnologie voor deze case study, omdat CO_2 bij voorkeur een hoge zuiverheid moet hebben. Hoewel het energieverbruik (vooral het thermische) hoger is voor een amine wasproces in vergelijking met andere processen, kan CO_2 worden verkregen met een hoge zuiverheid, onafhankelijk van de efficiëntie van het proces. Dat leidt mogelijk tot lagere operationele en investeringskosten verderop in het proces. Als lagere CO_2 – zuiverheden acceptabel zouden zijn in de mierenzuur reactor, kunnen andere beschouwde technologieën worden heroverwogen.

Inzet voor netondersteuning

Elektrochemische productie van mierenzuur kan mogelijk op een aantal manieren bijdragen aan de energietransitie in het elektriciteitssysteem, zoals de overgang naar meer wind en zonne-energie, en de verminderen van broeikasgasemissies in de industrie.

In de eerste plaats ondergaat het elektriciteitssysteem een transitie naar hernieuwbare energiebronnen die variabel produceren: wind- en zonne-energie. Vaak produceren wind en zonne-energie (veel) meer elektriciteit dan direct nodig is voor consumptie. Om tegemoet te komen aan de variabele productie, heeft het elektriciteitssysteem nieuwe bronnen nodig van zogenaamde 'flexibiliteit' die de hernieuwbare energie kunnen absorberen wanneer deze beschikbaar is.



Vereenvoudigd procesdiagram van een CO₂ valorisatie concept inclusief afvang, elektrochemische omzetting en product scheiding

Power-to-Formic Acid (P2FA) kan bijdragen aan deze flexibiliteit van het energiesysteem als de P2FA-elektrochemische reactor op een flexibele manier wordt ingezet: de productie opvoeren om de "overtollige" –en dan goedkope- hernieuwbare elektrische energie te absorberen wanneer deze in voldoende mate beschikbaar is, en vervolgens productie verminderen wanneer er sprake is van een tekort aan hernieuwbare elektriciteit. Dit helpt een elektriciteitssysteem dat grotendeels op wind- en zonne-energie is gebaseerd, voorkomt extra conventionele opwekking en heeft het co-voordeel van mierenzuurproductie die volledig is gebaseerd op hernieuwbare bronnen.

In het beste geval lijkt er potentieel te zijn in en na 2030.

Ten tweede kan P2FA bijdragen aan het koolstofarm maken van de industrie. Als mierenzuur op elektrochemische wijze wordt geproduceerd, kan conventionele productie van mierenzuur worden vermeden, wat leidt tot lagere CO₂ - emissies in de industrie.

Als biogene CO₂ wordt gebruikt, kan het resulterende mierenzuur mogelijk volledig koolstofneutraal zijn. De exacte hoeveelheid CO₂ - besparingen zal afhangen van de CO₂ - intensiteit van de respectievelijke conventionele productieroutes en de elektrische route.

Celconstructie

De elektrochemische cel die in dit project is gebruikt, is opgebouwd als een rechthoekig drukvat, waarin een elektrode-membraan-elektrode configuratie wordt gemonteerd. De kathode is een op tin gebaseerde plaat, de anode is Iridium gecoat, en het membraan is een bipolaire versie.

Tussen membraan en elektroden worden spacers gebruikt om de vereiste product- en elektrolyten stromen te laten plaatsvinden.

In principe is deze opzet geschikt voor een verdere ontwikkeling van de cel.

Voor een dergelijke verdere ontwikkeling zal het nodig zijn om langere meettests te doen en om de impact van onzuiverheden te bepalen. Op die manier kan de stabiliteit van de elektrode-membraan assemblage worden getest op langere termijn.

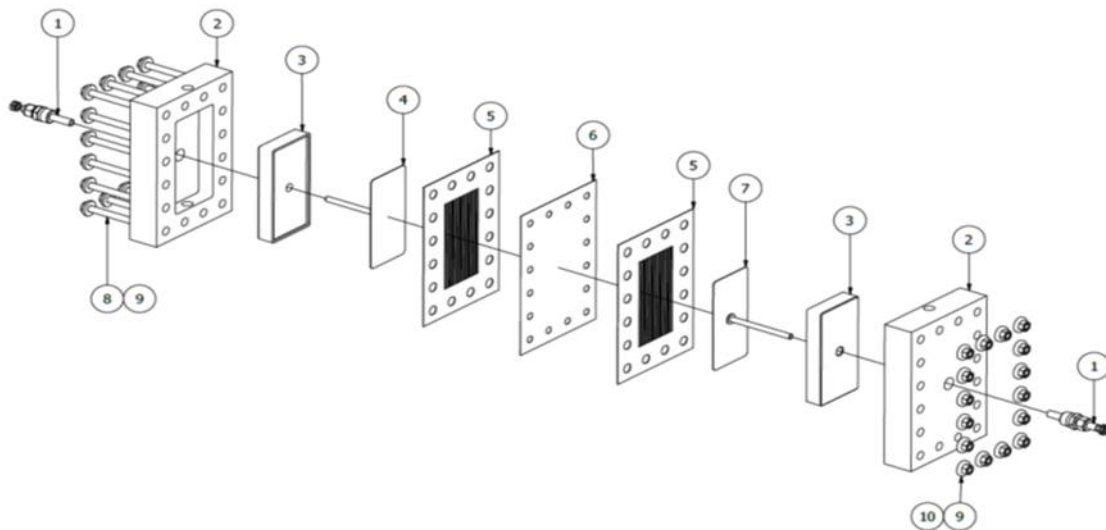


Figure 4: Exploded view of the reactor. (1) Insulator, (2) Reactor shell, (3) Teflon fluid distributor, (4) Anode, (5) Teflon spacer and seal, (6) Membrane, (7) Cathode, (8) Hex head bolt, (9) Isolating washer, (10) Hex nut.

Om de capaciteit te vergroten, zullen meerdere identieke cellen moeten worden gestapeld. Op basis van de ervaringen opgedaan bij het bedienen van de cel, is een nieuw ontwerp gemaakt voor een reactor waarbij meerdere cellen onder hoge druk in één reactor kunnen worden gestapeld. Deze reactor kan beschikbaar worden gesteld voor een follow-up project.

2.4 Technisch economische evaluatie

Op 5 oktober 2016 is het Verdrag van Parijs in werking getreden met ratificatie door meer dan 55 landen, waaronder China, India, de Verenigde Staten, Frankrijk en Duitsland. Samen produceren deze landen meer dan 55 procent van de mondiale uitstoot van broeikasgassen. De EU-landen willen ten minste 40 procent minder broeikasgassen door 2030 dan in 1990.

De vereiste transformatie van het Europese energiesysteem om deze broeikasgasemissies te verminderen is begonnen en zal nog vele jaren voortduren. De impact op de energie-intensieve industrieën, en in het bijzonder op de petrochemische industrie, met zijn gevarieerde processen en producten, zal significant zijn met fundamentele veranderingen in de (elektrische) stroomvoorziening. Een cumulatieve totale capaciteit van 64 GW wordt geraamd om te worden geïnstalleerd op de Noordzee tegen 2030. Dit is een gemiddelde groei van meer dan 3 GW/jaar. Nederland zal een gemiddelde groei hebben van bijna 1 GW/jaar. In 2030 zal Nederland meer dan 12

GW wind capaciteit hebben, voldoende om elektriciteit te leveren voor de huidige gemiddelde piekvraag in Nederland.¹

De kosten van elektriciteit worden verlaagd als gevolg van grootschalige ontwikkeling van hernieuwbare energie, terwijl de kosten van de CO₂-uitstoot worden verhoogd als gevolg van de nieuwe regelgeving van de EU-regeling voor de handel in emissierechten.

Samen met de impact die hernieuwbare elektriciteit op de elektriciteitsnetten zal hebben, zijn dit belangrijke ingrediënten voor de ontwikkeling van de zogenaamde 'Power-to-X' technologie, zoals de "Power -to-Formic Acid" technologie van Coval Energy. Samen met het potentieel van conversietechnologie om waterstof (zoals de technologie van Team Fast) en/of koolstofmonoxide uit mierenzuur te produceren, is het potentieel voor deze nieuwe technologieën enorm.

De huidige mierenzuur markt is relatief klein met ongeveer 1.000.000 Mt per jaar wereldwijd. De totale markt heeft een BBP gerelateerde groei en wordt gedomineerd aan de aanbodzijde door verschillende grote spelers. Het aanbod op basis van fossiele brandstoffen is ruim en de markt vereist in de nabije termijn geen nieuwe productiecapaciteit op basis van fossiele brandstoffen.

De markt voor de hernieuwbare toepassing van mierenzuur is echter onbenut en groot. We hebben gekeken naar drie verschillende potentiële markttoepassingen.

Case 1: grootschalige, centrale productie en toepassing van mierenzuur als basis chemicalie

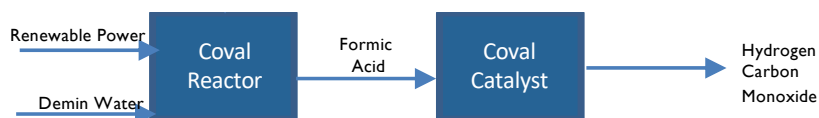
Mierenzuur levert dezelfde chemische functionaliteit als syngas, gasvormige grondstoffen variërend van zuiver koolmonoxide (CO), mengsels van koolmonoxide en waterstof (CO + H₂) tot zuivere waterstof. Als zodanig kan mierenzuur worden aangeduid als vloeibaar SynGas of LSG. De totale mondiale vraag naar CO wordt geschat op ongeveer 3.800.000 ton, terwijl de markt voor waterstof geschat wordt op ongeveer 60.000.000 metrische ton.

Aangezien de winstgevendheid voor CO beter is, zal Coval Energy gericht zijn op markten waar CO de belangrijkste grondstof is en niet waterstof.

Een van de twee grootste toepassingen van CO is de productie van azijnzuur en fosgeen. Deze twee markten hebben slechts een totale jaarlijkse Europese CO-vraag van ongeveer 740kt.

De meest eenvoudige manier om mierenzuur te gebruiken als een bron van CO en H₂ is door ontleding van mierenzuur gekoppeld met een omgekeerde-water-gas-shift-reactie (RWGS). De RWGS maakt het mogelijk om duurzaam grondstoffen te produceren op basis van hernieuwbare energie in plaats van fossiele grondstoffen. Een laagwaardige toepassing van mierenzuur is het gebruik als een energiebron voor hoge-temperatuur conversie processen.

Toepassing van Coval Energy in SMR-technologie (stoom-methaan reformingomvorming)



Coval Energy zal in eerste instantie voornamelijk in Europa opereren. De totale Europese markt voor CO kan als volgt worden samengevat:

¹WindEurope, ontketend Europa's offshore wind potentieel een nieuwe resource beoordeling, juni 2017

1. Voor de productie van azijnzuur: 375 kt
2. Voor de productie van Fosgene: 740 kt
3. Polyurethaan n/a

In combinatie met een geschatte Europese markt voor mierenzuur voor de bestaande toepassing van 300.000 ton per jaar, kijken we naar een totale marktomvang van 1.000.000 Mt.

De markt voor CO is dus significant groter dan die van mierenzuur. De markt voor nieuw gebouwde CO-installaties is echter relatief klein. In Europa wordt elke 3 jaar een nieuwe fabriek gebouwd. Een typische plant heeft een productie van 5.000 tot 10.000 kubieke meter CO per uur. Coval Energy zal zich richten op mogelijkheden om zijn technologie te integreren in bestaande productieprocessen en zo bij te dragen tot de reductie van broeikasgas gasen door het hergebruik van CO₂.

Case 2: mierenzuur als speciaal chemicalie bij gedecentraliseerde productie

De glastuinbouw is een van de grootste consumenten van aardgas in Nederland. Op jaarbasis wordt ongeveer 3.000.000.000 kubieke meter gas in Nederlandse kassen gestookt: ongeveer 7,5 procent van het totale gasverbruik in Nederland. De beslissing om de gaskraan versneld te sluiten heeft grote gevolgen voor tuinders.

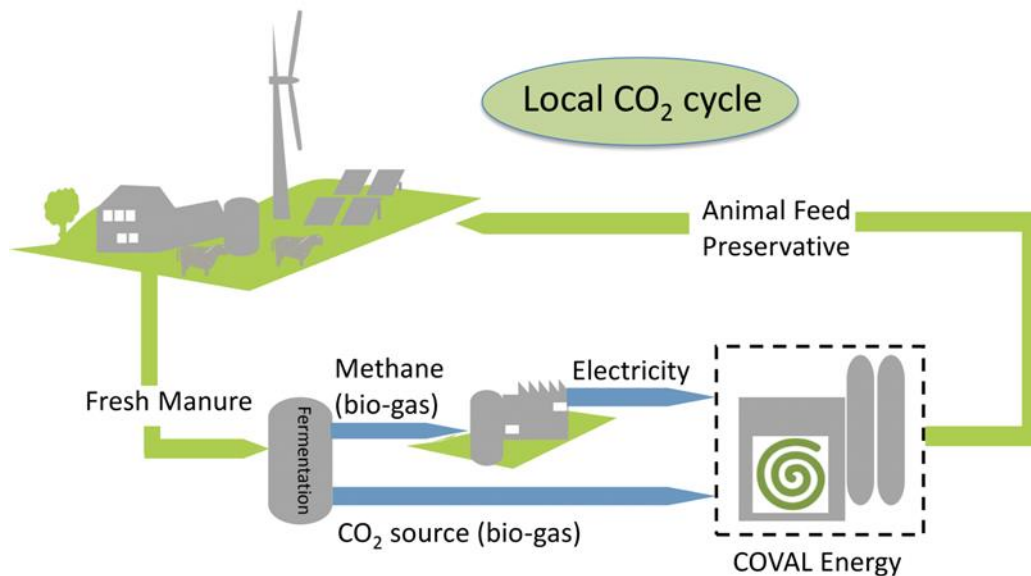
Een mierenzuur generator kan op een milieuvriendelijkere manier dezelfde functie hebben als een CHP-unit (warmte-kracht eenheid). CO₂ wordt bij de bron omgezet (bijvoorbeeld bij een afvalverbrandings oven) waarna mierenzuur per vrachtwagen naar kassen wordt vervoerd. Vervolgens wordt mierenzuur opgeslagen en naar behoefte gebruikt als brandstof voor een brandstofcel. De brandstofcel zal het mierenzuur omzetten in elektriciteit (voor elektrische verwarming en verlichting) en CO₂ afgeven als een meststof voor de gewassen.

Na een eerste verkenning, zal het uitdagend zijn voor mierenzuur om te concurreren met aardgas (de grondstof voor een CHP). De huidige prijs van mierenzuur is ongeveer 16,5 x hoger in vergelijking met aardgas voor dezelfde energie inhoud).

Een andere optie is de meer traditionele toepassing voor conservering van veevoeders (inkuiling van gras) op boerderijen.

De technologie van Coval kan worden gebruikt als systeemintegrator om een gesloten kringloop van CO₂-hergebruik mogelijk te maken: van mest via fermentatie tot biogeen CO₂ tot mierenzuur.

Uiteraard met gebruik van hernieuwbare energie.



In Nederland zijn er ca. 17.000 rundveehouders met gemiddeld 100 koeien en 40 hectare grond. De totale jaarlijkse besteding van een gemiddelde boer voor additieven voor veevoerconservering is ca. 5.000 - 10.000 euro. Een gemiddelde boer verbruikt ongeveer 10 tot 100 liter mierenzuur per jaar. Marketing en merkbekendheid zijn belangrijk in deze markt. Boeren zijn trouwe klanten die vaak al lange tijd gebruik maken van bepaalde producten en merken. Het is een uitdaging om het koopgedrag van klanten te veranderen en deze markt te betreden.

De voorkeur zou dan zijn om het mierenzuur aan de producenten van "inkuil" additieven te leveren, zodat het duurzaam geproduceerde mierenzuur als een component wordt opgenomen in de catalogus. Aangezien deze bedrijven "standaard" mierenzuur soorten kopen, betekent dit dat Coval Energy zou moeten concurreren met deze producten op kwaliteit en prijs. Coval Energy verwacht tegen de huidige marktprijzen te kunnen produceren.

Case 3: mierenzuur als energiedrager en de rol in de transportsector

Mierenzuur kan worden gebruikt als waterstofdrager voor het tanken van lichte personenauto's en andere voertuigen op waterstof. Hierbij wordt mierenzuur gebruikt om waterstof over de toeleveringsketen te transporteren en op te slaan, en pas op het laatste punt vóór de brandstofcel wordt het mierenzuur omgezet in waterstof. Team Fast en zijn opvolger Dens ontwikkelen technologie om mierenzuur naar waterstof te converteren.

Het transport met lage emissies staat hoog op de beleidsagenda in Nederland. Waterstof als brandstof voor elektrische voertuigen aangedreven door brandstofcellen kan een belangrijke bijdrage leveren aan de emissiearme realisatie van vervoer voor personen en goederen. Het gebruik van waterstofvoertuigen zou dan ook een effect kunnen hebben op een groter deel van de emissies in de vervoerssector dan elektrische voertuigen.

Op het gebied van auto's is de commercialisering al begonnen met de introductie van verschillende modellen in de grotere autosegmenten door Hyundai, Toyota en Honda, en van andere fabrikanten wordt verwacht dat ze snel modellen gaan uitbrengen, waarbij de verkoop wordt opgeschaald tot enkele tienduizenden per jaar.

Voor de vrachtwagen markt zijn high-potential projecten aan de gang om prototypes te ontwikkelen voor trucks van 40 ton en 27 ton. Er zijn mogelijkheden voor Nederland op dit gebied, ook vanwege

de omvang van de transport-en distributiesector in Nederland. De totale toekomstige vraag naar waterstof voor de transport-en mobiliteitssector in Nederland zou tot 1.000.000 ton per jaar kunnen bedragen.

Het leveren van waterstof uit mierenzuur is bijna 6% zuiniger in vergelijking met de conventionele waterstof route. Dit lijkt misschien niet significant, maar het belangrijkste commerciële belang ligt in de lagere investeringskosten voor een tankstation van mierenzuursus ten opzichte van waterstof. De totale CAPEX is ongeveer 46% lager in vergelijking met een waterstofstation.

De totale Opex is ongeveer 15% lager in vergelijking met een waterstofstation.

Vooraf in een markt die groeit met slechts een paar tankbeurten per dag, kan dit een aanzienlijke stimulans vormen voor investeerders om hun risico te verminderen, waardoor het aantrekkelijker wordt om te investeren in de waterstof waardeketen.

2.5 LCA (Life Cycle Assessment)

Voor de toepassing van duurzaam geproduceerd mierenzuur, zoals dat via een directe omzetting uit CO₂ wordt gevormd, is een indicatieve LCA (Life Cycle Assessment) uitgevoerd.

Hierbij wordt het mierenzuur in 2 toepassingen beschouwd als alternatief voor:

1. Conventioneel geproduceerde mierenzuur in conventionele toepassingen van mierenzuur;
2. Diesel in stationaire dieselmotoren, bijvoorbeeld voor ontwatering in infrastructurele werken.

Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het doel van deze studie is het maken van indicatieve milieueffectrapportages en het illustreren van de effecten van toegepaste productieroutes, CO₂-bronnen en energiebronnen die worden gebruikt voor de productie van mierenzuur.
- De functionele eenheid die in de LCA wordt beschouwd, is de productie en het daaropvolgende gebruik van 1 metrische ton mierenzuur (100%).
- De beschouwde systemen betreffen de hele productieketen, variërend van isolatie van de CO₂ gebruikt als grondstof tot en met het gebruik van het geproduceerde mierenzuur. De milieu-impact van de overwogen CCU-systemen(Carbon Capture & Utilisation) wordt vergeleken met die van de conventionele systemen.
- Voor CO₂-levering zijn twee verschillende bronnen in aanmerking genomen:
 1. CO₂ geïsoleerd van biogas;
 2. CO₂ gevangen op een afval naar energie faciliteit (EFW)CO₂ geïsoleerd van biogas wordt in dit project beschouwd als representatief voor CO₂ uit biologische koolstof en voor gedecentraliseerde afvangst. De tweede optie betreft een bestaand concreet initiatief en is om deze reden geselecteerd. Het wordt beschouwd als representatief voor grootschalige afvang bij industriële CO₂-bronnen.
- Voor de productie van elektrochemisch mierenzuur worden twee verschillende soorten elektriciteitsgebruik beschouwd:
 1. De conventionele gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix
 2. Elektriciteitsproductie door middel van Nederlandse windenergie (1/3 wind onshore, 2/3 wind offshore)
- Twee verschillende toepassingen, waarbij het elektrochemisch geproduceerde mierenzuur het conventionele gebruik kan vervangen, zijn overwogen:
 1. Conventioneel geproduceerde mierenzuur in conventionele toepassingen van mierenzuur;
 2. Diesel gebruik in stationaire dieselmotoren, bijvoorbeeld voor ontwatering in infrastructurele werken.

Beide toepassingen zijn geselecteerd op basis van de verwachte milieuvoordelen, de marktprijs van de te vervangen grondstof en het TRL-niveau van de potentiële toepassing.

- In deze studie wordt alleen rekening gehouden met de uitstoot van fossiele CO₂. We gaan ervan uit dat de CO₂ gevangen op de EFW een biogeen gehalte heeft van 53% heeft, en dat van biogas 100%.
- De impact op de klimaatverandering wordt beschouwd op basis van het meest recente IPCC (beoordelingsrapport 4) Global Warming mogelijkheden (GWP) per broeikasgas, met een tijdshorizon van 100 jaar.

Om de beste en de slechtste milieu-impact te kunnen tonen, worden in dit onderzoek zes verschillende CCU-routes overwogen:

1. CO₂ geïsoleerd van biogas, hernieuwbare elektriciteit, gebruik van mierenzuur voor conventionele toepassingen
2. CO₂ geïsoleerd van biogas, conventioneel elektriciteitsverbruik, gebruik in stationaire dieselmotoren
3. CO₂ gevangen op een EFW, conventioneel elektriciteitsgebruik, gebruik van mierenzuur voor conventionele toepassingen
4. CO₂ gevangen op een EFW, hernieuwbare elektriciteitsverbruik, gebruik van mierenzuur voor conventionele toepassingen
5. CO₂ gevangen op een EFW, conventioneel elektriciteitsgebruik, gebruik in stationaire dieselmotoren
6. CO₂ gevangen op een EFW, hernieuwbare elektriciteitsverbruik, gebruik in stationaire dieselmotoren

Milieueffecten

Een vergelijking van de milieueffecten van elektrochemisch geproduceerde mierenzuurten opzichte van de conventionele routes wordt gegeven in onderstaande tabel. **Error! Not a valid bookmark self-reference.**

Zoals blijkt uit de aangegeven percentages levert de elektrochemische productieroute een lagere bijdrage aan de beschouwde milieu-impact categorie wanneer conventioneel mierenzuur wordt vervangen. Dit is onafhankelijk van de elektriciteitsbron en van het type toegepaste CO₂. Dit betekent dat de elektrochemische productieroute een lagere milieu-impact heeft wanneer mierenzuur wordt geproduceerd voor conventioneel gebruik van mierenzuur, maar niet altijd als dieselvervanger.

Tabel - Vergelijking milieu impact van elektrochemisch geproduceerd mierenzuur tov conventioneel (basis scenario)

Env. impact category Application	Diesel substitution			Conventional Formic acid substitution		
	EfW + conv elec	EfW + wind	Bio-CO ₂ + wind	EfW + conv elec	EfW + wind	Bio-CO ₂ + wind
Global warming	19%	90%	656%	104%	485%	3543%
Stratospheric ozone depletion	35%	1126%	1146%	245%	7811%	7951%
Ionizing radiation	4%	376%	388%	146%	14140%	14589%
Ozone formation, Human health	127%	1091%	1103%	240%	2070%	2093%
Fine particulate matter formation	76%	404%	409%	369%	1967%	1989%
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	128%	1069%	1081%	244%	2040%	2062%
Terrestrial acidification	38%	538%	545%	210%	2948%	2987%
Freshwater eutrophication	14%	51%	51%	584%	2060%	2076%

Marine eutrophication	14%	45%	51%	419%	1307%	1489%
Terrestrial ecotoxicity	108%	57%	57%	1242%	652%	654%
Freshwater ecotoxicity	22%	9%	9%	617%	256%	256%
Marine ecotoxicity	23%	12%	12%	569%	291%	292%
Human carcinogenic toxicity	47%	41%	41%	385%	336%	336%
Human non-carcinogenic toxicity	23%	31%	31%	578%	773%	776%
Land use	3%	48%	48%	149%	2792%	2805%
Mineral resource scarcity	105%	33%	33%	737%	229%	229%
Fossil resource scarcity	47%	1485%	1522%	196%	6146%	6299%
Water consumption	18%	203%	208%	1663%	18719%	19180%

Toelichting:

1. EfW + conv Elec: CO₂ wordt afgevangen in afvalverbrandingsinstallatie, gemiddelde Nederlandse mix elektriciteit verbruikt in processen
2. EfW + wind: CO₂ wordt afgevangen in afvalverbrandingsinstallaties, elektriciteit uit windenergie verbruikt in processen
3. Bio-CO₂ + wind: CO₂ is geïsoleerd van biogas (geen toewijzing), elektriciteit uit windenergie verbruikt in processen
4. Alle percentages betreffen de ratio-bijdrage in de vervanging van de productieketen ÷ de bijdrage van elektrochemische productieroutes.
Een percentage > 100% betekent dat de elektrochemische productieroute een lagere bijdrage levert aan het beschouwde milieuthema.

2.6 Conclusies inclusief knelpunten en toepassingsperspectief

Kijkend naar de algemene prestatiedoelstellingen van dit project kan worden geconcludeerd dat de directe omzetting van CO₂ naar mierenzuur (en formiaat) veelbelovende mogelijkheden biedt voor een efficiënt conversieproces. De hoge stroom-of Faraday-efficiëntie en de resulterende parameter voor het elektriciteitsverbruik (in kg_{product}/kWh) duiden op positieve businesscase mogelijkheden. Het verbeteren van de stroomdichtheid is een aandachtspunt bij opschaling van de technologie voor een toekomstige toepassing.

Inmiddels is – met ondersteuning van RVO – een vervolgproject gestart waarbij een pilot plant wordt voorbereid bij het bedrijf Twence. Hierbij worden elektrochemische cellen in groepen gestapeld om een gewenste capaciteit te bereiken.

Een knelpunt hierbij is het verkrijgen van voldoende financiële ondersteuning om deze pilot mogelijk te maken.

Het toepassingsperspectief van groene mierenzuur als hergebruik van CO₂ is meervoudig:

- Het product kan op de bestaande (wereld)markt worden verkocht, ten behoeve van bestaande toepassingen;
- Het product kan ook ingezet worden om in andere toepassingen te worden ingezet, met name als een zuur in processen waar nu bijvoorbeeld zoutzuur of zwavelzuur worden toegepast; conventioneel geproduceerd zoutzuur en zwavelzuur worden meestal ingezet omdat ze goedkoper zijn dan mierenzuur, maar het groene karakter van mierenzuur uit CO₂ zou dan het verschil moeten maken, zeker als bedrijven op die manier hun CO₂ voetafdruk kunnen verkleinen; dit zou een (deel)oplossing kunnen zijn voor bijvoorbeeld de staal- en cementindustrie;
- Mierenzuur is een goede drager van waterstof en/of koolstofmonoxide ('vloeibaar synthesesgas'), en kan met name gebruikt worden om heel eenvoudig waterstof en koolmonoxide veilig en over grotere afstanden te transporteren; mierenzuur kan daarbij ook gebruikt worden als brandstof voor bijvoorbeeld brandstofcellen;
- Groene mierenzuur kan ook ingezet worden als één van de grondstoffen in vergassingsprocessen ter verdringing van fossiele brandstoffen; dit leidt tot een lagere CO₂

voetafdruk voor het proces en de producten, en kan bedrijven helpen de CO₂ emissie van hun productiesites te verlagen;

- Groene mierenzuur kan ook een uitstekende voedingsbron voor fermentatieprocessen, en zo een onderdeel gaan vormen van biochemische productieroutes;

En meer toepassingen zullen ongetwijfeld gevonden gaan worden als onderdeel van een cyclische koolstof keten.

3. Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de regeling (duurzame energiehouding, versterking van de kennispositie)

Zoals blijkt uit de resultaten van dit project, en zoals beschreven in het projectplan, biedt deze technologie uitzicht op het realiseren van meerde doelstellingen van de regeling:

- De verdere inzet van elektrificatie in de industrie op basis van groene elektriciteit;
- Het hergebruik van CO₂ waardoor emissies verminderen;
- Het recycleren van CO₂ ter ondersteuning van een circulaire economie;
- Het ontwikkelen van een P2C-optie die het elektriciteitsnet kan ondersteunen;
- Het versterking van de kennispositie.

De technologie zoals hierboven beschreven is gebaseerd op elektrochemie die gebruik maakt van groene stroom. Hierdoor hoeven geen energiebronnen op basis van fossiele brandstoffen worden ingezet, waardoor de producten kwalificeren als groen. Door toepassing van deze technologie in de industrie zal dus de CO₂ emissie kunnen verminderen, hetzij op eigen terrein in geval van eigen opwek, hetzij door vermindering van emissies bij elektriciteitscentrales.

De technologie is gericht op hergebruik van CO₂, waardoor deze CO₂ wordt omgezet in waardevolle grondstoffen die weer in bestaande en/of nieuwe toepassingen kunnen worden ingezet. Bij dit project wordt CO₂ omgezet in mierenzuur (of formiaat). Op deze manier wordt voorkomen dat elders mierenzuur op de oude vervuilende manier wordt gemaakt. Zoals uit de LCA blijkt, gebeurt dat dan veelal op een veel milieuvriendelijker manier.

Door CO₂ te hergebruiken wordt ook ingespeeld op een circulaire economie. In plaats van te emitteren wordt CO₂ gebruikt als een bron van koolstof voor met name de chemische sector. Op deze manier wordt het gebruik van fossiele brandstoffen als koolstofbron verdrongen.

De P2C technologie kan een belangrijke rol spelen ter ondersteuning van het Nederlandse elektriciteitsnet, zeker wanneer deze technologie voldoende schaal krijgt. Door het in- of uitschakelen van deze toepassingen kan de netbeheerder via deze vraagsturing schommelingen van minder voorspelbare elektriciteitsproductie op basis van zon en wind beheersen. Uit de resultaten van dit project blijkt dat deze technologie met intermitterende elektriciteitsaanvoer kan omgaan.

De kennispositie is door de uitvoering van dit project sterk verbeterd. Uit dit project zijn tot nu toe drie wetenschappelijke publicaties voortgekomen, waarvan twee al zijn gepubliceerd. Op basis van de LCA is bevestigd dat deze methode van mierenzuur produceren veel duurzamer is dan de huidige oude technologie. Op basis van de resultaten is al een verbeterde reactor gebouwd die op dit moment al wordt gebruikt in een vervolgproject. De opgedane kennis is belangrijk voor Nederland, en kan met huidige en nieuwe bedrijven worden uitgebouwd naar een voor Nederland belangrijke technologie voor CO₂ hergebruik. De technologie is in september 2019 gepresenteerd voor de VoltaChem community, waardoor vele geïnteresseerde bedrijven kennis hebben kunnen nemen van de mogelijkheden.

4. Spin off binnen en buiten de sector

De eerstvolgende voorgenomen stap is het bouwen van een pilot plant op basis van deze technologie in een industriële omgeving. Op dit moment wordt zo'n pilot plant al voorbereid in een samenwerking tussen het bedrijf Twence, Coval Energy, TU Delft en TNO/VoltaChem. Het plan is om in 2020 te beginnen met die pilot plant, zodra de financiering rond is.

Na de pilot plant zal een naar verwachting een eerste commerciële installatie volgen als demonstratie plant. Deze verdere opschaling biedt kansen aan Nederlandse installateurs en installatiebouwers.

Op de middellange termijn is het de bedoeling een elektrochemische module te hebben die 2.500 ton CO₂ per jaar kan omzetten in mierenzuur met een elektrische aansluiting van 1 MW. Grotere capaciteiten kunnen dan bereikt worden door meerdere van deze modules te combineren.

De technologie zal vooral interessant zijn voor bedrijven die hun 'CO₂-voetafdruk' willen verkleinen. Dit zullen vooral bedrijven zijn met een aanzienlijke CO₂ emissie.

Omdat de technologie in zijn huidige vorm gericht is op de directe omzetting van CO₂ naar mierenzuur, en omdat de omvang van de CO₂ emissies factoren groter is dan de mierenzuur markt, is het zaak om meer toepassingen voor mierenzuur te ontwikkelen.

Net zoals waterelectrolyzers zal ook deze technologie doorontwikkeld gaan worden om de prestaties te verbeteren en de kosten te verlagen. Hiertoe zal ook elk jaar een aanzienlijke onderzoeksinspanning nodig zijn, die kennisvermeerdering en werkgelegenheid oplevert.

5. Overzicht publicaties

Vanuit dit project zijn de volgende openbare wetenschappelijke publicaties verschenen:

- High pressure electrochemical reduction of CO₂ to formic acid/formate: a comparison between bipolar membranes and cation exchange membranes, M. Ramdin et al., Ind. Eng. Chem. Res. 2019, 58, 1834-1847;
- High pressure electrochemical reduction of CO₂ to formic acid/formate: the effect of pH on the downstream separation process and economics, M. Ramdin et al. Ind. Eng. Chem. Res., (geaccepteerd voor publicatie).
- Modeling the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide to Formic Acid or Formate at Elevated Pressures, Andrew R. T. Morrison et al., Journal of The Electrochemical Society, 166 (4) E77-E86 (2019);
- Artikel in NPT Procestechologie 2017

Publieke disseminatie

- <https://www.voltachem.com/fa>
- <https://www.voltachem.com/projects/co2-utilisation-power-2-formid-acid>
- <https://www.ce.nl/publicaties/1950/indicative-ghg-balance-for-formic-acid-as-a-hydrogen-carrier-in-transport>
- <https://www.tudelft.nl/2017/tu-delft/rijden-op-co2-voltachem-schaalt-duurzame-productie-mierenzuur-op/>
- <https://www.tudelft.nl/2017/3me/process-and-energy-helpt-mee-met-opscaling-duurzame-productie-mierenzuur/>
- <https://www.technischweekblad.nl/nieuws/consortium-schaalt-mierenzuurproductie-op>
- <https://energeia.nl/nieuws/40015780/mierenzuur-de-elegante-energiedrager>

- <https://www.agro-chemie.nl/nieuws/groene-stroom-op-de-bouwplaats-met-generator-op-mierenzuur/>

6. Overige informatie

Voor meer informatie over dit project kunt u contact opnemen met onderstaande contactpersonen:

- Coval Energy
Rien van Haperen
Email: rien@covalenergy.com
Tel: +31 6 2472 2900
- TNO / VoltaChem
Erwin Giling
Email: erwin.giling@tno.nl
Tel: +31 88 866 6474
- TU Delft
Thijs Vlugt
Email: t.h.j.vlugt@tudelft.nl
Tel: +31 15 278 6734
Wiebren de Jong
Email: wiebren.dejong@tudelft.nl
Tel: +31 15 2789476
- CE Delft
Diederik Jaspers
Email: jaspers@ce.nl
Tel: +31 15 215 0150

Van dit rapport kunt u geen geprinte exemplaren bestellen.

Op verzoek kunt u via de contactpersonen een pdf-versie via email ontvangen.