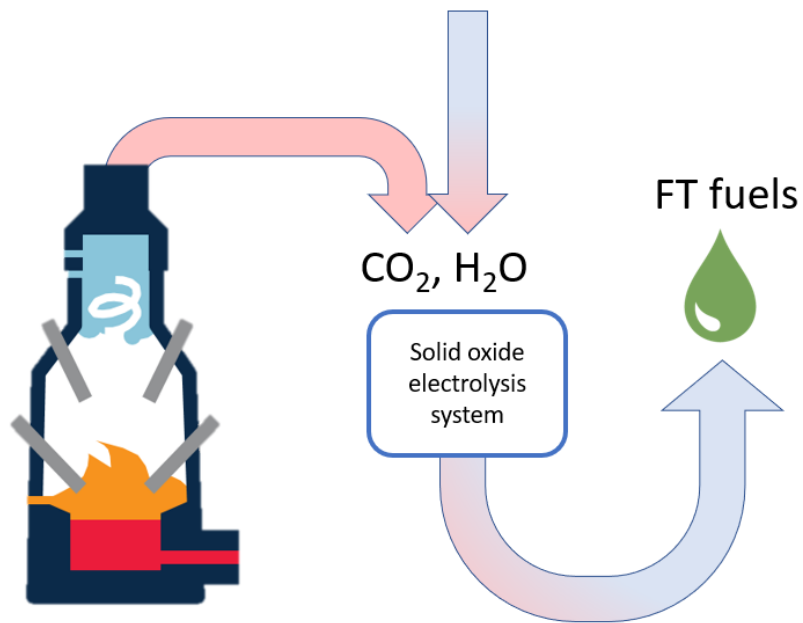


**RIJKSDIENST VOOR ONDERNEMEND
NEDERLAND**

**Regeling Nationale EZ-Subsidies
Topsector Energie Tender CCUS Pilots
RVO-referentie – TCCU218008**



CO₂ utilisatie geïntegreerd met Hlsarna: voorbereiding op demonstratie

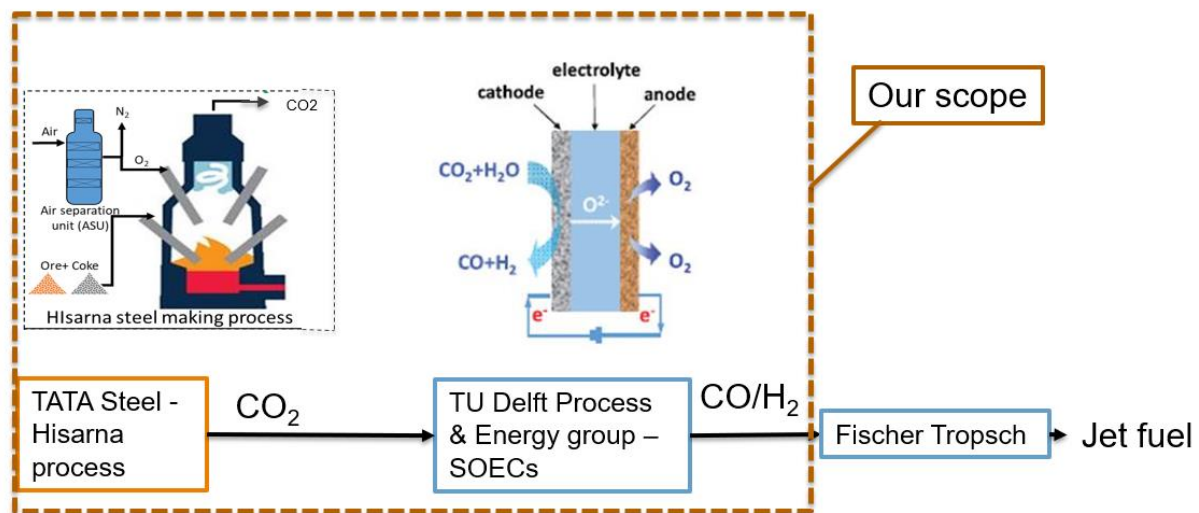
Openbare samenvatting

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

Deliverable Titel	CO ₂ utilisatie geïntegreerd met Hlsarna: voorbereiding op demonstratie	
Geschreven door	M.S. Feenstra, E.L.V. Goetheer, M.J.G. Linders (TNO) Y. Tambi, T.J.S. Wagemans, P.V. Aravind (TU Delft) L.J.P. van den Broeke (Tiello-Tech)	
Datum	30 Juni 2020	

Introductie

Het innovatieve ijzerproductieproces van HIsarna levert vloeibaar ijzer tegen aanzienlijk lagere kosten en verminderde CO₂-uitstoot. Bovendien heeft het rookgas van het HIsarna-proces een hoge temperatuur en is het een zeer geconcentreerde CO₂-gasstroom (d.w.z. >90% CO₂ op droge basis), waardoor het vrijwel direct geschikt is voor 'Carbon Capture Storage en Utilisatie' (CCS-CCU), en meer specifiek om te worden omgezet in syngas (een mengsel van waterstof H₂ en koolmonoxide CO) door middel van een vaste-oxide-elektrolyse cel (SOEC – solid oxide electrolysis cell).



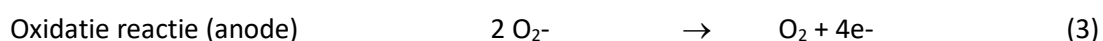
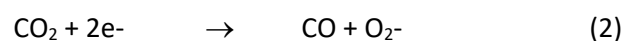
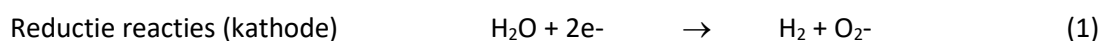
Figuur 1: Schema van het geïntegreerde proces, gebaseerd op een CO₂-afvangstap, een syngas-synthesestap met SOEC en een Fischer-Tropsch-conversiestap om vliegtuigbrandstof te produceren.

De uitdaging is om het CO₂-rijke afgas op hoge temperatuur efficiënt te integreren met de CO₂-utilisatietechnologie. De Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC) technologie zou ideaal zijn voor deze situatie, gezien de hoge bedrijfstemperaturen en gewenste producten. De SOEC-technologie produceert syngas (CO/H₂) als het belangrijkste product, dat kan worden gebruikt als grondstof voor de productie van chemicaliën of brandstof. De scope van het project is schematisch weergegeven in Figuur 1.

Co-elektrolyse en de huidige status

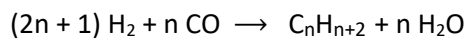
Co-elektrolyse is de gelijktijdige reductie van een mengsel van stoom (H₂O) en CO₂ om syngas te produceren. Syngas is de uitgang grondstof voor de productie van synthetische koolwaterstofbrandstoffen en is daarom van vitaal belang.

Momenteel wordt syngas geproduceerd door kolenvergassing of stoom-reforming van aardgas, maar beide processen zijn gebaseerd op fossiele brandstoffen en stoten broeikasgassen uit. Een alternatieve manier is om het stoom + CO₂-mengsel elektrochemisch te reduceren in een hoge temperatuur vast-oxide-elektrolyser (SOEC), volgens het volgende reactieschema:



Co-elektrolyse van stoom en CO₂ in elektrolyzers op hoge temperatuur is thermodynamisch voordeliger omdat een deel van de energie, naast een elektrische stroom, wordt geleverd door warmte. Hierdoor is er een lagere behoefte aan elektrische energie om de reactie(s) in een SOEC te laten verlopen. De meeste opties voor elektrolyse bij hoge temperatuur (voor elektrochemische reductie van CO₂) zijn gebaseerd op het gebruik van Solid Oxide Electrolyzers (SOE's), en de eerste elektrolyser units zijn nu op kleine schaal, in de orde van 1 tot 10 kW, commercieel verkrijgbaar. Het belangrijkste probleem met SOE is de duurzaamheid op lange termijn bij het gebruik met hoge stroomdichtheden. Er is een aanzienlijke verslechtering van de elektroden, voornamelijk aan de zijde van de brandstofelektrode, wanneer er een hoog stoomgehalte aanwezig is. Er zijn echter vele recente wetenschappelijk studies gaande om de SOE-prestaties op dit punt te verbeteren.

De conversie van syngas (CO + H₂) naar verschillende hoogwaardige producten via Fischer-Tropsch-synthese is een bewezen technologie en de zuurstof die vrijkomt bij de co-elektrolyse kan direct in het Hlsarna-proces worden gebruikt. De productie van alkanen op basis van syngas en de Fischer-Tropsch synthese vindt plaats volgens de volgende reactie:



De belangrijkste doelen van dit project zijn:

- Valideren van de geschiktheid van de afgassen van het Hlsarna-proces als grondstof voor het co-elektrolyseproces om syngas en zuurstof te produceren;
- Het ontwikkelen van een integratieschema van het elektrolyseproces (SOEC) met het Hlsarna-proces; dit houdt in een conceptueel ontwerp van een demonstratie-SOEC-eenheid;
- Het uitvoeren van een techno-economische evaluatie van het geïntegreerde Hlsarna-SOEC-proces om de economische haalbaarheid te beoordelen.
- Uitvoeren van een evaluatie hoe te komen tot een geïntegreerde Hlsarna-SOEC-demonstratie unit op pilot schaal. Deze evaluatie omvat de identificatie van technologische hiaten en risico's, techno-economische evaluatie en een ontwerp hoe de demo-installatie bij Tata er uit moet komen te zien.

Resultaten en conclusie

De belangrijkste resultaten zijn als volgt samen te vatten:

1) Een reeks van experimenten voor de co-electrolyse van CO₂ en water en voor stoom electrolyse zijn uitgevoerd in een SOEC. Voor de elektrolyse van alleen stoom is een Faradaic efficiency van rond de 90% gevonden. Wat betekent dat 90% van de energie input naar de SOEC wordt gebruikt voor de omzetting van water naar waterstof.

2) Een economische evaluatie is uitgevoerd om de kostprijs van een syngas mengsel met H₂:CO verhouding van 2:1 te bepalen op basis van co-elektrolyse van CO₂ en water. Hiervoor is een flowsheet model voor een SOEC geprogrammeerd in Aspen Plus. Met dit software model is de totale hoeveelheid energy, in kWh, bepaald om een kg syngas te maken. Op basis van deze informatie kan dan met de prijs voor de elektriciteit de kostprijs van het syngas worden vast gesteld.

3) Vervolgens is het syngas gebruikt om via Fischer-Tropsch synthese de kostprijs van vloeibare koolwaterstoffen te bepalen. Voor koolwaterstoffen in de range van C₅ tot C₂₀ is nagenoeg dezelfde verhouding van H₂:CO of 2:1 nodig. Dit betekent dat de kostprijs van een kilogram C₅ tot C₂₀ koolwaterstoffen nagenoeg onafhankelijk van het aantal C atomen (in het koolwaterstof) is. Verder wordt er een redelijk constante product verdeling verkregen voor de vier belangrijkste type producten: Natural gas liquids (C₁ - C₅), benzine (C₆ - C₁₂), diesel en kerosine (C₁₃ - C₁₉) en wax

(C20+). Voor een prijs voor de elektriciteit in de range 10 tot 40 € per MWh is de kostprijs in de range van 100 tot 200 € per barrel (van 159 L) koolwaterstoffen. Dit betekent een prijs per liter 'brandstof' van 0.6 tot 1.3 €, en dit is een factor 2 tot 4 hoger dan brandstof verkregen uit ruwe olie.

4) Een processchema voor de integratie van het rookgas van de Hlsarna en een SOE is ontworpen. Er zijn twee scenario's doorgerekend. In scenario 1 wordt het warme rookgas van de Hlsarna direct gevoed aan de SOEC, In scenario 2 wordt eerst de CO₂ uit het rookgas verwijderd, hierdoor stijgt de fractie CO₂ van 80% naar 99%. Op basis van de processchema's zijn de investeringskosten en operationele kosten voor de twee scenario's bepaald. Wanneer voor de twee scenario's alleen de processchema's t/m het syngas product wordt geëvalueerd (ofwel zonder het Fischer-Tropsch deel), is de kostprijs van het syngas in de orde van 430 tot 530 € per ton, waarbij scenario 2 iets duurder uitvalt door een extra processtap voor het reinigen van het CO₂. Om te zeggen of scenario 2 duurder uitvalt dan scenario 1 moeten echter ook de economische resultaten van Fischer-Tropsch meegenomen worden. Scenario 1 levert namelijk een verdund syngas op, wat meer kapitaal en operationele kosten met zich mee zal brengen dan scenario 2.

De ontwikkeling op het gebied van SOEC technologie bieden voldoende perspectief om op korte termijn, minder dan 5 jaar, een geïntegreerde pilot-test unit met een SOEC reactor in de orde van 100 tot 500 kWh vermogen te realiseren, en waarbij het CO₂ in het rookgas van de Hlsarna wordt gebruikt om samen met stoom syngas te produceren. De technologie voor koude gasreiniging is voldoende ontwikkeld voor toekomstige toepassingen, maar een hoge temperatuur integratie zou efficiënter zijn. Het Hlsarna rookgas komt immers vrij op hoge temperatuur en co-elektrolyse van stoom en CO₂ op hoge temperatuur is thermodynamisch voordeliger. Een deel van de energie wordt geleverd door warmte waardoor er een lagere behoefte aan elektrische energie is om de reactie(s) in een SOEC te laten verlopen. Voor de hoge temperatuur integratie van het Hlsarna proces met de solid oxide technologie zal de technologie voor hoge gas reiniging verder ontwikkeld moeten worden. Dit is een van de huidige technologische uitdagingen. Er een roadmap opgesteld met een beschrijving van de technologische uitdagingen die overwonnen moeten worden voor de integratie van de Hlsarna-demonstratiefabriek en de solid oxide technologie. De ontwikkeling voor solid oxide technologie moet gericht zijn op hoge conversies, duurzame materialen en het ontwerp van opgeschaalde systemen. Daarnaast zou een solid oxide systeem dat overeenkomt met de grootte van een Hlsarna-demonstratie-installatie, een enorme hoeveelheid elektrische energie vereisen. Het is daarom aan te bevelen om de technologie van vast oxide eerst op kleinere schaal te demonstreren dan direct te starten op de schaal van de Hlsarna-demonstratie plant.

Samenvattend, dit project toonde de technische haalbaarheid aan van de integratie van Hlsarna en de solid oxide technologie gericht op de productie van koolwaterstoffen. De eerste technische en economische evaluaties zien er veelbelovend uit, maar er zijn nog technische aandachtspunten voordat de solid oxide technologie toegepast kan worden on-site bij Tata Steel.