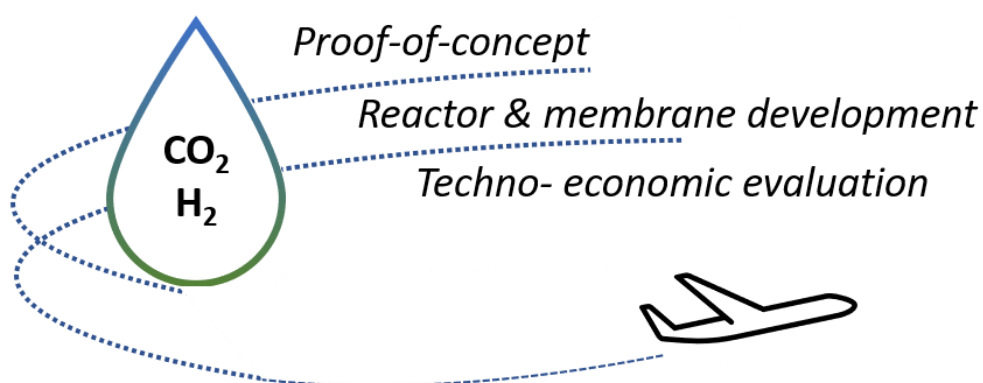


RIJKSDIENST VOOR ONDERNEMEND
NEDERLAND

Regeling Nationale EZ-Subsidies
Topsector Energie
RVO-referentie – TIND221008



**SUBLIME: SUstainable I nnovative MEmbrane reactor
for aviation fuel production**

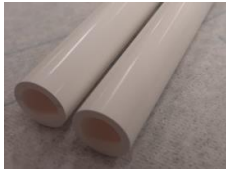
Duurzame en innovatieve membraan reactor voor
de productie van vliegtuigbrandstof

Openbare samenvatting

Met dank aan:

- 1) Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
- 2) Het project is uitgevoerd met technische en financiële ondersteuning van Shell.

Titel	Duurzame en innovatieve membraan reactor voor de productie van vliegtuigbrandstof – Openbare samenvatting
Auteurs	Lawien Zubeir, Marco Linders (TNO) Sjoerd van den Berg, Pablo Gonzalez (CoorsTek) Arasta Pourkamal, Maarten Kruis, Rene de Schutter (Bilfinger Tebodin)
Datum	24 Maart 2025

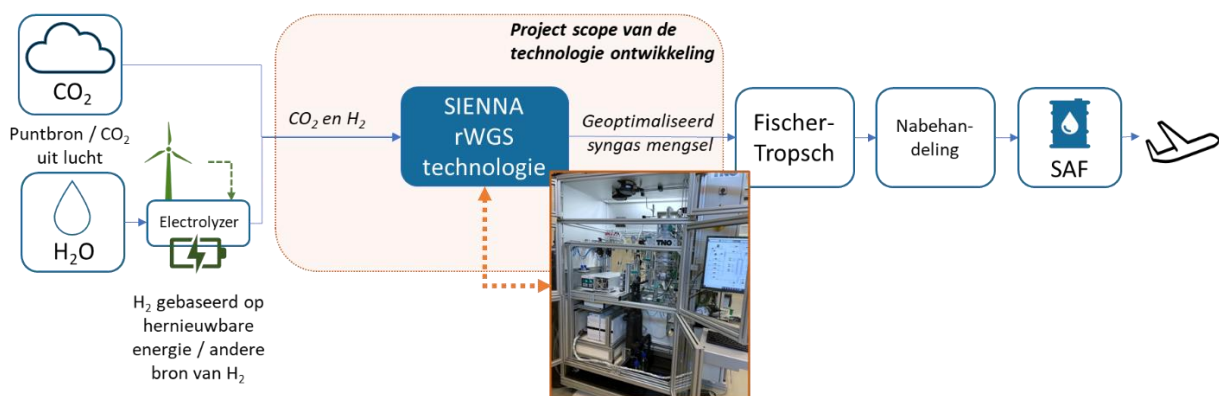


Introductie

De luchtvaart is een industrie die bijzonder moeilijk koolstofvrij te maken is, omdat ze afhankelijk is van een specifiek mengsel van koolwaterstoffen. Oplossingen zoals waterstof en batterijen, die technische oplossingen zijn voor andere sectoren, kunnen niet de enige optie zijn voor de luchtvaart vanwege de vereiste balans tussen energiedichtheid, gewicht en andere technische vereisten. Er wordt voorspeld dat de technologieën pas na 2040 zinvol zullen zijn en hoogstwaarschijnlijk voor de toepassing van korte afstanden. Om koolstofvrij te worden, vertrouwt de luchtvaartindustrie daarom op de ontwikkeling van productieroutes voor duurzame vliegtuigbrandstoffen (SAF = Sustainable Aviation Fuels). SAF kan worden gewonnen uit biobased bronnen of via een synthetische route die begint met koolstofdioxide CO_2 en groene waterstof H_2 . Vanwege de beperkte omvang van biohulpbronnen hebben synthetische routes het grootste potentieel om aan de marktvraag te voldoen. Dit project was gericht op het technisch mogelijk maken van een verbeterd synthetisch productie pad voor de productie van duurzame vliegtuigbrandstoffen. De route wordt verbeterd door de reactortechnologie voor de zogenaamde 'Reverse Water-Gas Shift Reaction' (RWGS) verder te brengen. In de RWGS-reactie wordt een mengsel van koolmonoxide CO en water gevormd vanuit CO_2 en H_2 .

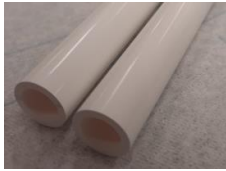
De RWGS-reactie luidt als volgt: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

De technologieketen van het productietraject van CO_2 en H_2 tot vliegtuigbrandstof wordt weergegeven in Figuur 1. Hier wordt CO_2 afgevangen van een puntbron of via een directe luchtafvangroute en kan waterstof worden geproduceerd met waterelektrolyse of via andere opties met een lage koolstofintensiteit. Deze gassen vormen de grondstof voor de RWGS-reactie, voor de productie van syngas, een mengsel van koolmonoxide CO en H_2 . Het geproduceerde syngas kan vervolgens via Fischer-Tropsch-synthese en nabewerkingsstappen worden omgezet in duurzame vliegtuigbrandstof.

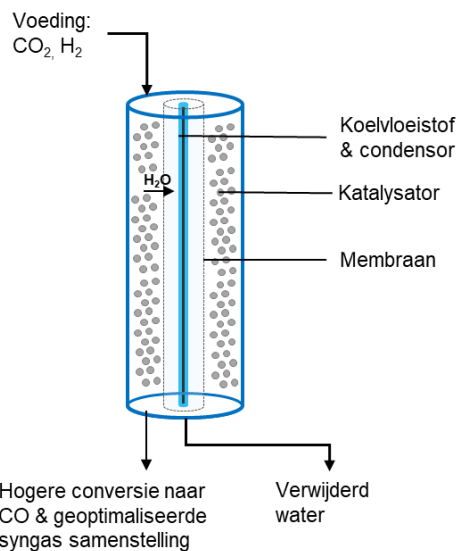


Figuur 1: Technologieketen van CO_2 en H_2 tot vliegtuigbrandstof. De technologische reikwijdte van het project is aangegeven in de figuur.

Binnen deze technologieketen is er een technologische uitdaging voor de RWGS-reactie, die in dit project is aangepakt. De reactie wordt beperkt door chemisch evenwicht. Om de CO_2 conversie naar CO te verhogen, was dit project gericht op het verbeteren van de SIENNA reactortechnologie (SIENNA



= Separation In-situ ENhanced Novel Adapted reactor). In de reactor wordt het water selectief via een membraan verwijderd en gecondenseerd op een koelelement. Volgens het principe van Le Chatelier wordt bij verwijdering van het gevormde water de omzetting gestimuleerd in de richting van meer CO-productie. Dit zal leiden tot een CO₂-omzetting die substantieel hoger is dan wat mogelijk zou zijn op basis van de evenwichtssamenstelling. Het reactor concept is weergegeven in Figuur 2 en de SIENNA reactor opstelling in Figuur 3.



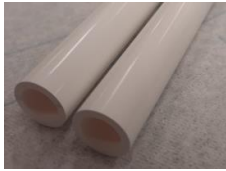
Figuur 2: SIENNA reactor concept ter verbetering van de RWGS-reactie.



Figuur 3: TNO's SIENNA reactor opstelling.

Een belangrijke prestatie-indicator is een hoge conversie naar het CO-product bij lagere temperaturen (250-350 °C): beoogd is meer dan 20% boven de standaard RWGS-evenwichtswaarde. Een dergelijke verbeterde conversie zou in grote besparingen kunnen resulteren op kapitaal- en operationele uitgaven voor de hele keten. Dit zou de algehele prestatie van de technologieketen (zoals weergegeven in figuur 1) van het omzetten van CO₂ en H₂ in vliegtuigbrandstof kunnen verbeteren.

Binnen het project werd gestreefd naar de volgende technische resultaten. Ten eerste was het de bedoeling om een proof-of-concept te realiseren voor de RWGS-reactie in de SIENNA-reactor met in-situ waterverwijdering en een verbeterde single pass conversie van ~20% bij lage temperaturen van tussen 250 en 350°C. Ten tweede is het potentieel van de innovatieve SIENNA-reactor verder onderzocht door conceptuele reactormodellering en reactoroptimalisatie. Daarnaast is een fit-for-purpose membraan van CoorsTek ontwikkeld om experimentele proof-of-concept-activiteiten te ondersteunen. Tot slot is het toekomstige potentieel van de technologie geëvalueerd in een technoeconomische evaluatie.



Resultaten

Katalysator

De RWGS-reactie is sterk afhankelijk van de temperatuur. Bij hogere temperaturen ($\sim 700^\circ\text{C}$) verschuift het evenwicht naar de vorming van CO en H_2 , omdat de reactie licht endotherm is. Dit betekent dat de efficiëntie van de RWGS-reactie toeneemt met de temperatuur, wat essentieel is voor industriële toepassingen. In dit project heeft partner Shell een katalysator geleverd die actief is bij lage temperaturen ($250\text{--}350^\circ\text{C}$). In dit project werd deze katalysator getest in een labschaal gepakt bed en in de SIENNA reactor. In beide gevallen is bewezen dat de gekozen hoeveelheid katalysator voldoende actief is bij 250°C om de ingestelde gasstroom en -compositie naar evenwicht te brengen (oftewel, het proces was niet kinetisch gelimiteerd).

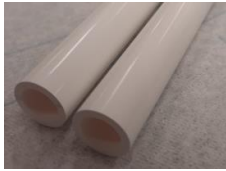
Membranen

Volledig keramische membranen met verschillende poriediameters en samenstelling zijn binnen de doelstelling van dit project gemaakt en geleverd door CoorsTek voor functionele testen in de Reverse Water-Gas Shift (RWGS) reactor. In de eerste levering zijn samples gemaakt met 3 verschillende gemiddelde porie-diameters: 100 nm, 40nm en 20 nm. Aangezien er binnen de applicatie behoefte was aan een kleinere poriediameter is er in 3 stappen gewerkt aan een volledig keramisch membraan. In deze oplossing is de laatste laag gemaakt in TiO_2 met een poriediameter van 3-5 nm. Ten behoeve van dit project, zijn er 10 membranen geleverd. Alle geteste membranen vertoonden uitstekende kwaliteit en hebben met succes de laboratoriumexperimenten doorstaan, zonder tekenen van degradatie of structurele schade. Dit bevestigt de robuustheid en geschiktheid van de door CoorsTek geleverde membranen. In toekomstig werk zijn er mogelijkheden om de ontwikkelde membraanconfiguratie verder te optimaliseren om selectief water te verwijderen door bijvoorbeeld de poriegrootte nog verder te terug te brengen.

Daarnaast zijn een aantal niet-poreuze membranen getest die door TNO zijn ontwikkeld. Deze zijn voorzien van een polymeerlaagje van polyimide met verschillende diktes. Deze werken niet enkel als moleculaire zeef, maar verwijderen water op basis van affiniteit. Polyimide staat bekend om zijn chemische en temperatuurbestendigheid onder de experimentele condities.

SIENNA testen

De experimenten voor de synthese van syngas in SIENNA zijn uitgevoerd met de door partners geleverde componenten, i.e. membranen van CoorsTek en katalysator van Shell. De reproduceerbaarheid van de testen liet zien dat de componenten geschikt zijn voor de testen in het SIENNA concept. Echter, door de geringe hoeveelheid water die ontstaat onder de geteste omstandigheden, heeft de verwijdering niet geleid tot een significante verhoging van de CO-productie. Om het proof-of-principle van het SIENNA concept te bewijzen, zijn gesimuleerde experimenten uitgevoerd met lege reactor en een voeding dat overeenkwam met de compositie zoals verwacht wordt bij het bereiken van het evenwicht. In deze experimenten is duidelijk bewezen dat een groot deel van het water door het membraan heen gaat en condenseert aan het oppervlak van het koelelement. Met andere woorden een meer open reactor structuur zal helpen bij het verhogen van de massatransport. Dit heeft te maken met het feit dat



verschillende tijdschalen een belangrijke rol spelen bij de efficiëntie van de reactor, zoals convectieve stroming, reactiesnelheden, axiale diffusie van de producten naar het membraan, en diffusie van de condenseerbare stoffen door het membraan. De laatste twee zijn experimenteel bewezen en ook door het model voorspeld dat deze de grootste impact op de massaoverdracht hebben. Daarom moet de leegtefractie van het bed aanzienlijk worden vergroot door gebruik te maken van een opener bed, d.w.z. een hogere leegtefractie naast het gebruik van dunnere en meer selectieve membranen. Naast het reactormodel zou Computational Fluid Dynamics (CFD) in vervolgwerk kunnen worden gebruikt voor een dieper begrip van de stromingsdynamiek binnen het reactorbed. De modellering zal de verbeterde massaoverdracht van dampen in het reactorbed naar het membraan kwantificeren.

Conclusie

Voor de synthese van syngas zijn in de SIENNA reactor experimenten uitgevoerd met de door partners geleverde componenten, i.e. membranen van CoorsTek en katalysator van Shell. De verwijdering van water heeft, onder de geteste condities met de toegepaste materialen, niet geleid tot een significante verhoging van de CO-productie. In een meer open reactor structuur kan een hogere gas voeding stroom worden gedoseerd waarvan verwacht wordt dat het kan resulteren in een hogere CO en water synthese. Bovendien zal een gestructureerd reactorbed zorgen voor een betere vermenging van de gassen. Hierdoor zal de massatransport van water naar het membraanoppervlak niet enkel door diffusie plaatsvinden, maar ook door convectie. Dit in combinatie met een selectievere membraan zal ervoor zorgen dat de waterverwijdering beter gefaciliteerd wordt en gescheiden van het reactiemengsel. In dat geval zal de CO-productie verhoogd worden.

Vervolg

Er zijn een aantal mogelijkheden om de SIENNA technologie verder te ontwikkelen:

- Uiterlijk 1 april 2025 wordt een voorstel ingediend bij het nationale Groeifonds Groenvermogen. Met geïnteresseerde partijen wordt gesproken of waterverwijdering middels SIENNA technologie onderdeel kan worden van het programma (dit betreft het zogenaamde WP4).
- Er zijn een tweetal voorstellen ingediend (januari 2025) in het Europese Horizon programma waarin beoogd wordt de SIENNA technologie verder op te schalen.