



# OPENBAAR EINDRAPPORT, POWER TO CLEAN GAS, DEI419001

Robert Makkus

HYG-PCG-RP.006



| <b>REPORT</b>         |   |
|-----------------------|---|
| Title                 | Openbaar Eindrapport, Power to Clean Gas, DEI419001 |
| Document number       | HYG-PCG-RP.006                                      |
| Issue                 | 1   |
| Date                  | 5-3-2021  |
| Internal distribution |   |
| External distribution | RVO   |
| Page / Annexes        | 3 /   |

| <b>NAME</b> |               | <b>FUNCTION</b> | <b>DATE</b> | <b>SIGNATURE</b> |
|-------------|---------------|-----------------|-------------|------------------|
| Author(s)   | Robert Makkus | Project Manager | 5-3-2021    |                  |

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

Het rapport is te verkrijgen bij HyGear BV.

| <b>CHANGE RECORD</b> |          |       |                              |
|----------------------|----------|-------|------------------------------|
| Issue                | Date     | Pages | Description of modifications |
| 1                    | 5-3-2021 |       | Original issue               |
|                      |          |       |                              |
|                      |          |       |                              |

## Inhoud

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Samenvatting.....                 | 4 |
| 1 Inleiding .....                 | 5 |
| 2 Doelstelling en werkwijze ..... | 6 |
| 2.1 Doelstelling.....             | 6 |
| 2.2 Werkwijze.....                | 6 |
| 3 Resultaten.....                 | 7 |
| 4 Discussie.....                  | 8 |
| 5 Conclusie en aanbevelingen..... | 9 |

## Samenvatting

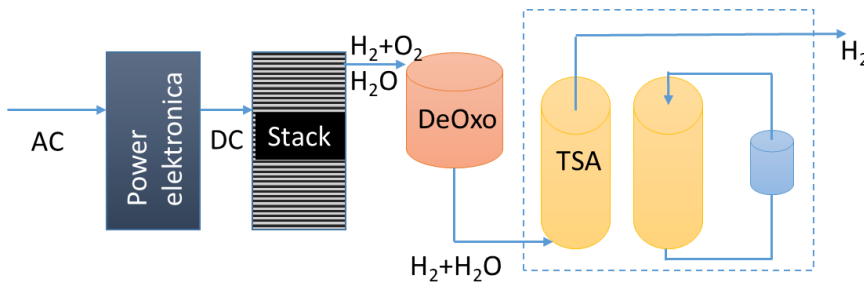
Een prototype electrolysersysteem gebaseerd op PEM-technologie is ontworpen, gebouwd en getest. Op basis van de resultaten is een ontwerp gemaakt van een 1 MW-systeem. Doel van het project is om na te gaan of PSA-technologie als nazuiveringstap om automotive grade waterstof te produceren vergelijkbaar is met een DeOxo dryer combinatie. Uit de resultaten en simulaties blijkt dat de opbrengst bij gebruik van een PSA afhankelijk is van de druk waarop de electrolyser de waterstof produceert. Bij een bedrijfsdruk van rond de 7 bar is de gebruik van een PSA vergelijkbaar met toepassing van een single-stage DeOxo-dryer systeem. Bij een hoge druk, 40 bar of bij gebruik van een vacuümstap, is de opbrengst vergelijkbaar met een closed-loop Deoxo-dryer system. Echter, de kosten van een closed-loop DeOxo-dryer zijn 40% hoger dan een (V)PSA oplossing. Wanneer rendement belangrijk is, zal de keuze gemaakt worden voor gebruik van een DeOxo-TSA. Voor een lage CAPEX is een (V)PSA oplossing aan te bevelen, waarbij aangemerkt moet worden dat een verhoging van stackdruk aan te bevelen is. Voor de omzetting van overtollige hernieuwbare elektriciteit waarbij CAPEX een relatief grotere rol speelt, kan een VPSA zuiveringsstap economische het meest interessant zijn.

De modelsimulaties van het 1 MW systeem tonen aan dat de stroomdichtheid een groot effect heeft op de benodigde energie per hoeveelheid waterstof.

# 1 Inleiding

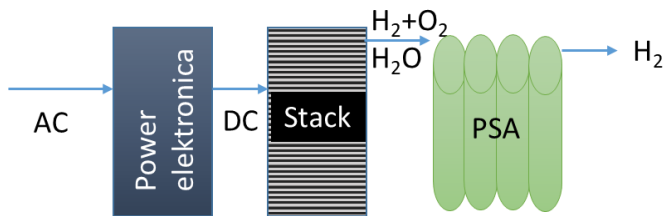
Waterstof kan op meerdere manieren worden verkregen, onder andere uit aardgas en groene methaan middels stoom methaan reforming reactie, of via elektrolyse uit water en elektrische energie.

Bij de productie van waterstof uit elektrolyse is deze vervuild met sporen zuurstof en waterdamp. Waterstof voor energietoepassingen vereist echter een zeer hoge zuiverheid en deze componenten moeten worden verwijderd. In huidige elektrolysesystemen wordt dit gedaan door allereerst het zuurstof te verwijderen door het met waterstof te laten reageren tot water met behulp een dure edelmetaalgedragen DeOxo-katalysator. In een tweede stap wordt het gas gedroogd door middel van Temperature Swing Adsorption technologie, TSA. In een TSA systeem adsorbeert water in een eerste fase van de cyclus aan een adsorbens in een reactor, waarbij droog waterstof de reactor verlaat; in de tweede (regeneratie) fase wordt de reactor verhit en desorbeert het water. Figuur 1 laat een basisschema zien van een elektrolyse systeem. De zuiveringsonderdelen kunnen oplopen tot 15-20% van de kostprijs voor het totale systeem. De prijs van edelmetaal is de afgelopen jaren sterk gestegen (+140%) en verwacht wordt dat in de toekomst dit verder zal stijgen. Hierdoor zullen de kosten voor het DeOxo-systeem nog verder oplopen.



**Figuur 1, Basiscomponenten van huidige elektrolyse-systemen**

Omdat met de huidige elektrolysesystemen het waterstof op druk geproduceerd kan worden, is de mogelijkheid ontstaan om het waterstof te zuiveren doormiddel van Pressure Swing Adsorptie (PSA). Het grote voordeel van deze technologie is dat deze in één stap alle onzuiverheden verwijderd zonder gebruik te maken van dure edelmetalen (Figuur 2).



**Figuur 2, Basiscomponenten van het Power to Clean Gas-systeem**

## 2 Doelstelling en werkwijze

### 2.1 Doelstelling

De doelstelling van het Power to Clean Gas project is om de kostprijs van hernieuwbare waterstof uit elektriciteit te verlagen. Hiervoor is het noodzakelijk dat de kostprijs van een elektrolyser-systeem te verlagen bij gelijkblijvend rendement. Een hoge druk elektrolyser-stack zal gekoppeld worden met een PSA-zuiveringsstap. Hierdoor kunnen de kosten van het totale elektrolyser-systeem gereduceerd worden met 8-10%, alsmede de afhankelijkheid van het kostbare palladium voor de De-oxo reactor. Een additioneel voordeel van het gebruik van een PSA als zuiveringsstap is dat de grootte (*footprint*) van het systeem sterk afneemt wat de toepasbaarheid in huidige infrastructuur sterk vereenvoudigd.

Binnen het project wordt op representatieve schaal (50kWe) een pilotsysteem ontwikkeld en getest. De resultaten uit de pilot zullen gebruikt worden om een commercieel toepasbare elektrolyser op MW-schaal te ontwerpen.

### 2.2 Werkwijze

De focus binnen het project ligt op het ontwerpen, bouwen en testen van een hoge druk elektrolyser en PSA-zuivering van het productgas. De resultaten van deze activiteiten worden gebruikt voor het ontwerpen van een commercieel elektrolyzersysteem van ten minste 1MW. Het Power to Clean Gas project is verdeeld in 3 fasen:

- 1) Technology Readiness fase  
In deze voorbereidende fase zijn de systeem- en module-eisen van de verschillende modules bijeengebracht. Alle componenteigenschappen zijn in een warmte/stof-balansmodel gekoppeld. Hiermee is het totale systeem ontworpen met het oog op kosten en bedieningsgemak.
- 2) Ontwikkeling en testen van representatieve schaalgrootte van elektrolyser-systeem op de waterstoffabriek in Arnhem  
In deze fase is in meerdere stappen het prototypesysteem ontwikkeld en gebouwd om vervolgens in een reële omgeving getest te worden.
- 3) Ontwerpen van een low-cost MW-schaal elektrolyser  
De resultaten van de voorgaande fasen zijn gebruikt om een ontwerp te maken van een MW-elektrolyser systeem.

### 3 Resultaten

#### *Ontwerpfase*

Een elektrolysesysteem bestaat voornamelijk uit vier grote bouwstenen: watertoevoer; electrolyser stack; vermogenslektronica (AC-DC converter); gasbehandeling.

De ontwerpfase van het systeem is in meerdere stappen gedaan. In de eerste stap is het zogeheten Process Flow Diagram (PFD), gevolgd door verdere detaillering in de vorm van een Piping en Instrumentation Diagram (P&ID) en vervolgens een 3D ontwerp van het totale systeem met mechanische ontwerpen van verschillende maakcomponenten.

Tijdens de PFD fase zijn verschillende opties voor de watertoevoer, warmteverwijdering en controle op de geleidbaarheid van het proceswater geanalyseerd.

Het PFD is omgezet naar een P&ID, componenten zijn geselecteerd en aangeschaft. Een aantal componenten zijn door HyGear ontworpen.

Het ontwerp is geanalyseerd op veiligheid en bedrijfsvoering door middel van een HAZOP analyse. Aan de zuurstofzijde van het systeem zijn speciaal gereinigde componenten toegepast om vetten en olie te verwijderen. Opstart en bedrijfsprocedures zijn ontworpen.

#### *Testfase*

De eerste stap in het testen van het systeem bestond uit een uitgebreide veiligheidsinspectie waarbij onder andere druk- en lektesten zijn uitgevoerd.

Het systeem is in de tweede stap langzaam opgewarmd tot de inlaattemperatuur 60 °C was. Vervolgens de stack gekarakteriseerd door een stroom en spanningskarakteristiek op te nemen.

Het systeem is bedreven op zijn nominaal stroom en is de PSA aan het systeem gekoppeld en de opbrengst bepaald bij een dauwpunt van het productgas van -80 °C.

De resultaten komen overeen met modelberekeningen.

#### *Ontwerp 1 MW systeem*

Op basis van de resultaten van de voorgaande activiteiten is een 1 MW systeem ontworpen, en gemodelleerd met de volgende doelen:

- om de overall efficiëntie van een volledig systeem dat 150 Nm<sup>3</sup>/u waterstof produceert te bepalen,
- om inzicht te krijgen in benodigde componenten, utility en elektrisch vermogen.

Vijf verschillende scenario's (A tot E) zijn geanalyseerd. Twee verschillende stroomdichtheden, A, B, C, en E versus D, opbrengst PSA, en manier van koelen.

Uit de analyses blijkt dat voornamelijk het opgenomen vermogen door de electrolyser stack de efficiëntie van het systeem bepaald, scenario C en D. Een lagere stroomdichtheid in scenario D resulteert in een lagere stackspanning en dus lager benodigd vermogen. De keerzijde is dat de stack groter is, en dus ongeveer tweemaal zo duur is.

## 4 Discussie

De doelstelling van het project was om na te gaan of PSA technologie een goedkoper alternatief is voor het zuiveren en drogen van waterstof afkomstig uit een electrolyser. Een TSA-systeem gecombineerd met een de-oxo reactor om zuurstof te verwijderen kan in principe een waterstofopbrengst hebben van bijna 100%. De experimentele resultaten en modelberekeningen geven aan dat voor een PSA de opbrengst sterk afhankelijk is van de druk. Bij lage druk is de opbrengst vergelijkbaar met een single-stage De-oxo/TSA systeem; bij hoge druk is de opbrengst van een PSA hoger, maar iets lager dan een closed loop De-oxo/TSA systeem.

Op PEM-gebaseerde electrolyzers hebben het voordeel dat ze op hoge druk en bij hoge stroomdichtheden kunnen worden bedreven. Echter, een hoge stroomdichtheid gaat ten koste efficiëntie, waardoor het verschil in energie nodig om waterstof te maken ongeveer 1 kWh/Nm<sup>3</sup> verschillen tussen deellast en vollast.



## 5 Conclusie en aanbevelingen

Een prototype electrolysesysteem is gebouwd dat ongeveer 10 Nm<sup>3</sup>/u waterstof kan produceren. Alhoewel een electrolysersysteem in de basis eenvoudig is, zijn er meerdere belangrijke ontwerpaspecten, drukregeling aan de waterzijde, zuurstofafscheiding uit de waterloop en veiligheidsaspecten zoals de aanwezigheid van zuivere zuurstof op druk en mogelijke vermenging van waterstof en zuurstof.

De studie heeft aangetoond dat bij bedrijf op een relatief lage druk de opbrengst van de PSA vergelijkbaar is met een single-stage DeOxo/TSA. Bij verhogen van de waterstofdruk en/of bij toevoeging van een vacuüm stap (VPSA) kan het zuiveringsrendement van een PSA-module verder toenemen. Een closed-loop DeOxo-dryer heeft een marginaal hoger zuiveringsrendement.

De kosten van een closed-loop DeOxo-dryer zijn echter 40% hoger dan een (V)PSA oplossing. Wanneer rendement belangrijk is, zal de keuze gemaakt worden voor gebruik van een DeOxo-TSA. Voor een lage CAPEX is een (V)PSA oplossing aan te bevelen, waarbij aangemerkt moet worden dat een verhoging van stackdruk aan te bevelen is. Voor de omzetting van overtollige hernieuwbare elektriciteit waarbij CAPEX een relatief grotere rol speelt, kan een VPSA zuiveringsstap economische het meest ideaal zijn.

Als aanbeveling wordt voorgesteld een vervolgproject te definiëren, waarbij een TSA en PSA op 40 bar gekoppeld aan het electrolysersysteem worden getest. Daarbij dient dan ook verder de effecten van deellast en vollast bedrijf te worden geanalyseerd.

De opgedane kennis zal verder worden ingezet bij de verdere productontwikkeling bij HyGear op het gebied van elektrolyse.