

AH₂PD-biogastechnologie als troef in de energietransitie

August Rodermans (Pandam.me), Kirsten Zagt (Bareau BV), Gert Jan Euverink (Rijksuniversiteit Groningen)

Met een verbruik van 40 miljard kubieke meter per jaar voorziet aardgas Nederland momenteel in 45 procent van zijn totale energiebehoefte. Met AH₂PD, een autogeneratieve hogedrukvergister met waterstofdosing, kan uit rioolslib en organische-afvalstromen in één stap schoon biogas worden geproduceerd. AH₂PD heeft bovendien een zeer interessante batterijfunctie; uit wind en zon geproduceerde energie kan efficiënt worden omgezet en opgeslagen in methaan, voor gebruik op een later tijdstip. AH₂PD-technologie biedt een businesscase die het behalen van de Nederlandse klimaatdoelstellingen economisch aantrekkelijk maakt.

Autogenerative High-Pressure Digestion (AHPD) is een tweede-generatie gistingstechnologie die gebruik maakt van biologische drukopbouw en waarmee in één stap biogas van aardgas-kwaliteit kan worden geproduceerd. Dit biogas kan zonder nabewerking direct in het bestaande gasnet worden geïnjecteerd. Bareau BV heeft de technologie, in samenwerking met de TU Delft, Wageningen UR en Rijksuniversiteit Groningen, in een proeffabriek getest, doorontwikkeld en verfijnd. Hieruit is een aantal octrooien ontstaan. In 2030 zou twee miljard kubieke meter groen gas kunnen worden geproduceerd.

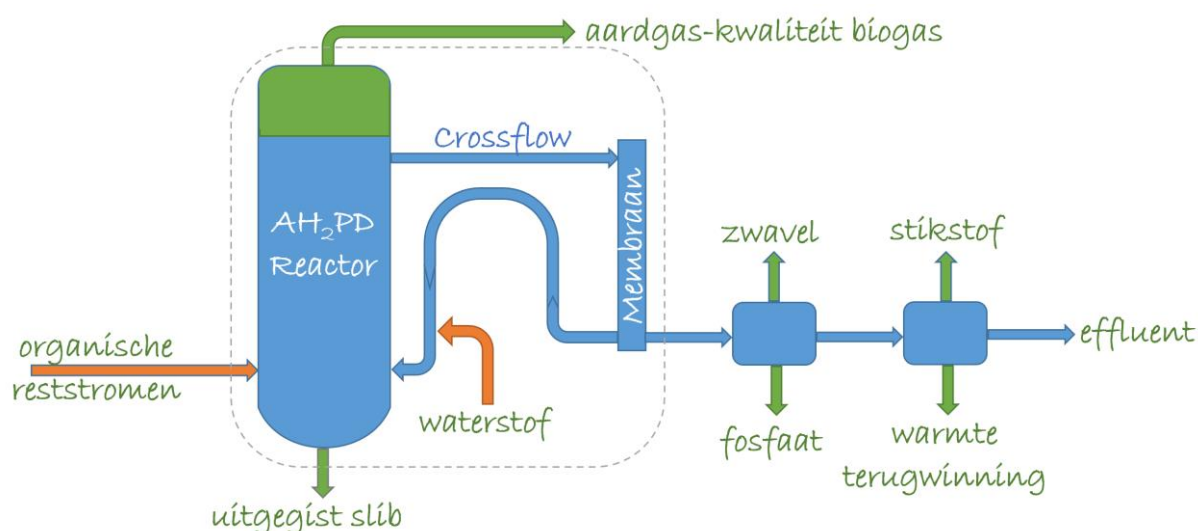
In het AHPD-proces zetten barofiele (drukminnende) bacteriën, door middel van anaerobe omzetting, organische afvalstromen (zoals zuiveringsslib en organisch keukenafval) om in biogas. Daarbij wordt zonder gebruik te maken van pompen (autogeneratief) een hoge druk opgebouwd van ongeveer 20 bar. Dit gebeurt in een continue anaerobe membraan-bioreactor (An-MBR) bij een temperatuur tussen 34°C en 60°C. Het membraan-gebaseerde scheidingssysteem (crossflow) is voorzien van een harenfilter en keramische filtratie. De membranen zijn voorzien van een gepatenteerd schoonmaaksysteem om verstopping van de membranen te voorkomen, waarbij een deel van de reactorinhoud ook wordt verwijderd. Vanwege de verregaande afbraak van organisch materiaal in de reactor treedt nauwelijks biofouling van de membranen op; scaling gebeurt ook niet omdat de calcium-, magnesium- en fosfaat-zouten pas neerslaan als de opgeloste zure gassen ontsnappen, doordat de druk in het permeaat wordt verlaagd. Dit gebeurt geheel los van het biologische proces en buiten de AHPD-drukreactor.

Proceseigenschappen

Wanneer RWZI-slib als substraat wordt gebruikt, kan een hogere druk dan 20 bar leiden tot koolstofdioxidevergiftiging, doordat de partiële CO₂-spanning stijgt tot boven de kritieke waarde van ongeveer 2,3 bar. Bij voeding met zuiveringsslib vindt het AHPD-proces plaats bij een pH van rond 6,5. Er vindt dan een iets tragere methanogenese plaats dan in conventionele gistingen, terwijl er wat meer vetzuren worden gevormd. Dit wordt gecompenseerd door de hogere netto gasopbrengst, de hoge methaanconcentratie en de verregaande slibafbraak, vooral met de AH₂PD-variant waarbij waterstof wordt gedoseerd. Wanneer het proces bij de juiste temperatuur wordt uitgevoerd is zonder dosering van waterstof een methaangehalte van 90% haalbaar, mits substraten worden gedoseerd die naast koolhydraten ook ammoniak bevatten. Dit kan afvalwater zijn of zuiveringsslib,

organisch keukenafval of varkensmest. Het hoge methaangehalte ontstaat als gevolg van een combinatie van de wet van Henry [1] plus de vorming van onder andere ammoniakcomplexen in het proces, zoals carbamaat en ureum. Zonder deze complexvorming is bij 20 bar, afhankelijk van de temperatuur, een methaangehalte van maximaal 82% haalbaar.

Het energiegebruik van het AHPD-proces is lager dan dat van alle conventionele processen die gericht zijn op de productie van groen gas uit zuiveringsslib. Om het proces aan te drijven, methaan en koolstofdioxide te scheiden, water door het ultrafiltratiemembraan te persen, gas in het gasnet te injecteren, fosfaat terug te winnen en (zo nodig) slib uit te persen, wordt immers de autogeneratief opgebouwde hoge druk gebruikt. Opwaardering van biogas is niet meer nodig, zodat ook de benodigde investering lager is dan die voor een gecombineerde gisting/biogas-opwerkingsinstallatie.



Afbeelding 1. Vereenvoudigd AH₂PD-processchema

Doorbraak: doseren waterstof

Als (groene) waterstof wordt gedoseerd in de AHPD-reactoren (zie afbeelding 1) noemen we dit proces AH₂PD. Uit onderzoek blijkt dat het methaangehalte van het geproduceerde groen gas in batchmodus kan worden opgevoerd tot 95% of hoger. Waterstof lost snel op in de reactorvloeistof en wordt daarna actief biologisch opgenomen. De opname van koolstofdioxide is concentratieafhankelijk en diffusie-gelimiteerd en bepaalt de processnelheid van het AH₂PD-proces volgens de Bio-Sabatier-reactie: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{energie}$.

Door waterstofdosering worden aanvankelijk geproduceerde vetzuren via acetaat omgezet in CH₄ + CO₂, neemt de verhouding van de vluchtige organische zuren en de buffercapaciteit af (waardoor de vergister robuuster gaat draaien) en stijgt de pH van 6,5 naar 7,2. Vervolgens wordt het nieuw opgeloste koolstofdioxide ook met waterstof omgezet in methaan. Als gevolg van de gestegen pH gaat de methanogenesesnelheid omhoog. Dat leidt tot een hogere methaanopbrengst en een hogere methaanconcentratie in het productiegas.

De fysisch-chemische omstandigheden in een AHPD-systeem zijn bij uitstek geschikt voor de productie van groen gas. Onder druk lost, volgens de wet van Henry, veel meer koolstofdioxide dan methaan op in de waterfase. Er wordt daardoor een hoge methaanconcentratie bereikt in de gasfase. Bovendien ontstaat als gevolg van de opslag van CO₂, koolzuur, in de waterfase en daardoor een hoge buffercapaciteit. Het systeem is hierdoor minder gevoelig voor verzuring door de gevormde

vetzuren en/of wisselende belastingen. Omdat koolzuur een zwak zuur is, stabiliseert de pH rond de 6,5. Dit ligt binnen de acceptabele bandbreedte voor anaerobe slibgisting. Bij AHPD ontstaan meer vetzuren zonder dat verzuring plaatsvindt. Een verhouding tussen vluchtige organische zuren en totale anorganische koolstof (FOS/TAC-verhouding) van 1,2 (zonder waterstofdosering) is geen uitzondering. Mogelijk kan dit verschijnsel worden toegepast om vetzuren te produceren. Het permeaat van de crossflowmembranen van de AHPD-reactor ruikt als uitgegist slib, lijkt op bier – ook qua productieproces – en bevat opgeloste koolstofdioxide, bicarbonaat, waterstofsulfide, methaan, fosfaat, ammonium en andere zouten. Zodra de druk van het permeaat is gereduceerd, ontsnappen de opgeloste gassen en stijgt de pH naar die van de resultante van het koolzuur- en ammoniakevenwicht. Bij een typische ammoniakconcentratie van 1.200 mg N/L is de pH van het AHPD-permeaat na ontgassing ongeveer 8,2. Bij deze pH is de oplosbaarheid van fosfaat-zouten zeer laag en ontstaan er verschillende fosfaatkristallen. Op deze manier kunnen spontaan calcium- en ijzerfosfaatkristallen worden teruggewonnen. Normaal gesproken is dit een derde tot de helft van de fosfaatvrucht en daarbij vindt derhalve ook een gedeeltelijke ontzouting van het permeaat plaats. Maximale defosfatering met een rendement van 90% of meer is goedkoop te bewerkstelligen door na de drukval in het permeaat calcium- of magnesiumchloride te doseren. Net als in een conventionele gisting zullen de zware-metaalsulfiden worden geabsorbeerd aan het biologische slib in de reactor. Ophoping daarvan kan worden voorkomen door kleine hoeveelheden surplusslib af te tappen. In de AHPD-reactor zijn bij een pH van 6,5 al carbonaten en sulfides neergeslagen.

Biogas van aardgas-kwaliteit

De afgelopen jaren hebben proefinstallaties laten zien dat met behulp van AH₂PD stabiel gas kan worden geproduceerd, volgens de specificaties van de gaswet (89–95% methaan) en dus van dezelfde kwaliteit als aardgas, en dat meer dan 99,5 procent van het waterstof wordt omgezet. Ook is uitvoerig getest op piekdosering. Daarmee lijkt AH₂PD uitmuntend geschikt voor grootschalige chemische energieopslag via waterstofproductie uit piekstroom. Zonder waterstofdosering is de methaanconcentratie 85% (bij 20 bar en 56°C). Bij hoge waterstofdosering is de methaanconcentratie in het primaire gas 94% en de koolstofdioxide concentratie 6%. Andere gassen zijn in veel lagere concentraties aanwezig. Zonder waterstofdosering ligt de pH rond 6,5 en met waterstofdosering rond 7,2.

Maximale methaanproductie

Naast waterstof kan ook extra koolstofdioxide worden gedoseerd, wat het afbreken van aanwezige vetzuren stimuleert (meer dan drie kwart van de vetzuren wordt afgebroken). Door de pH-stijging gaat de snelheid waarmee de micro-organismen waterstof en CO₂ omzetten in methaan volgens de modellen omhoog, zodat ook minder ophoping van vetzuren optreedt. Ook wordt er bij dosering van waterstof (en eventueel CO₂) nog meer droge stof afgebroken; er wordt een inhaalslag gemaakt. Deze proeven duiden op een specifieke methaanproductie van 1,14 Normaal-kubieke meter (Nm³) CH₄ per kg organische droge stof (ODS) zonder waterstofdosering en 3,7 Nm³ CH₄/kg aangevoerde ODS met waterstofdosering. De gasproductie van AHPD (zonder waterstof) is vanwege de grotere slibafbraak en de mindere verliezen aanzienlijk hoger dan die van een conventionele gisting (normaliter 0,2 tot 0,5 Nm³ biogas/kg ODS), die bovendien gas van lagere kwaliteit (circa 60% methaan) produceert. Door waterstofdosering conform het AH₂PD-proces kan de groengasproductie

derhalve met een factor van $3,7/1,14 = 2,5$ worden verhoogd, omdat minder vetzuren achterblijven, de methaanproductiesnelheid stijgt en er tevens meer slib wordt afgebroken.

In de fabriek resulteert 2,8 liter H₂ in 1 liter extra CH₄, terwijl een verhouding van 4:1 eerder in de lijn der verwachting lag. Het verschil wordt veroorzaakt door de afbraak van slib en vetzuren, minus de groei van waterstof-consumerende bacteriën. Er wordt AH₂PD met een waterstofspanning tussen de 300 en 1.500 ppm gebruikt, ruim onder de maximale waarde voor injectie in het gasdistributienet (0,5% = 5.000 ppm). De mogelijkheid om waterstof in pieken te injecteren (*electricity peak-shaving*) in plaats van continue dosering, en zodoende de bioreactor als stabilisator van het stroomnet te laten fungeren, is dus zeker aanwezig.

Circulair grondstoffengebruik

Hogere slibafbraak

Volgens de berekeningen zorgt 1 kg waterstof voor de extra afbraak van 77 kg DS secundair slib, waarbij tevens 3,93 Nm³ methaan vrijkomt. Als slibverwerking van 1000 kg DS €350 kost en biomethaan €1 per Nm³ oplevert, mag 1 kg waterstof dus $77 \times 350/1000 + 3,93 = €27/\text{kg}$ kosten; dat is een goede businesscase.

Recyclen fosfaten

Aan het permeaat kan eenvoudig een afgestemde hoeveelheid calciumchloride worden toegevoegd, waardoor er een fosfaatverwijdering van 90% wordt gerealiseerd. Deze gekristalliseerde fosfaatstroom lijkt geschikt om lokaal te kunnen worden hergebruikt als meststof.

De dosering van waterstof kan economisch rendabel worden uitgevoerd wanneer wordt gekozen voor *peak-shaving* van duurzame energiebronnen. In die situatie zijn de kosten van groene stroom laag, waardoor ook de kosten voor groene waterstof lager zijn dan in continubedrijf.

Voor de businesscase is het voordelig om waterstof te doseren, omdat er meer groengas wordt geproduceerd en minder slib overblijft. Dit maakt het AH₂PD-proces interessant voor zowel de gas/energiesector als de waterschappen. Dat hangt uiteraard mede af van de mate van extra productie van groengas en de kostprijs van het waterstof.

Energetische efficiëntie

Als de zon hard schijnt of de wind hard waait, is de vraag naar elektriciteit regelmatig lager dan de productie. Deze elektriciteit gaat nu verloren omdat elektriciteit moeilijk grootschalig kan worden opgeslagen. Door nu deze overcapaciteit (pieken) in elektriciteit productie te gebruiken kan met elektrolyse waterstof worden gemaakt, die met het AH₂PD-proces wordt omgezet in methaan. Elektriciteit kan zodoende goedkoop worden opgeslagen in het aardgasnetwerk in de vorm van methaan. Zie tabel 1 voor een vergelijking van de opties voor energieopslag in waterstof, methaan en lithium-ionbatterijen.

Tabel 1. Vergelijking energieopslagmogelijkheden

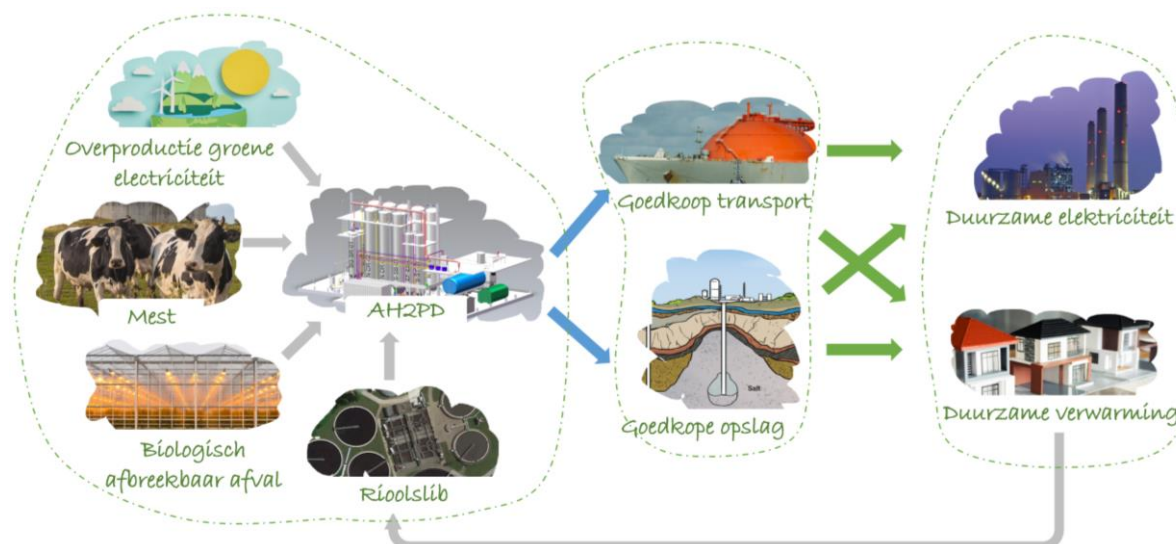
Opslagmedium	Productie-efficiëntie	Opslag	Transport en gebruik
H ₂	Efficiëntie ~60% tijdens elektrolyse, en opnieuw 13% verlies tijdens compressie tot 800 bar [2], zelfs zonder de elektrische en mechanische verliezen mee te rekenen.	€ 10–1300/kg CAPEX. → € 0,30–30/kWh opslagkosten. €10 voor ondergrondse omslag in bijvoorbeeld zoutcavernes of lege aardgasvelden. €1300 voor 800-bar opslag tanks.	Gigantische investeringen in infrastructuur nodig: nieuwe pijpleidingen, branders, turbines, gaspitten, etc. Minimaal 10% energieverlies voor 1000 km in pijpleidingen. 30-40% verlies tijdens het vloeibaar maken van waterstof [2]. In het geval van H ₂ naar elektriciteit, ~50% turbine rendement.
CH ₄ middels AH ₂ PD en elektrolyse	Efficiëntie ~60% tijdens elektrolyse en 105% tijdens omzetting H ₂ -CH ₄ . Waterstof stimuleert de afbraak van organische reststromen: een indirect toegevoegde waarde van €24/kg H ₂	Niet van toepassing! Zolang er aardgas wordt geïmporteerd is methaanopslag technisch gezien gratis: De hoeveelheid geproduceerde methaan wordt gewoon minder uit Rusland geïmporteerd.	Transport van methaan kan via de huidige leidingen. Transport van methaan via leidingen is vanwege lage frictie en hoge dichtheid ongeveer 4,6 keer efficiënter dan bij waterstof [2]. In het geval van CH ₄ naar elektriciteit ~50% turbine-rendement.
Li-ion	Nauwelijks verliezen.	€ 120/kWh in 2022. Voorspeld is dat af zal nemen tot ~ € 55/kWh in 2030 [3]. Rendement maximaal 90%, en grote rendementsverliezen voor langtijdige opslag / bij lage temperaturen.	~ 5% verlies over het net. Enorme investeringen voor netverzwaring vereist. Hoge snelheid en flexibiliteit in gebruik.

Energieopslag in methaan via AH₂PD blijkt voor het opschalen voor energieopslag duidelijk het meest voor de hand te liggen. Om kleine/kortdurende overschotten op te slaan en te leveren tijdens kleine/kortdurende energietekorten, kunnen batterijen worden ingezet ten behoeve van netstabilisatie. De wekelijkse, maandelijkse en seizoenspieken en dalen kunnen het best worden uitbalanceerd met behulp van biomethaan. Met de huidige technische mogelijkheden is waterstof wel geschikt als tussenvorm van energie om vervolgens in methaan te worden omgezet, maar nu nog niet als opslagmedium of als toekomstige brandstof. De energietransitie met AH₂PD-technologie zou

voor Nederland heel gunstig kunnen uitpakken, omdat de benodigde technologie al aanwezig is en een groot deel van de benodigde investeringen al decennia geleden is gedaan.

Economisch perspectief

Een schematische afbeelding van de rol van AH₂PD in het energielandschap is te zien in afbeelding 2. Berekeningen laten zien dat onder conservatieve aannames wat betreft gasprijzen, een AH₂PD-installatie inclusief electrolyzer zichzelf snel terug kan verdienen. Als vuistregel gaat op: hoe groter de installatie, hoe sneller de terugverdientijd. Maar zelfs bij een relatief kleine rioolwaterzuivering (rond 100.000 inwonerequivalenten) verdient een AH₂PD-installatie zichzelf zonder subsidies in tien jaar terug. Bij grotere RWZI's (ca. 600.000 inwonerequivalenten) kan dat al in zes jaar. Reststromen uit de voedingsmiddelenindustrie (of keukenafval) kunnen een groot deel van deze inwonerequivalenten vervullen, waardoor deze installatie dus ook winstgevend kan zijn voor kleinere gemeenten die organische reststromen hebben. In het geval van optimistischere scenario's, met hogere gasprijzen, en inclusief de verwachte subsidies kunnen installaties zichzelf al in vier of vijf jaar terugverdienen, afhankelijk van de schaal. Het Activiteitenbesluit milieubeheer verplicht bedrijven en instellingen om alle energiebesparende maatregelen met een terugverdientijd van vijf jaar of minder uit te voeren. Deze energiebesparingsplicht geldt voor bedrijven en instellingen (Wet milieubeheer-inrichtingen) die per jaar vanaf 50.000 kWh elektriciteit of 25.000 m³ aardgas of een equivalent daarvan verbruiken. Of dit activiteitbesluit de opschaling van AH₂PD zal versnellen is nog niet duidelijk.



Afbeelding 2. De rol van AH₂PD in de energieketen

Van alle Nederlandse huishoudens heeft 90 procent al een gasaansluiting en er ligt een functionele infrastructuur om gas te transporteren door het land. AH₂PD-technologie kan de huidige infrastructuur benutten zonder dat aanpassingen aan het netwerk nodig zijn. Deze technologie heeft ook een grote positieve impact op een aantal duurzame ontwikkelingsdoelen (SDG's) van de Verenigde Naties (zie tabel 2).

Tabel 2. Directe en indirecte positieve bijdrage van AH₂PD aan vijf duurzame ontwikkelingsdoelen (SDG: Sustainable Development Goals)

Duurzaam ontwikkelingsdoel	Uitleg
SDG7: betaalbare groene energie	Schone energie wordt geproduceerd en opgeslagen tegen een lage prijs
SDG9: industrie en infrastructuur	Bestaande infrastructuur krijgt een nieuwe, schone functie
SDG11: duurzame steden	Grondstoffen worden gerecycled en afvalstromen geminimaliseerd
SDG 13: klimaatactie	Elk groen methaanmolecuul dat verbrand wordt betekent de verbranding van een fossiel methaanmolecuul minder: het gebruik van bio-methaan stoot netto geen CO ₂ uit.

Referenties

1. Wikipedia, *Henry's law*, [Henry's law - WHenry's law - Wikipediaikipedia](#)
2. Bossel, U., Eliasson, B. (2002). *Energy and the Hydrogen Economy*. US department of energy - [Energy and the Hydrogen Economy](#)
3. Statista (2021). *Lithium-ion battery pack costs worldwide between 2011 and 2030*. [Statistics - Statista](#)