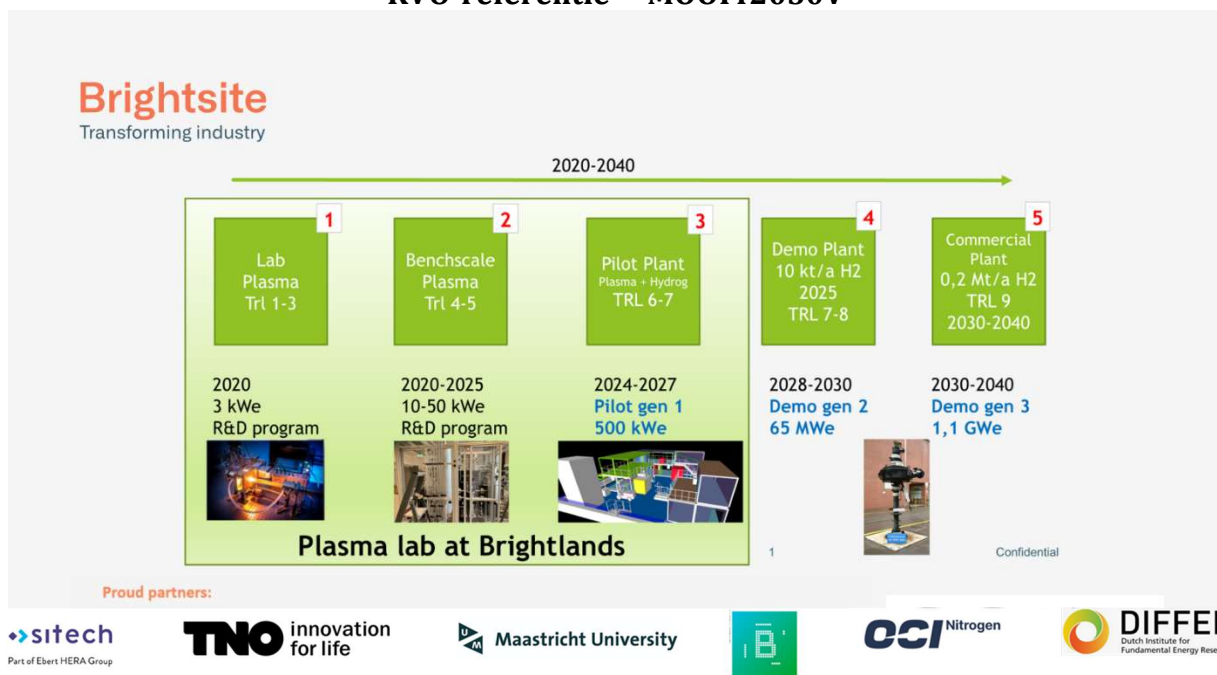


RIJKSDIENST VOOR ONDERNEMEND NEDERLAND

Regeling Nationale EZ-Subsidies Topsector Energie, Tender Topsector Energiestudies Industrie RVO-referentie - MOOI42030V



NEXT GENERATION PLASMACHEMIE VOOR CO₂-VRIJE PRODUCTIE VAN WATERSTOF EN ETHEEN UIT METHAAN. (PCCO₂).

MOOI-regeling 2020 (Missie gedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie)

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

Publieke samenvatting MOOI project MOOI42030V

Deliverable Title	Plasma – final report	
Geschreven door	Yves Creyghton TNO Hans Linden TNO Wilbert Derks Sitech Marco Linders TNO Zowi Meijer Sitech Jurjen Emmelkamp TNO Shahriar Mirpour TNO Gerard van Rooij UM/Differ Ando Kuypers TNO John Zevenbergen TNO Harro van Lente UM Dirk vd Bekerom TNO Arjan den Otter TNO Dijana Dimitrijevic Sitech Zowi Maijer Sitech Richard vd Zanden Differ	
Uitgifte datum	15-sept-2025	

In bijgevoegde teksten is per werkpakket aangegeven wat de verkregen resultaten en inzichten zijn vanuit het project MOOI42030V:

**NEXT GENERATION PLASMACHEMIE VOOR CO₂-VRIJE
PRODUCTIE VAN WATERSTOF EN ETHEEN UIT METHAAN.
(PCCO₂).**

Werkpakket 1: Reactormodellering

Op basis van het eerder ontwikkelde 3D CFD COMSOL-model voor de Hüls-reactor hebben we met succes een 2D axiaal-symmetrisch CFD COMSOL-model ontwikkeld van de 50 kW reactor.

We implementeerden een vereenvoudigde methaan-naar-acetyleen omzettingsmodel om de bijbehorende enthalpie- en gascompositieveranderingen te kunnen bepalen. De resultaten voor acetyleenomzetting correleerden zeer goed met de 0D kinetische CHEMKIN-modelsimulaties. We observeerden dat de acetyleenopbrengst en -omzetting maximaal zijn rond 20 kJ/g energie-invoer. De specifieke energiebehoefte (SER) voor acetyleen wordt in dit bereik ook geminimaliseerd. Hoewel de reactor geen puur plugflow-reactor is, lijken snelle kinetische plugflow-simulaties van methaan naar acetyleen geldig voor de 50 kW reactor, gebaseerd op de correlatie tussen de 0D-kinetiek en het volumetrische CFD-model. In deze simulaties werd roetvorming niet meegenomen, hoewel roet een belangrijk bijproduct is. De gasvormige roetprecursoren maakten echter wel deel uit van het 0D-kinetische model, waarin we uitgebreide kinetische datasets vergeleken, zowel open source (NIST, Aramco, NUIGmech), CHEMKIN-gecodeerde Fuel Library-databases als vereenvoudigde literatuu datasets van Holmen, Heijkers en Fincke. We vonden dat al deze datasets zeer goed correleerden bij lagere C-nummers (C0–C2), maar afweken bij hogere koolwaterstoffen. Ook waren de vereenvoudigde literatuu datasets zeer beperkt in de hogere koolwaterstoffen. Dit werkt goed als roetvorming niet relevant is, maar omdat roetvorming grotere koolwaterstoffen vereist, moeten deze worden meegenomen om roetvorming te schatten. Daarom gebruikten we de gecodeerde CHEMKIN Fuel Library, aangezien dit de enige database was die de vorming tot grotere gasvormige PAK's omvatte en simulaties van vaste roetdeeltjesnucleatie en -groei mogelijk maakte. Modellering van roetnucleatie en -groei werd uitgevoerd en gevalideerd met industriële Hüls-reactordata. Voor deze validatie werden voor-ench met vloeibaar gemaakt toevoergas en waterench geïmplementeerd in het 0D-kinetische model. Met aanpassingen van roetparameters voor gasreacties (schatting van de nucleatiesnelheid) en oppervlakreacties (schatting van de groeisnelheid van roetdeeltjes) kwamen de gesimuleerde roetvormingen zeer goed overeen met literatuu data. We merkten echter dat roetvorming zeer gevoelig is voor deze parameters, en daarom is experimentele validatie in de daadwerkelijke reactor vereist. Ook kwamen de fracties acetyleen en methaan in de productstroom overeen, maar werden afwijkingen in de fracties etheen en waterstof waargenomen. De afwijking in etheen is waarschijnlijk te wijten aan de beperking van 0D plugflow-simulaties, waarbij koelere reactorzones nabij de reactorwanden niet worden meegenomen. Het negeren van deze zones leidt tot een onderschatting van etheenvorming, aangezien de methaan-naar-etheen omzetting baat heeft bij lagere reactietemperaturen. De afwijking in de waterstoffractie is te wijten aan de onderschatting van het waterstofgehalte in roet. Literatuur laat een aanzienlijk waterstofgehalte in roet zien, terwijl het 0D-kinetische model dit volledig negeert. Er werden geen vereenvoudigde reacties voor etheen- en roetvorming verkregen uit de 0D-kinetische simulaties, en daarom maakten etheen en roet geen deel uit van het volumetrische reactormodel. Dit moet in toekomstig werk worden geïmplementeerd.

Om het gedrag van de 50 kW reactor te bestuderen, voerden we snelle parametrische 0D-kinetische studies uit zonder roetnucleatie en -groei, aangezien roetmodellering uitgebreide simulatietijd vereist. Ook voerden we simulaties uit van de thermische ench inclusief de vorming van polyaromatische koolwaterstoffen (PAK's), de belangrijkste voorlopers van roetvorming. De belangrijkste conclusies zijn dat hoge (boven-atmosferische) drukken en lange verblijftijden leiden tot aanzienlijke roetvorming, vooral in het 10–18 kJ/g energie-invoerbereik. Bij hogere energie-invoer bereikt de reactor temperaturen waarbij PAK's opnieuw worden afgebroken. Om roetvorming tijdens de ench te voorkomen, moet de temperatuur zo snel mogelijk onder 1200 K worden verlaagd, bij voorkeur binnen 10 ms. Bij langere tijden wordt de roetvorming juist gevoed, maar als etheenvorming gewenst is, kan de enchduur worden verlengd tot 20–30 ms om de etheenopbrengst te verhogen. Daarna blijft de etheenopbrengst gelijk, maar daalt de acetyleenopbrengst snel ten gunste van roetvorming. Roetvorming is sterk exotherm-daarom is meer koelvermogen vereist als de enchtijd toeneemt.

Publieke samenvatting MOOI project MOOI42030V

Voor efficiënte acetyleenvorming lijken drukken rond atmosferisch optimaal, maar etheenomzetting kan profiteren van hogere drukken, ten koste van meer roetproductie. Acetyleenomzetting kan opbrengsten tot 90% bereiken bij 20 kJ/g energie-invoer voor elk drukbereik tussen 0,1–10 bar. Aan de andere kant overschrijdt etheenomzetting nauwelijks 5% bij lage energie-invoer rond 10 kJ/g. De conversie-efficiëntie voor etheen blijft veel lager dan die voor acetyleen, vanwege een veel hogere SER. Voor optimalisatie van etheen zijn meer parametrische studies en reactorsimulaties vereist.

Op basis van de hoge correlatie tussen Hüls-literatuurdatabank en het 0D-kinetische model enerzijds, en het 0D-kinetische model en het volumetrische CFD-reactormodel anderzijds, concluderen we dat deze reactorsimulaties zeer nuttig kunnen zijn voor de ontwikkeling van nieuwe reactoren, ongeacht de schaal. Voor betere nauwkeurigheid moeten etheen- en roetvorming worden geïmplementeerd met behulp van vereenvoudigde reacties. De kinetiek van deze vereenvoudigde reacties kan worden verkregen via Arrhenius-fitting met behulp van 0D-kinetische modellering.

Werkpakket 2: Realisatie proefopstelling

De benchscale-installatie met een 50 kW ARC-plasmatoorts is gerealiseerd en met succes in bedrijf genomen.

Het ontwerp van het benchscale-systeem is gebaseerd op beschikbare informatie over het Hüls-proces, terug geschaald naar een minimale omvang waarin een stabiel atmosferisch plasma kan worden gehandhaafd. Het Hüls-proces werd commercieel geëxploiteerd op een schaal van 8 MW. In overleg met, de leverancier van de plasmatoorts, is gekozen voor een invoervermogen van 50 kW voor de benchscale-installatie.

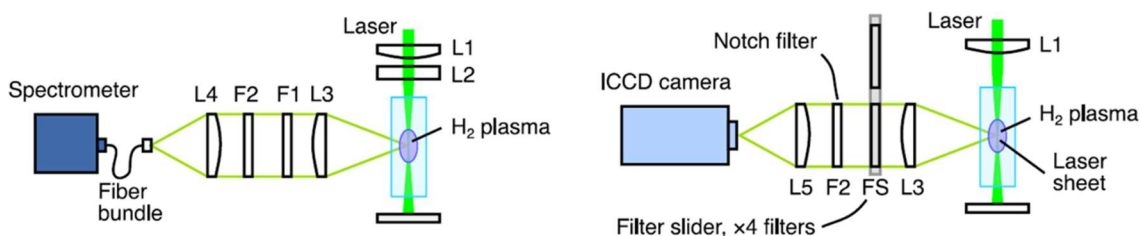
- Foto van benchscale



Werkpakket 3: Diagnostiek voor procescontrole

In lijn met het oorspronkelijke voorstel richtten de diagnostische ontwikkelingen zich op Raman-laserverstrooiing om temperatuurverdelingen in de verschillende plasmareactoren te meten. Bij Raman-verstrooiing gaat licht inelastisch een interactie aan met de gebonden elektronen van moleculen. Dit betekent dat er energie wordt uitgewisseld tussen het licht en het molecuul. Het spectrum van het verstrooide licht (de “rode pijlen”) geeft informatie de identiteit en de hoeveelheid van de moleculen die in het plasma gevormd worden.

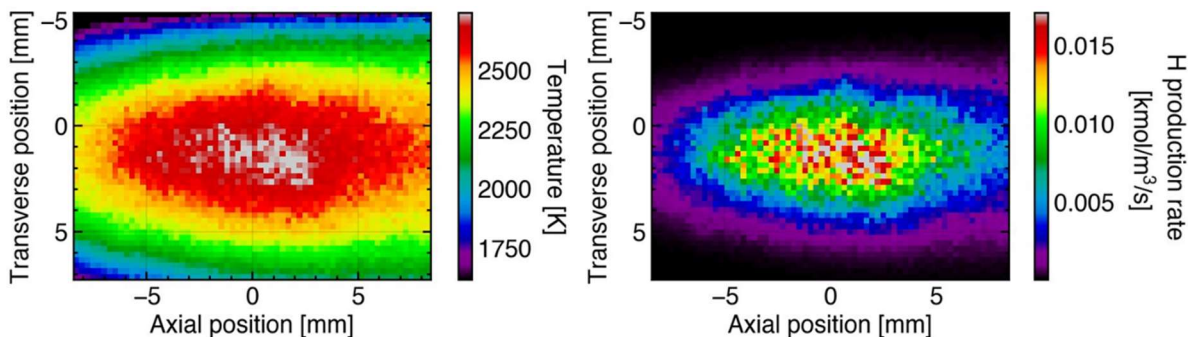
De onderstaande figuur illustreert het verschil tussen het oorspronkelijke spectrometergebaseerde systeem (links weergegeven) en het nieuw ontwikkelde filtergebaseerde systeem (rechts weergegeven).



De ingebruikname en prestaties van het systeem zijn gerapporteerd in de publicatie van Del Cont-Bernard et al. (2D Raman imaging for vibrational and rotational temperature mapping in H₂, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.109145>).

Als voorbeeld van hoe dergelijke informatie kan worden gebruikt om lokale chemische kinetiek te ontrafelen, wordt in de onderstaande figuur de temperatuurverdeling in een H₂-plasma en de gerelateerde productiesnelheid van waterstofatomen getoond.

Inmiddels is Ramanspectroscopie een routinediagnose geworden in het Brightsite plasmalaboratorium en wordt het gebruikt om temperaturen in de kern en staart van vele plasmaconfiguraties te meten. Typisch meten we kerntemperaturen in het bereik van 2100-3000 K voor methaan-waterstofmengsels. Deze metingen hebben in andere werkpakketten geleid tot begrip over de gasstroming door het plasma tot optimalisatie van de methaanconversie tot een niveau voorbij het industriële Hulsproces.



Werkpakket 4: Verbeterd Hüls-proces

Het doel van WP4 is het verbeteren van het Hüls-proces in termen van conversie en/of efficiëntie. In het Brightsite plasmalab worden twee afzonderlijke technologische trajecten gevolgd: microgolfttechnologie en DC-boogtechnologie.

In het Brightsite plasmalab is meer ervaring met microgolfplasma's, waardoor dit traject de meeste vooruitgang heeft geboekt gedurende het project. De parameterspace is in kaart gebracht om te identificeren onder welke omstandigheden het plasma kan worden bedreven).

Met behulp van deze parameter-scans zijn optimale omstandigheden voor acetyleenproductie geïdentificeerd; het resultaat was vergelijkbare opbrengst als de Hüls benchmark. Bij het einde van het project was de 50kW benchscale installatie eveneens operationeel en levert waardevolle data op over de omzetting van methaan naar acetyleen en etheen. Parameter-scans, vergelijkbaar met die in de microgolfreactor, worden routinematig uitgevoerd, en op basis van modellering en experimentele inzichten in de microgolf zijn we ervan overtuigd dat de prestaties in de microgolf ook kunnen worden doorgetrokken naar de benchscale installatie.

Het effect van de gas-quench werd onderzocht met CFD-numerieke modellering om de quench-geometrie te optimaliseren.

De hoofd-quench (waterquench) werd experimenteel gevalideerd, aangezien deze altijd draait wanneer de benchscale-opstelling in bedrijf is. Parametrische tests zijn gepland voor de nabije toekomst. Zelfs zonder experimentele tests is, op basis van literatuur en modellering, een herontwerp van de waterquench in ontwikkeling dat het quenchprofiel optimaliseert, d.w.z. het procesgas zo snel en gelijkmatig mogelijk afkoelt. Dit ontwerp is gebaseerd op literatuur over druppelvorming, waaronder studies naar brandstofinjectie in verbrandingsmotoren.

Het effect van voorverwarming werd geëvalueerd met 0D-modellering, uitgaande van een gastemperatuur T_0 bij verschillende startwaarden. Dit suggereert dat warmteterugwinning, niet alleen downstream maar ook binnen de reactor, aanzienlijk kan bijdragen aan de optimalisatie van het proces.

Werkpakket 5: Benchscale (Pilot Plant) reactorontwerp

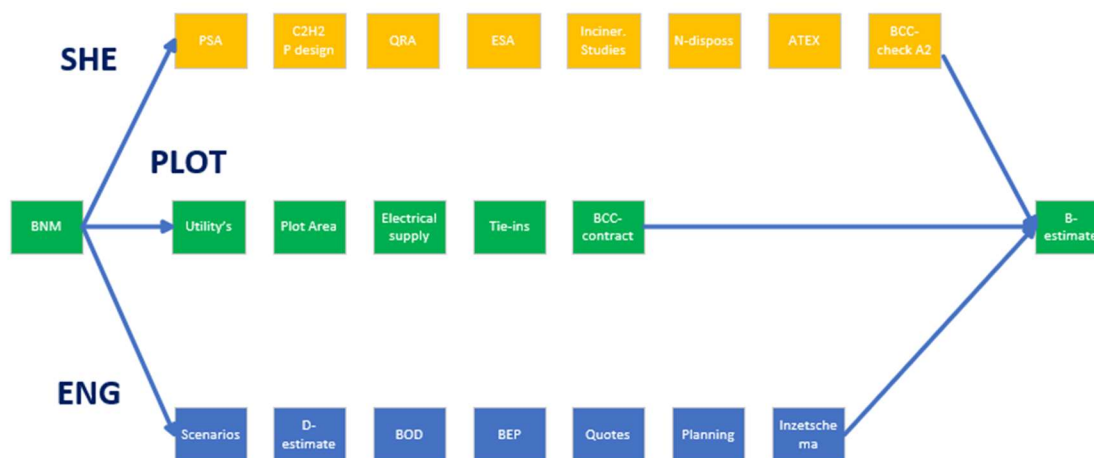
Gedeeltelijk gebaseerd op de ervaringen die zijn opgedaan tijdens de bouw van de experimentele benchscale-opstelling voor Resultaat 4, kan het conceptuele ontwerp – dat buiten dit project via een TSE-inspanning is verkregen – worden doorontwikkeld tot een basisontwerp voor een pilot plant-installatie.

Wat betreft schaal is besloten dat deze plasma pilot plant een reactorvermogen van ongeveer 500 kW zal hebben. Deze schaal moet een optimaal compromis bieden tussen voldoende flexibiliteit om nieuwe inzichten uit Resultaat 4 te integreren en het adequaat aanpakken van de verwachte opschalingsuitdagingen richting de demonstratie-installatie.

De werking van deze benchscale (pilot) reactor is primair gericht op het vergaren van kennis op het gebied van langdurige runs. Door het proces gedurende een langere periode continu (24/7) te laten draaien, zullen we leren over de SHE-aspecten van het omgaan met acetyleen en in het bijzonder de effecten op reactie efficiëntie door bijvoorbeeld vervuiling of degradatie van apparatuur.

Om het engineeringpakket te ontwikkelen en een C-raming van +/- 25% vast te stellen voor OPEX en een B-raming van +/- 10% CAPEX, zijn de volgende stappen ondernomen:

Fig 5.1 Engineering proces basic engineering 500 kW Plasma Pilot Plant



Werkpakket 6: Circulaire plasmachemie

De experimenten maakten gebruik van de Expanding Thermal Plasma (ETP)-bron, werkend in een lagedruk- en zuurstofvrije omgeving. De opstelling bestond uit een boogbron en een reactiekamer, waarbij argongas de plasmalozing faciliteerde. De kunststofmonsters, specifiek 10 gram laagdichtheid-polyethyleen (LDPE) korrels, werden aan het plasma blootgesteld onder verschillende omstandigheden:

Conclusies:

Dit onderzoek toonde het potentieel aan van plasmatechnologie voor het thermisch kraken van kunststoffen. Belangrijkste conclusies zijn:

- Theoretische voorspellingen kwamen nauw overeen met experimentele resultaten voor de energiebehoefte van polyethyleen-pyrolyse.
- Langere plasma-blootstellingstijden en hogere temperaturen leidden tot verhoogde opbrengsten van waardevolle koolwaterstoffen zoals etheen en acetyleen.
- Het proces liet veelbelovende resultaten zien voor de verwerking van gemengd plastic afval, hoewel verdere optimalisatie en onderzoek nodig zijn voor praktische toepassingen.

Werkpakket 7: Hydrogenatie van acetyleen

In dit MOOI-project is methaanpyrolyse onderzocht. Een potentieel belangrijk hoofdproduct van methaanpyrolyse is acetyleen. Omdat acetyleen zelf slechts beperkte toepassingen kent en moeilijk te transporteren is, is omzetting naar een ander product noodzakelijk. De selectieve hydrogenatie van acetyleen naar etheen is voorgesteld als een nuttige route.

De industrieel bewezen gasfasehydrogenatie van (lage concentraties) acetyleen is economisch niet aantrekkelijk voor onze situatie. Bedrijf X heeft aangetoond dat vloeistoffase hydrogenatie van hoge concentraties acetyleen met behulp van een door hen intern ontwikkelde katalysator kan worden uitgevoerd met een hoge selectiviteit (>98%). Deze hydrogenatie vindt plaats bij hoge CO-concentraties (ca. 20 vol%).



De opstelling waarmee acetyleen wordt gehydrogeneerd naar etheen.

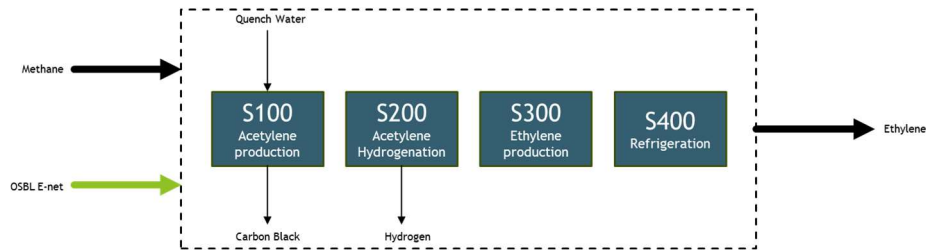
Binnen dit project heeft TNO een opstelling (zie foto) ontworpen, gebouwd en in bedrijf genomen voor de fed-batch vloeistoffasehydrogenatie van acetyleen. Een kleine hoeveelheid katalysator van bedrijf X is verkregen voor het testen van vloeistoffasehydrogenatie van acetyleen bij lage CO-concentraties (verwacht in onze plasma-uitlaatstroom). Daarnaast zijn verschillende commerciële hydrogenatiekatalysatoren getest.

Conclusies

Een opstelling voor de laboratoriumschaal, vloeistoffasehydrogenatie van acetyleen naar etheen bij verhoogde druk en temperatuur is met succes ontworpen, gebouwd en in bedrijf genomen. Met deze opstelling werd de prestatie van een reeks katalysatoren onderzocht in experimenten van 2 tot 11 dagen.

- Zeer veelbelovende resultaten werden behaald met de niet-commerciële -katalysator van bedrijf X: acetyleenconversies boven 95% bij 95% selectiviteit richting etheen.
- Een reeks andere commercieel beschikbare katalysatoren werd eveneens getest, maar hierbij werden aanzienlijk lagere conversie- en selectiviteitswaarden gemeten.

Werkpakket 8: Business case analyses



De business case analyse is gebaseerd op een IHS Markit PEP report nr 306. waarbij vanuit methaan waterstof en ethyleen (via hydrogenering) wordt geproduceerd. Ter vergelijking is ook gekeken naar de plasma variant voor koolstof en waterstof. Over het algemeen geldt dat voor plasma het moeilijk is om waterstof te produceren uit methaan en te kunnen concurreren met SMR (+CCS)

Wanneer er voldoende opbrengst aan de koolstof kan worden toegekend, worden de plasmavariant voor koolstof en waterstof concurrerend met SMR + CCS.

Combinatie Plasma + Hydrogenatie S100-S400:

Deze combinatie zal moeilijk concurreren met SMR, SMR + CCS en elektrolyse, gezien de hoge basisprijs en hoge gevoeligheid. Zelfs toevoeging van een prequenche levert onvoldoende reductie om concurrerend te zijn.

Combinatie Plasma + Hydrogenatie S100-S200:

Deze combinatie zal eveneens moeilijk concurreren, om dezelfde redenen.

Combinatie Plasma S100 voor productie van waterstof en koolstof

Deze combinatie is minder gevoelig dan het oorspronkelijke plasmaproces, maar afhankelijk van de prijs en het marktvolume van koolstof om concurrerend te zijn. De productie van waterstof en acetyleen als hoofdproducten is niet meegenomen in deze analyse.

Voordeel: niet gevoelig voor CO₂-prijzen omdat geen CO₂ ETS hoeft te worden afgedragen. Voor de oorspronkelijke plasmaprocessen lijkt dit de snelst haalbare route.

Het directe etheenproces, waarmee het plasmaproces S100-S400 zonder hydrogenatie veel concurrerender wordt met SMR en SMR + CCS. Dit proces is niet gevoelig voor CO₂-kosten omdat er geen CO₂ ETS hoeft te worden meegenomen, maar blijft gevoelig voor prijsschommelingen in etheen, aardgas en elektriciteit. De basisprijs komt dichterbij de buurt van SMR en SMR + CCS. De technische haalbaarheid wordt verder uitgewerkt in het vervolg project.

Voorwaarden voor succes:

- Hoge conversie én hoge selectiviteit richting etheen.
- Optimalisatie warmte-integratie rond de plasmareactor.
- Minimalisatie CAPEX plasmareactor.
- Integratie van secties 300 & 400 (productterugwinning/koeling) met bestaande installaties.

Werkpakket 9: Voorstudie demo plant

D9.1 Vereisten voor DEMO-plant

Om een robuust ontwerp voor een DEMO-plasmaplant voor te stellen, is het noodzakelijk dat er een operationele pilot-plasmaplant beschikbaar is met ontwikkelde/geschaalde technologie, inclusief praktische kennis en inzichten. Dit zal mogelijk zijn in de periode tussen 2026 en 2029. Naast een ontwikkelde technologie op pilotschaal, is ook een Eindgebruiker nodig die kan beslissen over veel fundamentele ontwerp vragen voor de DEMO-plant.

Op dit moment is daarom alleen een lijst met vereisten voor de DEMO-plasmaplant opgesteld, die in de toekomst moet worden meegenomen. Deze lijst van vereisten is opgesteld met behulp van een Front-End Loading (FEL)-sessie, waarbij gebruik is gemaakt van de momenteel beschikbare kennis, expertise en ervaring binnen het team, maar ook op de Chemelot-site.

Zodra de scope en de Eindgebruiker van de DEMO-plasmaplant bekend zijn, moeten de antwoorden voor elk van de aangegeven vereisten worden uitgewerkt.

D9.2 Voorstudie voor DEMO-plant

Zodra de antwoorden op de vereisten voor de DEMO-plasmaplant bekend zijn en deze zijn vastgelegd en gedocumenteerd in een Business Need Memorandum (BNM), kan de volgende projectstap worden gestart. Die stap is een voorlopige (haalbaarheids)studie voor de DEMO-plasmaplant, die kan worden uitgevoerd volgens het werkproces van de Large Capital Projects (LCP) binnen Sitech. Op deze manier wordt onnodig herwerk in latere projectfasen voorkomen.

In dit rapport zijn enkele vereisten voor de DEMO-plasmaplant in meer detail toegelicht, evenals het LCP-werkproces. Deze toelichting is echter op een hoog niveau gegeven, aangezien er nog veel onzekerheden bestaan met betrekking tot de DEMO-plasmaplant, omdat het project zich nog in een vroege ontwikkelingsfase bevindt.

Werkpakket 10: Maatschappelijke acceptatie

D10.1 Literatuur- en octrooistudie

Gedurende de looptijd van het project is een literatuur- en octrooistudie opgesteld en geactualiseerd.

D10.2 Maatschappelijke impact, LCA

Er is een rapport opgesteld waarin de relatie tussen de Sustainable Development Goals (SDG) en de pilot-plasmaplant op de Chemelot-site wordt toegelicht, als een manier om de projectimpact beter te begrijpen. De SDG's in relatie tot plasmatechnologie in het algemeen kunnen echter variëren, afhankelijk van de uiteindelijke toepassing bij de Eindgebruiker.

Daarnaast heeft het team van de pilot-plasmaplant een overzicht gemaakt van potentiële stakeholders die in de verschillende fasen van het project in overweging genomen en betrokken kunnen worden. Dit overzicht kan verder gebruikt worden als basis bij de ontwikkeling van de DEMO- en commerciële installaties. De gebruikte en beschreven aanpak voor stakeholderanalyse is ontwikkeld op Chemelot.

D10.3 Infrastructuuracceptatie en voorbereiding

In dit rapport is de integratie van het plasmaproces op verschillende schalen (pilot, DEMO en commercieel) binnen de lokale processen op de Brightlands Chemelot Campus en de Chemelot-site geëvalueerd. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de mogelijkheid dat de DEMO- en commerciële installaties wereldwijd op andere chemische sites gebouwd zouden kunnen worden.

Aangezien geen van de genoemde plasmaschalen momenteel operationeel of gebouwd is, is de verstrekte informatie opgesteld naar beste huidige kennis, die verder zal worden bijgewerkt en verfijnd naarmate de kennis uit dit project zich ontwikkelt in de vervolgfases.

Door de onzekerheden binnen het project is het op dit moment niet mogelijk om een definitieve aanbeveling te doen voor de integratie van infrastructuur voor de verschillende plasmaplantschalen. Wel zijn de algemene overwegingen op hoog niveau benoemd voor de pilot-, DEMO- en commerciële TRL-schalen.

D10.4 SHE-studies voor de pilot-plant

Een project moet niet alleen technologisch en economisch haalbaar zijn, maar ook veilig en maatschappelijk acceptabel. Daarom is het cruciaal om deze onderwerpen al in een vroege projectfase te behandelen en mee te nemen in het ontwerp.

Tijdens de Conceptuele Engineering van de pilot-plasmaplant is een lijst opgesteld van de vereiste veiligheidsstudies, inclusief het projectstadium waarin elk van deze studies moet worden uitgevoerd (zie Tabel 1). Deze lijst dient als checklist doorheen het hele project om overzicht te houden van de veiligheidsstudies die opgeleverd moeten worden.

Publieke samenvatting MOOI project MOOI42030V

SHE studies	Afkorting	Project fase	WP10.4 deliverable
ATmosphere Explosible	ATEX	Basic Engineering	Basic Engineering package
Quantitative Risk Assessment	QRA	Conceptual Engineering	Updated in the Basic Engineering phase.
DOW Fire and Explosion Index	DOW F&EI	Basic Engineering	Basic Engineering package
Working conditions	ARBO	Conceptual Engineering	Yes (first draft, but an actual study will be done once plant is in operation)
Machine Safety	Machine Safety	Detailed Engineering	No (at this project stage).
Engineering Failure Analysis	ESA	Basic Engineering	Basic Engineering package Pre-ESA was done in the Conceptual Engineering phase
Maximum Credible Accident	MCA	Not applicable, as QRA<1	No
A2 file	A2	All project phases	Basic Engineering package
Failure mechanisms (study)	Failure mechanisms	Basic Engineering	
Process Safety Analysis	PSA	Conceptual Engineering	
Safety Instrumented Systems Lifecycle	SIS	Basic Engineering	Pre-SIS is done.
Extended systems Hazop		Detailed Engineering	No (at this project stage).
Process Safety Consultation for new or modified high-risk scenarios		Basic Engineering, after ESA	Not required. Note: Three RL1 and RL2 scenarios with adequate provisions have been identified so far.
HAZard and OPerability study	HAZOP	Detailed Engineering	No (at this project stage).

Aanvullende studies:

- HCN-maatregelen
- Veilige locatie verbrandingsinstallatie
- AERIUS/N-depositie berekeningen
- Emissiebewakingsvereisten verbrandingsinstallatie