

Haalbaarheid van deoxygenatie van oliën/vetten tot bionafta in stilstaande biodieselfabrieken

Auteur: Remco Hoogma, Dwarsverband
Opdrachtgever: Biorenewables Business Platform
Projectduur: November & december 2016

Samenvatting

In Nederland staat ca. 1 Mton/a productiecapaciteit voor FAME-biodiesel stil. Oorzaken zijn onder meer overcapaciteit in de EU, de hoge kosten van biodiesel en negatieve publieke opinie over biobrandstoffen.

Biodieselfabrieken zijn ontworpen voor atmosferische processen bij relatief lage temperaturen. De omesteringsreactie van plantaardige olie met methanol naar FAME-biodiesel en glycerine is licht exotherm, zodat er weinig koeling nodig is. Er is sprake van een evenwichtsreactie die door overmaat methanol naar de producten wordt gedreven; vanwege verschillende dichtheid ontstaat een apolaire laag (ester) boven een polaire (alcohol) laag. Na scheiding kan destillatie worden toegepast voor zuivering.

Alternatieve reacties onder dezelfde condities kunnen in principe met geringe aanpassingen in biodieselfabrieken plaatsvinden. Het wordt moeilijker om de installatie te benutten voor sterk exotherme reacties omdat de vrijkomende warmte benut of weggekoeld moet kunnen worden, en voor reacties onder hoge druk. Voor een endotherme reactie kan een warmtebron bijgezet worden.

Er zijn verschillende mogelijkheden om FAME-biodieselfabrieken weer in gebruik te nemen. Er is in het bijzonder ingegaan op de in het Biorenewables Business Platform geopperde mogelijkheid om biodieselininstallaties te benutten voor productie van bionafta als voeding voor etheenkrakers.

- **Herstart als biodieselfabriek.** Door aanpassingen aan de installatie (voorbewerking, retrofit-technologie bij de omestering, destillatie) kunnen goedkopere grondstoffen gebruikt worden zodat de producenten hun marktpositie kunnen verbeteren.
- **Voorbehandelingslocatie.** Neste kocht de biodieselfabriek in Sluiskil voor opslag en voorbehandeling van grondstoffen voor HVO-productie.
- **Oleochemie.** Hier wordt een flexibeler proces met meer productmogelijkheden en zuiveringsstappen gevraagd dan bij een biodieselfabriek. De veresteringsfabrieken zijn veelal aanmerkelijk kleiner dan de biodieselfabrieken. In Rotterdam wordt de ombouw van een biodieselfabriek onderzocht voor etoxylering van vetalcoholen.
- **Katalytische deoxygenatie** zonder waterstof bij lage temperatuur van lange-keten vetzuren naar alkenen zou kunnen plaatsvinden in biodieselfabrieken, maar dit door WUR op laboratoriumschaal gedemonstreerde proces is nog niet uitontwikkeld. De alkenen kunnen hoogwaardig worden gebruikt voor productie van surfactants. Het vraagt waarschijnlijk een voorgeschakelde hydrolysestap.

- **Ombouw naar HVO.** De ombouw van een FAME-biodieselfabriek naar een HVO-fabriek voor renewable diesel of jet fuel is in principe mogelijk: het gaat om commercieel beschikbare technologie van meerdere aanbieders en verkrijgbaar op uiteenlopende schaal. De benodigde aanpassing van de fabriek en het investeringsvolume is zo groot dat in feite over een nieuwbouw moet worden gesproken. Essentieel is de beschikbaarheid van waterstof ter plekke voor hydrogenering van de olie of vet. De keuze van een locatie in een bestaand industriecluster met goedkope waterstof is gunstiger voor de business case dan de keuze voor een locatie waar een biodieselfabriek omgebouwd kan worden met behoud van opslagtanks en logistieke faciliteiten.

Bionafta voor krakers

Het HVO-proces levert een bionaftafractie op van 1-7wt% afhankelijk van de leverancier van het proces en de gekozen procescondities. De waarde van de dieselfractie en ook de jet fuel fractie is hoger dan van de bionaftafractie, zodat men zal optimaliseren naar deze producten. Bionafta uit deoxygenatie van plantaardige oliën is geschikt als hernieuwbare voeding voor naftakrakers en daarmee als grondstof voor bioplastic (etheen met certificaat op basis van massabalans). Sabic heeft laten zien met een niet bekend gemaakte voeding op deze wijze bio-PE te kunnen leveren en accepteert bionafta als voeding.

Omdat het bij bionafta gaat om een nevenstroom, en omdat de wereldwijde productiecapaciteit voor HVO sterk groeit, is de verwachting in de markt dat bionafta tegen acceptabele prijzen beschikbaar kan komen. Een Deense studie met medewerking van Neste becijferde de waarde van bionafta uit een gemodelleerde Neste-fabriek op 587 €/ton. Deze prijs zou ten opzichte van de referentieprij voor etheen uit eerdere studie (529 €/ton) meerkosten van €58/ton betekenen, oftewel een groene premie van 11%. Dit is veel minder dan nodig bleek in de eerder onderzochte biobased etheencasus uit inheemse suikerbietenethanol, destijds 30-50%. Ten opzichte van de actuele naftaprijs gaat het om meerkosten van €157/ton, oftewel 36% groene premie.

Toepassing voor krakers moet echter concurreren tegen andere toepassingen zoals in transport. Als bionafta in plaats van ethanol bij benzine kan worden gemengd trekt de marktprijs van ethanol de prijs van bionafta omhoog en wordt bionafta onbereikbaar voor de bio-PE route.

Vanwege de lage kosten van PE-productie in een gedurende decennia geoptimaliseerd systeem, en de hoge kosten van geschikte biomassagrondstoffen, is bio-PE voorlopig niet haalbaar. Technisch en organisatorisch is het bewezen, maar de economische haalbaarheid van bionafta voor plastics wordt grotendeels bepaald door het overheidsbeleid dat inzet van biomassa voor de energie- en transportsector stimuleert. Voor de bulkchemie is de concurrentie met die markten te groot. Voor een doorbraak voor bio-PE is een gelijk speelveld nodig tussen de sectoren, met dezelfde stimulansen.

1. Inleiding

Het Biorenewables Business Platform (BBP) heeft tot taak om (grootschalige) businesscases te helpen identificeren en te ontwikkelen voor de BV Nederland. Zij richt zich daarbij primair op mogelijkheden om hernieuwbare grondstoffen in te zetten voor chemische producten en bouwstenen voor duurzame (bio)-materialen. Energie is nu de meest voorkomende toepassing van biomassa in Nederland. Het BBP stelt zich de vraag of bestaande installaties, zoals biodieselfabrieken, herbestemd zouden kunnen worden van energie naar materialen.

In Nederland staat volgens inventarisatie van Avans Hogeschool ca. 1 Mton/a productiecapaciteit voor FAME-biodiesel stil.¹ Het gaat om vier grote fabrieken (Amsterdam 200 kton/a, Rotterdam 250 kton/a, Sluiskil 250 kton/a, Zwijndrecht 200 kton/a), en enkele kleinere. Dit vertegenwoordigt enkele honderd mio aan investeringen. Deze notitie onderzoekt de mogelijkheden voor herstart van dergelijke installaties of herbestemming voor toepassingen in de biobased economy.

Verantwoording

De studie is uitgevoerd in november-december 2016. Het betrof hoofdzakelijk deskresearch, aangevuld met interviews en telefonische en emailcontacten. Er is voor dit hoofdstuk informatie ingewonnen bij (in alfabetische volgorde):

- Prof.dr. Harry Bitter, Hoogleraar Biobased Chemistry and Technology, Wageningen University & Research
- Bert Bosman, Principal Engineer, Energy & Climate Services, Sabic
- Eric van den Heuvel, Secretaris Platform Duurzame Biobrandstoffen
- Renaat Hennis, Technology program manager SBU Chemicals, Sabic
- NN, adviseur voor de eigenaar van een stilstaande biodieselfabriek
- Marcel Weeda, Hydrogen Transition & Infrastructure, ECN (email)
- Bas Wels, Research & Technology Manager, Industrial Chemicals, Croda

Ook is informatie ter beschikking gesteld door leden van het Biorenewables Business Platform en RVO. Vertrouwelijk versterkte informatie is alleen gebruikt om gedurende het onderzoek ontstane inzichten en berekeningen te toetsen.

2. Benutting van stilstaande biodieselininstallaties

2.1 Productie van FAME-biodiesel

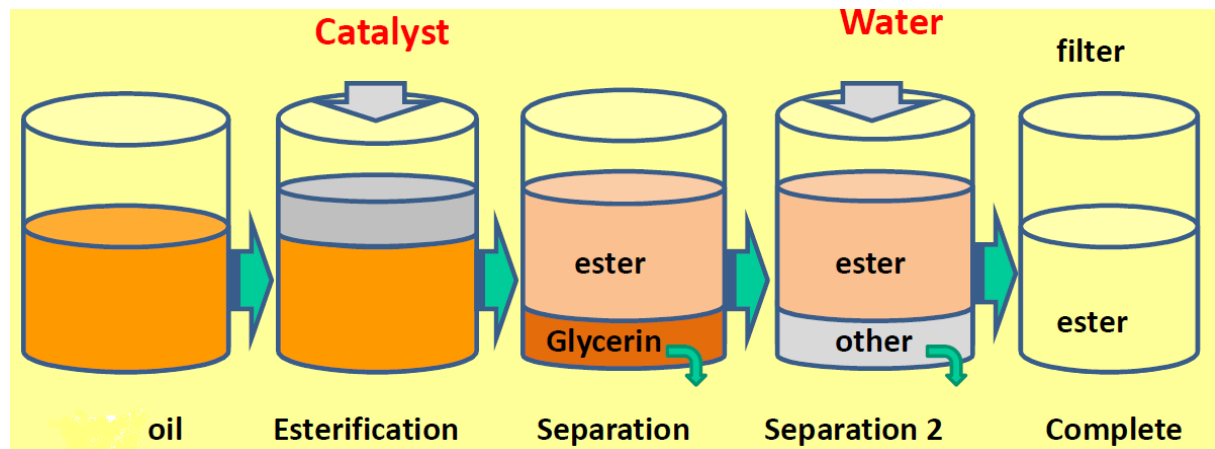
In 2015 is volgens het CBS 1,63 Mton biodiesel geproduceerd in Nederland, grotendeels voor export.² Dit betreft zowel FAME (Fatty Acid Methyl Esters, chemische formule $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOCH}_3$) als HVO (Hydrotreated Vegetable Oils, chemische formule $\text{C}_n\text{H}_{(2n+2)}$, zie paragraaf 3). Biodiesel wordt gebruikt als transportbrandstof, doorgaans gemengd bij diesel in lage (<7% in reguliere diesel) of hogere percentages (B20, B30, B100).

De gebruikte oliën en vetten bestaan hoofdzakelijk uit triglyceriden: esters van glycerol en vetzuren. De meeste fabrieken zijn gebouwd voor omestering met

¹ Avans Hogeschool, Inventarisatie en herbestemming van stilstaande bio-energie installaties, 1-2-2016 (niet openbaar).

² <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=71456NED>

methanol van koolzaadolie en soms ook sojaolie of “multi-feedstocks”. Daarnaast zijn gebruikte frituurolie (Used Cooking Oil, UCO) en in mindere mate dierlijke vetten (Animal Fats, AF) gewilde grondstoffen voor biodiesel.



Afbeelding 4: Stappen in productie van FAME biodiesel.

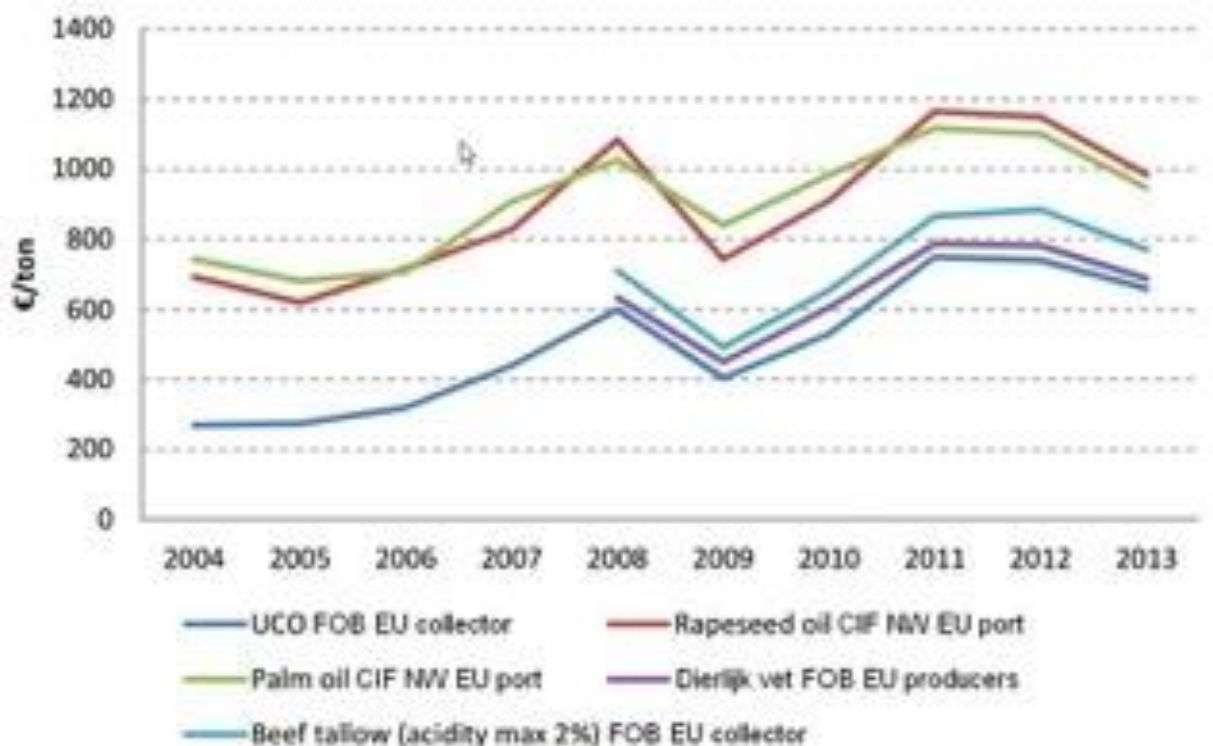
Redenen voor het staken of niet opstarten van biodieselproductie zijn:

- overcapaciteit van biodieselproductie in Europa door stagnerende biobrandstoffenbijmenging. Omdat Europa de doelstellingen voor bijmenging minder snel heeft laten toenemen dan volgens oorspronkelijke richtlijnen is er een kleinere markt gecreëerd dan de producenten verwachtten.
- Dit wordt in veel Europese landen versterkt omdat biodiesel uit UCO en AF dubbelgeteld wordt voor de biobrandstoffenverplichting. Daardoor wordt het totale marktvolume voor benodigde biodiesel kleiner. Volgens CBS wordt in Nederland bijna het volledige marktaandeel biodiesel ingevuld met dubbeltellende biodiesel. Overigens wil Nederland de dubbeltelling voor geavanceerde biobrandstoffen afschaffen.³
- Negatieve publieke opinie over biobrandstoffen.
- Hoge inkooprij van de grondstoffen (oliën en vetten):⁴ deze bedragen typisch 90% van de productprijs van biodiesel, afhankelijk van de grondstofprijs. UCO en AF zijn goedkoper dan koolzaadolie en andere plantaardige oliën. Voordat UCO en AF in beeld kwamen voor biodiesel waren hun prijzen tenminste de helft lager. Onderzoek wijst uit dat de invoering van de dubbeltelling de prijs niet verder opdrijft.⁵

³ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2016/09/08/implementatie-iluc-richtlijn-toezeggingen-aan-de-tweede-kamer-en-jaarrapportage-hernieuwbare-energie-vervoer-2015>

⁴ De wereldproductie van plantaardige olie en vetten omvat zo'n 165 mio ton, waarvan palmolie, sojaolie, raapolie en zonnebloemolie samen 85% uitmaken.

⁵ Pelkmans et al. 2014. *Impact of promotion mechanisms for advanced and low-iLUC biofuels on biomass markets: Used cooking oil and animal fats for biodiesel (case study)*. IEA Bioenergy Task 40. August 2014, <http://task40.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/09/t40-low-iluc-UCO-august-2014.pdf>



Afbeelding 5: Prijshistorie van dierlijke vetten, UCO, koolzaadolie en palmolie.⁶

Om de dominantie van de grondstofprijs te onderstrepen geeft onderstaande tabel de kostenopbouw van biodiesel, in €/liter, in relatie tot koolzaadprijs.⁷ 1 ton olie en 110 kg methanol leveren 1 ton biodiesel en 110 kg ruwe glycerol op plus (soms) een restant vetzuren; zowel glycerol als vetzuren dienen opgewerkt te worden. Voor de kapitaalkosten is gerekend met de vuistregel dat een biodieselfabriek omstreeks 100 k€/kton/a kost. De tabel laat zien dat de vaste kosten van biodieselproductie slechts een klein aandeel hebben in de productiekosten. Bij een koolzaadprijs van €0,30/kg⁸ is de biodieselskelprijs €0,75/liter. Het aandeel van de vaste kosten is dan slechts 10%.

Fixed costs	
Manufacturing costs	0.147
Capital costs (annualised)	0.012
Staff and overhead costs	0.005
Fixed income	
By-products income	0.084
TOTAL fixed factors	0.080
Variable costs	
1 l of bio-diesel requires 2.23 kg of rape-seed	Pr*2.23
TOTAL PRODUCTION COSTS	0.08 + Pr*2.23

Tabel 1: Kostenopbouw FAME-biodiesel. Pr = prijs van koolzaad (bron: IPTS)

De bovengenoemde vuistregel voor de kosten van biodieselfabrieken lijkt een onderschatting als we kijken naar gepubliceerde investeringsbedragen voor Nederlandse fabrieken: Vesta (nu Oiltanking) Amsterdam €40 mio voor 200

⁶ Pelkmans et al. 2014.

⁷ JRC-IPTS, *Techno-economic analysis of Bio-diesel production in the EU: a short summary for decision-makers*. May 2002. Report EUR 20279 EN, <http://ftp.jrc.es/EURdoc/eur20279en.pdf>

⁸ Dit was de laagste koolzaadprijs in de afgelopen 5 jaar volgens <http://www.finanzen.nl/grondstoffen/koolzaadprijs>. De hoogste prijs was €525/ton.

kton/a, Biodiesel Amsterdam €65 mio voor uitbreiding 150 kton/a en glycerine-opwerking, en Biopetrol Rotterdam €100 mio voor 400 kton/a. Mogelijke verklaringen voor de hogere kapitaalkosten zijn een verschillende kostenopbouw (welke kostenposten binnen en buiten de opgave vallen, op het terrein al dan niet aanwezige faciliteiten), ontwikkelingen in staalprijzen, en hogere investeringen voor multi-feedstock technologie. Een nadere analyse hiervan is hier niet nodig: de conclusie dat de grondstofkosten de kosten van biodiesel bepalen volstaat.

Er zijn verscheidene mogelijkheden om biodieselfabrieken weer in gebruik te nemen of te herbestemmen. Aan de mogelijkheid om de fabrieken af te breken en te verkopen, als geheel of in delen, gaan we voorbij. Voor herbestemming is in elk geval van belang dat een nieuw proces past bij de procescondities voor FAME-biodiesel, waar de fabriek voor ontworpen is.

Bij biodieselproductie is sprake van atmosferische processen bij relatief lage temperaturen ($<100^{\circ}\text{C}$). De omesteringsreactie is licht exotherm, zodat er weinig koeling nodig is. Alternatieve reacties die onder dezelfde condities verlopen kunnen in principe met geringe aanpassingen in biodieselfabrieken plaatsvinden, zoals verestering van vetzuren en omestering met andere alcoholen en esters. Het wordt moeilijker om de installatie te benutten voor sterk exotherme reacties omdat de vrijkomende warmte benut of weggekoeld moet kunnen worden. Dat kan bij een bestaande installatie die daar niet voor ontworpen is een probleem of in elk geval kosten opleveren.

Een endotherme reactie invoeren is gemakkelijker, omdat er dan een warmtebron zoals een brander bijgezet kan worden. Bij een reactie met weinig enthalpieverschil speelt warmteontwikkeling of -vraag nauwelijks een rol, maar is sprake van een evenwichtsreactie waarbij scheiding van grondstoffen en producten lastiger kan zijn. Bij biodieselproductie wordt de reactie naar de producten gedreven door een overmaat methanol te gebruiken, en zijn de producten relatief gemakkelijk te scheiden: vanwege verschillende dichtheid ontstaat een apolaire laag (ester) boven een polaire (alcohol) laag. Daarna kan destillatie worden toegepast voor zuivering.

2.2 Herstart als biodieselfabriek

De stilstaande biodieselfabrieken zijn gebouwd voor koolzaad of multi-feedstock. Om deze weer in gebruik te nemen is essentieel om de kosten van de grondstoffen te beperken en/of de waarde van de producten te vergroten.

Een beproefde route is het verwerken van gebruikte frituurolieën en -vetten. Een vroeg voorbeeld hiervan is Sunoil Biodiesel in Emmen, dat in 2009 koolzaadolie verruilde voor gebruikte frituurolie als grondstof. Bij het frituren breekt vet deels af, om UCO te kunnen verwerken zullen biodieselfabrieken daarom moeten beschikken over een voorbehandelingproces. Tijdens het afronden van deze studie werd bekend dat Neste de stilstaande biodieselfabriek in Sluiskil koopt.⁹ Deze fabriek was al ontworpen als multi-feedstockfabriek die deels op afvalstoffen werkt. Neste gaat de locatie gebruiken voor opslag en voorbehandeling van hernieuwbare grondstoffen, naar mag worden aangenomen

⁹ <http://www.pzc.nl/regio/zeeuws-nieuws/fins-concern-neste-oil-koopt-biodieselfabriek-in-sluiskil-1.6784270>

voor de HVO-fabriek in Rotterdam (zie 3.2). Het gaat volgens de berichtgeving om grondstoffen die bestaan uit afval en moeilijk afbreekbare resten. Overigens is de beschikbaarheid van UCO beperkt; Nederland importeert uit vrijwel heel Europa.

De kwaliteiten van UCO's verschillen en dat vraagt verschillende oplossingen. Naast voorbehandeling kan dat ook destillatie van biodiesel vergen. Sommige biodieselproducenten destilleren de biodiesel om de zuiverheid te verhogen, koudweereigenschappen te verbeteren en daarmee bijmenging bij fossiele diesel te vergemakkelijken. In reguliere processen wordt biodiesel gewassen om verontreinigingen te verwijderen en daarna gedroogd, maar destilleren is geen gangbare stap. Het toevoegen van destillatiecapaciteit aan biodieselfabrieken vergt aanzienlijke investeringen.¹⁰

Naast gebruikte frituurvetten staan laagwaardige "high FFA feedstocks" sterk in de belangstelling. Dit zijn oliën en vetten met hoog gehalte aan vrije vetzuren, zoals dierlijke vetten, slechte UCO-kwaliteiten ("brown grease"), maïsolie en verscheidene niet-eetbare oliën. Deze grondstoffen zijn tientallen procenten goedkoper, maar niet geschikt voor gangbare biodieselproductie omdat hoog vrij vetzuurgehalte meer verzeping met de katalysator (loog) tot gevolg heeft ten koste van de kwaliteit van de biodiesel.¹¹ Gebruik van deze goedkopere grondstoffen kan leiden tot 25% kostenreductie voor biodiesel, "all other production costs kept equal".¹² Door de extra kosten voor de pretreatment zal deze 25% reductie niet gehaald worden. Productie met dergelijke grondstoffen biedt met name de biodieselfabrieken in de zeehavens kansen vanwege de aanvoermogelijkheden.

Er zijn diverse aanbieders van retrofit-technologie voor bestaande biodieselfabrieken om "high FFA" grondstoffen te kunnen verwerken met lagere procesinputs (methanol, zwavelzuur), hogere opbrengsten en zuiverder en dus waardevoller nevenproduct glycerine. Voorbeelden (niet uitputtend):¹³

- Novozymes enzymen (katalysatoren).
- TransBiodiesel enzymen. TransBiodiesel meldt: "The current cost is \$150-300 per kg enzyme, depending on volume. Total enzyme cost to produce 40,000 tons of biodiesel is around \$2 million."
- BDI BioDiesel Retrofit Technology.
- Enhanced Biofuels retrofit reactor systems.
- Methes Energies eigen katalysator.
- Benefuel ENSEL Biorefining proces

¹⁰ Een voorbeeld is REG, dat dit jaar \$13 mio en \$34 mio investeerde in upgrades van twee fabrieken, met name in destillatiekolommen. www.regi.com

¹¹ Bij <3-4% FFA is verzeping beheersbaar door meer katalysator te gebruiken; tot 10-15% FFAs wordt FFA veelal verwijderd uit de olie door vacuümdistillation en kan verder verwerkt of verkocht worden; bij >15% FFA is voorbehandeling nodig.

¹² I.M. Atadashi et al., 'Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 3275-3285, <http://repository.um.edu.my/23169/1/idris%202.pdf>

¹³ <http://www.novozymes.com/en/solutions/bioenergy/enzymatic-biodiesel>;
<http://www.transbiodiesel.com>; <http://www.bdi-bioenergy.com>; <http://enhancedbiofuels.com>;
<http://www.methes.com>; <http://www.benefuel.net/ensel.php>

In Beatrice, Nebraska is in september een stilstaande biodieselfabriek heropend na een retrofit met ENSEL-technologie van Benefuel.¹⁴ Deze technologie gebruikt een vaste katalysator voor één-staps verestering en omestering van high FFA-grondstoffen met naar eigen zeggen zuiverder productspecificaties waaronder betere koudweereigenschappen voor de biodiesel. De fabriek gaat 200.000 liter biodiesel produceren uit maïsolie (distillers corn oil, DCO), een bijproduct uit de ethanolindustrie. In Kuantan Port, Maleisië is palmolievetzuurdistillaat de beoogde grondstof voor een andere om te bouwen biodieselfabriek. Benefuel beschikt ook over katalysatoren om methylesters verder te verwerken tot bio-afbreekbare smeermiddelen, oleochemische bouwstenen en glycerineproducten.

2.3 Herbestemming biodieselfabrieken voor oleochemie

Oleochemie is de industrietak voor de chemische bewerking van plantaardige en dierlijke oliën en vetten tot basisgrondstoffen. Herbestemming van een biodieselfabriek voor oleochemie is mogelijk maar ligt niet voor de hand.

Biodieselfabrieken zijn ontworpen om een enkel product zo efficiënt mogelijk te maken op grote schaal. De mogelijke producten zijn beperkt tot de aanwezige vetzuursamenstelling in de oliën, en er wordt alleen met methanol gewerkt (soms ethanol). Oleochemische bedrijven splitsen eerst de esters met hydrolyse in vetzuren en alcoholen (200-250°C, 30-60 bar), zuiveren deze tussenproducten, en bouwen dan de esters opnieuw op tot een breed scala aan producten, waaronder hoogwaardige FAME. Dit gebeurt met diverse alcoholen. Deze procesaanpak levert flexibiliteit in producten en een hogere zuiverheid en kwaliteit. De installaties zijn meestal aanzienlijk kleiner dan biodieselfabrieken.

Voor sommige producten kunnen FAME van biodieselkwaliteit als grondstof worden gebruikt, zoals voor oppervlakte-actieve stoffen of sucrose-esters. FAME uit biodieselfabrieken kunnen ook als oplosmiddelen (alternatief voor vluchtige organische stoffen) worden ingezet in de cosmetische en farmaceutische industrie, bij de productie van coatings of bij polymerisatie. Verder worden FAME toegepast bij metaalbewerking en in de landbouw. De marktvraag naar dergelijke producten is echter klein ten opzichte van de overcapaciteit voor FAME-productie. Als smeermiddelen voldoen dergelijke FAME niet omdat hogere kwaliteit wordt gevraagd.

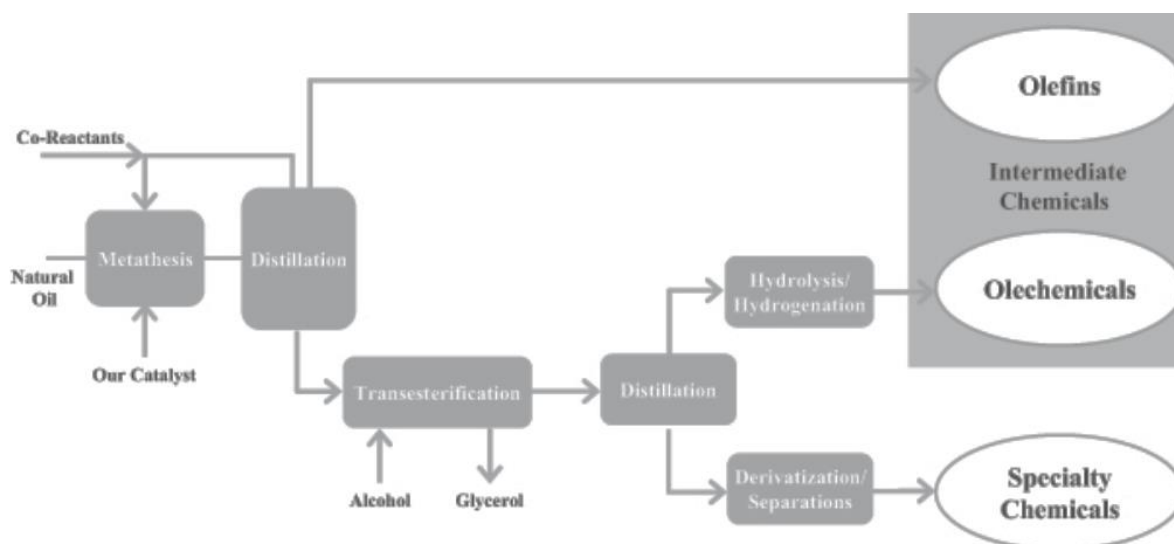
Een alternatieve toepassing voor stilstaande biodieselfabrieken zou het omzetten van plantaardige olie in vetalcoholen kunnen zijn (lange-ketenalcoholen), maar dit vereist waterstof voor hydrogenering na de omestering, en de beperkte flexibiliteit en kwaliteit die kunnen worden behaald met bestaande biodiesel-fabrieken zijn een nadeel ten opzichte van specifiek ontworpen installaties.

In maart 2016 kocht opslagbedrijf Koole Terminals de biodieselfabriek van Biopetrol/Glencore in Pernis. De opslagtanks worden herbestemd voor verhuur van opslagcapaciteit. Een chemieconcern onderzocht de mogelijkheid om de fabriek geschikt te maken voor etoxylering van alcoholen; Koole doet hierover geen mededelingen.¹⁵ Alcohol-etoxylaten worden gebruikt als surfactants (oppervlakte-actieve stoffen) voor was- en schoonmaakmiddelen, cosmetica,

¹⁴ <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/09/22/breakthrough-in-biodiesel-duonix-beatrice-reaches-commercial-scale-with-signature-advances-in-cost-reduction-feedstock-flexibility/>

¹⁵ <http://koole.com/news/>

landbouw en producten voor textiel-, papier- olie- en andere industrieën. Door etoxylering van vetalcoholen worden er meer zuurstofatomen geïntroduceerd, zodat de wateroplosbaarheid toeneemt. De vetalcoholen worden verwarmd en gemengd met etheenoxide en katalysator KOH in een industriële reactor. De temperatuur wordt verhoogd tot 150°C en de druk wordt met stikstof opgevoerd tot 5 bar. Dit zijn dus andere procescondities dan bij omestering naar FAME, maar mogelijk kan de installatie hiervoor worden aangepast. De benodigde etheenoxide zal waarschijnlijk niet biobased zijn, aangezien het doorgaans wordt geproduceerd door partiële oxidatie van etheen.



Afbeelding 6: Processchema Elevance biorefinery

Een ander bedrijf dat aankondigde om stilstaande biodiesel fabrieken te gaan ombouwen is Elevance Renewable Sciences. Deze firma heeft technologie ontwikkeld om metathese-katalyse te gebruiken om nieuwe moleculen te maken uit plantaardige oliën en te gebruiken als bouwstenen voor specialty chemicaliën. Metathese-katalyse is een reactie waarbij een selectieve katalysator dubbele koolstofverbindingen openknipt, waarna de ontstane fragmenten zich onder gecontroleerde procesomstandigheden herordenen tot nieuwe bifunctionele moleculen. Deze bouwsteenmoleculen zijn uitzonderlijk omdat ze de functionele eigenschappen van alkenen (typisch petrochemie) combineren met die van monofunctionele esters of zuren (typisch oleochemie). Omestering met alcoholen biedt vervolgens nog meer productmogelijkheden.¹⁶

Elevance kocht in 2011 een stilstaande biodiesel fabriek in Natchez, Mississippi, om deze om te bouwen met zijn technologie. De bedoeling was om hier alkenen, specialty chemicaliën en oleochemicals te gaan produceren. Redenen om deze locatie te kiezen waren de beschikbaarheid van geschikt personeel, goede logistieke ontsluiting, uitbreidingsruimte, en ondersteuning vanuit de overheid.¹⁷ Recent heeft Elevance de fabriek echter verkocht aan een biodieselproducent. In 2013 was de biodieselproductie al hervat, maar de doorontwikkeling naar chemie leed onder opstartproblemen die werden ondervonden in de Indonesische fabriek waar Elevance samenwerkt met Wilmar (operationeel sinds 2013; verwerking

¹⁶ <http://www.elevance.com/index.php/technology/metathesis>

¹⁷ <http://www.biodieselmagazine.com/articles/7835/elevance-to-convert-idle-biodiesel-plant>

van 180 kton plantaardige oliën; investering \$40 mio). Ook verslechterde de lage aardolieprijs de business case voor de biobased chemicaliën.¹⁸ Elevance was niet bereikbaar voor nadere toelichting.

2.4 Katalytische deoxygenatie

Nog een mogelijkheid voor herbestemming van biodieselfabrieken is lage-temperatuur katalytische deoxygenatie van oliën of vetten. Het verwijderen van zuurstof verbetert de brandstofeigenschappen van de resulterende koolwaterstoffen. Zuurstof kan verwijderd worden als CO (decarbonylatie), als CO₂ (decarboxylatie) en als H₂O (hydrodeoxygenatie met waterstof). De laatste route komt in paragraaf 3.2 aan de orde.

Wageningen Universiteit & Research en Universiteit Utrecht hebben in het Catchbio-programma (2009-2013) routes onderzocht voor katalytische deoxygenatie van plantaardige oliën, met uiteenlopende katalysatoren, met en zonder gebruik van waterstof. Inzet van katalysatoren is een alternatief voor thermische deoxygenatie bij hoge temperatuur, dat veel energie kost en weinig selectief is. Het is ook een alternatief voor hydrogeneren, dat grote hoeveelheden waterstof vraagt bij hoge druk en hoge temperatuur. Verschillende typen katalysatoren blijken onder verschillende condities het meest effectief om zuurstof te verwijderen: heterogene katalysatoren (in suspensie of vastbed) werken het best bij middelhoge temperaturen (boven 250°C), homogene katalysatoren (in oplossing) bij temperaturen tussen 70 en 280°C, en bio-organische (enzymen) bij 20-50°C.¹⁹

Onderzoek aan de WUR liet zien dat deoxygenatie van lange-keten vetzuren zonder waterstof kan in reactie met azijnzuuranhydride en met homogene katalysatoren (palladium in oplossing) bij 110°C en atmosferische druk.²⁰ Dit zijn procescondities die passen bij FAME-biodieselfabrieken.²¹ Het product is een mengsel van terminale alkenen (lange koolwaterstoffen met aan het uiteinde een dubbele verbinding). De nevenproducten azijnzuur en CO kunnen gerecycled worden. Deze alkenen zijn geschikt voor het maken van surfactants, met een marktwaarde >€1.000/ton. De alkenen kunnen ook worden hergeordend met metathese. In principe kunnen de alkenen ook worden gekraakt voor etheenproductie, maar de marktwaarde is dan veel lager. Een moeilijkheid in het gedemonstreerde proces is de scheiding van katalysator en product: de opgeloste katalysator moet worden geïmmobiliseerd. Het proces vereist daarom nog doorontwikkeling voor eventuele toepassing in biodieselfabrieken. Het proces is bewezen met vetzuren en moet mogelijk geschakeld worden na een hydrolysestap die de esters in de plantaardige olie omzet in vetzuren.

Een spin-off van Universiteit van Alberta, Forge Hydrocarbons, commercialiseert een proces dat plantaardige oliën zonder waterstof en zonder katalysatoren omzet in koolwaterstoffen. De olie wordt gemengd met water in een reactor en

¹⁸ <http://www.natchezdemocrat.com/2016/09/01/world-energy-buys-elevances-natchez-facility/>

¹⁹ Gwen J S. Dawes et al., 'Deoxygenation of biobased molecules by decarboxylation and decarbonylation – a review on the role of heterogeneous, homogeneous and bio-catalysis', *Green Chem.*, 2015, 17, 3231.

²⁰ Jérôme Le Nôtre et al., 'Selective preparation of terminal alkenes from aliphatic carboxylic acids by a palladium-catalysed decarbonylation-elimination reaction', *Tetrahedron Letters* 51 (2010) 3712-3715.

²¹ Geopperd door Harry Bitter in presentatie aan Biorenewables Business Platform, 2 april 2016.

door hydrolyse bij 200°C ontstaan vrije vetzuren en glycerol. Na scheiding vindt pyrolyse van de vetzuren plaats (bij 450°C), waarbij de gedeoxygeneerde koolwaterstoffen ontstaan. Na destillatie resulteren 55% diesel, 25% 'gasolene', 5% 'light ends' en 15% CO₂. Forge bouwt nu in Canada voor \$12,7 mio een proeffabriek voor 19 mio liter per jaar.²² De 'gasolene' en 'light ends' zouden geschikt kunnen zijn voor naftakrakers. Bovenstaande procescondities wijken sterk af van biodieselfabrieken, zodat eventuele ombouw niet in aanmerking komt (of het moet nieuwbouw zijn).

2.5 Hydrotreated Vegetable Oil productie

2.5.1 HVO-proces

De reactie van plantaardige en dierlijke oliën en vetten met waterstof in aanwezigheid van metallische katalysatoren is een inmiddels op grote schaal toegepast proces om biokoolwaterstoffen te maken. Het product wordt Hydrotreated (of hydrogenated, of hydrodeoxygenated) Vegetable Oils genoemd: HVO. Dit zijn lange-keten paraffine koolwaterstoffen, vrij van aromaten, zuurstof en zwavel, met een hoog cetanaantal en zeer goede koudweereigenschappen. Daardoor kan het in pure vorm of in hoge percentages bijgemengd bij fossiele diesel gebruikt worden in dieselmotoren, of als jet fuel. Nevenproducten zijn biopropaan, bionafta en soms andere koolwaterstoffen. Onderstaande figuur toont het proces op hoofdlijnen.

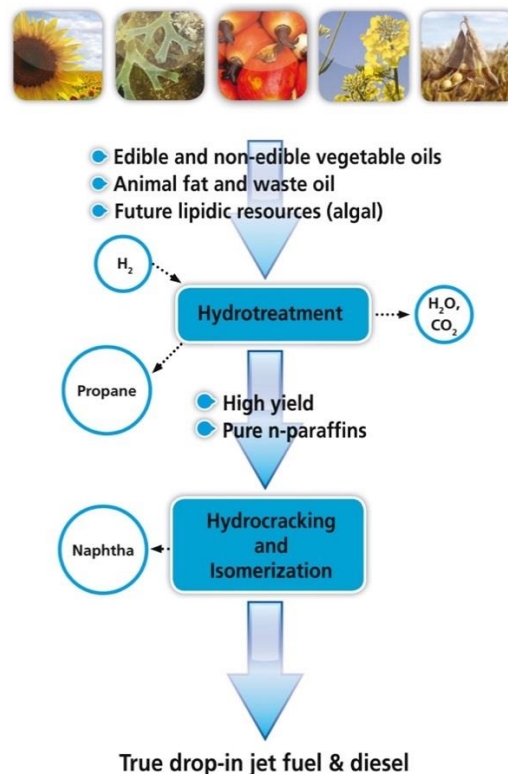
Onder meer de volgende bedrijven bieden HVO-procestechnologie aan: Axens IFP: Vegan (onderstaande afbeelding); ENI/Honeywell UOP: Ecofining; Haldor Topsoe: Hydroflex; Diamond Fuels: Bio-Synfining (Syntroleum) en Neste: NEXBTL, Neste Renewable Diesel. Neste is de HVO-marktleider met vier grootschalige fabrieken in Finland (twee), Rotterdam en Singapore. Neste's eerste HVO-fabriek in Finland met een capaciteit van 190 kton/a, dus in de ordegrootte van FAME biodieselfabrieken, kostte €100 mio.²³ De capaciteit in Rotterdam bedraagt 800 kton/a (investering €670 mio) en wereldwijd 2 mio ton/a. De productiecapaciteit van Neste Rotterdam is ongeveer gelijk aan die van de vier grootste stilstaande Nederlandse biodieselfabrieken bij elkaar.

Neste gebruikt een breed spectrum aan grondstoffen, aanvankelijk vooral palmolie maar in toenemende mate reststromen uit diverse industrieën (eind 2014 64%, doel is 100% in 2017).²⁴ In essentie concurreert HVO met FAME-biodiesel om dezelfde grondstoffen.

²² <http://www.greencarcongress.com/2016/07/20160728-forge.html>;
<http://www.greenchemistrymn.org/sites/greenchemistrymn.org/files/presentations/Tim%20Haig%20-%20Edu%26Business.pdf> (presentatie 19 februari 2015)

²³ http://dvfg.de/fileadmin/user_upload/downloads/Neste_Oil_press_conference_Automechanika_16_September_2014.pdf

²⁴ <http://www.biofuelstp.eu/spm6/docs/petri-lehmus.pdf>



Afbeelding 7: Productieproces Hydrotreated Vegetable Oil (bron: Axens IFP)

De producten van Neste zijn:

- hernieuwbare diesel, C_{14} - C_{20} (2007; om verschil met FAME te maken kiest men niet voor de naam biodiesel maar hernieuwbare diesel). Het is duurder dan FAME maar van betere kwaliteit en in hogere percentages (in theorie tot 100%, maar binnen de dieselspecificatie tot 33%) mengbaar met fossiele diesel.
- Jetfuel voor luchtvaart, C_{11} - C_{13} (2011)
- Bionafta, C_5 - C_{10} (2013), door Neste ook 'biogasoline' genoemd. Het product is zwavelvrij en bijna vrij van aromaten. Het is geschikt als bio-component in benzine en als grondstof voor bioplastics en biochemicalïën.²⁵
- Isoalkanen voor chemie (2014)
- Biopropana voor WKK (aanvankelijk) of propaanhandel (2015).²⁶

In bijlage 1 worden technische en economische data voor de productie van FAME en HVO-diesel vergeleken.

De bionaftafractie maakt een klein deel uit van de output, bij Neste omstreeks 1% op energiebasis. De verhouding tussen de producten (omvang van de fracties) is beïnvloedbaar door de keuze van de katalysator en temperatuur, waarin de lange ketens in meer of mindere mate worden gekraakt. Zo leiden hoge temperaturen en zure katalysatoren tot een grotere bionaftafractie. De hoeveelheid benodigde waterstof hangt af van de soort plantaardige of dierlijke olie of vet (meer waterstof bij hoger aandeel onverzadigde triglyceriden),

²⁵ <https://www.neste.com/na/en/customers/products/renewable-products/nexbt-l-renewable-naphtha-more-sustainable-component>

²⁶ Neste levert biopropana aan Primagaz, <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/neste-oil-levert-bio-lpg-aan-shv>

gekozen katalysator en procescondities.²⁷ UOP geeft op dat hydrotreatment van plantaardige oliën met het Ecofining proces resulteert in 75-85wt% diesel, <1-7wt% bionafta, 4-5wt% propaan en 0-2wt% butaan.²⁸ De massabalans met de inputstroom van 100wt% olie en 1,5-3,8wt% waterstof wordt gesloten met CO₂ en water. In lijn hiermee is dat Total aankondigde een olieraffinaderij om te bouwen met Axens-technologie voor de productie van 500 kton/a HVO waarvan 55 kton/a biopropaan en bionafta (dus 11wt%).²⁹ Een fabriek van Dynamic Fuels (capaciteit ±250 kton) met Syntroleum-technologie zou "83% *Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD)*, 12% *naphtha* and 5% *Liquid Petroleum Gas*" opleveren (waarschijnlijk vol%).³⁰

In principe resulteert de hydrogenering van triglyceriden met korte ketens (C₆-C₁₀) in een zeer hoge fractie bionafta, zonder noodzaak voor kraken. Er zijn echter weinig planten die dergelijke triglycerides (tricaprin C₁₀, tricaprylin C₈, tricaproin C₆) in industrieel benodigde hoeveelheden produceren.³¹

Beschikbaarheid van voldoende hoeveelheden waterstof is een essentiële voorwaarde voor HVO-productie. Die kan worden ingevuld door HVO-fabrieken op of in de buurt van petroleumraffinaderijen te plaatsen (Total Frankrijk, ENI Italië) of nieuwe waterstofproductiecapaciteit te bouwen (Neste Rotterdam). Om Neste van waterstof te voorzien, maar ook voor het eigen pijpleidingsysteem in Noordwest-Europa, investeerde Air Liquide €160 mio in een fabriek met een capaciteit van 130 kton per jaar op de Maasvlakte.

Een ander voorbeeld van een kleinere HVO-fabriek is die van de Finse papierindustrie UPM, gebouwd met Haldor Topsoe technologie. De UPM Lappeenranta Biorefinery begon commerciële productie in januari 2015. Een deel van de grondstoffen is ruwe tallolie, een bijproduct bij de productie van houtpulp uit UPM's eigen pulp-fabrieken die houtresiduen verwerken. De fabriek heeft een capaciteit van 100 kton/a (120 mio liter/a). Er is een kleine nevenstroom van hernieuwbare nafta. De investering bedroeg €175 mio, dus factoren hoger dan voor FAME en ook veel duurder per eenheid productiecapaciteit dan Neste.³²

²⁷ Rogelio Sotelo-Boyás et al., 'Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels', Chapter 8 in: *Hydrogenation* (2012), InTechOpen, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39732.pdf>

²⁸ Tom M. Kalnes et al., 'Green diesel production by hydrotreating renewable feedstocks', *Biofuels Technology* (n.d.),

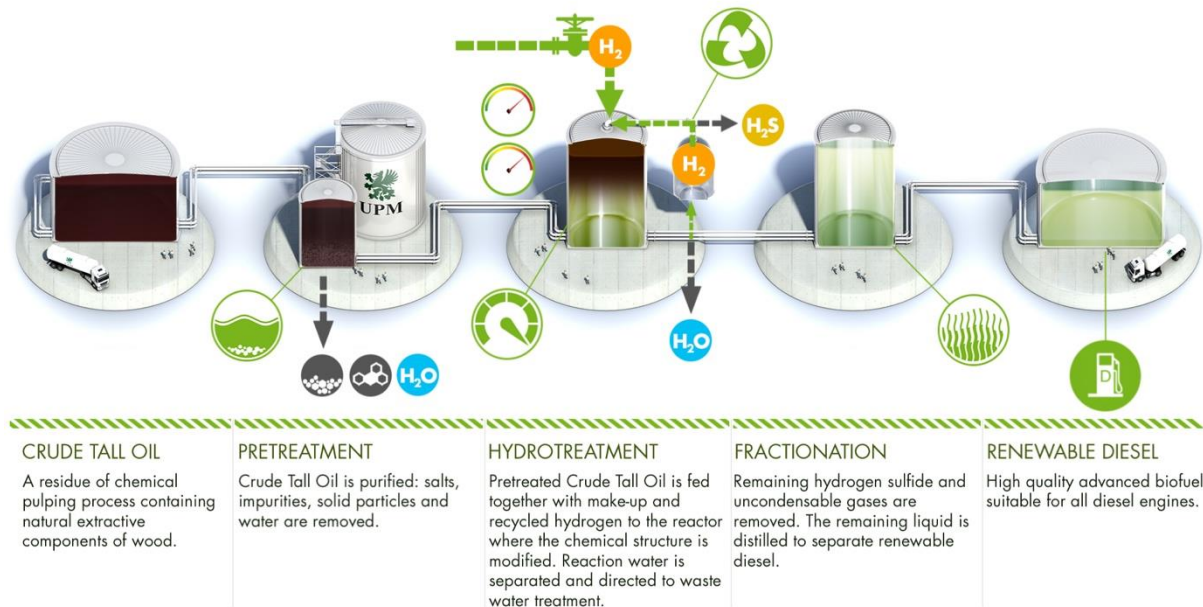
<https://www.uop.com/?document=uop-hydrotreating-green-diesel-tech-paper&download=1>

²⁹ <http://www.argusmedia.com/news/article/?id=1024140>

³⁰ <http://seekingalpha.com/instablog/7360901-robert-wagner/1513521-syntroleums-dynamic-fuels-plant-should-run-baby-run-margins-are-very-solid>

³¹ László Boda et al., 'Catalytic hydroconversion of tricaprylin and caprylic acid as model reaction for biofuel production from triglycerides', *Applied Catalysis A: General* Vol. 374, 1-2, February 2010, 158-169, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X09008345>; Jan C.J. Bart et al., *Biodiesel science and technology. From soil to oil*, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 7, Oxford (2010).

³² http://www.biofuelstp.eu/factsheets/Factsheet_UPM_final.pdf;
<http://www.upmbiofuels.com/Pages/default.aspx>



Afbeelding 8: Schema van productieproces HVO uit tallolie van UPM.

In 2015 bedroeg de productie van HVO 9% van de wereldwijde biodieselmkt, en werd verwacht dat dit binnen 3-5 jaar zou groeien tot 16-23%. Een inventarisatie van bestaande en voorgenomen productiecapaciteit kwam tot 6 mio ton/a HVO, waarvan één-derde in handen van Neste.³³ Met een potentiële bionaftafractie van 1-7wt% is de omvang van nevenstroom bionafta 60-420 kton/a (maar eerder aan de onder- dan aan de bovengrens).

2.5.2 HVO: alternatief voor stilstaande biodieselfabrieken?

Overeenkomsten en verschillen tussen FAME en HVO-productie zijn:

- in principe worden in beide gevallen dezelfde plantaardige en dierlijke oliën en vetten als grondstoffen gebruikt.
- voor FAME is methanol en voor HVO waterstof nodig. Bij FAME-productie is sprake van atmosferische processen bij lage temperaturen (<100°C), terwijl hydroprocessing onder verhoogde druk (±5 bar) en temperatuur (±350°C) plaatsvindt. Er worden dus andersoortige reactoren gebruikt.
- HVO-fabrieken zijn vaak groter maar er zijn ook voorbeelden (Neste, UPM) op de dezelfde schaal als grotere FAME-fabrieken.
- CAPEX en OPEX zijn voor HVO-productie aanmerkelijk groter dan voor FAME-productie. Een Deense studie (bijlage 1) becijferde de CAPEX voor HVO op €19.4/GJ diesel/a en voor FAME op €4,4/GJ diesel/a (factor 4).
- De eindproducten kunnen in beide gevallen per schip of truck worden afgevoerd.

Om HVO te gaan maken in een bestaande biodieselfabriek moet de fabriek fors worden aangepast. Een deel van de assets kan worden hergebruikt, namelijk de opslagtanks (geroerde en verwarmde tanks), eventuele voorbehandeling en logistieke voorzieningen voor vrachtwagens en schepen. Dit kan een besparing opleveren op de investeringen in de HVO-installatie. Een Amerikaanse studie

³³ 'Is HVO the Holy Grail of the world biodiesel market?', September 2015, <https://www.linkedin.com/pulse/hvo-holy-grail-world-biodiesel-market-fabien-hillairet>

geeft een gedetailleerde kostenopbouw voor een biodieselfabriek op basis van sojaolie met capaciteit van 38 mio liter/a (44 kton/a).³⁴ Volgens deze studie maken de bouw van opslagtanks voor grondstoffen en producten één-derde uit van de investering van \$11,3 mio, en de procesapparatuur tweederde.

Nemen we als eerste orde benadering aan dat deze verhouding ook bij grotere fabrieken geldt, dan kan bij hergebruik van opslagtanks van een bestaande 200 kt/a biodieselfabriek waarvoor de totaalinvestering ooit €40 mio bedroeg, zo'n €13 mio worden bespaard op de investering in de ombouw naar een HVO-fabriek. Ten opzichte van de totale benodigde investering in de HVO-installaties (Neste's eerste fabriek kostte €100 mio) is dit slechts een klein deel. De benodigde aanpassing van de fabriek is zo groot dat in feite over een nieuwbouw moet worden gesproken.

Beschikbaarheid van waterstof

Op de locatie moet in elk geval waterstof zijn of komen.³⁵ Volgens UOP is voor per ton plantaardige olie 1,5-3,8wt% waterstof nodig, afhankelijk van de olie.³⁶ Stel de input is 200 kton olie, dan is 3.000-7.600 ton waterstof nodig. 3.000-7.600 ton/a komt overeen met 35,6-90 mio m³/a en omstreeks 4.000-10.000 m³/u. Deze hoeveelheden zijn geen probleem als de locatie ligt aan het netwerk van waterstofpijpleidingen in de Rijnmond, langs de corridor naar Antwerpen, Bergen op Zoom, of Terneuzen. Het netwerk wordt gevoed met waterstof uit de grootschalige omvorming van methaan: autothermische reforming (ATR) en stoom-methaan reforming (SMR). De prijs van waterstof uit SMR is in de orde van 2-3 €/kg.³⁷

Als op een locatie geen waterstof aanwezig is kan dit worden aangevoerd over de weg. De prijs van waterstof dat geleverd wordt door vrachtwagens met tubetrailers van een centrale SMR-unit is 6 €/kg.³⁸ Dit is dus 2-3 keer zo duur als waterstof uit de pijpleidingen. Het zou ook veel transportbewegingen betekenen.³⁹ Ter plekke waterstof maken is dan het alternatief. De meest gangbare manier is uit aardgas, maar uit oogpunt van duurzaamheid is power-to-gas (waterstof) een aantrekkelijker optie. Hierbij wordt hernieuwbare elektriciteit gebruikt om water te scheiden in waterstof en zuurstof (elektrolyse). Power-to-gas staat sterk in de belangstelling omdat het een manier is om hernieuwbare energie tijdelijk op te slaan. De kosten zijn echter voorlopig te hoog. In 2015 bedroegen de productiekosten van waterstof bij een kleinschalige 1,2 MW installatie €6,4/kg. De productiekosten van waterstof bij een grootschalige 100 MW installatie (dus 16 maal groter dan de installatie in Mainz) zouden €4,05/kg bedragen bij voltijdse productie, en €3,33/kg bij productie

³⁴ Michael J. Haas et al., 'A process model to estimate biodiesel production costs', *Bioresource Technology* 97 (2006) 671-678; http://webservices.itcs.umich.edu/mediawiki/algaebiofuel/sites/algaebiofuel/uploads/d/df/Haas_Biodiesel_Process.pdf

³⁵ Het Amerikaanse bedrijf Cetane Energy heeft in 2009 de ombouw van biodieselfabrieken naar HVO-productie onderzocht en concludeerde dat het gebrek aan waterstof ter plekke de showstopper is. <http://biomassmagazine.com/articles/6545/fitting-the-right-retrofit>

³⁶ <https://www.uop.com/?document=uop-hydrorefining-green-diesel-tech-paper&download=1>

³⁷ Thomas D. et al., *Power-to-Gas Roadmap for Flanders*, October 2016, <http://www.power-to-gas.be/roadmap-study>

³⁸ *Power-to-Gas Roadmap for Flanders*, October 2016

³⁹ Met een capaciteit van 4.000 kg vloeibare waterstof per trailer zouden dat 1.900 afleveringen jaar betekenen, en nog meer als waterstof met tube trailers zou worden afgeleverd.

alleen tijdens de rendabele uren (bepaald als 8.070 uren per jaar). Zie de toelichting in bijlage 2.



Afbeelding 9: Pijpleidingennetwerk voor industriële gassen waaronder waterstof (AL) en etheen (ARG, RC2); bron: HbR.

De kostenopbouw van HVO-diesel (bijlage 1) laat zien dat de inkoop van waterstof na de inkoop van de plantaardige oliën de belangrijkste kostenpost is, voor de CAPEX en OPEX. Elke marginale €/kg waterstof werkt in de gemodelleerde HVO-installatie door als €26,7 mio/a kosten en €0,02/liter HVO-diesel.

Biodieselfabriek inzetten voor voorbehandeling bij HVO-productie

Vlak voor het afronden van deze studie werd bekend dat Neste de stilstaande biodieselfabriek in Sluiskil koopt om hier "afval"-oliën en vetten op te slaan en voor te behandelen (zie ook 3.1.2). De biodieselfabriek wordt ingezet voor pre-treatment voor HVO-productie.

Een soortgelijk decentraal model bestaat al langer in Zweden. In de fabriek van SunPine in Piteå wordt ruwe tallolie uit de papierpulpindustrie geraffineerd. Hierbij ontstaat 55% geraffineerde tallolie en 45% tall oil pitch (bio-olie voor verbranding en halffabrikaat voor chemicaliën). Ruwe tallolie bevat 60-70% vetzuren, 20% harszuren en overige neutrale elementen. De raffinage gebeurt door verestering met methanol met zwavelzuur als katalysator, gevolgd door vacuumdestillatie.⁴⁰ De geraffineerde tallolie wordt verscheept naar een olieraffinaderij van Preem in Göteborg voor hydrogenering samen met fossiele olie (co-raffinage). Zo resulteert een diesel met "ingebouwde" biocomponenten.

Deze productieketen is in principe een interessant model voor een stilstaande biodieselfabriek in Nederland, waar omestering met methanol het basisproces is en verestering ook kan plaatsvinden. Als die locatie geen beschikking heeft over waterstof (voorbeeld Amsterdam) zou het halffabrikaat elders gehydrogeneerd kunnen worden. Er zijn echter haken en ogen:

⁴⁰ http://www.chemrec.se/SunPine_producing_tall_oil_diesel.aspx

- Vanwege de genoemde eigenschappen van ruwe tallolie zou een biodieselabriek flink aangepast moeten worden. De fabriek in Piteå is gebouwd volgens een specifiek voor tallolie ontworpen proces. De investeringen door SunPine bedroegen €32 mio voor ±90 kton/a ruwe tallolie.
- Ook in de olieraffinaderij moet worden geïnvesteerd in reactoren om de corrosieve tallolie te hydrogeneren. Dit kostte Preem €23 mio.⁴¹
- Tallolie is beperkt beschikbaar en dan nog uitsluitend in grootschalige bosbouwgebieden. In Zweden komt jaarlijks 200 kton ruwe tallolie vrij en er is concurrentie met andere toepassingen. In Nederland zou voor HVO-productie volgens dit gedecentraliseerde model dan een andere grondstof gekozen moeten worden met hoog vrij vetzurengehalte.

De investeringen door SunPine en Preem samen zijn overigens aanzienlijk lager dan die voor de eerder vermelde eerste HVO-fabriek van Neste met vergelijkbare capaciteit.

3. Bionafta voor etheenkrakers

3.1 Bionafta en andere hernieuwbare feedstocks voor bio-PE

In Europa ligt een netwerk van etheenpijpleidingen, dat zich uitstrekt van Rotterdam via België naar Zuid-Duitsland. Chemiebedrijven in Nederland, België en Duitsland ontvangen hieruit de etheen (of ethyleen) die zij nodig hebben voor de fabricage van hun producten zoals polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP). Toepassingen van PE zijn onder meer plastic flesjes, zakjes, mantels van elektrische kabels, verpakkingsfilm, water- en gasleidingen en technische vezels; het sterkere PP wordt gebruikt voor o.a. auto-onderdelen, tapijten, touw en pijpen. PE en PP zijn niet afbreekbaar, wel recyclebaar (door omsmelting).

Als deze pijplijn wordt gevoed met bio-etheen, kunnen al deze bedrijven een deel van hun productie vergroenen. De pijpleidingen worden op verschillende plekken gevoed met etheen uit naftakrakers (stoomkrakers); in Nederland gaat het om Geleen (Sabic), Moerdijk (Shell) en Terneuzen (Dow).⁴² De naftakrakers leveren naast etheen ook onder meer propeen, buteen en benzeen op.

Nafta is het condensaat dat ontstaat bij het destilleren van ruwe aardolie; het bestaat uit verschillende koolwaterstoffen; lichte nafta (destillatie tot 80°C) gaat tot C₅, zware nafta (destillatie bij 80-170°C) gaat van C₅ tot C₁₀. Afhankelijk van de herkomst van de ruwe aardolie levert destillatie ervan ±20% nafta op. Deze nafta wordt in stoomkrakers verhit waardoor de grondstoffen uiteenvallen in een gasmengsel van kleinere moleculen in kraakfracties C₁ t/m C₁₀. Met name alkenen zijn gewenst: onverzadigde koolwaterstoffen waarin één paar koolstofatomen verbonden is door een dubbele binding, waarmee polymeren gevormd kunnen worden. Scheiding vindt plaats met destillatie. De temperatuur waarbij het scheiden gebeurt, de verblijftijd van de grondstoffen in de ovens en

⁴¹ http://www.chemrec.se/Preem_makes_the_tall_oil_diesel_greener.aspx;
http://www.topsoe.com/sites/default/files/paper_industrial_scale_prod_of_renewable_diesel.ashx_.pdf

⁴² Vergunde productiecapaciteiten in kton/a etheen: Geleen 1.310, Moerdijk 910, Terneuzen 565+580+680.

de stoomverdunding bepalen onder andere welke kraakproducten er ontstaan. Naftakrakers zijn tamelijk flexibel voor grondstoffen.

Etheenproductie zorgt voor uitstoot van 1-1,6 kg CO₂ per kilo etheen, afhankelijk van de grondstof. De toepassing van hernieuwbare grondstoffen verlaagt de carbon footprint van de eindproducten. Ook de in principe eindige beschikbaarheid van goedkope olie is een reden om alternatieven te zoeken.

De enige gecommercialiseerde route naar bio-PE is tot dusver dehydratie van ethanol uit suikerriet in Braskem's 200 kton/a fabriek in Brazilië. Vanwege de lage olieprijs van de afgelopen jaren staakte Braskem de productie totdat de prijsverhouding tussen ethanol en olie zou verbeteren. Dow Chemical stopte plannen voor een soortgelijke 350 kton/a fabriek in Brazilië vanwege de concurrentie van goedkope etheen uit schaliegas.⁴³

SABIC kondigde in 2014 aan om bio-PE en PP te gaan produceren en vermarkten door feedstocks op basis van afvalstromen plantaardige en dierlijke oliën en vetten te verwerken in zijn naftakrakers in Europa, om te beginnen in Geleen. Het ging in eerste instantie om feedstock van een anonieme leverancier met ISCC+-certificering.⁴⁴ ISCC+ staat voor International Sustainability and Carbon Certification Plus en betreft een methodiek om hernieuwbare herkomst en standaarden in de hele waardeketen van bron tot eindproduct te certificeren. ISCC+ volgt het massabalanssysteem: voor elke ton hernieuwbare feedstock voor de kraker kan een proportioneel aandeel van het product geclaimd worden als hernieuwbaar. Informatie over de aard en leverancier van de feedstock evenals andere mogelijke hernieuwbare feedstromen is vertrouwelijk. De eerste toepassing van Sabic's bio-PE was als coating voor kartonnen drankenverpakkingen van Elopak.

3.2 Hernieuwbare feedstocks voor etheenkrakers

Een uitgebreid overzichtsartikel onderscheidt meerdere routes van biomassa naar alkenen voor etheenkrakers via alcoholen, via plantaardige oliën en via biomassavergassing.⁴⁵ Een afstudeerscriptie van Chalmers University in Zweden behandelt ook mogelijke opties voor hernieuwbare stoomkrakervoedingen.⁴⁶

Een logische vervanger van fossiele nafta is een vergelijkbare stroom uit biomassa. Zoals eerder beschreven komt bij het HVO-proces een stroom bionafta vrij van 1-7wt%. Het Material Safety Data Sheet van Neste beschrijft Renewable Naphta als "Hydrocarbons, C5-C7, n-alkanes, isoalkanes, n-haxane rich". Dat HVO-bionafta geschikt is als voeding voor naftakrakers werd aangetoond door Universiteit Gent die de samenstelling van 'renewable naphta' uit het Bio-Synfining proces van Syntroleum onderzocht: 32,6wt% n-paraffines en 60wt% iso-paraffines (waarvan 0,8% aromaten), 6,3wt% naftenen en 0,3wt% olifenen.

⁴³ Doris de Guzman, 'Green in 2016: Bioplastics are growing inside & out', *Plastics Engineering*, March 2016, <http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/march2016/>

⁴⁴ <http://www.icis.com/resources/news/2014/06/23/9793016/special-report-sabic-takes-first-steps-into-renewable-polyolefins/>

⁴⁵ Alessandro Chiericato et al., 'Olefins from Biomass', in: *Chemicals and Fuels from Bio-Based Building Blocks*, First Edition, Edited by Fabrizio Cavani et al., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2016), 3-31, https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527338977_c01.pdf

⁴⁶ Sofie Marton, *Renewable Ethylene A Review of Options for Renewable Steam Cracker Feedstocks*, Chalmers University of Technology, 2013, <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/193712/193712.pdf>

Er werd geen zuurstof gemeten. Na stoomkraken in een proefinstallatie resulteerde 31wt% etheen, 17.5wt% propaan, 15wt% pyrolysebenzine en <1wt% pyrolysis fuel oil (overig: CO₂).⁴⁷

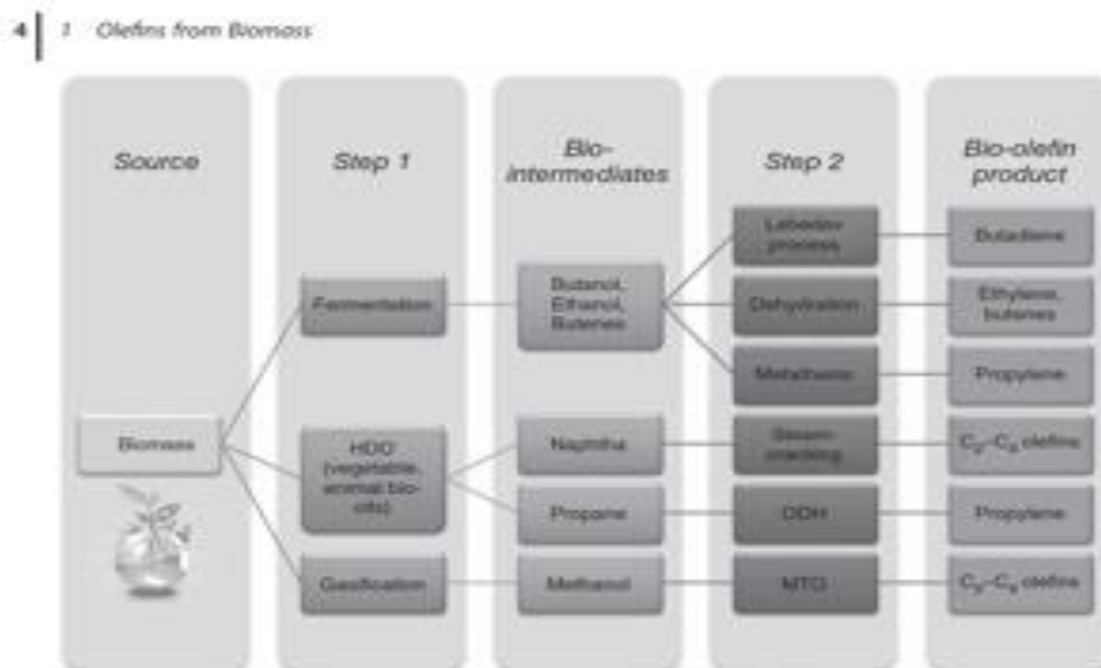


Figure 1.1 Routes from biomass to olefins.

Afbeelding 10: Routes van biomassa naar bio-alkenen (Chieregato et al. 2016).

Ook bij biomassavergassing gevolgd door Fischer-Tropsch synthese vormt bionafta een nevenstroom. UPM is van plan om in Frankrijk een Biomass-to-Liquid fabriek te bouwen voor 105 kton/a biobrandstof, waarvan 80% biodiesel en 20% bionafta.⁴⁸ Een opschaling van wereldwijde productiecapaciteit van Fischer-Tropsch biodiesel zoals zichtbaar bij HVO wordt nog niet verwacht.

Naast bionafta zijn er ook andere hernieuwbare feedstocks mogelijk voor stoomkrakers. Een optie is directe voeding van stoomkrakers met plantaardige olie.⁴⁹ Volgens Tsjechisch laboratoriumonderzoek vallen plantaardige oliën onder procescondities die lijken op die van stoomkrakers (korte verblijftijd bij >800°C) in vergelijkbare alkenen uiteen als feedstocks uit aardolie. Omdat hierbij 15wt% koolstofoxide vrijkomt tegen <1wt% bij aardoliefeedstocks zou plantaardige olie in bestaande stoomkrakers volgens de onderzoekers alleen samen met aardoliefeedstocks verwerkt kunnen worden. Sabic wijst deze optie desniettemin af omdat het teveel risico oplevert voor het bedrijf van de stoomkrakers.

Er zijn ook diverse studies gedaan naar katalytische deoxygenatie van olie en vetten, FAME of vrije vetzuren door pyrolyse of kraken bij lagere temperaturen

⁴⁷ Steven Pyl et al., 'Biomass to olefins: Cracking of renewable naphtha', *The Chemical Engineering Journal* 176-177 (2011) 178-187, <http://fulltext.study/preview/pdf/150686.pdf>

⁴⁸ <http://www.forestplatform.org/en/paper-companies-make-ec-shortlist-of-candidates-for-renewable-energy-funding>

⁴⁹ Petr Zámstný et al., 'Production of olefins via steam cracking of vegetable oils', *Resour. Conserv. Recycl.* 2012 Feb; 59:47-51, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911000449>

als hierboven. Uiteenlopende zure, basische en metallische katalysatoren zijn onderzocht. Meestal is diesel het beoogd product, maar kraken en pyrolyse reacties bij temperaturen tussen 300-500°C resulteren in een molecuulverdeling met hogere fracties korte koolwaterstoffen.⁵⁰

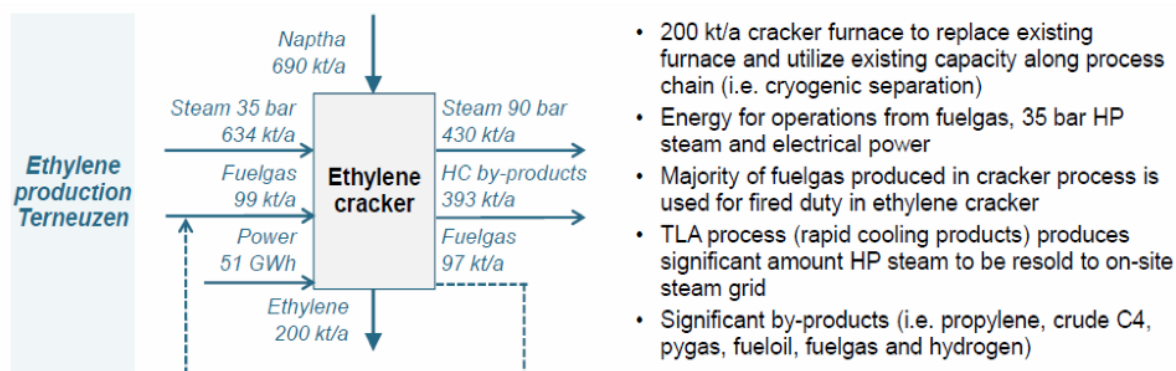
CE Delft onderzocht tenslotte in 2013 de inzet van biopropaan van Neste (naast ethaan en propaan van de GATE LNG-terminal) bij de kraakinstallaties van Dow Terneuzen en Shell Moerdijk. Deze studie is achterhaald omdat Neste inmiddels de biopropaanfractie aan de vloeibaar propaanhandel verkoopt.⁵¹

3.3 Eerdere business cases voor bio-etheen in Nederland

In eerste instantie zette het Platform Groene Grondstoffen in op de potentiële business case van etheenproductie in Nederland met ingevoerde bio-ethanol. Verschillende bedrijven hadden belangstelling maar knelpunt bleek de Europese invoerheffingen voor ethanol. Dit is via diverse kanalen ter discussie gesteld maar de situatie is ongewijzigd. Het Biorenewables Business Platform heeft vervolgens met de suikerindustrie en etheenproducenten de casus onderzocht om op basis van suikerbieten bio-etheen te maken. Dit blijkt onder specifieke omstandigheden en met een hoge 'Green Premium' mogelijk.⁵²

De route via deoxygenatie van plantaardige oliën naar bionafta is een ander alternatief. Om de haalbaarheid van deze route te onderzoeken geeft de business case voor bio-etheen uit suikerbieten nuttige informatie, hoewel de achterliggende getallen vanwege NDA's niet beschikbaar zijn. Met name de referentiecassus voor fossiele etheen is bruikbaar om de casus van deoxygenatie van plantaardige oliën naar bionafta mee te vergelijken.

De referentiecassus is hieronder weergegeven.



Afbeelding 11: Referentiecassus etheenproductie uit (fossiele) nafta

De Net Present Value opbouw van de referentiecassus ziet er als volgt uit.

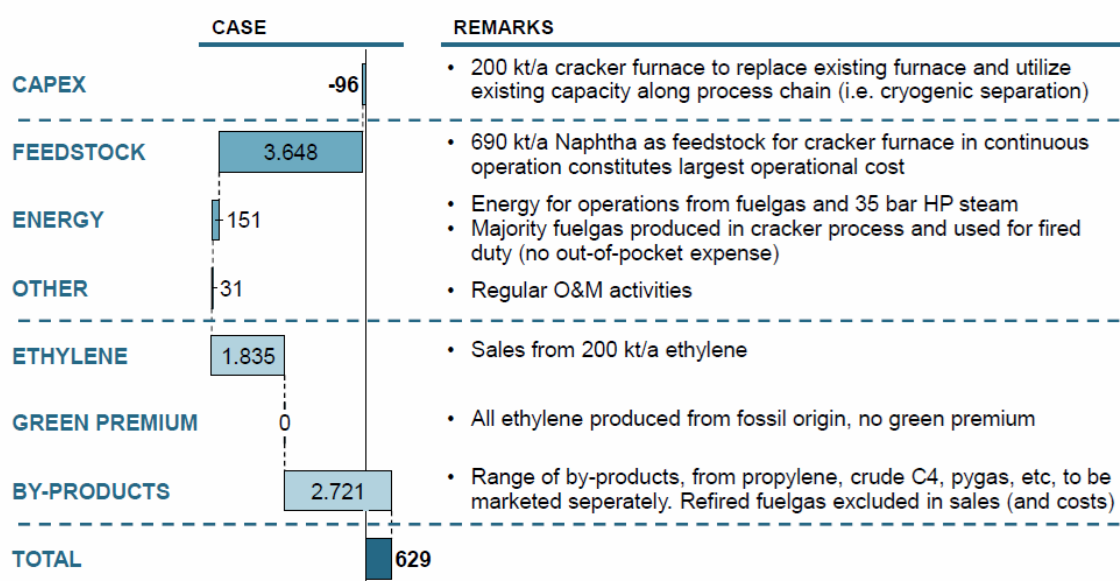
⁵⁰ KO Albrecht, RT Hallen, A Brief Literature Overview of Various Routes to Biorenewable Fuels from Lipids for the National Alliance for Advanced Biofuels and Bio-products (NAABB) Consortium, Pacific Northwest National Laboratory, March 2011,

http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20279.pdf

⁵¹ A. (Ab) de Buck et al., *Reststromen propaan en ethaan als grondstof in kraakinstallaties. Een verkenning*, Delft, CE Delft, oktober 2013

⁵² Biorenewables Business Platform, *Economical feasibility of the sugarbeet-to-ethylene value chain in Zuid-West Nederland*, May 2012, <http://www.biobasedeconomy.nl/wp-content/uploads/2012/06/Van-suiker-tot-ethyleen-BBP-2012.pdf>

Business case NPV breakdown [m EUR]



Afbeelding 12: Business case referentiecassus etheenproductie uit nafta

Uit beide figuren kunnen we afleiden dat in de referentiecassus 690 kton/a nafta wordt ingekocht voor €3.648 mio, dus €529/ton. Dit bedrag werd ook gekozen als referentie in de aangehaalde studie van CE Delft (€525/ton, de gemiddelde prijs is de voorafgaande 5 jaar). Dit is fors hoger dan de prijzen in december 2016 (omstreeks €430/ton).⁵³

Gezien deze prijzen is duidelijk dat de hoge kostprijs van plantaardige oliën (zie grafiek in afbeelding 5) de inzet ervan in stoomkrakers voor bio-PE belemmert (afgezien van technische haalbaarheid). De inzet van de nevenstroom bionafta uit HVO wordt hierna besproken. De economische haalbaarheid van inzet van andere hernieuwbare feedstocks dan plantaardige oliën is voor deze studie niet onderzocht.

3.4 Economische haalbaarheid bio-etheen uit HVO-bionafta

Sabir heeft een niet bekend gemaakte biomassafeedstock verwerkt in zijn naftakraker in Geleen. Dit is zonder problemen omgezet tot etheen samen met fossiele nafta (als "drop-in feedstock"). De naftakrakers van Sabir zijn ontworpen om veel flexibiliteit te bieden. Sabir is continu op zoek naar feedstromen voor de etheenkrakers, en inzet van biostromen is een onderzoeksthema in de R&D. Sabir kan grondstoffen aanvoeren met een eigen pijpleiding uit de havens van Antwerpen en Rotterdam naar Geleen. Essentieel is dat er geen zuurstof in de feedstock zit, en geen contaminanten zoals zware metalen en chloor. Elke batch die binnenkomt wordt geanalyseerd. Door opmengen kunnen mindere stromen toch worden gebruikt, maar hier zijn grenzen aan.

De casus heeft bewezen dat op deze wijze bio-PE geproduceerd kan worden via certificering van de inputstroom, maar voor een permanente oplossing is een goedkopere feedstock nodig in voldoende grote volumina, aldus Sabir. Er is wel een toenemende vraag van klanten-van-klanten naar duurzame oplossingen,

⁵³ <http://www.quotenet.com/commodities/naphtha>

maar beperkte bereidheid om er dan ook meer voor te betalen. Sabic laat zich niet uit over productprijzen van bio-PE.

Nemen we als feedstock bionafta uit HVO-productie, dan is dit te beschouwen als een pure drop-in feedstock, en dan is de veronderstelling dat de andere kostenposten en inkomsten voor nevenproducten ongewijzigd blijven ten opzichte van de referentie business case voor etheenproductie. In bijlage 1 wordt berekend dat de inkomsten uit bionafta uit HVO-productie €587/ton bedragen volgens een studie voor het Danish Energy Agency met medewerking van Neste. Dat deze prijs actueel van toepassing is wordt niet bevestigd; Neste was niet bereikbaar voor inlichtingen of reactie op bevindingen.

Deze prijs zou ten opzichte van de referentieprij voor fossiele etheen uit eerdere studies (€529/ton) meerkosten van €58/ton betekenen, oftewel een groene premie van 11%. Dit is veel minder dan nodig bleek in de eerder onderzochte biobased etheencasus uit inheemse suikerbietenethanol, destijds 30-50%.⁵⁴ Ten opzichte van de actuele naftaprijs (€430/ton) gaat het in deze etheen uit bionafta casus om meerkosten van €157/ton, oftewel 36% groene meerkosten/premie.

Toepassing voor krakers moet concurreren tegen andere toepassingen zoals in transport. Bionafta heeft een hoge dampspanning en kan daarom niet of slechts in kleine hoeveelheden in de winter worden bijgemengd bij benzine. Volgens HVO-producenten kan bionafta wel samen met bio-ethanol worden geblend in benzine tot (samen) 30%. Bionafta en ethanol compenseren elkaars eigenschappen: ethanol heeft lage dampspanning, lage energiedichtheid en hoog octaangetal, bij bionafta is het andersom, en in combinatie is het mogelijk om aan de brandstofsspecificaties te voldoen. Het bijmengen van bionafta beperkt ook het aandeel zuurstof in de brandstof, dat toeneemt door ethanol.⁵⁵

Ethanol is op energiebasis een duurdere hernieuwbare brandstof dan bionafta. Als bionafta in plaats van ethanol bij benzine kan worden gemengd trekt de marktprijs van ethanol de prijs van bionafta omhoog. Zijn bionafta en ethanol echter aanvullende componenten dan gaat dit niet op. Bij een ethanolprijs van 500 €/m³ (23,5 €/GJ) zou bionafta ruim 1.100 €/ton kosten, dus veel meer dan de eerdergenoemde 587 €/ton. Als blenders niet op energiebasis rekenen maar op volumebasis (deze praktijk komt voor) mag bionafta 765 €/ton kosten om een gelijke literprijs als ethanol te bereiken -- ook nog ruim boven 587 €/ton.

Kortom, als HVO-bionafta als biocomponent in benzine benut kan worden is de toepassing via naftakrakers voor bioplastics onbetaalbaar.

4. Conclusies

Er zijn verschillende mogelijkheden om FAME-biodieselfabrieken weer in gebruik te nemen.

⁵⁴ Volgens een artikel in *Plastics Engineering* March 2016, pag. 19 gold deze premie van 30-50% op de prijs van conventioneel PE ook voor bio-PE van Braskem. http://s3.amazonaws.com/rdcms-spe/files/production/public/PlasticsEngineering/Images/PENG_MARCH2016_LR.pdf

⁵⁵ Patent No: US 8,558,042 B2 (Syntroleum Corporation, 2013; ook: Päivi T. Aakko-Saksa, Leena Rantanen-Kolehmainen, and Eija Skyttä (2014) "Ethanol, Isobutanol, and Biohydrocarbons as Gasoline Components in Relation to Gaseous Emissions and Particulate Matter" *Environmental Science & Technology* 48 (17), 10489-10496 doi: 10.1021/es501381h

Herstart als biodieselfabriek

Door aanpassingen aan de installatie (voorbewerking, retrofit-technologie bij de omestering, destillatie) kunnen goedkopere grondstoffen gebruikt worden zodat de producenten hun marktpositie kunnen verbeteren. Weliswaar is er overcapaciteit op de Europese biodieselmkt maar er is door de dubbeltelling (zolang deze bestaat) en door de publieke opinie die zich tegen inzet van voedingsgewassen heeft gekeerd vraag naar biodiesel uit reststromen. Het verplichte percentage hernieuwbare energie in transport zal ook stijgen.

Oleochemie

Herbestemming van de biodieselfabrieken in de oleochemie ligt niet voor de hand omdat daar vergeleken met het eenvoudige proces van een biodieselfabriek een flexibeler proces met meer productmogelijkheden en zuiveringsstappen gevraagd wordt. De veresteringsfabrieken zijn veelal aanmerkelijk kleiner dan de biodieselfabrieken. Er loopt wel onderzoek naar ombouw van een biodieselfabriek voor etoxylering van vetalcoholen. Pogingen van Elevance Renewable Resources om biodieselfabrieken om te bouwen voor metathese op basis van plantaardige oliën zijn gestaakt.

Katalytische deoxygenatie

Katalytische deoxygenatie zonder waterstof bij lage temperatuur van lange-keten vetzuren naar alkenen zou kunnen plaatsvinden in biodieselfabrieken, maar dit door WUR op laboratoriumschaal gedemonstreerde proces is nog niet uitontwikkeld. De alkenen kunnen hoogwaardig worden gebruikt voor productie van surfactants. Het vraagt waarschijnlijk een voorgeschakelde hydrolysestap.

Het Canadese Forge Hydrocarbons ontwikkelt een deoxygenatieproces voor oliën en vetten zonder waterstof en zonder katalysatoren via hydrolyse gevolgd door pyrolyse. De benodigde reacties verschillen sterk van het proces in biodieselfabrieken, zodat ombouw ook in dit geval geen optie is.

Ombouw naar HVO

De ombouw van een FAME-biodieselfabriek naar een HVO-fabriek voor renewable diesel of jet fuel is in principe mogelijk: het gaat om commercieel beschikbare technologie van meerdere aanbieders en verkrijgbaar op uiteenlopende schaal. De benodigde aanpassing van de fabriek en het investeringsvolume is zo groot dat in feite over een nieuwbouw moet worden gesproken.

Essentieel is de beschikbaarheid van waterstof ter plekke voor hydrogenering van de olie of vet. De keuze van een locatie in een bestaand industriecluster met goedkope waterstof is gunstiger voor de business case dan de keuze voor een locatie waar een biodieselfabriek omgebouwd kan worden met behoud van opslagtanks en logistieke faciliteiten. De goedkoopste waterstof (uit aardgas) wordt geleverd door het pijpleidingennetwerk in Rijnmond, Zuidwest-Nederland en Vlaanderen. Op locaties die niet aan dit netwerk liggen kan men duurzame waterstof maken via de power-to-gas route, maar dit is aanmerkelijk duurder en vraagt een installatie die factoren groter is dan de grootste power-to-gas installatie van vandaag. Nieuwbouw op een locatie naar keuze in plaats van ombouw op een gegeven locatie geeft ook de vrijheid om op grotere schaal te produceren.

Biodieselfabrieken kunnen worden benut als voorbehandelingslocatie in een gedecentraliseerd model van HVO-productie. Neste kocht een multifeedstock-biodieselinstallatie om de aanwezige opslag- en voorbehandelingsfaciliteiten.

Ondanks overcapaciteit voor biodieselproductie en het duurdere product zijn er kansen voor aanvullende HVO-productie vanwege de hogere productkwaliteit en een latente vraag in luchtvaart en scheepvaart (zodra economisch haalbaar).

Bionafta voor krakers

Het HVO-proces levert een bionaftafractie op van 1-7wt% afhankelijk van de leverancier van het proces en de gekozen procescondities. De waarde van de dieselfractie en ook de jet fuel fractie is hoger dan van de bionaftafractie, zodat men zal optimaliseren naar deze producten. Bionafta uit deoxygenatie van plantaardige oliën is geschikt als hernieuwbare voeding voor naftakrakers en daarmee als grondstof voor bioplastic (etheen met certificaat op basis van massabalans). Sabic heeft laten zien met een niet bekend gemaakte voeding op deze wijze bio-PE te kunnen leveren. Sabic accepteert bionafta als voeding. Inzet van bionafta uit deoxygenatie van plantaardige oliën als voeding voor krakers is dus technisch haalbaar.

Omdat het bij bionafta gaat om een nevenstroom, en omdat de wereldwijde productiecapaciteit voor HVO sterk groeit, is de verwachting in de markt dat bionafta tegen acceptabele prijzen beschikbaar kan komen. Een Deense studie met medewerking van Neste becijferde de waarde van bionafta uit een gemodelleerde Neste-fabriek op 587 €/ton.

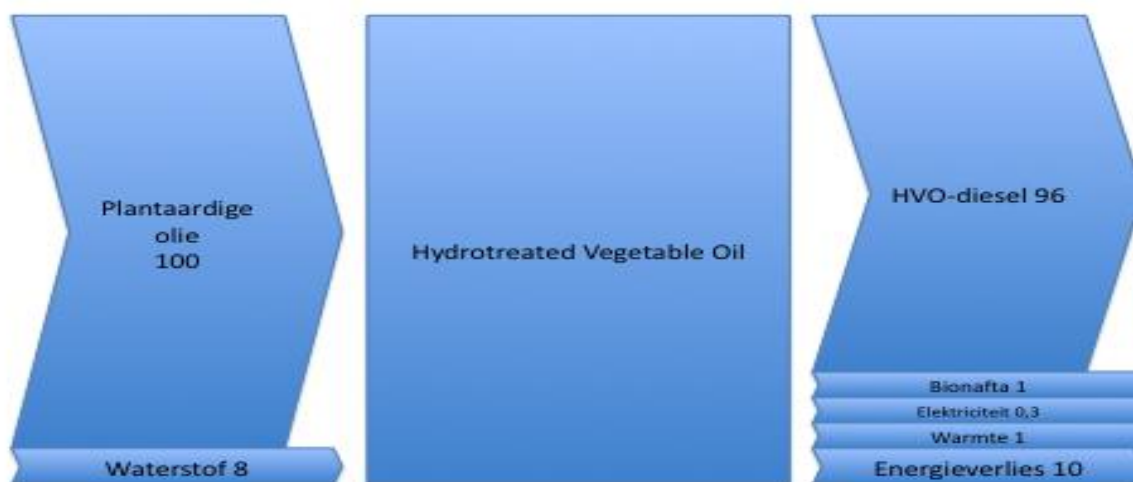
Deze prijs zou ten opzichte van de referentieprij voor etheen uit eerdere studie (529 €/ton) meerkosten van €58/ton betekenen, oftewel een groene premie van 11%. Dit is veel minder dan nodig bleek in de eerder onderzochte biobased etheencasus uit inheemse suikerbietenethanol, destijds 30-50%. Ten opzichte van de actuele naftaprijs gaat het om meerkosten van €157/ton, oftewel 36% groene premie.

Toepassing voor krakers moet echter concurreren tegen andere toepassingen zoals in transport. Bionafta heeft een hoge dampspanning en kan daarom niet of slechts in kleine hoeveelheden in de winter worden bijgemengd bij benzine, maar volgens HVO-producenten kan bionafta wel samen met bio-ethanol worden geblend in benzine tot (samen) 30%. Ethanol is op energiebasis een duurdere hernieuwbare brandstof dan bionafta. Als bionafta in plaats van ethanol bij benzine kan worden gemengd trekt de marktprijs van ethanol de prijs van bionafta omhoog en wordt bionafta onbereikbaar voor de bio-PE route.

Vanwege de lage kosten van PE-productie in een gedurende decennia geoptimaliseerd systeem, en de hoge kosten van geschikte biomassagrondstoffen, is bio-PE voorlopig niet haalbaar. Technisch en organisatorisch is het bewezen, maar de economische haalbaarheid van bionafta voor plastics wordt grotendeels bepaald door het overheidsbeleid dat inzet van biomassa voor de energie- en transportsector stimuleert. Voor de bulkchemie is de concurrentie met die markten te groot. Voor een doorbraak voor bio-PE is een gelijk speelveld nodig tussen de sectoren, met dezelfde stimulansen.

Bijlage 1: Technische en economische parameters HVO-productie

Onderstaand Sankey-diagram met de energiebalans en de tabel met informatie over typische capaciteit, investering, efficiënties, operationele kosten e.d. zijn opgesteld voor het Danish Energy Agency met input van Neste.⁵⁶ Ter vergelijking zijn ook waarden voor FAME biodiesel in de tabel opgenomen.



Afbeelding B1: Sankey-diagram van HVO-productie

Het nevenproduct 'gasoline' is de bionaftafractie. Dit maakt dus volgens deze studie een klein deel uit van de output, omstreeks 1% op energiebasis. De verhouding tussen de producten (omvang van de fracties) is echter beïnvloedbaar door de keuze van de katalysator en temperatuur, waarin de lange ketens in meer of mindere mate worden gekraakt. Zo leiden hoge temperaturen en zure katalysatoren tot een grotere bionaftafractie. De hoeveelheid benodigde waterstof hangt af van de soort plantaardige of dierlijke olie of vet (meer waterstof bij hoger aandeel onverzadigde triglyceriden), gekozen katalysator en procescondities.⁵⁷

De outputstroom elektriciteit en warmte ontstaat na verbranding van nevenproduct biopropaan, maar dit vervalt als het propaan afzonderlijk op de markt wordt gebracht.

⁵⁶ Force Technology, *Technology data for advanced bioenergy fuels*, Danish Energy Agency, 2013, https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/I_teknologikatalog_for_konvertering_af_biomasse_til_biobraendsler_2014.pdf

⁵⁷ Rogelio Sotelo-Boyás et al., 'Hydroconversion of Triglycerides into Green Liquid Fuels', Chapter 8 in: *Hydrogenation* (2012), InTechOpen, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39732.pdf>

FAME Biodiesel by transesterification of vegetable oil vs. HVO Diesel by Hydrotreatment of vegetable oil			
Technical data 2015		FAME	HVO
Typical plant size, (bio)diesel	t/a	200,000	800,000
	GJ/a	7,460,000	35,200,000
Vegetable oil consumption	GJ/GJ (bio)diesel	1.0	1.04
	t/t (bio)diesel	1.0	1.23
Methanol consumption / hydrogen consumption	GJ/GJ biodiesel	0.1	0.09
	t/t biodiesel	0.11	0.031
Total energy input, raw materials	GJ/GJ (bio)diesel	1.1	1.13
Electricity input	GJ/GJ biodiesel	0.006	-
Heat input	GJ/GJ biodiesel	0.04	-
By-product, glycerol / by-product 'gasoline'	GJ/GJ (bio)diesel	0.05	0.01
Available electricity	GJ/GJ diesel	-	0.003
Available heat	GJ/GJ diesel	-	0.011
Process energy efficiency, (bio)diesel	%	91.0	88.6
Total process energy efficiency, (bio)diesel + by-products	%	95.6	90.8
Economic data			
Capital cost	€/GJ diesel /a	4.4	19.4
Capital cost, for this typical plant size	€ mio	32.8	683
O & M (3% of CAPEX)	€/GJ diesel /a	0.13	0.58
O & M, for this typical plant size	€ mio/a	0.97	20.4

Tabel B1. Technische en economische data voor productie van FAME en HVO-diesel

Met deze data heeft het eveneens Deense Ea Energy Analyses een kostprijs berekend voor HVO uit koolzaad (hoewel dit geen voor de hand liggende grondstof is).⁵⁸

- Men komt met een koolzaadolieprijs van €680/ton (€725/ton inclusief transport en opslag) en inkomsten voor nevenproducten meegerekend, tot een prijs van €25,9/GJ oftewel €0,89/liter HVO-diesel resp. €1.144/ton.⁵⁹ De inkoopprijs van de koolzaadolie maakt 80% uit van deze prijs. Ter vergelijking: de berekende productieprijs van FAME biodiesel met dezelfde koolzaadolieprijs is €23.7/GJ oftewel €0,79/liter resp. €887/ton.
- De inkomsten uit 'by-product gasoline', dus bionafta, bedragen volgens deze studie €4,3 mio per jaar, oftewel €587/ton (bij 48,1 MJ/kg).
- Voor de hydrotreatment wordt 26,7 kton/a ingekocht voor €112,2 mio/a, dus tegen een inkoopprijs van €4,2/kg. Deze kostenpost is hoger dan de jaarlijkse CAPEX en OPEX samen. Deze inkoopprijs is voor de Rotterdamse Neste-fabriek overigens te hoog, zie verder.

Volgens afbeelding 5 liggen de prijzen van afvaloliën en -vetten zo'n 20-30% onder die van koolzaadolie. Aan de andere kant zijn de koolzaadolieprijzen ook hoger geweest dan waarmee in bovenstaande casus is gerekend.

⁵⁸ Ea Energy Analyses, *Fuel costs – Production, distribution and infrastructure costs used in the Economic Analysis in Grøn Roadmap 2030*, 19-11-2015, http://www.ea-energianalyse.dk/reports/1459_fuel_costs_production_distribution_infrastructure.pdf.

⁵⁹ Dit valt binnen de bandbreedte van productiekosten bij uiteenlopende oliën die volgens een benchmarkstudie liggen tussen 22 en 32 €/GJ. Müller-Langer, F., Majer, S. & O'Keeffe, S. 'Benchmarking biofuels—a comparison of technical, economic and environmental indicators', *Energy Sustain Soc* (2014) 4: 20, <http://link.springer.com/article/10.1186/s13705-014-0020-x>

Bijlage 2: Power-to-gas waterstof voor HVO-productie

In paragraaf 3.2.2 is een casus beschreven van een HVO-installatie voor 200 kton plantaardige olie, de grootteorde van een grote biodieselfabriek, dan is 3.000-7.600 ton waterstof nodig. Als op een locatie geen waterstof aanwezig is kan dit worden aangevoerd over de weg, of ter plekke worden gemaakt.

De meest gangbare manier is uit aardgas, maar uit oogpunt van duurzaamheid is power-to-gas (waterstof) een aantrekkelijker optie. Hierbij wordt hernieuwbare elektriciteit gebruikt om water te scheiden in waterstof en zuurstof (elektrolyse). Power-to-gas staat sterk in de belangstelling omdat het een manier is om hernieuwbare energie tijdelijk op te slaan. De behoefte aan buffering komt voort uit de onbalans tussen fluctuerend aanbod van energie uit hernieuwbare bronnen (wind, zonneschijn) en fluctuerende energievraag (gebruik door de tijd). De energieoverschotten, waarbij er meer aanbod dan vraag is worden aangeduid met 'curtailment'.

Een voorbeeld is de power-to-gas (waterstof) installatie op Energiepark Mainz, de grootste tot nu toe (naast een project van Audi waar de waterstof wordt gemethaniseerd).⁶⁰ In Mainz leveren 4 windmolens van 2 MW elk elektriciteit aan electrolyzers met opgesteld vermogen van 6 MW. 5 electrolyzers van Siemens maken in continubedrijf 1.125 m³/u waterstof. Dit is dus ongeveer één-vierde tot één-negende van de benodigde hoeveelheid voor hydrotreatment van 200 kton plantaardige olie. De projectkosten bedragen €17 mio. De waterstof wordt geleverd aan tankstations en in het aardgasnet ingevoerd.



Afbeelding B2: Waterstofproductie (power-to-gas) op Industriepark Mainz

⁶⁰ <http://www.energiepark-mainz.de/wissen/technische-daten/>; Een Siemens Silyzer 200 electrolyser met 1,25 MW vermogen in continubedrijf (piek 2 MW) maakt 225 Nm³/u waterstof. <http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/pem-electrolyzer/silyzer/pages/silyzer.aspx>

In Nederland zijn nog geen power-to-gas projecten gerealiseerd. In 2014 werden plannen onthuld voor een 12 MW installatie (dus tweemaal zo groot als de Duitse installatie) die waterstof en syngas moet produceren voor de chemische industrie in Delfzijl met inzet van overschotten energie uit wind en zon. Er is een intentieverklaring opgesteld door Torrgas, Siemens, Stedin, Gasunie, A.Hak, Hanzehogeschool / EnTranCe en stichting Energy Valley.⁶¹

In de Power to Gas Roadmap voor Vlaanderen is de business case van power-to-gas installaties voor industriële waterstoflevering uitgewerkt voor 2015, 2030 en 2050. In 2015 bedragen de productiekosten van waterstof bij een kleinschalige 1,2 MW installatie €6,4/kg. De productiekosten van waterstof bij een grootschalige 100 MW installatie (dus 16 maal groter dan de installatie in Mainz) zouden €4,05/kg bedragen bij voltijdse productie, en €3,33/kg bij productie alleen tijdens de rendabele uren (bepaald als 8.070 uren per jaar). De voornaamste kostencomponent is de prijs van elektriciteit (inclusief distributie en netkosten). Op termijn kunnen de kosten dalen en is ook de verwachting dat waterstof uit aardgas duurder wordt, waardoor rendabele business cases in zicht komen. Voor de korte termijn is waterstof uit power-to-gas echter aanzienlijk duurder dan waterstof uit het Nederlands-Vlaamse pijpleidingnetwerk (€2-3/kg).

Casus (2015)	Kleinschalig	Grootschalig
Elektriciteit voor electrolyser	1.2 MW	100 MW
Jaarlijkse bedrijfsuren electrolyser	8.497 (baseload bedrijf @ 97% beschikbaarheid)	
Annual Jaarlijkse waterstofproductie	± 2.000.000 Nm ³ bij lage druk (20 bar)	± 170.000.000 Nm ³ bij lage druk (20 bar)
Type electrolyser	Kleinschalige PEM	Grootschalige PEM
Opslag	CAPEX voor opslag van min. 2 dagen consumptie in tube trailer, bij 200 bar. Geen compressiekosten of OPEX voor deze opslag.	Geen opslag, geen compressie
Kosten van werken	€50.000	€5.000.000
Aansluiting op elektriciteitsnet	€50.000 (beperkt omdat industrielocatie al aansluiting heeft)	€2.000.000 (beperkt omdat industrielocatie al aansluiting heeft)
Elektriciteitsprijs	Volgens prijsduurcurves (mid scenario voor 2030 en 2050) for België (commodity) + 10% (leveranciersmarge) + 33,04 €/MWh (netwerkkosten en heffingen voor 36 kV aangesloten klant, met jaarlijkse afname van 50 GWh, of ± 5 maal het gebruik van de electrolyser)	Volgens prijsduurcurves (mid scenario voor 2030 en 2050) for België (commodity) + 10% (leveranciersmarge) + 7,26 €/MWh (netwerkkosten en heffingen voor 150 kV aangesloten klant, met jaarlijkse afname van 4 TWh)
Kosten van waterstof	€6,4/kg	€4,05/kg bij voltijdse productie, en €3,33/kg bij productie alleen tijdens de rendabele uren (8.070 uren per jaar).

Tabel B2: Kostenopbouw power-to-gas waterstofproductie voor industrie (2015)

⁶¹ <https://www.energyvalley.nl/nieuws/eerste-grootschalige-power-to-gas-installatie-in-delfzijl>

De kostenopbouw van HVO-diesel liet zien dat de inkoop van waterstof na de inkoop van de plantaardige oliën de belangrijkste kostenpost is, voor de CAPEX en OPEX. Elke marginale €/kg waterstof werkt in de gemodelleerde HVO-installatie door als €26,7 mio/a kosten en €0,02/liter HVO-diesel.

	Kosten waterstof	Kosten van HVO-diesel
Ea Energy Analyses casus	€4,2/kg	€0,89/liter
Pijpleidingennetwerk	€2-3/kg	€0,85-0,87/liter
Power-to-gas casus	€6,4/kg kleinschalig €3,33-4,05/kg grootschalig	€0,93/liter €0,88-0,89/liter

Tabel B3: Relatie tussen waterstofkosten en kosten van HVO-diesel