

Fossielvrij raffineren, kan dat?

Onze maatschappij moet snel minder afhankelijk worden van fossiele grondstoffen zoals kolen, olie en aardgas. We moeten daarom een aantal grote transitities bewerkstelligen: energie, grondstoffen en materialen. De energietransitie gaat over het vervangen van fossiele grondstoffen door elektriciteit en andere energiedragers zoals waterstof. De materialentransitie zoekt alternatieven voor materialen zoals beton, glas en staal, die bij productie veel energie nodig hebben.

Is het mogelijk om een raffinaderij te ontwerpen die volledig fossielvrij is, en dus geen druppel olie of gas gebruikt als grondstof? Ik laat zien dat dit technisch mogelijk is met bekende processen, maar de realisatie brengt geweldige kosten met zich mee. Naast een beschrijving van de chemie die nodig is, geef ik vooral inzicht in de grootte van het probleem.

Er zijn iets meer dan 600 raffinaderijen in de wereld die gezamenlijk ongeveer 100 miljoen vaten olie per dag omzetten naar transportbrandstoffen en grondstoffen voor producten die we allemaal dagelijks gebruiken. Ter illustratie: de grootste olietankers die er bestaan zijn vier voetbalvelden lang, en kunnen 3 miljoen vaten olie bevatten. We gebruiken dus met elkaar dertig tankers per

dag. De grootste van de zes raffinaderijen in Nederland is Shell Pernis, met een capaciteit van iets meer dan 400 duizend vaten per dag. De grootste raffinaderij in de wereld staat in India, en is drie keer zo groot als Shell Pernis.

Een raffinaderij maakt meer dan alleen brandstof

Uit deze getallen volgt dat een gemiddelde raffinaderij ongeveer 165 duizend vaten per dag verwerkt. Dat is het uitgangspunt voor de berekeningen. Omdat we met zijn allen elektrisch moeten gaan rijden in onze personenauto's, zal een raffinaderij in 2050 veel minder benzine produceren. Eigenlijk blijven op termijn alleen zware langeafstandvrachtwagens, langeafstandscheepvaart en intercontinentaal vliegverkeer over als gebruikers van koolwaterstoffen als brandstof. De raffinaderij van de toekomst kan dus veel kleiner zijn dan nu. Op basis van gegevens van het

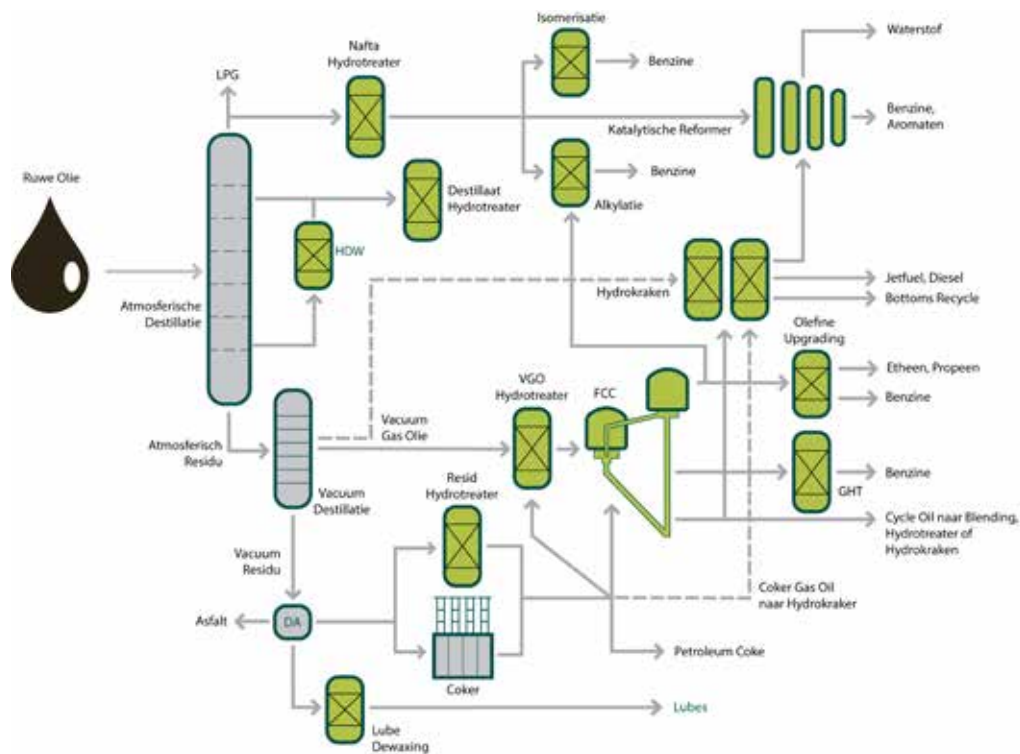
Internationale Energie Agentschap (IEA) schat ik dat een derde van de huidige brandstoffen voldoende zal kunnen zijn. Maar een raffinaderij maakt niet alleen brandstof. Een groeiend deel van de output gaat naar monomeren en functionele chemicaliën waaruit coatings, textiel, detergentia, medicijnen, en bijvoorbeeld windturbines kunnen worden gemaakt. Deze groep producten groeit hard, en wordt steeds belangrijker voor raffinaderijen. Ik ga daarom uit van een raffinaderij die voor de helft brandstoffen maakt, en voor de helft chemicaliën en monomeren (elk een kwart van de totale capaciteit) maakt. Na wat rekenwerk komen we dan op een raffinaderij die 40 duizend vaten brandstof maakt met (het equivalent van) 20 duizend vaten elk voor monomeren en chemicaliën.

Vanuit CO₂ en H₂ naar brandstof

De brandstoffen die we nodig hebben, zijn moleculen die vrijwel allemaal in de diesel-fractie vallen. Ze kunnen heel efficiënt worden gemaakt van synthesesgas, een mengsel van koolmonoxide en waterstof. Het proces heet Fischer-Tropsch, en wordt bijvoorbeeld door Shell in Qatar op een schaal van 140 duizend vaten per dag al industrieel toegepast.



PROF. DR. EELCO VOGT begon in 2014 als deeltijdhoogleraar aan het departement scheikunde van de RU Utrecht en werd in 2020 gewoon hoogleraar Industriële Katalyse. Ook is hij directeur van het Institute for Sustainable and Circular Chemistry. Daarvoor werkte hij vanaf 1988 bij Akzo Chemie, Akzo Nobel en Albemarle, nu Ketjen.



Figuur 1. De processen bij een huidige raffinaderij

Eerst wordt de koolstofmonoxide, CO in synthegas gemaakt uit koolstofdioxide en waterstof met een proces dat 'reverse water-gas-shift' (RWGS) heet en dat ook op grote schaal al wordt toegepast. De reactievergelijking is:



Waterstof, H₂, is goed te maken door elektrolyse van water. Het benodigde CO₂ kunnen we afvangen bij puntbronnen zoals staalbedrijven of energiecentrales, of direct uit de lucht. Daarna volgt de omzetting van synthegas naar koolwaterstoffen:



Door combineren van (1) en (2) ontstaat de totale route:



Het eindproduct (-CH₂)_n is de basis van brandstof. Door te hydrogenen is een route van CO₂ naar brandstof tot stand gebracht. Dit is een veelbelovende manier om de CO₂ concentratie in de atmosfeer omlaag te brengen.

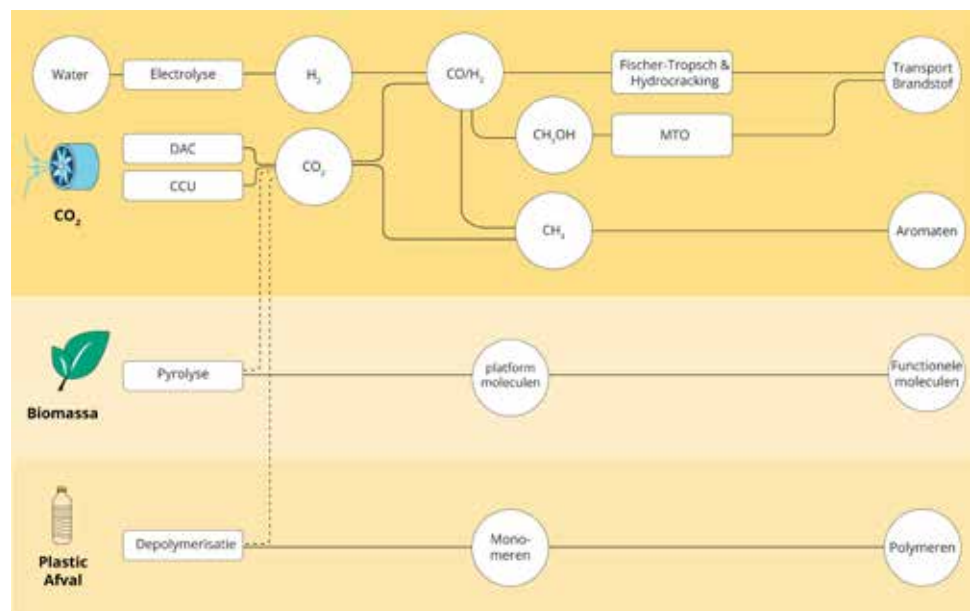
Immense energiebehoefte

De energiebehoefte van de nieuwe raffinaderijen (we hebben momenteel zes raffinaderijen in Nederland) is immens groot en is vooral een gevolg van de grote hoeveelheid energie die nodig is voor de

productie van de grondstof waterstof. Voor de productie van 40 duizend vaten brandstof per dag hebben we ongeveer 18 kiloton CO₂ per dag nodig, dat is evenveel als er in 3x3x3 km³ lucht zit. Waterstof is natuurlijk veel lichter dan CO₂, maar we hebben nog altijd 2400 ton per dag nodig (3 mol H₂ per mol CO₂). Om die waterstof te maken hebben we 5,5 GW elektriciteit nodig, en nog eens 0,3 GW - 1,5 GW om CO₂ te vangen, afhankelijk van of je de CO₂ vangt bij puntbronnen of met Direct Air Capture.

Dit is technisch mogelijk, maar gaat de samenleving veel kosten

Omdat je bij het opwekken van elektriciteit met wind en zon rekening moet houden met het feit dat de zon niet altijd schijnt en de wind niet altijd waait, moet je in de praktijk veel meer zonnepanelen en windmolens plaatsen dan je in eerste instantie zou berekenen. Voor onze raffinaderij heb je 104 km² zonnepanelen én een windmolenpark van 722 km² (328 van de meest efficiënte en grootste windmolens die er bestaan). En uiteraard moet je ook nog een voorraadje waterstof kunnen opslaan, voor vier dagen zou >>



Figuur 2. Het schema van de raffinaderij van de toekomst. De afkortingen staan voor: DAC = direct air capture (directe luchtafvang); CCS = carbon capture storage (koolstofafvang en -opslag); CCU = carbon capture utilisation (koolstofafvang en -benutting); MTO = methanol to olefins, methanol naar olefinen.

dat 10 duizend ton zijn, die je bijvoorbeeld in zoutkoepels zou kunnen pompen, ook daar is op de juiste schaal al ervaring mee. Ter vergelijking met de bovengenoemde 5,5 GW en meer: de grootste energiecentrale in Nederland heeft een elektrisch vermogen van 1,5 GW, en het snel groeiende totaal opgesteld elektrisch vermogen was 7 GW voor windturbines, en 24 GW voor zonnepanelen in 2023 (volgens het CBS). Een groot deel van die energie komt overigens niet in het product terecht. Een artikel van Kraan et al. laat zien dat je bijna 15 GJ moet investeren om in totaal 5,5 GJ per vat aan energie in je brandstof te kunnen oogsten.

Gebruik biomassa en plastic afval

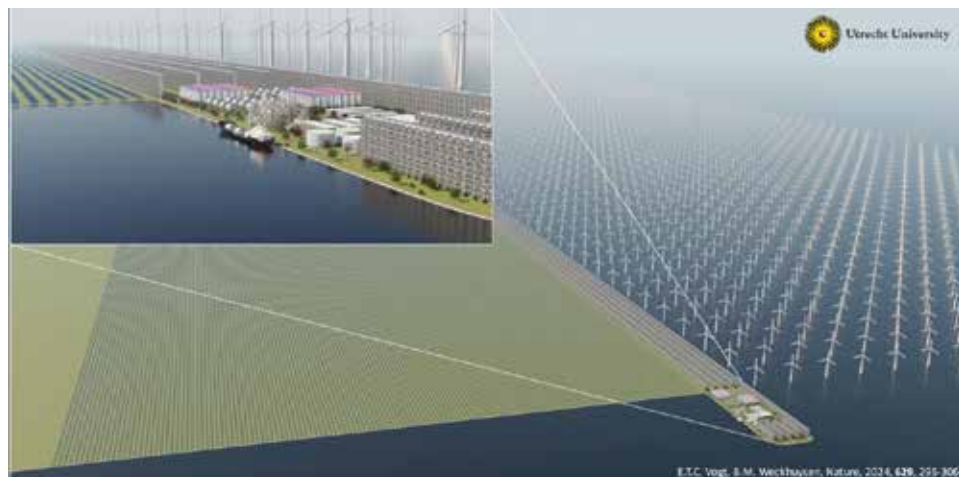
Zoals eerder vermeld maakt de raffinaderij ook functionele chemicaliën en monomeren. Voor de productie hiervan vertrouwen we op de conversie van biomassa en plastic afval. Biomassa is opgebouwd uit natuurlijke polymeren zoals cellulose en lignine, die al een

De schaal van de transitie is bijna onvoorstelbaar groot

flink aantal chemische bouwstenen bevatten. Met zorgvuldige depolymerisatie zijn die deels direct te oogsten zonder dat complexe verdere processen nodig zijn. Hetzelfde geldt voor het produceren van monomeren uit plastic. Voor een aantal kunststoffen, zoals polyester, zijn de monomeren chemisch terug te winnen. Voor polyolefinen zoals polyetheen en polypropen ligt dat wat moeilijker, en wordt bij de depolymerisatie nog veel koolstof verspild. Gelukkig is die koolstof makkelijk beschikbaar te maken als CO₂ die in de brandstofroute kan worden ingezet.

Infrastructuur en grondstoffen

Het lijkt dus mogelijk om een raffinaderij te ontwerpen die de gewenste producten kan maken zonder dat daarbij fossiele grondstoffen worden ingezet. De energiebehoefte van zo'n raffinaderij is echter immens, en



uiteraard zal behalve de nieuwe raffinaderij ook de infrastructuur moeten worden gebouwd (windmolens, zonnepanelen, electrolyzers, waterstofopslag). We schatten dat de kosten voor de zon en wind-infrastructuur ongeveer 8 - 16 miljard euro per raffinaderij bedragen, en de kosten voor de electrolyzers 1 - 2,5 miljard, terwijl de raffinaderij zelf voor ongeveer 5 miljard zou moeten kunnen worden gebouwd. Uiteraard is kernenergie een optie, maar die gaat niet goedkoper uitvallen dan de kosten voor wind en zon. Naast de kosten van ongeveer 25 miljard per raffinaderij moeten we uiteraard rekening houden met het beslag dat we leggen op grondstoffen om dit alles te bouwen. Als we dit alles in 2050 klaar willen hebben moeten we elk jaar ongeveer 25 raffinaderijen vervangen.

Conclusie

Het is dus technisch mogelijk om raffinaderijen te vervangen door volledig fossielvrije versies. Daarbij is de schaal van de benodigde infrastructuur zo groot dat het vervangen van fossiele brandstof zeer grote investeringen zal vergen, die bovendien concurreren met andere energie- en materiaalbehoeften. Maar hoe kostbaar ook, de kosten van voortdurende klimaatverandering zullen vele malen groter zijn.

De berekeningen die aan dit alles ten grondslag liggen zijn relatief simpel, en kunnen gebruikt worden om leerlingen een beter inzicht te geven in technische mogelijkheden aan de ene kant, en de schaal van de gewenste transities aan de andere kant. ●

Dit artikel is een weergave van de slotlezing op de Woudschoten Chemie Conferentie 2024 door Eelco Vogt, met als titel 'Op weg naar een fossielvrije toekomst'. De bijbehorende dia's staan op www.c3.nl en op <https://tinyurl.com/Slotlezing-EelcoVogt> of scan de QR-code voor de pdf.



In vervolgartikelen in NVOX wordt in detail teruggekeken op de chemie van de omzetting van CO₂ naar bruikbare moleculen via synthesesegas, methanol, of methaan, en op de depolymerisatie van biomassa en plastic afval.

Kom op 7 en 8 november 2025 naar de 35e editie van de WCC met een programma vol boeiende lezingen, interactieve workshops en inspirerende ontmoetingen. De conferentie vindt plaats in het sfeervolle Woudschoten Conferentiecentrum, bij Zeist.

BRONNEN

- Vogt, E. T. C., & Weckhuysen, B. M. (2024). *The refinery of the future*. Nature, 629(8011), 295-306. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07322-2> (<https://rdcu.be/dHkd7>).
- Kraan, O., Kramer, G. J., Haigh, M., & Laurens, C. (2019). *An energy transition that relies only on technology leads to a bet on solar fuels*. Joule, 3(10), 2286-2290. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.029>