Technische Universiteit Eindhoven University of Technology

Where innovation starts

Membranen voor een nieuwe toekomst

Nijmeijer, K.

Gepubliceerd: 07/04/2017

Document Version
Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

• A submitted manuscript is the author's version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
• The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
• The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

Link to publication

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 09. jul. 2018

Intreerede
prof. dr. ir. Kitty Nijmeijer
7 april 2017

/ Faculteit Scheikundige Technologie

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology

Membranen voor een nieuwe toekomst

Where innovation starts

Intreerede prof. dr. ir. Kitty Nijmeijer

Membranen voor een nieuwe toekomst

Uitgesproken op 7 april 2017
aan de Technische Universiteit Eindhoven

Inleiding

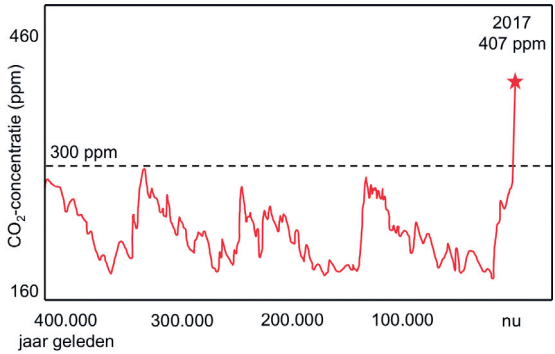
Mijnheer de Rector Magnificus, zeer gewaardeerde collega's, familie en vrienden,

In 2006 verscheen het boek 'An Inconvenient Truth' ofwel 'Een ongemakkelijke waarheid', van Al Gore, de 45e vicepresident van de Verenigde Staten [1]. Gore was een van de eersten die, zonder enige aarzeling of twijfel, luid en duidelijk verkondigde dat door menselijke activiteiten ons klimaat zal veranderen. Sterker nog, hij beweerde dat de mensheid aan zichzelf ten onder zal gaan als wij op deze wijze door leven. Voor Gore was de oorzaak duidelijk: de sterk toegenomen uitstoot van CO_2 veroorzaakt door de mens.

De boodschap van Gore werd gesteund door velen. Met name wetenschappers en milieuactivisten realiseerden zich destijds al dat de dreigende klimaatverandering en de menselijke invloed daarop serieus genomen moesten worden. Tegelijkertijd was er een grote groep sceptici die ervan overtuigd was dat Gore ernaast zat en de klimaatdiscussie alleen maar gebruikte als een publiciteitsstunt. De kritieken waren niet mild: 'eenzijdig, misleidend, overdreven, speculatief, onjuist' [2]. De olie- en gasindustrie heeft de klimaatverandering zelfs jarenlang ontkend, hoewel uit een gedetailleerde studie naar Exxon Mobil blijkt dat de top van Exxon Mobil al in de jaren '80 moet hebben geweten wat de effecten van de toegenomen CO_2-uitstoot door het gebruik van fossiele brandstoffen zijn [3]. Het bedrijf besteedde echter miljoenen aan het ondermijnen van klimaatwetenschap en het verspreiden van misleidende informatie [4]. Schokkend genoeg twijfelt ook de net verkozen president van de Verenigde Staten, Donald Trump, er nog aan of menselijke activiteiten wel invloed hebben op de klimaatverandering [4-6]. Slechts enkele minuten na zijn aantreden als president werden de internetpagina's over klimaatverandering van de website van het Witte Huis verwijderd [7]. Trump heeft de voormalig CEO van Exxon Mobil, Rex Tillerson, benoemd tot zijn minister van Buitenlandse Zaken. Hoewel Tillerson de koers van Exxon Mobil de afgelopen jaren gewijzigd heeft en hij inmiddels aangeeft een voorstander te zijn van het klimaatakkoord van Parijs [4] en belasting op fossiele brandstoffen [5], is het afwachten hoeveel inspanningen de Verenigde Staten zich de komende jaren zullen getroosten in het streven om de internationale klimaatdoelstellingen te halen.

In de eerste jaren na het verschijnen van An Inconvenient Truth was het vooral de wetenschap die zich verdiepte in de thematiek. In opdracht van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), het klimaatpanel van de Verenigde Naties, deden klimaatwetenschappers, chemici, natuurkundigen en geologen gezamenlijk gedetailleerd wetenschappelijk onderzoek met als doel meer en betrouwbare informatie te verzamelen over de mogelijke gevolgen van de antropogene CO_2-uitstoot. Waar de eerste rapporten van het IPCC nog aarzelend waren en aangaven dat er mogelijk een causaal verband bestaat tussen de stijging van de CO_2-uitstoot en de klimaatverandering op aarde, zijn deze rapporten in de loop der jaren steeds explicieter geworden.

Er is altijd een beperkte variatie in de CO_2-concentratie in de atmosfeer geweest (figuur 1).

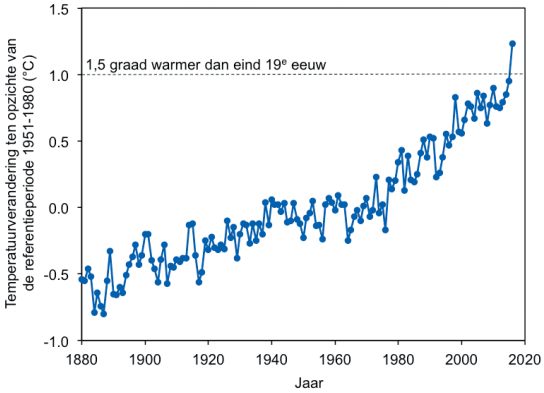


Figuur 1

CO_2 concentratie in de atmosfeer in de afgelopen 400.000 jaar [8].

Historisch gezien is deze waarde de afgelopen 400.000 jaar nooit hoger geweest dan 300 ppm [8]. De toename gedurende de laatste 50 jaar overstijgt echter elke natuurlijke variatie en op 21 februari 2017 bedroeg de concentratie CO_2 in de atmosfeer 406,71 ppm [9], de hoogst gemeten waarde ooit. Hoewel de absolute CO_2-uitstoot van een klein land als Nederland beperkt is, ligt deze per hoofd van de bevolking wel ver boven het Europese gemiddelde. Nederlanders stoten per hoofd van de bevolking bijna 10 ton CO2 uit door het gebruik van fossiele brandstoffen en cement, terwijl het Europese gemiddelde slechts bijna 7 ton bedraagt [10].

Parallel aan de stijging van de CO_2-concentratie in de atmosfeer, is de laatste decennia een zeer duidelijke stijging in de temperatuur op aarde zichtbaar (figuur 2).

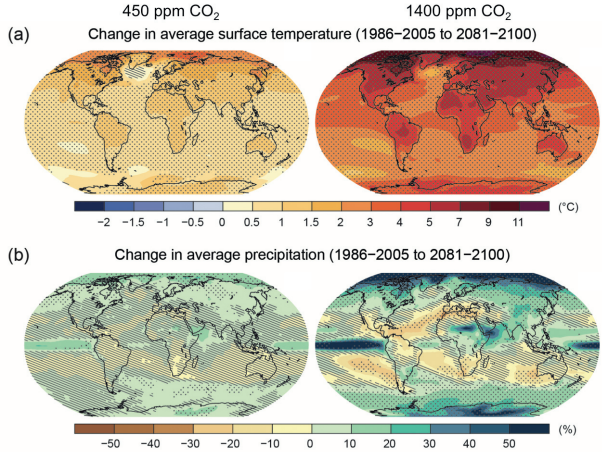


Figuur 2

Gemiddelde mondiale temperatuur boven land [9].

De temperatuur op aarde was nog nooit zo hoog. In januari 2017 meldden de ruimtevaartorganisatie NASA en het Amerikaanse agentschap NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) dat sinds het begin van de metingen de gemiddelde temperatuur op aarde in 2016 met 1,23°C gestegen is ten opzichte van het pre-industriële tijdperk [11].

Tijdens de klimaatconferentie van Parijs in 2015 is afgesproken dat de gemiddelde temperatuur op aarde niet meer dan 2°C mag stijgen, waarbij ernaar gestreefd wordt deze stijging te limiteren tot maximaal 1,5°C [12]. Wetenschappers zijn het erover eens dat een stijging van meer dan 2°C de klimaatsystemen op aarde ernstig zal verstoren. In zijn meeste recente rapport, schetst het IPCC een aantal scenario's voor de hoeveelheid CO_2 in de atmosfeer met daaraan gekoppeld de te verwachten gevolgen voor het klimaat op aarde voor de periode 2081-2100 ten opzichte van de referentieperiode 1986-2005 [13]. Onderstaand figuur uit dat rapport laat zien dat de temperatuur op aarde de komende eeuw verder zal stijgen (figuur 3a [13]). Gekoppeld aan de temperatuurstijging op aarde, zal ook de neerslag op aarde aanzienlijk stijgen (figuur 3b [13]).



Figuur 3

Voorspelling van de verandering van a) de gemiddelde temperatuur en b) de gemiddelde hoeveelheid neerslag op aarde ten opzichte van de periode 1986-2005 voor twee scenario's. Het eerste scenario komt overeen met 450 ppm CO_2-equivalent, de grens om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C ten opzichte van het pre-industriële tijdperk. Het tweede scenario komt overeen met 1400 ppm CO_2-equivalent in de atmosfeer [13]. In dat geval zal de temperatuurstijging in de orde van grootte van 4°C liggen. In februari 2017 bedroeg de daadwerkelijke gemeten CO_2-concentratie in de atmosfeer reeds 407 ppm [9].

De hoogte van de temperatuurstijging en de toename van de hoeveelheid neerslag op aarde zijn sterk afhankelijk van het precieze scenario en de mate waarin wij onze CO_2-uitstoot zullen reduceren, waarbij er tevens sprake is van een na-ijleffect door de traagheid van het klimaatsysteem. Het eerste scenario (de figuren aan de linkerkant) komt overeen met 450 ppm CO_2-equivalent, de grens om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2°C ten opzichte van het pre-industriële tijdperk. Dit scenario vereist een zeer ambitieus klimaatbeleid. Het tweede scenario (de figuren aan de rechterkant) komt overeen met 1400 ppm CO_2-equivalent in de atmosfeer. In dat geval is er sprake van slechts een beperkt aantal maatregelen en technologische doorbraken om de CO_2-emissies te reduceren. In dat geval zal de temperatuurstijging echter in de orde van grootte van 4°C liggen.

Het KNMI heeft de cijfers van het IPCC vertaald naar Nederland. Afhankelijk van het gekozen scenario, zal de zeespiegel met 25 tot 80 cm toenemen [14]. Voor een land als Nederland, waarvan 59% van het gebied gevoelig is voor overstromingen [15], zal een dergelijke stijging ernstige gevolgen hebben. Nu al is er jaarlijks 1,2 miljard euro beschikbaar om de Nederlandse dijken te versterken en bekkens te

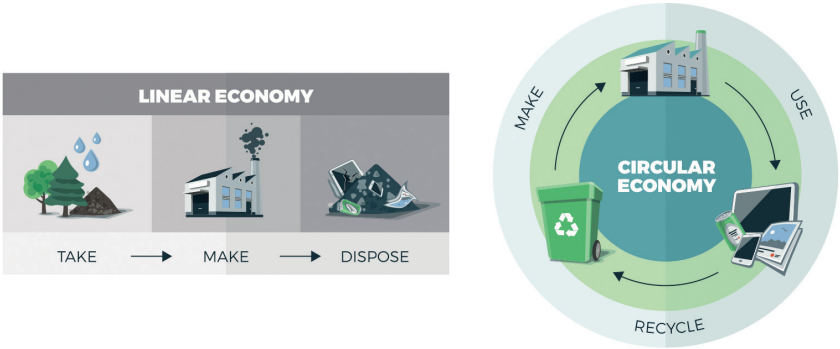
creëren die het teveel aan rivierwater kunnen opvangen [16]. Deze maatregelen zijn noodzakelijk om ons aan te passen aan de klimaatveranderingen die nu al een feit zijn. Verdere stijging van de temperatuur zal die kosten significant verhogen. In het extreme scenario zal de hoeveelheid neerslag in de winter toenemen met 30% en zullen de zomers 23% droger zijn. Voor de schaatsliefhebbers is er ook slecht nieuws: de kans op een Elfstedentocht neemt af van 15% in 2016 naar slechts 2 tot 0,2% in 2050 [14]. Het Europees Milieuagentschap (EMA) meldde recent dat de klimaatverandering grote gevolgen heeft voor de ecosystemen, de economie en de volksgezondheid in Europa [17]. De economische schade in Europa als gevolg van klimaatverandering voor de periode 1980-2013 wordt geschat op 400 miljard euro [17]. De recent verschenen documentaire 'Before the flood', maakt pijnlijk concreet wat de gevolgen van klimaatverandering zijn [18].

Het boek van Gore heeft destijds veel indruk op mij gemaakt. Ook ik wist toen niet of de boodschap die Gore verkondigde daadwerkelijk waar was. Maar ik realiseerde mij wel zeer nadrukkelijk dat wij als mensheid verantwoordelijk zijn voor de toekomst van de aarde in het belang van de generaties na ons. De afgelopen jaren is die overtuiging alleen maar sterker geworden. Met in gedachte de scenario's van het IPCC en de wetenschap dat onze menselijke activiteiten in de huidige vorm een bedreiging voor de aarde zijn, vind ik dat wij de verantwoordelijkheid hebben voor een schone, duurzame wereld.

De hoge uitstoot van CO_2 is het inherente gevolg van de wijze waarop wij leven en wij onze samenleving hebben ingericht. De energieproductie is nog steeds voornamelijk gebaseerd op fossiele brandstoffen, wat leidt tot de productie van grote hoeveelheden CO_2. Vervanging van fossiele brandstoffen door duurzame bronnen zal deze uitstoot significant reduceren. Het aandeel hernieuwbare energie was in Nederland in 2015 echter slechts 5,8% [19]. Daarmee bungelt Nederland onderaan in de lijst van Europese landen, net boven Malta en Luxemburg, en staat ons land ver onder het EU-gemiddelde van 16% in 2014 [20].

Parallel aan de vervanging van fossiele brandstoffen door duurzame bronnen zal er voor een duurzame, toekomstbestendige wereld echter ook een grootschalige economische transitie moeten plaatsvinden. Onze huidige economie is gebaseerd op een volledig lineair systeem: we produceren iets, we gebruiken het en na gebruik gooien we het weg. We consumeren en verbruiken zonder na te denken over de toekomst. Het is mijn ideaal dat de wereld wordt ingericht volgens een circulair systeem, waarbij producten zodanig ontworpen en geproduceerd worden dat deze na gebruik, aan het einde van hun technische of biologische levensduur,

op eenvoudige wijze te de-assembleren zijn zodanig dat de verschillende delen opnieuw gebruikt kunnen worden (figuur 4).



Figuur 4

Principe van een lineaire en een circulaire economie. (Figuur: Petovarga)

De Ellen MacArthur Foundation, sinds 2009 een begrip in de wereld van de circulaire economie, definieert het als volgt: een circulaire economie is een economisch systeem dat bedoeld is om de herbruikbaarheid van producten en grondstoffen te maximaliseren en waardevernietiging te minimaliseren [21].

Het circulaire systeem maakt onderscheid tussen een biologische en een technische kringloop van materialen. Door deze twee kringlopen te onderscheiden blijft de functionele en de economische waarde zoveel mogelijk behouden. Met andere woorden, niet alleen het hergebruik van materialen en grondstoffen maakt onderdeel uit van een circulaire economie, ook de waarde van die materialen en het behoud van die waarde zijn belangrijke aspecten. Downcycling, het hergebruik van materialen in een applicatie die een materiaal van lagere waarde vereist, of een grondstof die na gebruik niet meer dezelfde zuiverheid heeft als de oorspronkelijke grondstof, moet zoveel mogelijk vermeden worden. Een voorbeeld is het hergebruik van glas. Wanneer alle glas ingezameld wordt in één glasbak, kan het alleen nog maar voor de productie van bruin glas gebruikt worden. Wordt iedere kleur glas gescheiden ingezameld, dan kan van de blanke fractie weer blank glas worden gemaakt. In een circulaire economie wordt juist gestreefd naar upcycling, waarbij bijvoorbeeld uit afval nieuwe grondstoffen worden geproduceerd.

Niet alles wat wij verbruiken is onbeperkt aanwezig op aarde. Schoon water is bij uitstek een voorbeeld van een schaars goed. Slechts 2,5% van al het water op aarde is zoet water. Door de toename van de temperatuur op aarde en als gevolg

daarvan de stijging van de zeespiegel, zal ons nu nog zoete grond- en oppervlaktewater verzilten [14], met als gevolg dat zoet en schoon water nog schaarser zullen worden. Voorts heeft de EU recent een analyse gemaakt van materialen en grondstoffen die met schaarste bedreigd worden maar kritisch zijn voor de Europese economie [22]. Het betreft met name een aantal metalen en mineralen die veelvuldig gebruikt worden in de transport-, metaal-, elektronica- en chemische industrie. Voor de landbouw zijn de zogenaamde NPK (stikstof, fosfor, kalium) componenten van groot belang [23]. Nederland is na de Verenigde Staten met ruim 82 miljard euro de grootste exporteur van landbouwproducten [24] en daarmee in hoge mate afhankelijk van de beschikbaarheid van NPK-componenten. Het winnen en produceren van deze mineralen kost relatief veel energie en de wereldwijde fosforvoorraad is beperkt. Hergebruik van deze componenten is dus essentieel, ook ter voorkoming van onder- of overbemesting en het weglekken ervan door lozing van afvalwater.

Waar het samenvattend op neerkomt, is dat wij in de Westerse wereld met onze huidige manier van leven, simpelweg teveel aardes gebruiken (tabel 1 [25]).

Tabel 1

Aantal aardes dat nodig is om de huidige kwaliteit van leven te handhaven als de gehele wereldbevolking zou leven als een inwoner van een van de genoemde landen [25].

Land	Benodigd aantal aardes
Verenigde Staten 5 aardes	
Engeland 3,4 aardes	
Argentinië 1,7 aardes	
Zuid Afrika 1,5 aardes	
China 1 aarde	
India 0,4 aardes	
Wereldgemiddelde 1,4 aardes	

We hebben slechts één aarde ter beschikking, maar in de westerse wereld hebben we 3 tot 5 aardes nodig om uitputting te voorkomen. Uitgaande van de gemiddelde levensstijl van de gehele wereldbevolking, zouden we op dit moment de beschikking moeten hebben over anderhalve aarde om op de huidige wijze door te kunnen leven. Een meer duurzame manier van leven en het recyclen en hergebruiken van materialen en grondstoffen zijn dus absolute noodzaak om uitputting te voorkomen en de kwaliteit van onze aarde te behouden voor de generaties na ons.

Het bovenstaande heeft mij geïnspireerd om als wetenschapper en mens een bijdrage te leveren aan een duurzame toekomst van de aarde. Het idee dat we de wereld ook volgens volledig andere uitgangspunten kunnen inrichten, namelijk als een circulair systeem, heeft dat alleen maar versterkt. Vanuit die gedachte heb ik er in volle overtuiging voor gekozen om hier, aan de Technische Universiteit Eindhoven, samen met mijn collega dr. Zandrie Borneman, de nieuwe leerstoel Membrane Materials and Processes (MM/P) op te zetten (figuur 5).

MM/P
Membrane Materials and Processes

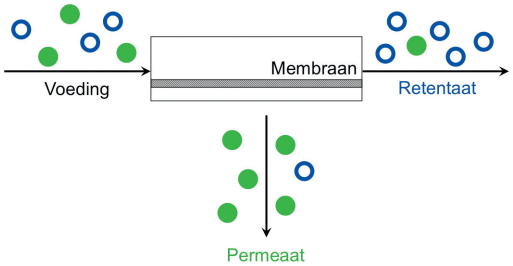
Figuur 5
Logo leerstoel Membrane Materials and Processes.

Vandaag ongeveer een jaar geleden zijn Zandrie (universitair hoofddocent en tevens verantwoordelijk voor de valorisatie van ons onderzoek), Caroline (secretaresse) en ik bij de Technische Universiteit Eindhoven met zijn drieën begonnen aan de opbouw van onze onderzoeksgroep Membrane Materials and Processes. Het doet mij dan ook heel erg veel plezier dat ik hier vandaag niet alleen op dit podium sta, maar bijgestaan wordt door mijn beide paranimfen: dr. Zandrie Borneman en Caroline van Os.

Membraantechnologie

In een tijd waarin het sluiten van kringlopen en het creëren van waarde uit afval centraal staan, is de ontwikkeling van kosteneffectieve technologie voor het scheiden van componenten op moleculair niveau essentieel om hergebruik en recycling grootschalig te kunnen toepassen. Als duurzame scheidingstechnologie zal de membraantechnologie daarin een nog belangrijkere rol gaan spelen dan zij nu al doet. Binnen onze leerstoel werken wij aan de ontwikkeling, de karakterisering en de toepassing van membranen voor circulaire processen.

Een membraan is een filter dat selectief bepaalde componenten wel of niet doorlaat. Met behulp van membranen kunnen dus verschillende componenten in een mengsel van elkaar gescheiden worden (figuur 6).



Figuur 6

Principe van membraanscheiding.

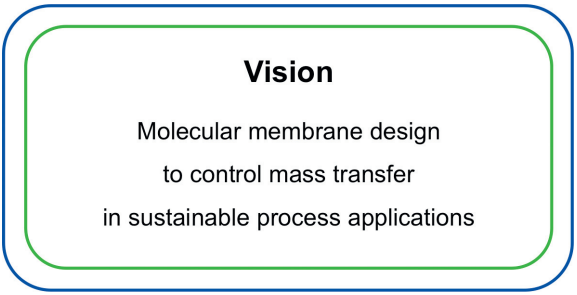
In vergelijking met vele andere technologieën is membraantechnologie een energiezuinige en milde scheidingstechnologie. In 1748 was Jean Antoine Nollet, een Franse natuurkundige, een van de eersten die met de ontdekking van het principe van osmose de basis voor de huidige membraantechnologie legde [26]. Na Nollet volgden vele anderen met als resultaat dat de grootschalige industriële productie en toepassing van membranen niet meer weg te denken zijn uit de huidige tijd. Tegenwoordig worden membranen op grote schaal toegepast in onder andere de watersector (productie van drinkwater, zuivering van afval- en proceswater), in de chemische industrie (waterstofscheiding, winning van organische componenten, drogen van gasstromen, productie van chloor en natriumhydroxide in het chloor-alkali-proces), in de voedings- en zuivelindustrie (filtratie van bier, wijn, aardappel-

vruchtwater en melk), in de medische wereld (wondbedekking, hemodialyse) en in de energiesector (opwerking van biogas, stikstofverrijking van lucht, afvangen van CO_2, productie van elektriciteit met brandstofcellen).

Met de verduurzaming van de wereld en de focus op terugwinning en hergebruik van materialen en grondstoffen zal het aantal nieuwe toepassingen van membranen sterk toenemen. Dat vraagt om de ontwikkeling van nieuwe typen membranen met andere en/of verbeterde scheidende eigenschappen, betere chemische, thermische of mechanische resistentie en hogere opbrengsten: het speerpunt van het onderzoek van onze leerstoel Membrane Materials and Processes.

Visie leerstoel Membrane Materials and Processes

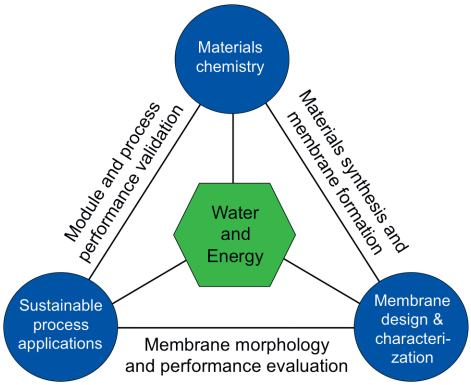
Binnen onze leerstoel richten wij ons op de ontwikkeling van polymeermembranen voor toepassingen op het gebied van water en energie. De naam van onze leerstoel, Membrane Materials and Processes, zegt het al: in ons onderzoek leggen wij nadrukkelijk de verbinding tussen het ontwikkelen van nieuwe materialen en de toepassing ervan als membranen voor de verduurzaming van nieuwe en bestaande industriële processen (figuur 7).



Figuur 7
Visie leerstoel Membrane Materials and Processes.

De verbinding tussen chemie en materialen enerzijds en procestechnologie anderzijds is een noodzaak voor de ontwikkeling van de membranen van de toekomst (figuur 8).

De chemie van het polymeer en de structuur van het membraan bepalen gezamenlijk de eigenschappen en procestechnologische prestaties van het membraan. De chemie biedt een gereedschapskist met volledig nieuwe gereedschappen die het mogelijk maken op moleculair niveau aan membranen te sleutelen en op die manier de moleculaire samenstelling van membranen te beïnvloeden. Variatie van de verschillende parameters die een rol spelen bij het membraanvormingsproces maakt het mogelijk de structuur en morfologie van deze membranen te sturen. Chemie en morfologie bepalen daarmee in belangrijke mate de eigenschappen van membranen. Karakterisering geeft inzicht in de structuur, morfologie en fysische eigenschappen, zoals lading en hydrofiliciteit, van de membranen. Gecombineerd met het membraanmodule-ontwerp en proces-specifieke parameters, zoals



Figuur 8

Inhoudelijke expertise leerstoel Membrane Materials and Processes.

compositie van de industriële stroom, temperatuur en druk, bepalen deze factoren gezamenlijk de technologische prestaties van membranen in industriële scheidingsprocessen. Het relateren van de technologische prestaties aan de moleculaire eigenschappen en morfologie van de ontwikkelde membranen geeft vervolgens fundamenteel inzicht in de relaties tussen de chemie, het materiaal, de structuur, de fysische karakteristieken en de technologische prestaties van de ontwikkelde membranen.

Dit duale karakter van membraanonderzoek waarbij zowel de materiaalkunde als de procestechnologie essentieel zijn, is voor mij persoonlijk ook een belangrijke reden geweest om hier bij de faculteit Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Eindhoven deze leerstoel te aanvaarden. De faculteit heeft twee inhoudelijk zeer sterke clusters: het cluster Molecular Systems and Materials Chemistry dat zich richt op chemie en nieuwe materialen en het cluster Chemical and Process Technology dat focust op de ontwikkeling van nieuwe technologie en processen. Het onderzoek en het onderwijs van onze leerstoel sluiten dan ook uitstekend aan op de visie en het inhoudelijke profiel van de faculteit Scheikundige Technologie.

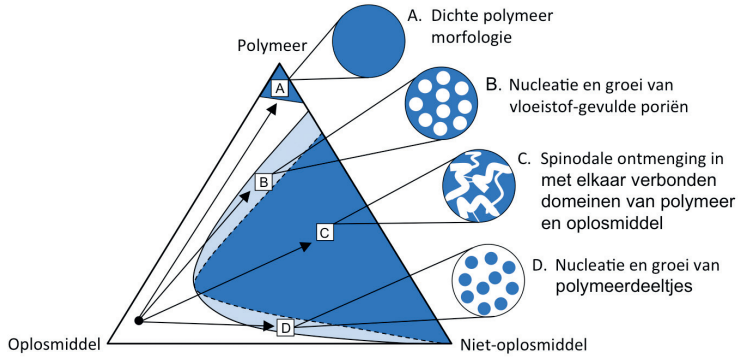
Onderzoek leerstoel Membrane Materials and Processes

Membraanvorming

De membranen die binnen onze leerstoel Membrane Materials and Processes ontwikkeld worden, zijn gemaakt van polymeren (plastics). Door een polymeer op te lossen in een oplosmiddel, ontstaat een polymeeroplossing. Met behulp van een mal (strijkmes of extrusiekopje) wordt van de polymeeroplossing een dunne film of een holle vezel (rietje) gemaakt. Onderdompeling van deze film of deze vezel in een niet-oplosmiddel (meestal water) resulteert in uitwisseling van oplosmiddel en niet-oplosmiddel, waarbij het niet-oplosmiddel de polymeeroplossing in diffundeert en het oplosmiddel de polymeeroplossing uit diffundeert. Op een zeker moment zal het aandeel niet-oplosmiddel in de polymeeroplossing zo hoog zijn, dat deze oplossing instabiel wordt en er fasescheiding op zal treden. Hierbij ontstaat een polymeerrijke en een polymeerarme fase. De polymeerrijke fase wordt vervolgens door verdere in-diffusie van niet-oplosmiddel vormvast en vormt de wanden van de poriën in en de vaste matrix van het membraan. De polymeerarme fase vormt de poriën in het gevormde membraan.

Het grootste deel van de commercieel beschikbare polymeermembranen wordt op deze wijze geproduceerd. Prof. Cees Smolders, een van de grondleggers van de huidige membraantechnologie en oprichter van mijn vorige onderzoeksgroep aan de Universiteit Twente, was een van de eersten die fundamenteel, systematisch onderzoek deed naar de vorming van membraanstructuren uit polymeren via het zogeheten immersie-precipitatie proces. Zijn vele publicaties (zie bijvoorbeeld [27-31]) over de fundamentele aspecten van membraanvorming en de grafische weergave hiervan in een ternair fasediagram (figuur 9) zijn wereldberoemd en nog steeds leidend.

De geometrie van het membraan wordt bepaald door de gebruikte mal. De microscopische structuur en moleculaire eigenschappen van het uiteindelijke membraan worden bepaald door het type polymeer, het oplosmiddel, het niet-oplosmiddel en eventueel toegevoegde additieven, maar vooral ook door de weg door het fasediagram. Afhankelijk van de route die het ontmengproces doorloopt, worden de porositeit en morfologie en daarmee dus ook de scheidende eigenschappen van het membraan beïnvloed en gestuurd. Het wetenschappelijk



Figuur 9

Schematische weergave van het membraanvormingsproces in een ternair fasediagram. A, B, C en D illustreren mogelijke routes in het membraanvormingsproces en de bijbehorende gevormde membraanstructuren. (Figuur: Zandrie Borneman)

interessante aan dit proces van membraanvorming is dat er vele chemische en fysische parameters zijn die onderling interacteren en zo de uiteindelijke structuur bepalen. Met andere woorden; als membraantechnologen hebben we dus vele variabelen om nieuwe membraanstructuren te ontwikkelen en membranen precies die eigenschappen te geven die vereist zijn voor een bepaalde toepassing.

Technologische applicaties

De transitie naar een circulaire economie is een gigantische uitdaging. Voortbouwen op bestaande producten en processen is niet voldoende. Deze transitie dwingt ons tot het bedenken van radicaal nieuwe ideeën en concepten en het ontwikkelen van innovatieve materialen en processen gebaseerd op duurzame uitgangspunten. Scheiding, en dus de membraantechnologie, zullen daarin een essentiële rol spelen.

Binnen onze leerstoel richten wij ons onderzoek nadrukkelijk op deze grote wetenschappelijke, materiaalkundige en technologische, uitdagingen van de toekomst. We werken aan nieuwe methodes om membranen te maken, om ze te functionaliseren en om ze exact die eigenschappen te geven die nodig zijn voor deze nieuwe toepassingen. We richten ons daarbij op vier industriële speerpunten:

1. Het scheiden, opwerken en afvangen van gassen en dampen.
2. Het concentreren, zuiveren en hergebruiken van water en waardevolle componenten uit verdunde processtromen.

3. De valorisatie van CO_2 door omzetting naar chemische bouwstenen en brandstoffen.
4. Het opwekken en opslaan van duurzame energie.

1. Het scheiden, opwerken en afvangen van gassen en dampen.
Aardgas zal vooralsnog een belangrijke rol blijven spelen in de circulaire economie. Echter, door de afnemende gasvoorraad worden meer en meer laagwaardige bronnen aangeboord en worden de gasstromen steeds complexer in termen van samenstelling. De stromen bevatten in toenemende mate hogere concentraties aan CO_2 en daarnaast steeds meer van de gevaarlijke gassen koolstofmonoxide en waterstofsulfide. Het gebruik van biogas, geproduceerd uit de vergisting van organisch materiaal zoals mest, slib en huisvuil, zal sterk toenemen. Hoewel de exacte samenstelling sterk afhankelijk is van de gebruikte grondstoffen en de specifieke productiemethode, bevat biogas na productie gemiddeld 60 tot 70% methaan, 30 tot 40% CO_2, tot 4000 ppm waterstofsulfide en 100 ppm ammonia en is het verzadigd met waterdamp [32]. Opwerking en zuivering van aardgas en met name biogas zijn essentieel om de verbrandingswaarde van het gas te verhogen en dit aan het gasnet te kunnen leveren. Ook bij de productie van bijvoorbeeld syngas uit de vergassing van biomassa speelt gasscheiding een belangrijke rol. Syngas is een mengsel van koolstofmonoxide en waterstof geproduceerd uit fossiele brandstoffen of biomassa door vergassing, stoomreforming of partiële oxidatie. Het is een van de belangrijkste grondstoffen in de chemische industrie en vormt de basis voor de productie van onder andere biobrandstoffen en kunstmest. Het opwerken van aardgas en syngas (en in mindere mate biogas) is in beginsel niet nieuw, de uitdagingen liggen echter in het feit dat de samenstelling van de mengsels steeds complexer wordt. De aanwezigheid van grote hoeveelheden CO_2 en andere onzuiverheden leidt, zeker in hogedruktoepassingen (tot 150 bar), tot zeer sterke zwelling van membranen, resulterend in een verslechtering van de selectiviteit van de membranen en dus de zuiverheid van de producten. Bij lagedruktoepassingen is de lage drijvende kracht voor permeatie een complicerende factor en ligt de nadruk juist op het verhogen van de doorlaatbaarheid van membranen, uiteraard met behoud van selectiviteit.

Hoewel de drijfveer voor bovenstaande scheidingen van oudsher het opwerken van aardgas, biogas en syngas was, zal met de transitie naar een circulaire economie ook de reststroom, voornamelijk bestaand uit CO_2 en waterdamp, een essentieel aspect van de scheiding worden (figuur 10).

Figuur 10

De rookpluimen uit elektriciteitscentrales bevatten zowel ongeveer 10-15% CO_2 als waterdamp. Deze verdwijnen momenteel in de lucht maar kunnen een bron van waarde worden door CO_2 en waterdamp af te vangen met behulp van membranen. (Foto: Kodda)

Waar in eerste instantie de nadruk lag op het zuiveren van aardgas en de reststroom met onzuiverheden de lucht in kon worden geblazen, moet deze reststroom ook afgevangen worden om te voorkomen dat CO_2 in onze atmosfeer terecht komt waardoor de aarde verder opwarmt. Daarnaast zal met de toenemende waterschaarste en de noodzaak van energiebesparing ook het terugwinnen van waterdamp uit gasstromen belangrijk worden. Industriële gasstromen uit bijvoorbeeld elektriciteitscentrales, biogasinstallaties en de papierindustrie bevatten door hun grote volumina, aanzienlijke hoeveelheden waterdamp die op dit moment via schoorstenen de atmosfeer in worden geblazen. Terugwinning van slechts 20% van dit water maakt een elektriciteitscentrale zelfvoorzienend in termen van watergebruik. Terugwinning van 50% waterdamp uit deze reststromen maakt een 800 MW elektriciteitscentrale, naast elektriciteitsproducent, ook waterleverancier, zodanig dat 8000 huishoudens in de westerse wereld of 100.000 mensen in droge gebieden in Afrika van schoon water kunnen worden voorzien [33]. Zowel het voorkomen dat CO_2 in de atmosfeer terechtkomt als het afvangen van waterdamp brengt additionele eisen in termen van zuiverheid en productievolume met zich mee.

2. Het concentreren, zuiveren en hergebruiken van water en waardevolle componenten uit verdunde processtromen.
Waterzuivering, het concentreren van waterige stromen en waterhergebruik zijn belangrijke onderzoeksthema's binnen onze leerstoel (figuur 11).

Figuur 11

Ongeveer 70% van de oppervlakte van de aarde is bedekt met water. Slechts 2,5% daarvan is zoet water, waarvan slechts een zeer beperkt deel eenvoudig toegankelijk is. In feite is maar 0,007% van al het water op aarde direct beschikbaar voor ruim 7 miljard mensen [34]. (Foto: Rajesh Kumar Singh)

In deze context richten wij ons op twee aspecten. In de eerste plaats werken wij aan de ontwikkeling van membranen en membraantechnologie voor het concentreren van verdunde, waterige rest- en processtromen en het selectief terugwinnen van waardevolle componenten uit deze stromen. Sterk verdunde stromen zijn op dit moment vanuit economisch perspectief niet interessant en lozing is vaak duur. Hoewel dergelijke stromen vaak zeer waardevolle componenten bevatten, loont het, door de grote hoeveelheid water in deze stromen, niet om deze componenten terug te winnen. Concentreren van deze stromen door het selectief verwijderen van water, maakt het mogelijk deze componenten alsnog op een efficiënte manier terug te winnen voor hergebruik. Daarnaast wordt op deze manier ook het water gezuiverd. Voorbeelden van dergelijke waardevolle componenten zijn eiwitten, wei en aminozuren uit processtromen in de zuivel- en voedingsmiddelenindustrie en de NPK (stikstof, fosfor en kalium)-verbindingen uit stromen afkomstig van bijvoorbeeld de mestverwerkingsindustrie of percolatiewater uit kassen.

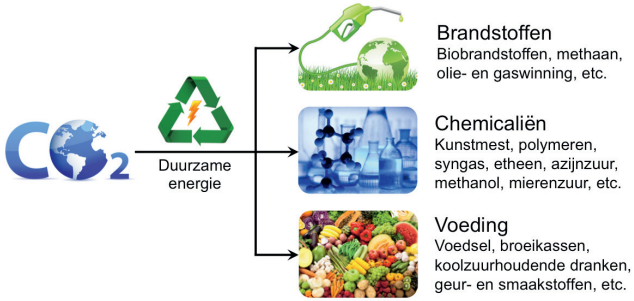
Daarnaast zetten wij in op de zuivering van water en dan met name de verwijdering van microverontreinigingen. De term microverontreiniging is een verzamelnaam voor een groep van stoffen die van oudsher niet in ons grond- en oppervlaktewater voorkomen maar die er door menselijke activiteit wel in terecht gekomen zijn of zullen komen en op die manier onze schoonwatervoorziening bedreigen. Naast bijvoorbeeld medicijnresten, hormonen, drugs, cocaïne en pesticiden zijn dat ook industriële chemicaliën die in ons afvalwater terechtkomen of die bijvoorbeeld aan (zee)water toegevoegd worden om olie uit de grond te halen via het zogenaamde enhanced oil recovery process. Deze stoffen zijn weliswaar slechts aanwezig in zeer lage concentraties (ppb- of ppm-niveau), maar daarmee uiteindelijk niet minder bedreigend voor onze gezondheid.

Binnen onze groep richten wij ons op de ontwikkeling van membranen en membraanprocessen voor de zuivering en valorisatie van waterige stromen. Dat brengt grote wetenschappelijke uitdagingen met zich mee. De componenten in deze stromen hebben een zeer grote diversiteit in chemische samenstelling, fysische eigenschappen, structuur, grootte en lading waarbij, afhankelijk van de specifieke applicatie, de concentratie van de verschillende componenten ook nog eens verschillend kan zijn. Er is vaak sprake van een sterke interactie tussen de componenten onderling en tussen deze componenten en het membraanoppervlak, wat leidt tot membraanvervuiling en veranderingen in de scheidende eigenschappen van membranen. Dit vraagt om fundamenteel inzicht in de relatie tussen de chemie en de eigenschappen van de membranen enerzijds en de consequenties daarvan voor de prestaties van deze membranen in grootschalige industriële processen anderzijds.

3. De valorisatie van CO_2 door omzetting naar chemische bouwstenen en brandstoffen.

Bij veel industriële conversies in de (petro)chemische industrie (elektriciteitscentrales, (bio)gasinstallaties, metaalindustrie, cementindustrie) wordt CO_2 gevormd. Zoals reeds beschreven is het mogelijk dit CO_2 af te vangen met behulp van membranen. Het opslaan van CO_2 in bijvoorbeeld lege gas- en olievelden is slechts een tijdelijke oplossing. Een duurzame aanpak is de conversie van CO_2 naar bijvoorbeeld CO_2-neutrale brandstoffen of chemicaliën (figuur 12). Hierdoor wordt de CO_2-kringloop gesloten en wordt additionele uitstoot van CO_2 voorkomen.

Door de hoge thermodynamische stabiliteit van CO_2 is conversie energetisch zeer ongunstig. Echter, met in gedachten dat de zon een oneindige bron van energie is, werken wij onder andere samen met het onderzoeksinstituut Differ, gevestigd hier op de campus van de Technische Universiteit Eindhoven, aan de valorisatie



Figuur 12

Valorisatie van CO_2.

van CO_2. Met behulp van een plasma wordt energie uit zonlicht (of een andere duurzame energiebron) gebruikt om CO_2 om te zetten in koolstofmonoxide, dat vervolgens via een aantal seriële en parallelle chemische reacties omgezet kan worden naar bijvoorbeeld brandstoffen en chemicaliën, zoals methanol, methaan, kunstmest en polymeren. Daarnaast kan CO_2 gebruikt worden in bijvoorbeeld koolzuurhoudende dranken, voor plantengroei of voor de extractie van geur- en smaakstoffen.

Wij werken aan de ontwikkeling van membranen die, bij de omzetting van CO_2 met behulp van plasma, het gevormde koolstofmonoxide selectief isoleren. De scheiding van deze gassen vraagt om volledig nieuwe membraanchemie, daar de huidige membranen slechts zeer beperkt selectief zijn en zowel CO_2 als koolstofmonoxide doorlaten. In de opvolgende evenwichtsreacties waarbij koolstofmonoxide wordt omgezet in brandstoffen en chemicaliën, worden gasmengsels gevormd bestaande uit verschillende componenten en concentraties. Dergelijke gasmengsels zijn vaak complex van samenstelling en bevatten naast koolstofmonoxide ook bijvoorbeeld CO_2, waterstof, methaan, waterdamp en zuurstof. Vaak hebben ze bovendien een hogere druk en/of temperatuur. Hierbij gebruiken we membranen om het reactie-evenwicht van specifieke reacties naar de productzijde te verschuiven zodat de opbrengst aanzienlijk hoger wordt, maar ook om zuivere grondstof- of productstromen te genereren.

In de natuur komen micro-organismen (bacteriën) voor die elektriciteit kunnen produceren uit suikers. Het omgekeerde is echter ook mogelijk, waarbij bacteriën in staat zijn om CO_2 met behulp van elektriciteit om te zetten in grondstoffen voor CO_2-neutrale chemicaliën en brandstoffen. Deze bio-elektrochemische systemen zijn in essentie zeer vergelijkbaar met de plasmaconversie van CO_2, zij het dat in dit geval niet het plasma maar de bacteriën gebruikt worden om CO_2 om te zetten.

Met name verhoging van de snelheid van de conversie en de opbrengst is van groot belang. Op dit gebied onderzoeken wij, onder andere samen met de Universiteit Gent, de relatie tussen membraaneigenschappen, microbiologische conversie en uiteindelijke opbrengsten.

Bij zowel de plasmaconversie als de microbiologische conversie kunnen conversie en scheiding na elkaar plaatsvinden, maar integratie van beide stappen in een chemische reactor maakt het proces efficiënter. Afhankelijk van de omzettingsreacties die plaatsvinden, moeten de membranen in deze reactoren bestand zijn tegen de heersende reactiecondities. In het geval van plasmolyse en afhankelijk van de precieze positie van deze membranen ten opzichte van de plasmareactor, stelt dat hoge eisen aan de chemische en thermische stabiliteit van membranen vanwege de hoge temperatuur en de aanwezigheid van radicalen in de reactor. Bovendien is het van groot belang dat snelheden van conversie en scheiding op elkaar afgestemd zijn en niet een van beide processen limiterend is. Deze integratie kent, door de complexiteit van de reactiemengsels en condities, grote uitdagingen, enerzijds op het gebied van de chemie van de te ontwikkelen membranen in termen van stabiliteit en scheidende prestaties en anderzijds op het vlak van de procesvoering wat betreft reactiesnelheden en procescondities.

4. Het opwekken en opslaan van duurzame energie.
Duurzame energieopwekking en -opslag zijn belangrijke aspecten van een duurzame, circulaire economie. Duurzame bronnen hebben echter een veel lagere energiedichtheid dan fossiele brandstoffen. Tevens geldt dat sommige bronnen niet continu beschikbaar zijn (bijvoorbeeld zonne- of windenergie), waardoor, naast energieproductie, energieopslag essentieel is.

Een onderwerp waar ik al een groot aantal jaren samen met Wetsus, het Blue Energy team van Wetsus, REDstack en Fujifilm aan werk en waar ik ook bij de Technische Universiteit Eindhoven onderzoek naar zal blijven doen, is Blauwe Energie: het opwekken van elektriciteit uit het mengen van rivierwater en zeewater. Op de Afsluitdijk ziet u het resultaat van deze samenwerking. Daar hebben onder andere Wetsus, REDstack en Fujifilm de allereerste Blauwe Energie-installatie wereldwijd gebouwd, gebaseerd op onze gezamenlijke onderzoeksresultaten (figuur 13). Deze installatie maakt het mogelijk veelvuldig experimenten te doen onder realistische condities met water uit het IJsselmeer en de Waddenzee.

Figuur 13

De Afsluitdijk met halverwege aan de linkerkant (Breezanddijk) het blauwe gebouw van REDstack BV waar Koning Willem Alexander in november 2014 de allereerste Blauwe Energie-installatie ter wereld opende. (Foto: REDstack BV)

We ontwikkelen niet alleen volledig nieuwe typen membranen en membraanstructuren die geschikt zijn voor toepassing in echt zee- en rivierwater, maar we onderzoeken ook nieuwe technologische concepten met verbeterde transporteigenschappen en verhoogde energieopbrengsten. Het beheersbaar houden van vervuiling van de membranen door micro-organismen, humuszuren en kalkdeeltjes is nu nog de grootste technologische uitdaging voor grootschalige commercialisatie van de technologie. De komende jaren zetten we daar, als Blue Energy team, breed op in. Gezamenlijk werken we aan de ontwikkeling van een geïntegreerde materiaalkundig-technologische aanpak. Daarbij richten we ons op de synthese van enerzijds anti-fouling membranen en anderzijds nieuwe technologische concepten voor voorbehandeling om vervuiling te verminderen en om de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit te maximaliseren. Hoewel er enig raakvlak is met onderzoek naar het voorkomen van membraanvervuiling in waterzuivering, is vervuiling in dergelijke ion-uitwisselende membraanprocessen een nieuw veld. In tegenstelling tot membranen voor waterzuivering worden in het geval van Blauwe Energie positief en negatief geladen membranen met een volledig andere chemie gebruikt en is ook de procesvoering anders, omdat er twee waterige stromen met verschillende zoutconcentraties gecontroleerd met elkaar in contact gebracht worden. Daardoor spelen ook andere interacties tussen de constituenten in het zee- en rivierwater enerzijds en de membranen anderzijds een rol, wat resulteert in andere vervuilingsmechanismen.

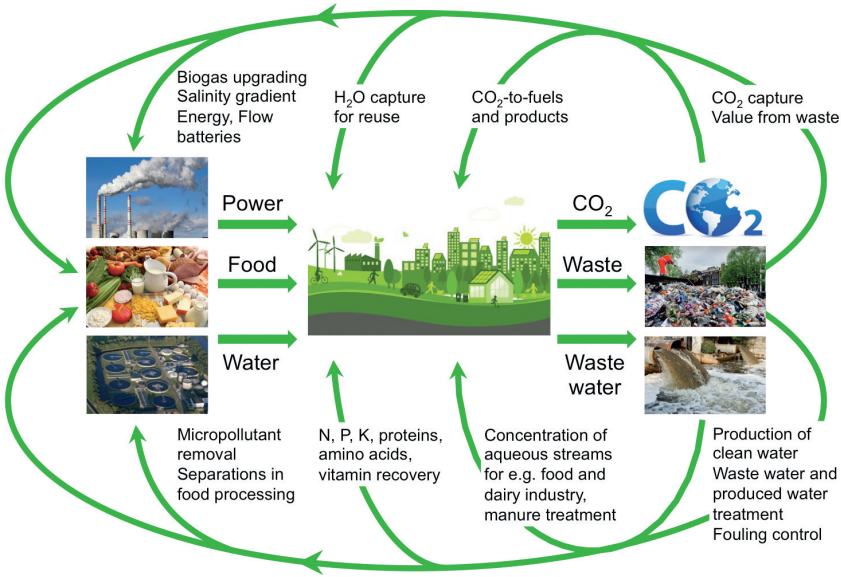
In het verlengde daarvan ligt het onderzoek naar mogelijkheden voor energie-opslag. Op dat vlak werken we binnen de Technische Universiteit Eindhoven en met industriële partijen aan de opslag van energie in bijvoorbeeld brandstoffen of chemicaliën, die vervolgens, wanneer de vraag groot is, eenvoudig weer omgezet kunnen worden naar energie. In dat verband onderzoeken we de mogelijkheden van redoxflow batterijen. In dergelijke batterijen vindt een reversibele reactie plaats. Wanneer er een overschot aan energie wordt opgewekt, wordt dit gebruikt om de batterij op te laden en de energie op te slaan. Op het moment dat er in een later stadium vraag naar energie is, treedt in de batterij de omgekeerde chemische reactie op en komt de opgeslagen energie beschikbaar voor gebruik. In dergelijke batterijen worden membranen toegepast om de elektrische stroom gescheiden te houden van de chemische reacties. Hoewel deze beschrijving eenvoudig klinkt, is energieopslag een zeer complex onderwerp dat vraagt om een grote mate van creativiteit en multidisciplinariteit. De reacties voor opslag en ontlading vinden vaak plaats onder zure condities, wat extreem hoge eisen stelt aan de gebruikte materialen en dus ook aan de membranen. Daarnaast geldt dat de energie-inhoud van dergelijke systemen sterk verhoogd moet worden. Daarbij is het van belang dat de membranen zeer selectief en hoog doorlaatbaar zijn voor de gewenste ionen (meestal protonen) en de doorlaatbaarheid van de overige reactieproducten geminimaliseerd wordt.

Uit het bovenstaande zal duidelijk zijn dat voor vrijwel alle van de hierboven beschreven speerpunten de wetenschappelijk uitdagingen liggen op het grensvlak van chemie en technologie. Veel van bovengenoemde processtromen zijn complex van samenstelling met een brede diversiteit aan componenten. Interacties tussen die componenten en het membraan zijn het gevolg van de chemie en structuur van dat membraan en resulteren vaak in verslechtering van scheidende eigenschappen en/of vervuiling van het membraan. Daarnaast geldt dat de doorlaatbaarheid en selectiviteit van de huidige membranen niet toereikend zijn om een voldoende hoge opbrengst van voldoende kwaliteit te genereren en deze nieuwe processen economisch rendabel te maken.

Op dit grensvlak van chemie en technologie werken wij graag nauw samen met onze collega's, de polymeerchemici en procestechnologen, bij de Technische Universiteit Eindhoven. Dat kan bijvoorbeeld door het ontwikkelen van een volledig nieuw polymeer of door het functionaliseren van commercieel verkrijgbare polymeren om zo het membraanvormingsproces en dus ook de eigenschappen en prestaties van het uiteindelijke membraan te beïnvloeden, maar ook door het

modelleren van membraanprocessen met behulp van computersimulaties met als doel inzicht te krijgen in de kritieke parameters in het proces.

De samenhang tussen de verschillende onderzoeksthema's en de inbedding van het onderzoeksprogramma van de leerstoel Membrane Materials and Processes in een circulaire economie is schematisch samengevat in figuur 14.



Figuur 14

Samenhang tussen de verschillende speerpunten van het onderzoek van de leerstoel Membrane Materials and Processes en de positionering van het onderzoeksprogramma in een circulaire economie.

Het onderzoek van de leerstoel Membrane Materials and Processes richt zich, zoals in figuur 14 te zien is, nadrukkelijk op het valoriseren van reststromen en het terugwinnen van waardevolle componenten met als doel het sluiten van kringlopen van materialen en grondstoffen en de transitie naar een duurzame, circulaire economie. Het sluit dan ook naadloos aan bij het recent door de Nederlandse overheid opgestelde visiedocument 'A circular economy in the Netherlands by 2050' [35], waarin de overheid de ambitie uitspreekt dat Nederland in 2050 een volledig circulaire economie moet hebben.

Valorisatie

De sterke relatie van ons onderzoek met de toepassing maakt dat wij nadrukkelijk de samenwerking met de industrie opzoeken en daar groot belang aan hechten. Juist die samenwerking tussen universiteit en bedrijfsleven maakt het onderzoek voor mij persoonlijk inspirerend. Het toepassingsgerichte onderzoek in samenwerking met de industrie zorgt voor maatschappelijke en sociale vooruitgang en vernieuwing. Zeker in een tijd met grote technologische uitdagingen die vragen om innovatieve én haalbare oplossingen in tijd en toepassing, is samenwerking met de industrie relevant en uitdagend.

Om expliciet inhoud te geven aan deze samenwerking met de industrie, maakt het Membrane Innovation Centre Eindhoven (MIC/e) integraal onderdeel uit van onze leerstoel. Het MIC/e, waar mijn collega dr. Zandrie Borneman verantwoordelijk voor is, vormt de brug tussen het academisch membraanonderzoek zoals dat uitgevoerd wordt door studenten en promovendi, en de toepassing daarvan in de industrie (figuur 15).

MIC/e
Membrane Innovation Centre Eindhoven

Figuur 15
Logo Membrane Innovation Centre Eindhoven.

Het MIC/e vertaalt de academische kennis uit bijvoorbeeld promotieprojecten naar concrete industriële toepassingen en oplossingen voor vragen vanuit de industrie. Terwijl de resultaten van promotieprojecten per definitie gepubliceerd worden, geldt die verplichting niet voor de projecten uitgevoerd door het MIC/e, waardoor het onderzoek een confidentieel karakter kan hebben. Dat biedt bedrijven de mogelijkheid om nieuwe producten en processen in de markt te zetten terwijl gelijktijdig de ontwikkelde wetenschappelijke kennis ook maatschappelijke impact krijgt. Omdat de tijdshorizon voor met name het MKB vaak korter is dan vier jaar (de duur van een promotieproject), ligt de duur van projecten bij het

MIC/e tussen enkele uren voor bijvoorbeeld een standaard membraankarakterisering en 3 jaar voor bijvoorbeeld de ontwikkeling van een nieuw type membraan of onderzoek naar het gebruik van membranen in een specifieke industriële toepassing.

De combinatie van enerzijds academisch langetermijnonderzoek en anderzijds applicatiegericht onderzoek met een kortere tijdsduur heeft een grote meerwaarde voor het onderzoek van onze leerstoel als geheel. De nauwe en intensieve samenwerking met de industrie binnen het MIC/e geeft inzicht in de industriële vragen van de toekomst, die vervolgens weer als basis dienen voor vernieuwend academisch onderzoek. Bovendien blijft ontwikkelde kennis en ervaring behouden voor de leerstoel en verdwijnt deze niet met een promovendus die na vier jaar de universiteit verlaat. Tegelijkertijd geldt dat de academische kennis die ontwikkeld is met belastinggeld op deze wijze effectief haar weg vindt naar de samenleving en aangewend kan worden voor de ontwikkeling van industriële toepassingen en het creëren van werkgelegenheid.

Ik ben van mening en weet uit ervaring dat samenwerking met de industrie het academisch onderzoek en de kwaliteit daarvan alleen maar kan versterken. Vragen uit de industrie zijn complex en multidimensionaal. Daadwerkelijke industriële problemen vragen om creatieve ideeën en een verrassende benadering. Op het snijvlak van universiteit en industrie vindt prachtig, uitdagend onderzoek plaats.

Onderwijs

Onderwijs is een groot goed. Het vormt de basis voor ontwikkeling en vooruitgang. Het opleiden van mensen is de primaire taak van een universiteit (figuur 16). Niettemin zijn onderzoek en onderwijs onlosmakelijk met elkaar verbonden: goed onderzoek kan niet zonder goed opgeleide mensen en het opleiden van goede academici kan niet zonder goed onderzoek.

Figuur 16

Hoorcollege Scheidingstechnologie voor derdejaars Bachelorstudenten van de opleiding Scheikundige Technologie aan de Technische Universiteit Eindhoven. (Foto: Menno Houben)

Onderwijs is voor mij veel breder dan het verzorgen van Bachelor- en Mastervakken. Het opleiden van promovendi of het bijdragen aan de professionele ontwikkeling van de medewerkers hoort daar mijns inziens bij. Het is bijzonder om te zien hoe jonge mensen zich ontwikkelen in de jaren dat ze aan een universiteit studeren. Ik ervaar het als een groot voorrecht om een bijdrage te mogen leveren aan hun opleiding en ontwikkeling.

Ons Bachelor- en Masteronderwijs is van hoge kwaliteit en dat moet in de toekomst ook zo blijven. Werkgevers moeten voor onze afgestudeerden en promovendi in de rij willen staan. Aan het niveau en de kwaliteit van ons onderwijs mogen wij geen concessies doen. Daar hoort een sterk inhoudelijk gericht onderwijsprogramma bij. Ik ben van mening dat inhoudelijke kennis en academische vaardigheden het fundament vormen van een goede opleiding.

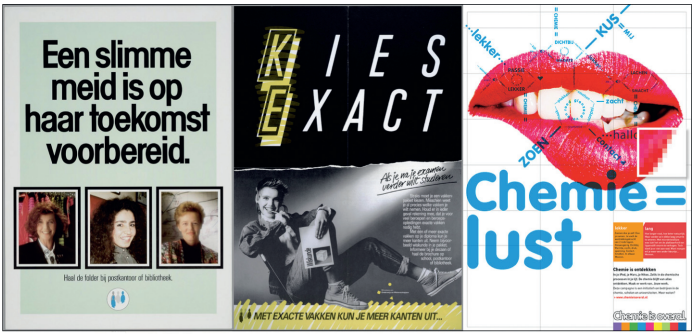
Onze afgestudeerden en gepromoveerden hebben de hoogst mogelijke opleiding genoten die ze waar ook ter wereld kunnen krijgen. Dat betekent dat wij de lat hoog mogen en moeten leggen, dat wij mensen moeten uitdagen om kritisch te denken en nooit alleen te studeren voor een zesje. Als docenten hebben we de verantwoordelijkheid onze studenten op te leiden tot kritische wereldburgers die feit van mening kunnen onderscheiden. Het is onze taak als docenten om ervoor te zorgen dat als onze studenten en promovendi de universiteit verlaten, zij verantwoordelijkheid kunnen nemen en anderen kunnen stimuleren verder te kijken dan hun eigen grenzen. Met het oog op de toekomst is academisch onderwijs van hoge kwaliteit een absolute noodzaak: de transitie naar een circulaire economie vraagt om goed opgeleide mensen met kennis van zaken, creativiteit en een positief kritische blik.

De universiteit

De studenten en onderzoekers die wij vandaag opleiden moeten de technologie van morgen ontwikkelen en zullen vorm en inhoud gaan geven aan de grootschalige transitie naar de duurzame samenleving. Deze transitie vereist radicaal nieuwe ideeën en concepten voor innovatieve materialen en processen gebaseerd op duurzame uitgangspunten. Dat vraagt om goed opgeleide, creatieve, kritische mensen. We zullen alle diversiteit aan mensen en talenten nodig hebben om die transitie in goede banen te leiden en daadwerkelijk te bewerkstelligen. Vanuit dit perspectief bezien is er binnen de universiteiten de laatste jaren een aantal zorgelijke ontwikkelingen in gang gezet, zowel op het gebied van onderwijs als op dat van onderzoek.

1. Onderwijs

Decennialang hebben overheid, industrie en universiteiten gezamenlijk campagne gevoerd om middelbare scholieren te motiveren toch vooral een technische studie te kiezen (figuur 17). Desondanks liep het aantal studenten aan technische universiteiten de afgelopen decennia alleen maar verder terug.



Figuur 17

Enkele advertenties uit de overheidscampagnes om studenten aan te moedigen voor een technische studie te kiezen. (Affiches: IIAV en Volta)

Recent werd echter duidelijk dat voor het eerst sinds jaren, door de demografische en economische ontwikkelingen, dit aantal sterk is toegenomen. Een zeer wel-

kome trendbreuk, zowel voor de universiteiten als voor de industrie, die staat te springen om goed opgeleide ingenieurs [36-38].

De bezuinigingen van de afgelopen jaren in combinatie met de sterk toegenomen studentenaantallen stellen de universiteiten nu echter voor grote problemen. Er is een tekort aan personeel, middelen en college- en practicumzalen om al deze studenten goed onderwijs te kunnen blijven geven. Er zijn technische opleidingen die, noodgedwongen, een beperking aan de instroom van het aantal studenten hebben opgelegd.

Het gemiddelde aantal studenten in Nederland steeg in de periode 2000-2015 met maar liefst 57% [39]. Voor de opleiding Scheikundige Technologie aan de Technische Universiteit Eindhoven is er in de periode 2010-2016 zelfs sprake van een verdubbeling van het aantal studenten in het eerste jaar, van 52 studenten in 2010 naar 102 studenten in 2016 [40]. Het is als docent prachtig om aan zoveel geïnteresseerde studenten onderwijs te mogen geven. Daar staat tegenover dat de rijksbijdrage voor het wetenschappelijk onderwijs in diezelfde periode veel minder toenam, namelijk met slechts 14% [39]. De VSNU (Vereniging van universiteiten) constateert dat hierdoor de ambities op het gebied van kwaliteitsverbetering, profilering en academische vorming in gevaar zijn [39]. Een zeer zorgelijke ontwikkeling voor een kenniseconomie als Nederland. Enkele maanden geleden hebben ook de 4TU.Federatie (federatie van de vier technische universiteiten in Nederland: Technische Universiteit Eindhoven, Universiteit Twente, Technische Universiteit Delft en Wageningen University and Research) en FME (ondernemersorganisatie voor de technologische industrie) gezamenlijk aangegeven dat Nederland op deze wijze haar internationale toppositie dreigt te verliezen. Partijen hebben een pact gesloten en roepen de politiek op extra financiële middelen, oplopend tot jaarlijks 450 miljoen euro in 2020, beschikbaar te stellen om de dreigende studentenstop tegen te gaan en groei van het aantal studenten aan technische opleidingen mogelijk te maken. De 4TU.Federatie constateert ‘dat het niet zo kan zijn dat iemand die techniek wil studeren, de kans loopt geconfronteerd te worden met een studentenstop, alleen omdat we te weinig middelen krijgen’ [38].

Technische opleidingen zijn arbeidsintensief, docenten willen de studenten goed begeleiden en practicumruimtes en onderzoeksfaciliteiten bij technische universiteiten zijn zeer kostbaar. Goede ingenieurs leid je niet op achter de computer, die moeten leren experimenteren in laboratoria en ervaring opdoen met moderne analysemethodes en apparatuur (figuur 18).

Figuur 18

Experimenteerruimtes voor studenten van technische opleidingen. (Foto's: TU/e)

Door de huidige ontwikkelingen worden de technische universiteiten echter gedwongen om concessies te doen aan de kwaliteit van het onderwijs. Met hetzelfde aantal mensen en middelen moeten significant meer studenten opgeleid worden. Dat dwingt docenten tot efficiënte onderwijsvormen, waarbij zoveel mogelijk studenten tegelijkertijd onderwijs krijgen en er steeds minder ruimte is voor practica, onderwijs in kleinere groepen en individuele begeleiding. Door de massaliteit van de universitaire opleidingen komen tevens de academische vaardigheden in het geding. Om in de woorden van de voormalig rector magnificus van de Universiteit van Amsterdam te spreken: 'Hoe kun je aan academische vorming doen met honderden studenten in een collegezaal? Dat kan niet. Terwijl dat juist in deze tijd zo belangrijk is.' [41].

Bij alle universiteiten is er een duidelijke tendens zichtbaar waarin opleidingen ingericht worden volgens een uniform, strak stramien zodat zoveel mogelijk studenten zo snel mogelijk afstuderen. Het aantal contacturen is sterk verhoogd, in sommige gevallen zijn collegeroosters zelfs zo ingericht dat studenten van 8.45 uur 's ochtends tot 17.30 uur 's avonds op de universiteit aanwezig moeten zijn, alleen maar om deze studenten te dwingen met hun studie bezig te zijn. Sommige universitaire opleidingen hebben zelfs, om dezelfde reden, elke week een tussentoets.

Het betreft hier echter universitaire ingenieursopleidingen gericht op het ontwikkelen van een academisch werk- en denkniveau. Onze afgestudeerden moeten een sterke inhoudelijke en praktische basis hebben, zij moeten verantwoordelijkheid kunnen nemen en zij moeten in staat zijn leiding te geven en anderen te motiveren. Dan kan het toch niet zo zijn dat wij deze mensen tijdens hun studie door gebrek aan mensen en middelen slechts in beperkte mate experimentele en aca-

demische vaardigheden kunnen bijbrengen, dat wij hun precies vertellen wat ze wanneer moeten doen en dat wij hun die verantwoordelijkheid juist afnemen?

2. Onderzoek
Het aantal eisen dat aan wetenschappelijk medewerkers wordt gesteld is de afgelopen jaren sterk toegenomen. Er is een min of meer informeel lijstje van eisen gedefinieerd waaraan al het wetenschappelijk personeel zou moeten voldoen om als excellent betiteld te mogen worden. Die eisen zijn niet mild. De medewerker moet geld binnenhalen voor onderzoek, bij voorkeur veel geld en persoonlijke beurzen. Dat betekent avonden en nachten lang ploeteren in de wetenschap dat statistisch gezien de kans op succes vaak minder dan 10% is. De medewerker moet publiceren, veel publiceren, graag als eerste of als laatste auteur want dat heeft meer status. Uiteraard moet het werk gepubliceerd worden in excellente tijdschriften en veelvuldig geciteerd worden. Vervolgens moet de medewerker ook nog voldoen aan een serie criteria op het gebied van valorisatie van onderzoek en outreach activiteiten (voorlichting) en moeten er een aantal organisatorische taken binnen de organisatie vervuld worden. Uiteraard moet de wetenschappelijk medewerker tevens excellent onderwijs ontwikkelen en verzorgen en een grote groep promovendi begeleiden. Bovenstaande betekent werkweken die de 40 uur ruimschoots overschrijden. En dat alles in een zeer competitieve omgeving.

Uit zeer recent onderzoek van de vakbond FNV blijkt dat 79% van het wetenschappelijk personeel een hoge tot zeer hoge werkdruk ervaart, met een sterke toename in de afgelopen drie jaar [42]. In zijn recent verschenen rapport 'Chinese Borden' [43] constateert het Rathenau Instituut dat de competitieve druk in financiering van onderzoek de afgelopen jaren sterk is toegenomen. Wetenschappers zijn veel tijd kwijt met het schrijven van onderzoeksvoorstellen, terwijl de kans op toekenning steeds kleiner wordt. Daarbij geldt bovendien dat de investeringen van de Nederlandse rijksoverheid in onderzoek achterblijven bij de groei van de economie. Nederland staat in Europa wat dat betreft in de middenmoot [44].

Een bij tijd en wijle zeer frustrerend gebeuren dat op sommige momenten medewerkers het plezier in onderwijs en onderzoek ontneemt. Niet omdat wij als academici niet hard willen werken, integendeel, we houden van ons vak, we werken met plezier avond aan avond aan een onderzoek dat ons boeit, of aan onderwijs voor een groep gemotiveerde studenten. Waar het mij om gaat is dat voor iedereen min of meer dezelfde meetlat wordt gebruikt. We moeten allemaal excellent zijn in een aantal zeer eenzijdig gedefinieerde prestatie-indicatoren. Een docent die fantastisch onderwijs geeft, maar geen onderzoeksfinanciering binnenhaalt en

niet publiceert, is daarmee dus niet excellent. We zijn zo nadrukkelijk bezig met elkaar te beoordelen en met ons eigen streven naar excellentie, dat we soms vergeten waar het eigenlijk om gaat.

De hierboven beschreven ontwikkelingen op het gebied van onderwijs en onderzoek leiden tot standaardisering van academici. Iedereen moet in hetzelfde keurslijf passen en aan dezelfde eisen voldoen. Wij leiden mensen op die geleerd hebben aan de door ons gedefinieerde, nauwe set van prestatie-indicatoren te voldoen. De ruimte voor creativiteit en diversiteit in mensen en hun talenten wordt systematisch ingeperkt. Op korte termijn lijkt dit misschien zeer efficiënt en effectief, op de langere termijn zullen de effecten juist zeer schadelijk zijn, voor de universiteiten en voor Nederland. Op het moment dat de wereld om ons heen verandert, zullen wij, juist door deze uniformiteit, niet meer in staat zijn ons aan die veranderingen aan te passen en zullen wij achteraan lopen in plaats van te floreren als kenniseconomie. Wij creëren uniforme onderzoekers en technologen, juist in een tijd dat diversiteit en creativiteit essentieel zijn.

Aan de vooravond van een enorme maatschappelijke en technologische transitie, betekent dit dat wij, de universiteiten, de politiek en de industrie, keuzes zullen moeten maken. Er zullen zonder enige twijfel meer financiële middelen moeten komen van overheid en bedrijfsleven, zodat de universiteiten voldoende goede academici en technologen kunnen opleiden. Daarnaast zullen de universiteiten weer ruimte moeten bieden aan diversiteit en creativiteit. Wij moeten af van het elkaar continu beoordelen op basis van een nauwe set eenzijdig gedefinieerde kwantitatieve parameters (aantal publicaties, aantal citaties, aantal studenten, aantal gehonoreerde onderzoeksvoorstellen). Aantallen doen niet ter zake in deze complexe transitie. Het gaat erom hoe we als universiteiten gezamenlijk een verschil gaan maken en een bijdrage gaan leveren aan de transitie naar een duurzame wereld. Uiteraard is kwaliteit belangrijk, dat lijdt geen twijfel. Maar de kwaliteit die nu nodig is, is niet te meten met een paar kwantitatieve parameters. Die is veel breder en meer divers, die gaat juist ook om niet meetbare zaken, zoals het inspireren en motiveren van mensen, het uitdagen van studenten en onderzoekers een stap verder te gaan dan zij denken te kunnen en het overbrengen van academische vaardigheden. Dat vereist naast een goede inhoudelijke opleiding, een universiteit met pluriformiteit in mensen en hun talenten, met ruimte voor diversiteit en creativiteit, kritische discussie en meningsvorming. Want juist die aspecten zijn essentieel voor verrassend onderzoek en uitdagend onderwijs.

Tot slot

Onze wereld zal de komende decennia ingrijpend veranderen van een lineaire economie in een duurzame circulaire economie (figuur 19). Dat is een gigantische transitie.

Figuur 19

De transitie van een op fossiele brandstoffen gebaseerde, lineaire economie naar een duurzame, circulaire economie. (Foto: Ben Goode)

Met in gedachte het feit dat wij op dit moment anderhalve aarde consumeren, is de urgentie duidelijk: wij kunnen het ons simpelweg niet permitteren om af te wachten en te zien waar het schip strandt. De aarde heeft geen geduld meer.

Na het lezen van deze rede zal het u duidelijk zijn dat ons vakgebied, de membraantechnologie, een essentiële bijdrage levert aan de circulaire economie. Zonder efficiënte, duurzame en effectieve scheidingstechnologie kan een circulaire economie niet bestaan. Op het grensvlak van chemie en technologie werken wij hier bij de leerstoel Membrane Materials and Processes aan de Technische Universiteit Eindhoven aan de membraantechnologie van de toekomst. We kunnen de chemie en de structuur van de membranen die wij ontwikkelen variëren en beïnvloeden. Daardoor kunnen we de eigenschappen en procestechnologische

prestaties van deze membranen sturen en deze membranen toepassen in duurzame industriële processen.

Daarbij richten wij ons op vier speerpunten:

1. Het scheiden, opwerken en afvangen van gassen en dampen.
2. Het concentreren, zuiveren en hergebruiken van water en waardevolle componenten uit verdunde processtromen.
3. De valorisatie van CO_2 door omzetting naar chemische bouwstenen en brandstoffen.
4. Het opwekken en opslaan van duurzame energie.

Universiteiten spelen een cruciale rol in de transitie naar een circulaire economie en hebben een grote verantwoordelijkheid wat betreft het opleiden van mensen en het doen van hoogwaardig, innovatief onderzoek. Diversiteit in mensen, talenten, creativiteit en kennis zijn daarbij heel hard nodig. Alleen dan zullen wij in staat zijn om de grenzen van wat mogelijk gedacht werd op te zoeken en deze te overschrijden.

Dankwoord

Als afsluiting wil ik een aantal mensen bedanken. Zij hebben allen op hun eigen manier een bijdrage geleverd aan het feit dat ik hier vandaag deze rede heb kunnen uitspreken.

In de eerste plaats zijn dat onze nieuwe collega's hier bij de Technische Universiteit Eindhoven, en in het bijzonder bij de faculteit Scheikundige Technologie. Grote dank allemaal voor het warme welkom. De vanzelfsprekendheid waarmee jullie Zandrie en mij helpen onze weg te vinden, de grote onderlinge collegialiteit en solidariteit en het prachtige wetenschappelijke onderwijs en onderzoek met vele mogelijkheden voor samenwerking zijn iets om trots op te zijn. Ik verheug mij op de toekomst.

Ik wil Jaap Schouten, Laurent Nelissen, René Janssen en het College van Bestuur van de Technische Universiteit Eindhoven expliciet bedanken voor de kans om de nieuwe leerstoel Membrane Materials and Processes te beginnen. Een droom die werkelijkheid geworden is.

Ook wil ik onze vroegere collega's van de Universiteit Twente heel hartelijk bedanken. Ik heb ruim 15 jaar met erg veel plezier bij de Universiteit Twente gewerkt. Mijn ervaringen in Twente hebben gemaakt dat ik deze stap naar de Technische Universiteit Eindhoven heb kunnen zetten. Bedankt voor de fijne jaren. In het bijzonder wil ik Matthias, mijn promotor, bedanken voor alles wat hij mij geleerd heeft in de bijna tien jaar dat we hebben samengewerkt. Grote dank daarvoor, Matthias. Het heeft een sterke basis gelegd voor mijn wetenschappelijke loopbaan.

Ik wil graag mijn dank uitspreken aan alle industriële partijen waar wij mee samenwerken. Dank voor het vertrouwen in ons onderzoek, de financiële steun en de vele inhoudelijke discussies. Jullie inbreng is van grote waarde en ik ben blij dat die samenwerking hier in Eindhoven voortgezet wordt.

Het onderzoeksinstituut Differ wil ik bedanken voor de nieuwe, inspirerende mogelijkheden voor samenwerking. Het recent gedefinieerde gezamenlijke onderzoeksprogramma naar de valorisatie van CO_2 zal die samenwerking alleen maar versterken.

In het bijzonder wil ik hier Wetsus noemen. Cees, Johannes, Bert en alle andere medewerkers van Wetsus: grote dank voor jullie vertrouwen en de collegiale, inspirerende samenwerking! De reis van Eindhoven naar Leeuwarden is lang, maar ik heb het er graag voor over.

Ook Tjeerd, Menno, Klaartje en alle andere medewerkers van ISPT wil ik heel hartelijk bedanken. Ik hoop van harte dat wij ook in de toekomst nauw zullen samenwerken.

I would like to sincerely thank my MM/P colleagues. It has been a very exciting year for all of us. A big thank you to all of you for your enthusiasm, for your help in arranging the labs, for building the group, for your scientific work and especially for making MM/P a wonderful place to be. I am looking forward to our future together. Thanks a lot!

Jan, Wil en Alexandra, bedankt voor jullie steun en vertrouwen. Hoewel het voor jullie misschien niet altijd duidelijk is waar ik mee bezig ben in Eindhoven, weet ik dat jullie er altijd voor mij zullen zijn.

Lieve Gerrit en Thea, Lonneke en Gino, Ben en Lasse: door jullie realiseer ik mij dat er veel meer is dan wetenschap alleen. Bedankt voor jullie geduld het afgelopen jaar, maar bovenal dank jullie wel voor jullie liefde.

Tenslotte zijn er drie mensen die een bijzonder woord van dank verdienen omdat ze voor mij persoonlijk erg belangrijk zijn.

Zandrie en Caroline: met zijn drieën begonnen wij een jaar geleden de leerstoel Membrane Materials and Processes. Ik denk dat we trots mogen zijn op het resultaat en met vertrouwen naar de toekomst kunnen kijken.

Caroline, vanaf het allereerste moment dat Zandrie en ik bij de Technische Universiteit Eindhoven begonnen, zijn we een team. Bedankt voor de vanzelfsprekendheid waarmee je ons helpt, je betrokkenheid bij ons werk, je flexibiliteit en je vrolijkheid! Ik vind het een groot plezier om met je te mogen samenwerken.

Zandrie, ik ben blij dat we hier vandaag samen op dit podium staan: het symboliseert onze samenwerking. Gezamenlijk hebben we hier bij de Technische Universiteit Eindhoven een prachtig onderzoeks- en onderwijsprogramma neergezet. Je brede membraantechnologische kennis, je creativiteit en oprechtheid zijn voor mij van onschatbare waarde. Bedankt voor de fijne samenwerking. Onze vriendschap is mij zeer dierbaar.

Lieve San, je creativiteit, je enthousiasme en je vooruitstrevende visie op duurzaamheid zijn voor mij een bron van inspiratie. Meer dan je zelf weet heb je een bijdrage geleverd aan de basis van mijn werk. Een groot dank je wel voor je onvoorwaardelijke steun en liefde!

Ik heb gezegd.

Referenties

1. A. Gore, An Inconvenient Truth: The Planetary Emergency of Global Warming and What We Can Do About, Rodale Inc., Emmaus, Verenigde Staten, 2006.
2. M. Lewis, A Skeptic's Guide to An Inconvenient Truth, Competitive Enterprise Institute, Washington, Verenigde Staten, 2006.
3. D. Kaiser, Lee Wasserman, The Rockefeller Family Fund vs. Exxon, The New York Review of Books, New York, Verenigde Staten, 2016.
4. M. Somers, Trump kan brug naar Poetin slaan met voordracht Tillerson, NRC.nl, https://www.nrc.nl/nieuws/2016/12/13/tillerson-moet-brug-slaan-naar-poetin-a1536426, 13 december 2016.
5. J. Bolle, Trump kiest baas Exxon Mobil als buitenlandminister, NRC.nl, https://www.nrc.nl/nieuws/2016/12/10/trump-kiest-baas-exxon-mobil-als-buitenlandminister-a1536069, 10 december 2016.
6. A. Sulzberger Jr., Donald Trump's New York Times interview: Full transcript, New York Times, https://www.nytimes.com/2016/11/23/us/politics/trump-new-york-times-interview-transcript.html, 23 november 2016.
7. M. Somers, Trump begint voortvarend aan sloop Obama's erfenis, NRC.nl, https://www.nrc.nl/nieuws/2017/01/23/trump-begint-voortvarend-aan-sloop-obamas-erfenis-6361212-a1542640, 23 januari 2017.
8. Nasa – Global climate change, Facts, http://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/, 27 januari 2017.
9. NOAA, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, Trends in atmospheric carbon dioxide, https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html, 21 februari 2017.
10. J.G.J. Olivier, G. Janssens-Maenhout, M. Muntean, J.A.H.W. Peters, Trends in global CO_2 emissions: 2016 Report, Publication number: 2315, PBL Netherlands Environmental Agency, Den Haag, Nederland, 2016.
11. Nasa – National Aeronautics and Space Administration, Goddard Institute for Space Studies, GISS surface temperature analysis (GISTEMP), https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/, 27 januari 2017; J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, K. Lo, Global surface temperature change, Rev. Geophys. 48, RG4004, 2010.
12. Framework convention on climate change, Adoption of the Paris agreement, United Nations, Parijs, Frankrijk, 2012.
13. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, Verenigde Staten, 2013.

14. A. Klein Tank, J. Beersma, J. Bessembinder, B. van den Hurk, G. Lenderink KNMI '14 - Klimaatscenario's voor Nederland, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, De Bilt, Nederland, 2015.
15. Wegen naar een klimaatbestendig Nederland, Planbureau voor de leefomgeving, Bilthoven, Nederland, 2009.
16. P. Luttikhuis, Als het zo acuut is, waarom doen we dan niks?, NRC Handelsblad, 24 februari 2017.
17. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report, European Environment Agency, Luxemburg, 2017.
18. F. Stevens, L. DiCaprio, Before the Flood, Documentaire, 2016.
19. K. Schoots, M. Hekkenberg, P. Hammingh, Nationale Energieverkenning 2016, Energieonderzoek Centrum Nederland, Amsterdam/Petten, Nederland, 2016.
20. Renewable energy in the EU, Share of renewables in energy consumption in the EU rose further to 16% in 2014, Eurostat News Release 30, 2016.
21. Ellen MacArthur Foundation, https://www.ellenmacarthurfoundation.org, 27 januari 2017.
22. EU Ad-hoc working group on defining raw materials, Report on critical raw materials for the EU, European Commission, 1819503, 2015.
23. J.-P. Malingreau, H. Eva, A. Maggio, NPK: Will there be enough plant nutrients to feed a world of 9 billion in 2050? JRC Science and Policy Reports, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Scientific Policy and Stakeholders relations, European Union, Luxemburg, 2012.
24. Meer agrarische producten de wereld over; stijging export naar ruim 82 miljard euro, Rijksoverheid, https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2016/01/15/meer-agrarische-producten-de-wereld-over-stijging-export-naar-ruim-82-miljard-euro, 15 januari 2017.
25. Global Footprint Network, http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/, 17 januari 2017.
26. M. Mulder, Basic principles of membrane technology, 2de editie, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nederland, 1996.
27. D.M. Koehnen, M.H.V. Mulder, C.A. Smolders, Phase separation phenomena during the formation of asymmetric membranes, Journal of Applied Polymer Science 21, 1977, 199-215.
28. L. Broens, F.W. Altena, C.A. Smolders, Asymmetric membrane structures as a result of phase separation phenomena, Desalination 32, 1980, 33-45.
29. J.G. Wijmans, J.P.B. Baaij, C.A. Smolders, The mechanism of formation of microporous or skinned membranes produces by immersion precipitation, Journal of Membrane Science 14, 1983, 263-274.
30. A.J. Reuvers, C.A. Smolders, Formation of membranes by means of immersion precipitation. Part II. The mechanism of formation of membranes prepared from the system cellulose acetate-acetone-water, Journal of Membrane Science 34, 1987, 67-86.
31. C.A. Smolders, A.J. Reuvers, R.M. Boom, I.M. Wienk, Microstructures in phase-inversion membranes. Part 1. Formation of macrovoids, Journal of Membrane Science 73, 1992, 259-275.

32. A. Petersson, A. Wellinger, Biogas upgrading technologies – Developments and innovations, IEA Bioenergy, 2009.
33. L. Daal, Capture of evaporated water with novel membranes – CapWa, Publishable summary, EU grant agreement number: 246074, KEMA Nederland BV, Arnhem, Nederland, 2013.
34. USGS Water Science School, https://water.usgs.gov/edu/gallery/global-water-volume.html, 27 januari 2017.
35. Ministeries van Infrastructuur en Milieu, Economische Zaken, Buitenlandse Zaken, Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, A circular economy in the Netherlands by 2050, Den Haag, Nederland, 2016.
36. De Ingenieur, Toename vacatures voor ingenieurs, https://www.deingenieur.nl/artikel/toename-vacatures-voor-ingenieurs, 18 juli 2016.
37. Technisch Weekblad, vraag naar ingenieurs neemt toe, https://www.technischweekblad.nl/nieuws/vraag-naar-ingenieurs-neemt-toe/item6827, 2 september 2013.
38. Nationaal Techniekpact 2020, Technische Universiteiten en FME: investeer in opleidingen en ondernemersklimaat, http://www.techniekpact.nl/—technische-universiteiten-en-fme-investeer-in-opleidingen-en-ondernemersklimaat, 6 februari 2017;
39. Infographic prijs per student, VSNU, Den Haag, Nederland, 2015.
40. Cijfers Faculteit Scheikundige Technologie, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland, 2017.
41. E. de Bruin, Wetenschap is verslingerd aan publicaties tellen, NRC Handelsblad, 11 februari 2017.
42. Rapport werkdruk in universiteiten, FNV, Utrecht, Nederland, 2017.
43. E. Koier, B. van der Meulen, E. Horlings, R. Belder, Chinese borden – Financiële stromen en prioriteringsbeleid in het Nederlandse universitaire onderzoek, Rathenau Instituut, Den Haag, Nederland, 2016.
44. A. Vennekens, J. van Steen, Overzicht totale investeringen in wetenschap en innovatie (TWIN) 2014-2020, Rathenau Instituut, Den Haag, 2016.

Curriculum vitae

Prof. dr. ir. Kitty Nijmeijer is op 1 februari 2016 benoemd tot hoogleraar Membrane Materials and Processes aan de faculteit Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).

Kitty Nijmeijer (1972) promoveerde in 2003 aan de Universiteit Twente op het gebied van de scheiding van etheen en ethaan met behulp van membranen. Na haar promotie werd zij verantwoordelijk voor het Europees Membraan Instituut Twente dat confidentieel, membraantechnologisch contractonderzoek doet in samenwerking met de industrie. In 2006 kreeg zij een aanstelling als universitair docent bij de Universiteit Twente. In 2011 werd zij bij dezelfde universiteit hoofd van de onderzoeksgroep Membrane Science and Technology. Ze was visiting scientist bij het Shell Research & Technology Center Amsterdam en de University of California, Berkeley (Verenigde Staten). Ze is lid van de Editorial Board van Journal of Membrane Science en de Board of Reviewing Editors van het wetenschappelijke tijdschrift Science. In 2011 was zij voorzitter van ICOM 2011, het grootste membraantechnologische congres ter wereld.

Sinds 1 februari 2016 is zij hoogleraar Membrane Materials and Processes aan de Technische Universiteit Eindhoven. Haar onderzoek richt zich op de ontwikkeling van polymeermembranen voor industriële toepassingen op het gebied van water en energie in een circulaire economie. Haar visie op het onderwijs en onderzoek van de leerstoel Membrane Materials and Processes staat beschreven in deze intreerede.

Naast haar wetenschappelijke werk hecht Kitty Nijmeijer veel waarde aan de valorisatie en popularisering van wetenschap. Ze is nauw betrokken bij de Blauwe Energie-installatie op de Afsluitdijk. Ze geeft regelmatig semi-wetenschappelijke lezingen om een breed publiek kennis te laten maken met wetenschap en technologie. Voor de Universiteit van Nederland heeft zij een serie van 5 korte lezingen over membraantechnologie gemaakt en ze was een aantal keren te gast bij het televisieprogramma ‘De Wereld Draait Door’.

Meer informatie:
Prof. dr. ir. D. C. (Kitty) Nijmeijer
Membrane Materials and Processes
Faculteit Scheikundige Technologie
Technische Universiteit Eindhoven (TU/e)
Postbus 513
5600 MB Eindhoven
d.c.nijmeijer@tue.nl
www.tue.nl/mmp

Colofon

Productie
Communicatie Expertise Centrum TU/e

Fotografie cover
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp
Grefo Prepress, Eindhoven

Druk
Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-4265-9
NUR 910

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Bezoekadres
Auditorium (gebouw 1)
Groene Loper, Eindhoven

Navigatieadres
De Zaale, Eindhoven

Postadres
Postbus 513
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11
www.tue.nl/plattegrond

Technische Universiteit
Eindhoven
University of Technology